



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY**
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**TESTOVÁNÍ TĚSNOSTI PNEUMATICKÝCH
KOMPONENT**

LEAK TESTING OF PNEUMATIC COMPONENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Martin Staňo

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Pavel Houška Ph.D.

BRNO 2019



Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Ing. Martin Staňo**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Houška, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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 diplomové práce:

Testování těsnosti pneumatických komponent

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při výrobě pneumatických komponent se pro zajištění vysoké kvality musí testovat jejich těsnost a průtok dle funkčního stavu. Toto testování má v mnoha případech dominantní vliv na výrobní čas komponent. Proto je nutné se zabývat způsobem testování a vlivem doby testování na přesnost metody. Cílem této práce je tuto problematiku analyzovat.

Cíle diplomové práce:

Současný stav řešené problematiky měření úniků a testování těsnosti pneumatických komponent.
Systémový rozbor a analýza známých metod měření úniku podle legislativy.
Návrh nového postupu pro testování poskytnutých pneumatických komponent.
Testování pneumatických komponent dle poskytnuté specifikace.
Zpracování a vyhodnocení výsledků, analýza vlivu doby měření na přesnost a opakovatelnost měření.
Vlastní závěry a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications 5th ed. 2016 Edition, Springer International Publishing, Switzerland 2016.

KVASNICA, Jozef. Mechanika. Vyd. 2. Praha: Academia, 2004, 476 s. ISBN 80-200-1268-0.

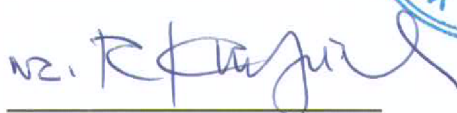
ČSN EN 1779. Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení těsnosti: Kritéria pro volbu metod a postupů. Praha: ČNI, 1999.

ČSN EN 13184. Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení těsnosti: Metoda změny tlaku. Praha: ČNI, 2002.

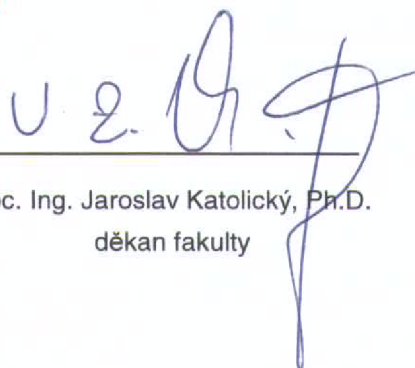
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 8. 4. 2019





doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Táto diplomová práca je zameraná na problematiku testovania pneumatických komponentov a merania úniku vzduchu. Na základe analýzy metód testovania tesnosti podľa platnej legislatívy je zhrnutý súčasný stav danej problematiky. Cieľom práce je návrh postupov na testovanie pneumatických komponentov podľa špecifikácie. V rámci overenia postupu je zostavený pneumatický obvod s regulačným systémom tlaku, na ktorom sú realizované testy funkčnosti poskytnutých komponentov a overenie ich tesnosti metódou poklesu tlaku. Výsledky testov sú následne vyhodnotené v súlade so špecifikáciou.

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on the issue of pneumatic components testing and air leakage measurement. The current state of the given issue is summarized based on the analysis of leak testing methods in accordance with valid legislation. The aim of this thesis is to design methods for pneumatic components testing according to specification. As part of method verification, a pneumatic circuit with a pressure control system has been assembled, on which functionality tests of provided components and leak tests by the pressure-drop method have been performed. The results of these tests have been subsequently evaluated as consistent with the specification.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Testovanie tesnosti, pneumatické komponenty, pneumatický obvod, regulácia tlaku

KEYWORDS

Leak testing, pneumatic components, pneumatic circuit, pressure control

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

STAŇO, Martin. *Testování těsnosti pneumatických komponent*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/120257>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Pavel Houška.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom. Spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Pavla Houšku Ph.D a s použitím literatúry uvedenej v zozname literatúry.

V Brne dňa 23.5.2019

.....

Ing. Martin Staňo

POĎAKOVANIE

Ďakujem môjmu vedúcemu Ing. Pavlovi Houškovi Ph.D. za odborné vedenie, cenné rady a pomoc pri tvorbe tejto diplomovej práce.

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	MECHANIKA TEKUTÍN	5
2.1	Základné veličiny plynu	5
2.2	Statika plynov	5
2.3	Kinematika a dynamika plynov	6
3	MERANIE ÚNIKU A TESTOVANIE TESNOSTI	9
3.1	Vplyvy veličín na testovanie tesnosti	10
3.2	Metódy testovania tesnosti	11
3.2.1	Lokalizácia úniku	12
3.2.2	Kvantitatívne meranie úniku	13
3.3	Halogénová a héliová metóda	14
3.4	Metóda zmeny tlaku	14
3.4.1	Pokles tlaku	16
3.4.2	Zvýšenie tlaku	17
3.4.3	Zmena tlaku v komore	18
3.4.4	Meranie prietoku	19
3.5	Súčasná riešenia testovania tesnosti	20
4	NÁVRH POSTUPU TESTOVANIA KOMPONENTOV	23
4.1	Návrh testovacieho pneumatického obvodu	23
4.2	Regulačná časť pneumatického obvodu	24
4.2.1	Návrh regulačného systému tlaku	25
4.2.2	Kompaktné regulátory tlaku	27
4.3	Testovacia časť pneumatického obvodu	28
4.3.1	Postup testu pneumatického filtra	29
4.3.2	Postup testu pneumatického ventilu	30
5	REALIZÁCIA TESTOV	31
5.1	Linearizácia prvkov pneumatického obvodu	32
5.2	Testovanie regulačnej časti	33
5.2.1	Regulátor SMC ITV 1050	33
5.2.2	Regulátor Stasto RE16	36
5.2.3	Navrhnutý regulačný systém tlaku	38
5.3	Testovanie pneumatických komponentov	40
5.3.1	Test tesnosti testovacej časti obvodu	41
5.3.2	Test filtra s automatickým odtokom	42
5.3.3	Test pneumatického ventilu	45
5.4	Zhodnotenie a možnosti rozšírenia	49
6	ZÁVER	51
7	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	53
8	ZOZNAM PRÍLOH	55



1 ÚVOD

Pneumatické systémy sú v dnešnej dobe početne zastúpené v rámci priemyselnej automatizácie, mechanizácie a robotizácie. Tieto systémy premieňajú nakumulovanú energiu v stlačenej vzduchu na mechanickú prácu. Medzi ich hlavné výhody patrí dostupnosť pracovného média – vzduchu. Vzduch sa vyznačuje tým, že nie je nebezpečný, výbušný a je čistý. Komplikáciou vzduchu je jeho udržanie, pretože v netesných podmienkach rýchlo uniká. Z toho dôvodu sa vo veľkých množstvách vyrábajú rôzne pneumatické komponenty, od jednoduchých hadičiek a spojok, po komplikované viacstavové ventily, pohony a robotické chápadlá, ktoré musia spĺňať určité parametre tesnosti.

Výrobcovia pneumatických komponentov, ktorí zaručujú u svojich komplexných produktoch určitú kvalitu, ich pred uvedením na trh testujú. Podľa špecifikácie overujú parametre daného komponentu, kontrolujú jeho funkčnosť a zisťujú jeho tesnosť. Na toto testovanie potrebujú v rámci výroby produktu vytvoriť príslušné pracovisko. V niektorých prípadoch môžu náklady na test produktu presahovať výrobné náklady. Často sú dôvodmi použitie nevhodnej metódy testovania výrobku, alebo využívanie predražených systémov, ktoré nezaručujú dostatočnú kvalitu a nie je ich možné nakonfigurovať presne podľa požiadaviek.

Cieľom tejto práce je oboznámiť sa s metodikou merania úniku a testovania tesnosti pneumatických komponentov a na základe analýzy súčasného stavu riešení a platnej legislatívy, navrhnúť testovacie postupy pre testovanie poskytnutých komponentov. Navrhnutý postup je nutné následne overiť, preto je potrebné realizovať experimentálny test na navrhnutom pneumatickom obvode, ktorý sa zostaví na základe špecifikácie testu. V rámci testovania je dôležité overiť funkčnosť poskytnutých komponentov a zistiť kvantitatívny únik netesnosťami. Výsledky testov je potom potrebné spracovať a vyhodnotiť.

Na základe týchto poznatkov je ďalej možné analyzovať problematiku testovania pneumatických komponentov, ktorá zvýši efektívnosť kontroly produktov. Parametre výrobného procesu, ktoré môžu byť zlepšené, sú minimalizácia doby merania, zvýšenie presnosti a opakovateľnosti merania a kompenzácia negatívnych vplyvov. Dôležitá je taktiež cena pracoviska, ktoré je nevyhnutné v rámci podniku zriadiť na testovanie produktov, aby sa obmedzilo výskytu chybných kusov na trhu pre zákazníkov.



2 MECHANIKA TEKUTÍN

Táto práca je zameraná na testovanie pneumatických komponentov, ktoré využívajú pre svoju funkčnosť ako základné testovacie médium vzduch. Testovanie pneumatických komponentov vyžaduje znalosť fyzikálnych zákonov plynov, na ktorých sú postavené základy návrhu pneumatických systémov a postupov na testovanie pneumatických komponentov.

Tekutina je spoločné označenie pre kvapalinu a plyn. Pod mechaniku tekutín spadá mechanika kvapalín (hydromechanika) a mechanika plynov (aeromechanika). Ideálnu tekutinu je možné považovať za dokonale spojitú rozprestretú látku – kontinuum. [1]

2.1 Základné veličiny plynu

Medzi základné stavové veličiny plynu, patrí tlak p , ktorý vyjadruje silové účinky častíc na plochu, ktoré sa prejavujú ako tlaková sila. Jednotkou tlaku je Pascal [Pa], čo odpovedá $[N/m^2]$, prípadne sa používajú jednotky torr ($1 \text{ torr} = 133,322 \text{ Pa}$), atmosféra ($1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$) alebo bar ($1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa} \approx 1 \text{ atm}$). Ďalšou veličinou plynu je teplota T , ktorá charakterizuje jeho termodynamický stav. Ku každému rovnovážnemu stavu plynu (nemení sa jeho okolie), je možné priradiť teplotu, v jednotkách typicky $[^{\circ}C]$ alebo $[K]$. Z dôsledku rozpínavosti voľného plynu nie je možné určiť jeho objem. V prípade že je plyn uzatvorený v nádobe, vyplní celý priestor a je rovný objemu nádoby V . V danom objeme sa nachádza množstvo plynu m , ktorý má určitú hustotu ρ v danom mieste. Hustota plynu je silne závislá na ostatných stavových veličinách.

Plyn je vyjadrený ako sústava častíc (atómov), ktorých charakteristiky sú vyjadrené pomocou látkového množstva n . Látkové množstvo je vyjadrené ako podiel počtu častíc a Avogadrovej konštanty. Ďalšou charakteristikou je molová hmotnosť M_m , ktorá vyjadruje podiel hmotnosti plynu m a látkového množstva n . Plyny z chemicky rovnorodej látky za normálnych fyzikálnych podmienok (teplota $0^{\circ}C$, tlak 101 kPa) zachovávajú rovnaký objem V_m , ktorý odpovedá hodnote $22,414 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ a nazýva sa molový objem. [2]

2.2 Statika plynov

Šmykové napätie v bode je vyjadrené tlakom rovnakej veľkosti na všetkých rovinách preložených daným bodom. Zložky šmykového napätia ideálnej tekutiny sú nulové a jej hustota je v každom bode konštantná. Na rozdiel od ideálnej kvapaliny je možné považovať ideálny plyn za stlačiteľný. Na základe stavovej rovnice plynu, je možné po vyjadrení podmienok prebiehajúceho deja (izotermický, adiabatický,...) určiť hustotu plynu ako funkciu tlaku v danom mieste. Takýto plyn sa nazýva barotropný. Objem plynu je na základe jeho rozpínavosti daný objemom nádoby, v ktorej sa nachádza.

Po dosadení vzťahu šmykového napätia v bode tekutiny do rovnice rovnováhy kontinua je možné vyjadriť vektor objemovej sily \mathbf{G} rovnicou (1). Tento vzťah vyjadruje silu, ktorá pôsobí na jednotkový objem. [1]

$$\mathbf{G} = \text{grad } p = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{V} \quad (1)$$

Objemové sily sú v tekutine úmerné hustote, ktorá je závislá na tlaku tekutiny, pričom v kvapaline je hustota konštantná. Pre plyny je hustota silne závislá na tlaku, a preto je namiesto objemovej sily použitá veličina intenzity silového poľa \mathbf{I} , ktorá je vyjadrená pôsobiacou objemovou silou na jednotku hmotnosti tekutiny (2). Úpravou vzťahu (2) je možné určiť zložku intenzity silového poľa ako funkciu tlaku p v danom mieste y_i . Táto rovnica (3) sa nazýva rovnica hydrostatickej rovnováhy, ktorej riešenie udáva rozloženie tlaku v tekutine a charakterizuje tak rovnovážny stav kvapaliny. [1]

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{G}}{\rho} \quad (2)$$

$$I_i = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y_i} \quad (3)$$

U barotropného plynu je potrebné okrem tlakového rozloženia určiť rozloženie hustoty. Na základe závislosti hustoty plynu na tlaku je možné určiť závislosť tlaku plynu na výške h v tiažovom poli a predpokladať správanie plynu podľa izotermického deja ideálneho plynu ($T = \text{konšt}$) Boyle-Mariottovho zákona, ktorý je vyjadrený stavovou rovnicou (4). Plynová konštanta R má pre všetky plyny rovnakú hodnotu $8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. [1] [2]

$$p \cdot \frac{m}{\rho} = p \cdot V = n \cdot R \cdot T = \text{konšt.} \quad (4)$$

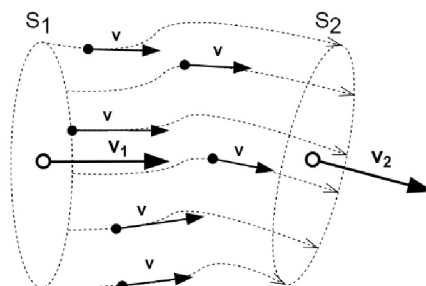
Z objemu plynu V je možné určiť merný objem plynu v , ktorý zaujme vždy určitý počet molekúl a je vyjadrený ako podiel objemu plynu jeho hmotnosťou m . S jeho využitím v úpravách rovníc (2 až 4) je vyjadrená lineárna diferenciálna rovnica, ktorej riešenie je výsledná barometrická rovnica (5). Konštanta p_0 predstavuje atmosférický tlak cca 101 kPa a ρ_0 odpovedá hustote vzduchu v normálnych podmienkach cca $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Zem resp. hladina mora je zvolená ako počiatok súradnicovej sústavy, čo odpovedá $y_1 = 0 \text{ m}$ a g predstavuje gravitačné zrýchlenie. Keďže pre izotermický dej je teplota plynu konštantná a zároveň teplota T s rastúcou výškou h klesá, tak je Boyle-Mariottov zákon splnený len približne. [1] [2]

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot y_1} = p_0 \cdot e^{-\frac{M_m}{R \cdot T} \cdot g \cdot h} \quad (5)$$

2.3 Kinematika a dynamika plynov

Prúdenie tekutín sa typicky znázorňuje prúdnicami (Obr. 1), čo sú krivky, ktorých dotyčnice v každom bode majú smer vektoru rýchlosti \mathbf{v} . Prúdnice vytvárajú celok, ktorý sa nazýva prúdová trubica (Obr. 1). Prúdová trubica je definovaná prierezom S a vektorom rýchlosti \mathbf{v} , ktorý udáva smer a veľkosť rýchlosti celkového prúdenia. [1]

Všeobecný pohyb tekutiny sa skladá s translačného, deformačného a rotačného pohybu. Rýchlosť objemového elementu plynu je všeobecnou funkciou polohy v priestore a čase. Prúdenie môže byť ustálené (stacionárne, laminárne), kde je tvar prúdnic konštantný, alebo je neustálené (vírivé, turbulentné). Prúdenie je definované Reynoldsovým číslom Re , ktorého kritická hodnota predstavuje prechod medzi laminárnou a turbulentnou medznou vrstvou. [2]



Obr. 1) Prúdová trubica a prúdnice [1]

Prúdenie tekutín je charakterizované okrem rýchlosti taktiež objemovým tokom Q_v , ktorý vyjadruje pretečený objem plynu určitou plochou s prierezom S za jednotku času (6). Táto rovnica platí len pre nestlačiteľné prúdenie. V prípade stlačiteľných tekutín je plyn okrem objemového toku vyjadrený hmotnostným tokom, ktorý vyjadruje hmotnosť plynu pretečenú určitým prierezom za jednotku času (7). [2]

$$Q_v = \frac{dV}{dt} = S \cdot v \quad (6)$$

$$Q_m = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot S \cdot v \quad (7)$$

Z predpokladu, že pri prúdení tekutiny je zachovaná jej hmotnosť m , vychádza rovnica kontinuity prúdenia. Pri stacionárnom prúdení tekutiny trubicou s prierezom S_1 kolmým k vektoru rýchlosti v_1 vtečie za časový interval Δt množstvo tekutiny m s hustotou ρ_1 . Za rovnaký časový interval Δt vytečie rýchlosťou v_2 prierezom S_2 z trubice rovnaké množstvo tekutiny m s hustotou ρ_2 . V prípade, že je hustota tekutiny konštantná ($\rho_1 = \rho_2$), tak je možné vyjadriť rovnicu kontinuity (8). Rovnica kontinuity platí aj pre nestacionárne prúdenie. Všeobecný tvar rovnice kontinuity je vyjadrený vzťahom (9). [2]

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (8)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot \frac{\partial v_i}{\partial y_i} = 0 \quad (9)$$

Tlak plynu je pri prúdení plynu závislý na rýchlosti prúdenia a polohe. Všeobecný tvar rovnice pre plyn, ktorého hustota ρ nie je konštantná, je odvodený vzťah (10), Význam rovnice je taký, že v miestach, kde rastie rýchlosť toku plynu v , klesá tlak p . Ak sa jedná o prúdenie vzduchu s tlakom atmosférickým, v danom mieste vzniká podtlak. So zmenou tlaku sa mení aj hustota plynu, čo je vyjadrené funkciou závislosti $\rho = \rho(p)$. V prípade izotermického prúdenia ideálneho plynu je možné považovať funkčnú závislosť hustoty na tlaku podľa lineárneho

vztahu $\rho = K \cdot p$. Bernoulliho rovnica má po vyjadrení tvar (10), kde K je konštanta, ktorá platí pre všetky body prúdu tekutiny. [1] [2]

$$\frac{1}{2} \cdot v^2 + V + \int \frac{dp}{\rho} = \text{konšt.} \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} \cdot v^2 + V + \frac{1}{K} \cdot \ln p = \text{konšt.} \quad \text{pre } \rho = K \cdot p \quad (11)$$

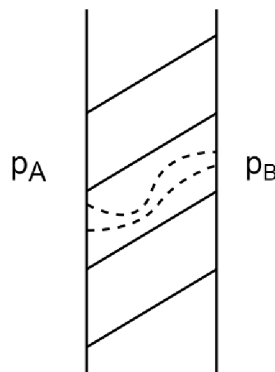
V reálnych tekutinách vzniká na styku dvoch rôznych vrstiev šmykové napätie (trenie), ktoré je úmerné rozdielu rýchlostí medzi týmito vrstvami. Vnútorne trenie tekutín je vyjadrené viskozitou (väzkosťou), ktoré vychádza z Newtonovho viskózneho zákona. [1]

3 MERANIE ÚNIKU A TESTOVANIE TESNOSTI

Tesnosť objektu je vyjadrená neprítomnosťou netesností podľa špecifikácie a je popísaná veľkosťou úniku prúdu tekutiny smerom „do“ alebo „z“ testovaného objektu. V prípade, že je testovacou tekutinou plyn, môže byť tesnosť za určitých podmienok vyjadrená zmenou tlaku. Veľkosť úniku netesnosťami q (značená aj q_L z angl. „leakage“) je definovaná podľa vzťahu (12) ako pV-prúdenie špecifickej tekutiny, ktorá prejde netesnosťou za špecifických podmienok za určitý čas. Najčastejšie je veľkosť úniku vyjadrená v Pa.m³/s alebo mbar.l/s, [3]

$$q_L = \frac{\Delta p}{\Delta t} \cdot V = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \frac{R \cdot T}{M} \quad (12)$$

Netesnosti objektu sa vyskytujú v otvoroch, póroch alebo v iných štruktúrach steny objektu. Pôsobením účinkov tlaku alebo rozdielov koncentrácie prepúšťajú tekutinu z jednej strany rozhrania na druhú (Obr. 2). Smer prúdenia netesnosťami prebieha z rozhrania s vyšším tlakom (koncentráciou) k rozhraniu s nižším tlakom (koncentráciou). [3]



Obr. 2) Netesnosť medzi rozhraním A – B [4]

Veľkosť prúdenia netesnosťami závisí na veľkosti prierezu. Netesnosti je možné rozdeliť podľa tvaru otvoru na nasledujúce typy:

- Otvorová – priemer je mnohonásobne väčší ako dĺžka netesnosti
- Kapilárna – priemer je menší ako dĺžka netesnosti
- Vodivostná – obsahuje jeden alebo viaceré oddelené kanáliky, vrátane poréznych oblastí
- Permeačná – prepúšťa plyn neporéznu stenou

Na základe legislatívnych požiadaviek, musia súčasti spĺňať tesnostné limity a z toho dôvodu prebiehajú pred uvedením súčasti na trh nedeštruktívne testovacie skúšky tesnosti. Typický priebeh testovacieho cyklu tesnosti pozostáva z minimálne štyroch fáz. Prvou fázou je natlakovanie testovaného objektu, prípadne testovacej komory. Potom nasleduje stabilizačná fáza, kde prebieha ustálenie tlaku a teploty. Táto fáza je v rámci cyklu najdlhšia, a preto doba stabilizácie má veľký vplyv na celkovú dĺžku testu. Po stabilizácii prebieha samotné meranie požadovaných veličín v určitom intervale. Testovací cyklus končí odvdzdušením skúšobného plynu z obvodu. [3] [5]

Pre výpočet zmien veľkosti úniku v závislosti na tlaku, teplote a druhu plynu sa uplatňujú bežné zákony pre prúdenie plynu. U kvantitatívneho určenia veľkosti úniku zapríčiňuje geometria netesnosti to, že prechádzajúci plyn má viskóznny alebo molekulárny charakter. Všeobecne platí, že pre určenie veľkosti úniku hélia menšej alebo rovnej 10^{-7} Pa.m³/s odpovedajú podmienky molekulárneho prúdenia a pre úniky hélia väčšie ako 10^{-5} Pa.m³/s platia v prípade kapilárneho úniku podmienky laminárneho prúdenia. [3] [5]

Nulová veľkosť úniku, ktorá by odpovedala absolútnej tesnosti, nie je špecifikovaná, no za technickú tesnosť je považovaná hodnota úniku menšia ako 10^{-10} mbar.l/s. Veľkosť úniku v závislosti na tesnosti a veľkosti otvoru pri atmosférickom tlaku je zobrazená v Tab. 1. Požadovaná tesnosť je vždy v určitom vzťahu s ohľadom na funkciu skúšaného objektu. Napríklad veľkosť úniku 0,0005 Pa.m³/s môže byť prijateľná pre tlakové nádoby so stlačeným vzduchom, čo odpovedá kolísaniu tlaku 5 kPa v objeme 10 l za 24 hodín alebo úbytku 0,5 l vzduchu nameraného pri atmosférickom tlaku. Veľkosť úniku 10^{-10} Pa.m³/s, ktorá je typická pre kardiostimulátory, odpovedá približne úniku 1 cm³ za 30 rokov. Meranie tesnosti závisí na veľkosti atómu média, ktoré uniká z testovaného objektu. [3] [5]

Tab. 1: Závislosť kritéria tesnosti a veľkosti úniku [3]

Látka / kritérium tesnosti	Veľkosť úniku q_L [mbar.l/s]	Veľkosť otvoru $\varnothing d$ [μ m]	Doba úniku častic s $V = 1 \text{ cm}^3$
Voda (vodotesnosť)	10^{-2}	≈ 10	100 s
Para (parotesnosť)	10^{-3}	≈ 3	15 min
Baktérie	10^{-4}	≈ 1	3 h
Ropné a olejové látky	10^{-5}	$\approx 0,3$	1 d
Vírusy	$10^{-6} - 10^{-8}$	$\approx 0,1 - 0,01$	10 d – 3 r
Plyn (plynotesnosť)	$10^{-7} - 10^{-9}$	$\approx 0,03 - 0,003$	100 d – 30 r
Technická („absolútna“) tesnosť	10^{-10}	$\approx 0,001$	300 r

Celková tesnosť systému sa posudzuje podľa tesností jednotlivých súčastí testovaného systému. Pre splnenie požiadaviek tesnosti systému musí byť súčet veľkostí úniku z každej súčasti a zároveň súčet veľkostí úniku v každom mieste spoja menší ako celková prípustná veľkosť úniku zo systému. Tesnosť súčastí alebo systému musí byť špecifikovaná za normálnych pracovných podmienok. V prípade odlišných podmienok sa musí uvažovať v zvolených medziach podľa špecifikácie. Najvýznamnejší vplyv na tesnosť má pracovná teplota, tlak a charakter plynu. [3] [5]

3.1 Vplyvy veličín na testovanie tesnosti

Testovanie tesnosti závisí na viacerých pracovných podmienkach. Počas merania je podstatná čistota testovaného objektu a plynu. Ďalšou požiadavkou sú stabilizované podmienky. Presnosť merania závisí na použitých technických meracích prístrojoch a taktiež na veličinách pôsobiaceho okolia.

Jednou z najvplyvnejších veličín je teplota. Pre nameranú veľkosť úniku za konštantného objemu sa rozlišujú vplyvy teploty pre molekulárne a laminárne prúdenie. Pre molekulárne prúdenie platí vzťah (13) a pre laminárne, na ktorý má vplyv dynamická viskozita, platí vzťah (14). T_1 a T_2 sú rôzne teploty v kelvinoch namerané v časoch t_1 a t_2 . Veličiny q_{T_2} a q_{T_1} vyjadrujú nameraný únik pri odpovedajúcom indexe teploty v danom čase. [3] [5]

$$q_{T_2} \cdot \sqrt{T_1} = q_{T_1} \cdot \sqrt{T_2} \quad (13)$$

$$q_{T_2} \cdot \sqrt{T_2} = q_{T_1} \cdot \sqrt{T_1} \quad (14)$$

Ďalšou vplyvnou veličinou pri meraní tesnosti je tlak. Vnútorňý objem objektu pri pôsobení tlaku počas testovania musí ostať konštantný. Pre molekulárne prúdenie platí rovnica (15) a pre laminárne prúdenie platí vzťah (16). Číselné indexy veličín znamenajú príslušnosť k danému časovému intervalu t_1 alebo t_2 . Veličina p_B odpovedá tlaku mimo testovaný objekt a p_A tlaku vo vnútri testovaného telesa. [5]

$$q_2 = q_1 \cdot \frac{(p_{B_2} - p_{A_2})}{(p_{B_1} - p_{A_1})} = q_1 \cdot \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} \quad (15)$$

$$q_2 = q_1 \cdot \frac{(p_{B_2}^2 - p_{A_2}^2)}{(p_{B_1}^2 - p_{A_1}^2)} = q_1 \cdot \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} \cdot \frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1} \quad (16)$$

Charakter použitého plynu ovplyvňuje tesnosť taktiež podľa toho, či sa jedná o molekulárne, alebo laminárne prúdenie. Pri porovnávaní použitia plynu A a plynu B u molekulárneho prúdenia (17) je únik ovplyvnený molekulovými hmotnosťami M daného plynu. U laminárneho prúdenia (18) sa mení dynamická viskozita η rozličných plynov. [5]

$$q_A \cdot \sqrt{M_A} = q_B \cdot \sqrt{M_B} \quad (17)$$

$$q_A \cdot \eta_A = q_B \cdot \eta_B \quad (18)$$

3.2 Metódy testovania tesnosti

Testovanie tesnosti objektu je možné realizovať viacerými spôsobmi. Voľba metódy postupu merania závisí na viacerých faktoroch. Prvým je stanovenie smeru prúdenia plynu, ktorým je smer „do“ alebo „z“ testovaného objektu. Na základe toho sa skúšky delia na testovaciu skúšku podtlakom (vákuová skúška) alebo pretlakom. Podstatným parametrom skúšky tesnosti je doba merania (časový interval), ktorá závisí na stabilizácii podmienok merania. Ďalej sa definuje rozsah skúšky, či sa sleduje miestna plocha objektu (lokálna skúška) alebo test zahŕňať celý objekt (integrálna skúška). Výber metódy závisí taktiež na celi skúšky, a to buď na lokalizovanie netesností alebo na meranie veľkostí úniku plynu. Ďalšími faktormi pre voľbu metódy testovania tesnosti je voľba testovacieho média (plynu) a finančná náročnosť danej metódy. [3]

Na základe týchto faktorov sa zvolí vhodná metóda postupu skúšky, ktorá vychádza z normy EN 1779. Táto norma sa zaoberá kritériami pre voľbu metód a postupov pri nedeštruktívnom skúšaní tesnosti. Spravidla nie je možné určiť celkový únik z objektu, respektíve systému, a zároveň súčasne lokalizovať miesto úniku, preto je nutné použiť viacero postupov na odstránenie netesností. Štandardizovaná miera netesnosti (úniku) je ekvivalentné množstvo vzduchu, ktoré by prúdilo meraným kanálom za jednotku času:

- Pri vstupnom tlaku 1013 Pa (atm. tlak)
- Pri výstupnom tlaku 0 Pa (vákuum)
- Pri izbovej teplote

Všetky meracie prístroje, ktoré sú použité pri zisťovaní tesnosti objektu musia byť kalibrované vzhľadom na národné normy. Norma EN 1779 rozdeľuje testovacie metódy podľa viacerých kritérií, podľa voľby skúšobného plynu, tlaku v testovanom objekte, minimálneho detekovateľného úniku alebo použiteľnosti (meranie alebo lokalizácia). Prehľad najpoužívanejších metód je zobrazený v Tab. 2. Presnosti jednotlivých metód, prípadne testovacie postupy sú popísané v európskej norme EN 13185, ktorá pojednáva o skúšaní tesnosti nedeštruktívnou metódou skúšobného plynu. [5] [6] [7]

Tab. 2: Metódy testovania tesnosti [3] [5]

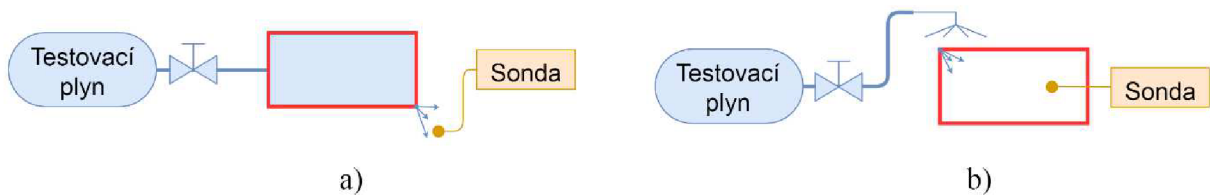
Názov metódy	Testovacie médium	Min. detekovateľný únik [mbar.l/s]	Lokalizácia	Kvantitatívne meranie	Tlakový test	Vákuový test
Bublínový test - ponorenie	vzduch / iný plyn	10^{-3}	áno	nie	áno	nie
Penotvorný test	vzduch / iný plyn	10^{-4}	áno	nie	áno	nie
Čuchový test (chemický)	NH ₃ / H / He / iný plyn	10^{-6}	áno	nie	áno	nie
Ultrazvukový test	vzduch / iný plyn	10^{-2}	áno	nie	áno	áno
TCLD (tepelná vodivosť)	iný plyn ako vzduch	10^{-5}	áno	nie	áno	áno
Vodný tlakový test	voda	10^{-2}	áno	nie	áno	nie
Halogénový test	halogén	10^{-6}	áno	áno	áno	áno
Héliový test (MSLD)	He	10^{-12}	áno	áno	áno	áno
Metóda poklesu tlaku	vzduch / iný plyn	10^{-4}	nie	áno	nie	áno
Metóda zvýšenia tlaku	vzduch / iný plyn	10^{-4}	nie	áno	áno	nie
Zmena tlaku v komore	vzduch / iný plyn	10^{-5}	nie	áno	áno	áno
Meranie prietoku	vzduch	10^{-3}	nie	áno	áno	áno

3.2.1 Lokalizácia úniku

Jedným zo spôsobom testu tesnosti objektu je lokalizácia netesností. Lokalizácia netesností sa realizuje čuchovým alebo postrekovacím testom (Obr. 3). Čuchový test (Obr. 3a) spočíva v tom, že testovaný produkt je naplnený značkovacím plynom (amoniak, hélium) a následne sa deteguje únik značkovacieho plynu sondou v okolí testovaného produktu. Postrekovací test (Obr. 3b) spočíva v odčerpaní vzduchu z testovaného produktu, ktorý je pripojený k detektoru

plynu. Produkt je postrekovaný značkovacím plynom, na ktorý je detektor citlivý. Na základe detekcie plynu v objekte sondou je lokalizovaná netesnosť. [5]

Najtypickejšia metóda lokalizácie je bublinkový test, ktorý prebieha ponorením natlakovaného testovaného objektu do detekčnej kvapaliny s nižším tlakom a následným porovnávaním množstva uniknutých bublín. Druhým spôsobom je nanosením penotvornej kvapaliny na testovaný povrch, kde sa vytvoria bubliny. Test prebieha vizuálnou prehliadkou priamo alebo nepriamo prostredníctvom zariadení ako sú zrkadlá, lupy, teleskopy alebo endoskopy. [8]



Obr. 3) Schémy lokalizačných metód merania úniku: a) čuchový test, b) postrekovací test [3]

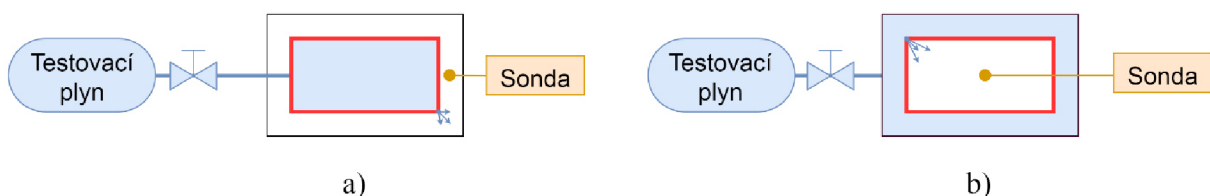
3.2.2 Kvantitatívne meranie úniku

Okrem lokalizačných metód sa využívajú kvantitatívne metódy testovania tesnosti objektu, ktorých výsledkom je zistenie množstva úniku (prúdu) netesnosťami objektu. Typicky sa zisťuje únik celkového systému alebo jeho určitých častí. Metódy merania celkového alebo čiastočného úniku je možné rozdeliť nasledujúcimi základnými spôsobmi (Obr. 4). [5]

Prvý spôsob je detekcia plynu z vnútra – von (Obr. 4a), kde testovaný produkt je naplnený značkovacím plynom a upevnený do testovacej komory, ktorá je vyčerpaná. Únik je zachytený vo vnútri testovacej komory. Táto metóda sa nazýva aj ako pretlakový test, pretože objekt je vystavený vyššiemu tlaku ako je tlak jeho okolia.

Druhý spôsob je detekcia plynu z vonku – dnu (Obr. 4b), kde testovaný produkt je vyčerpaný a potom umiestnený do testovacej komory naplnenej značkovacím plynom, ktorý natečie netesnosťami do testovaného produktu. Tento test sa nazýva taktiež vákuový alebo podtlakový, pretože objekt je vystavený podtlaku. [5]

Medzi najpoužívanejšie metódy kvantitatívneho merania netesností patrí halogénový test, héliový test a metóda zmeny tlaku. Halogénový a héliový test vyžaduje prítomnosť špecifického plynu. Metóda zmeny tlaku sa bežne realizuje so vzduchom ako testovacím médiom. [3]



Obr. 4) Schémy kvantitatívnych metód merania úniku: a) pretlakový test, b) vákuový test [3]

3.3 Halogénová a héliová metóda

Halogénový test tesnosti spočíva v detekcii plynom, ktorý obsahuje halogény (chlór, fluór). Najčastejšie sa používajú chladivá R12, R22 a R134a. Tento test využíva detektor prítomnosti halogénového značkovacieho plynu, ktorý je založený na princípe halogénovej diódy alebo infračerveného žiarenia. Halogénové detektory dokážu merať úniky až do 10^{-6} mbar.l/s. Test vyžaduje, aby bola skúšobný objekt naplnený halogénom, čo nie je pre každú aplikáciu vhodné. Zároveň je táto technológia finančne náročná a môže ohrozovať životné prostredie. [3]

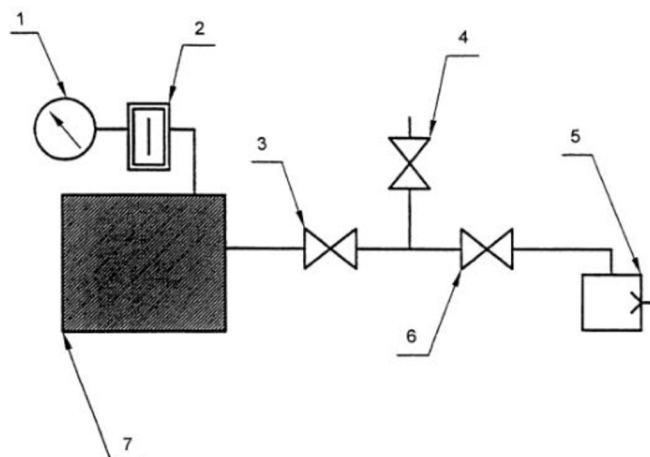
Héliový test je založený na princípe hmotnostného spektrometru MSLD (Mass Spectrometer Leak Detector), ktorý deteguje úniky „do“ alebo „z“ testovaného objektu podľa typu metódy. Systém pozostáva zo samotného detektoru a vysoko-vákuovej vývevy. Princípy detektorov MSLD spočívajú v meraní rýchlosti prietoku „po“ alebo „proti“ prúdu plynu. Skúšobný plyn sa zavedie do testovaného objektu, ktorý je pripojený k detektoru netesností.

Keďže sa hélium vyskytuje bežne v atmosfére v zanedbateľnom množstve (5 ppm), tak jeho únik z testovaného telesa preniká do detekčného systému, kde sa meria jeho parciálny tlak a následne sa vyhodnocuje množstvo uniknutého hélia. Héliová metóda využíva ako skúšobný plyn na rozdiel od halogénovej metódy netoxický inertný plyn – hélium. Jedinou menšou molekulou ako je hélium je molekula vodíka, ktorý môže za istých podmienok slúžiť ako náhrada za hélium. Nevýhodou vodíka je jeho výbušnosť, pretože sa nejedná o inertný plyn. Héliovou metódou je možné detegovať úniky až do 10^{-12} mbar.l/s, z čoho vyplýva, že sa jedná o najpresnejšiu kvantitatívnu metódu testu tesnosti. [3]

3.4 Metóda zmeny tlaku

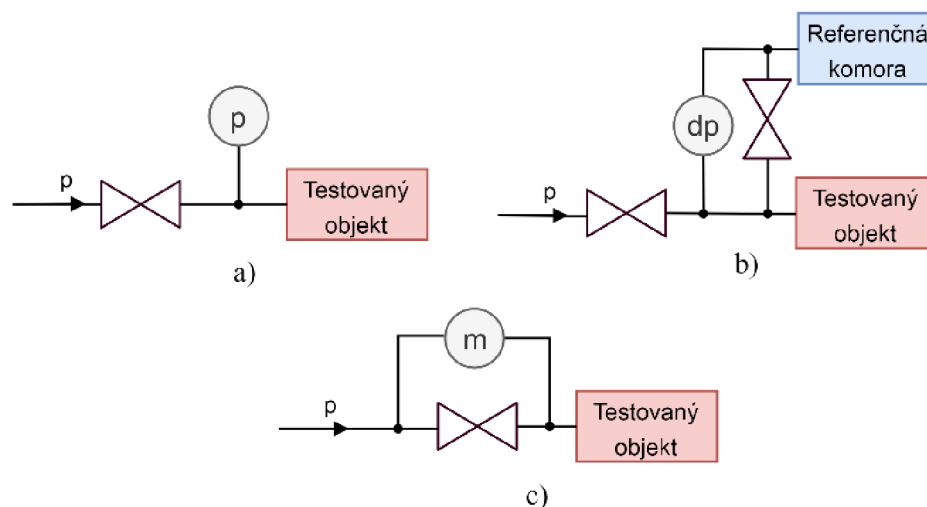
Metódy zmeny tlaku stanovujú rýchlosť prieniku netesností stenou uzatvoreného objektu podrobeného rozdielom tlaku. Tieto metódy sú založené na meraní zmeny množstva plynu vo vnútri testovaného objektu. Na stanovenie tejto zmeny sa využíva stavová rovnica pre ideálny plyn, ktorá udáva pomer medzi množstvom, tlakom, teplotou a objemom plynu vo voľnom vnútornom objeme testovaného objektu. Tento spôsob testovania vychádza z normy ČSN EN 13184, ktorá popisuje nedeštruktívne skúšanie tesnosti metódou zmeny tlaku. Táto norma taktiež uvádza schému princípu testovacieho systému tlakovej skúšky (Obr. 5). Systém pozostáva z meracieho zariadenia, obvykle manometru (1), chladiaceho čidla (2), havarijných ventilov (3,6), odvzdušňovacieho ventilu (4), vývevy a samotného testovaného objektu (7). [4]

Výpočet množstva úniku vychádza zo stavovej rovnice ideálneho plynu, z ktorej je odvodený vzťah (12) uvedený v kap. 3. Rýchlosť prieniku netesnosťou je daný ako pV-prúd plynu a je možné ho vyjadriť aj ako percento strát hmotnosti alebo tlaku. [4]



Obr. 5) Schéma princípu systému tlakovej skúšky [4]

Metóda zmeny tlaku môže byť prevedená viacerými spôsobmi. Na základe odolnosti telesa voči pretlaku či podtlaku sa volí metóda poklesom alebo zvýšením tlaku (Obr. 6a), kde prebieha meranie celkového tlaku. Meraný tlak sa vzťahuje buď k atmosférickému tlaku okolia alebo k absolútnemu tlaku vákuua. Táto metóda má vysokú spoľahlivosť a široký rozsah merania. Diferenčnou metódou (Obr. 6b) sa porovnáva rozdiel tlaku v testovanom objekte s tlakom v referenčnej komore. Táto metóda sa nazýva aj metóda tlakového spádu prípadne metóda zmeny tlaku v komore. Výhodou tejto metódy je vyššie rozlíšenie tlakovej zmeny. Posledným variantom je metóda meraním hmotnostného prietoku (Obr. 6c). [9]



Obr. 6) Schémy systémov metód zmeny tlaku a) pretlak/podtlak b) tlakový spád c) prietok [9]

Testovacie skúšky objektov, ktoré vyžadujú vysokú presnosť, musia byť analyzované a vyhodnotené pomocou diagramu závislosti straty hmotnosti na čase trvania skúšky. Kritické súčasti vyžadujú taktiež opakovanie merania, kde rozptyl výsledkov v každej sérii môže vykazovať významné nepredvídané javy premenlivosti veličín na skúšku. Dostačujúcim určením rýchlosti prietoku netesností môže byť stredná hodnota nameraných hodnôt. V prípade dodatočných požiadaviek alebo v prípade veľkého rozptylu sa musí vypočítať lineárna regresia a definovať horná konfidenčná úroveň. Tvar výpočtu lineárnej regresie je vyjadrený vzťahom (19), kde \hat{q} je odhad úniku v čase t , A je úsek na osi q a B je smernica priamky. Tieto

koeficienty sú vypočítané podľa štatistického kolísania hodnoty úniku. Korelácia medzi bodmi sa môže určiť metódou najmenších štvorcov. Neistota odhadu hodnôt je určená štandardnou odchýlkou smernice korelačnej priamky. Výberový rozptyl je mierou priemernej odchýlky bodov od odhadnutej hodnoty. [4]

$$\hat{q} = A + B \cdot t \quad (19)$$

Skúšky s vysokou presnosťou vyžadujú dokázanie platnosti presnosti merania. Prvým spôsobom určenia je rýchle vpustenie alebo odstránenie malého referenčného množstva skúšobného plynu do alebo zo skúšobného objemu. Prístrojom indikovaná zmena hmotnosti sa musí zhodovať najviac s 20% odchýlkou s nameranou referenčnou hodnotou množstva plynu. Druhým spôsobom je metóda, kde sa netesnosť so známou rýchlosťou prieniku za splnených skúšobných podmienok pričíta k existujúcej netesnosti. Ako prevedenie slúži kalibrovaný otvor, ktorý je pripevnený k testovanému objektu prostredníctvom ventilu. Clona pri skúšobnom tlaku musí vytvoriť podobný prietok ako všetky existujúce netesnosti sčítané dohromady. [4]

3.4.1 Pokles tlaku

Skúšobná metóda poklesom tlaku (podľa normy EN 1779 metóda D.1) sa využíva na testovanie systému alebo objektov, ktoré odolávajú vnútornému pretlaku bez významných zmien objemu a deformácie. Pred začiatkom testovacej skúšky musí byť objekt čistý, suchý a časti, ktoré nemôžu odolávať skúšobnému tlaku, sa musia izolovať. Tenkostenné objekty je potrebné sledovať tenzometrami s ohľadom na náhle zmeny objemu. [4]

Priebeh skúšky začína tak, že testovaný objekt sa vystaví pretlaku, natlakovaním čistým suchým plynom pomocou kompresoru alebo vložení objektu do vákuovej komory. Následne sa odpojí zdroj tlaku a po teplotnej stabilizácii sa pravidelne zaznamenávajú hodnoty tlaku, teploty, prípadne rosného bodu. Zaznamenaný tlak, resp. pokles tlaku, je korigovaný na základe teplotnej závislosti v čase. Ak zostane relatívna vlhkosť vo všetkých oblastiach objektu počas akýchkoľvek teplotných podmienok nižšia ako 90%, tak je možné uvažovať správanie ideálnych plynov. V prípade nesplnenia tejto podmienky je nutné použiť výpočty pomocou psychrometrického diagramu vlhkosti vzduchu. [4]

Počas skúšky je vhodné minimalizovať účinky spôsobené prievanom a slnečným svetlom. Pre zníženie doby stabilizácie teploty by mala byť vstupná teplota plynu blízka teplote vzduchu v skúšanom objekte. Podľa normy EN 1779 sa vyžaduje doba stabilizácie minimálne jedna hodina na vyrovnanie teploty a vlhkosti. Samotné trvanie skúšky závisí na rozmeroch testovaného objektu, požadovanej presnosti skúšky a taktiež na jej účele. [4]

Existujú dve metódy testovania poklesom tlaku, a to absolútna metóda, kde je indikovaný absolútny tlak a metóda referenčnej nádoby, kde tlak v testovanom objekte sa porovnáva s tlakom v referenčnom objekte. Ako referenčný objekt sa používa utesnený objem s geometriou, kde sa predpokladá rovnaká teplota atmosféry a skúšobného objektu, ktorá sa počas testu zaznamenáva. Referenčný objem musí mať o niečo menší tlak, než testovaný objekt a musí byť pred a po skúške testovaný na tesnosť. [4]

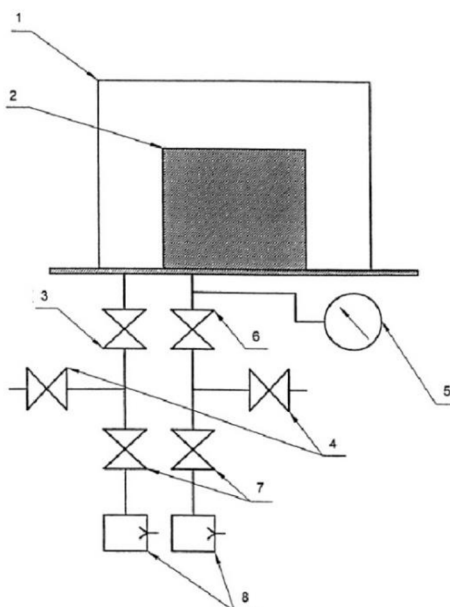
Ak je rýchlosť prieniku udávaná ako hmotnostný tok, tak je nutné presné určenie voľného vnútorného objemu testovaného objektu. Ten môže byť stanovený niekoľkými

spôsobmi, napríklad meraním významných poklesov tlaku behom krátkeho času pomocou rýchlosti prieniku ventilom so známou netesnosťou. Ďalšou možnosťou je stanovenie objemu zo strednej hodnoty poklesu tlaku a celkovej straty plynu. Znalosť uzavretého voľného objemu sa nevyžaduje, ak je rýchlosť prieniku netesností vyjadrená ako percento straty z celkovej hmotnosti uzavretého plynu za jednotku času. [4]

Citlivosť tejto metódy je úmerná času a je možné zaznamenávať úniky do 10^{-4} mbar.l/s. Výhodou testovania tesnosti poklesom tlaku je jednoduchosť metódy, ktorá vyžaduje v pneumatickom obvode prítomnosť len kompresoru a tlakomeru. Negatívnym faktorom testovaním poklesom tlaku je kolísanie teploty, ktorá výrazne zhoršuje presnosť testu. [4]

3.4.2 Zvýšenie tlaku

Skúšobná metóda zvýšením tlaku (podľa normy EN 1779 metóda D.2) sa využíva na testovanie systému alebo objektov, ktoré odolávajú vákuu alebo vonkajšiemu tlaku a môžu byť evakuované pri normálnej prevádzke. Testovaný objekt sa buď pripojí na systém vývevy, uzavreť bezpečnostným havarijným ventilom, alebo sa vloží do tlakovej komory (Obr. 7). Po dosiahnutí stanoveného rozdielu tlaku sa objekt odpojí a zaznamenáva sa jeho vnútorný tlak v určených časových intervaloch. Pred testovaním je nutné poznať voľný vnútorný objem, ktorý je možné určiť zo strednej hodnoty zvýšeného tlaku a celkového množstva napusteného plynu. V prípade merania rýchlosti prieniku netesností ako zvýšenie tlaku za jednotku času, znalosť objemu nie je potrebná. Testovací systém s komorou (Obr. 7) pozostáva podľa normy ČSN EN 13184 z komory (1), ktorá slúži ako pomocná výveva a v nej sa nachádza testovaný objekt (2). Ku komore je pripojený havarijný ventil vývevy (3) a odvzdušňovací ventil (4). Meracím prístrojom (5) sa deteguje tlakový nárast v objekte, ktorý je pripojený cez havarijný ventil (6) k odvzdušňovaciemu ventilu (4). Obvod je zakončený havarijnými ventilmi čerpadla (7) a vývevami (8). [4]



Obr. 7) Schéma systému s pomocnou vývevou [4]

Testovaný objekt musí byť pred skúškou čistý a suchý. Uvoľnené pary prítomnej vody, oleje, prchavé zlúčeniny alebo iné znečistené povrchy môžu spôsobiť navýšenie počiatočného tlaku, a zvýšia tak časové trvanie skúšky. Medzi testovaný objekt a tlakomer je vhodné zahrnúť vymrazovaciu jímku, ktorá stabilizuje zmeny teploty objektu, spôsobené zmenami teploty okolia alebo zahriatím z dôvodu odplynenia. Stabilizačná doba je nutná na vylúčenie účinkov adiabatického zahriatia a mechanických deformácií testovaného objektu. Stabilné podmienky sú považované za dosiahnuté ak sa postupnosť meraní rýchlosti prieniku netesnosťami nelíši o viac než 10%. [4]

Pred začiatkom testu je nutné poznať objem testovaného objektu vrátane potrubia až k bezpečnostnému ventilu, tzv. „mŕtvy objem“. Mŕtvy objem má zanedbateľnú rýchlosť prieniku netesnosťami vzhľadom k prípustnej rýchlosti prieniku netesnosťami skúšaným objektom. Ak je prípustná netesnosť počítaná ako tlakový nárast za časovú jednotku, tak ekvivalentný nárast tlaku zodpovedá súčinu zaznamenananej rýchlosti nárastu tlaku a pomeru celkového objemu (objem objektu + mŕtvy objem) k objemu objektu. Výsledná rýchlosť prieniku netesnosťami, ktorá je vyjadrená ako pV-prietok, odpovedá súčinu zaznamenananej rýchlosti nárastu tlaku a celkového objemu. V prípade, že počas skúšky mŕtveho objemu je nárast tlaku výrazne veľký, tak sa vypočíta rýchlosť prieniku netesnosťami mŕtveho objemu ako súčin rýchlosti nárastu tlaku mŕtveho objemu a mŕtveho objemu. Rýchlosť prieniku netesnosťami objemu sa následne vypočíta odčítaním tejto rýchlosti od celkovej rýchlosti prieniku netesnosťami. [4]

Citlivosť metódy závisí na rozlišovacej schopnosti a stabilite meracích zariadení, pomocou ktorých je zisťovaný tlak, objem a čas. Detekčná schopnosť metódy je ovplyvnená hlavne možnosťou dosiahnutia absolútneho tlaku v evakuovanom objekte, presnosťou zistenia vnútorného objemu testovaného objektu a mŕtveho objemu, časovou dĺžkou skúšky, stabilizáciou teploty a povrchovým stavom objektu (čistota). [4]

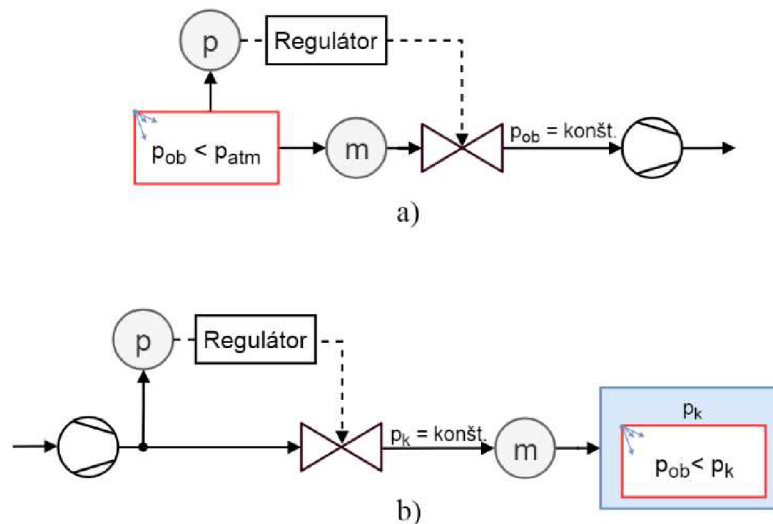
3.4.3 Zmena tlaku v komore

Skúšobná metóda zmenou tlaku v komore (podľa normy EN 1779 metóda D.3) sa využíva na testovanie systému alebo objektov, ktoré odolávajú vákuu alebo tlaku. Postup skúšky spočíva v tom, že suchý, čistý, teplotne stabilizovaný testovaný objekt sa uzavrie do tuhej skúšobnej komory (zvonu). Táto metóda vyžaduje znalosť vnútorného objemu komory a prítomnosť snímača tlaku v utesenom objeme komory. Princíp metódy je vo vytvorení rozdielu tlaku medzi testovaným objektom a referenčnou komorou natlakovaním alebo evakuovaním objemu testovaného objektu. Na základe toho sa táto metóda nazýva aj diferenčná metóda. V prípade, že je testovaný objekt natlakovaný, akýkoľvek prietok stenou skúšaného objektu vyvolá vo vnútri komory nárast tlaku. Ak je testovaný objekt evakuovaný, tak akýkoľvek prietok stenou tohto objektu vyvolá vo vnútri testovacej komory pokles tlaku. Priebeh skúšky, výpočty a overenie presnosti je rovnaké ako v metóde testovania poklesom tlaku okrem toho, že objem testovaného systému odpovedá objemu komory. [4]

3.4.4 Meranie prietoku

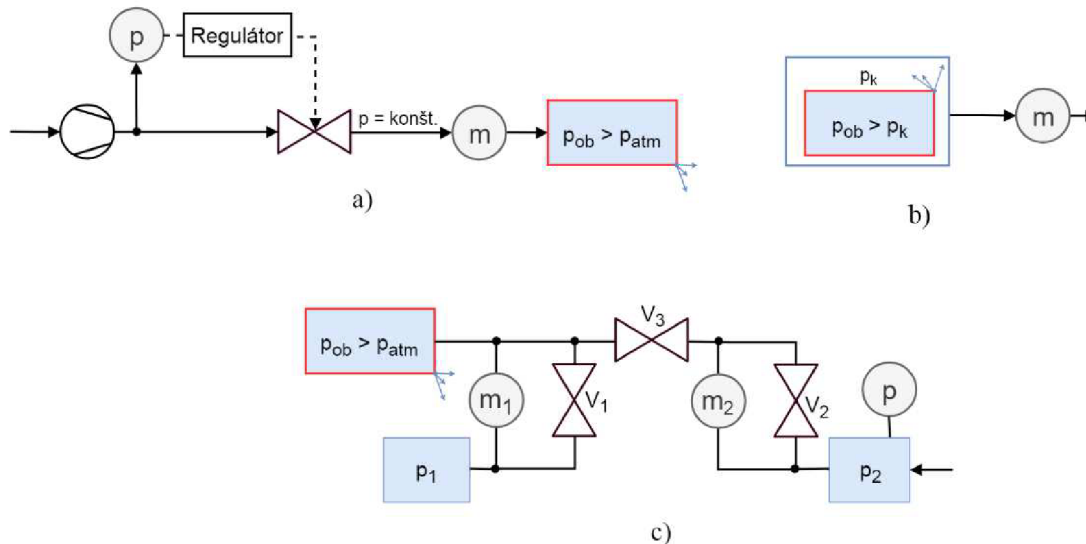
Skúšobná metóda meraním prietoku (podľa normy EN 1779 metóda D.4) sa využíva na testovanie systému alebo objektov, ktoré odolávajú vákuu alebo nízkemu pretlaku. Táto metóda zisťuje zmeny rýchlosti prieniku netesnosťami meraním toku plynu smerom do alebo zo skúšaného objektu. Priebeh skúšky je podobný ako v predošlých metódach. Vyžaduje sa použitie presných meracích prístrojov a zabezpečenie stabilných podmienok. Namerané hodnoty sa musia korigovať vo vzťahu ku všetkým ovplyvňujúcim parametrom. [4]

V prípade testovania plynom, ktorý prúdi smerom do objektu (podtlaková metóda) sa tento objekt pripojí pomocou potrubia s prietokomerom (m) a regulátorom tlaku (p) k výveve (Obr. 8a). Regulátor tlaku slúži na udržiavanie konštantného vnútorného tlaku v objekte prostredníctvom ventilu. Druhý spôsob testovania plynom v smere do objektu spočíva vo vložení evakuovaného testovaného objektu do komory, ktorá je pripojená k prietokomeru a konštantnému zdroju tlaku (Obr. 8b). Tlak v objekte je menší ako v komore a netesnosťami začne prúdiť plyn do objektu, čo zvýši prietok plynu do komory. [4]



Obr. 8) Systémy podtlakovej metódy merania prietoku a) bez komory b) s komorou [4]

V prípade testovania plynom, ktorý prúdi smerom z objektu (pretlaková metóda) sa používa spôsob pripojenia testovaného objektu k prietokomeru a konštantnému zdroju tlaku (Obr. 9a). Ďalším spôsobom je natlakovanie objektu a jeho následne vloženie do komory, ktorá je pripojená cez prietokomer na atmosférický tlak (Obr. 9b). Nevýhoda tejto metódy je kolísanie atmosférického tlaku, ktorý negatívne ovplyvňuje výsledky merania. Tretí variant skúšky je meraním objemu plynu (Obr. 9c), ktorý je potrebný na obnovu tlaku, ktorý bol nameraný na začiatku skúšky. Test začína natlakovaním testovaného objektu a zásobníkov na konštantný tlak pri otvorených ventiloch. Následne sa uzatvoria ventily a zahájí sa skúšobný časový interval, kde vplyvom netesností klesá tlak v objekte p_{ob} . Na konci skúšobnej periódy sa otvorí ventil V_3 a nastáva vyrovnávanie tlakov (zvyšovanie tlaku p_2) a uniknuté množstvo plynu sa odčíta z trubicového U-manometru m_2 . [4]



Obr. 9) Pretlakové metódy merania prietoku (plyn prúdi z objektu) [4]

3.5 Súčasné riešenia testovania tesnosti

Dôležitou časťou výroby produktu je jeho testovanie funkčnosti. Testovacia fáza môže výslednú cenu produktu značne predražiť, či už z dôvodu časovej alebo finančnej náročnosti. V rôznych odvetviach priemyslu sú požadované testy tesnosti produktov. Jedná sa najmä o výrobu pneumatických a hydraulických súčastí a systémov. V niektorých prípadoch je potrebné neznáme netesnosti lokalizovať, v iných zistiť množstvo uniknutého média, prípadne je vyžadovaná kombinácia týchto dvoch požiadaviek. Na základe metód testovania tesnosti popísaných v kap. 3.2 poskytujú výrobcovia komerčne dostupné riešenia testovacích zariadení pre rozličné odvetvia.

Výhody komerčných riešení testovania tesnosti sú certifikácia systému, servis a záruka. Medzi nevýhody patria vyššie náklady na zriadenie systému, prípadne paušálne licenčné náklady za riadiaci softvér. Prístroje sú často špecializované na určitý typ merania a nie je možné vždy zariadenie prispôbiť potrebám užívateľa.

Labtech je česká firma, ktorá sa zaoberá vývojom a výrobou prístrojov a zariadení na testovanie tesnosti pre priemyselné a laboratórne použitie. Návrh a realizácia testovacích staníc prebieha na základe požiadaviek zákazníka s ohľadom na voľbu metódy, typ testu a limit tesnosti. Dominantne testovacia metóda staníc je héliová metóda. Testovacie stanice sú navrhované ako modulárna konštrukcia a detekčný systém s riadením pomocou PLC alebo priemyslového PC s individuálnym riadiacim systémom. [7]

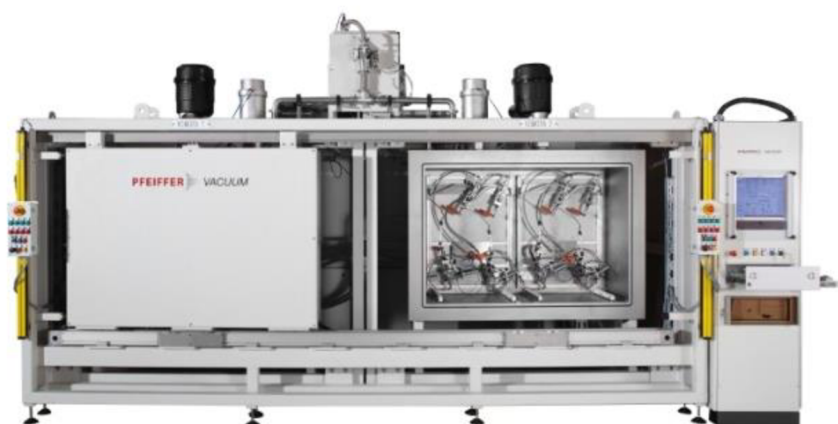
Pneumatickými a elektrickými skúšobnými metódami sa zaoberá aj česká firma ATEQ, ktorá ponúka skúšobné zariadenia na testovanie tesnosti a prietoku. Ich prístroje sa vyznačujú vysokou presnosťou, nízkym časom testu, automatickým meraním, kalibrovaním, jednoduchou obsluhou a komunikačným rozhraním. Najmodernejší detektor z portfólia firmy je ATEQ F620 (Obr. 10), ktorý podporuje diferenčné meranie poklesu tlaku v rozsahu od 0 do 0,5 kPa s rozlíšením 0,1 Pa a v rozsahu do 5 kPa s rozlíšením 1 Pa. Zariadenie obsahuje širokú škálu testovacích programov a flexibilné komunikačné rozhranie. Okrem detektoru tesnosti ponúka

firma moderný prietokomer ATEQ D620, ktorý slúži na reguláciu a meranie prietoku s možnosťou detekcie tesnosti. V portfóliu firmy sa nachádzajú detektory netesnosti (vodíkové), kalibrátory prietoku, tlaku, príslušenstvo ako upínacie konektory a kalibre netesnosti. [10]



Obr. 10) ATEQ F620 [10]

Rakúska firma Pfeiffer Vacuum je jedným zo svetových výrobcov vákuových technológií a jednou z častí ich portfólia je detekcia tesnosti vákuovou metódou. Ich riešenia zahŕňajú prenosné, univerzálne, modułárne, vysokovýkonné testovacie prístroje a pracovné stanice (Obr. 11). Detektory sú založené na princípe hmotnostných spektrometroch a optoelektronických snímačov, ktoré detegujú skúšobný plyn. [11]



Obr. 11) Pfeiffer Vacuum testovacia jednotka chladiacich hadíc [11]

Nemecká firma Innomatec ponúka technické riešenia v oblasti testovania únikov pre rozličné odvetvia ako je automobilový priemysel, medicínska technológia a iné. Zameriava sa na vývoj detektorov, tesných rýchlo-konektorov a automatických testovacích liniek. Táto firma ponúka produkty a servis pre všetky testovacie metódy s rozličnými médiami, tlakmi a objemami. Riešením firmy Innomatec je LTC (Leak-Test-Computer), čo je univerzálne zariadenie (počítač) na testovanie tesnosti a meranie úniku so širokým spektrom využitia. LTC (Obr. 12) sa vyznačuje intuitívnym ovládaním s dotykovým farebným displejom, pripojením k sieti a veľkou pamäťou na výsledky merania. [12]



Obr. 12) LTC-902 od firmy Innomatec [12]

Analýzy a riešenia testov tesnosti ponúka oddelenie nemeckej firmy Zeltwanger Dichtheitsprüfung, ktoré vyvíja a ponúka prístroje založené na skúšobných metódach zmeny tlaku vzduchu. Jedná sa o zariadenia od malých mobilných prístrojov po kompletne stanice a riadiace centrá. Kompaktný prístroj s dotykovým displejom je ZEDbase+ (Obr. 13), ktorý sa vyznačuje jednoduchým ovládaním, integrovanou kompenzáciou teploty a širokou škálou diagnostických funkcií. Okrem testovacích zariadení sa v portfóliu firmy nachádza taktiež kalibračné príslušenstvo. [9]



Obr. 13) ZEDbase+ firmy Zeltwanger [9]

Významnou spoločnosťou v oblasti testovania tesnosti je americká firma Uson, ktorá vyvíja systémy a aplikácie s vysokou presnosťou merania. Široká škála produktov tejto firmy je použiteľná v rôznych odvetviach. Uson sa taktiež podieľal na vývoji metód testovania tesnosti vesmírneho programu NASA. [13]

Medzi ďalších predstaviteľov na trhu, ktorí sa zaoberajú testovaním tesnosti patrí nemecká spoločnosť JW Froehlich, ktorá ponúka riešenie vo forme liniek, ktoré zahŕňajú montáž, funkčný test a test tesnosti motorov, prevodoviek, turbodúchadiel a elektropohonov. Britská spoločnosť Furness Controls poskytuje riešenia merania a kalibrácie tlaku, prietoku a detekcie tesnosti v rôznych aplikačných oblastiach. Táto firma sa špecializuje na diferenčné meranie tlaku veľmi nízkych hodnôt už od 0,01 Pa. Podobné portfólio má aj japonská firma Cosmo Instruments, ktorá sa zaoberá vývojom vzduchových testerov tesnosti, tlakomerov, prietokomerov, vibračných analyzátorov a iných produktov. Komerčné riešenia testovania tesnosti ponúkajú aj ďalšie spoločnosti ako Fischer Leak Systems, Werner Bayer, CETA Testsysteme, MACEAS a iné. [14] [15] [16]

4 NÁVRH POSTUPU TESTOVANIA KOMPONENTOV

Renomovaní výrobcovia pneumatických komponentov testujú svoje výrobky, ktorých funkčnosť je závislá na správnom výrobnom postupe. Podľa komplexnosti komponentu sa realizuje odpovedajúca kontrola. Jedná sa predovšetkým o kontrolu parametrov komponentu ako je prietok, pracovný tlak, rozsah, tesnosť a iné. Test súčasti môže v niektorých prípadoch značne predĺžiť čas výrobného procesu daného komponentu. Dĺžka testu môže závisieť na viacerých parametroch rôznych fáz testu. Typický test pneumatických komponentov pozostáva z nasledujúcich základných fáz:

1. Natlakovanie obvodu
2. Stabilizácia tlaku v obvode
3. Test pneumatického komponentu
4. Evakuácia obvodu

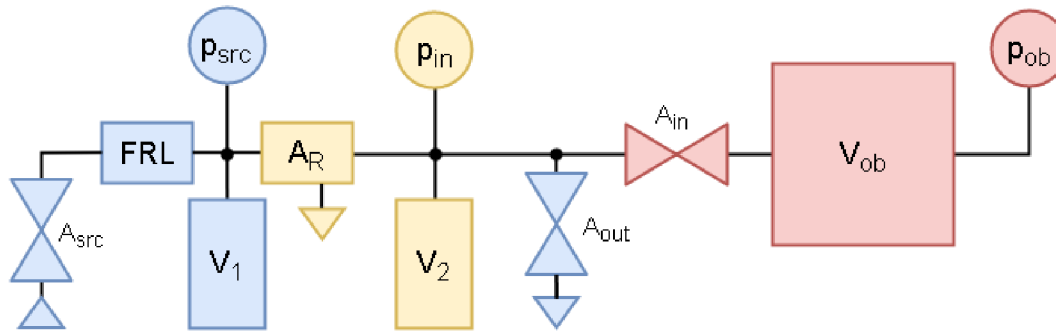
V rámci praktickej časti práce sú dodané k dispozícii dva pneumatické komponenty od firmy IMI Norgren, pre ktoré je navrhnutý testovací postup na overenie funkčnosti a kvantitatívne zistenie úniku. Jedná sa o pneumatický filter s automatickým odtokom a pneumatický spínací ventil, ktorý sa používa v automobilovom priemysle.

Na základe analýzy súčasného stavu metodiky testovania tesnosti a podľa špecifikácie je zvolená pre test tesnosti metóda poklesom tlaku, ktorá sa vyznačuje svojou jednoduchosťou, má dostatočnú minimálnu detekovateľnosť úniku a okrem zdroja vzduchu vyžaduje prítomnosť len jedného snímača tlaku. Podľa tejto metódy a na základe špecifikácie výrobcu je potrebné zostaviť testovací postup poskytnutých komponentov. Na analýzu a overenie navrhnutého postupu je potrebné zostaviť pneumatický testovací obvod.

4.1 Návrh testovacieho pneumatického obvodu

V rámci práce je na základe analýzy navrhnutý a realizovaný testovací pneumatický obvod, ktorý slúži na analýzu a overenie navrhnutých testovacích postupov. Tlak v obvode je závislý na zdroji vzduchu, ktorým býva kompresor. Pre testy je často požadovaná variabilná veľkosť tlaku, ktorá sa v obvode typicky rieši prítomnosťou viacerých vetiev s rôznou hodnotou tlaku. Veľký vplyv na presnosť a dĺžku testu má taktiež doba stabilizácie tlaku vzduchu. Z dôvodu zníženia množstva vetiev v testovacom obvode a taktiež zníženia času ustálenia tlaku je výhodné použiť v obvode regulátor tlaku. Požiadavky na regulátor tlaku sú rýchla odozva, presnosť a opakovateľnosť merania. Pre proces výroby je dôležitým faktorom aj cena použitého zariadenia. Návrh pneumatického obvodu (Obr. 14) pozostáva z nasledujúcich farebne vyznačených hlavných častí na blokovej schéme:

1. Prívod, úprava a odvod vzduchu (modrá)
2. Regulačná časť obvodu (žltá)
3. Testovacia časť (červená)



Obr. 14) Schéma návrhu testovacieho pneumatického obvodu

Stlačený vzduch sa privedie do obvodu pomocou vstupnej armatúry (A_{src}) zo zdroja a následne sa upravuje prostredníctvom jednotky na úpravu vzduchu nazývanej FRL (filter, regulátor a lubrikátor). Najprv je potrebné pomocou filtra a odlučovača zbaviť privedený vzduch nečistôt a vlhkosti. Vzduch je ďalej regulovaný na požadovanú hodnotu maximálneho tlaku zdroja (p_{src}) pomocou vstupného regulátora. Potom prejde vzduch procesom lubrikácie prostredníctvom rozprašovača oleja. Pre zmiernenie tlakových rázov a zvýšenie kvality regulácie vstupného tlaku je pridaný do obvodu vzdušník (V_1). Upravený vzduch ďalej pokračuje do regulačnej časti pneumatického obvodu. Odvod vzduchu je riadený výstupným, odfukovým ventilom (A_{out}).

Regulačná časť tlaku navrhnutého pneumatického obvodu je tvorená regulačným ventilom (A_R) a snímačom tlaku, ktorý zaznamenáva vstupný tlak (p_{in}) do testovacej časti pre test pneumatického komponentu. Súčasťou regulačnej časti je taktiež pomocný objem (V_2), ktorý tlmí tlakové rázy a pomáha stabilizovať vzduch v obvode.

Testovacia časť obvodu je tvorená vstupným ventilom (A_{in}), ktorý slúži na natlakovanie testovaného objektu tlakom p_{in} a na izolovanie testovanej časti od zvyšku obvodu. Súčasťou testovacej časti je samotný testovaný objekt so známym objemom V_{ob} a snímač tlaku (p_{ob}), ktorý slúži na monitorovanie tlaku v objekte. Návrh testovacej časti vychádza z metódy poklesu tlaku na test tesnosti.

4.2 Regulačná časť pneumatického obvodu

Testy pneumatických komponentov vyžadujú konštantnú hodnotu tlaku v určitom rozsahu, a preto je potrebné regulovať vstupný tlak zo zdroja na požadovaný tlak, ktorý je nižší ako maximálny zdrojový. Požiadavky na variabilné hodnoty tlakov v obvode môžu viesť k nutnosti rozširovania testovacieho pracoviska o niekoľko vetiev s rôznou hodnotou konštantného tlaku. Toto rozširovanie zvyšuje náklady linky, a preto je cieľom navrhnuť regulačnú časť pneumatického obvodu, ktorá bude schopná stabilne regulovať tlak v požadovanom rozsahu. Ako akčný člen sú analyzované a použité ventily, ktoré by mali mať lineárnu tlakovú závislosť v určitom rozsahu. Typický problém regulačných ventilov je stabilizácia nízkeho tlaku na hodnotu nižšiu ako 0,5 bar.

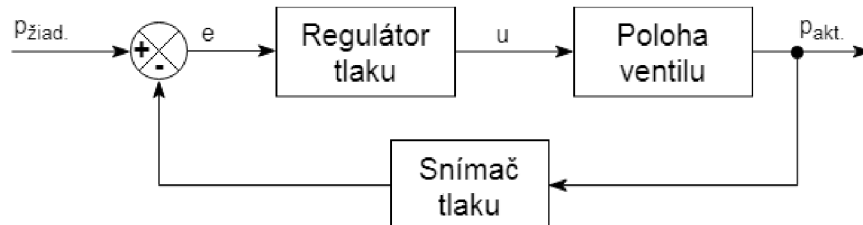
Ako regulátor tlaku v obvode je možné použiť buď komerčne dostupné kompaktné zariadenie, ktoré sa v praxi využívajú v dominantnom zastúpení alebo vlastný regulačný systém s lineárnym proporcionálnym ventilom a tlakomerom. Ďalším možným riešením regulačnej

časti v pneumatickom obvode je použitie servoventilov, ktoré sa typicky využívajú na reguláciu prietoku vzduchu. Monitorovanie tlaku na rozdiel od monitorovania prietoku vyžaduje nižší čas stabilizácie a kalibrácie, preto je zvolený regulačný systém tlaku. Charakteristiky a parametre kompaktných regulátorov, sú v rámci práce experimentálne porovnané s navrhnutým systémom regulácie tlaku.

4.2.1 Návrh regulačného systému tlaku

Čas ustálenia regulovaného tlaku vzduchu, je jedným z parametrov, ktorý môže výrazne ovplyvniť celkovú dĺžku testu pneumatického komponentu. Pri samotnom privedení vzduchu alebo pri prepínaní ventilov nastáva v obvode prudká tlaková zmena, ktorá vyvolá tlakový ráz. Ráz tlaku spôsobí rozkmitanie prúdu vzduchu a preťažuje jednotlivé časti pneumatického obvodu. Regulátor pomáha eliminovať amplitúdu prekmitu tlaku a taktiež plynule stabilizuje tlak na žiadanú hodnotu v čo najkratšom čase a s čo najmenším rozptylom. Z toho dôvodu je vyžadovaná rýchla reakcia akčného člena regulátoru a monitorovanie spätnej väzby s vysokou frekvenciou. Požiadavky na regulačnú časť tlaku pneumatického obvodu sú teda kladené na rýchlosť regulácie s čo najvyššou presnosťou a opakovateľnosťou merania.

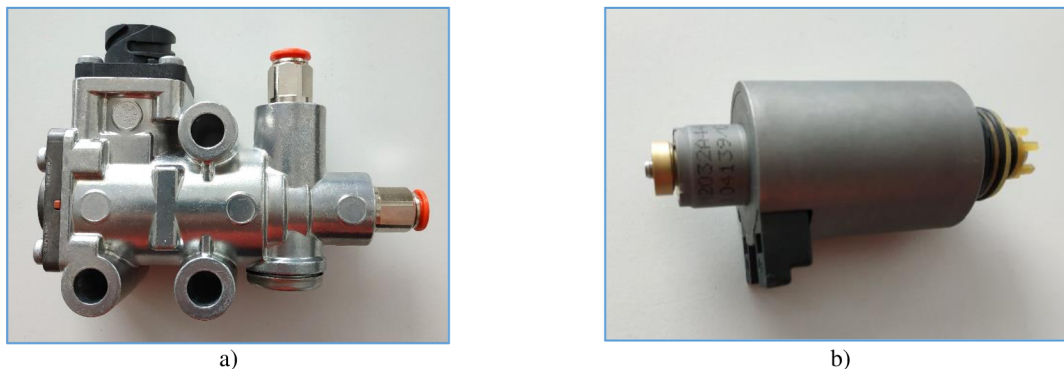
Okrem použitia komerčne dostupných regulátorov, je možné využiť systém jednotlivých zariadení (ventil, snímač, riadiaci systém) na zostavenie regulačného systému pneumatického obvodu. Základná bloková schéma regulátoru tlaku je zobrazená na Obr. 15, kde vstupnou veličinou je žiadaná hodnota tlaku ($p_{\text{žad.}}$) a výstupom je aktuálna hodnota tlaku ($p_{\text{akt.}}$). Do regulátoru, ktorý je buď súčasťou kompaktného zariadenia alebo beží ako softvérový program v rámci riadiacej aplikácie, vstupuje regulačná odchýlka (e), ktorá predstavuje rozdiel tlaku na vstupe od tlaku na výstupe ($p_{\text{žad.}} - p_{\text{akt.}}$). Dôležitou časťou regulátoru je spätná väzba, ktorou je v tomto prípade výstupný tlak ($p_{\text{akt.}}$) monitorovaný snímačom tlaku. Výstupom z regulátoru je akčná veličina (u), ktorá riadi polohu ventilu. Typicky sa jedná o riadiaci zásah v podobe spínania solenoidu prostredníctvom PWM (pulzno-široková modulácia), prípadne o analógový napäťový alebo prúdový výstup z riadiaceho systému. V pneumatickom obvode sú prítomné taktiež poruchové veličiny, ktoré sú spôsobené napríklad nestabilným tlakom zo zdroja, šumom na vstupoch a výstupoch, rôzna teplota alebo vlhkosť vzduchu a okolia a ďalšie iné veličiny.



Obr. 15) Bloková schéma regulátoru tlaku

Z dôvodu urýchlenia stabilizácie tlaku v pneumatickom obvode je navrhnutý vlastný regulačný systém tlaku, ktorého hlavným prvkom je ako akčný člen regulátoru použitý lineárny proporcionálny ventil NG3 (Obr. 16), poskytnutý od firmy IMI Norgren. Tento ventil je primárne určený na použitie do brzdových systémov kamiónov. Ventil je ovládaný priamo

elektrickým PWM signálom prostredníctvom výstupnej karty, ktorá je súčasťou riadiaceho systému. Tento ventil sa vyznačuje presnou lineárnou charakteristikou, ktorá by mala zabezpečiť rýchlu a stabilnú reguláciu tlaku.



Obr. 16) Proporcionálny ventil NG3 IMI Norgren a) v puzdre b) bez puzdra

Ako druhým variantom akčného členu regulátoru tlaku je v experimente použitý pneumatický servoventil (ďalej VGT) od firmy IMI Norgren (Obr. 17), ktorý sa používa na ovládanie turbodúchadiel s premennou geometriou (Variable Geometry Turbocharger). V teste je tento ventil priamo ovládaný PWM signálom z výstupnej karty, ktorá je súčasťou použitého riadiaceho systému. [17]



Obr. 17) Pneumatický servoventil IMI Norgren

Spätná väzba regulačného systému je zaistená pomocou snímača tlaku KELLER PR-23S/80594 (Obr. 18), ktorý pracuje v rozsahu od 0 do 20 bar s výstupným analógovým napät'ovým signálom v rozmedzí od 0 do 10 V. Snímač sa vyznačuje vysokou lineárnou presnosťou približne $\pm 0,2\%$ celkového rozsahu, čo odpovedá v tomto prípade ± 40 mbar. [18]



Obr. 18) Snímač tlaku KELLER PR-23S

Ako riadiaci systém pneumatického obvodu je použitý systém NI CopmactRIO cRIO-9064 od firmy National Instruments, ku ktorému sú prostredníctvom vstupných a výstupných kariet

pripojené snímače na monitorovanie obvodu a ovládanie ventilov. Riadiaca aplikácia je naprogramovaná v prostredí *NI LabVIEW*. S použitím programovateľného hradlového poľa FPGA, ktoré cRIO-9064 obsahuje, je vďaka systému reálneho času docielená rýchlosť spracovania signálov a regulácie s vzorkovacou frekvenciou 1 kHz. Na výpočtové operácie regulátoru je použitý softvérový PID regulátor, ktorý beží na FPGA.

4.2.2 Kompaktné regulátory tlaku

Charakteristiky navrhnutého regulačného systému tlaku sú porovnané s nasledujúcimi riešeniami komerčne dostupných regulátorov, ktoré sú založené na báze proporcionálnych ventilov. Výhodou týchto zariadení je ich kompaktnosť, kde sa v jednom puzdre zariadenia nachádza akčný člen, snímač spätnej väzby a riadiaci systém, ktorý spracováva signály a vyhodnocuje ich. Nevýhodou je nízka možnosť konfigurácie systému, čo mnohokrát obmedzuje rozsah regulovanej veličiny a kvalitu regulácie. Ďalšou nevýhodou môže byť cena daného produktu, ktorá je z dôvodu kompaktnosti výrobku vysoká.

Ako prvým regulačným zariadením v testovacom pneumatickom obvode je použitý proporcionálny elektro-pneumatický regulátor SMC ITV1050-31F2N3-Q (Obr. 19). Výstupný tlak regulátoru sa pohybuje v rozsahu od 0,05 do 9 bar podľa napät'ového signálu v rozsahu od 0 do 10 V. Princíp je založený na elektrickom riadení solenoidov po zachytení nárastu vstupného signálu. Výstupný tlak je monitorovaný tlakovým senzorom, ktorý reaguje proporcionálne na zvýšenie vstupného signálu. Komunikácia regulátoru s riadiacou aplikáciou môže taktiež prebiehať prostredníctvom rozhrania RS 232C. [19]



Obr. 19) Regulátor SMC ITV 1050

Navrhnutý regulačný systém tlaku je experimentálne porovnaný s druhým kompaktným proporcionálnym elektro-pneumatickým regulátorom RE16-14-0/6 (Obr. 20) od firmy Stasto, ktorý reguluje v oblasti 0 až 6 bar s prietokom 700 l_n/min (normolitre za minútu). Regulátor je rovnako ako SMC ITV 1050 riadený napät'ovým signálom v rozsahu 0 až 10 V prostredníctvom riadiacej karty použitého systému. [20]

V porovnaní s regulátorom SMC ITV 1050 sa jedná o drahšie prevedenie regulátoru, s použitím kvalitnejších a pevnejších materiálov, a preto je v tomto prípade očakávaná vyššia kvalita regulácie tlaku. Okrem toho je očakávaná aj možnosť regulácie v nízkych tlakoch



Obr. 20) Stasto RE16-14-0/6

4.3 Testovacia časť pneumatického obvodu

Konštantný a stabilný tlak z regulačnej časti vstupuje cez prívodný ventil do testovacej časti pneumatického obvodu, kde sa nachádza testovaný objekt. Na základe poskytnutých prostriedkov je testovacia časť obvodu zostavená na testovanie funkčnosti daného komponentu a nedeštruktívne testovanie tesnosti podľa metódy poklesu tlaku (kap. 3.4.1). Po natlakovaní objektu je uzavretý prívodný ventil a pomocou tlakomeru, je zaznamenávaný absolútny pokles tlaku v testovanom objekte. Testovacia časť obvodu je vždy prispôbena konkrétnym požiadavkám testu. Jedná sa však o minimálne úpravy obvodu, ktoré spočívajú v presunutí miesta snímania tlaku. Na to sú využité nástrčné spojky.

Monitorovanie tlaku objektu je zabezpečené pomocou presného snímača tlaku Keller PR-33X/80794 (Obr. 21), ktorého pracovný rozsah je od 0 do 30 bar s výstupným analógovým napäťovým signálom v rozmedzí od 0 do 10 V. Možnosťou výstupného signálu tlakomeru je aj digitálny výstup po komunikačnej zbernici RS485.



Obr. 21) KELLER PR-33X

Snímač obsahuje mikroprocesor s integrovaným 16 bitovým A/D prevodníkom, ktorý spracováva signál a matematicky kompenzuje teplotu, ktorú je schopný taktiež snímať pomocou senzoru. Tieto prvky slúžia v snímači na zvýšenie jeho presnosti. Výhodou tohto snímača je jeho vysoká rozlíšiteľnosť 0,002 % FS (full scale), čo odpovedá hodnote 0,6 mbar a taktiež vysoká presnosť, ktorá sa dostáva pri použití analógového signálu na hodnotu 0,1% meraného rozsahu, čo odpovedá hodnote 30 mbar. [18]

V rámci práce je navrhnutý testovací postup pre dva pneumatické komponenty na ich vyhodnotenie funkčnosti a tesnosti. Poskytnuté zariadenia na test sú pneumatický filter s automatickým odtokom F64G a pneumatický spínací ventil Phoenix od firmy IMI Norgren.

4.3.1 Postup testu pneumatického filtra

Prvou testovanou súčast'ou je pneumatický hliníkový filter s automatickým odtokom od firmy IMI Norgren s produktovým číslom F64G-NNN-AD3 (Obr. 22), ktorý sa používa na odlučovanie kondenzátu a filtráciu nečistôt. Automatické uzatvorenie odtoku nastáva pri náraste tlaku do 0,3 bar a otvorenie pri poklese tlaku do 0,2 bar. Maximálny operačný tlak filtra je 17 bar. Minimálny tok vzduchu pre uzatvorenie odtoku je 0,6 l/s. Vnútorný objem pneumatického filtra je 0,22 l. [17]



Obr. 22) Testovaný filter filter IMI Norgren F64G

Test filtra začína overením zapojenia všetkých monitorovacích (snímačov) a ovládacích prvkov (ventilov) a vizuálnou kontrolou zapojenia obvodu. Následne nastáva funkčná kontrola ventilov ich sekvenčným aktivovaním a deaktivovaním. Po bezpečnostnej kontrole sa privedie do obvodu vzduch a audiovizuálne sa skontroluje tesnosť obvodu. Uvedené opatrenia by v rámci výrobného procesu prebiehali na začiatku smeny. V procese testovania ďalej prebieha sekvencia overenia funkčnosti filtra a meranie úniku netesnosťami podľa špecifikácie.

Testovacia sekvencia overenia funkčnosti filtra F64G začína natlakovaním obvodu, a na vstupe testovacej časti zvyšovaním tlaku z 0 bar na 0,4 bar. Pri tlaku do 0,3 bar by malo nastať uzatvorenie odtoku filtra, čo odpovedá nulovému prietoku odtokom. Následným znižovaním tlaku na približne 0,1 bar by malo byť pozorované pri tlaku nižšom ako 0,2 bar otvorenie filtra s prietokom 0,6 l/s. Po ukončení testu sa obvod odvzdušní. Na prevedenie tohto testu je vyžadovaná presná regulácia tlaku v nízkych hodnotách, čo kladie vysoké požiadavky na regulačný systém tlaku pneumatického obvodu.

Testovacia sekvencia merania úniku netesnosťami začne privedením tlaku 6 bar a odpojením od zdroja tlaku uzatváracím ventilom. Zo známej veľkosti objemu filtra a mŕtveho objemu obvodu je následne z poklesu tlaku v čase vypočítaná veľkosť úniku netesnosťami. Po

skončení testu sa obvod evakuuje. Rovnaký postup nastane po privedení tlaku 2 bar. Veľkosť úniku je kvantitatívne zhodnotená podľa špecifikácie.

4.3.2 Postup testu pneumatického ventilu

Ďalšou testovanou súčasťou je pneumatický 3/2 ventil Phoenix od firmy IMI Norgren s produktovým číslom 9033727011114900.C (Obr. 23). Tento typ ventilu sa typicky používa v prevodových systémoch v automobilovom priemysle. Ventil je v experimente ovládaný elektricky pomocou PWM signálu. [17]



a)



b)

Obr. 23) Testovaný pneumatický ventil Phoenix a) v puzdre, b) bez puzdra

Test pneumatického ventilu začína ako u filtra F64G overením zapojenia všetkých monitorovacích a ovládacích prvkov a vizuálnou kontrolou zapojenia obvodu. V ďalšej fáze prebieha funkčná kontrola ventilov ich sekvenčným aktivovaním a deaktivovaním a privedením vzduchu do obvodu s audiovizuálnou kontrolou tesnosti obvodu. Uvedené opatrenia by v rámci výrobného procesu prebiehali na začiatku smeny. V rámci procesu testovania daného komponentu prebieha sekvencia overenia funkčnosti ventilu, meraním prechodovej charakteristiky ventilu a meraním úniku netesnosťami v oboch stavoch ventilu.

Testovacia sekvencia overenia funkčnosti ventilu začína podobne ako u ostatných ventilov sekvenčným prepínaním ventilu. Po overení spínania nastáva natlakovanie testovacej časti obvodu požadovaným tlakom a jeho stabilizácia. Ďalšou časťou testu je zisťovanie prechodovej charakteristiky ventilu, kde okrem reakcie výstupu ventilu na vstup prebieha meranie spínacej charakteristiky, ktorá predstavuje časovú závislosť odberu prúdu, kde sa hodnotí doba zopnutia a priebeh prúdu. Za ventil je vhodné umiestniť pomocný objem, ktorý sa po jeho zopnutí naplní.

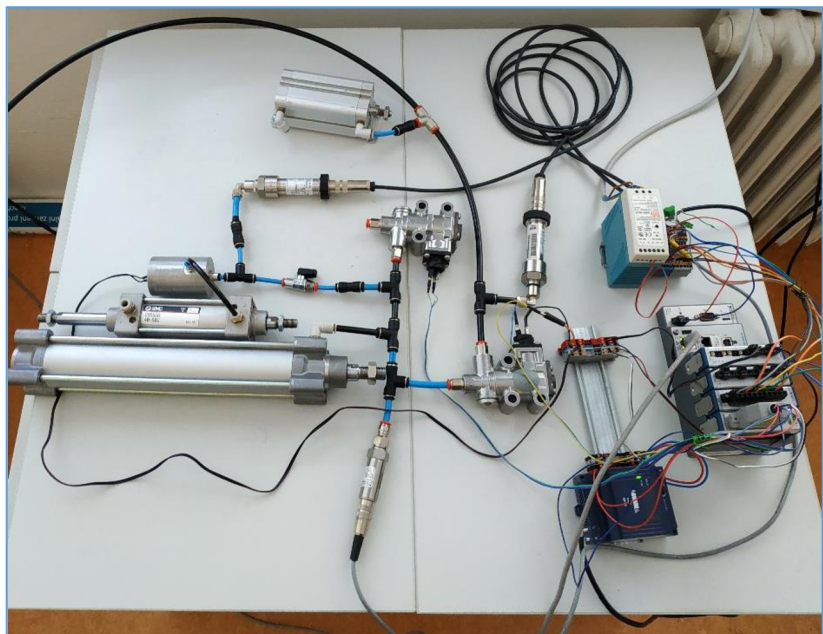
Ďalšou časťou testu je sekvencia merania úniku netesnosťami metódou poklesu tlaku, kde sa hodnotí únik v rámci uzavretého obvodu pred ventilom, pričom je ventil uzavretý. Následne sa ventil otvorí, natlakuje a hodnotí sa únik ventilu v otvorenej polohe. Test prebieha pri tlaku 6 a 2 bar.

5 REALIZÁCIA TESTOV

V rámci praktickej časti diplomovej práce je realizovaný testovací obvod na testovanie pneumatických komponentov podľa návrhu v kap. 4, ktorý je upresnený podľa zadaných požiadaviek jednotlivých testov. Obvod je zostavený z poskytnutých pneumatických prvkov. Dostupný zdrojový tlak vzduchu z rozvodu sa pohybuje v rozsahu od 6,5 do 7,5 bar. Ku zdroju vzduchu je do obvodu pripojená jednotka na úpravu vzduchu, poskytnutá od firmy IMI Norgren (Obr. 24a). V testovacom obvode sú použité pneumatické valce, ktoré svojím objemom funkčne nahrádzajú prítomnosť vzdušníka, ktorý nebol k dispozícii (Obr. 24b). Monitorovanie veličín prebieha pomocou troch snímačov tlaku Keller. Ako odfukový ventil je použitý proporcionálny pneumatický ventil, ktorým je možné simulovať únik vzduchu v pneumatickom obvode. Ostatné časti obvodu sú zapojené podľa špecifikácie testu konkrétneho pneumatického komponentu.



a)



b)

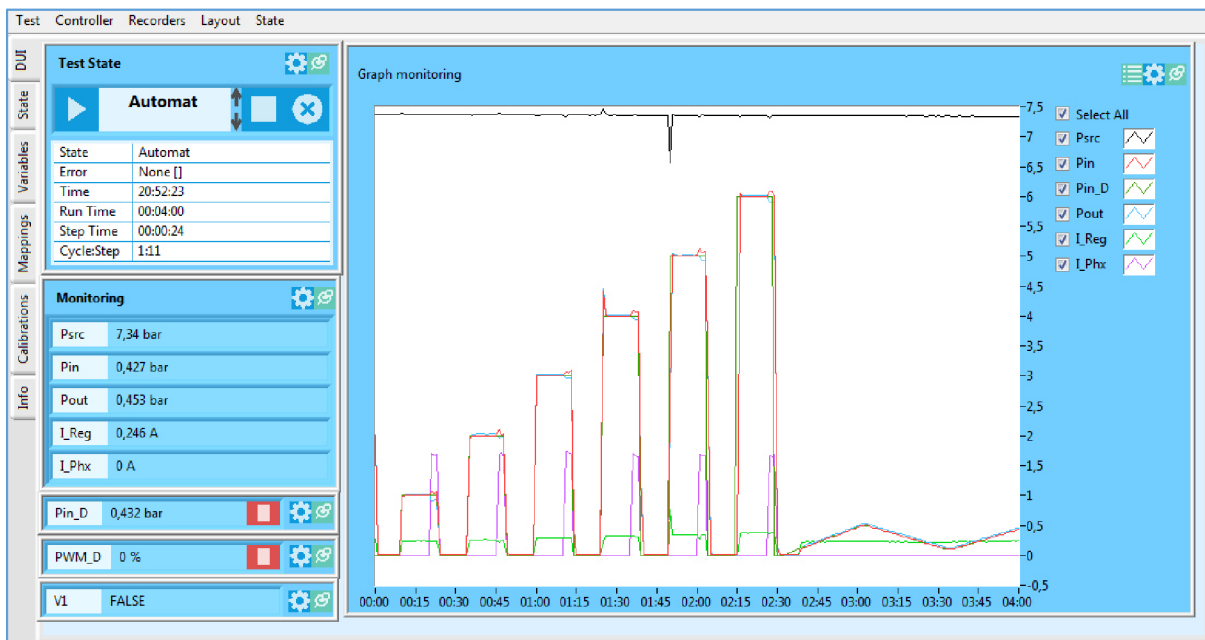
Obr. 24) Realizácia testovacieho pneumatického obvodu:
 a) jednotka na úpravu vzduchu, b) zapojenie testu ventilu Phoenix

V prvej fáze testovania pneumatických komponentov je realizovaný test regulačného členu pneumatického obvodu, kde najprv prebieha linearizácia poskytnutých kompaktných regulátorov pre zvýšenie kvality regulácie. V ďalšej časti je experimentálne nameraná a následne porovnaná charakteristika navrhnutého nakonfigurovaného regulačného systému tlaku (4.2.1) s charakteristikami poskytnutých kompaktných regulátorov tlaku (4.2.2). Na základe analýzy výsledkov je zvolené podľa špecifikácie riešenie regulačnej časti pneumatického obvodu na testovanie pneumatických komponentov.

V druhej fáze je analyzovaná a vyhodnotená tesnosť pneumatického obvodu bez testovaného komponentu. Následne je overená funkčnosť a tesnosť pneumatických komponentov poskytnutých od firmy IMI Norgren. Na testovanie tesnosti je zvolená metóda

poklesu tlaku, z dôvodu jednoduchosti metódy, ktorá požaduje prítomnosť len zdroja tlaku (kompresor) a jedného snímača tlaku, čo zníži náklady testovacieho pracoviska. Ďalším dôvodom je nižší čas stabilizácie tlaku ako je čas stabilizácie prietoku, kde prebieha počas merania kalibrácia prietokomeru.

Konfigurácia riadiaceho systému a testovacích sekvencií je realizovaná v aplikácii *Test Cell* (Obr. 25), ktorá bola vyvíjaná tímom Dr. Houšku v prostredí *NI LabVIEW*. Aplikácia slúži na realizáciu testovacích sekvencií a umožňuje zaistenie akčných zásahov systému v jednotných časových sledoch. Zároveň sú pomocou aplikácie monitorované všetky veličiny. Výstupom z testu aplikácie je súbor so záznamom dát, ktorý je ďalej možné spracovať. Na Obr. 25 je zobrazený príklad rozvrhnutého grafického užívateľského rozhrania (GUI) a časový priebeh zostavenej testovacej sekvencie v automatickom režime. Na ľavej strane GUI je k dispozícii ovládací a monitorovací panel, ktorý slúži na prepínanie stavu testu (automatický, manuálny,...), riadenie veličín v manuálnom režime a taktiež na monitorovanie stavu testu a jeho veličín. Na pravej strane sú zobrazené monitorované veličiny a ich časový priebeh v grafe.



Obr. 25) Priebeh testu v GUI aplikácie *Test Cell*

5.1 Linearizácia prvkov pneumatického obvodu

Pred samotným testom pneumatických komponentov je potrebná analýza a kalibrácia riadiacich a monitorovacích prvkov pneumatického obvodu. Všetky použité tlakomery a kompaktné regulátory (4.2.2) v pneumatickom obvode sú pneumaticky a elektricky zapojené a nakonfigurované podľa manuálu. Správne pripojenie je následne otestované. Použité snímače tlaku sú stotožnené na niekoľkých tlakových úrovniach, kde je prevedená linearizácia.

Ďalšou fázou je kalibračný test regulátorov, ktorý prebieha v manuálnom režime riadiacej aplikácie *Test Cell*, kde je analyzovaná závislosť vstupu na výstupe daných zariadení postupným skokovým zvyšovaním žiadaného tlaku. Výsledkom analýzy je určenie bodu

ustáleného tlaku v každom kroku, ktorý je ďalej použitý na aproximáciu funkcie závislosti vstupu na výstupe. Pomocou aproximácie funkcie je korigovaná nelinearita a ofset použitých regulačných zariadení. Kalibrácia je taktiež realizovaná v aplikácii *Test Cell*.

Výsledná charakteristika regulačného členu by mala mať lineárny charakter, no túto požiadavku je problematické fyzikálne realizovať v širokom rozsahu žiadaných tlakov (najmä nízkych). Z toho dôvodu je zostavený validačný test regulátoru s použitím aproximovaných charakteristík polynómom prvého (P1), druhého (P2) a tretieho stupňa (P3). Test je realizovaný pomocou zostavenej validačnej sekvencie v automatickom režime aplikácie *Test Cell*. Validáčna sekvencia pozostáva zo skokového zvyšovania tlaku v rozsahu od 0 do 0,5 bar s krokom veľkosti 0,1 bar a od 1 do 6 bar s krokom 1 bar. Doba ustálenia tlaku jedného kroku je zvolená na jednu minútu, z ktorej je následne analyzovaných a vyhodnotených posledných 30 sekúnd. Pre porovnanie kvality regulácie je spustený rovnaký validačný test aj pre navrhnutý regulačný systém s použitím pneumatických proporcionálnych ventilov NG3 a VGT.

Záznam nameraných dát je následne spracovaný. Výsledkom je grafické zobrazenie celého priebehu testu a detailné zobrazenie regulácie v určených jednotlivých krokoch celého rozsahu tlakov. Ako detail výsledných hodnôt merania sú zvolené prechodové charakteristiky žiadaného tlaku veľkosti 0,5 bar, a 5 bar, ktoré pokrývajú požadovanú škálu tlakového rozsahu v nízkych a aj vyšších hodnotách.

5.2 Testovanie regulačnej časti

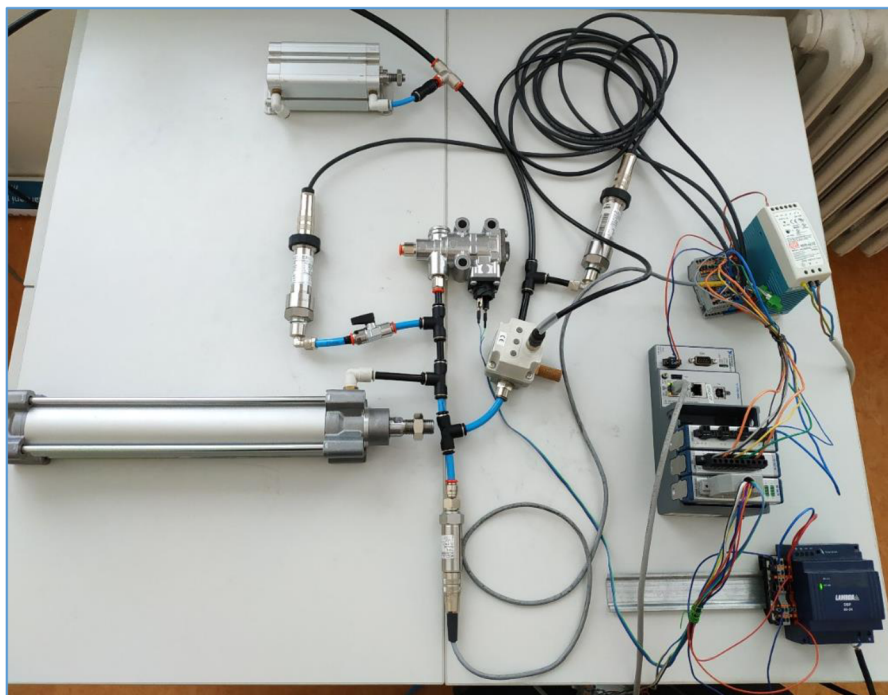
V ďalšej fáze je z nameraných dát testu analyzovaný a štatisticky spracovaný záznam posledných 30 sekúnd každého skoku, čo odpovedá stabilizovanej hodnote žiadaného tlaku. Pre zvolené žiadané tlaky je zobrazená priemerná hodnota nameraného tlaku v zvolenej časovej perióde. Na kvantitatívne posúdenie presnosti slúži štandardná odchýlka. Ďalším parametrom je relatívna odchýlka, ktorá vyjadruje pomer chyby, založenej na vypočítanej smerodajnej odchýlke, k priemernej hodnote merania. Smerodajná odchýlka vyjadruje absolútnu hodnotu chyby merania. Interval absolútnej chyby je možné vyjadriť dvojnásobnou hodnotou smerodajnej odchýlky. Celková relatívna chyba má takisto dvojnásobnú hodnotu. Zobrazené výsledné hodnoty vyjadrujú len polovicu celkového intervalu.

Ďalším parametrom posúdenia kvality je rozsah tlaku nameraného úseku, ktorému odpovedá rozdiel maximálnej a minimálnej hodnoty. Dôležitým štatistickým údajom je taktiež priemerná chyba ofsetu, ktorá je vyjadrená rozdielom priemerného tlaku a žiadaného tlaku v celom rozsahu merania. Posledným parametrom je relatívna chyba ofsetu, ktorá vyjadruje pomer priemernej chyby ofsetu k žiadanej hodnote. Na základe týchto parametrov je následne posúdená kvalita regulácie daného regulačného členu.

5.2.1 Regulátor SMC ITV 1050

Prvým analyzovaným kompaktným regulátorom je SMC ITV 1050. Ako príklad je zobrazené zapojenie obvodu kalibračného a validačného testu regulátoru (Obr. 26), kde je možné vidieť zhora prívod upraveného vzduchu, snímače tlaku a testovaný regulátor. V obvode sú použité pneumatické valce, ako funkčná náhrada vzdušníka na stabilizáciu tlakových zmien vzduchu.

Testovacia časť pneumatického obvodu nemá pripojený žiadny objekt, obsahuje len manuálny ventil a snímač tlaku, ktorý slúži ako redundantné monitorovanie tlaku za regulátorom. Na Obr. 26 je zobrazená použitá riadiaca jednotka cRIO-9064, ku ktorej sú pripojené karty pre elektrické zapojenie použitých vstupov a výstupov. V strede obrázku je možné vidieť zapojený pneumatický regulátor SMC ITV 1050.



Obr. 26) Realizácia zapojenia testu regulátoru SMC ITV 1050

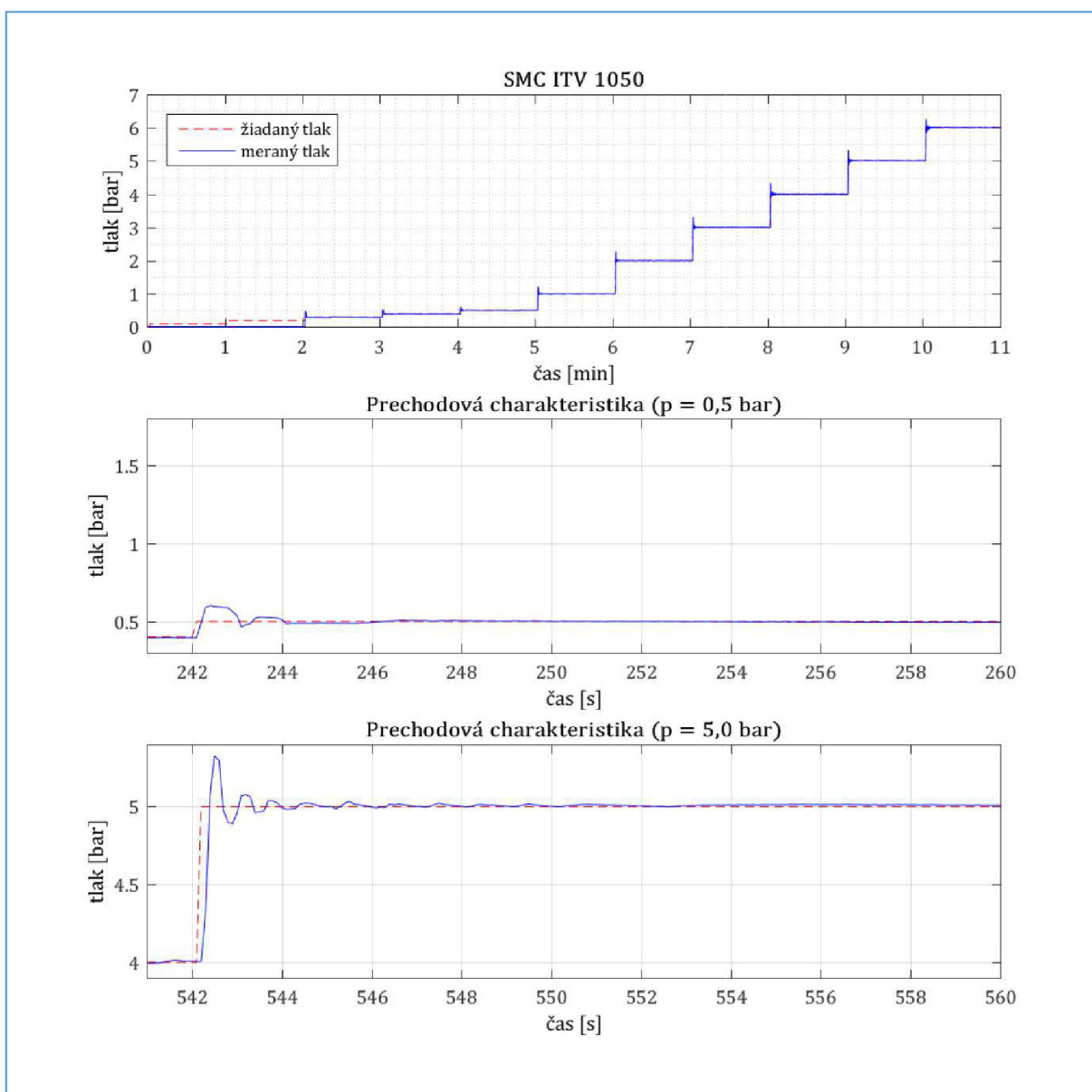
Výsledky aproximácie polynómami prvého, druhého a tretieho stupňa sú spracované a následne vyhodnotené (Tab. 3), kde je vyhodnotenie záznamu 30 sekúnd po zmene prechodového deja. Táto doba by mala odpovedať stabilizovanému stavu tlaku.

Tab. 3: Validačný test regulátoru SMC ITV 1050

SMC ITV 1050	Polynóm 1				Polynóm 2				Polynóm 3			
Žiadaný tlak [bar]	0,2	0,5	2,0	6,0	0,2	0,5	2,0	6,0	0,2	0,5	2,0	6,0
Priemer [bar]	0,017	0,480	1,995	6,003	0,017	0,497	1,997	6,011	0,017	0,501	2,002	6,011
Št. odchýlka [bar]	0,000	0,004	0,004	0,005	0,000	0,004	0,004	0,005	0,000	0,004	0,004	0,005
Rel. chyba [%]	0,00	0,78	0,22	0,08	0,00	0,80	0,19	0,08	0,00	0,86	0,18	0,08
Rozsah [bar]	0,000	0,016	0,020	0,023	0,000	0,020	0,018	0,026	0,000	0,017	0,016	0,022
Min [bar]	0,017	0,474	1,986	5,991	0,017	0,488	1,989	5,998	0,017	0,492	1,993	6,001
Max [bar]	0,017	0,490	2,006	6,014	0,017	0,508	2,007	6,024	0,017	0,509	2,009	6,023
Priem. offset [bar]	-0,183	-0,020	-0,005	0,003	-0,183	-0,003	-0,003	0,011	-0,183	0,001	0,002	0,011
Rel. offset [%]	-91,50	-4,00	-0,25	0,05	-91,50	-0,60	-0,15	0,18	-91,50	0,20	0,10	0,18

Na základe vyhodnotených údajov je možné vidieť, že regulátor SMC ITV 1050 nereaguje na vstup pre hodnoty nízkych tlakov (0,2 bar), čomu odpovedá vysoký ofset od žiadanej hodnoty. Podľa aproximácie polynómom P1 je možné vidieť vyšší ofset aj pri hodnotách 0,5 bar, z čoho vyplýva, že daný ventil nemá lineárnu charakteristiku. Lepšie výsledky predstavoval regulátor s kalibráciou pomocou polynómov P2 a P3.

Stabilnejšia regulácia bola pri použití polynómu P2, pretože u vyšších tlakoch sa u P3 mierne zvyšoval ofset. Presnosť regulácie pre tlaky od 0,5 bar do 5 bar je približne v rozsahu hodnoty ± 4 mbar s ofsetom ± 7 mbar. Z priebehu testu (Obr. 27), ktorý trval 11 minút a prechodovej charakteristiky (18 sekúnd) je možné vidieť dobu stabilizácie regulátoru. Pri zmene žiadanej hodnoty nastal taktiež prechod. Vzhľadom na cenu zariadenia sú tieto výsledky očakávané. Grafické zobrazenie prechodových charakteristík má jednotný rozsah osí (1,5 bar).



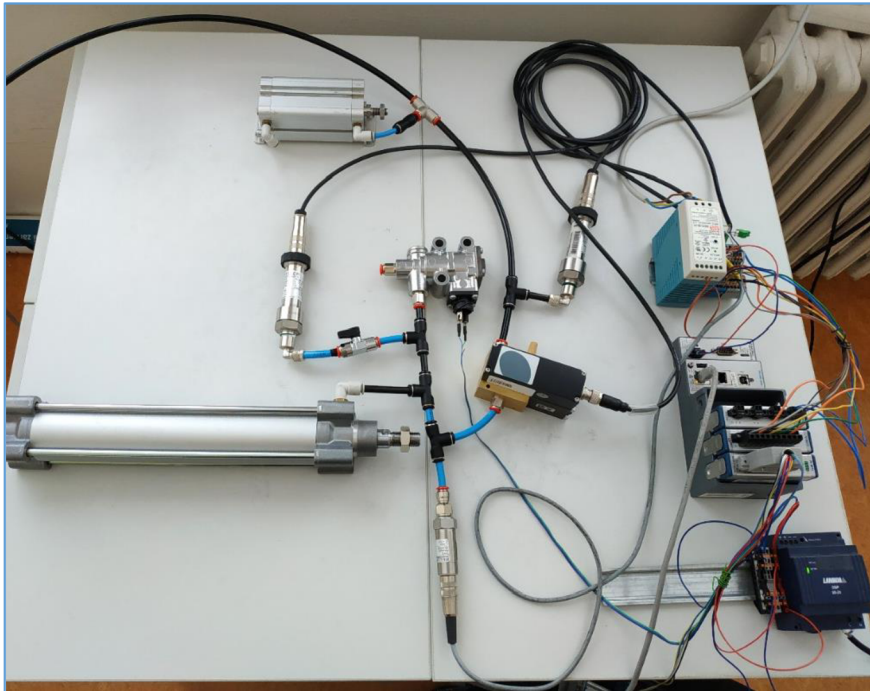
Obr. 27) Test regulátoru SMC ITV 1050

Na grafickom zobrazení regulácie regulátoru SMC ITV 1050 v prílohe 1 je zobrazený detail tlakového priebehu ustálenia po dobe 30 sekúnd. Graficky je vyznačené aj štatistické

vyhodnotenie. Prehľadnosť pri porovnaní jednotlivých meraní je zabezpečená statickým rozsahom osí grafu, kde na horizontálnej osi je časový úsek 30 s a na vertikálnej osi je vždy hodnota žiadaného tlaku $\pm 0,03$ bar.

5.2.2 Regulátor Stasto RE16

Druhým analyzovaným kompaktným regulátorom je Stasto RE16. Zapojenie testu regulátoru (Obr. 28) je obdobné ako v prípade regulátoru SMC. Ako u predošlého regulátoru sú taktiež výsledky aproximácie polynómami prvého, druhého a tretieho stupňa a následne vyhodnotené.



Obr. 28) Realizácia zapojenia testu regulátoru Stasto RE16

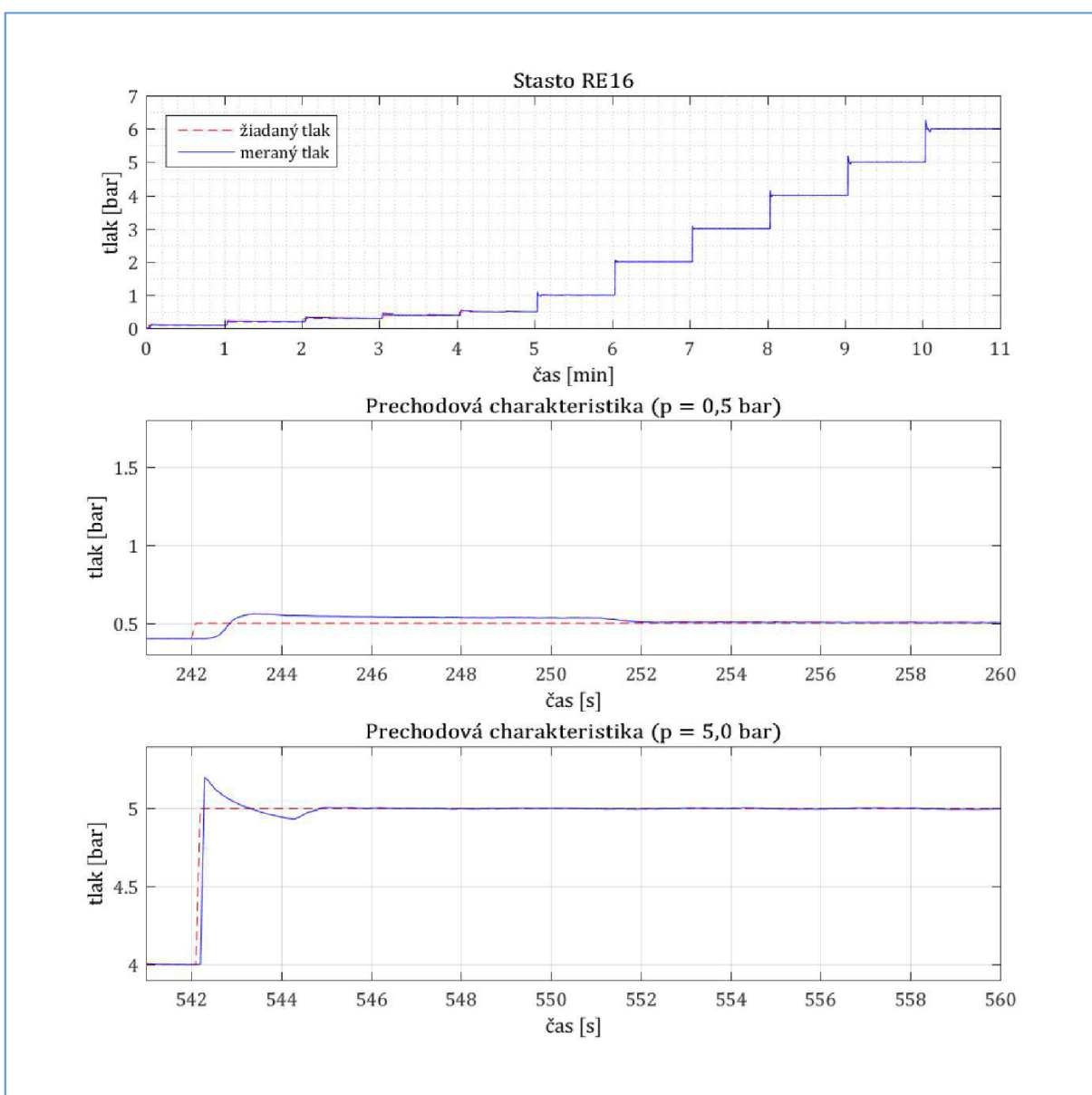
Štatistické vyhodnotenie regulácie ustáleného tlaku po dobu 30 sekúnd pre jednotlivé aproximácie polynómom prvého až tretieho stupňa. (Tab. 4).

Tab. 4: Validačný test regulátoru Stasto RE16-14-0/6

Stasto RE16	Polynóm 1				Polynóm 2				Polynóm 3			
Žiadaný tlak [bar]	0,2	0,5	2,0	6,0	0,2	0,5	2,0	6,0	0,2	0,5	2,0	6,0
Priemer [bar]	0,210	0,501	2,003	5,997	0,210	0,503	2,001	6,003	0,213	0,508	2,004	6,007
Št. odchýlka [bar]	0,003	0,008	0,001	0,004	0,003	0,006	0,001	0,004	0,002	0,006	0,001	0,004
Rel. chyba [%]	1,24	1,54	0,06	0,07	1,23	1,28	0,05	0,07	1,11	1,13	0,06	0,07
Rozsah [bar]	0,010	0,026	0,008	0,019	0,012	0,025	0,005	0,018	0,010	0,023	0,006	0,018
Min [bar]	0,205	0,488	1,999	5,988	0,204	0,491	1,998	5,994	0,208	0,498	2,001	5,997
Max [bar]	0,215	0,514	2,007	6,007	0,216	0,516	2,003	6,012	0,218	0,521	2,007	6,015
Ofset [bar]	0,010	0,001	0,003	-0,003	0,010	0,003	0,001	0,003	0,013	0,008	0,004	0,007
Rel. ofset [%]	5,00	0,20	0,15	-0,05	5,00	0,60	0,05	0,05	6,50	1,60	0,20	0,12

Na základe výstupných dát je možné vidieť, že regulátor Stasto RE16 reaguje na vstup aj u hodnôt nízkych tlakov (0,2 bar), no stále je prítomný ofset od žiadanej hodnoty. Regulácia mala dlhú dobu stabilizácie, no v rozsahu tlakov od 1 do 5 bar bol regulátor schopný regulovať s vysokou presnosťou ± 1 mbar. U tlaku 6 bar je vidieť zvýšenie smerodajnej odchýlky, no jedná sa o hraničnú možnú hodnotu tlaku regulácie pre toto zariadenie. Najlepšie výsledky dosahoval regulátor pomocou aproximácie polynómom P2.

Z priebehu testu a prechodovej charakteristiky (Obr. 29) je možné vidieť, že doba stabilizácie tlaku pomocou tohto regulátoru je pre stredné hodnoty tlakov rýchlejšia a pri zmene žiadanej hodnoty nastal menší prekmit v porovnaní s regulátorom SMC ITV 1050. Kvalita regulácie je teda lepšia v rozsahu stredných tlakov. Jedná sa však o drahšie zariadenie, a preto je očakávaná vyššia kvalita, nie len v prevedení produktu, ale aj v jeho funkcii. Regulátor reaguje na vstup aj pri požadovanom nízkom tlaku, no kvalita regulácie stále nie je dostatočná.



Obr. 29) Test regulátoru Stasto RE16

Na grafickom zobrazení regulácie pomocou regulátoru Stasto Re16 v prílohe 2 je zobrazený detail tlakového priebehu ustálenia po dobe 30 sekúnd.

5.2.3 Navrhnutý regulačný systém tlaku

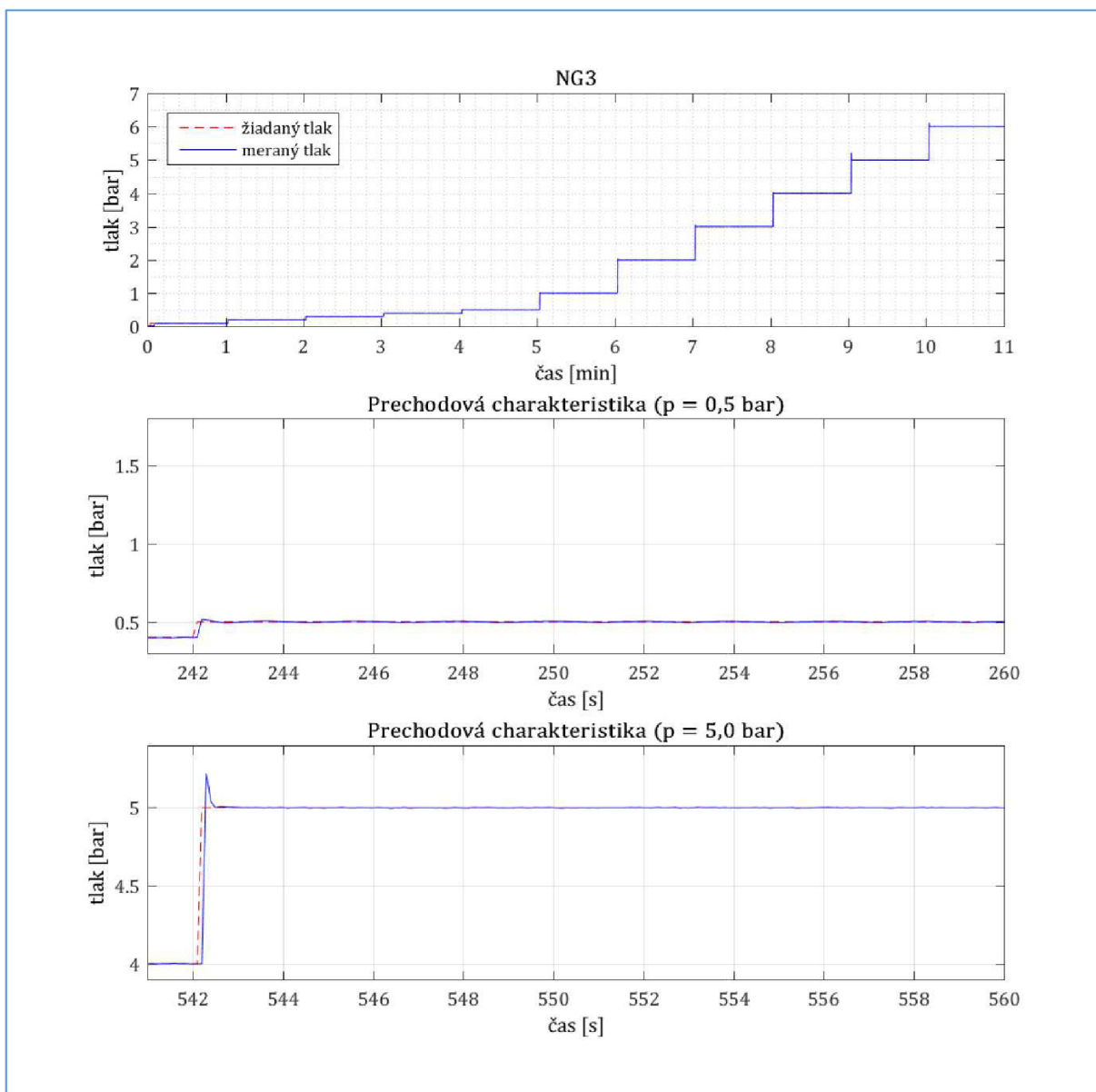
Na posúdenie a porovnanie kvality regulácie tlaku je rovnaký validačný test prevedený aj na navrhnutom regulačnom systéme s ventilmi NG3 a VGT. Tieto ventily sú riadené PWM signálom z regulátoru, ktorý beží na FPGA riadiaceho systému cRIO-9064. Po nastavení regulátoru pre jednotlivé zariadenia je spustený validačný test ako u kompaktných regulátorov. Výsledky testov sú rovnako spracované a štatisticky vyhodnotené (Tab. 5). Rovnako je na vyhodnotenie použitých 30 sekúnd záznamu po prechodovom deji, čo odpovedá stabilizovanej hodnote tlaku.

Tab. 5: Validačný test regulácie s ventilom NG3 a VGT

Žiadaný tlak [bar]	NG3				VGT			
	0,2	0,5	2,0	6,0	0,2	0,5	2,0	6,0
Priemer [bar]	0,200	0,500	2,000	6,000	0,199	0,501	2,000	5,998
Št. odchýlka [bar]	0,003	0,002	0,002	0,001	0,019	0,019	0,016	0,019
Rel. chyba [%]	1,38	0,47	0,10	0,01	9,44	3,85	0,78	0,32
Rozsah [bar]	0,012	0,011	0,010	0,006	0,066	0,066	0,055	0,063
Min [bar]	0,194	0,495	1,996	5,997	0,168	0,467	1,972	5,969
Max [bar]	0,206	0,506	2,006	6,003	0,234	0,533	2,027	6,032
Offset [bar]	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,001	0,000	-0,002
Rel. offset [%]	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,50	0,20	0,00	-0,03

Z výsledkov a priebehu regulácie pomocou proporcionálneho ventilu NG3 (Obr. 30) je vidieť, že regulácia prebieha bez offsetu so štandardnou odchýlkou približne ± 2 mbar. Pomocou regulačného systému s ventilom NG3 je možné regulovať s vysokou presnosťou v celom rozsahu dostupného zdrojového tlaku, taktiež aj v nízkych tlakoch do 0,5 bar. Stabilizácia tlaku prebieha do doby kratšej ako 1 sekunda v plnom rozsahu testovaného zdrojového tlaku.

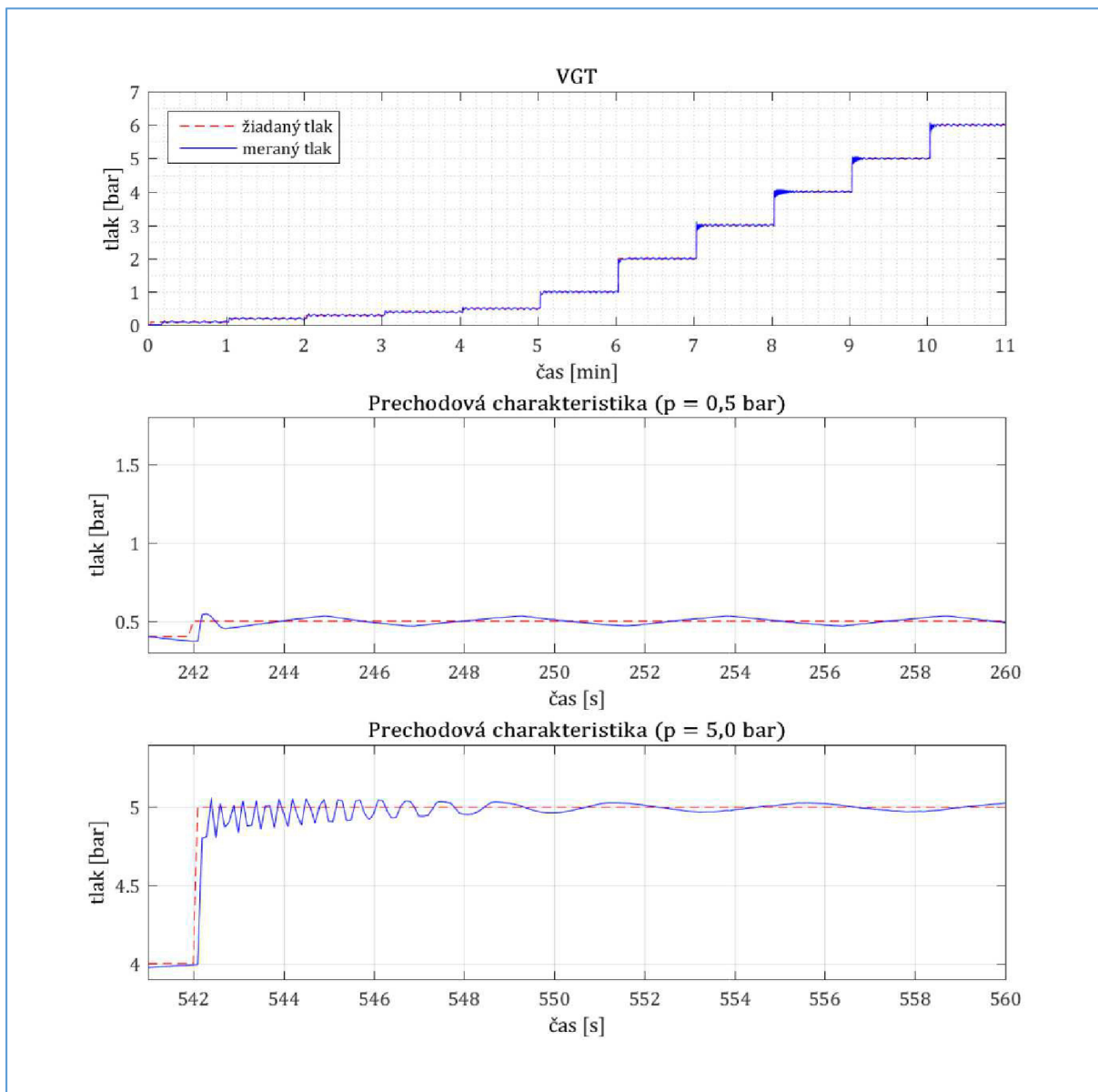
Na grafickom zobrazení regulácie pomocou proporcionálneho ventilu NG3 v prílohe 3 je zobrazený detail tlakového priebehu ustálenia po dobe 30 sekúnd.



Obr. 30) Regulácia s proporcionálnym ventilom NG3

Druhý testovaný regulačný systém je realizovaný s použitím servoventilu VGT. Na základe výsledkov, priebehu testu a prechodovej charakteristiky (Obr. 31) je možné vidieť, že regulácia prebieha s miernym ofsetom, no štandardná odchýlka sa pohybuje v rozsahu približne 60 mbar. Podstatne horšia je aj doba stabilizácie tlaku. Tento jav je možné zlepšiť inou konfiguráciou regulátoru, no už počas ladenia regulátoru javil ventil známky nelineárnej charakteristiky v celom rozsahu tlakov. Zapríčinené to je aj tým, že tento ventil sa primárne používa na reguláciu prietoku.

Na grafickom zobrazení regulácie pomocou servoventilu VGT v prílohe 4 je zobrazený detail tlakového priebehu ustálenia po dobe 30 sekúnd.



Obr. 31) Regulácia so servoventilom VGT

Na základe vyhodnotenia výsledkov regulácie je zvolený ako hlavný prvok regulačnej časti pneumatického obvodu navrhnutý regulačný systém s proporcionálnym ventilom NG3, ktorý má lineárnu charakteristiku a je ním možné rýchlo a spoľahlivo regulovať v celom rozsahu tlakov. Zo všetkých testovaných regulátorov dokázal najspoľahlivejšie regulovať aj na požadované hodnoty nízkych tlakov.

5.3 Testovanie pneumatických komponentov

Test pneumatických komponentov pozostáva z dvoch častí. Prvý test komponentu je založený na overení funkčnosti daného zariadenia podľa špecifikácie. Druhý test spočíva v zistení tesnosti daného prvku výpočtom úniku zo známeho objemu testovacej časti (mŕtvy objem) a vnútorného objemu testovaného pneumatického komponentu.

5.3.1 Test tesnosti testovacej časti obvodu

Testovacia časť pneumatického obvodu na meranie úniku by mala pozostávať z pneumatických komponentov, ktoré sa vyznačujú tesnosťou rádovo vyššou, ako je očakávaný únik testovaného objektu. V experimente boli použité pneumatické komponenty, ktoré boli k dispozícii, a teda výsledky odpovedajú daným podmienkam.

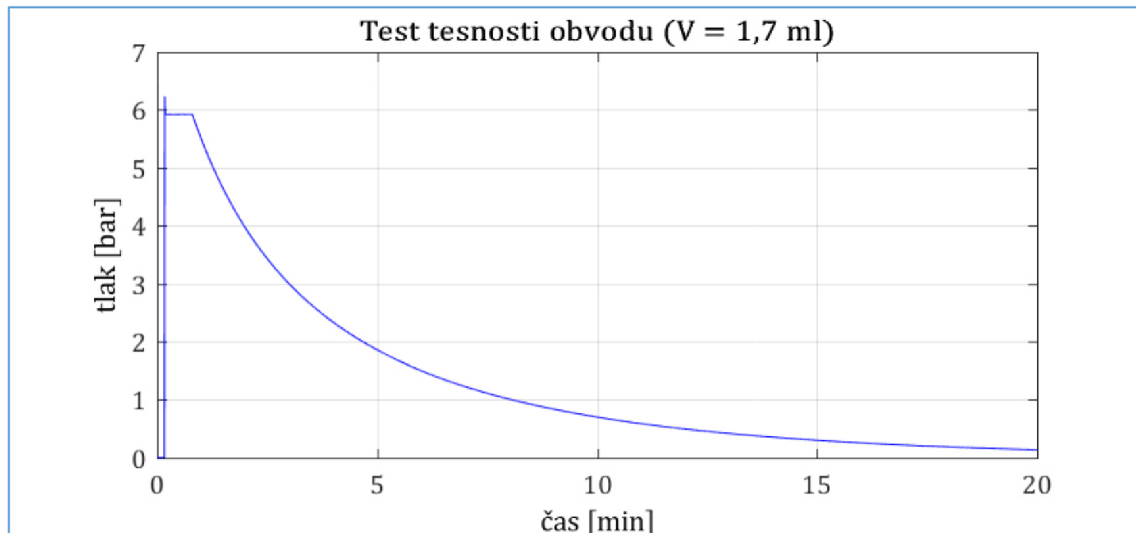
Testovacia časť pozostáva z guľového manuálneho ventilu, hadička a kovovej kolenovej spojky k snímaču tlaku (Obr. 32). Medzi tieto prvky sa potom pripojí pomocou hadičky testovaný objekt. Z tohto dôvodu je pred samotným testom overená tesnosť a zistený únik testovacej časti. Test začína zistením vnútorného objemu, ktorý je vypočítaný zo známych rozmerov použitých komponentov. Výsledný vnútorný objem je približne 1,7 ml.



Obr. 32) Testovacia časť obvodu (tlakomer, hadička, ventil)

Presnosť výpočtu úniku a dĺžka testu tesnosti závisí na presnosti použitého snímača tlaku a frekvencii snímania dát. V experimente je nutné zvoliť interval poklesu tlaku Δp , pomocou ktorého je vypočítaný únik pri danom tlaku. Interval Δp by mal byť väčší ako je rozlíšenie použitého snímača tlaku, no nemôže byť extrémne veľký, pretože veľkosť úniku nemá v čase lineárny charakter a sa so znižujúcim tlakom sa pri konštantnom objeme znižuje. Pre výpočet je vyžadovaný záznam tlakovej zmeny, a preto chyba offsetu snímača sa kompenzuje odčítaním dvoch nameraných hodnôt rovnakým snímačom. Dôležité je mať záznam dát s dostatočnou frekvenciou vzorkovania, aby zvolený interval poklesu tlaku Δp bol zastúpený dostatočným počtom nameraných hodnôt.

Realizovaný test tesnosti obvodu trval 20 minút, kde je zachytený celý priebeh úniku netesnosťami metódou poklesom tlaku s periódou záznamu 0,1 s (Obr. 33). Záznam je následne spracovaný a vyhodnotený. Výsledkom testu je vypočítaný únik pre tlaky 6, 4, 2 a 0,5 bar. Pre malý objem pneumatického obvodu ($V = 1,7$ ml) je priebeh úniku rýchly. Zo záznamu je zvolená monitorovaná doba poklesu tlaku $\Delta p = 100$ mbar, pri danej vzorkovacej frekvencii záznamu.



Obr. 33) Priebeh poklesu tlaku v teste tesnosti obvodu

Následne je podľa vzťahu (12) je vypočítaný únik pre danú tlakovú zmenu. Výsledky úniku sú prepočítané do štandardizovaných jednotiek, ktoré vyjadrujú prietok za normálnych podmienok (Tab. 6). Toto vyjadrenie zahŕňa vo výpočte teplotu a tlak okolia za normálnych podmienok. Typicky je štandardizovaný únik vyjadrený v l_n/min (normolitre za minútu). Odvođená jednotka je cm^3_n/min .

Tab. 6: Únik netesnosťami obvodu ($V = 1,7 \text{ ml}$)

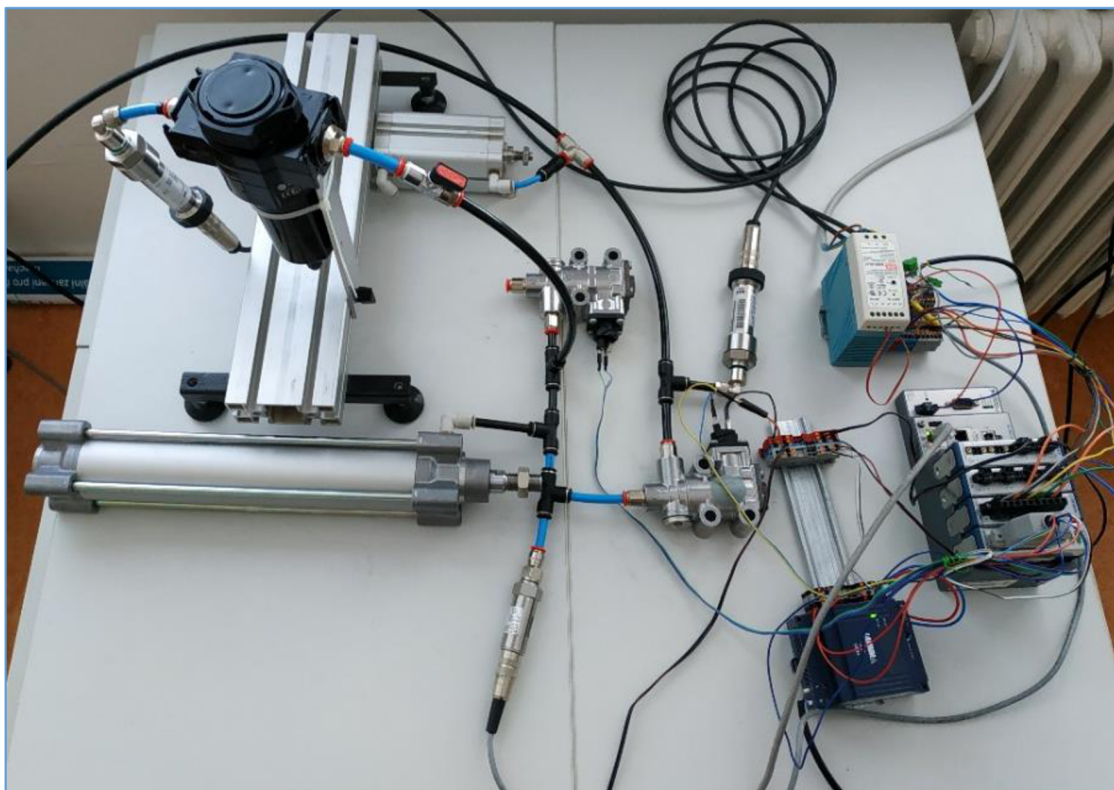
Tlak	q_L [mbar.l/s]	q_{Ln} [cm^3_n/min]
6 bar	0,0614	3,64
4 bar	0,0325	1,93
2 bar	0,0118	0,70
0,5 bar	0,0021	0,12

Z výsledkov je poznať, že vzhľadom na použité pneumatické prvky, má obvod očakávané výsledky úniku. Vzhľadom na použité testovacie prostriedky je možné tvrdiť, že kvantitatívne výsledky úniku sú orientačné. Presnosť samotného testu by sa zvýšila znížením monitorovanej doby Δt , poklesu Δp a zvýšením vzorkovacej frekvencie záznamu. Pre použitie v praxi je nutné využiť pre testovaciu časť obvodu kvalitnejšie pneumatické prvky, ktoré vykazujú rádovo vyššiu tesnosť.

5.3.2 Test filtra s automatickým odtokom

Test filtra s automatickým odtokom (Obr. 34) začína overením zapojenia obvodu a funkčnou kontrolou ventilov ich sekvenčným spínaním. Následne je privedený do obvodu vzduch a spustí sa funkčný test mechanického spínania odtoku v automatickom režime v aplikácii *Test Cell*. Na funkčný test je požadovaná prítomnosť prietokomeru pripojeného k odtoku filtra, ktorým je možné detegovať únik. Prietokomer s potrebným rozlíšením nebol v čase experimentu k dispozícii.

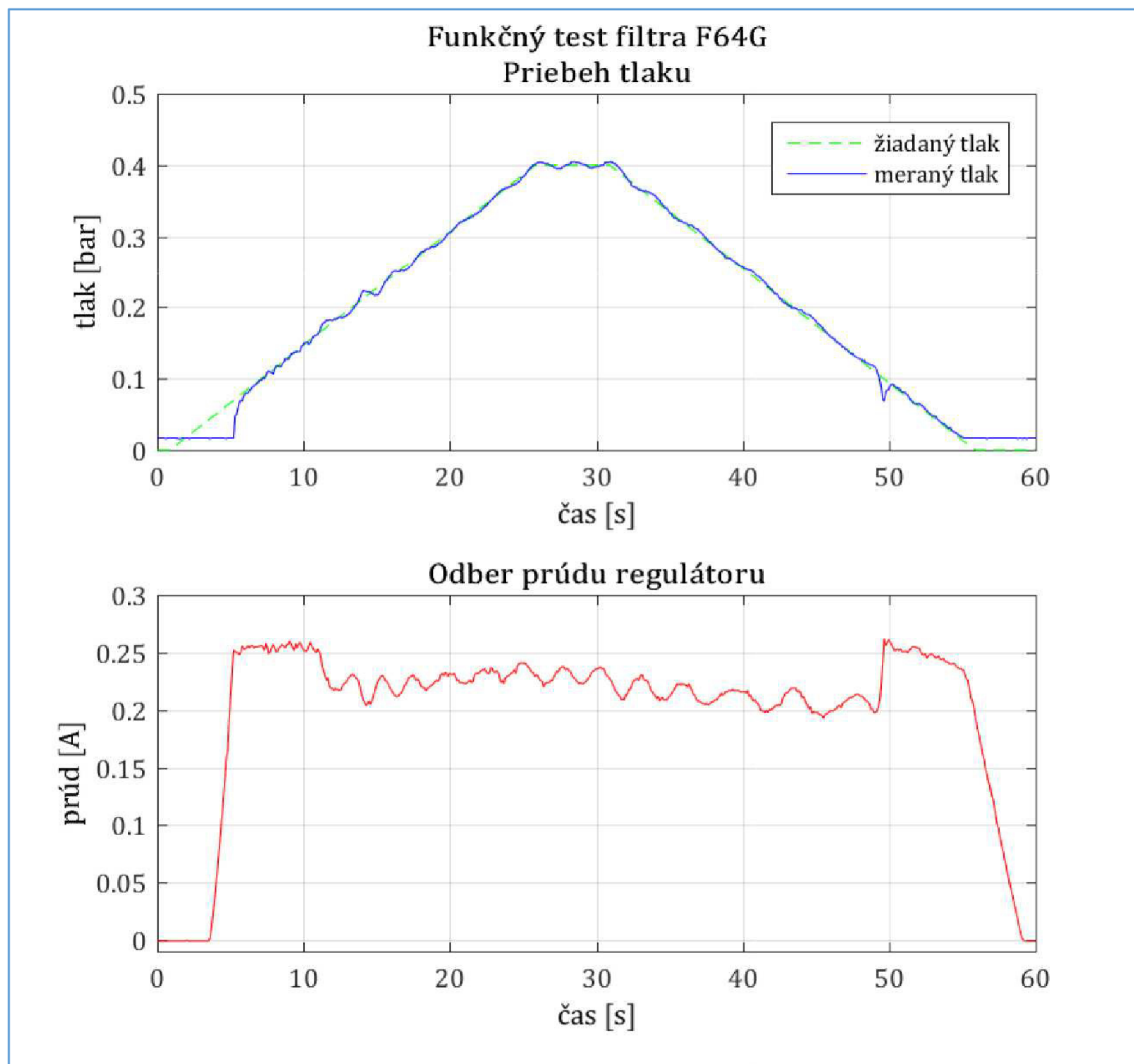
Náhradou za prítomnosť prietokomeru je monitorovanie odberu prúdu regulátoru tlaku. Odber prúdu regulátoru sa pri zmene tlaku v obvode mení, preto je možné prudké zmeny sledovať aj z prúdovej charakteristiky. Otvorením alebo uzavretím odtoku nastáva v obvode zmena tlaku, ktorú regulátor kompenzuje a tento jav je možné zachytiť. Tento variant funkčného testu dokáže detegovať zmenu stavu odtoku, no nedokáže kvantifikovať prietok z odtoku filtra.



Obr. 34) Realizácia testu filtra F64G

Testovacia sekvencia funkčnosti filtra F64G prebieha zvyšovaním tlaku z 0 bar na 0,4 bar. Vďaka možnosti rýchlej regulácie systému je použitý ako vstupný signál rampa. Z grafu (Obr. 35) je možné vidieť, že tesne po 10. sekunde testu pri tlaku približne 0,18 bar (menší než 0,3 bar) nastáva uzatvorenie odtoku filtra, čo je možné vidieť na znížení odberu prúdu regulátoru z 0,25 A na približne 0,22 A. Následným znižovaním tlaku na 0 bar taktiež pomocou rampy je pozorované pri tlaku cca 0,14 bar (menší než 0,2 bar) otvorenie filtra. V tomto bode nastáva zvýšenie odberu prúdu regulátoru z približne 0,20 A na 0,26 A, ktorý sa snaží tlakovú zmenu dorovnať. Filter splnil funkčný test.

Regulácia PWM signálom prebieha s frekvenciou 1000 Hz a záznam je nastavený na frekvenciu zápisu 10 Hz, preto je prúdová charakteristika (Obr. 35) vykreslená v tvare sinusoidy.



Obr. 35) Funkčný test filtra F64G

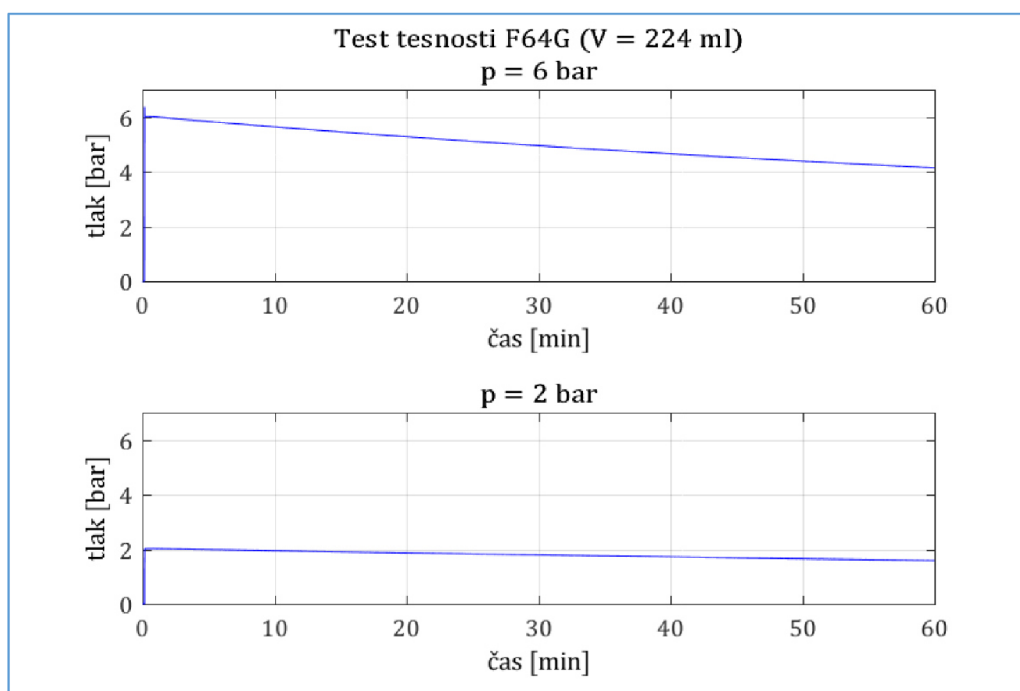
Po funkčnom teste filtra nasleduje poloautomatický test tesnosti, kde testovacia sekvencia merania úniku netesnosťami prebieha privedením tlaku 6 bar pomocou regulátoru a po ustálení sa manuálne odpojí pomocou manuálneho ventilu testovacia časť od regulačnej. Po odpojení nastáva v testovacej časti kvôli netesnostiam pokles tlaku, ktorý je zaznamenaný s periódou 0,1s. Z dôvodu väčšieho objemu testovanej súčasti je zobrazený záznam 1 hodiny, aby bol pokles tlaku viditeľný (Obr. 36). Rovnaký postup testu prebieha aj pre požadovaný tlak 2 bar.

Zo známej veľkosti objemu filtra (0,220 l) a mŕtveho objemu pneumatického obvodu (0,004 l) je následne z poklesu tlaku v čase vypočítaná veľkosť úniku netesnosťami. Výsledky sú vyjadrené pre hodnoty poklesu tlaku (Δp) 100 mbar, 50 mbar a 10 mbar (Tab. 7). V tabuľke je zobrazený priemerný tlak, počas ktorého bol nameraný pokles Δp za čas Δt . Priemerný tlak je vypočítaný z nameraných hodnôt v časovom úseku Δt . Z výsledkov je možné vidieť, že na základe časovej závislosti tlaku sa pri zvyšujúcom intervale Δt , resp. Δp , zvyšuje aj vypočítaná hodnota úniku. Príčina toho je nelineárna charakteristika úniku.

Tab. 7: Únik netesnosťami obvodu s filtrom F64G ($V = 224$ ml)

Tlak	\bar{p} [bar]	Δp [mbar]	Δt [s]	q_L [mbar.l/s]	q_L [cm ³ _n /min]
6 bar	5,952	100	140	0,1600	9,47
	5,977	50	71	0,1577	9,33
	5,997	10	15	0,1493	8,84
2 bar	1,951	100	743	0,0302	1,79
	1,975	50	371	0,0302	1,78
	1,995	10	76	0,0297	1,76

Na základe znalosti úniku samotnej testovacej časti je možné považovať výsledky úniku za očakávané. Filter pozostáva z niekoľkých častí, ktoré hlavne v rámci spojov vytvárajú netesnosti. Hodnotu úniku filtra je možné približne získať odčítaním nameraného úniku testovacieho obvodu. Pre hodnotu tlaku 6 bar je to približne 5,5 cm³_n/min a pre hodnotu tlaku 2 bar približne 1,1 cm³_n/min.



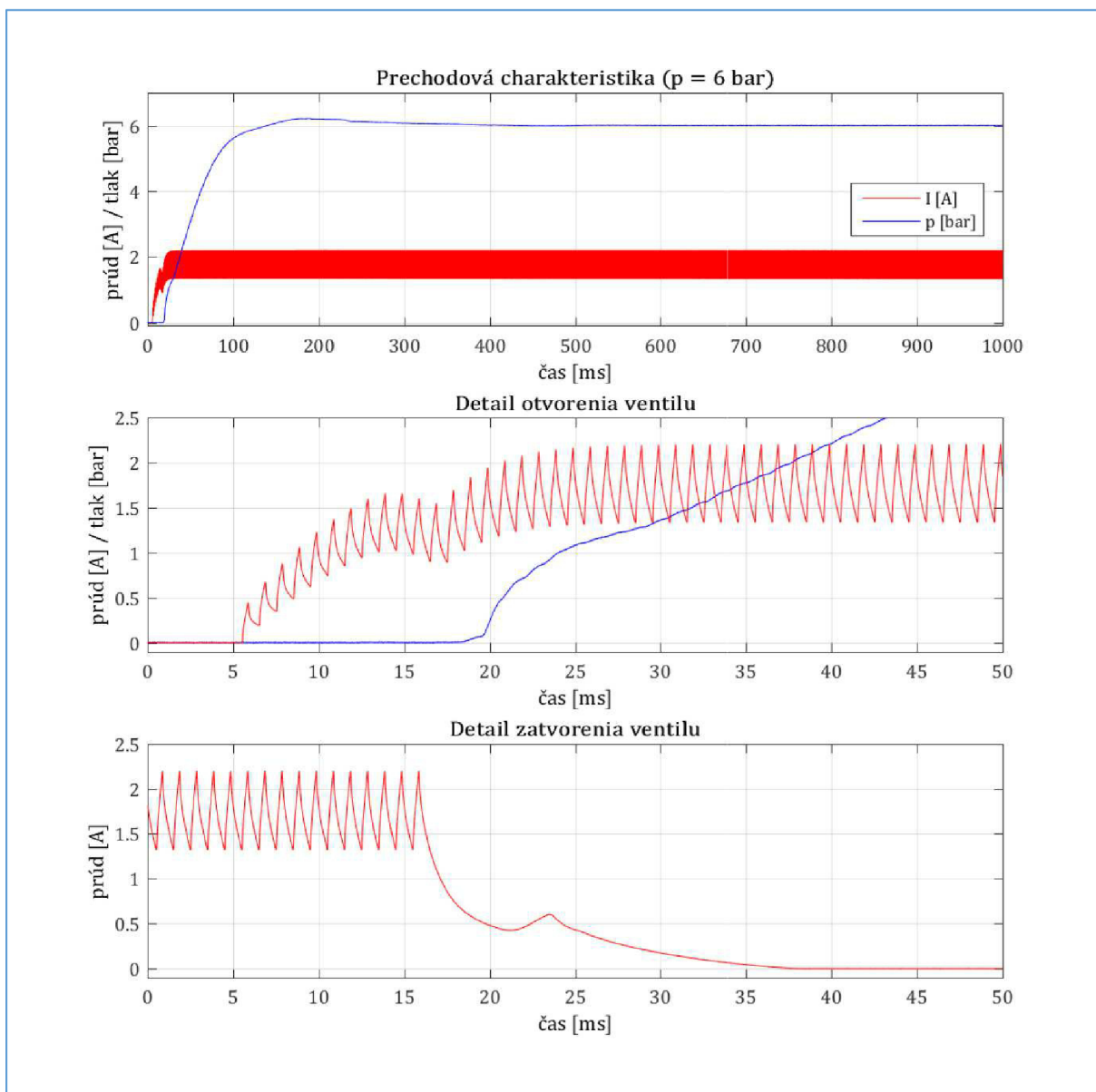
Obr. 36) Priebeh testu tesnosti filtra F64G pri tlaku 6 a 2 bar

5.3.3 Test pneumatického ventilu

Test pneumatického ventilu, poskytnutého od firmy IMI Norgren, začína overením zapojenia všetkých prvkov obvodu a sekvenčným spínaním ventilov, vrátane testovaného ventilu. Po privedení vzduchu sa spustí funkčný test v automatickom režime v aplikácii *Test Cell*. Za ventilom sa nachádza pneumatický valec, ktorý je po zopnutí ventilu naplnený. Známy objem valca je $V = 69,7$ ml. Funkčný test ventilu overuje prechodovú a spínaciu charakteristiku ventilu.

Ventil sa vyznačuje tým, že vo vypnutom stave (základná poloha) je uzavretý (NC – normally closed). Po nabudení elektromagnetu cievky sa začne pohybovať kotva, ktorá po doraze zapríčini zvýšenie indukčnosti cievky a nastáva prúdový pokles. V teste sa hodnotí priebeh prúdu a doba zopnutia pohyblivej kotvy po elektromagnetickom pôsobení cievky, pri ktorom nastáva otvorenie samotného ventilu. Tento dej je veľmi rýchly, a preto je použitý záznam s frekvenciou 50 kHz, ktorý je následne vyhodnotený (Obr. 37). Funkčný test prebieha pri veľkostiach tlaku v obvode od 1 bar do 6 bar.

Graficky (Obr. 37) je zobrazený časový priebeh prúdu a tlaku na výstupe ventilu po jeho zopnutí. Nábeh tlaku po otvorení ventilu je vyjadrený prechodovou charakteristikou. Zobrazené sú charakteristiky pre tlak 6 bar v časovom rozmedzí 1 s a detail prúdového poklesu v stave zopnutia ventilu v časovom intervale 50 ms.



Obr. 37) Funkčný test ventilu Phoenix

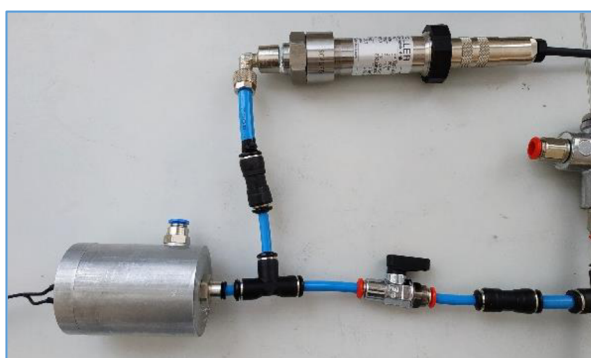
V grafickom zobrazení odberu prúdu (Obr. 37) je možné vidieť priebeh riadiaceho PWM signálu pneumatického ventilu, ktorého veľkosť je 1 kHz. Zmena indukčnosti cievky je

vyvolaná aj pri uzatváraní ventilu, čo je možné taktiež pozorovať zvýšením prúdu (Obr. 37). Uzatvorenie ventilu je taktiež veľmi rýchly jav a trvá približne 20 ms. Doba otvorenia ventilu v závislosti na vstupnom tlaku je zobrazená v Tab. 8.

Tab. 8 Závislosť tlaku na dobe otvorenia ventilu

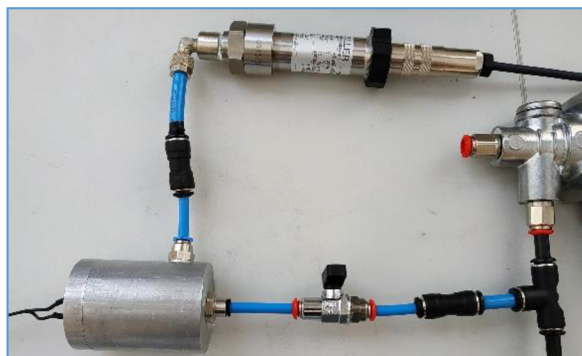
p [bar]	1	2	3	4	5	6
t [ms]	17	16	14	13	12	12

Druhou časťou testu pneumatického ventilu Phoenix je meranie úniku netesnosťami metódou poklesu tlaku, kde sa hodnotí únik v natlakovanej časti obvodu pred uzavretým ventilom, ktorá má známy objem $V = 3,6$ ml (Obr. 38). Táto časť je v priebehu testu tesnosti izolovaná manuálnym ventilom od regulačnej časti.



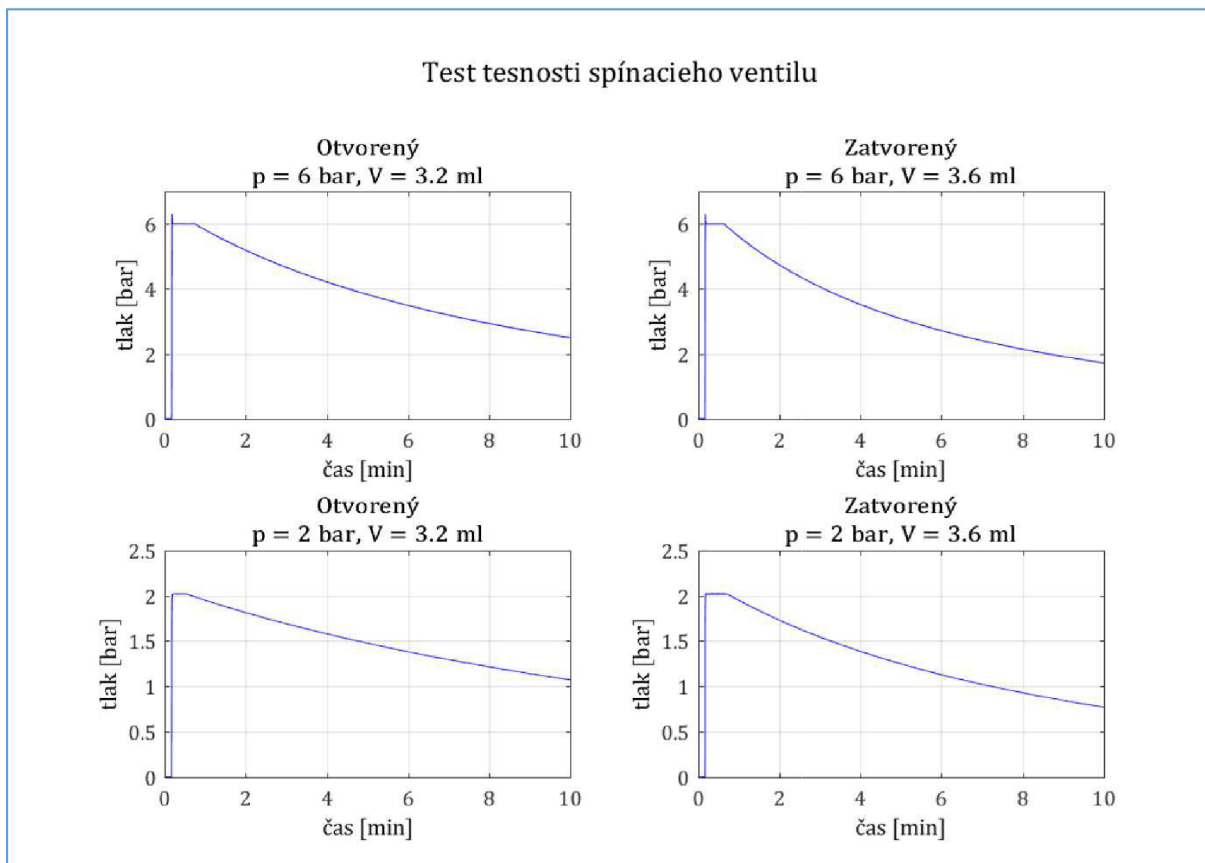
Obr. 38) Realizácia testu tesnosti uzavretého ventilu

V ďalšej časti sa ventil otvorí pomocou prúdu PWM signálu, natlakuje sa a odpojí od zdroja tlaku manuálnym ventilom. Hodnotí sa únik ventilu v otvorenej polohe (Obr. 39). Objem testovacej časti pre otvorený ventil je $V = 3,2$ ml. Tento objem je menší, pretože obsahuje o jeden spoj menej, ktorý je väčší ako pripočítaný vnútorný objem ventilu. Testy tesnosti sú realizované pri tlaku 6 a 2 bar.



Obr. 39) Realizácia testu tesnosti otvoreného ventilu

Výsledky testu tesnosti ventilu Phoenix v otvorenej a zatvorenej polohe pre tlak v obvode 6 a 2 bar (Obr. 40) sú vyjadrené pre zvolené hodnoty poklesu tlaku (Δp) veľkosti 100 mbar, 50 mbar a 10 mbar (Tab. 9), ku ktorým je vypočítaná priemerná hodnota tlaku z nameraných hodnôt a únik.



Obr. 40) Test tesnosti ventilu spínacieho Phoenix

Z výsledkov je možné na prvý pohľad vidieť, že v otvorenom stave je nameraný únik ventilu Phoenix menší ako v zatvorenom stave. Počas otvoreného stavu však tečie ventilom prúd veľkosti približne 1,8 A, ktorý spôsobuje výrazné zahrievanie ventilu, a teda aj vzduchu v testovanom objeme. Na základe stavovej rovnice plynu je známe, že ohriatie vzduchu spôsobí zvýšenie tlaku v konštantnom objeme, čo negatívne ovplyvní testovanie tesnosti metódou poklesu tlaku.

V tomto prípade výpočtu úniku je nutné kompenzovať tlakový nárast zapríčinený zvyšujúcou sa teplotou vzduchu. V prevedenom experimente je reálny únik vyšší ako nameraný z dôvodu, že sa malý meraný objem rýchle ohrial a zvýšil svoj tlak. Počas experimentu nebolo dostupný snímač teploty, ktorým by bolo možné zistiť zvýšenie teploty vzduchu a kompenzovať tak tlakový nárast.

Súčasťou použitého tlakového snímača Keller je teplotný snímač, ktorý funguje v prípade digitálneho zapojenia. S týmto zapojením nebolo pôvodne uvažované, pretože test bol naplánovaný len so snímačom tlaku. Riadiaca aplikácia neobsahovala v čase testu potrebné prostriedky na realizovanie pripojenia digitálnej komunikácie snímača, a preto nebolo možné overiť výsledky aj so snímačom teploty. Ohriatie ventilu po 10 minútovom teste bolo natoľko značné, že kvôli vysokej teplote nebolo možné udržať puzdro s ventilom v ruke.

Tab. 9: Únik netesnosťami obvodu s ventilom Phoenix

Stav	Tlak	\bar{p} [bar]	Δp [mbar]	Δt [s]	q_L [mbar.l/s]	q_L [cm ³ _n /min]
Zatvorený V = 3,6 ml	6 bar	5,951	100	5,5	0,0655	3,87
		5,976	50	2,7	0,0667	3,95
		5,997	10	0,5	0,0720	4,26
	2 bar	1,990	100	24,7	0,0146	0,86
		1,975	50	12,0	0,0150	0,89
		1,995	10	2,1	0,0171	1,01
Otvorený V = 3,2 ml	6 bar	5,950	100	8,2	0,0390	2,31
		5,976	50	4	0,0400	2,37
		5,995	10	0,8	0,0400	2,37
	2 bar	1,950	100	40,9	0,0078	0,46
		1,975	50	19,7	0,0081	0,48
		1,995	10	3	0,0107	0,63

5.4 Zhodnotenie a možnosti rozšírenia

Podľa návrhu postupu testovania poskytnutých pneumatických komponentov bol navrhnutý testovací pneumatický obvod, kde v prvej časti bol zvolený vhodný typ regulátoru tlaku. Ako najlepšie riešenie z možných uvažovaných bol navrhnutý regulačný systém s proporcionálnym ventilom NG3. Regulačný systém s týmto ventilom sa vyznačoval lineárnou charakteristikou v testovanom rozsahu tlakov, dokonca aj v tlakoch nižších ako 0,5 bar. Regulácia prebiehala s vysokou presnosťou a rýchlosťou stabilizácie. Všetky testy vyžadovali konštantný tlak rôznej veľkosti, čo by bez regulačného systému znamenalo rozšíriť obvod o daný počet vetiev. Okrem toho bola vyžadovaná na overenie funkčnosti poskytnutého filtra regulácia nízkych tlakov.

Funkčné testy bolo možné realizovať s navrhnutým obvodom, no pre vyššiu presnosť a overenie všetkých parametrov daného komponentu je vhodné použiť v testovacom obvode prietokomer. Počas realizácie testu však nebol k dispozícii.

V rámci testovania tesnosti je dôležitou podmienkou zabezpečiť čo najtesnejšie pneumatické prvky testovacieho obvodu. Počas realizácie testu boli k dispozícii len bežné spojovacie prvky, ktoré nezaručujú rádovo vyššiu tesnosť. Preto boli výsledky testu negatívne ovplyvnené. Výsledné kvantitatívne určenie úniku je v rámci práce len orientačné.

Testy tesnosti metódou poklesom tlaku vyžadujú prítomnosť snímača tlaku, ktorý umožňuje rýchly záznam s vysokou rozlíšiteľnosťou a presnosťou. Počas experimentu bol použitý snímač Keller pripojený pomocou analógového signálu k riadiacej karte systému. Z dôvodu chýbajúcej aplikačnej podpory pre komunikačný modul nebolo možné využiť plný potenciál snímača. Rozšírením riadiaceho systému o digitálnu komunikáciu sa v teste tesnosti zvýši presnosť výsledkov a taktiež ponúka možnosť kompenzácie teploty v obvode. Limit použitia tohto je frekvencia záznamu ktorá je pre daný snímač 400 Hz, no pre väčšinu testov je dostatočná.

6 ZÁVER

Táto práca bola vytvorená s cieľom analyzovať a zhrnúť súčasný stav metodiky testovania tesnosti pneumatických komponentov podľa platnej legislatívy. Na základe získaných poznatkov bolo úlohou navrhnuť postup testov na overenie funkčného stavu poskytnutých pneumatických komponentov podľa zadanej špecifikácie a kvantifikovanie úniku vzduchu netesnosťami.

V prvej časti práce je zmienený úvod do mechaniky tekutín, z ktorej vychádza fyzikálna podstata použitého testovacieho média – vzduchu. Z toho dôvodu sú zhrnuté základné veličiny plynu, ktoré sú ďalej používané v práci. Časť mechaniky plynov sa zaoberá statikou, ktorej základom je stavová rovnica plynu. Stavová rovnica popisuje vzájomný vzťah veličín, ktoré charakterizujú plyn. Únik plynu je dej dynamický, a preto je v tejto časti práce popísaný základ kinematiky a dynamiky plynov.

Ďalšou časťou práce je rešerš v oblasti testovania tesnosti a merania úniku. Zmienené sú veličiny, ktoré najviac ovplyvňujú meranie. Hlavná časť tejto kapitoly je venovaná metodike nedeštruktívneho testovania tesnosti, ktorá sa zaoberá lokalizáciou úniku a taktiež jeho kvantitatívnym meraním. V rámci práce je uvedený prieskum komerčne dostupných zariadení, ktoré sa používajú na riešenie tejto problematiky.

Na základe získaných poznatkov a podľa špecifikácie bolo cieľom navrhnuť postup testovania pneumatických komponentov, kde sa overí ich funkčnosť a zistí únik metódou poklesom tlaku, ktorá vychádza z platnej legislatívy. Na overenie navrhnutého postupu bol navrhnutý a realizovaný testovací pneumatický obvod, kde bola analyzovaná možnosť regulácie tlaku na zefektívnenie pracoviska. Experimentálne boli overené možnosti využitia komerčne dostupných regulátorov tlaku. Tieto kompaktné regulátory boli porovnané s navrhnutým regulačným systémom, ktorý pozostáva z lineárneho proporcionálneho ventilu, snímača tlaku a riadiaceho systému. Ako najlepšie riešenie regulačnej časti pneumatického obvodu bol zvolený práve navrhnutý regulačný systém, ktorý vykazoval najlepšie výsledky.

V ďalšej časti bolo realizované testovanie dvoch poskytnutých pneumatických komponentov, filtra s automatickým odtokom a spínacieho ventilu. Obe zariadenia boli podrobené funkčnému testu a testu tesnosti. Funkčný test filtra spočíval v overení spínania automatického odtoku pri tlaku podľa špecifikácie. Hodnotenie ventilu prebiehalo na základe jeho prechodovej a spínacej charakteristiky, kde dôležitý jav bola doba zopnutia. Test tesnosti oboch zariadení bol realizovaný v obvode s poskytnutými pneumatickými prvkami, ktoré nespĺňali požiadavky testu tesnosti, preto sú výsledky len orientačné. Napriek tomu bolo možné únik detegovať a kvantitatívne ho vyjadriť. Výsledky všetkých testov boli graficky zobrazené a vyhodnotené.

Realizáciou testovacieho obvodu je overená kvalita regulácie navrhnutého regulačného systému, ktorý bol schopný regulovať v celom rozsahu dostupného tlaku, taktiež nízkeho, s vysokou presnosťou a taktiež s krátkou dobou stabilizácie. Použitie tohto systému môže v praxi výrazne zvýšiť kvalitu testovacieho pracoviska. Za podmienok použitia rádo vo tesnejších pneumatických prvkoch v testovacej časti obvodu je možné vďaka jednoduchosti metódy poklesu tlaku kvantifikovať únik. U požiadaviek vyššej presnosti je nutná prítomnosť

snímača teploty, na základe ktorého je možné kompenzovať negatívny vplyv teploty na meranie.

7 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] KVASNICA, Jozef. *Mechanika*. Vyd. 2. Praha: Academia, 2004, 476 s. ISBN 80-200-1268-0.
- [2] RESNICK, Robert, David HALLIDAY a Jearl WALKER. *Fyzika*. 2. vyd. VUTIUM: Brno, 2013. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [3] ROTTLÄNDER, Hans, Walter UMRATH a Gerhard VOSS. *Grundlagen der Lecksuch-Technik*. Kat.-Nr. 199 79_VA.01. Köln: Leybold GmbH, 2016.
- [4] ČSN EN 13184. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení těsnosti: Metoda změny tlaku*. Praha: ČNI, 2002.
- [5] ČSN EN 1779. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení těsnosti: Kritéria pro volbu metod a postupů*. Praha: ČNI, 1999.
- [6] ČSN EN 13185. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení těsnosti: Metoda zkušebního plynu*. Praha: ČNI, 2001.
- [7] LABTECH [online]. Telnice: LABTECH, 2011 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.detekce-netesnosti.cz/>
- [8] ČSN EN 1593. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení těsnosti: Bublínková metoda*. Praha: ČNI, 2001.
- [9] ZELTWANGER DICHTHEITSPRÜFUNG [online]. ZELTWANGER, b.r. [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.zeltwanger.de/zeltwanger-dichtheitspruefung.html>
- [10] ATEQ [online]. Leaktesting ATEQ, 2018 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.ateq-leaktesting.com/>
- [11] Pfeiffer Vacuum [online]. Pfeiffer Vacuum, 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/de/>
- [12] Innomatec: *Leak Test Solutions* [online]. innomatec, 2016 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: <https://www.innomatec.com/>
- [13] USON [online]. Uson, 2019 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.uson.com/>
- [14] JW Froehlich: *Test and Assembly Solutions for Powertrain* [online]. JW Froelich Maschinenfabrik, 2019 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.jwf.com/>
- [15] Furness Controls: *Pressure, Flow, Leak Detection* [online]. Furness Controls, 2019 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.furness-controls.com/>
- [16] Cosmo [online]. Tokyo: Cosmo Instruments, 2019 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.cosmo-k.co.jp/english/>
- [17] IMI Precision Engineering [online]. IMI International, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.imi-precision.com/cz/cs>

- [18] *KELLER* [online]. KELLER AG für Druckmesstechnik, 2019 [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: <http://www.keller-druck.com/>
- [19] *Electro-Pneumatic Regulator/Electronic Vacuum Regulator: Series ITV* [online].
SMC Pneumatics, b.r. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z:
<https://www.smc-pneumatics.com/pdfs/ITV.pdf>
- [20] *Stasto Automation* [online]. Stasto Automation, 2019 [cit. 2019-05-02].
Dostupné z: <https://www.stasto.cz/>

8 ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1: Regulátor SMC ITV 1050 – detail priebehu tlaku

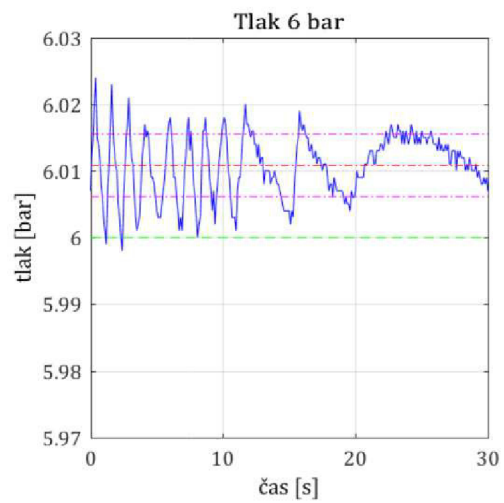
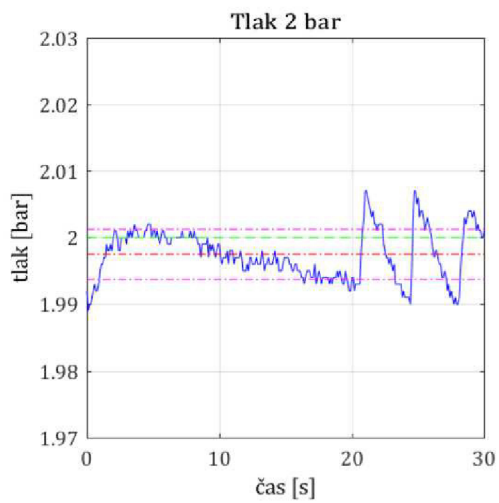
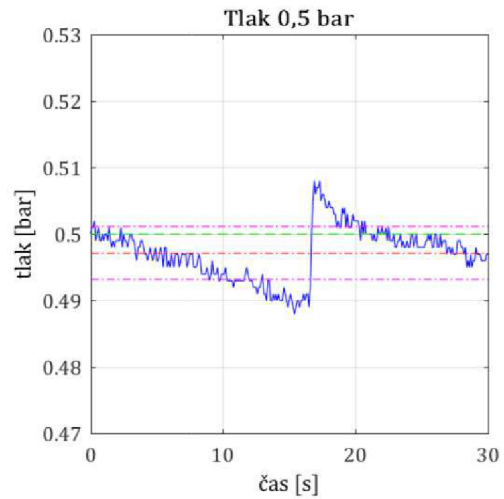
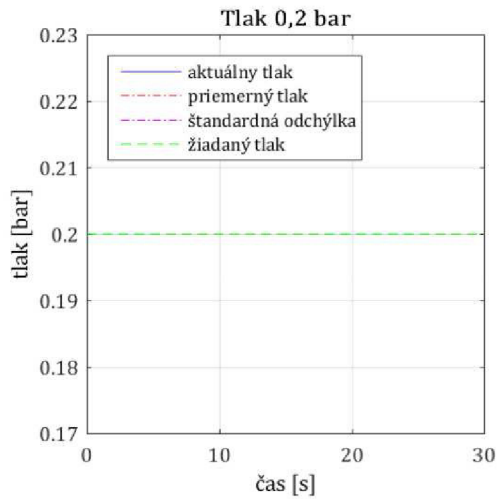
Príloha 2: Regulátor Stasto RE16 – detail priebehu tlaku

Príloha 3: Regulátor s ventilom NG3 – detail priebehu tlaku

Príloha 4: Regulátor s ventilom VGT – detail priebehu tlaku

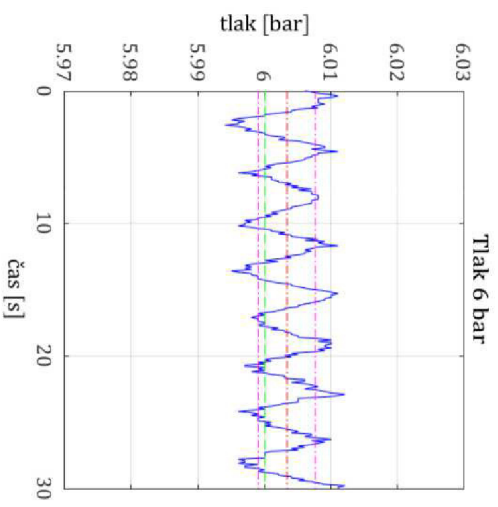
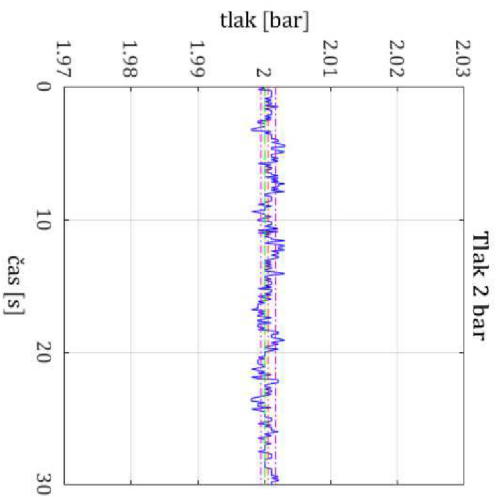
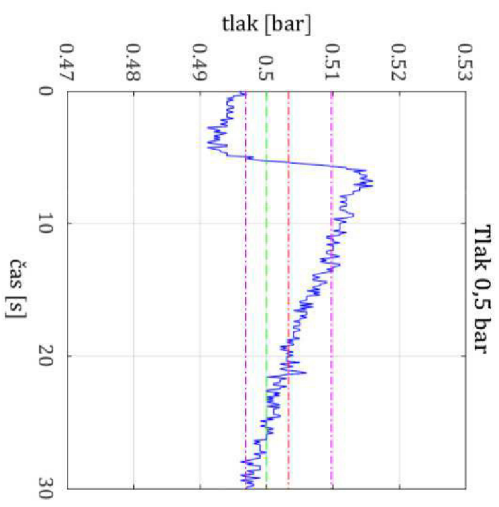
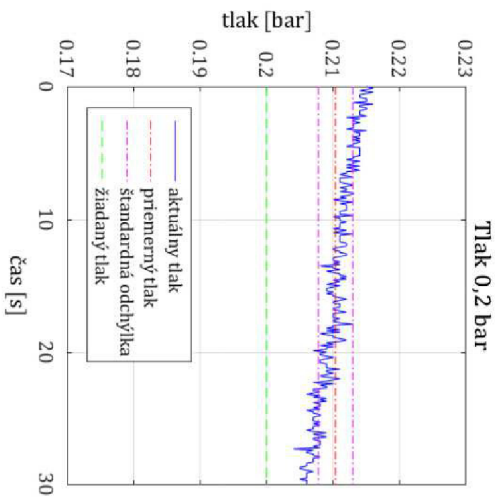
PRÍLOHA 1

Regulátor SMC ITV 1050 – detail priebehu tlaku pre jednotlivé žiadané hodnoty



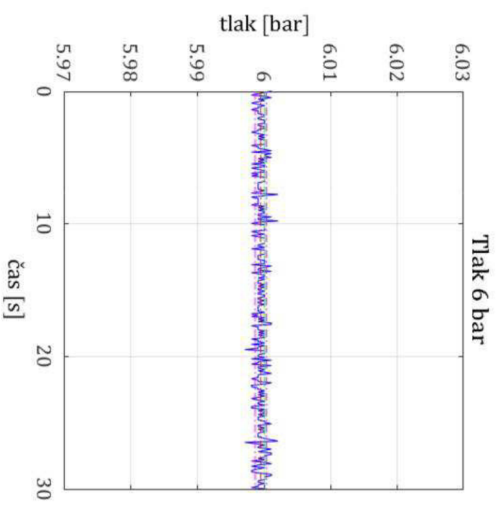
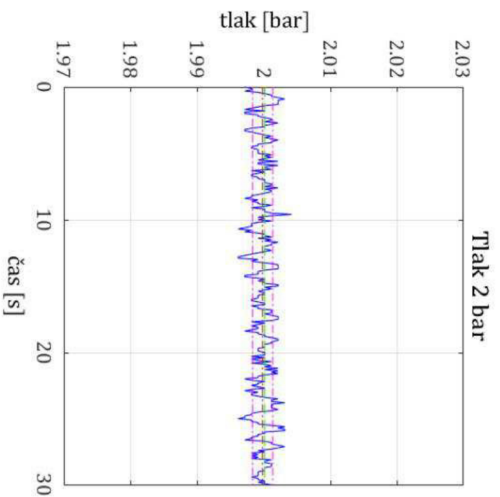
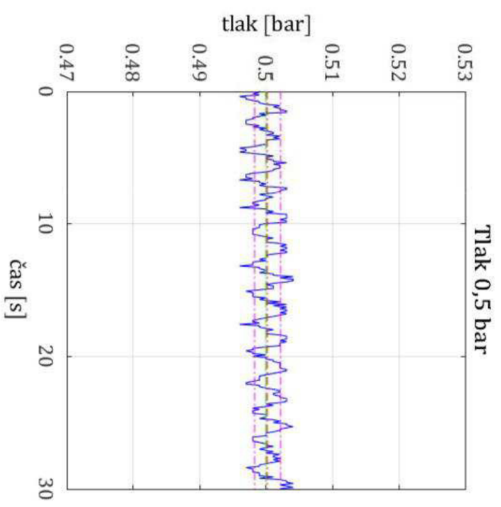
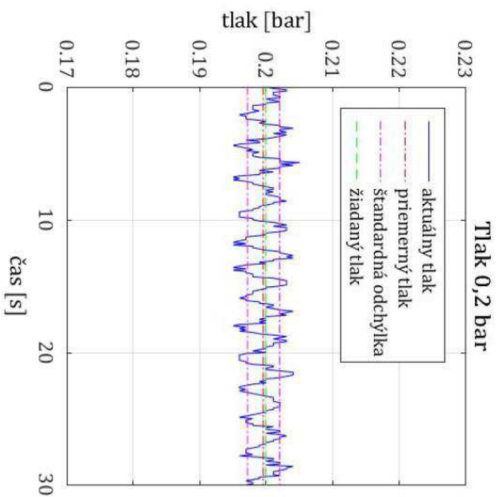
PRÍLOHA 2

Regulátor Stasto RE16 – detaili priebehu tlaku pre jednotlivé žiadané hodnoty



PRÍLOHA 3

Regulátor s ventilom NG3 – detail priebehu tlaku pre jednotlivé žiadané hodnoty



PRÍLOHA 4

Regulátor s ventilom VGT – detail priebehu tlaku pre jednotlivé žiadané hodnoty

