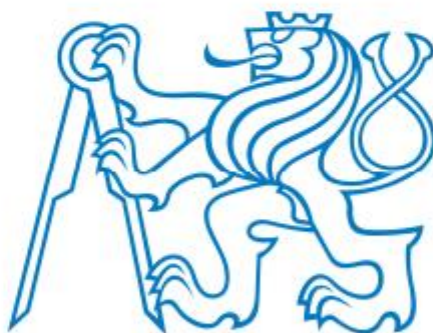


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní – Ústav přístrojové a řídicí techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Automatizace měření mechanických tlakových spínačů

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum:

Podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horák** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **482439**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Automatizace měření mechanických tlakových spínačů

Název bakalářské práce anglicky:

Automation of measurement of mechanical pressure switches

Pokyny pro vypracování:

- 1) Měřicí principy tlakoměrů s elektrickým výstupem
- 2) Popis kontrolovaného tlakového spínače
- 3) Popis zařízení pro kontrolu tlakových spínačů
- 4) Návrh postupu měření a zpracování naměřených dat

Seznam doporučené literatury:

JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. Technická měření. Praha: České vysoké učení technické, 2000.
VACULÍK, Jan a Ludvík BEJČEK. Snímače tlaku. Automa [online]. 2011. Dostupné z: <https://automa.cz>
VACULÍK, Jan a Petr HEJL. Spínací manometry a tlakové spínače. Automa [online]. 2004. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/spinaci-manometry-a-tlakove-spinace-2004_03_32235_2995

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Dana Bauerová, U12110.3

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Dana Bauerová
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Anotace

Cílem této bakalářské práce je popis návrhu zkušebního zařízení pro měření funkční charakteristiky mechanických tlakových spínačů v objemu desítek ks/hodinu. Dále je cílem návrh a popis zpracování a analýza dat. V rámci tohoto tématu je shrnuta teorie měření tlaku, kalibrace přístrojů pro jeho měření, popis elektronických tlakoměrů s dálkovým přenosem dat a mechanických tlakových spínačů. Náplní praktické části je popis návrhu zkušebního zařízení a parametrů a postupu měření. Dále je to popis záznamu a zpracování naměřených dat a jejich analýza.

Abstract

The goal of this thesis is the description of designing a test device for measuring the functional characteristics of mechanical pressure switches in the volume of tens of pcs/hour. Furthermore, the goal is the designing and description of data processing and analysis. Within this topic, the theory of pressure measurement, calibration of instruments for its measurement, description of electronic pressure gauges with remote data transmission and mechanical pressure switches is summarized. The content of the practical part is a description of the design of the test device and measurement parameters and procedure. It is also a description of the gathering and processing of measured data and their analysis.

Obsah

1. Úvod.....	7
2. Měřené veličiny	8
2.1. Tlak	8
2.1.1. Definice a jednotky tlaku.....	8
2.1.2. Statický a dynamický tlak.....	9
2.1.3. Tlak s časem proměnný.....	9
3. Měření tlaku	10
3.1. Způsoby měření tlaku.....	10
3.2. Kalibrace	10
3.3. Požadavky na tlakoměr	11
3.4. Deformační tlakoměry	12
3.5. Měřicí principy tlakoměrů s elektrickým snímačem	13
3.6. Tlakový spínač	16
3.6.1. Mechanické tlakové spínače.....	16
3.6.2. Tlakový spínač Orion SE10	18
3.6.3. Finální aplikace a měřené charakteristiky spínače	19
4. Návrh zkušebního zařízení a postupu zkoušky	20
4.1. Popis zkoušky	20
4.2. Výběr kontrolního tlakoměru	20
4.3. Popis měřicího kufru	22
4.4. Postup měření.....	25
4.5. SwitchTest – software pro zpracování a záznam dat z měřicího kufru.....	26
5. Záznam a zpracování naměřených dat	29

5.1. Počet měřicích cyklů	29
5.2. Trvání měřicího cyklu	32
5.3. Závislost hystereze na rozpínacím tlaku	34
5.4. Nejistota měření	35
5.5. Tabulková aplikace pro zpracování měření.....	37
5.6. Analýza výsledků měření	39
6. Závěr.....	42
7. Seznam použité literatury.....	43
8. Seznam obrázků	45

1. Úvod

Firma BHV senzory s.r.o. mj. prodává mechanické tlakové spínače indického výrobce Orion Instruments. Část spínačů se vrací na reklamaci kvůli nevyhovujícím funkčním vlastnostem. Proto se v laboratoři BHV senzorů měří všechny reklamované spínače, a kromě toho se provádí namátková kontrola před odesláním. Za tímto účelem vzniklo poloautomatické zkušební zařízení, jehož výstupní data se dále zpracovávají a vizualizují.

System má usnadnit a zrychlit měření velkého množství spínačů (100–500 ks/měsíc), interpretovat a vizualizovat data. Tato data slouží ke zjištění důvodu tak velkého množství reklamací a k případné reklamaci u výrobce spínačů.

V prvních dvou kapitolách je teoretický základ pro pochopení tématu měření tlaku. V kapitole 4 je popsáno zkušební zařízení a software pro sběr dat z tohoto zařízení. Na vývoji zařízení i SW se autor této práce podílel. V kapitole 5 je několik experimentů, které zjišťují vlastnosti tlakových spínačů a vztahy, které jsou při daném způsobu měření platné. Následuje popis tabulkové aplikace pro zpracování a analýzu naměřených dat. Autor této práce je zároveň autorem všech experimentů a nástrojů popsaných v kapitole 5.

V této práci lze nalézt odpovědi na tyto otázky:

- Jak funguje mechanický tlakový spínač a jaké charakteristiky se u něj měří?
- Která měřicí zařízení se ve zkušebním zařízení používají a co vedlo k jejich výběru?
- Z jakých příčin může docházet k chybám při měření?
- Na jakém principu zkušební zařízení pracuje?
- Jak probíhá měření z pohledu operátora?
- Jak se naměřená data zpracovávají?
- Jaké jsou grafické výstupy?

2. Měřené veličiny

2.1. Tlak

Hlavní veličinou, která se v tomto případě měří, je tlak. Měří se tlak, při kterém spínač změní stav, při klesajícím a stoupajícím tlaku. Rozdíl těchto hodnot je tlaková hystereze. Ta je charakteristikou tlakového spínače, která se v tomto případě zjišťuje.

2.1.1. Definice a jednotky tlaku

Měrný tlak p (zkráceně bývá nazýván pouze tlakem) je definován poměrem elementu síly dF působící na element plochy dA ve směru normály

$$p = \frac{dF}{dA}. \quad (2.1.1-1)$$

Je-li tlak konstantní, lze z rovnice určit sílu působící na plochu A vztahem

$$F = pA. \quad (2.1.1-2)$$

Tato rovnice má význam zejména u tekutin, které jsou v klidu, neboť zde působí tlak vždy ve směru normály a plocha na níž je tlak konstantní, je ekvidistantní s hladinou. Tlak v hloubce h pod hladinou je určen vztahem

$$p = h \cdot \rho \cdot g, \quad (2.1.1-3)$$

kde ρ je měrná hmota tekutiny,

g – tíhové zrychlení.

Z rovnice (2.1.1-1) vyplývají základní definice jednotek tlaku, jejichž rozměr je poměrem rozměru síly a čtverce rozměru délky. [1]

V soustavě SI, která je nyní u nás normalizována (ČSN ISO IEC 80000), je hlavní jednotkou tlaku pascal [Pa], což odpovídá N/m^2 . Kromě Pa se v praxi používá i jednotka bar [bar], $1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$.

Prostoru bez hmoty přisuzujeme nulový tlak. Měříme-li od nulového tlaku, mluvíme o tlaku absolutním. Tlak v atmosféře u zemského povrchu se nazývá tlakem barometrickým. Většina tlakoměrů měří rozdíl zjišťovaného tlaku a tlaku barometrického. Pokud je měřený tlak vyšší než barometrický, mluvíme o přetlaku, pokud je nižší, tak o podtlaku (případně vakuu). Platí:

$$p = p_A - b, \quad (2.1.1-4)$$

kde p je tlak,

p_A je tlak absolutní,

b je tlak barometrický.

Rozdíl dvou tlaků nazýváme tlakovým rozdílem a označujeme ho

$$\Delta p = p_1 - p_2. \quad (2.1.1-5)$$

2.1.2. Statický a dynamický tlak

Pokud je tekutina v klidu, působí v ní jen statický tlak p_s . Jedná se o skalární veličinu, protože působí z jednoho bodu stejně všemi směry.

V proudící tekutině působí i tlak dynamický p_D . Jde o vektorovou veličinu, která má směr a smysl stejný, jako vektor rychlosti proudící tekutiny w .

Celkový tlak p_C se pak získá vektorovým součtem statického a dynamického tlaku. Ve směru proudění platí

$$p_C = p_s + \frac{w^2}{2} \cdot \rho. \quad (2.1.2-1)$$

2.1.3. Tlak s časem proměnný

Většina měřených tlaků se mění s časem τ . Změnu lze vyjádřit vztahem

$$p = \bar{p} + p', \quad (2.1.3-1)$$

kde \bar{p} je průměrná hodnota,

p' je tlaková fluktuace.

Pokud $p'=0$, hovoříme o soustavné změně, v případě že p' =konstanta o nesoustavné změně.

Pokud dochází při ději pouze k nesoustavným změnám, nazýváme jej stacionárním.

[1]

3. Měření tlaku

3.1. Způsoby měření tlaku

K měření tlaku lze použít jakoukoli jinou fyzikální veličinu, která je tlakem přímo ovlivněna. Přístroje k měření tlaku nazýváme tlakoměry. [1]

Podle velikosti měřeného tlaku a podle oblasti použití se jim přiřazují tyto názvy:

- **manometry** – k měření přetlaku (obvykle deformační tlakoměry)
- **vakuometry** – k měření podtlaku nebo velmi malých absolutních tlaků
- **manovakuometry** – k měření přetlaků i podtlaků (většinou deformační tlakoměry)
- **tahoměry** – k měření malých podtlaků (obvykle kapalinové nebo deformační tlakoměry)
- **diferenční tlakoměry** – k měření tlakových rozdílů

Podle definice tlaku a podle funkčního principu se tlakoměry dělí na:

- **zvonové** – etalonové přístroje podle (2.1.1-2), měřítkem tlaku je zdvih zvonu
- **pístové** – funkce vychází přímo z definice tlaku: tlak na kapalinu se vyvozuje přes píst kalibrovaným závažím
- **kapalinové** – etalonové přístroje s jednoduchým principem podle (2.1.1-3), měřítkem tlaku je výška kapalinového sloupce (U-trubicové, nádobkové, mikromanometry, se sklonným ramenem a kompresní vakuometry). Nevýhodou je obtížné stanovení přesné hustoty kapaliny.
- **deformační** – měřítkem tlaku je velikost deformace pružného prvku (trubicové – bourdonské, membránové, krabicové a vlnovcové)
- **elektrické** – měřítkem tlaku je změna elektrické veličiny tlakově závislé (odporové, bolometrické a ionizační vakuometry) [2]

3.2. Kalibrace

Kalibrací se rozumí měření funkčních vlastností pracovních měřidel jejich porovnáním zpravidla s etalonem. V případě, že se kalibruje tlakoměr, spočívá kalibrace v porovnání naměřené hodnoty tlaku na ověřovaném tlakoměru s hodnotou naměřenou na tlakovém etalonu (též se používá termín referenční nebo kontrolní tlakoměr). Takové porovnání se zpravidla provádí pro více hodnot tlaku tak, aby se dostatečně pokryl celý rozsah testovaného měřidla. K přenosu referenčního tlaku slouží kapalná, nebo plynná médium. [11]

3.3. Požadavky na tlakoměr

Základním parametrem tlakoměru je jeho měřicí rozsah. Kromě toho se tlakoměr posuzuje podle následujících kritérií, které určují jeho užité vlastnosti:

- A. Chemická odolnost vůči měřenému médiu – řeší se materiál měřicího ústrojí, případně oddělovač
- B. Odolnost vůči vlivu prostředí (klíma, vibrace, rázy, ...) – řeší se materiál těla
- C. Odolnost proti přetížení měřeným tlakem
- D. Přesnost
- E. Komunikace – přenos informace o naměřené hodnotě [5]

Při volbě rozsahu se volí cca 1,5 až 2násobek optimálního pracovního bodu. Je to kvůli deformacím a nepřesnostem, které by mohly z důvodu dlouhodobého zatížení vznikat. [4] [5]

- A. Z kapalných médií se zpravidla používá olej nebo voda, z plyných médií vzduch nebo dusík.

Výhodou kapalných médií je jejich spolehlivost, spočívající v zanedbatelné stlačitelnosti. Při měření vysokého tlaku plynem dochází k výraznému stlačování média. K tomu je potřeba velké množství energie, které se projeví mj. zvýšením teploty plynu. Změna teploty zapříčiňuje tlakovou nestabilitu. Tyto jevy se v případě kapalného média projevují jen zanedbatelně.

Olej nebo voda má oproti vzduchu řádově vyšší hustotu a jeho hydrostatický tlak zkresluje měřenou hodnotu tlaku, což je potřeba kompenzovat při měření nízkých tlaků nebo při kalibraci velmi přesných měřidel. Další nevýhodou kapalných médií je, že kontaminují ty části tlakoměru, které jsou ve styku s měřeným médiem. Měření pomocí plynu jako média je tedy jednodušší a chrání měřený přístroj před znečištěním. Pokud by měřicí ústrojí tlakoměru mělo přijít do kontaktu s pitnou vodou nebo s potravinami, je kontaminace měřicího ústrojí nepřijatelná. [3] [4]

- D. Nepřesnost, respektive chyba měření je odchylka naměřené hodnoty od dané měřicí charakteristiky. Na chybě měření se podílí nelinearita a hystereze. Ta je v případě mechanických tlakoměru zpravidla způsobena pasivnímu odporu. V případě elektrických tlakoměru je způsobena jevem zvaným creep, tedy tečením materiálu deformačního členu pod vlivem tlaku. V případě tlakového spínače není hystereze považována za chybu, ale za další vlastnost měřidla.

Dalšími zdroji chyb je citlivost (respektive necitlivost), časová a teplotní nestabilita nulového bodu, časová a teplotní nestabilita strmosti převodní charakteristiky.

Přesnost se obvykle udává jako procentuální hodnota vztažená buď k měřicímu rozsahu (% FS, full scale) nebo k naměřené hodnotě (% of reading).

E. Informaci o naměřené hodnotě lze přenášet následujícími způsoby:

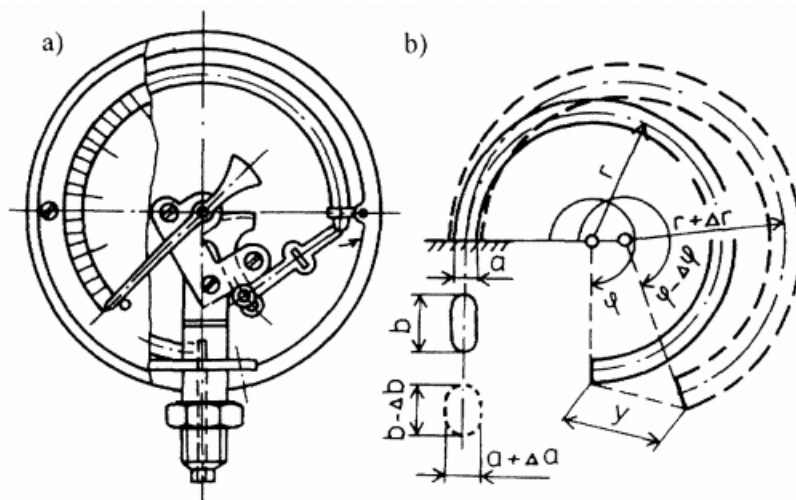
- Přímo – zpravidla ručkové nebo digitální tlakoměry, hodnota je vidět přímo na tlakoměru
- Elektrickým analogovým výstupním signálem – v oboru průmyslového měření nejčastěji proudový výstup 4-20 mA
- Digitálním výstupním signálem – sběrnice nebo sériová komunikační linka (ethernet, RS232/485, USB propojení, Profibus (Process Field Bus), aj.)

Při testování a kalibraci, jakož i obecně ve zkušebnictví vzniká potřeba výsledky zaznamenat a dále početně zpracovat na počítači. Proto je vhodné, když má tlakoměr rozhraní pro komunikaci s počítačem.

3.4. Deformační tlakoměry

Principem deformačního tlakoměru je měření pružné deformace, kterou tlak způsobí, a jím vyvolanou změnu geometrie. Vzhledem k tomu, že deformace je velmi malá, je nutné použít mechanický převod nebo přesné elektrické snímání.

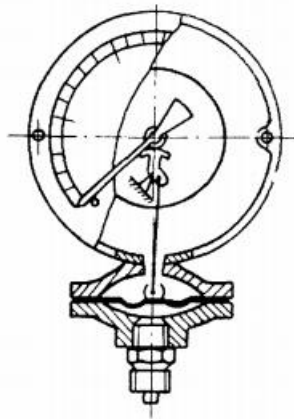
Dnes nejpoužívanější je tlakoměr s Bourdonovou trubicí. Jde nejčastěji o provozní přístroje s přesností 1 % a horší, nebo etalonové přístroje s přesností obvykle 0,25 % a 0,6 %. Jde o tlakoměry s rozsahem od 0-60 kPa až do 500 MPa. Deformačním prvkem je trubice oválného profilu stočená do kruhového oblouku, spirály nebo šroubovice. Trubice je z jedné strany uzavřená, z druhé strany do ní vstupuje tlak. Uzavřený konec je spojen s mechanickým převodem a ukazatelem, nebo je výchylka vyhodnocena elektricky.



Obrázek 1: Trubicový tlakoměr: a) uspořádání přístroje, b) deformace trubice [2]

Další možností je tzv Schaefferův tlakoměr. Jde o tlakoměr s deformačním prvkem ve formě membrány kruhového tvaru s vlisy. Ta je uložena mezi přírubami komory. Na jednu nebo obě strany membrány je přiveden tlak. Membrána musí mít definovanou tuhost, což je v případě kovových membrán přímo tuhost membrány, v případě plastových nebo pryžových membrán je toto zajištěno přidáním pružiny. [2] [3]

Pro nižší hodnoty tlaku a přetlaku se používají tzv. membránové krabice.



Obrázek 2: Membránový tlakoměr [2]

3.5. Měřicí principy tlakoměrů s elektrickým snímačem

V kategorii tlakoměrů s elektrickým výstupem jsou nejrozšířenější přístroje s elektronickými snímači. Díky vysoké přesnosti a malým rozměrům se elektronické snímače používají též u přímokazujících tlakoměrů, zejména u etalonů tlaku.

V dnešní době jsou nejrozšířenější membránové elektrické tlakoměry. Deformaci membrány lze měřit jak mechanickým převodem na ukazatel, tak elektricky. Níže je uveden stručný přehled nejpoužívanějších snímačů. [7]

Odporové snímače

Odporový snímač je založený na změně odporu vodiče s jeho deformací. Měřicí vodiče jsou na membráně uspořádány do Wheatsonova můstku. Nevýhodou je závislost hodnoty elektrického odporu použitých materiálů na teplotě, a tedy nutnost teplotní kompenzace. Odporový snímač se využívá v následujících třech případech: [7]

Piezorezistivní odporové snímače

Deformační člen tohoto tlakoměru je vyroben z destičky monokrystalického křemíku o průměru několika desetín mm připájené na skleněné nosné destičce. Na povrchu křemíkové destičky jsou difúzí akceptorů vytvořeny vodivé cesty, obvykle uspořádané do Wheatsonova můstku. Akceptory zajišťují v jinak

nevodivém křemíku výraznou závislost odporu na deformaci (která je cca 30x vyšší než u kovových foliových tenzometrů). Tato závislost může stoupat nebo klesat s deformací v závislosti na použitém akceptoru. [7]

Průhyb membrány je takřka nulový, z čehož plyne výhoda malé hystereze a malého creepu. Nevýhodou je citlivost křemíkové destičky a přívodních vodičů na vlhkost či agresivní látky. Proto je snímač obvykle chráněn silikonovým gelem, nebo pomocí oddělovací membrány. Piezorezistivní senzory jsou používány jak v jednoduchých a levných, tak ve vysoce přesných zařízeních. [7]

Tlustovrstvé tenzometry

Deformační člen je destička z keramiky, plastu, ale i jiných materiálů, zpravidla o průměru jednotek mm. Na této destičce je sítotiskem nanesen odporový materiál tloušťky řádově 0,01 mm. Na destičce je jak samotný tenzometr, tak případné kompenzační obvody. Toto uspořádání snižuje náklady na výrobu. Tuto technologii lze nalézt v zařízeních nižší a střední cenové kategorie. [7]

Tenkovrstvé kovové tenzometry

Pracuje na stejném principu jako tlustovrstvý tenzometr. V tomto případě se vrstva kovu vakuově napaňuje na izolační vrstvu na kovovém deformačním členu. Tloušťka vrstvy je cca 0,1 μm . Tato technologie se hodí pro vyšší tlaky. [7]

Kapacitní snímače

Deformační člen, membrána z tenkého vodivého materiálu nebo z keramiky s vakuově napařenou vrstvou kovu, je jednou elektrodou kondenzátoru. Druhá elektroda je nad membránou a prostor mezi nimi je vyplněn inertním plynem nebo silikonovým olejem. V přesných a odolných zařízeních vyšší cenové kategorie je ještě třetí elektroda pod membránou. V takovém případě je zařízení doplněno ještě oddělovačem, aby se pracovní médium nedostalo do měřicího prostoru.

Kapacita kondenzátoru je závislá na tloušťce dielektrika, která je v tomto případě přímo závislá na vychýlení membrány. [7]

Indukčnostní snímače

Funguje na podobném principu jako kapacitní snímač. V tomto případě je nad, případně pod membránou snímací cívka napájená střídavým napětím. Membrána je z feromagnetického materiálu. Magnetický obvod se uzavírá přes jádro cívky, vzduchovou mezeru a membránu. Indukčnost je závislá na velikosti této mezery, která je přímo závislá na výchylce membrány. [2] [7]

Piezoelektrické snímače

Na membráně jsou dva piezoelektrické krystaly ve tvaru tzv. piezoelektrického dvojčete. Měří se náboj na krystalech, který vzniká při jejich deformaci na membráně. Membrána je v zájmu linearizace měřených hodnot předepjatá. Výhody tohoto snímače jsou použitelnost do teplot 550 °C a výborné dynamické vlastnosti (časová konstanta v řádu mikrosekund). Nevýhody jsou teplotní závislost snímače, obtížné zpracování signálu (nutnost speciálních kabelů a zesilovačů) a inkrementální povaha snímání. [7]

Rezonanční snímače

Jako deformační člen se v dnešní době používá mikromechanický prvek, jež je rozkmitáván elektromagnetickým polem. V závislosti na napětí deformačního členu se mění jeho mechanická vlastní frekvence. Elektromagnetické pole má takovou frekvenci, aby amplituda kmitů rezonátoru byla konstantní. Tato frekvence je tedy úměrná měřenému tlaku. Mezi přednosti tohoto snímače patří frekvenční výstupní signál a tedy nízký šum, odolnost proti rušení, vysoká rozlišovací schopnost, časová stabilita signálu, přesnost a spolehlivost měření. Nevýhodou je závislost na teplotě, horší dynamické vlastnosti a náročná výroba. [7]

Optické snímače

Oproti ostatním snímačům využívají jako nosič informace fotony, což má za následek vysokou citlivost, linearitu a odolnost proti rušení. Tyto snímače dosahují citlivosti až 100 mPa. [7]

První skupinou jsou tzv. vláknové snímače vlastní, kde se působením tlaku deformuje přímo optické vlákno. Deformací vlákna dochází ke konverzi některých vidů v mnohavidovém vlákně, což má za následek snížení výstupního optického výkonu. [7] [8]

Druhou skupinou jsou nevlastní vláknové snímače, kde vlákno jen přenáší světlo. Sem spadá například měření ztráty optické intenzity při odrazu světla z pevného optického vlákna od membrány. Deformace membrány způsobí změnu velikosti mezery mezi koncem vlákna a membránou, což se projeví právě ztrátou optické intenzity na výstupu optického vlákna. [7]

3.6. Tlakový spínač

Jiná označení je manostat nebo presostat. Tlakový spínač je specifickým druhem tlakoměru, který podává dvoustavovou informaci: tlak je buď vyšší, nebo nižší než nastavená mez.

3.6.1. Mechanické tlakové spínače

V praxi je výstup tlakového spínače realizován sepnutým nebo rozepnutým elektrickým kontaktem. Sepnutí, respektive rozepnutí kontaktu nastává při dosažení daného spínacího, respektive rozpínacího tlaku. Z hlediska funkce kontaktu se rozlišují následující tři typy kontaktů:

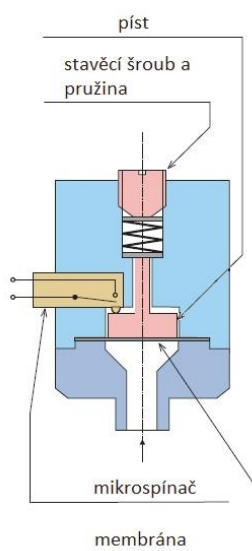
NO (normal open, spínací kontakt) – při nulovém tlaku je kontakt rozepnutý, při stoupajícím tlaku sepne.

NC (normal closed, rozpínací kontakt) – při nulovém tlaku je kontakt sepnutý, při stoupajícím tlaku rozepne.

SW (switch, přepínací kontakt) – Při stoupajícím tlaku dojde k přepnutí kontaktu. Tlakový spínač má tedy tři výstupní kontakty, kdy jedna dvojice funguje jako NO a druhá dvojice jako NC. [10]

Tlakové spínače mohou mít jeden nebo více kontaktů, které mohou mít rozdílnou funkci a nezávisle nastavitelnou hodnotu spínacího nebo rozpínacího tlaku.

Obecně, tlakové spínače mohou mít jeden nebo více spínacích a rozpínacích kontaktů, které mohou mít nezávisle nastavitelnou hodnotu spínacího, respektive rozpínacího tlaku.



Obrázek 3: Tlakový spínač pístový v řezu

Deformačním členem je většinou membrána, píst s pružinou nebo vlnovec. Výchyłka deformačního členu se přenáší buď na pohyblivý kontakt, nebo na průmyslový mikrospínač. Výhodou mikrospínače je, že nedochází k částečnému doteku, který může způsobit jiskření. Jiskření způsobuje poškození kontaktů a nejednoznačnost okamžiku sepnutí. Okamžik sepnutí je v případě mikrospínače jednoznačný. [10]

Na Obrázku 3 je pístový tlakový spínač. Deformačním členem je pružina, píst je překryt membránou z pryže (NBR, EPDM, FKM/Viton, Neopren) nebo PTFE zaručující utěsnění pístu. Tato konstrukce je použita i u spínačů, kterými se zabývá tato práce.

U testovaného spínače je dráha pístu velmi krátká (několik desetin mm) a je vymezena dvěma dorazy. K přesunutí pístu z jedné krajní polohy do druhé dochází při tlaku, jehož hodnota je určena předpětím pružiny, o kterou se píst opírá. Změnou předpětí pružiny lze měnit spínací tlak. [10]

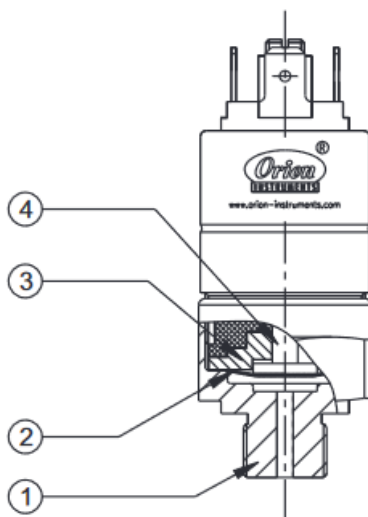
Důležitým parametrem tlakového spínače je hystereze spínání. Hystereze je rozdíl spínacího a rozpínacího tlaku. Malá hystereze může znamenat časté spínání při malém kolísání tlaku. Pokud se spínač používá k regulaci tlaku (například se jím spíná kompresor), vede malá hystereze k častému spínání a rozpínání spínače, což může vést k nadměrnému opotřebení spínače i jiných částí systému, nebo ke vzniku rezonance a rozkmitání soustavy. Velká hystereze má za následek velké rozpětí tlaku, pod kterým musí systém správně pracovat.

V případech tlakových spínačů jednoduché konstrukce je hystereze dána samotnou konstrukcí a použitými součástmi už při výrobě. Složitější konstrukcí spínače lze dosáhnout nastavitelné hystereze.

3.6.2. Tlakový spínač Orion SE10

Orion SE10 je pístový tlakový spínač indického výrobce Orion Instruments. Katalogový list tohoto spínače je v přílohách práce. Jde o kompaktní, lehký, jednoduchý a levný spínač. Na Obrázku 4 je řez tělem tohoto spínače, kde:

- 1...připojovací závit
- 2...membrána z neoprenu nebo PTFE
- 3...dosedací disk zamezující nadměrné deformaci systému
- 4...píst [4]



Obrázek 4: Orion SE tlakový spínač v řezu [4]

Píst je shora podepřen pružinou, která se opírá o stavěcí šroub. Stavěcí šroubem lze měnit předpětí pružiny, a tedy spínací tlak. Při daném tlaku se píst posune z jedné krajní pozice do druhé a sepne mikrospínač. [4]

3.6.3. Finální aplikace a měřené charakteristiky spínače

Spínače v této konkrétní aplikaci jsou součástí výčepního zařízení. Jde o spínač Orion SE10 s funkcí NC s tlakovým rozsahem 0–1000 kPa. Nastavit spínací bod lze v rozsahu 50–350 kPa. Operátor výčepního zařízení ovládá přes rukojeť stavěcí šroub, aby si mohl nastavit spínací tlak. Spínač spouští kompresor, který udržuje sud s pivem pod stálým tlakem.

V poslední době vzrůstá obliba speciálních piv, které se výrazně liší viskozitou. Kvůli tomu je potřeba, aby obsluha mohla nastavit tlak v širším rozmezí, než bylo dosud obvyklé. Zákazník tedy požaduje především to, aby hystereze ležela v rozsahu 40...60 kPa. Stabilita tlaku je důležitá kvůli možnosti nastavit výčepní ventil tak, aby se dosáhlo požadované pěnivosti čepovaného piva. Zároveň nesmí být příliš nízká, aby se rychlou oscilací kolem pracovního bodu nadměrně neopotřeboval jak samotný spínač, tak kompresor. Funkce kontaktu tlakového spínače je NC, tedy s rostoucím tlakem spínač rozepne, s poklesem tlaku sepne.

4. Návrh zkušebního zařízení a postupu zkoušky

4.1. Popis zkoušky

Účelem zkoušky je zjistit nastavení pracovního bodu a zkontrolovat jeho opakovatelnost a zjistit velikost hystereze. Zkouška spočívá v opakovaném měření spínacího a rozpínacího tlaku spínače.

Tělem zkušebního zařízení bude hliníkový kufr, z důvodu snadného přenosu mezi pracovišti. Pro zkušební zařízení se ve firmě používá pojmenování „měřicí kufr“ a pro jednoznačnost bude toto označení používáno ve zbytku práce.

Měřicí kufr musí zajistit následující funkce:

1. Plynulou změnu referenčního tlaku od nuly do horní požadované meze a zpět k dolní požadované mezi.
2. Měření okamžitého referenčního tlaku
3. Detekce stavu kontaktu tlakového spínače

4.2. Výběr kontrolního tlakoměru

Kontrolní měřidlo se nepoužívá k provoznímu měření, ale pro kontrolní účely. Je definováno v řádech podnikové metrologie a jeho návaznost je zajištěna kalibrací na etalon vyššího řádu. Mělo by mít řádově vyšší přesnost než měřidlo, které je k měření použito v provozu. [12]

- Dle dohody mezi zákazníkem a výrobcem se hystereze kontroluje při seřizení spínače na rozpínací tlak 320 kPa. Měřicí rozsah kontrolního tlakoměru tedy musí pokrýt minimální tlak (0 kPa) až 1,5- až 2-násobek pracovního bodu (480 kPa ÷ 640 kPa).
- Laboratoř BHV senzorů s.r.o. je vybavena rozvodem stlačeného vzduchu. Tlakové spínače budou ve své finální aplikaci měřit tlak vzduchu. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem byl jako tlakové médium zvolen vzduch. Není tedy nutnost zvýšené chemické odolnosti měřicího ústrojí kontrolního tlakoměru.
- Tlakoměr bude zabudován v těle měřicího kufru. Při kalibraci bude měřicí kufr v klidu mimo zdroje vibrací. Zvýšená mechanická odolnost tedy není potřeba.
- V této aplikaci se bude měřit relativně nízký tlak a nepředpokládají se tlakové rázy. Není tedy vyžadována odolnost proti přetížení.
- Přesnost tlakového spínače je v tomto případě 2 % FS na rozsahu 360 kPa, maximální absolutní chyba tlakového spínače je tedy 7,2 kPa. Přesnost kontrolního tlakoměru v pracovním bodě 320 kPa by měla být řádově nižší než u tlakového spínače, tedy řádově nižší než 2,25 %.

Jako kontrolní tlakoměr byl na základě výše uvedených skutečností zvolen digitální manometr a snímač tlaku **PM111-L-1002-G-S-82-G-0-QR-V-Q0** vyráběný firmou BHV senzory s.r.o. Katalogový list je v přílohách práce.

Jde o digitální tlakoměr. Pouzdro je vyrobeno z korozivzdorné oceli. Manometr měří piezorezistivním čidlem. Signál z čidla je zpracován šestnáctibitovým AD převodníkem, dále je signál zpracován mikroprocesorem (linearizace a teplotní kompenzace). K dispozici je výstupní signál analogový, nebo digitální ve standardu RS 232 a RS 485. V měřicím kufříku je tlakoměr PM111 s výstupem RS485. Signál se tedy digitalizuje ještě v tlakoměru. [6] [9]

Manometr je opatřen displejem pro zobrazení hodnoty měřeného tlaku. Navíc má tlakoměr analogový programovatelný vstup. Ten se použije pro detekci stavu tlakového spínače (sepnuto/rozepnuto) k odeslání této informace do počítače. [6] [9]



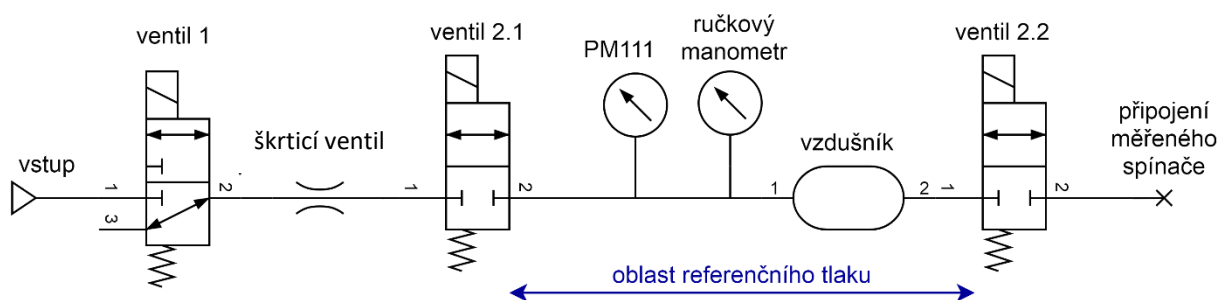
Obrázek 5: PM111 [9]

Byl zvolen rozsah 0–1 MPa. Chyba přístroje je 0,25 % FS, v tomto případě 2,5 kPa. V pracovním bodě to znamená relativní chybu 0,78 %. [6] [9]

4.3. Popis měřicího kufru

Měřicí kufr musí obsahovat následující části:

- Kontrolní tlakoměr, v tomto případě byl zvolen PM 111
- Pneumatické a elektrické připojení měřeného tlakového spínače
- Automaticky spínaná dvojice ventilů uzavírající oblast referenčního tlaku
- Automaticky spínaný ventil pro vypouštění vzduchu ze systému
- Regulátor vstupního tlaku
- Škrticí ventil



Obrázek 6: Pneumatické schéma měřicího kufru

Na Obrázku 6 je pneumatické schéma měřicího kufru.

Na **vstup** je přiveden stlačený vzduch. Vstupní tlak se seřizuje redukčním ventilem.

Ventil 1 ve vypnutém stavu vypouští vzduch ze soustavy přes hrdlo 3, v zapnutém stavu připojuje soustavu ke zdroji tlaku.

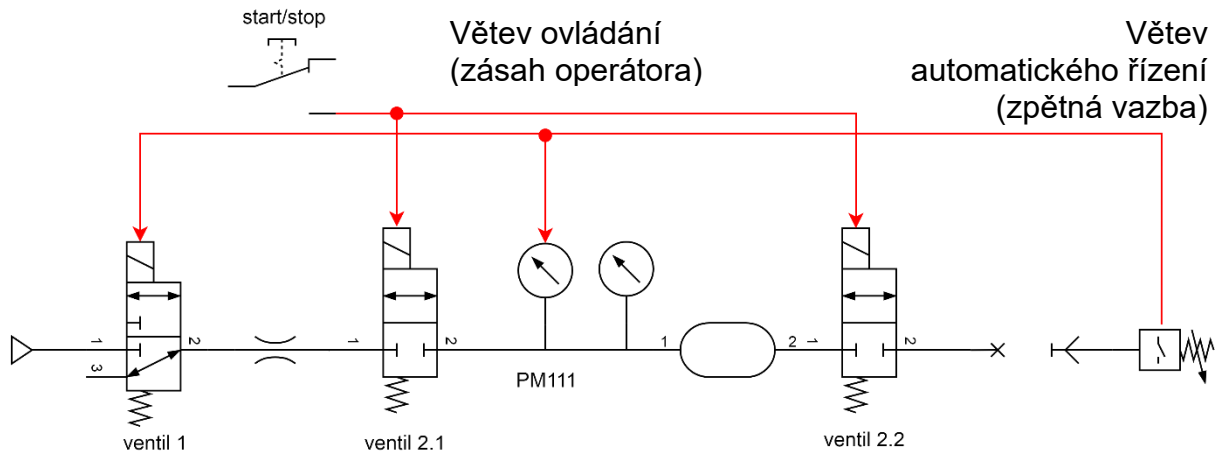
Oblast referenčního tlaku se plní a vyprazdňuje přes **škrticí ventil**, aby se docílilo požadované rychlosti změny tlaku (viz kapitolu 5.2.).

Ventily 2.1 a 2.2 se otevírají v závislosti na přepínači start/stop. Operátor ho spíná ve chvíli, kdy je na přípojce připojený tlakový spínač. Ventily 2.1 a 2.2 v tu chvíli rozšíří oblast referenčního tlaku na spínač a připojí soustavu na vstup tlaku/atmosférický tlak (v závislosti na stavu ventilu 1)

Za ventilem v oblasti referenčního tlaku se nachází kontrolní tlakoměr **PM111**, který měří referenční tlak a průběžně odesílá data o aktuální hodnotě tlaku a o stavu tlakového spínače (sepnuto/rozepnuto) do počítače.

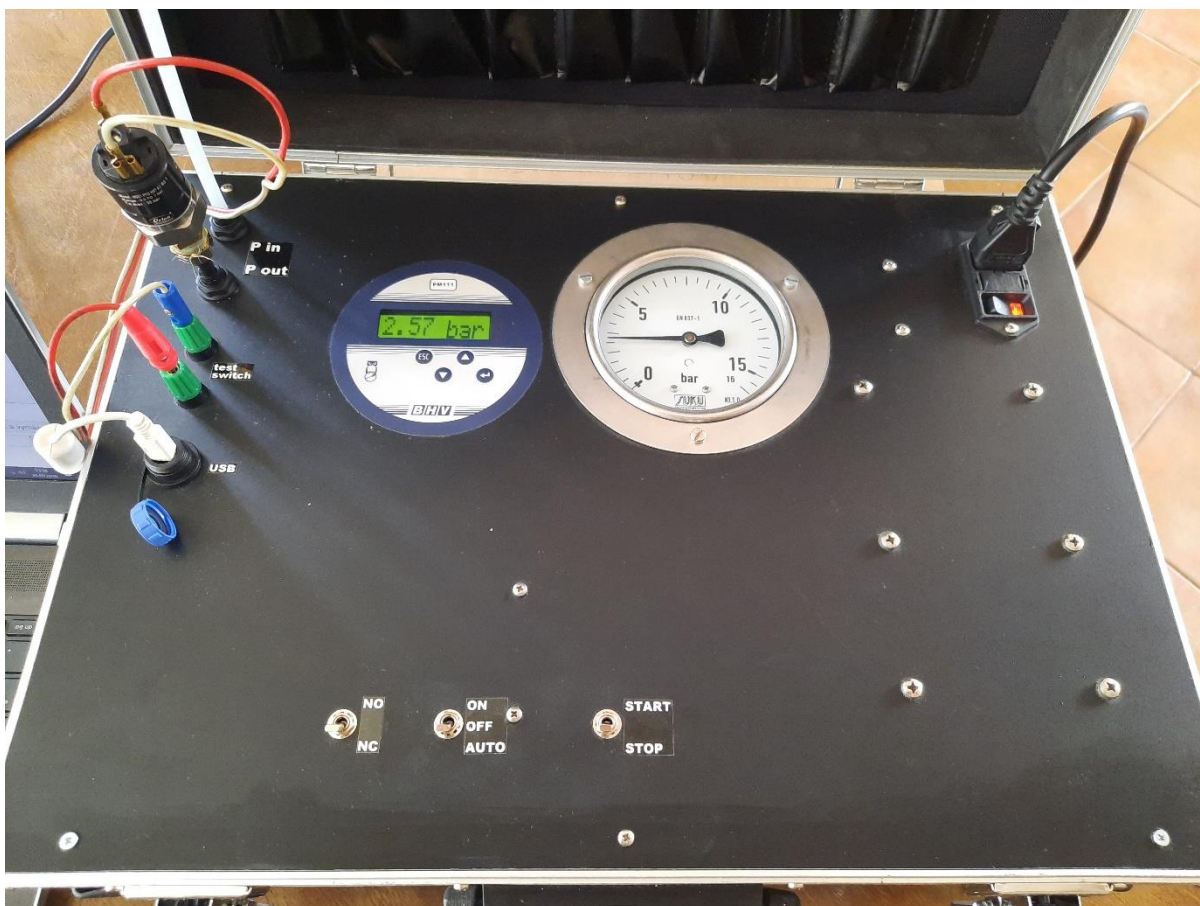
Dále je na oblast referenčního tlaku připojen **ručkový manometr** (rozsah 0...1600kPa, třída přesnosti 1,0) pro orientační kontrolu tlaku. Na ručkovém manometru je zároveň dobře vidět rychlost změny tlaku.

Vzdušník společně se škrticím ventilem určuje rychlost změny tlaku v soustavě. Zároveň uchovává objem natlakovaného vzduchu v oblasti referenčního tlaku. Při uzavření ventilů 2.1 a 2.2 a odpojení měřeného spínače unikne jen malé množství natlakovaného vzduchu. Po připojení dalšího měřeného tlakového spínače a otevření ventilů 2 dojde díky objemu vzduchu ve vzdušníku jen k malému poklesu referenčního tlaku a není tedy nutné čekat na opětovné zvýšení referenčního tlaku.



Obrázek 7: Pneumatické schéma s přenosem elektrických signálů měřicího kufru

Na Obrázku 13 je naznačený přenos signálu z tlakového spínače do **PM111** a ventilu 1 (spínání ventilu 1 je realizováno přes relé, které je spínáno tlakovým spínačem) a z ručního přepínače **start/stop** na ventily 2.



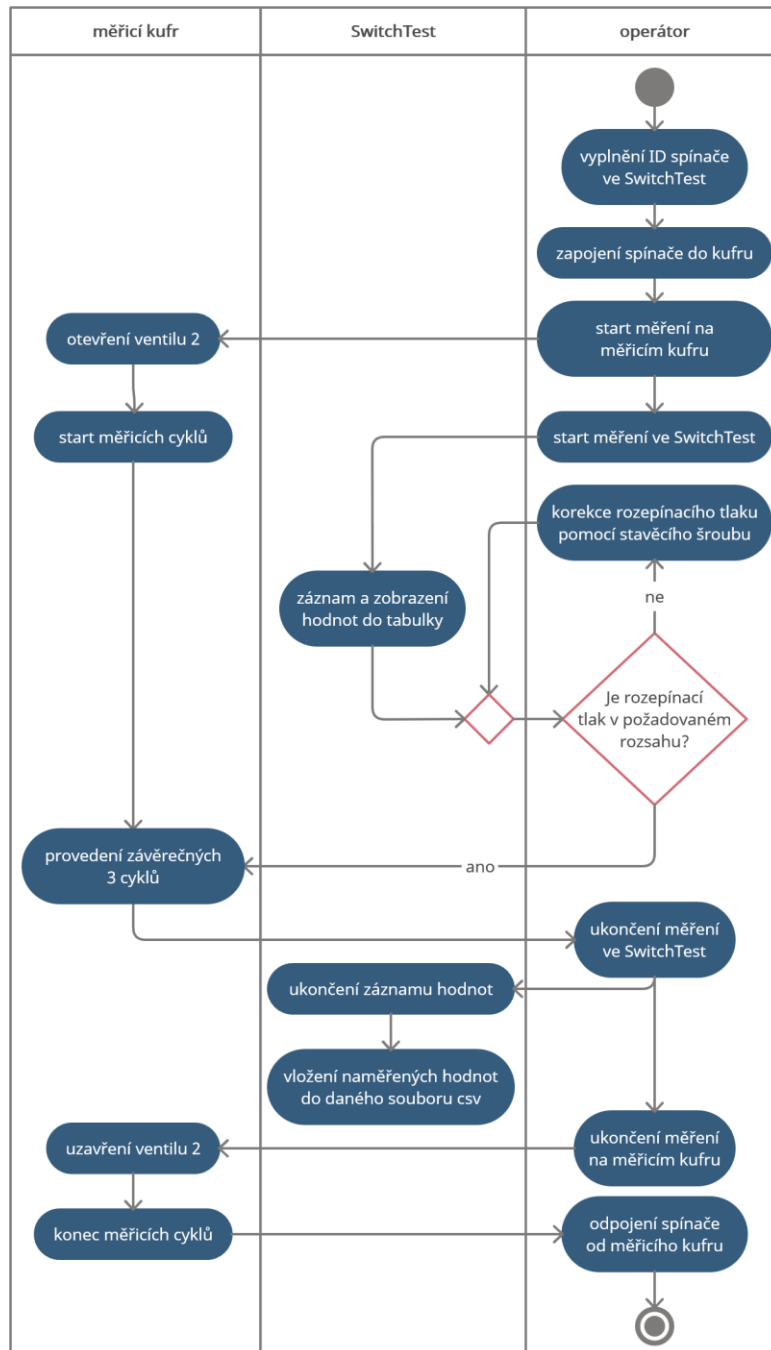
Obrázek 8: Foto čelního panelu měřicího kufru



Obrázek 9: Foto sestavy měřicího kufru

4.4. Postup měření

Celý měřicí proces probíhá za účasti operátora, počítače s monitorem, myší a klávesnicí s instalovaným programem SwitchTest a samotného měřicího kufru. Operátor musí být vybaven klíčem pro otáčení stavěcího šroubu na spínači, případně prostředkem pro označení spínače jeho identifikačním číslem (v našem případě se používá černý lihový fix). Funkce kufru již byla popsána, funkce programu SwitchTest je popsána v následující kapitole. Postup měření je znázorněn na diagramu níže.



Obrázek 10: UML diagram aktivit – seřízení a měření jednoho tlakového spínače

4.5. SwitchTest – software pro zpracování a záznam dat z měřicího kufru

Tento software běží na počítači vedle měřicího kufru, ke kterému je připojen přes linku RS-485. Z funkčního hlediska se jedná o nedílnou součást měřicího kufru.

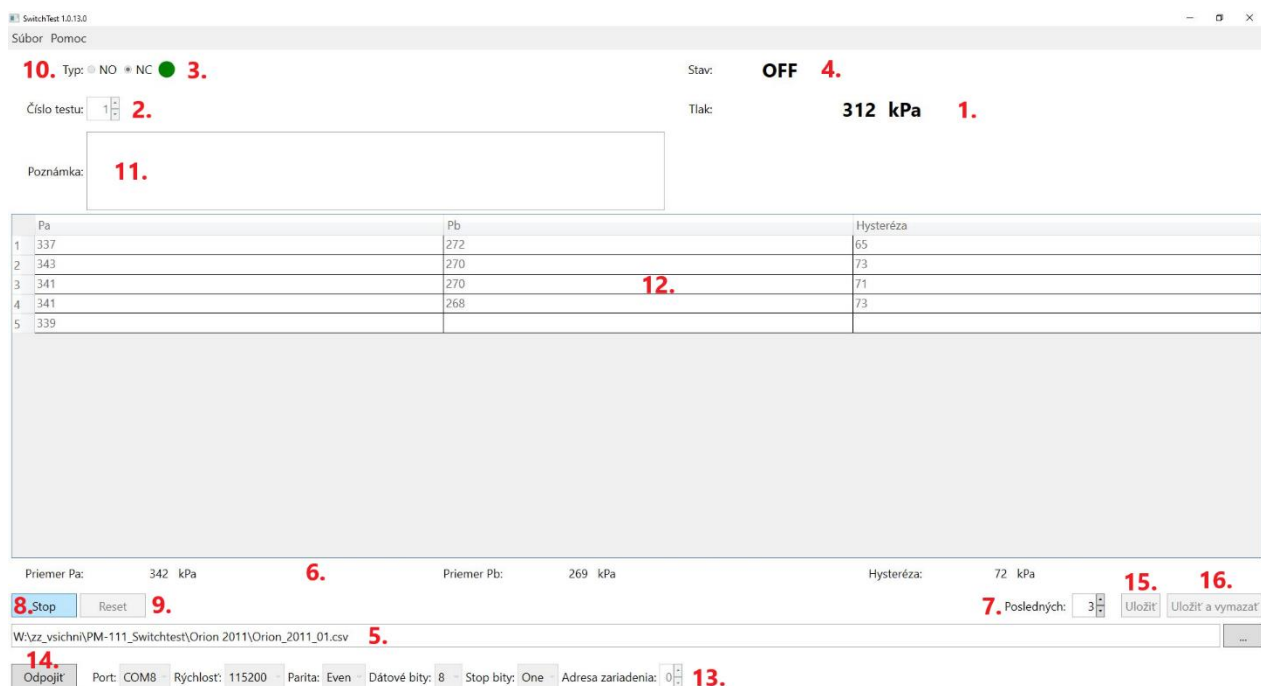
Byl vytvořen podle zadání BHV senzorů externí firmou. Autor této práce se podílel na jeho testování a připomínkování.

Účelem tohoto programu je:

- zaznamenat a zobrazit hodnoty spínacího a rozpínacího tlaku
- vypočítat a zobrazit hodnotu hystereze
- při opakovaném měření uspořádat data do tabulky a vypočítat a zobrazit jejich průměrné hodnoty.

Nejdůležitější požadavky pro tento SW jsou schopnost pracovat v reálném čase, grafické znázornění měřených a řízených veličin, grafické interaktivní prvky pro ovládání, záznam tzv. události do paměti. [2]

Na obrázku 11 je popsáno grafické rozhraní programu SwitchTest.



Obrázek 11: Grafické rozhraní programu SwitchTest

Kde:

1. Aktuální hodnota tlaku
2. Identifikační číslo spínače
3. Kontrolka spuštění měření (zelená – měření lze spustit, červená – měření nelze spustit)
4. Stav spínače (ON – sepnuto, OFF – rozepnuto)
5. Textové pole s názvem souboru pro export
6. Řádek průměrných hodnot z posledních n měření
7. Nastavení hodnoty n
8. Start/Stop záznamu hodnot do tabulky
9. Zahození obsahu tabulky
10. Režim záznamu hodnot (NO/NC)
11. Poznámka
12. Tabulka zaznamenaných hodnot
13. Konfigurace připojeného zařízení
14. Tlačítko připojení/odpojení od zařízení
15. Tlačítko pro uložení hodnot z tabulky do daného souboru
16. Tlačítko nové zkoušky – uložení hodnot z tabulky do daného souboru, zahození obsahu tabulky a zvýšení identifikačního čísla spínače o 1

Organizace naměřených dat

Aktuální tlak a okamžik změny stavu spínače jsou postačující informace pro provedení měření. Ve chvíli změny stavu spínače zaznamená program hodnotu aktuálního tlaku do tabulky na příslušné místo. V našem případě, kdy měříme spínač NO a tuto skutečnost v programu nastavíme, se do prvního sloupce tabulky zaznamenává rozpínací tlak, do druhého sloupce spínací tlak. Ve třetím sloupci se, odečtením druhého od prvního sloupce, zaznamená hodnota hystereze.

Export dat

Po dokončení měření, tedy ve chvíli, kdy je tlakový spínač nastaven na správný rozpínací tlak a v posledních třech měřeních vykazuje hodnoty v rámci své chyby, stiskne operátor tlačítko „Uložit a vymazat“. V takovém případě uloží program celé měření do csv (comma separated values, primitivní formát pro ukládání tabulek) souboru, který je společně s cestou zadáný v textovém poli. Pokud soubor neexistuje, program jej vytvoří. Pokud soubor už existuje, program přidá měřená data jako nový řádek. Po exportu hodnot vymaže program data z tabulky v programu a zvýší identifikační číslo spínače o 1.

Formát exportu dat je na obrázku níže:

343	11/22/2019 14:50:55	314.480	269.538	44.943		3	322.229	273.577	48.652	315.916	268.1
344	11/22/2019 14:52:59	320.207	289.470	30.737		3	342.106	300.957	41.149	325.238	293.4

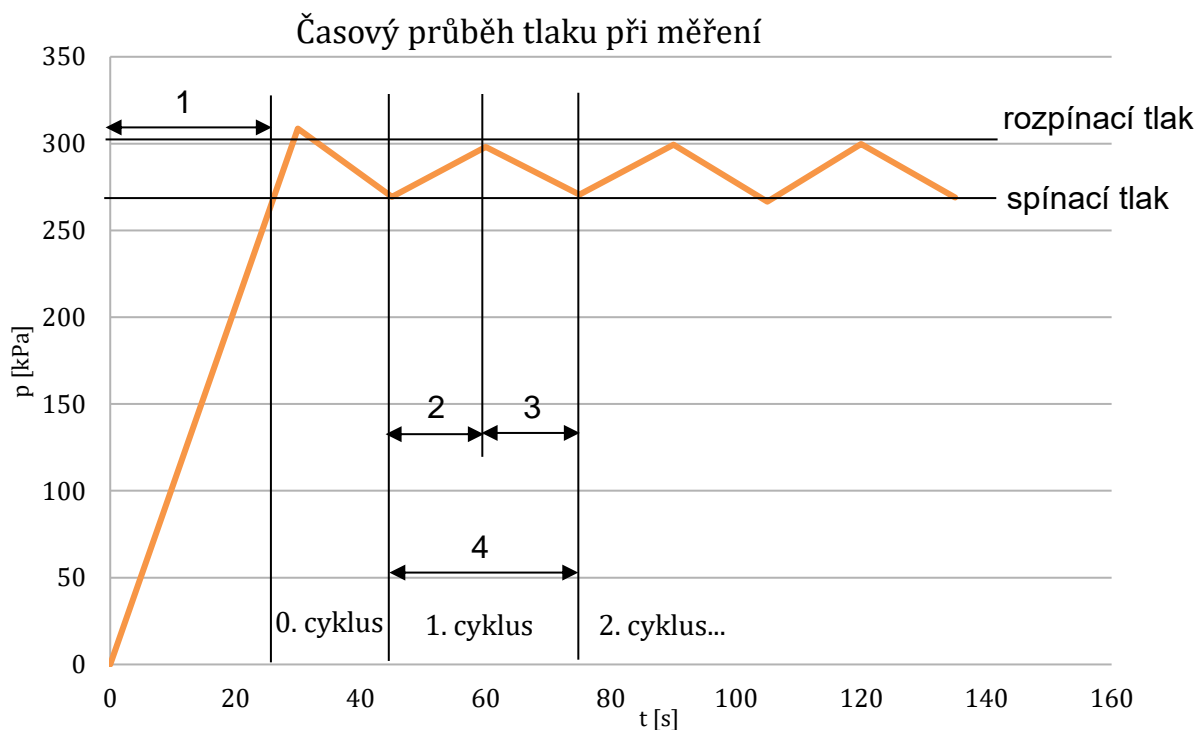
Obrázek 12: Formát exportu dat z programu SwitchTest

V 1. sloupci je identifikační číslo spínače. Ve 2. sloupci je časové razítko měření. V následujících 3 sloupcích je průměr rozpínacího, spínacího tlaku a hystereze z posledních n měření. V 6. sloupci je poznámka. Číslo n je uvedeno v 7. sloupci. Následují trojice rozpínací, spínací tlak a hystereze pro celé měření.

5. Záznam a zpracování naměřených dat

Pokusy v této kapitole byly provedeny autorem této práce a veškeré prezentované soubory jsou v přílohách této práce. Pokud nebude řečeno jinak, je jednotkou tlaku, hysterese a koeficientů rovnic kPa.

5.1. Počet měřicích cyklů

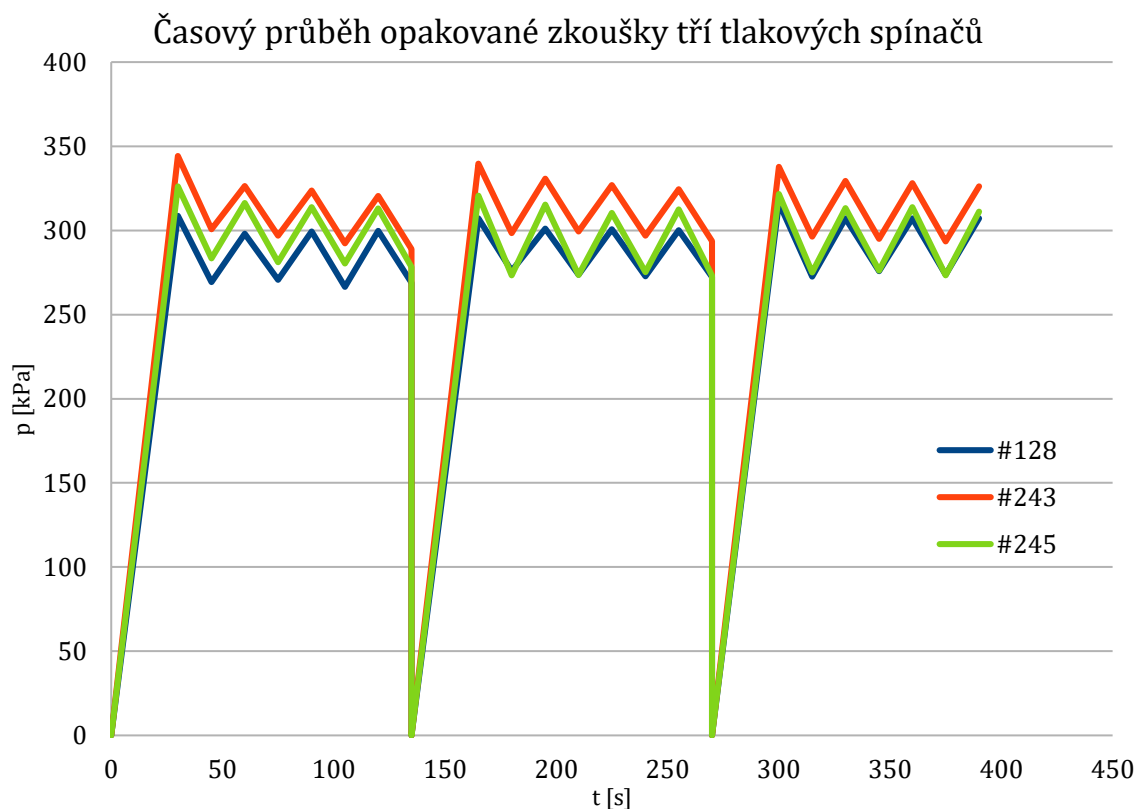


Obrázek 13: Časový průběh tlaku při měření spínače

Na Obrázku 13 je znázorněný časový průběh 4 cyklů měření spínače. Přechodové jevy mezi body jsou pro jednoduchost nahrazeny úsečkami. V průběhu lze definovat tyto oblasti

1. fáze zvyšování tlaku v měřicím kufří na pracovní úroveň
2. fáze tlakování
3. fáze vypouštění
4. 1. měřicí cyklus

První hodnota rozpínacího tlaku je výrazně vyšší než následující hodnoty rozpínacího tlaku. Pro lepší pochopení tohoto jevu bylo provedeno měření tří spínačů (s identifikačním číslem 128, 243 a 245), které předtím nebyly několik týdnů pod přetlakem. Zkouška byla provedena třikrát s každým spínačem, vždy s úplným vypouštěním tlaku z měřicího kufří. Časový průběh tlaku je znázorněn na grafu níže.

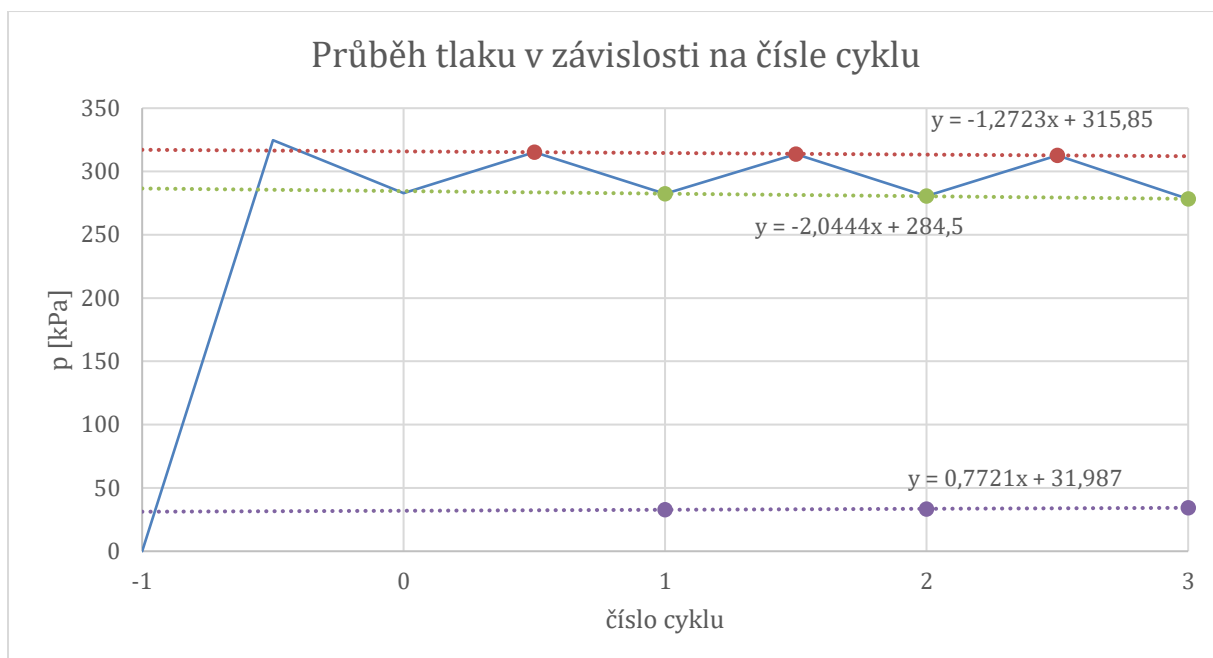


Obrázek 14: Časový průběh zkoušky tří spínačů

Z grafu je zřejmé, že odchylka při prvním měření se vyskytuje vždy, když se ve spínači zvyšuje tlak od nuly. Takový měřicí cyklus se definuje jako 0. cyklus a nelze ho použít pro výsledné měření. Následující cykly vykazují relativně stabilní výsledek a je tedy možné je použít pro výsledné měření.

Jev při 0. cyklu lze vysvětlit tvarovou pamětí pryžové membrány ve spínači. Při zvyšování tlaku od nuly musí tlak kromě pružiny tlačící na píst „přetlačit“ ještě membránu. První rozpínací tlak je tedy vyšší. Po „natažení“ membrány už klade jen minimální odpor a hodnoty tlaků už jsou skoro konstantní.

Spínače na grafu výše se chovají stejně, liší se jen hodnotou spínacího/rozpínacího tlaku. Pro zjištění trendu spínacího tlaku, rozpínacího tlaku a hystereze byly hodnoty tlaku těchto tří spínačů zprůměrovány pro každý časový bod. Časová osa byla nahrazena osou čísla cyklu. Výsledek je na Obrázku 15.



Obrázek 15: Průběh tlaku v závislosti na čísle cyklu

V oblasti 1. až 3. cyklu lze závislost měřených veličin na čísle cyklu vyjádřit rovnicemi

$$p_{rozepínací} = 315,9 - 1,272 \cdot n, \quad (3.6.3-1)$$

$$p_{spínací} = 284,5 - 2,044 \cdot n, \quad (3.6.3-2)$$

$$h = 31,99 + 0,7721 \cdot n, \quad (3.6.3-3)$$

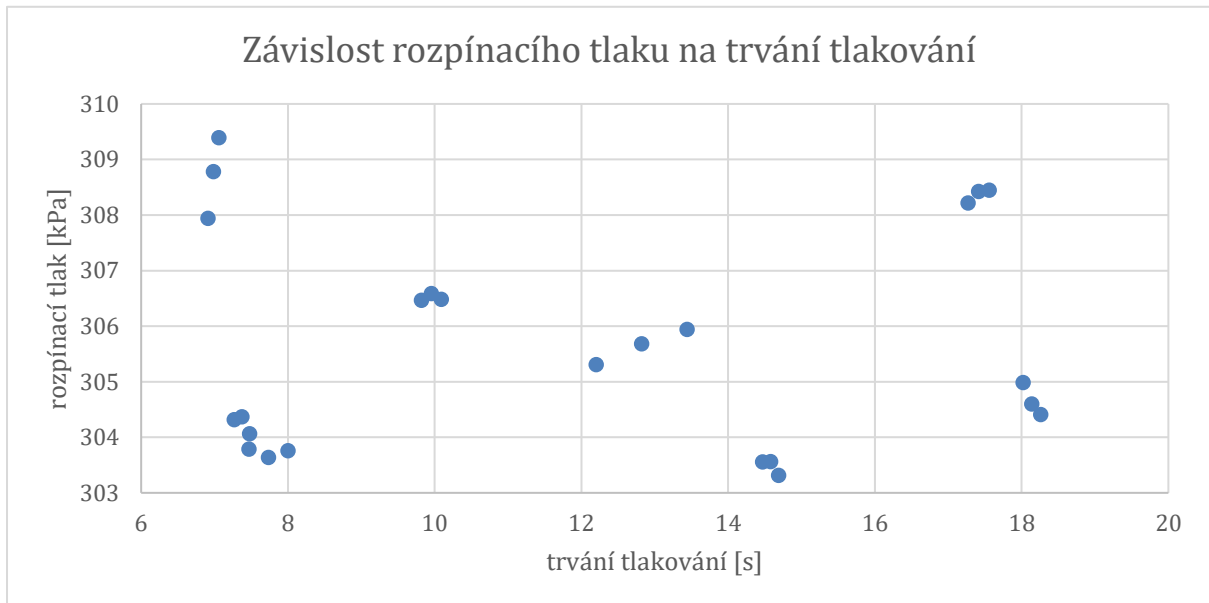
kde n odpovídá číslu cyklu a h je hystereze. Závislost hystereze na čísle cyklu lze v této oblasti považovat za konstantní. V zájmu vyšší přesnosti se výsledná hodnota hystereze získá z průměru tří posledních cyklů měření.

Závěr

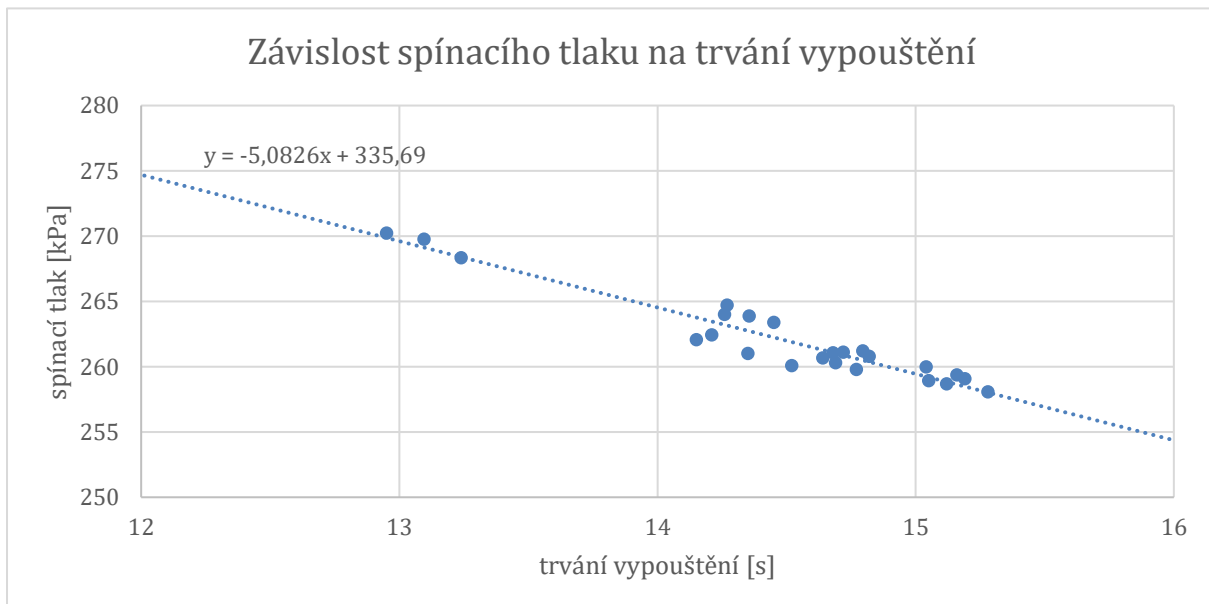
- Měření následující po tom, co byl ve spínači nulový přetlak, není věrohodné.
- Měření, která následují, už lze považovat za konstantní.
- V zájmu vyšší přesnosti se výsledná hystereze vypočte z posledních 3 hodnot

5.2. Trvání měřicího cyklu

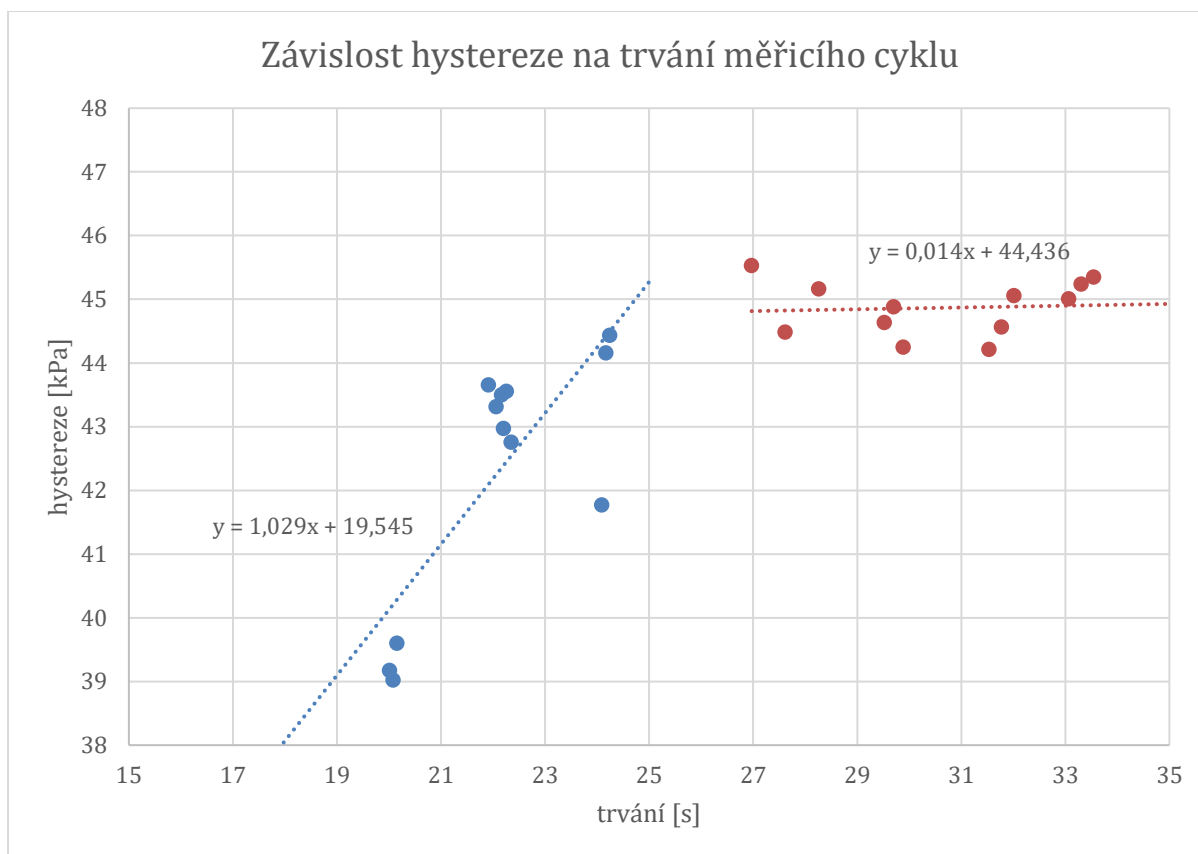
Z měření dne 6.11.2019 vyplynulo, že velikost spínacího tlaku a zároveň hodnota hystereze je závislá na rychlosti změny referenčního tlaku ve spínací. Velikost vstupního tlaku byla měněna, čímž se měnila i doba tlakování a vypouštění. Závislost spínacího, rozpínacího tlaku a hystereze je znázorněna na grafech níže.



Obrázek 16: Závislost rozpínacího tlaku na trvání tlakování



Obrázek 17: Závislost spínacího tlaku na trvání vypouštění



Obrázek 18: Závislost hystereze na trvání měřicího cyklu

Hodnoty rozpínacího tlaku v prvním grafu jsou rozprostřeny nahodile v rozptylu 7 kPa, a tedy v rámci absolutní chyby spínače (7,2 kPa). Lze tedy říci, že pro dobu tlakování v intervalu 7...18 s není mezi dobou tlakování a rozpínacím tlakem závislost.

V druhém grafu je vidět jasná závislost spínacího tlaku na době vypouštění. Tu lze v rozpětí 13...15,5 s popsat rovnicí

$$p_{spínací} = 335,7 - 5,083 \cdot t_{vypouštění} \quad (3.6.3-1)$$

Z této rovnice plyne mj. to, že při změně času vypouštění o 2 s se spínací tlak změní o 10,2 kPa. Vzhledem k absolutní chybě spínače je tedy nutné brát tento jev v úvahu.

Ve třetím grafu je závislost hystereze na trvání cyklu, tedy součtu trvání tlakování a vypouštění. V tomto případě jsou hodnoty hystereze rozprostřeny v rozptylu 7,5 kPa, což je v rámci chyby spínače. Na hodnotách je v intervalu 20...25 s patrná stoupající závislost, kterou lze popsat rovnicí

$$\Delta p = 19,55 + 1,029 \cdot t_{cyklu} \quad (3.6.3-2)$$

V intervalu 27...34 s jsou hodnoty prakticky konstantní, lze je popsat rovnicí

$$\Delta p = 44,44 + 0,014 \cdot t_{cyklu} \quad (3.6.3-3)$$

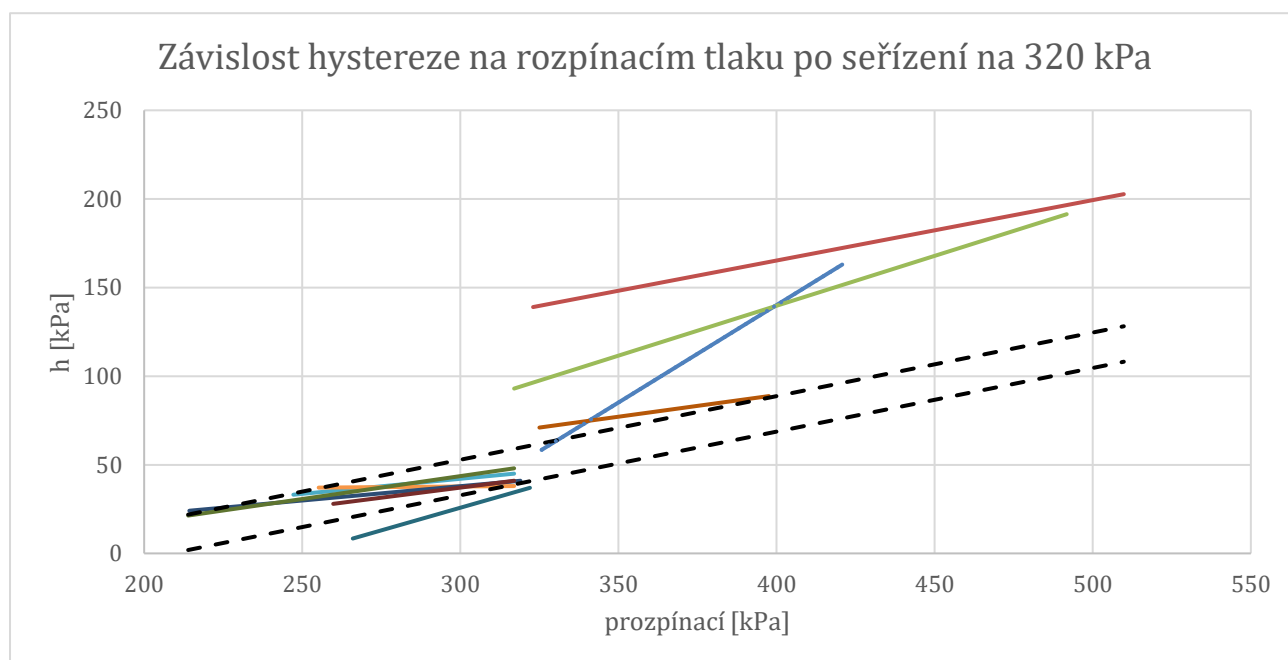
Vzhledem k povaze aplikace lze očekávat trvání pracovního cyklu v řádu minut, je tedy žádoucí provádět měření v oblasti trvání, kde už je hystereze konstantní. Doba trvání měřicího cyklu by tedy měla být minimálně 27 s. Z rovnice 3.4.3-3 plyne, že při délce měřicího cyklu o 60 s kratší, než bude pracovní doba cyklu, se dopustíme chyby 0,84 kPa.

Závěr

- Hodnota hystereze je v intervalu 27...34 s jen zanedbatelně závislá na trvání cyklu. Trvání cyklu bylo tedy stanoveno na 30 s.
- Hodnota rozpínacího tlaku je v intervalu 7...18 s nezávislá na době tlakování. Při seřizování spínače může být trvání tlakování kdekoli v tomto intervalu.

5.3. Závislost hystereze na rozpínacím tlaku

Z produktového listu plyne, že hodnota hystereze je závislá na hodnotě rozpínacího tlaku. Bylo provedeno měření na 10 tlakových spínačích. Každý spínač byl změřen s výchozím nastavením a poté seřizen na 320 kPa a znovu změřen. Pro každý spínač je úsečka v grafu níže.



Obrázek 19: Závislost hystereze na rozpínacím tlaku po seřizení na 320 kPa

Pro každou úsečku byla sestavena rovnice přímky, které je prvkem. Směrnice této přímky byla nazvána K_{hpr} konstantou. Její průměrná hodnota z tohoto měření je 0,359. V grafu jsou čárkované přímky s touto směrnicí pro maximální a minimální přípustnou hodnotu hystereze v pracovním bodě 320 kPa, tedy pro 40 kPa a 60 kPa.

Chybě tlakového spínače 7,2 kPa odpovídá chyba nastavení rozpínacího tlaku 20,1 kPa.

Závěr

- Hysterezi je nutné měřit v pracovním bodě seřízeném s řádově vyšší přesností než 20,1 kPa.
- Pro tlaky blízké pracovnímu bodu lze hysterezi korigovat pomocí K_{hpr} konstanty.

5.4. Nejistota měření

Za účelem stanovení nejistoty měření byl použit standardní postup používaný pro kalibraci tlakoměrů. Tento postup je zpracován v tabulkové aplikaci, jejíž vstup je jeden řádek z csv souboru exportovaného ze SW SwitchTest.

Na druhém listu se vyplní informace o měřeném spínači a kontrolním tlakoměru. Zároveň se na tomto listu zpracují data z prvního listu. To obnáší:

- Korekci naměřené hystereze pro pracovní bod
- Výpočet nejistoty typu B kontrolního tlakoměru a spínače. Nejistota spínače nehraje v tomto měření roli, protože sám spínač nemá kalibrované seřizování – spínač se seřizuje podle kontrolního tlakoměru.
- Výpočet nejistoty typu A hystereze, rozpínacího i spínacího tlaku.
- Výpočet celkové a celkové rozšířené nejistoty.
- Zobrazení změřené hodnoty hystereze včetně nejistoty.

Naměřená data:			kPa		
Kalibrováno pro bod:			320		
rozpínací tlak	spínací tlak	hystereze	A. korigovaná hystereze		
314.000	267.000	47.000	49,154	29	30
315.000	265.000	50.000	51,795	26	27
315.000	267.000	48.000	49,795	23	24
316.000	267.000	49.000		20	21
316.000	270.000	46.000		17	18
317.000	269.000	48.000		14	15
318.000	267.000	51.000		11	12
333.000	267.000	66.000		8	9
334.000	290.000	44.000		5	6
337.000	294.000	43.000		2	3
		3.000		-1	0
				-4	-3
				-7	-6

B. typu B		tlakoměr	
celková:		1,443	
spínač			
4,041		1,443	
4,041		1,443	
4,041		1,443	

	rozpínací tlak	spínací tlak	hystereze
C. nejistota typu A:	0,47	0,94	1,25
D. Celková nejistota:	1,52	1,72	1,91
D. Celková rozšířená nejistota:	3,04	3,45	3,815

E. hystereze = 50,2 ± 3,8 kPa

Obrázek 20: Výpočet nejistot v tabulkové aplikaci

Nejistota typu A se rovná směrodatné odchylce naměřených hodnot. Lze ji tedy vyjádřit vztahem:

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum(h_i - \bar{h})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.6.3-1)$$

kde:

h_i je jedna naměřená hodnota hystereze,

\bar{h} je aritmetický průměr hodnot hystereze,

n je počet měření.

Nejistota typu B závisí jen na kontrolním tlakoměru, vypočítá se podle vzorce:

$$u_b = \frac{\Delta Z_{max}}{m}, \quad (3.6.3-2)$$

kde:

ΔZ_{max} je maximální chyba kontrolního tlakoměru. V tomto případě je přesnost tlakoměru uvedena jako 0,25 % FS na rozsahu 1MPa, tedy $\Delta Z_{max} = 0,0025 \cdot 1e6 = 2,5 \text{ kPa}$,

m koeficient druhu rozdělení (v tomto případě se předpokládá rovnoměrné rozdělení, a tedy $m = \sqrt{3}$).

Celková nejistota se získá ze vztahu:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2}, \quad (3.6.3-3)$$

Pro pokrytí 95 % případů byl zvolen koeficient $k = 2$ a rozšířená standardní nejistota se vypočítá ze vztahu:

$$U = k \cdot u_c. \quad (3.6.3-4)$$

Korekce hystereze se provede podle vztahu:

$$h_k = h + K_{hpr} \cdot (p_{pracovní} - p_{rozpínací}), \quad (3.6.3-5)$$

kde:

h_k je korigovaná hodnota hystereze,

h je naměřená hodnota hystereze,

K_{hpr} je konstanta závislosti hodnoty hystereze na rozpínacím tlaku (viz kapitolu 5.3.),

$p_{pracovní}$ je požadovaný pracovní bod, v tomto případě 320 kPa,

$p_{rozpínací}$ je naměřený rozpínací tlak.

Výsledkem je zápis naměřené hodnoty hystereze včetně nejistoty $\overline{h_k} \pm U$, kde $\overline{h_k}$ je aritmetický průměr korigovaných hodnot hystereze. [2]

5.5. Tabulková aplikace pro zpracování měření

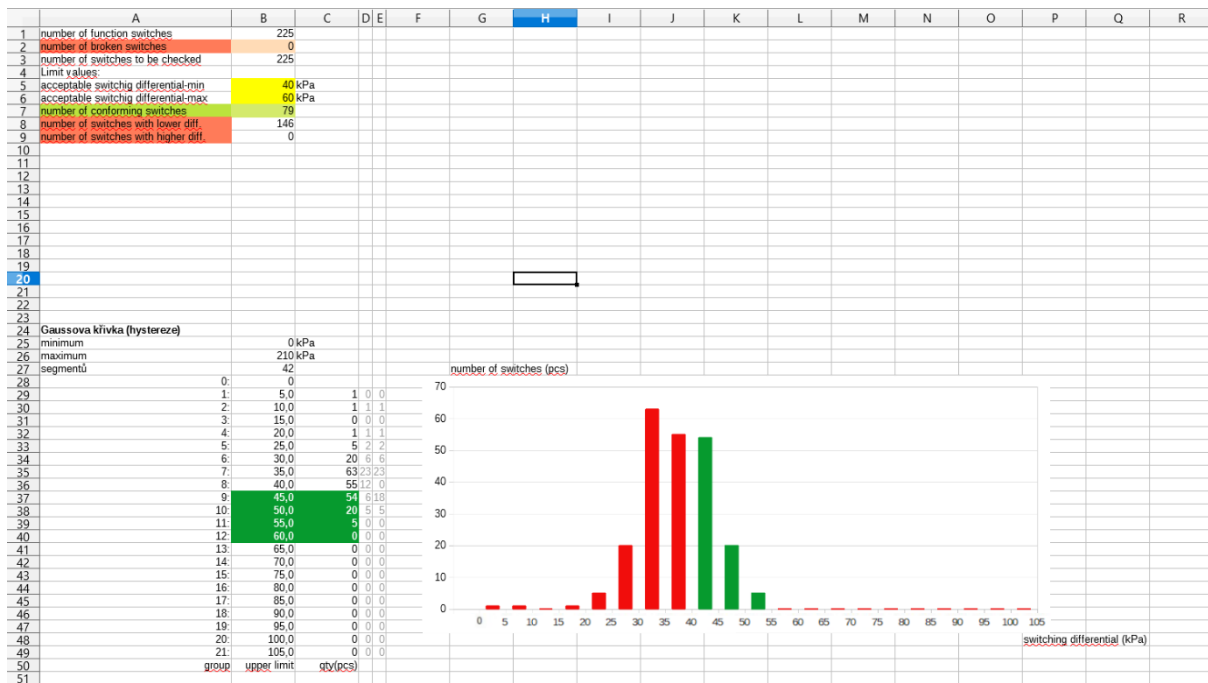
Vzhledem k nutnosti zpracovat data o více spínačích, řádově stovkách kusů v jedné objednávce byla vytvořena tabulková aplikace. Na list „measured data“ se zkopíruje 1., 3., 4. a 5. sloupec z exportovaného souboru csv. Zeleně se zvýrazní vyhovující spínače, tedy spínače s hodnotou hystereze v daných mezích.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	750	319	279	39																
2	751	319	283	35																
3	752	315	282	33																
4	753	314	292	22																
5	754	325	301	24																
6	755	323	286	36																
7	756	308	264	44																
8	757	300	267	33																
9	758	317	286	31																
10	759	319	286	33																
11	760	345	298	46																
12	761	329	290	39																
13	762	343	302	41																
14	763	319	272	47																
15	764	304	276	27																
16	765	303	272	31																
17	766	330	293	37																
18	767	315	283	32																
19	768	312	278	34																
20	769	307	275	33																
21	770	310	275	35																
22	771	321	282	38																
23	772	308	273	35																
24	773	313	261	51																
25	774	299	270	29																
26	775	317	281	36																
27	776	318	286	50																
28	777	315	286	48																
29	778	317	272	44																
30	779	317	282	35																
31	780	314	282	32																
32	781	312	273	39																
33	782	311	274	37																
34	783	319	270	49																
35	784	320	283	37																
36	785	318	285	33																
37	786	305	275	30																

Obrázek 21: List „measured data“ tabulkové aplikace

Na listu „Evaluation“ je vyhodnocení měření. Důležitými informacemi je počet funkčních (number of function switches) a nefunkčních (number of broken switches) spínačů, dále počet vyhovujících spínačů (number of conforming switches) a počet spínačů s vyšší/nížší hysterezí (number of switches with higher/lower diff.), než jsou dané meze (acceptable switching differential-min/max). Tyto informace jsou důležité hned z několika důvodů:

- V případě **reklamace** lze říci, jaká část reklamace je oprávněná. Zároveň lze rozeznat jednoznačné příčiny (nefunkční tlakové spínače) od méně jednoznačných (nižší/vyšší hystereze). Jak je totiž popsáno výše, i malá chyba v procesu měření může znamenat velkou chybu v měření hystereze.
- V případě **objednávky** lze říci, kolik spínačů je nutné vrátit zpět na reklamaci. Dále pak, jestli je chyba spíše v nefunkčnosti spínačů, nebo v příliš malé/velké hysterezi.
- Při porovnání měření dvou šarží lze určit, jak se změnil charakter nevyhovujících spínačů (příliš malá/velká hystereze).

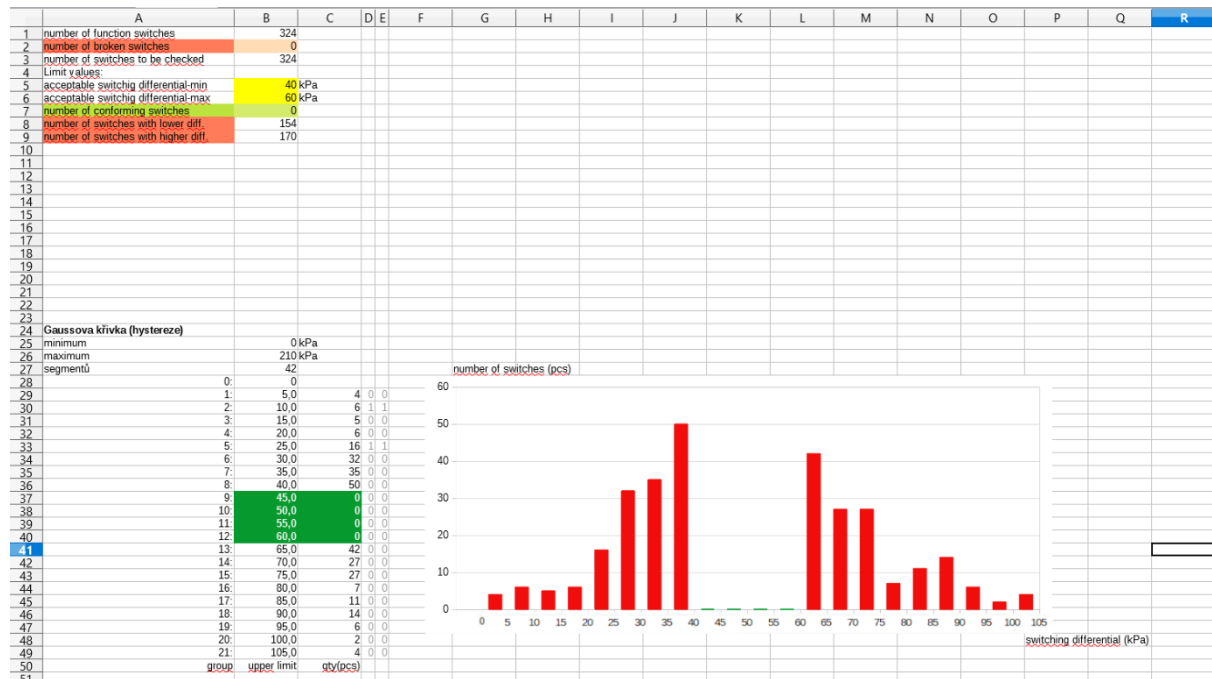


Obrázek 22: List „Vyhodnocení“ tabulkové aplikace

Součástí je také graf četnosti hystereze v intervalech po 5 kPa. Zelené sloupce jsou pro vyhovující spínače, červené pro nevyhovující spínače. Tento graf nabízí větší míru detailu při podrobnějším zkoumání problému.

5.6. Analýza výsledků měření

Na Obrázku 22 je namátkové měření 225 spínačů před odesláním. Je zjevné, že měřený soubor spínačů má hodnoty hystereze přibližně normálně rozdělené v okolí střední hodnoty 37,3 kPa, což je hodnota těsně pod minimální mezí 40 kPa.

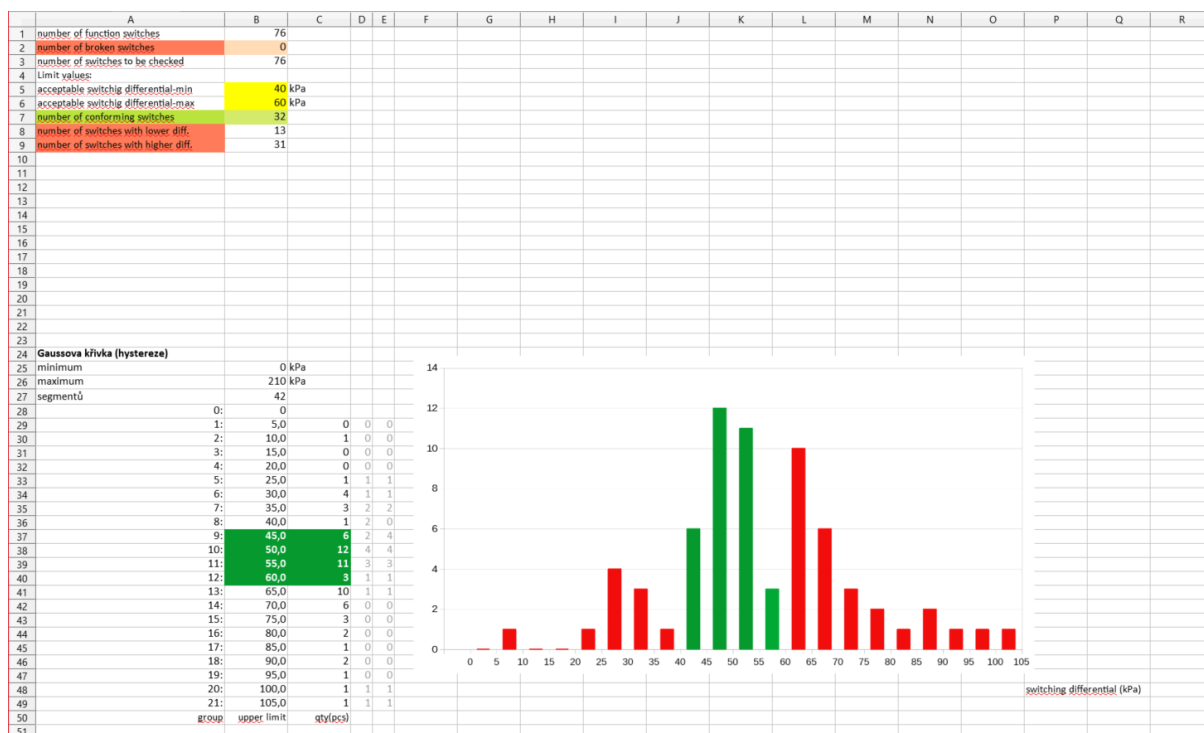


Obrázek 23: Spínače k reklamace v tabulkové aplikaci

Na Obrázku 23 je měření 324 spínačů vrácených výrobcí k reklamaci. Na grafu je znovu patrné přibližně normální rozdělení s vyjmutými sloupci vyhovující hodnoty hystereze. Na Obrázku 24 je fotografie spínačů vrácených k reklamaci.



Obrázek 24: Spínače k reklamaci u výrobce

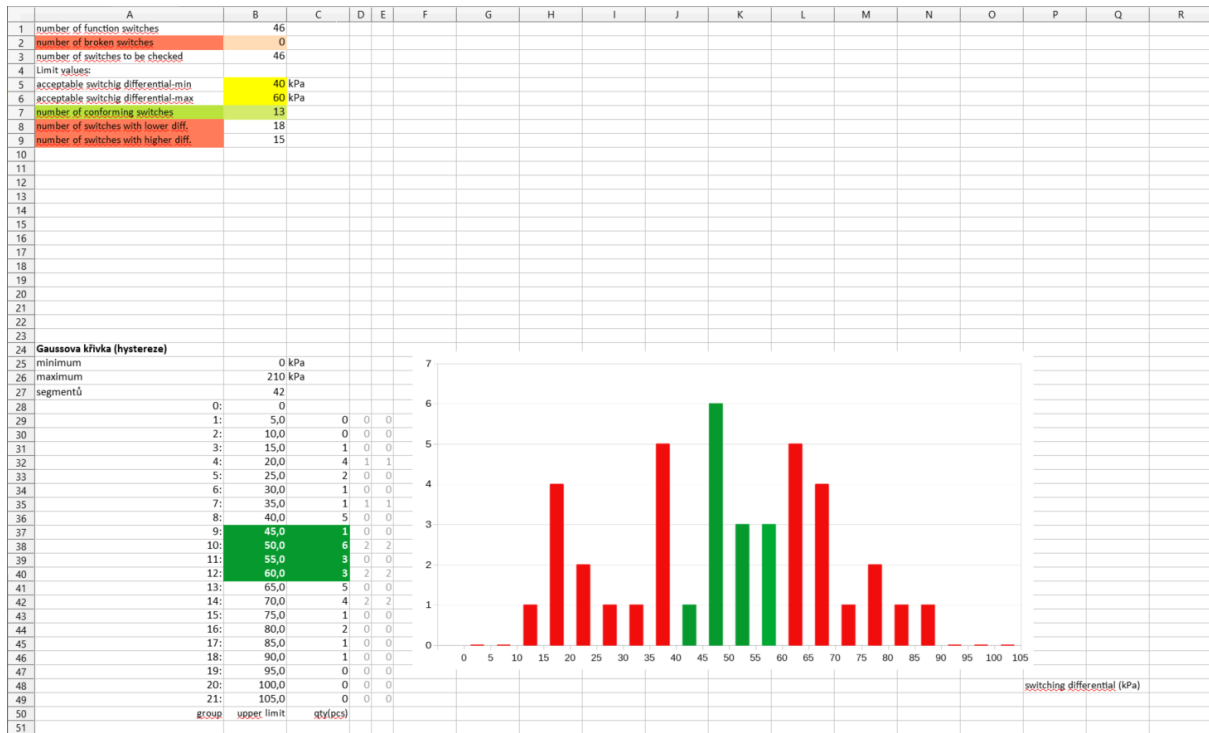


Obrázek 25: Reklamace 10 v tabulkové aplikaci

Na Obrázku 25 je výstup z tabulkové aplikace pro jednu z reklamací od firmy Lindr. Ačkoli jde podle zákazníka o spínače s nevyhovující hysterezí, měření ve firmě BHV senzory vykazuje více méně normální rozložení hodnot.

V tomto případě šlo navíc o spínače starší šarže se starší konstrukcí. Oproti inovované konstrukci, která je většinou zastoupena např. na Obrázku 22, je v tomto případě rozptyl hodnot velmi široký.

Staré konstrukce jsou i spínače na Obrázku 26, na kterém je patrný ještě větší rozptyl hodnot.



Obrázek 26: Reklamace 11 v tabulkové aplikaci

6. Závěr

Z provedených experimentů a analýzy postupu měření, které autor práce provedl, vyplývá, že proces měření byl navržen správně a výsledky jsou věrohodné. Z experimentů plyne, že naměřená hodnota hystereze se může výrazně lišit při nedodržení doby měřicího cyklu a nepřesném nastavení pracovního bodu. Zvolený kontrolní tlakoměr má nejistotu výrazně nižší, než je typická nejistota typu A, tedy vliv náhodných chyb, měřeného tlakového spínače.

Navržené měřicí zařízení i software pro zpracování naměřených dat, na jejichž vývoji se autor této práce podílel, splňuje požadavky na dodržení podmínek měření a jednoduchost ovládání. Tabulková aplikace pro analýzu dat vytvořená autorem této práce též poskytuje smysluplné výstupy, kterých se ve firmě běžně používá.

Nejistota při měření je v tomto případě tvořena z velké části náhodnými chybami ve spínači. V zájmu vyšší přesnosti měření by bylo vhodné se dále věnovat těmto jevům, které se dějí uvnitř tlakového spínače a které byly v této práci autorem nastíněny.

7. Seznam použité literatury

- [1] BAŠUS, Vladimír. Příručka měřící techniky pro strojírenství a energetiku. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [2] JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. *Technická měření*. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02138-6.
- [3] Kalibrátory tlaku v roce 2015. *Automa* [online]. 2015, 2015(5) [cit. 2020-12-16]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: <http://www.bhvsenzory.cz/cs/pub-21-kalibratory-tlaku-v-roce-2015>
- [4] SUBMINIATURE SWITCHES. In: *Orion Instruments* [online]. Pune (Indie): Orion Instruments, 2021 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: https://orion-instruments.com/images/product_images/OEM/SE_subminiature_series/SE_Subminiature_Series_Catalouge.pdf
- [5] Jak vybrat manometr? In: *Tlakový vzduch* [online]. Náchod: Ing. Richard Kašpar, 2020 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: www.tlakovyvzduch.cz/files/pdf_vyber_manometr.pdf
- [6] VACULÍK, Jan. Snímač tlaku PM111 – digitální manometr, spínač i převodník. *Automa* [online]. 2007, **2007**(3) [cit. 2021-02-19]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/snimac-tlaku-pm111-digitalni-manometr-spinaci-prevodnik-2007_03_34307_3304/
- [7] VACULÍK, Jan a Ludvík BEJČEK. Snímače tlaku. *Automa* [online]. 2011, **2011**(1) [cit. 2021-02-19]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42719.pdf
- [8] *Československý časopis pro fyziku*. 2011. Praha: Fyzikální ústav Akademie věd České republiky, 2011. ISSN 0009-0700.
- [9] Digitální manometr a snímač tlaku se spínací funkcí PM 111 s permanentním napájením. *BHV senzory* [online]. Kněževes u Prahy: BHV senzory [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <http://www.bhvsenzory.cz/sites/default/files/files/download/pm111.pdf>
- [10] VACULÍK, Jan a Petr HEJL. Spínací manometry a tlakové spínače. *Automa* [online]. 2004, 2004, **2004**(3) [cit. 2021-03-24]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/spinaci-manometry-a-tlakove-spinace-2004_03_32235_2995/
- [11] ČESKO. Část 3 zákona č. 505/1990 Sb., o metrologii. In: *Zákony pro lidi.cz* [online]. © AION CS 2010-2021 [cit. 2. 5. 2021]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1990-505#cast3>

[12] CÉZOVÁ, Eliška. Metrologie v praxi. *Metrie* [online]. METRIE spol. s r.o, 2016, 2016 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.metrie.cz/metrologie/cz>

8. Seznam obrázků

Obrázek 1: Trubicový tlakoměr: a) uspořádání přístroje, b) deformace trubice [2] ...	12
Obrázek 2: Membránový tlakoměr [2]	13
Obrázek 3: Tlakový spínač pístový v řezu.....	16
Obrázek 4: Orion SE tlakový spínač v řezu [4].....	18
Obrázek 5: PM111 [9]	21
Obrázek 6: Pneumatické schéma měřicího kufru	22
Obrázek 7: Pneumatické schéma s přenosem elektrických signálů měřicího kufru .	23
Obrázek 8: Foto měřicího kufru.....	24
Obrázek 9: Foto sestavy měřicího kufru.....	24
Obrázek 10: UML diagram aktivit – seřízení a měření jednoho tlakového spínače..	25
Obrázek 11: Grafické rozhraní programu SwitchTest.....	27
Obrázek 12: Formát exportu dat z programu SwitchTest.....	28
Obrázek 13: Časový průběh tlaku při měření spínače.....	29
Obrázek 14: Časový průběh zkoušky tří spínačů	30
Obrázek 15: Průběh tlaku v závislosti na čísle cyklu	31
Obrázek 16: Závislost rozpínacího tlaku na trvání tlakování	32
Obrázek 17: Závislost spínacího tlaku na trvání vypouštění	32
Obrázek 18: Závislost hystereze na trvání měřicího cyklu	33
Obrázek 19: Závislost hystereze na rozpínacím tlaku po seřízení na 320 kPa	34
Obrázek 20: Výpočet nejistot v tabulkové aplikaci	35
Obrázek 21: List „measured data“ tabulkové aplikace	37
Obrázek 22: List „Vyhodnocení“ tabulkové aplikace.....	38
Obrázek 23: Spínače k reklamace v tabulkové aplikaci	39
Obrázek 24: Spínače k reklamaci u výrobce	39

Obrázek 25: Reklamace 10 v tabulkové aplikaci	40
Obrázek 26: Reklamace 11 v tabulkové aplikaci	41