

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroniky a informačních technologií

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Regulace tlaku plynu v nádobách

Autor práce: **Filip Drtina**  
Vedoucí práce: **Prof. Ing. Milan Štork CSc.**

---

2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Filip DRTINA**  
Osobní číslo: **E19B0083P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Téma práce: **Regulace tlaku plynu v nádobách**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

## Zásady pro vypracování

1. Navrhněte a realizujte systém pro regulaci tlaku v nádobě (nádobách) pomocí mikrokontroléru. Celý systém se bude skládat z miniaturního kompresoru, nádoby (nádob) ve kterých se bude mikrokontrolérem regulovat tlak pomocí elektricky ovládaných ventilů. Systém bude např. modelem řízení hyperbarické komory.

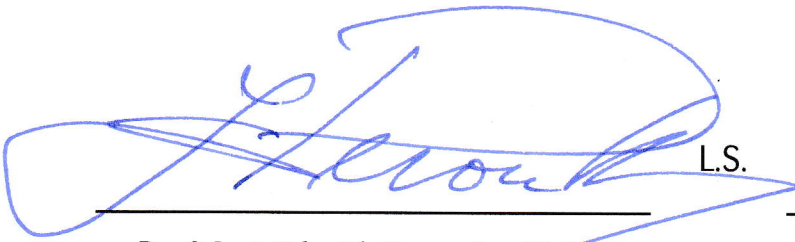
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40**  
Rozsah grafických prací: **5**  
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Naci Zafer, Greg R. Luecke: Stability of gas pressure regulators,  
[https://www.researchgate.net/publication/222654817\\_Stability\\_of\\_gas\\_pressure\\_regulators](https://www.researchgate.net/publication/222654817_Stability_of_gas_pressure_regulators)
2. Rami El Golli,: Modelling of a pressure regulator,  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01845776/file/modelling-of-a-pressure-regulator.pdf>
3. Weixiang Ni: Mathematical Model of Small-Volume Air Vessel Based on Real Gas Equation,  
<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiUmpWu64rwAhXI2KQKHW0HArkQFjAFegQICBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.mdpi.com%2F2073-4441%2F12%2F2%2F530%2Fpdf&usq=AOvVaw2Mn07-s8ogQ1iCwKQrG75P>

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Milan Štork, CSc.**  
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2023**

  
L.S.  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

  
\_\_\_\_\_  
**Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá testováním funkcí a principů řízení několika elektricky ovládaných pneumatických ventilů, které se mohou nalézt využití například v oblasti zdravotnictví.

Práce seznamuje s principy měření krevního tlaku a využití regulace tlaku u hyperbarické komory a umělé plicní ventilace. Dále práce zmiňuje různorodé metody pro stabilizaci regulátoru, představuje použité ventily a snímače tlaku. Jsou představeny návrhy a dimenzování obvodů pro jednotlivé ventily a senzoru zapojených v pneumatickém obvodu. Z měření zkonstruovaného systému jsou vyhodnocovány různé parametry, vlastnosti jednotlivých komponent a vzájemné ovlivnění mezi nimi. Následně představuje mikrokontroler, naprogramovaný řídicí algoritmus systému s použitím principu hystereze a komunikaci s počítačem po sériové lince UART/USART. Také představuje program pro uživatelské rozhraní pro řízení tlaku a zobrazování informací o řízeném procesu. Závěrem práce popisuje a zhodnocuje funkčnost celého systému.

## **Klíčová slova**

regulace tlaku, regulátor, mikrokontroler, algoritmus řízení pneumatického systému, stabilita regulačního pochodu, měření provozních veličin, hyperbarická komora, plicní ventilace, měření krevního tlaku, pneumatický ventil, senzor měření tlaku, měření tlaku

## **Abstract**

This thesis deals with the testing of the functions and control principles of several electrically operated pneumatic valves, which may find application in, for example, the medical field.

The thesis introduces the principles of blood pressure measurement and the use of pressure control in hyperbaric chamber and artificial lung ventilation. Furthermore, the thesis mentions various methods for regulator stabilization, and presents the valves and pressure sensors used. The design and dimensioning of circuits for each valve and sensor involved in the pneumatic circuit are introduced. From the measurements of the engineered system, various parameters, properties of the components and the interaction between them are evaluated. Then it presents the microcontroller, the programmed control algorithm of the system using the hysteresis principle and the communication with the computer via UART/USART serial link. It also presents the user interface program for pressure control and display of information about the controlled process. Finally, the thesis describes the performance evaluation of the whole system.

## **Key Words**

pressure regulation, regulator, microcontroller, pneumatic system control algorithm, regulation process stability, measurement of operating parameters, hyperbaric chamber, artificial lung ventilation, blood pressure measurement, pneumatic valve, pressure measuring sensor, pressure measurement

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, panu Prof. Ing. Milanovi Štorkovi CSc. za pomoc při měření a odbornou konzultaci, kterou mě dokázal nasměrovat ke správnému řešení.

# Obsah

1	Úvod (Simulace, testování několik druhů ventilů).....	- 1 -
1.1	Tlak plynu .....	- 1 -
1.2	Využití.....	- 1 -
2	Technologie měření a regulace.....	- 5 -
2.1.1	Stabilita regulačního pochodu .....	- 10 -
2.2	Teorie měření provozních veličin .....	- 17 -
2.2.1	Rozdělení snímačů.....	- 19 -
2.3	Převody mezi různými jednotkami tlaku .....	- 20 -
2.4	Senzor měření tlaku.....	- 20 -
2.4.1	RVA Series RVAQ300GU .....	- 20 -
2.5	Ventily se zpětnou vazbou o hodnotě výstupního tlaku.....	- 20 -
2.5.1	Proporcional mini piezo-valves piezotronic 630 000 76 .....	- 20 -
2.5.2	Electropneumatic 3 ports proportional valve sentronic 601 00 041 010 713 970 518 .....	- 21 -
2.5.3	Aventics proportional valves Sentronic <sup>D</sup> 608 160 111 .....	- 24 -
2.5.4	MINI-SOLENOID valves 302 10010 - LP2 – 2/2NC .....	- 25 -
2.6	Princip simulace regulace tlaku.....	- 25 -
3	Vlastní práce .....	- 29 -
3.1	Zprovoznění proporcionálního piezoelektrického ventilu 630 000 76 .....	- 29 -
3.2	Zprovoznění elektropneumatického proporcionálního ventilu Sentronic 601 00 041 010 713 970 518 .....	- 32 -
3.3	Kompresor.....	- 36 -
3.4	Použití senzoru series RVAQ300GU .....	- 40 -
3.5	Použité zdroje.....	- 41 -
3.5.1	Zdroj 9 V Aimtec AME10-9SCJZ.....	- 41 -
3.5.2	Zdroj ±15 V Recom RAC20-15DK.....	- 42 -
3.5.3	Zdroj 24 V kamn3024.....	- 43 -
3.6	Ventil 302 100 10 – P.....	- 43 -
3.7	Zhodnocení naměřených a získaných dat.....	- 44 -

3.8	Řídící program mikrokontroleru .....	- 48 -
3.8.1	Mikrokontroler Nucleo STM32F303K8 .....	- 48 -
3.8.2	Program.....	- 49 -
3.9	Uživatelská aplikace Windows.Forms pro mikrokontroler.....	- 51 -
4	Zhodnocení a závěr.....	- 52 -
5	Literatura .....	I
6	Přílohy .....	III



## Seznam symbolů a zkratek

<b>Značka</b>	<b>Popisek / Jednotka</b>
<i>p</i>	tlak
<i>Pa</i>	Pascal
<i>atm</i>	normální atmosférický tlak
<i>mmHg</i>	milimetrů rtuťového sloupce
<i>PSI</i>	libra na čtverečný palec (z angl: <i>pound per square inch</i> )
<i>V</i>	Volt
<i>W</i>	Watt
<i>l/min</i>	litrů za minutu
<i>m<sup>3</sup>/h</i>	metrů krychlových za hodinu
<i>mm</i>	milimetr
<i>N</i>	Newton
<i>ρ</i>	hustota
<i>T</i>	teplota
<i>K</i>	poměr měrných tepel
<i>kg</i>	kilogram
<i>°C</i>	stupeň Celsia
<i>K</i>	Kelvin
<i>Hz</i>	Hertz
<i>B</i>	byte
<i>μC</i>	mikrokontroler

## 1 Úvod (Simulace, testování několik druhů ventilů)

Tato práce vznikla za účelem otestovat funkci a princip řízení několika elektricky ovládaných pneumatických ventilů, které se mohou využívat ve zdravotnictví pro měření krevního tlaku nebo řízení tlaku v hyperbarické komoře.

### 1.1 Tlak plynu

Tlak je fyzikální síla působící kolmo na jednotku plochy. Matematicky jej vyjádříme:

$$p = \frac{F}{S} \quad [Pa] \quad (1)$$

kde  $F$  je působící síla a  $S$  je plocha na kterou síla působí.

Tlak označujeme malým písmenem  $p$  a jeho jednotka je Pascal (Pa), která je definována jako velikost síly 1 N působící na plochu 1 m<sup>2</sup>.

Snímače tlaku můžeme rozdělit do třech hlavních skupin tlakoměrů podle velikosti měřeného tlaku: [1]

- Nanometry – přetlak
- Barometry – atmosférický tlak
- Vakuometry – podtlak

Také je můžeme rozdělit podle způsobu měření tlaku s tenzometry:

- Odporové tenzometry
  - Drátové
    - S vlnovou mřížkou
    - Lepené
  - Polovodičové
    - Difundované
  - Monokrystalické
    - Lepené
    - Se siloměrným členem
- Optické tenzometry
- Kapacitní tenzometry

### 1.2 Využití

Regulace tlaku se hojně využívá ve zdravotnictví. Nejčastěji se s ní setkáme při měření krevního tlaku pacienta tonometrem<sup>1</sup>. Krevní tlak je tlak proudící krve působící na stěnu

---

<sup>1</sup> Tonometr je přístroj měřící krevní tlak nepřímou metodou.

cévy, jde převážně o tepenný (arteriální) tlak. V praxi, díky velké přesnosti, lékaři měří krevní tlak rtuťovým tonometrem. Ten se skládá z manometru<sup>2</sup> a nafukovacího systému balónku s výpustným ventilem s pomocí fonendoskopu<sup>3</sup>. Tímto systémem mačkáním balónku se zvýší tlak, dokud se nezastaví průtok krve tepnou. Následně se ventilem balónku vypouští vzduch z manžety. Když fonendoskopem jsou slyšet první zvuky proudící turbulentní krve (tzv. Korotkovovy zvuky<sup>4</sup>), odečte se z manometru systolický tlak a v okamžiku kdy Korotkovovy zvuky vymizí odečítá se diastolický tlak. Na stejném principu pracují Aneroidní tonometr a Digitální Tensoval duo control, ale tyto přístroje mají menší přesnost.

Existuje také metoda digitálního měření na oscilometrickém principu. Tato metoda detekuje oscilace v tepně při největších tlakových změnách. Tonometr stanovuje hodnotu středního arteriálního tlaku, ze kterého poté programově dopočítává systolickou a diastolickou velikost tlaku. Tato metoda už z principu měření není přesná a závisí na pružnosti tepen. [2] [3]

U měření krevního tlaku není nastavování tlaku složité. S náročnější regulací tlaku se setkáme při unikátní léčebné metodě Hyperbarickou komorou. Hyperbarická komora je speciální uzavřené natlakované zařízení, v němž pacienti dýchají stoprocentně čistý kyslík, který se pomalu rozpouští v krevní plazmě. To funguje na principu jednoduchého přirozeného fyzikálního zákona: větší tlak umožňuje většímu objemu plynu snadno se rozpustit v tekutinách. Se stoupajícím tlakem v komoře na dvojnásobek až trojnásobek úrovně atmosférického tlaku významně roste i množství kyslíku rozpuštěného v krvi. Díky tomu je v těle pacienta větší koncentrace kyslíku přenášena nejen červenými krvinkami, ale také krevní plazmou a lépe se dostává k jednotlivým tkáním a orgánům. To snižuje účinky nedostatku kyslíku. Oblasti málo zásobené kyslíkem vznikají například chronickými chorobami, akutními poraněními, otravou oxidem uhelnatým nebo při dekompresním onemocnění potápěčů. Přetlak v hyperbarické komoře je udržován na přesných hodnotách pomocí kompresoru a moderní měřicí a regulační technikou. [5] [6]

---

<sup>2</sup> Manometr je mechanické měřidlo tlaku plynu nebo kapaliny. Speciální druhy manometrů mohou mít své vlastní názvy, např. barometr, barograf, aneroid.

<sup>3</sup> Fonendoskop slouží k přenosu zvuku z vyšetřovaného místa tak, aby bylo snížení hlasitosti přenášeného zvuku co nejmenší.

<sup>4</sup> Korotkovovy zvuky jsou vytvářeny vibrací tepnou vlivem vířivého toku krve. Snižováním tlaku víření postupně ustává. Korotkovova metoda je nepřímá metoda měření krevního tlaku. [4]

V situacích, kdy je třeba podpořit dýchací systém nemocných, u kterých došlo ke vzniku závažné ventilační nebo oxygenační poruchy nebo jsou vznikem této poruchy v ohrožení, se využívá umělá plicní ventilace (UPV). UPV je způsob dýchání při kterém je průtok plynu respiračním systémem plně nebo částečně zajištěn mechanickým přístrojem. UPV může být vedena neinvazivním způsobem, který využívá různé masky, nebo způsobem invazivním, pro jehož využití je třeba adekvátní zajištění dýchacích cest například pomocí zavedení tracheální rourky do průdušnice (endotracheální intubace) nebo umělým vyústěním průdušnice na povrch těla chirurgickým výkonem (tracheostomie). UPV přichází k zvažení, pokud jsou přítomny klinické nebo laboratorní známky nedostatečné oxygenace nebo ventilace, kdy se musí zohlednit celkový stav pacienta a je velmi individuální.

Podle mechanismu průtoku plynů dělíme UPV na následující čtyři skupiny.

- **Ventilace přetlakem** je nejrozšířenější typ (tzv. **konvenční ventilace**). Používá dechové frekvence blízké fyziologickým a velikost dechového objemu větší než velikost mrtvého prostoru<sup>5</sup>. Velikost potřebného tlaku je určována požadovanými průtoky (poddajností hrudníku a plic, rezistenci ventilačního okruhu a velikostí endexpiračního alveolárního tlaku).
- **Ventilace podtlakem** (tzv. **železné plíce**) se dnes využívá jen u pacientů s neuromuskulárními poruchami. S tímto typem ventilace je bez rizika komplikací spojených se zajištěním dýchacích cest.
- **Trysková ventilace** využívá frekvence okolo 150 dechů za minutu, přičemž je vzduch vháněn do zúženého místa okruhu (trysky). To zvyšuje rychlost proudění vzduchu, který se tak dostane až do plicních sklípků. Umožňuje tak udržet efektivní ventilaci i při otevřených dýchacích cestách, například v hrudní chirurgii pro výkony na průdušnici.
- **Oscilační ventilace** využívá vyšších frekvencí a velmi malých objemů, to umožňuje udržování prakticky konstantního tlaku v plicních sklípcích. Používá se například při homogenním plicním poškození.

Mechanismus dechů, které jsou přítomny při konvenční UPV, dělíme na čtyři základní typy:

---

<sup>5</sup> Mrtvý dýchací prostor představuje tu část vdechnutého vzduchu, která se neúčastní výměny plynů v plicních sklípcích.

- **Dech řízený** – dech plně řízený ventilátorem
- **Asistovaný** – dech je iniciován pacientem, ale jeho další průběh je plně řízen ventilátorem
- **Podporovaný** – ventilátor zvyšuje aspirační průtok u dechu jinak řízeného pacientem
- **Nepodporovaný**

Metody tryskové a oscilační ventilace využívají velmi nízkých ventilačních objemů a vysokých dechových frekvencí, čímž snižují riziko barotraumatů plic<sup>6</sup>.

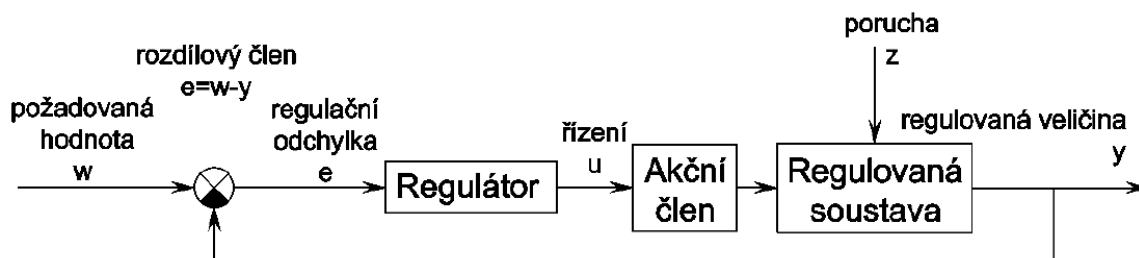
---

<sup>6</sup> Baotrauma je fyzické poškození tkání způsobené rozdílem tlaků. Postihuje hlavně potápěče.

## 2 Technologie měření a regulace

Pro správné a efektivní řízení výstupní hodnoty (veličiny  $y$ ) je nutný správně nastavený regulátor.

Na obrázku 1. je ukázán základní jednoduchý princip každé regulační smyčky. Vstupem regulátoru je požadovaná hodnota ( $w$ ) a výstupem je regulovaná veličina ( $y$ ). Regulační smyčka za všech okolností zajišťuje rovnost mezi požadovanou a reálnou hodnotou ( $w = y$ ). Spojitému lineárnímu systému stačí informace o rozdílu mezi požadovanou a skutečnou hodnotou, pracuje s rozdílovým členem  $w - y$  nazývaným regulační odchylka ( $e$ ). Výstup regulátoru ( $u$ ) je úměrný regulační odchylce a řídí samotný akční člen (ventil, motor...), který ovládá regulovanou soustavu. Na regulovanou soustavu působí poruchové vlivy ( $z$ ), které negativně ovlivňují řízenou veličinu.



Obr. 1.: Regulační smyčka

- $y$  – skutečná, reálná hodnota, kterou řídíme
- $w$  – zadání požadované hodnoty  $y$
- $e$  – regulační odchylka = rozdíl mezi požadovanou a reálnou hodnotou
- $u$  – vstup regulátoru = úměrný regulační odchylce  $e$
- $z$  – porucha

Základními stavebními jednotkami principu regulace jsou regulátory proporcionální, integrační a derivační. Jejich vlastnosti změny výstupní veličiny se znázorňují vůči změně jednotkového skoku v čase.

### Proporcionální regulátor – P

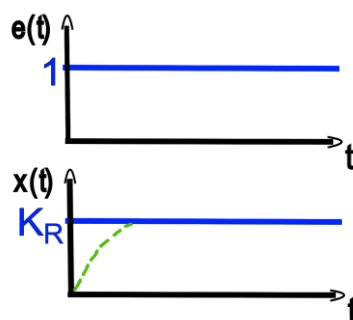
Proporcionální regulátor je nejjednodušší a nejzákladnější typ spojitého regulátoru, který se chová podobně jako nezávislá soustava na čase, tzn. vstup ( $e$ ) se pouze násobí konstantou  $k_R$ . Čím větší je zesílení  $k_R$ , tím P-reg. silněji „tlačí“ soustavu k požadované hodnotě. Při velkých hodnotách  $k_R$  se soustava může rozkmitat a stát se nestabilní. Negativní vlastností tohoto regulátoru je stálá regulační odchylka  $e_0$ , která je způsobena na principu přenosobení konstanty aktuální regulační odchylkou  $e(t)$ , kdy její hodnota není dostatečně velká

k dosažení požadované hodnoty. Vždy bude určitý rozdíl mezi aktuální a požadovanou hodnotou. Zmenšení regulační odchylky  $e_0$  dosáhneme zvětšením zesílení  $k_R$ .

$$x(t) = k_R \cdot e(t) \quad (2)$$

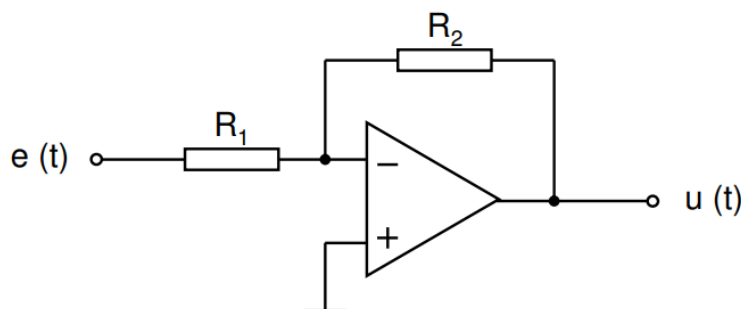
$K_R$  – zesílení

$e(t)$  – regulační odchylka



Obr. 2.: Přechodová charakteristika ideálního P – regulátoru na jednotkový skok

Realizace P-reg. pomocí operačního zesilovače (OZ).



Obr. 3.: Operační zesilovač jako P – regulátor

$$K_R = \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

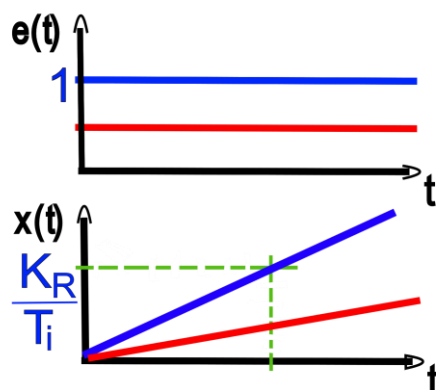
Zapojení je invertující, to ale k ukázce nevádí. [8]

### Integrační regulátor – I

Integrační regulátor je závislý na čase, má pozvolný náběh akčního zásahu ( $u$ ) a i při malých hodnotách odchylky ( $e$ ) se stále mění ( $u$ ) správným směrem. Regulátor se „snaží“ doregulovat do požadované hodnoty. To odstraňuje problém s trvalou regulační odchylkou. Při špatně zvolené velikosti časové integrační konstanty ( $T_I$ ) může dojít ke kmitání celého obvodu. Nelze s ním řídit astatické regulační obvody.

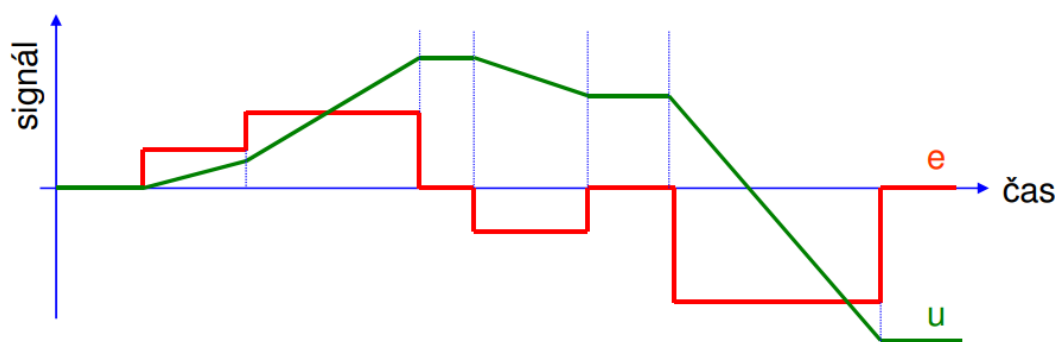
$$x(t) = \frac{K_R}{\tau_I} \cdot \int e(t) dt \quad (4)$$

$T_I$  – časová integrační konstanta



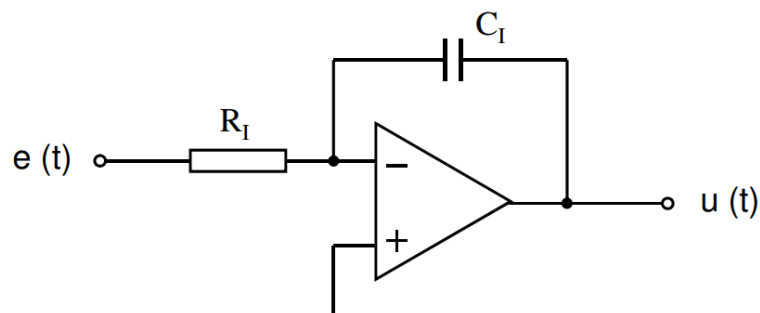
Obr. 4.: Přechodová charakteristika ideálního I – regulátoru na dva různě velké jednotkové skoky

Pokud je regulační odchylka ( $e$ ) kladná, akční zásah ( $u$ ) roste. Je-li regulační odchylka ( $e$ ) záporná, akční zásah ( $u$ ) klesá. Pokud je regulační odchylka ( $e$ ) nulová, akční zásah ( $u$ ) je konstantní. Čím větší je hodnota ( $e$ ), tím rychleji se ( $u$ ) mění. Rychlost změny závisí také na časové konstantě  $\tau_I$  (menší  $\tau_I$  = rychlejší reakce).



Obr. 5.: Reakce akční veličiny I – regulátor na změnu regulační odchylky (převzato z [9])

Realizace I-reg. pomocí operačního zesilovače (OZ).



Obr. 6.: Operační zesilovač jako I – regulátor (převzato z [9])



Časová konstanta  $\tau$  se nastavuje pomocí rezistoru a kondenzátoru,

$$\tau = R_1 \cdot C_1 \quad (5)$$

čím jsou jejich hodnoty větší, tím je reakce I-reg. pomalejší. Zapojení je invertující, to ale k ukázce nevedí. [9]

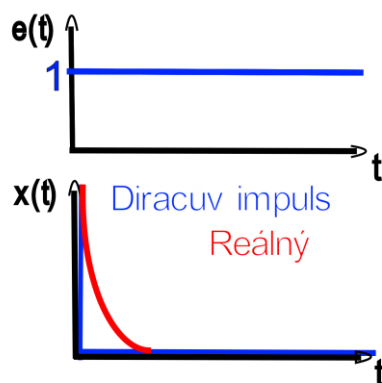
### Derivační regulátor – D

Derivační regulátor slouží pro zrychlení nebo zklidnění průběhu, proto nelze použít samostatně, pouze v kombinacích PD a PID. Jeho rychlost změny vychází z přenásobení rychlostní změny regulační odchylky  $e'(t)$  a časovou derivační konstantou  $T_D$ . Principiálně si to můžeme představit jako Diracův impuls, což je nekonečně časově úzký a amplitudově nekonečně velký pulz.

$$x(t) = K_R \cdot T_D \cdot e'(t) \quad (6)$$

$T_D$  – časová derivační konstanta

$e'(t)$  – rychlost změny

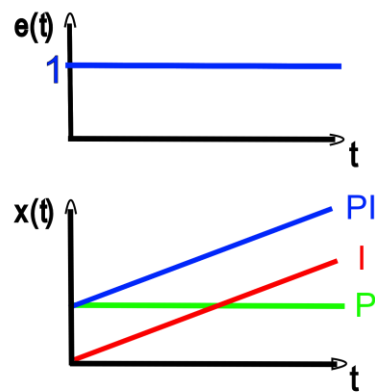


Obr. 7.: Přejchodová charakteristika ideálního D – regulátoru na jednotkový skok

### Proporcionálně – Integrovní regulátor – PI

Kombinuje dobré vlastnosti z obou regulátorů, které zajišťují stabilitu (P) a přesnost (I) regulace. Proporcionální složka vyrovnává velké odchylky od požadované hodnoty a integrační doladuje už jen ty malé rozdíly, díky tomu je regulátor i poměrně rychlý.

$$x(t) = K_R \cdot e(t) + \frac{K_R}{\tau_I} \cdot \int e(t) dt \quad (7)$$

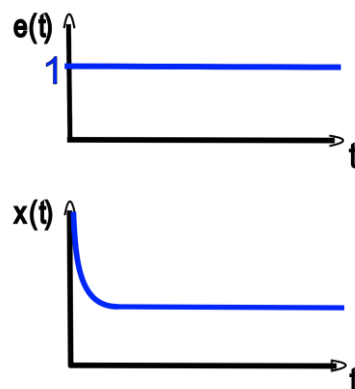


Obr. 8.: Přejchodová charakteristika ideálního P, I a PI – regulátoru na jednotkový skok

Proporcionálně – Derivační regulátor – PD

Díky rychlosti derivační složky je dosažení požadované hodnoty rychlé, ale kvůli vlastnostem P-reg. je nepřesné, zato je regulace stabilní.

$$x(t) = K_R \cdot e(t) + K_R \cdot T_D \cdot e'(t) \quad (8)$$

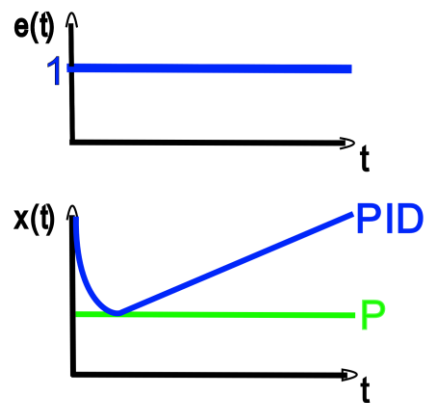


Obr. 9.: Přejchodová charakteristika ideálního PD – regulátoru na jednotkový skok

Proporcionálně – Integračně – Derivační regulátor – PID

Tato regulační sestava má všechny potřebné vlastnosti pro stabilní, přesnou a rychlou regulaci. [10]

$$x(t) = K_R \cdot e(t) + \frac{K_R}{\tau_I} \cdot \int e(t) dt + K_R \cdot T_D \cdot e'(t) \quad (9)$$



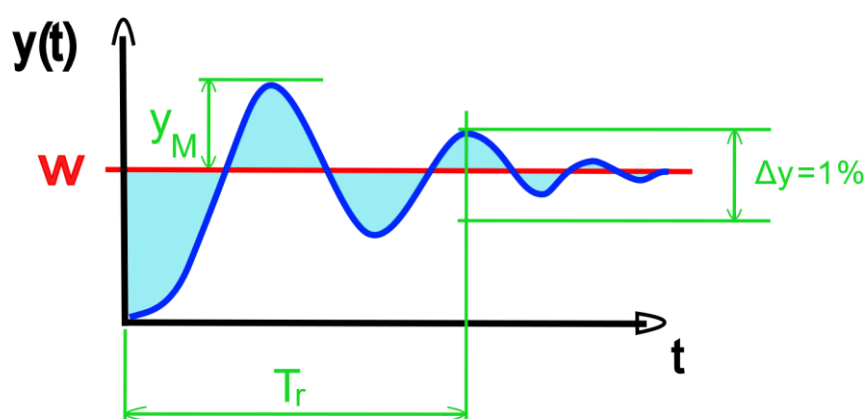
Obr. 10.: Přejchodová charakteristika ideálního PID – regulátoru na jednotkový skok

### 2.1.1 Stabilita regulačního pochodu

Regulovaný systém má různé druhy průběhů určující doby regulace, přeregulování, aperiodický nebo kmitavý průběh. Tyto vlastnosti se určují nastavením výše uvedených konstant  $K_R$ ,  $T_I$  a  $T_D$ . Chování systému také závisí na požadovaném chování a na aplikaci. V některých aplikacích, kde jsou nějaká mechanická omezení, je nutné, aby nedošlo k přeregulování. V takovém případě překmitů dochází k velkému namáhání až ke zničení mechanických součástí systému. Naopak také existují aplikace, kde přeregulování nevádí a může být využito k rychlejšímu dosažení požadovaného výstupu, čímž může ušetřit energii.

Ovšem je důležité, aby systém byl v obou případech stabilní. Nestabilní systémy jsou z principu nepoužitelné. Stabilitu regulačního pochodu dělíme:

- Stabilní



Obr. 11.: Stabilní periodický regulační pochod

$W$  – Požadovaná hodnota

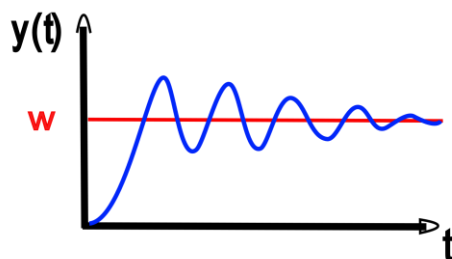
$T_r$  – Doba regulace = počítá se do doby, kdy velikost kmitu je menší než 1%

$y_m$  – Přeregulování = velikost prvního překmitu

$\Delta y$  – Rozmezí, kdy považujeme dosažení požadované hodnoty  $w$

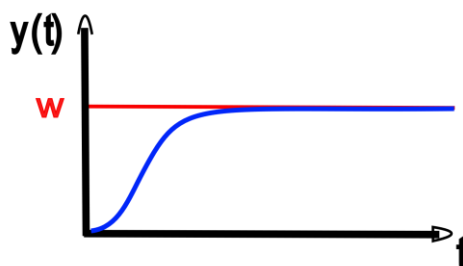
Vybarvená oblast – Minimum regulační plochy = plocha mezi regulační křivkou a přímkou požadované hodnoty

- Periodický



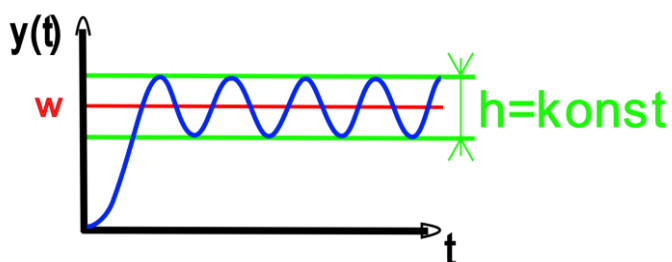
Obr. 12.: Výstupní charakteristika stabilního periodického systému

- Aperiodický



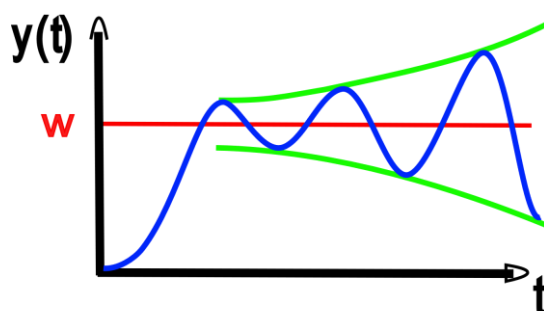
Obr. 13.: Výstupní charakteristika stabilního aperiodického systému

- Na hraně stability



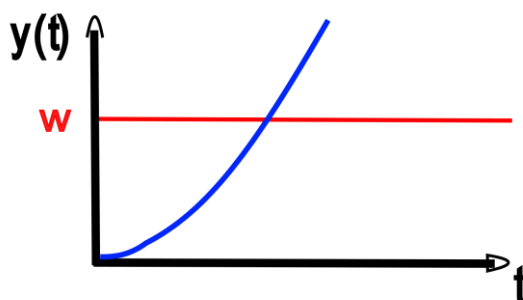
Obr. 14.: Výstupní charakteristika systému na hraně stability

- Nestabilní
  - Periodický



Obr. 15.: Výstupní charakteristika nestabilního periodického systému

- Aperiodický



Obr. 16.: Výstupní charakteristika nestabilního aperiodického systému

Pro určení podmínek chování regulované soustavy používáme různé metody založené na matematických výpočtech, matematických modelech nebo grafických znázornění.

- Kritéria:
  - Matematická
    - Ljapunovo kritérium
    - Hurwitzovo kritérium
  - Grafická
    - Nyquistovo kritérium

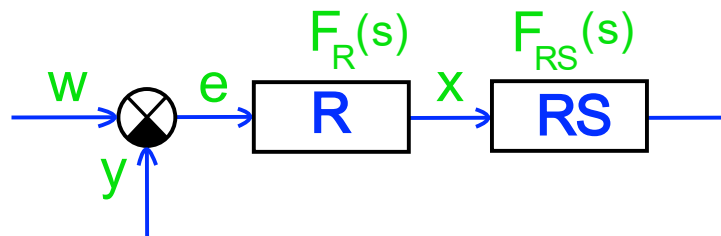
Ljapunovo kritérium vychází z matematického popisu uzavřené regulační smyčky regulované lineární soustavy (Obr. 17.), kdy soustava je stabilní, pokud z charakteristické rovnice v rovnici 11 vycházejí všechny kořeny reálné a záporné.

$$1 + F_R(s) \cdot F_{RS}(s) = 0 \quad (10)$$

Charakteristická rovnice

$$F(s) = \frac{F_R(s) \cdot F_{RS}(s)}{1 + F_R(s) \cdot F_{RS}(s)} \quad (11)$$

Přenos uzavřené regulační smyčky



Obr. 17.: Ljapunovo kritérium uzavřené regulační smyčky

Hurwitzovo kritérium vychází z rovnice přenosu uzavřené regulační smyčky a z matematického popisu se vytvoří Hurwitzova matice (rovnice 12) podle níž se určuje, jestli je či není systém stabilní. Systém je stabilní, pokud jsou všechny diagonální subdeterminanty kladné. V případech, kdy je některý z koeficientů „s“ nulový nebo záporný, systém je určitě nestabilní.

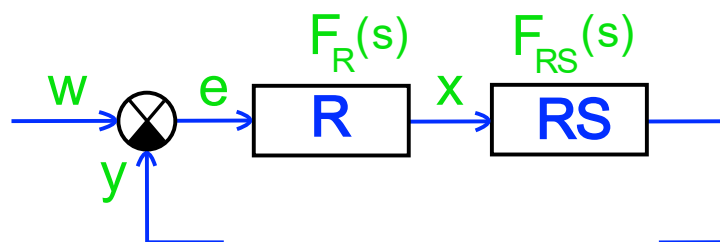
$$H = \begin{bmatrix} a_2 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_1 & a_2 \\ 0 & 0 & a_0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Kde  $a_n$  jsou koeficienty polynomiální rovnice vycházející z rovnice 13  $A(s)$ .

$$A(s) = \det[sI - A] \quad (13)$$

Kde  $I$  je jednotková matice vynásobená proměnnou  $s$ , a matice  $A$  je řešená matice soustavy.

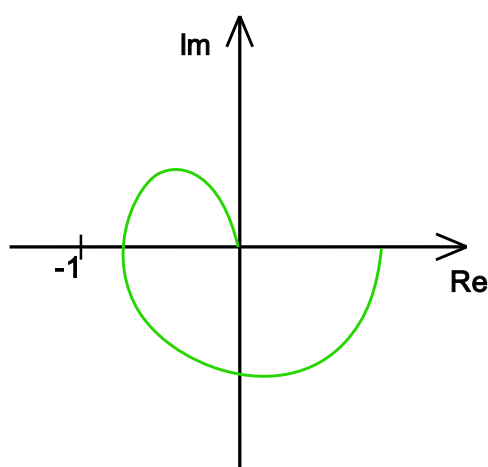
Nyquistovo kritérium pracuje s kmitočtovou charakteristikou rozpojené (otevřené) regulační smyčky (Obr. 18.). Stabilita se určí z grafu kmitočtové charakteristiky, do které je vyneseno řešení Gaussovy rovnice 14. Systém je stabilní, když kmitočtová křivka prochází mezi body -1 a 0 na reálné ose, na hraně stability prochází právě bodem -1 a pokud se nachází v levé oblasti od bodu -1 je systém nestabilní.



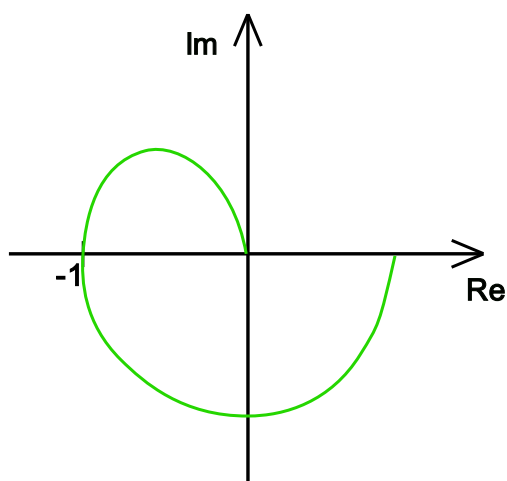
Obr. 18.: Nyquistovo kritérium otevřené regulační smyčky

$$F_O(j\omega) = F_R(j\omega) \cdot F_{RS}(j\omega) \quad (14)$$

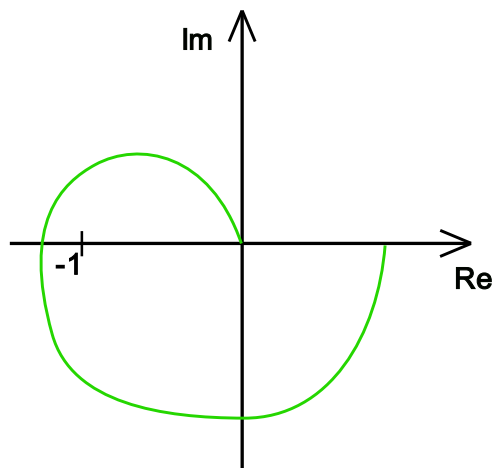
$F_O$  – Přenos otevřené smyčky;  $F_R$  – Přenos regulátoru;  $F_{RS}$  – Přenos regulované soustavy



Obr. 19.: Stabilní regulační obvod



Obr. 20.: Regulační obvod na hraně stability



Obr. 21.: Nestabilní regulační obvod

### Ruční nastavení regulačního obvodu

K ručnímu nastavení regulátoru se používají programy s možností simulace chování obvodu k přesnému nastavení rychlosti a citlivosti regulátoru. Postupně se nastavují jednotlivé složky, často metodou pokus-omyl, ale i zde musíme umět předpokládat reakce regulátoru. Hlavním účelem je dosáhnout co nejlepšího chování objektu.

Proporcionální složka:

$$r_0 = K_R \quad (15)$$

Integrační složka:

$$r_1 = \frac{K_R}{T_I} \quad (16)$$

Derivační složka:

$$r_2 = K_R \cdot T_D \quad (17)$$

Poté, co je matematicky popsáno chování obvodu, se nejdříve nastavuje proporcionální složka  $r_0$ . K tomu je potřeba vyřadit vliv integrační složky tím, že jmenovatel  $T_I$  nahradíme hodnotou nekonečno a také derivační složky  $T_D$ , kterou položíme rovnou nule. Po nalezení vhodné hodnoty  $K_R$  se nastavuje integrační konstanta  $T_I$  pro složku  $r_1$  a jako poslední složka  $r_2$  se hledá konstanta derivační  $T_D$ .

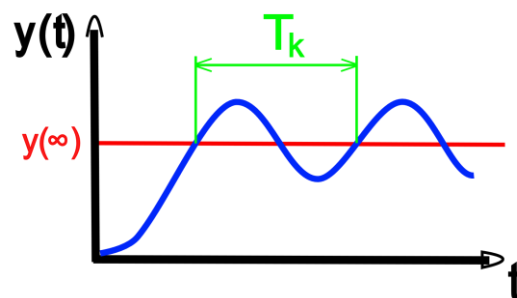
Jedna z nepoužívanějších metod je Ziegler-Nicholsova metoda vycházející z experimentu v uzavřeném regulačním obvodu pouze s P – regulátorem. Z této soustavy zjistíme hodnoty potřebné pro výpočet a nastavení zbylých regulátorů. Ziegler-Nicholsova



metoda je rozdělena na dva postupy, na metodu určení kritické periody a metodu přechodové odezvy.

### Určení kritické periody

Zvyšováním a snižováním konstanty zesílení regulátoru  $K_R$  hledáme stav, kdy je regulovaný obvod na hraně stability. Z takto nastaveného regulačního obvodu odečteme zesílení  $K_R$  a periodu kmitů soustavy  $T_k$ . Pro každý regulátor je výrobcem daný vzorec, do kterého se dosadí výše zjištěné hodnoty pro získání konstant pro integrační a derivační regulátory.



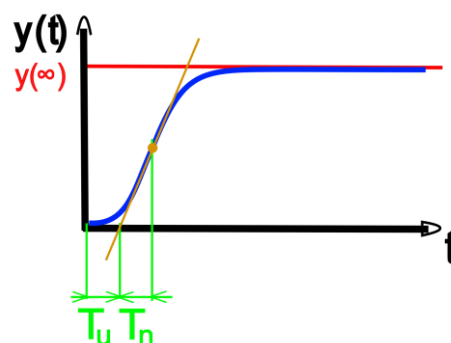
Obr. 22.: Určení  $K_R$  Ziegler-Nicholsova metodou kritickou periodou

$T_k$  – perioda kmitů

$y(\infty)$  – požadovaná hodnota

### Metoda přechodové odezvy

V této metodě se parametry stanoví na základě doby průtahu  $T_u$  a náběhu  $T_n$  a statického zesílení  $K$ . Parametry se nastavují pomocí daných vzorců, pro každou složku regulátoru existuje vzorec, dosazením času  $T_u$  nebo násobkem  $K \cdot H$ .



Obr. 23.: Určení konstant regulátorů Ziegler-Nicholsova metodou přechodové odezvy

$T_u$  – doba průtahu

$T_n$  – doba náběhu

$y(\infty)$  – požadovaná hodnota

$$H = \frac{T_u}{T_n}$$

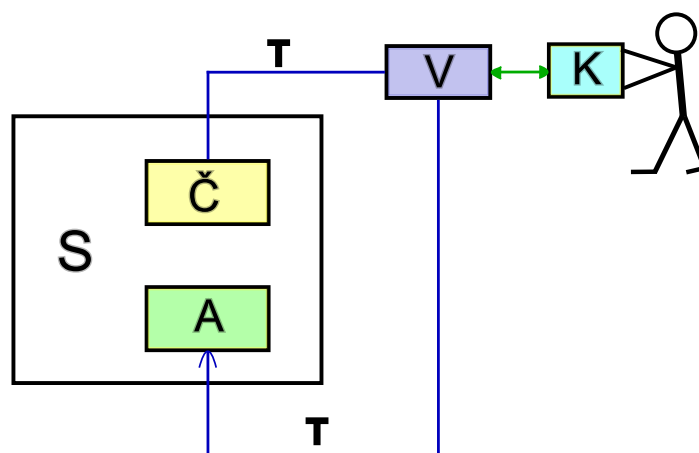
H – konstanta poměru dob

Tabulka 1. Ukázky pro nastavení PID regulátorů Ziegler-Nicholsova metodou přechodové odezvy

Regulátor	r0	r1 (T <sub>I</sub> )	r2 (T <sub>D</sub> )
P	$\frac{1}{(K \cdot H)}$		
PI	$\frac{0,9}{(K \cdot H)}$	$3 \cdot T_u$	
PID	$\frac{1,2}{(K \cdot H)}$	$2 \cdot T_u$	$0,5 \cdot T_u$

## 2.2 Teorie měření provozních veličin

Základními technickými prostředky (TP) měření provozních veličin v automatickém řízení se využívají následující prostředky. Pro získání informace o stavu řízeného procesu jsou čidla (Č). Tyto snímače měří stavy a shromažďují informace o probíhajícím procesu. Transport (T) přenášených informací vedením drátově nebo bezdrátově zajišťují prostředky pro přenos informace. Prostředky pro zpracování informace vyhodnocují a zpracovávají vyhodnocovací obvody (V) nebo algoritmy v řídicím programu. Akční členy (A) jsou prostředky pro využití informace, jenž působí na stav řízeného procesu a tím jej řídí. Prostředky pro komunikaci s obsluhou zajišťují komunikaci (K) mezi řízeným systémem (S) a člověkem, který jej nastavuje a získává o něm informace.



Obr. 24.: Obecné schéma technických prostředků pro měření provozních veličin

**Řízení** je cílevědomé působení na proces tak, aby dosáhl žádoucího stavu při měnících se podmínkách. Pokud řídíme ať už ručně nebo automaticky proces bez zpětné informace o řízeném procesu, nazýváme takové řízení **ovládáním** systému. Oproti tomu **regulace** je řízení v uzavřené smyčce, která zpracovává informace o skutečném stavu systému. Takové řízení může být ruční, kdy vyhodnocení a zásah provádí člověk. Nebo automatické, kdy tyto činnosti provádí stroj (automat) podle daného algoritmu.

Průmyslové provozní měření přináší určité požadavky na výběr použitého snímače. S ohledem na druh měření je třeba posuzovat statické a dynamické vlastnosti snímače.

**Statické vlastnosti** se vyobrazují ve *statické charakteristice*, která udává závislost výstupní veličiny snímače ( $y$ ) na vstupní veličině ( $u$ ) v ustáleném neměnném stavu vstupní veličiny. *Citlivost snímače* je poměr mezi změnou měřené veličiny (údaje výstupu čidla) a změnou hodnoty vstupní veličiny. *Citlivost systému* je dána součinem citlivostí jednotlivých prvků v měřicím řetězci. *Prahová citlivost* je nejmenší změna měřené veličiny  $\Delta u$ , která ještě způsobí odezvu na výstupu měřidla. Přesnost měřícího přístroje zjistíme poměrem mezi maximální přípustnou chybou  $\Delta y_{\max}$  a rozsahem přístroje  $y_{\max}$ .

$$T_p = \frac{\Delta y_{\max}}{y_{\max}} \cdot 100 \% \quad (19)$$

**Dynamické vlastnosti** se znázorňují v *přenosové, přechodové charakteristice*, která vyjadřuje matematicky nebo graficky chování snímače při změnách vstupní měřené veličiny  $u(t)$  v čase. *Časová konstanta  $T$*  je doba, za kterou by výstupní veličina snímače dosáhla ustálené hodnoty, kdyby jeho změny byly po celou dobu konstantní a stejné, jako v počátku. *Rychlost odezvy* snímače je funkcí časové konstanty  $T$ . *Frekvenční charakteristika* snímače udává, jak se mění výstupní signál amplitudy a fáze při buzení harmonickým průběhem s frekvencí proměnnou od nuly do nekonečna. Výstupní signál s rostoucí frekvencí se za buzením opoždí co do fáze a amplituda výstupních kmitů se zmenšuje až k nule při frekvenci blíží se k nekonečnu. *Dynamická chyba* je rozdíl mezi skutečnou hodnotou výstupní veličiny snímače a výstupem ideálního bez setrvačného proporcionalního členu. Pokud známe přesnost snímače, lze dynamickou chybu korigovat. Je také velmi nutné znát kmitočtový rozsah použitého snímače.

Dalšími důležitými vlastnostmi pro volbu snímače je jeho *linearita*, která udává největší odchylku statické charakteristiky snímače nebo člen měřícího řetězce od ideálního (lineárního) průběhu pro daný rozsah měření. Také je potřeba znát *schopnost převodu na některý druh unifikovaného signálu*, tedy jestli je snímač schopen bez užití dalších převodníků, případně zesilovačů, posílat informace v požadované formě signálu. Další

důležitou vlastností je *spolehlivost a životnost snímače*. Spolehlivost je schopnost plnit během stanovené doby své funkce při zachování provozních parametrů daných technickými podmínkami. Tuhle vlastnost udává střední doba mezi poruchami (angl. MTBF – Mean Time Between Failures), je dána vztahem 20:

$$T = \frac{1}{n_f} \sum_{i=1}^{n_f} T_i \quad (20)$$

kde  $T_i$  je doba bezporuchového provozu mezi první a  $i$ -tou poruchou zařízení,  $n_f$  je počet všech poruch zařízení.

Také se berou v úvahu náklady na pořízení a instalaci snímače a odolnost proti vlivům prostředí, které nám ovlivňují přesnost, spolehlivost, životnost atd. Zejména sledujeme vlivy teploty, vlhkosti, prašnosti, agresivity prostředí, rušivých elektromagnetických polí, vibrací, tlaku a ionizujícího záření. Zařízení lze chránit proti těmto jevům zejména stíněním (elektromagnetická vlna, ionizující záření), kompenzací (teplota, mechanická dilatace), krytím (vlhkost, prach, agresivita), odpružením nebo tlumením (vibrace).

### 2.2.1 Rozdělení snímačů

Snímače jsou základním prvkem měřicího řetězce. Základní rozdělení jednotlivých snímačů je podle principu, na kterém pracují nebo podle druhu snímané veličiny. Pro potřebu tohoto úvodu je vhodnější rozdělení podle druhu měřené veličiny. Nejčastějšími měřenými veličinami jsou:

- Tlak, síla, zrychlení
- Poloha
- Hladina
- Teplota
- Otáčky, úhel
- Průtok, prošlé množství
- Vlhkost
- Složení látek, pH
- Ionizující záření

## 2.3 Převody mezi různými jednotkami tlaku

Tabulka 2. Převody mezi jednotkami tlaku

p	Pa	bar	atm	mmHg	PSI
Pa	1	$9,87 \cdot 10^6$	$9,87 \cdot 10^6$	$7,5 \cdot 10^3$	$0,145 \cdot 10^3$
bar	$100 \cdot 10^3$	1	0,987	750,1	14,5
atm	101325	1,013	1	760	14,7
mmHg	133,3	$1,33 \cdot 10^3$	$1,32 \cdot 10^3$	1	$13,3 \cdot 10^3$
PSI	6894,8	0,0689	0,068	51,72	1

## 2.4 Senzor měření tlaku

### 2.4.1 RVA Series RVAQ300GU

Snímač RVA měří tlakovou veličinu v rozsahu od 0 do 300 mmHg s vynikající kompatibilitou s různými médii. Velikost tlaku získává s vysokou přesností s hysterezi  $\pm 0,15\%$ , kterou udává v napěťovém výstupním rozsahu 0,5 až 4,5 V. Jeho citlivost je 13,33 mV/mmHg. Je napájen stejnosměrným napětím o velikosti 5 V  $\pm 0,25$  V. Délka doby odezvy je 1 ms. Převodní rovnice mezi napětím (u) a tlakem (p).

$$u = \frac{4}{300}p + 0,5 \quad [V] \quad (21)$$

$$p = 75u - \frac{75}{2} \quad [mmHg] \quad (21)$$

## 2.5 Ventily se zpětnou vazbou o hodnotě výstupního tlaku

### 2.5.1 Proporcional mini piezo-valves piezotronic 630 000 76

Tento piezoelektrický ventil pracuje na principu piezoelektrického jevu, díky tomu má velmi nízkou spotřebu energie (0,004 W) a nemá indukční špičky při spínání. Proto se téměř nezahřívá a obvod nepotřebuje ochranu. Napájí se stejnosměrným napětím o velikosti 40 V a nutným minimálním přídržným proudem 100 mA. Pracuje v režimu, kdy za klidových podmínek je uzavřený. Výhodou ventilu je, že nevyžaduje minimální provozní tlak. Provozní tlak je 0 až 4 PS a jeho součinitel průtoku je 0,12 l/min nebo-li 0,007 m<sup>3</sup>/h. Velikostí řídicího signálu je úměrná velikosti průtoku. Doba odezvy tohoto proporcionalního ventilu je od 8 do 15 ms.

### 2.5.2 Electropneumatic 3 ports proportional valve sentronic 601 00 041 010 713 970 518

Díky spojení pneumatické a elektronické technologie umožňuje nastavit tlak, průtok, sílu, rychlost a lineární nebo úhlovou polohu. Označení ventilu číselnou řadou udává velikost otvorů Ø 3 mm (G1/8). Tlakové i výfukové otvory jsou stejné, což poskytuje krátkou dobu odezvy, jak při zvyšování tlaku/průtoku, tak i při jejich snižování. Vstupní nastavení porovnává s výstupním tlakem, který se upravuje v reálném čase pomocí uzavřené regulační smyčky. Základní konstrukce a komponenty zajišťují fungování s velmi malou hysterezí, velmi krátkou dobou odezvy a s vynikající citlivostí. Senzor je kompaktní monobloková sestava včetně elektromagnetického ventilu, elektronického regulátoru a snímače tlaku. Má funkci vypnutí při 0,5 % maximálního zvoleného vstupního řídicího signálu, analogový výstup pro informaci o tlaku a analogové nebo digitální nastavení hodnotou 8 bitů.

Funkce ventilu 601 je založen na principu, kdy se tlak mění nestálým působením dvou protichůdných sil, magnetickou silou (FM) a silou zpětné vazby (FR) úměrnou výstupnímu tlaku.

$$FR = (D1^2 - D2^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot P2 \quad [N] \quad (23)$$

Vzorec pro výpočet síly zpětné vazby.

Pro princip funkce ventilu platí:

Střední poloha

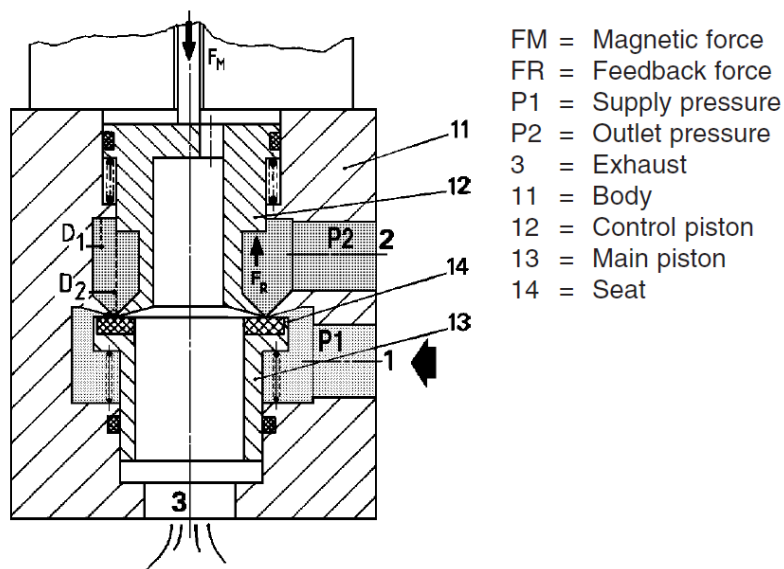
$$FM = FR \quad [N] \quad (24)$$

Zvyšování tlaku

$$FM > FR \quad [N] \quad (25)$$

Snižování tlaku

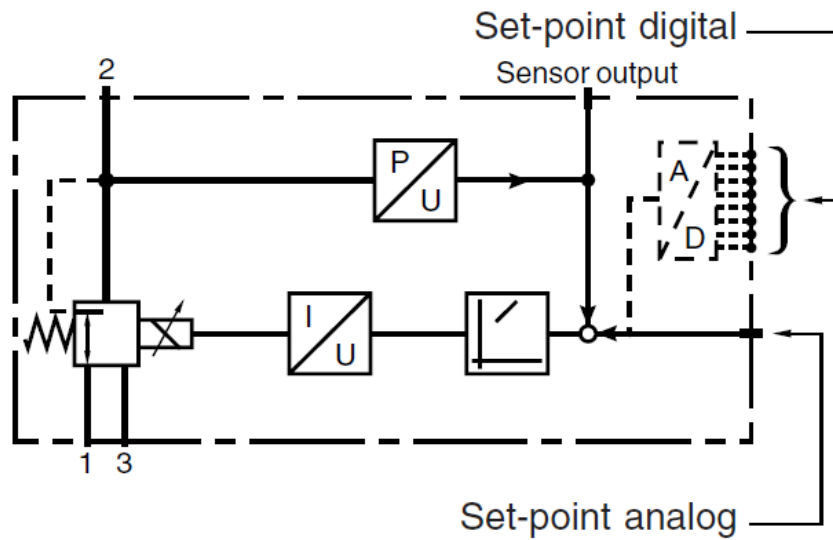
$$FM < FR \quad [N] \quad (26)$$



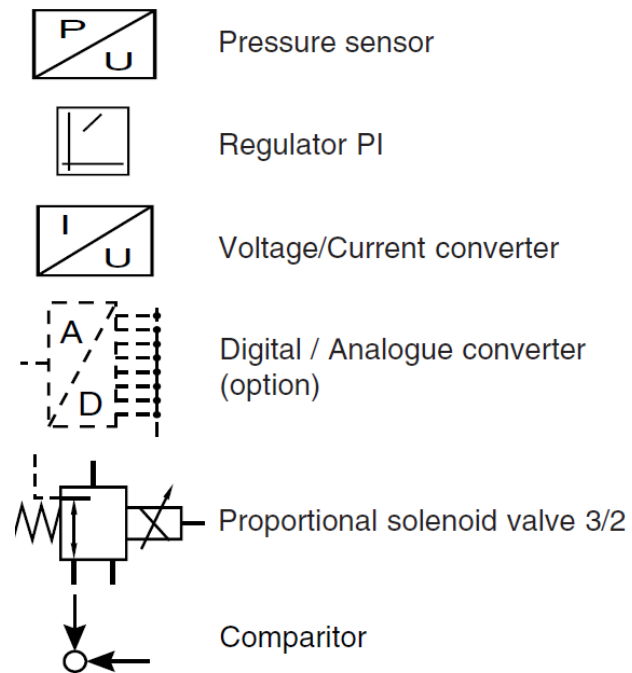
Obr. 25.: Boční řez ventilem 601 (převzato z [11])

Tabulka 3. Překlad pojmů pro obrázek 24.

FM	Magnetic force	Magnetická síla
FR	Feedback force	Síla zpětné vazby
P1	Supply pressure	Přívodní tlak
P2	Outlet pressure	Výstupní tlak
3	Exhaust	Výfukový tlak
11	Body	Tělo
12	Control piston	Řídicí píst
13	Main piston	Hlavní píst
14	Seat	Sedlo



Obr. 26.: Elektro-pneumatické schéma zapojení ventilu 601 (převzato z [11])

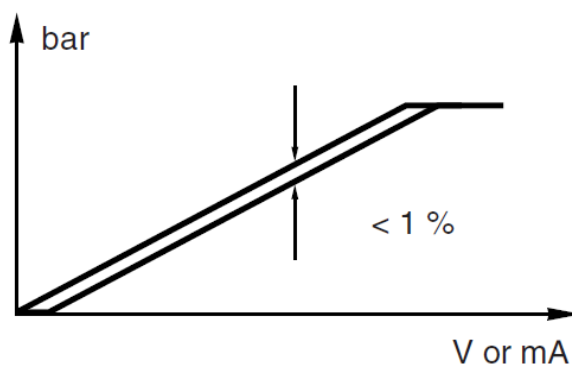


Obr. 27.: Vysvětlení bloků (převzato z [11])



Tabulka 4. Překlad pojmů pro obrázek 26.

Pressure sensor	Tlakový senzor
Regulator PI	Regulátor PI
Voltage/Current converter	Měnič napětí/proudu
Digital/Analogue converter (option)	Digitální / analogový převodník (volitelně)
Proportional solenoid valve 3/2	Proporcionální elektromagnetický ventil 3/2
Comparator	Komparátor

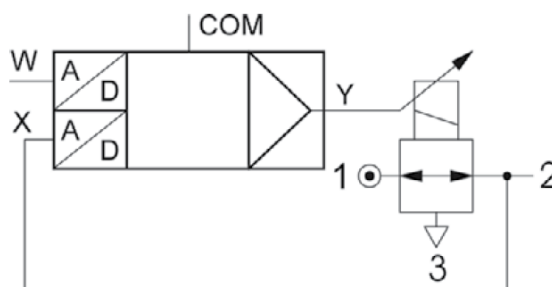


Obr. 28.: Hysterezní smyčka ventilu 601 (převzato z [11])

Proporcionální ventil 601 je napájen stabilizovaným stejnosměrným napětím 24 V s povolenou odchylkou  $\pm 10\%$  s maximálním výkonem 15 W a maximálním proudem 600 mA. Hodnota se nastavuje analogovým vstupem v rozsahu od 0 V do 10 V s citlivostí méně než 50 mV s impedancí 1000 k $\Omega$ . Ventil zvládne maximální průtok 210 l/min při 6 barech, jeho regulační pásmo je do 0 baru do 0,1 baru, tedy do 75 mmHg. Tento ventil umí pracovat pouze se vzduchem.

### 2.5.3 Aventics proportional valves Sentronic<sup>D</sup> 608 160 111

Sentronic<sup>D</sup> je třicestný proporcionální ventil s digitálním i analogovým řízením a komunikací. Přímou ovládaný ventil s dynamickým chováním pro vysokou rychlost. Výstupní tlak ventilu lze nastavit přes integrovaný displej nebo přes tlačítka. Další funkce jsou nastavení parametrů, diagnostika ventilu a údržba. Pracuje se vzduchem nebo neutrálními plyny v rozsahu od 0 do 6 barů. Při šesti barech má průtok 470 až 1300 l/min. Výstupní tlak ventilu lze nastavit napětím od 0 do 10 V. Jeho napájecí napětí je 24 V s maximálním výkonem 21 W a maximálním proudem 850 mA.

Obr. 29.: Schéma regulace ventilu Sentronicu<sup>D</sup> 608 (převzato z [13])

#### 2.5.4 MINI-SOLENOID valves 302 10010 - LP2 – 2/2NC

Tento kompaktní, monoblokový elektromagnetický ventil s integrovanou elektrickou ochranou je stejnosměrně napájen 24 V a odebírá změřený proud o velikosti 0,04 A. Pracuje na 1,1 W výkonu ve dvoustavovém režimu (zavřen, otevřen). Jeho průtok je 17 l/min při 6 barech mezi používanými vstupy 1 do 2. Je navržen pro provozní tlak do 8 barů. [22]

### 2.6 Princip simulace regulace tlaku

Regulace tlaku je využívána v pneumatických systémech. Tyto systémy nepotřebují zpětné potrubí, jelikož použitý vzduch je možný vypouštět do okolí. Při modelování pneumatických systémů je zapotřebí respektovat stlačitelnost pracovního média a změnu teploty, která ovlivňuje jeho vlastnosti.

Změny hustoty, které téměř vždy nastanou u pneumatických systémů, musí být uvažovány v matematickém modelu. Odezva na změnu stavu pneumatického systému je pomalejší než u hydraulického systému v důsledku stlačitelnosti plynů. Teplota<sup>7</sup> je důležitou stavovou proměnnou modelovaného procesu, která se mění podle termomechanických zákonů. Při změnách mechanické energie na tepelnou, dochází k velkým změnám teploty.

Při analýze pneumatického systému je nutné používat zákonů mechaniky tekutin i zákonů termomechaniky. Musí se uvažovat se všemi základními termodynamickými veličinami – tlak  $p$ , hustota  $\rho$ , objem  $V$  a teplota  $T$ . To jsou stavové veličiny, které se musí sledovat. Hlavní stavovou proměnnou je tlak  $p$ ., jelikož při působení tlaku na plochu vzniká síla, která působí na mechanickou zátěž a může konat mechanickou práci.

Mezi základní používané fyzikální zákony patří zákon o zachování hmotnosti, který umožňuje vyjádřit probíhající změny hustoty.

$$m = \rho \cdot V = konst. \quad (27)$$

<sup>7</sup> Teplota je míra vnitřní energie plynu.

Z důvodu stlačitelnosti média nemůžeme použít Bernoulliho rovnici v základním tvaru, ale musíme použít odvozenou rovnici v diferenciálním tvaru.

$$v \cdot dv + \frac{dp}{\rho} + g \cdot dh = 0 \quad (28)$$

V tomto vztahu  $dv$ ,  $dp$  a  $dh$  jsou přírůstky proměnných  $v$ ,  $p$  a  $h$ , které vznikají podél dráhy sledované malým objemem tekutiny v ustáleném proudu, kdy rychlost proudění je tečná k proudnici.

Pro ideální plyn platí v termodynamickém rovnovážném stavu tzv. Boyle – Mariottův zákon, jehož předpokládaná platnost je splněna u většiny pneumatických systémů.

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad , \text{ resp. } p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (29)$$

Kde  $R$  je univerzální plynová konstanta, pro vzduch je rovna  $287 \text{ m}^2/\text{s}^2\text{K}$ .

Další důležitý předpoklad pro usnadnění modelování je, že všechny termodynamické procesy jsou adiabatické. Tím, že procesy jsou bez tření, teplo není dodáváno z okolí ani není odváděno, systém je tedy dokonale izolován, probíhající procesy jsou reversibilní podle adiabatického děje. Tento děj je idealizací, ve skutečnosti nikdy přesně nenastane. Pro hodnoty stavových veličin platí,

$$p \cdot \rho^{-\kappa} = \text{konst.} \quad , \text{ resp. } p \cdot V^{\kappa} = \text{konst.} \quad (30)$$

kde  $\kappa$  je poměr měrných tepel,

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} \quad [-] \quad (31)$$

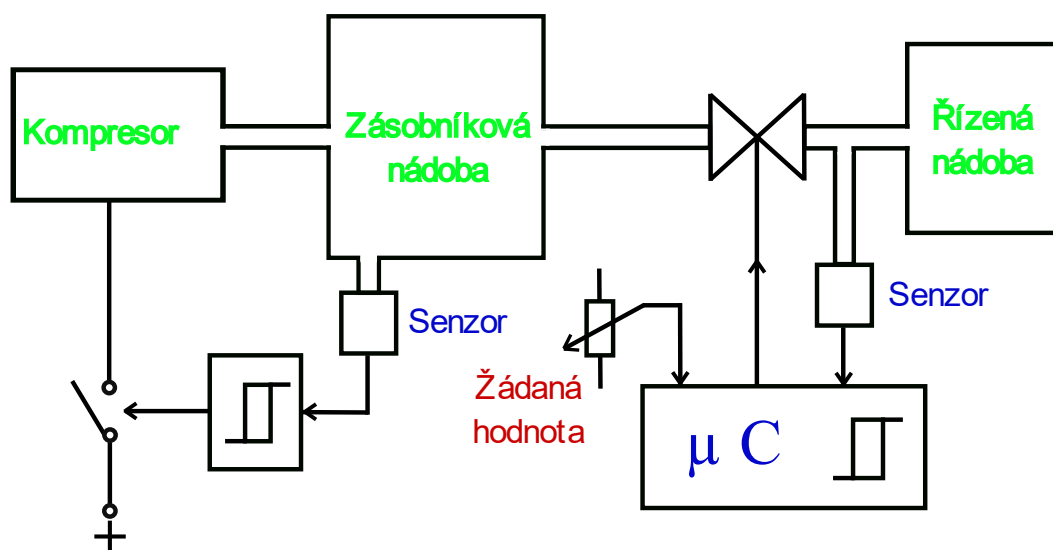
kde  $c_p$  je přivedené měrné teplo a  $c_v$  je vyvedené měrné teplo. Měrné teplo je takové množství tepla, které je nutno přivést látce o hmotnosti 1 kg, aby se ohřála o  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  nebo o 1 K při konstantním tlaku, resp. objemu. Pro vzduch je poměr měrných tepel  $\kappa = 1,4$ .

Uvedené dva vztahy (29)  $p = \rho \cdot R \cdot T$  a (30)  $p \cdot \rho^{-\kappa} = \text{konst}$  spojují tři termodynamické proměnné  $p$ ,  $\rho$  a  $T$ . Můžeme je použít pro eliminaci hustoty, teploty a tlaku, a tak vyjádřit všechny termomechanické jevy pouze pomocí tlaku. [25]

Pro každou soustavu existuje nějaký druh aproximace. Aproximace usnadňuje práci se simulacemi soustav nebo soustavy s určitým zkreslením výsledů. Vhodně zvolená aproximace soustavy toto zkreslení ve velké míře eliminuje až může být i zanedbatelně malá.

Pro řešení různých problémů pneumatické soustavy je možné takovou soustavu pro jednodušší analýzu<sup>8</sup> aproximovat do podoby elektrického obvodu. Ten se následně analýzou, případně syntézou<sup>9</sup> zkoumá tak, aby se dosáhlo požadovaného chování systému.

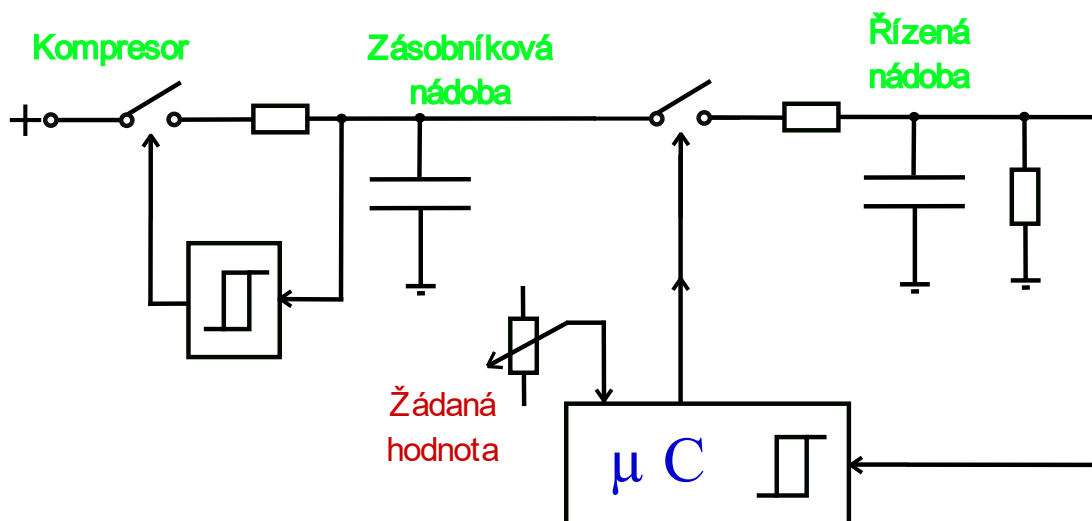
Na obrázku 30. je ukázané elektro-pneumatické schéma zapojení realizovaného systému. A na obrázku 31. je aproximace tohoto obvodu do elektrického schématu obvodu. Pneumatický kompresor funguje obdobně jako zdroj elektrického napětí. Zásobníkové nádoby akumulují tlak, který je v podstatě stavovou veličinou pneumatických systémů. Jelikož v elektrické podobě systému zdroj tlaku odpovídá zdroj napětí, které je stavovou veličinou kondenzátoru, budou nádoby nahrazeny kondenzátory. Ventil také jako spínač uzavírá a spojuje obvody, je nahrazený spínačem. Vzduchové hadičky nejenže propojují jednotlivé komponenty, ale také svým průřezem a různými ohyby způsobují určitý odpor, který protékající plyn musí překonávat. Lze si hadičky přestavit jako odpory mezi součástkami. Nedokonalé utěsnění spojů mezi hadičkami nebo hadičkou a prvkem způsobuje nechtěný únik plynu. V elektrické soustavě si tento fyzikální jev lze představit jako svod. Ten se představí jako zapojení odporu vůči zemi, přes který také teče nežádoucí elektrický proud.



Obr. 30.: Pneumatické blokové schéma realizovaného obvodu

<sup>8</sup> Analýza je proces rozkladu nebo rozdělení celku na menší části s cílem porozumět jejich vlastnostem, funkcím a vztahům. Je to zkoumání složitějšího problému a snaha o jednodušší pochopení.

<sup>9</sup> Syntéza je proces skládání nebo sestavování jednotlivých prvků nebo částí do jednoho celku. Je to proces vytvoření nového celku, aby se dosáhlo nových vlastností.



Obr. 31.: Elektrické blokové schéma realizovaného obvodu

### 3 Vlastní práce

#### 3.1 Zprovoznění proporcionálního piezoelektrického ventilu 630 000 76

Nejdříve bylo zapotřebí zprovoznit hlavní piezoelektrický ventil 630. Díky principu založeném na piezoelektrickém jevu, ventil nemá při spínání špičky, které by byly způsobeny indukčností, a proto by se neměl zahřívát. Při znalosti těchto vlastností ventilu můžeme uvažovat o jeho řízení přímo z mikrokontroleru. Prvním krokem pro řízení daného ventilu je nutné změřit jeho průběh spínání, respektive míru otevření ventilu v závislosti na napětí.

Pro jeho napětí pohybující se od 0 do 40 V. Měl by být řízen mikrokontrolerem STM32 je nutné navrhnout, dimenzovat (Obr. 33. a 34.) a zkonstruovat budící obvod (Obr. 35.). Rozhodl jsem se vybrat vysokonapěťový monolitický operační zesilovač OPA445, který pracuje s napájecím napětím až do  $\pm 45$  V a výstupním proudem do 15 mA. Má nízkou vlastní proudovou spotřebu do 10 pA. Jeho vysoká rychlost přenosu signálu poskytuje širokou šířku pásma výkonu, která je často vyžadována u vysokonapěťových aplikací. FET vstupní obvody umožňují použití vysoko-impedančních zpětnovazebních sítí, což minimalizuje jejich vliv na zatížení výstupu. Laser trimming<sup>10</sup> vstupních obvodů umožnil dosáhnout nízkého vstupního offsetového napětí a driftu. Použil jsem neinvertující zesilovací zapojení, jelikož mikrokontroler disponuje maximálním napětím 5 V. Podle datasheetu jsem vybral a použil doporučené hodnoty kondenzátorů. Podle vzorečku 34 jsou vypočítané a zvolené hodnoty odporů  $R_3$  a  $R_4$  tak, aby zesilovač zesiloval osmkrát.

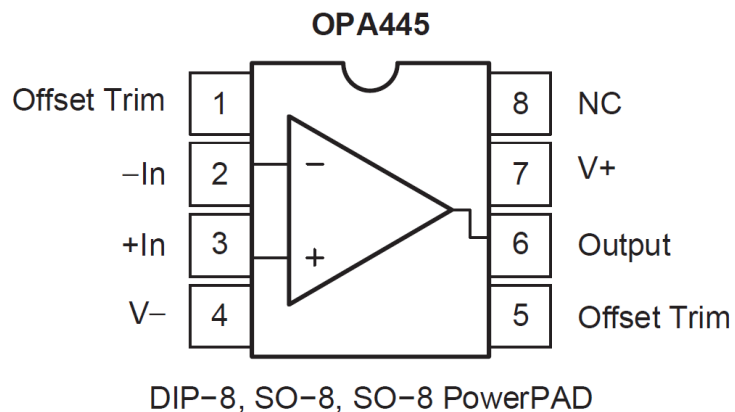
$$K \cdot U_{IN} = U_{OUT} [-] \quad (32)$$

$$K \cdot 5 = 40 \quad \Rightarrow \quad K = 8 \quad [-] \quad (33)$$

$$K = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad [-] \quad (34)$$

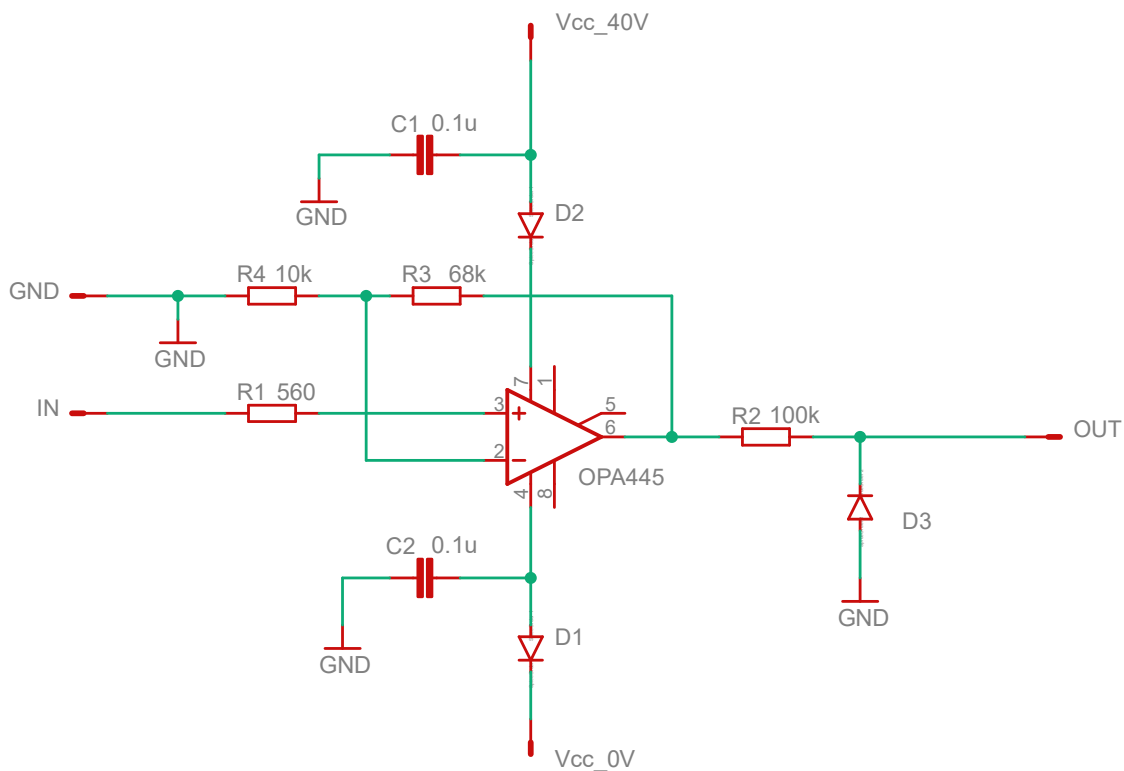
Odporů  $R_1$  a  $R_2$  slouží k impedančnímu přizpůsobení a k omezení proudu. Diody  $D_1$  a  $D_2$  chrání napájení OPA445 proti jeho přepólování. V případě náhodného přepólování bez výše zmíněných diod by jinak došlo ke zničení zesilovače. Dioda  $D_3$  ochraňuje vstup ventilu 630, který je připojený na výstup (OUT) budícího obvodu, před záporným nábojem na výstupu budícího obvodu.

<sup>10</sup> Laser trimming, nazývaný také laserové ořezávání, je technika výrobního procesu využívající laser k doladění provozních parametrů elektronických součástek a obvodů. [12]

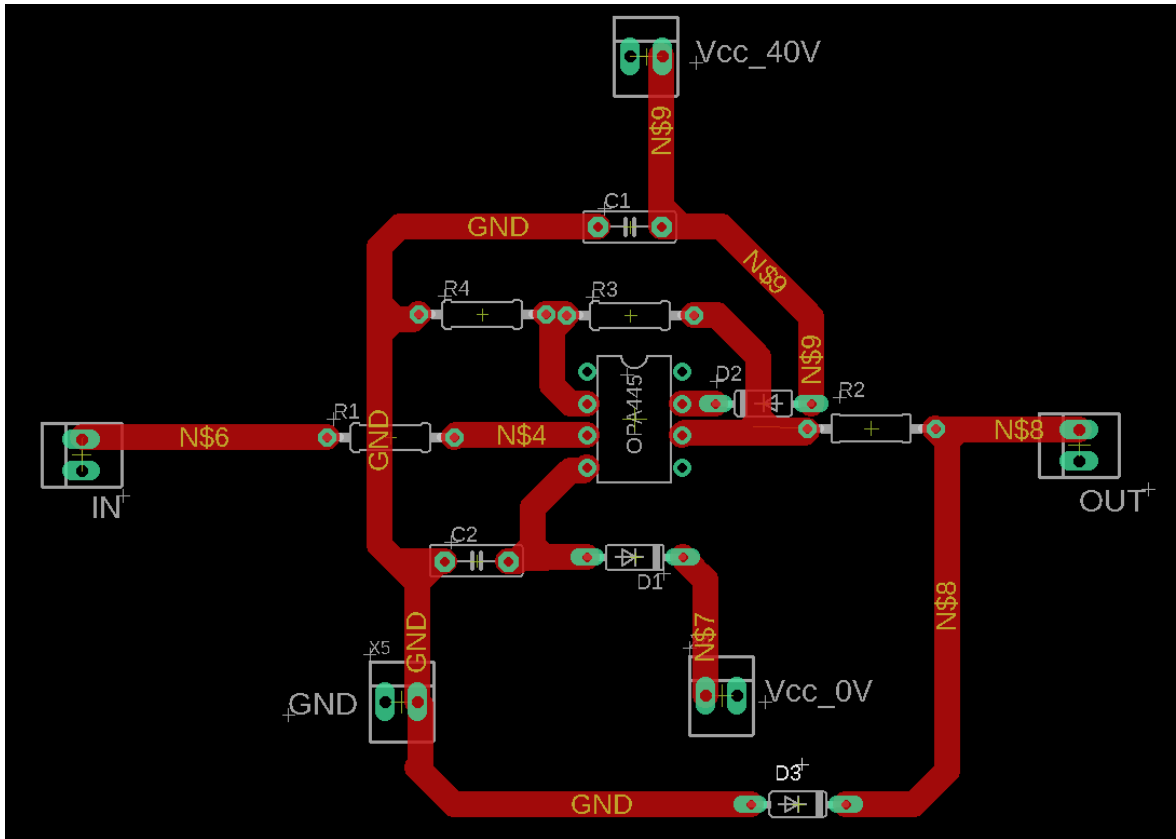


NC = No internal connection;  
leave NC floating or connect to GND, V+, or V-.

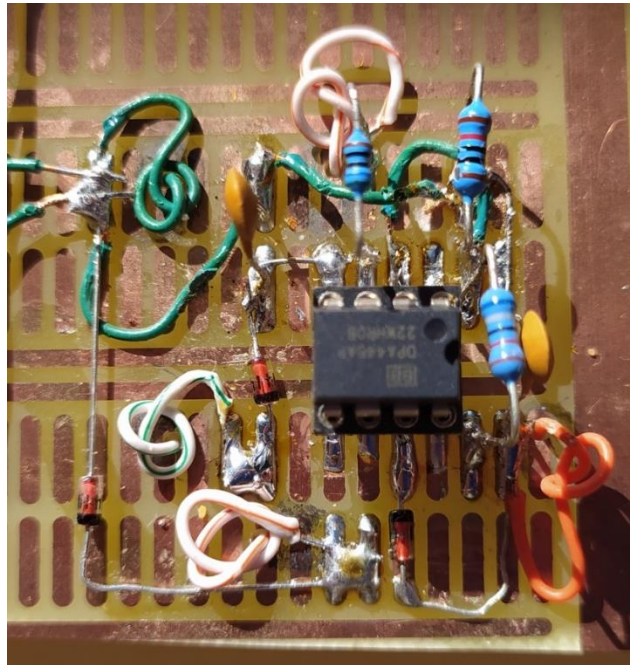
Obr. 32.: Schéma vnitřního zapojení OPA445 (převzato z [14])



Obr. 33.: Schéma budícího obvodu s OPA445 pro ventil 630



Obr. 34.: Budící obvod s OPA445 rozložení na desku



Obr. 35.: Zkonstruovaný prototyp budícího obvodu s OPA445



Zhotovený obvod bylo nutné vyzkoušet a otestovat, zda správně funguje dle počátečních zadaných vlastností, proto jsem ho sám otestoval. Budící obvod podle požadavků zesiluje osmkrát a reguluje napětí od 0 do 40 V. Takto ověřený zesilovač jsem připojil k ventilu 630. Ten se však neotevíral podle předpokladů. Proto jsem se pokusil ventil otevřít bez budícího obvodu přímo pomocí 30 V zdroje. Takové napětí by mělo stačit pro otevření ventilu na 75 %. Ventil se ani při přímém připojení ke zdroji neotevřel. Tento problém jsem řešil s vedoucím práce s panem Prof. Štorkem. Ten rozebráním a analýzou ventilu zjistil, že ventil má prasklý vnitřní píst a další drobné poškození. Tímto prozkoumáním vnitřní stavby ventilu jsme zjistili jeho nevratné poškození. Proto tento ventil není vhodný k použití v tomto projektu.

### 3.2 Zprovoznění elektropneumatického proporcionálního ventilu Sentronic 601 00 041 010 713 970 518

Před začátkem návrhu potřebných obvodů k regulování ventilu a zpracování dat z výstupu ventilu, kdy jsem byl poučen z předchozího poškozeného ventilu, jsem nejprve vyzkoušel připojení ventilu přímo ke zdroji napětí, zda pracuje správně či není vadný jako první ventil. Zjistil jsem, že je funkční, a proto jsem mohl začít navrhovat budící obvod pro ventil 601. Tento ventil je řízen rozsahem napětí od 0 do 10 V. Z tohoto důvodu je potřeba použít operační zesilovač v neinvertujícím zapojení s vhodným zesílením napětí. Vybral jsem operační zesilovač s označením OZ TS358CD – C3G, který je symetricky napájený  $\pm 15$  V, umí pracovat až do frekvence 1 MHz a je dvou kanálový (Obr. 37.) v pouzdru DIP 8. Velikost zesílení se určuje poměrem odporů ve zpětné vazbě, jeden odpor se vhodně zvolí a druhý je vypočítán podle vzorečku 37.

$$K \cdot U_{IN} = U_{OUT} \quad (35)$$

$$K \cdot 3,3 = 10 \Rightarrow K \doteq 3,03 \quad [-] \quad (36)$$

$$K = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad [-] \quad (37)$$

Ventil 601 poskytuje informaci o tlaku na jeho výstupu ve stejném napětíovém rozsahu jako je jeho řízení. Ovšem z měření vyplývá, že při větším tlaku, než je 75 mmHg (to odpovídá 10 V) umí vnitřní senzor ventilu měřit se zkreslením až do 105 mmHg (14 V), při kterém přechází do saturace. Mikrokontroler však umí zpracovávat signál pouze do 3,3 V ( $U_{INF}$ ), proto je nutné tento rozsah zmenšit. V tomto případě postačuje jednoduchý odporový dělič. Podobně jako ve zpětné vazbě jeden odpor je volen a druhý dopočítán (Vzorec 39). Odpor  $R_3$  je potřeba spočítat podle vzorečku 38, tak aby omezil proud tekoucím do

mikrokontroleru a zároveň při poruše odporu R4 neprocházelo celé napětí ze senzoru do mikrokontroleru. K tomu také slouží obě diody zapojené před výstupem vůči 3,3 V a zemi mikrokontroleru.

$$R_{3MIN} = \frac{10 V}{10 mA} = 1 \quad [k\Omega] \quad (38)$$

Zvolil jsem větší odpor o hodnotě 12 k $\Omega$ .

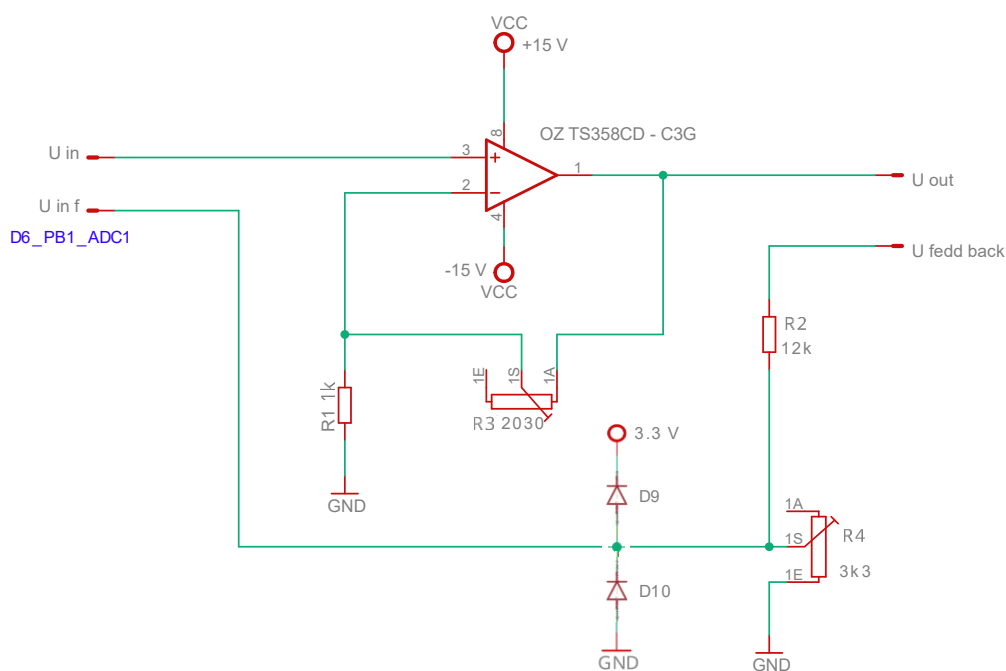
$$U_{INF} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{FEEDBACK} \quad [V] \quad (39)$$

$$3,3 V = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot 15 V = \frac{R_4}{12000 + R_4} \quad (40)$$

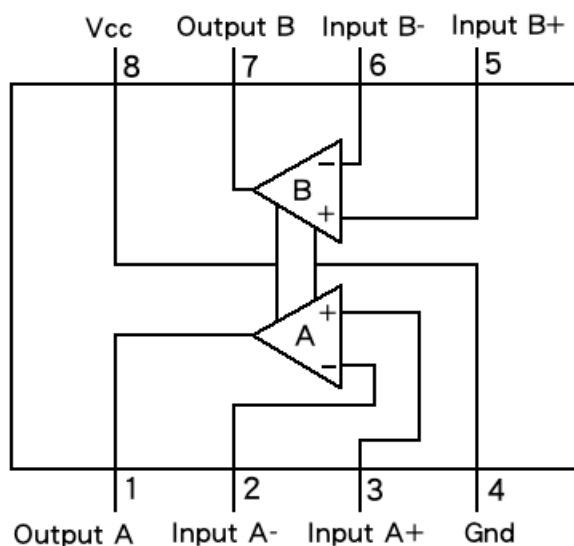
$$R_4 = 3385 \quad [\Omega] \quad (41)$$

Výpočtem mi vyšel druhý odpor v hodnotě 3300  $\Omega$ . Pro přesné snížení rozsahu jsem použil potenciometr, který eliminuje tolerance součástek a přesného doladění výstupního napětí.

Na následujícím obrázku 36. je vidět kompletní zapojení budícího obvodu a obvodu pro zpracování zpětné vazby.



Obr. 36.: Schéma zapojení obvodu potřebné k ventilu 601



Obr. 37.: Blokový diagram vnitřního zapojení zesilovače OZ TS358CD - C3G (převzato z [15])

V následujících vzorcích je vidět postup přepočtu mezi tlakem ( $p$ ) a výstupním napětím senzoru ventilu 601 ( $u_V$ ) (Rovnice 42 a 43). Z rovnic 44 a 45 je pomocný přepočet mezi výstupním napětím senzoru 601 ( $u_V$ ) na vstupní napětí do mikrokontroleru ( $u_M$ ). Rovnice 46 a 47 udávají výpočet mezi napětím  $u_M$  a tlakem  $p$  A na obrázku 38. je vidět grafické znázornění těchto výpočtů.

$$u_V = \frac{10}{75} \cdot p = 0,1333 \cdot p \quad [V] \quad (42)$$

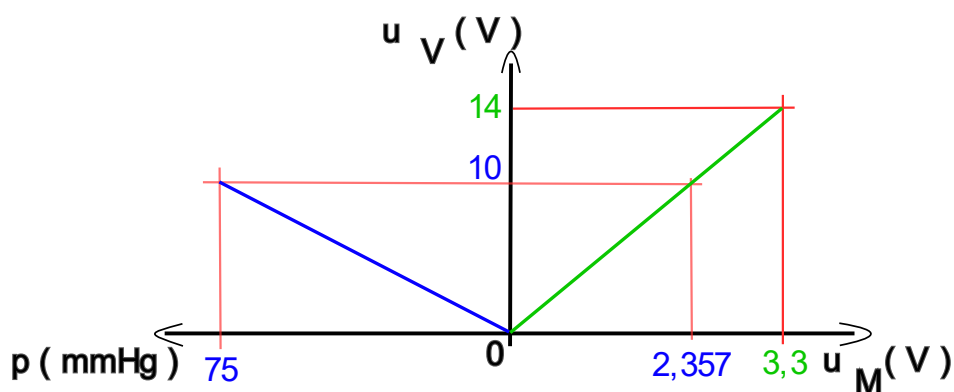
$$p = \frac{75}{10} \cdot u_V = 7,5 \cdot u_V \quad [mmHg] \quad (43)$$

$$u_M = \frac{3,3}{14} \cdot u_V = 0,2357 \cdot u_V \quad [V] \quad (44)$$

$$u_V = \frac{14}{3,3} \cdot u_M = 4,2424 \cdot u_M \quad [V] \quad (45)$$

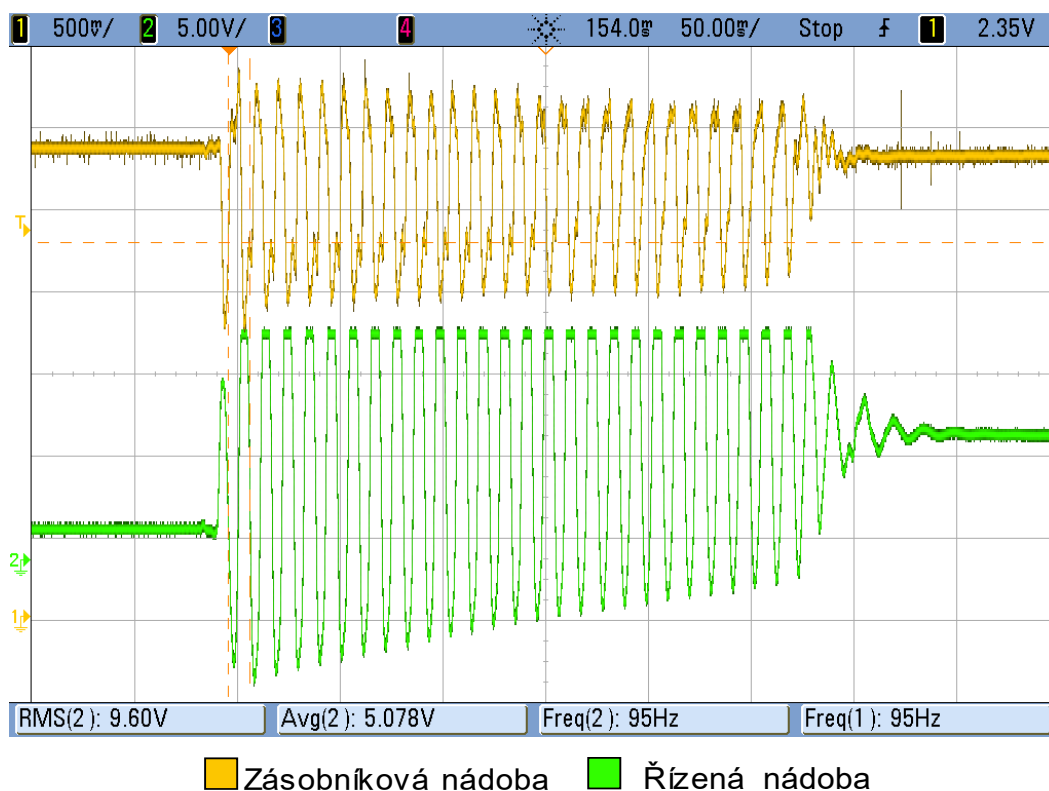
$$u_M(p) = \frac{3,3}{14} \cdot \frac{10}{75} \cdot p = 0,03143 \cdot p \quad [V] \quad (46)$$

$$p(u_M) = \frac{75}{10} \cdot \frac{14}{3,3} \cdot u_M = 31,8182 \cdot u_M \quad [mmHg] \quad (47)$$



Obr. 38.: Grafické zobrazení převodů

Z průběhu (zeleně) získaného z osciloskopu (Obr. 39.) je vidět, jak se tento ventil 601 rozkmitá při změně požadovaného tlaku v řízené nádobě zvětšením řídicím napětím ventilu 601. Ventil spíná rychlostí 95 Hz a rozkmitává plyn jak do řízené nádoby, tak i do zásobníku. Proto snímač (oranžově) ukazuje kmitající změny tlaku v zásobníkové lahvi o stejné frekvenci a posunutou fází o půl periody. Při takovém průběhu vlastní regulace ventilu není vhodné jej spojitě regulovat. Z měření vyplynulo, že zabudovaný snímač tlaku ve ventilu 601 měří správně pokud není ventil aktivní. Zvýše uvedených důvodů je tento ventil 601 použitý jen jaké snímač a reguluje se ventil 302. A proto nebyla ani realizován budící obvod mezi mikrokontrolerem a ventilem 601.



Obr. 39.: Průběhy snímače RVAQ300GU (oranžová) a snímače ventilu 601 (zelená)

### 3.3 Kompresor

Kompresor je stavěný pro 6 V napájení. V nezatíženém stavu odebírá proud 0,22 A, a při zatížení se jeho odběr zvýší na 0,4 A. Jelikož nebyl k sehnání zdroj o 6,5 V, použil jsem 9 V zdroj (AME10-CJZ). [16] Na snížení napájecího napětí o 3 V jsem použil sériové zapojení 4 usměrňovacích diod D<sub>5</sub> až D<sub>8</sub> (Obr. 42.).

Kompresor tlakuje láhev pro získání poměrně konstantního zdroje stlačeného vzduchu do pneumatické soustavy. Pro jeho spínání jsem vybral bipolární tranzistor BC639 NPN, protože umí spínat jednoampérový proud. [19] Spouští kompresor v limitním režimu spuštěn – vypnut. Spínání tranzistoru zajišťuje invertující komparátor s hysterezí pro udržení tlaku v nádobě v určitém rozsahu. Invertující komparátor s hysterezí zároveň zajišťuje, aby kompresor byl při zvoleném rozsahu tlaku v nádobě vypnutý. Použitý kompresor není zkonstruován pro dlouhodobé spuštění. Používá se v medicíně například pro měření krevního tlaku, kdy pracuje jen v krátkých intervalech. Pro invertující komparátor s hysterezí jsem také použil operační zesilovač OZ TS358CD C3G napájený ±15 V. [15] Komparátor porovnává nastavitelné referenční napětí ( $U_{HS}$ ) s napětím ( $U_{SENSOR}$ ) od senzoru tlaku RVAQ300GU. [20] Je-li napětí senzoru menší, než je referenční na výstupu komparátoru je maximální napětí  $U_{SAT} + 15$  V. V opačném případě, kdy sensorové napětí je větší než napětí referenční, výstupní napětí  $U_{SAT}$  je minimální -15 V, které bezpečně zajišťuje zavření tranzistoru. Při maximálním  $+U_{SAT}$  je nádoba málo natlakovaná, proto je zapínán kompresor. Když je v nádobě dostatečný tlak, výstup komparátoru se překlápí do  $-U_{SAT}$  a kompresor se vypne. Šířka hystereze ( $U_H$ ) se počítá podle vzorečku 48, respektive 49.

$$U_H = 2 \cdot \frac{R_7}{R_8} \cdot U_{SAT} \quad [V] \quad (48)$$

$$\frac{R_7}{R_8} \sim \frac{U_H}{2U_{SAT}} \quad (49)$$

Komparační úrovně, kdy se komparátor překlápí vypočítáme vzorečkem 50 a střed šířky hystereze  $U_{HS}$  (Vzorec 51).

$$U_k = -\frac{R_7}{R_8} \cdot U_0 \quad [V] \quad (50)$$

$$U_{HS} = U_{K-} + U_{K+} \quad [V] \quad (51)$$

Z výše uvedených vzorečků 50 a 51 lze dopočítat horní  $U_{(K-)}$  a dolní  $U_{(K+)}$  komparační úrovně.

$$U_{K-} = -\frac{R_7}{R_8} \cdot (-U_{SAT}) \quad [V] \quad (52)$$

$$U_{K-} = \frac{R_7}{R_8} \cdot (U_{SAT}) \quad [V] \quad (53)$$

$$U_{K+} = -\frac{R_7}{R_8} \cdot (U_{SAT}) \quad [V] \quad (54)$$

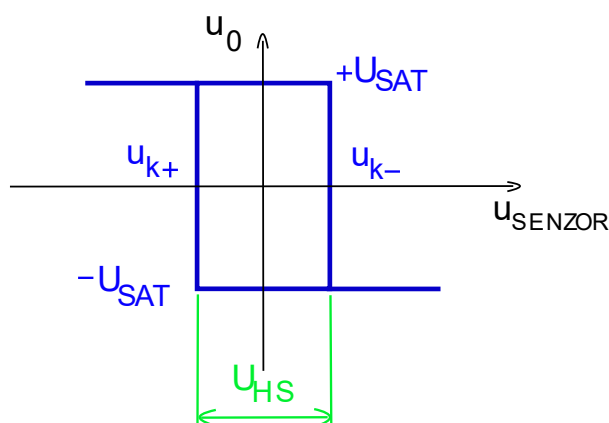
Pro hysterezní šířku a komparační úroveň teoretickým výpočtem, následným vyzkoušením a měřeními jsem dospěl k hodnotám odporů  $R_7 = 2,2 \text{ k}\Omega$  a  $R_8 = 100 \text{ k}\Omega$ . Zpětným dosazením do vzorečků 55 až 58 zjistíme  $U_{(K-)}$ ,  $U_{(K+)}$ , šířku hystereze  $U_H$  a osu hystereze  $U_{HS}$ .

$$U_H = 2 \cdot \frac{2200 \Omega}{100 \text{ k}\Omega} \cdot 15 = 0,66 \text{ V} \quad (55)$$

$$U_{K-} = \frac{2200 \Omega}{100 \text{ k}\Omega} \cdot 15 = 0,33 \text{ V} \quad (56)$$

$$U_{K+} = -\frac{2200 \Omega}{100 \text{ k}\Omega} \cdot 15 = -0,33 \text{ V} \quad (57)$$

$$U_{HS} = 0,33 + (-0,33) = 0 \text{ V} \quad (58)$$

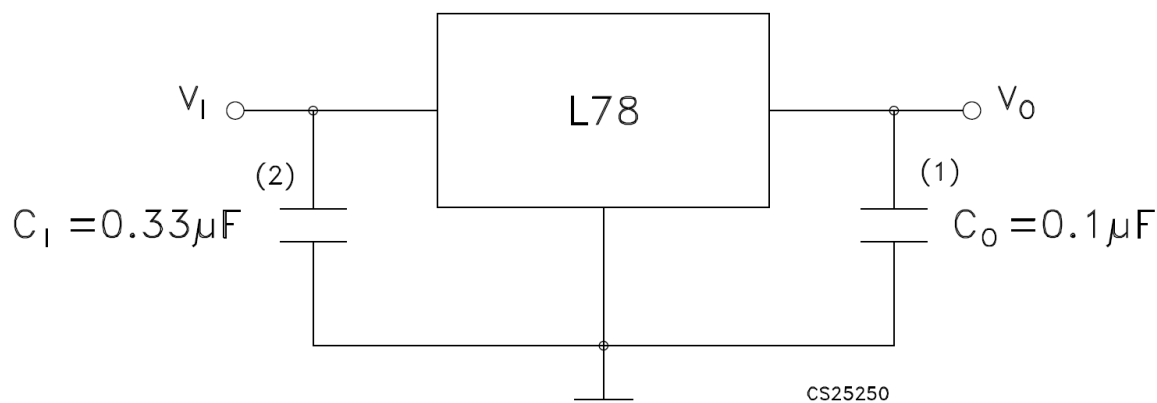


Obr. 40.: Invertující hystereze

Takto vypočítaná invertující hystereze platí pro  $U_{HS}$  rovnou nule (Obr. 40.). Pro nastavení tlaku v nádobě je potřeba regulovat hysterezní střed  $U_{HS}$ . To odpovídá velikosti referenčního napětí, které je vytvořeno sériovým spojením napěťového pětivoltového stabilizátoru 78L05Y3126 s potenciometrem. Právě potenciometrem se nastavuje poloha hystereze, jejíž osu  $U_{HS}$  jsem nastavil na 3 V. Tímto nastavením se nám zvětšily všechny hodnoty. Samozřejmě šířka hystereze je konstantní, jelikož odpovídá poměru velikostí odporů.

$$U_{HS} = 3 \text{ V}, U_{K-} = 3,33 \text{ V}, U_{K+} = 2,67 \text{ V}, U_H = 0,66 \text{ V} \quad (59)$$

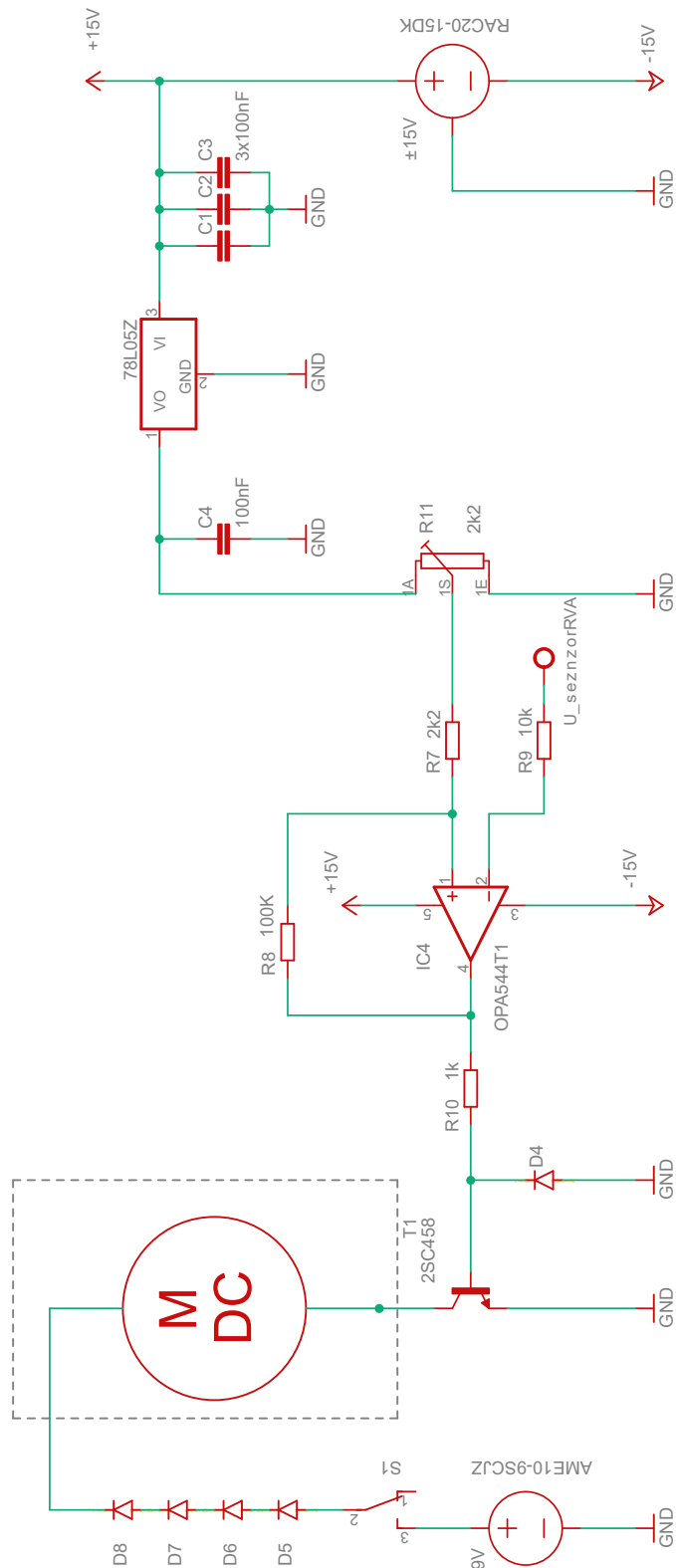
Z 15 V zdroje je napájený 5 V stabilizátor. Pro jeho stabilní výstup je potřeba podle datasheetu přidat kondenzátory  $C_1 = 0,33 \mu\text{F}$  a  $C_0 = 0,1 \mu\text{F}$  zapojené podle obrázku 41. Z absence velikosti kondenzátoru  $C_1$  jsem paralelně zapojil 3 kondenzátory o hodnotě  $C_0$ . [21]



GAMG220920161007MT

Obr. 41.: Zapojení stabilizátoru 78L05

Na obrázku 42. je znázorněné zapojení kompresoru, bipolárního tranzistoru, invertujícího komparátoru s hysterezí, vytvořené regulované napětí se stabilizátorem 78L05 a vstupu pro připojení tlakového senzoru RVAQ300GU. Odpor  $R_9$  slouží k omezení proudu do invertujícího vstupu komparátoru a  $R_{10}$  vytváří úbytek napětí pro bipolární tranzistor a omezení proudu do báze tranzistoru. Ten je plně otevřen už od 2 V, proto je zbytečné k němu přivádět plné saturační napětí 15 V. Dioda D4 chrání vstupní bázi tranzistoru proti zápornému napětí. Do série s kompresorem je přidán spínač pro možné ruční vypnutí kompresoru.



Obr. 42.: Kompletní nastavení a regulace kompresoru



### 3.4 Použití senzoru series RVAQ300GU

Senzor RVAQ300GU (dále jen senzor RVA) snímá tlak od 0 do 300 mmHg což odpovídá napěťovému rozsahu od 0,5 do 4,5 V respektive měří až do 5 V. V následujících rovnicích (60 až 63) je ukázán převod mezi výstupním napětím senzoru RVA ( $u_{RVA}$ ) s měřeným tlakem ( $p$ ) a čteným tlakem ( $p$ ) se vstupním napětím mikrokontroleru ( $u_{MR}$ ).

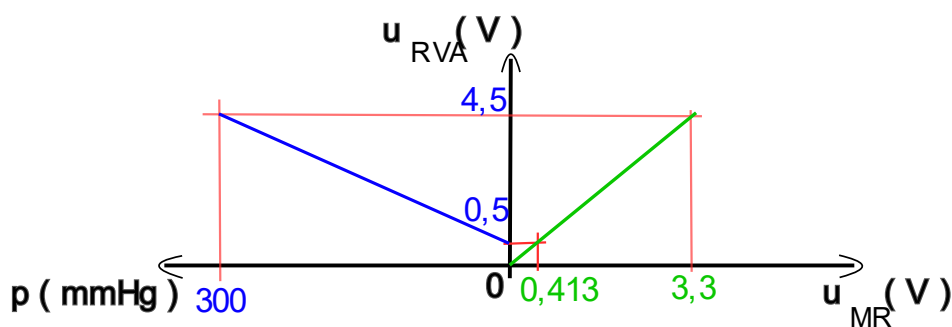
$$u_{RVA} = \frac{4}{300} \cdot p + 0,5 \quad [V] \quad (60)$$

$$p = 75 \cdot u_{RVA} - 37,5 \quad [mmHg] \quad (61)$$

$$u_{MR}(p) = \frac{3,3}{300} \cdot p + \frac{3,3 \cdot 0,5}{4} = 0,033 \cdot p + 0,4125 \quad [V] \quad (62)$$

$$p(u_{MR}) = 75 \cdot \frac{4}{3,3} \cdot u_{MR} - 37,5 = 90,9091 \cdot u_{MR} - 37,5 \quad [mmHg] \quad (63)$$

Obrázek 43. ukazuje převodní charakteristiku mezi tlakem  $p$ , napětím senzoru  $u_{RVA}$  a vstupním napětím do mikrokontroleru  $u_{MR}$ .



Obr. 43.: Převodní charakteristika senzoru RVAQ300GU

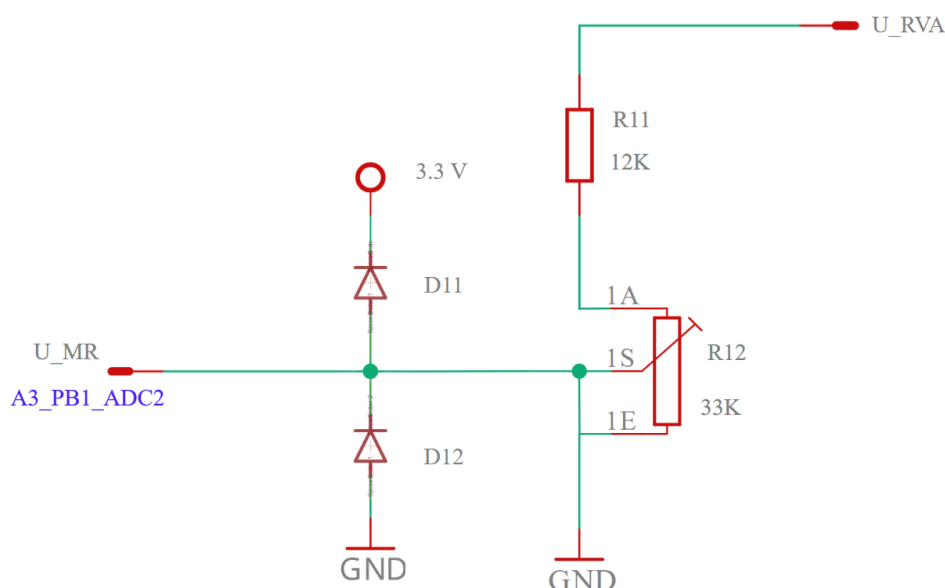
Tento senzor je také snímán řídicím mikrokontrolerem, proto je také nutné snížit maximální výstupní napětí senzoru RVA z 5 V na 3,3 V. Snižovací dělič napětí pracuje na stejném principu jako dělič napětí pro senzor ve ventilu 601. Rovnice 64 až 66 ukazují výpočet rezistoru  $R_5$  a potenciometru  $R_6$  dimenzování pro použití se senzorem RVA. V tomto zapojení jsem také zvolil odpor o hodnotě 12 k $\Omega$ .

$$U_{INF} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} U_{RVA} \quad [V] \quad (64)$$

$$3,3 V = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \cdot 5 V = \frac{R_4}{12000 + R_4} \quad (65)$$

$$R_4 = 23294 \Omega \quad (66)$$

Výpočtem mi vyšel druhý odpor v hodnotě 23,294 k $\Omega$ . Pro přesné snížení rozsahu a možnému doladění jsem použil potenciometr o hodnotě 33 k $\Omega$ . Obrázek 44. znázorňuje schématické zapojení použitých součástek.



Obr. 44.: Dělič napětí pro senzor RVAQ300GU

### 3.5 Použité zdroje

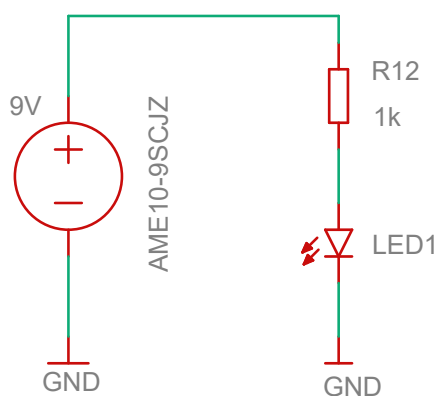
Všechny zdroje jsou napájeny přímo ze sítě přes společný přívodní kabel se svorkovnicí. Výstupní nulové potenciály zdrojů je nutné propojit, aby nevznikla plovoucí nula. Pokud by se nespojily, v některých místech v obvodu by mohla vznikat nesprávná velikost potenciálu. Při jednom sestavování jsem takovou chybu udělal, a tím přestal správně pracovat komparátor. Díky tomu jsem zjistil chybu v zapojení.

#### 3.5.1 Zdroj 9 V Aimtec AME10-9SCJZ

Zdroj AME10-9SCJZ poskytuje 9 V napětí s dodáním až 1,1 A a pracuje v pokojové teplotě s efektivitou 78 %. Tento zdroj napájí kompresor a je k němu připojená přes odpor dioda pro indikaci připojení celého systému do zásuvky (Obr. 46.). [16]



Obr. 45.: Zdroj AME10-9SCJZ



Obr. 46.: Schéma zapojení s indikační diodou

### 3.5.2 Zdroj $\pm 15$ V Recom RAC20-15DK

Zdroj RAC20-15DK poskytuje symetrické napětí kolem 0 o 15 V. Tento zdroj umí do obvodu dodat až 1333 mA. Pracuje s 86 % účinností při pokojové teplotě. Tento symetrický zdroj napájí všechny operační zesilovače a 5 V stabilizátor napětí. [17]



Obr. 47.: Zdroj symetrického napětí RAC20-15DK

### 3.5.3 Zdroj 24 V kamn3024

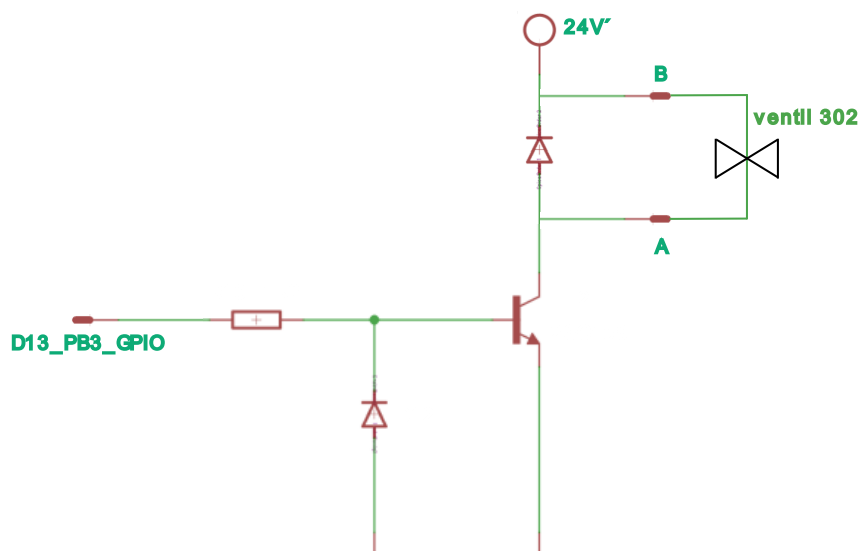
Tento 30 W zdroj má typickou účinnost 86 %, poskytne až 1250 mA a vytváří 24 V napětí. Primárně je určen pro napájení různých ventilů. [18]



Obr. 48.: Zdroj napětí kamn3024

### 3.6 Ventil 302 100 10 – P

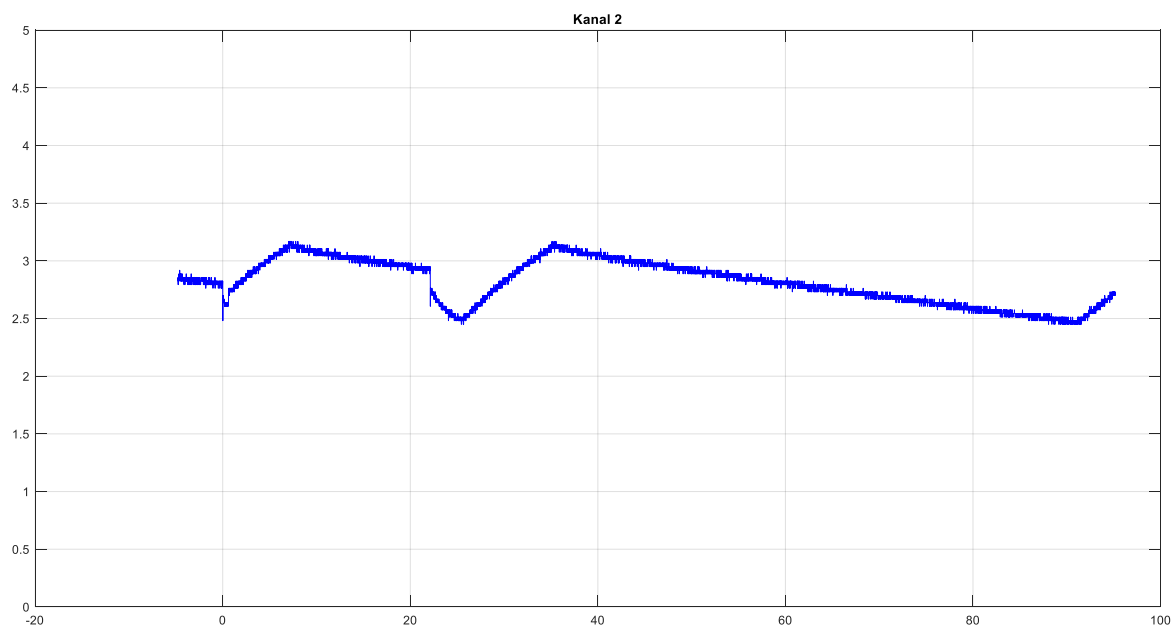
Jelikož ventil 602 nepracoval tak jak bylo předpokládáno, byl pro regulaci tlaku v řízené nádobě zvolen ventil 302. Je řízen mikrokontrolerem. Ten dává na výstupu pinu maximálně 3,3 V. Proto a také aby jeho výstupní konektor nebyl zatěžován, navrhl jsem, dimenzoval a sestavil budící obvod (Obr. 49.) pro spínání 24 V. Odpor  $R_{13}$  omezuje proud do bipolárního tranzistoru BC639 NPN. [19] A dioda  $D_{12}$  chrání vstupní bázi tranzistoru proti zápornému napětí. I když mikrokontroler neumí vytvořit záporné napětí, zapojil jsem jí do obvodu. Kolektor tranzistoru je přes ventil připojen ke zdroji napětí 24 V. Jelikož ventil se v podstatě spíná indukčností, musí se k němu antiparalelně připojit dioda, která přebírá proud z ventilu při jeho rozeptnutí. Ventil se podle schématu na obrázku 49. zapojuje mezi konektory A a B.



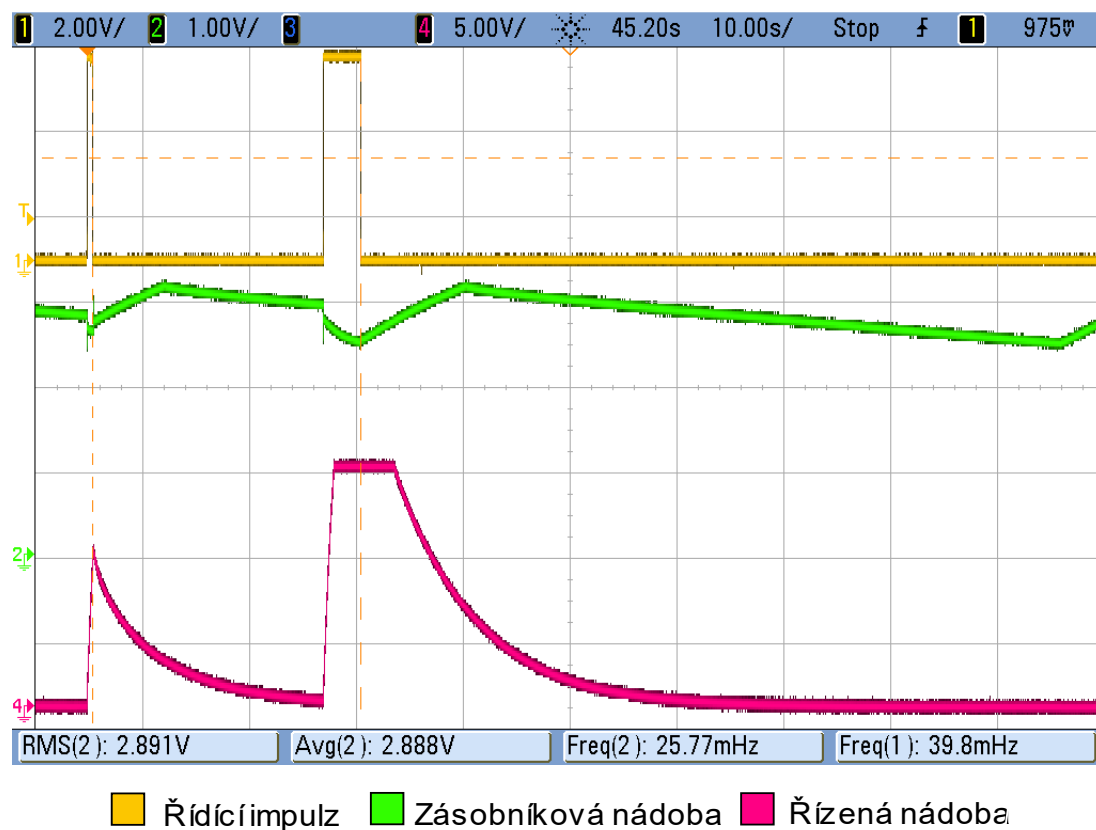
Obr. 49.: Schéma zapojení budícího obvodu pro ventil 302

### 3.7 Zhodnocení naměřených a získaných dat

Průběh napětí senzoru RVA na obrázku 50. znázorňuje funkci hystereze. Ta se pohybuje od 2,45 V do 3,1688 V. Šířka hystereze je 0,7188 V. Z těchto velikostí napětí lze vyvodit, že zásobovací nádoba je tlakována od 146,25 mmHg do 200,16 mmHg.



Obr. 50.: Hystereze zásobovací nádoby

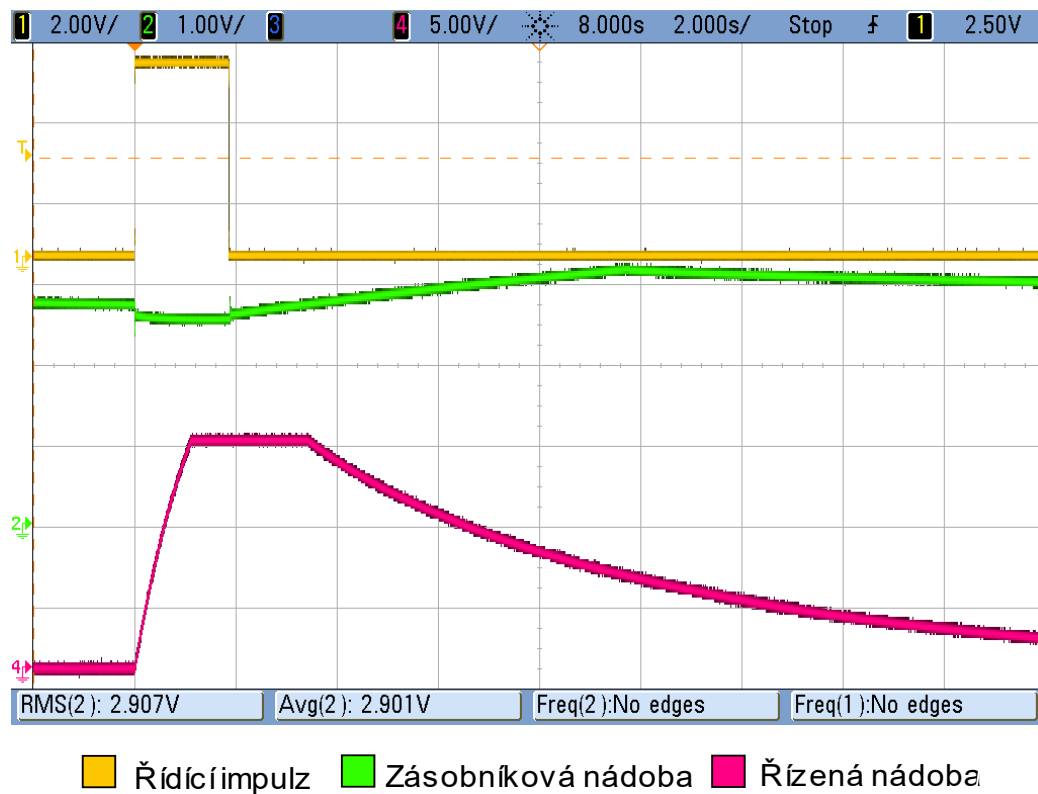


Obr. 51.: Pulzní spínání ventilu 302

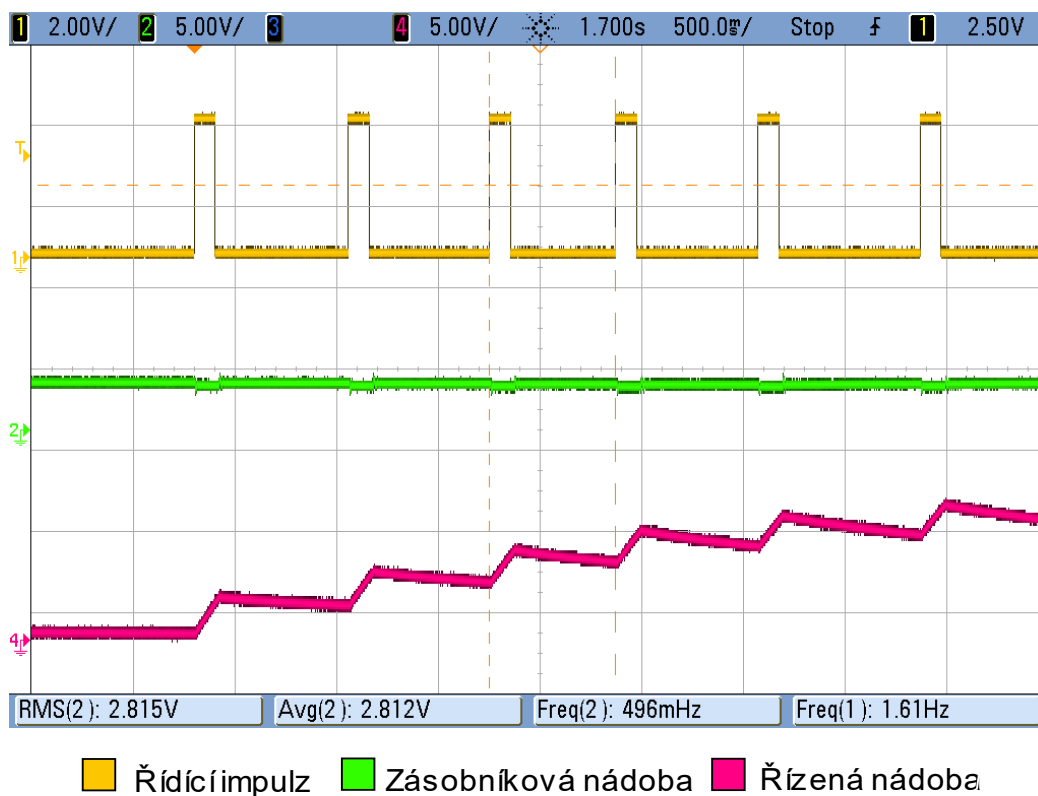
Při krátkém pulzním sepnutí (oranžově) ventilu 302 poklesne tlak v zásobovací nádobě (zeleně) a prudce tlak vzroste v řízené nádobě (růžově) (Obr. 51.). Pokud je tento řídicí impuls dlouhý tak, že umožní srovnat tlaky mezi oběma nádobami, senzor 601 v řízené nádobě přejde do saturace při tlaku 105 mmHg. To odpovídá výstupnímu napětí 14 V. Ventil 601 i se zabudovaným senzorem tlaku jsou dimenzovány pro provozní tlak 75 mmHg s možným opakovaným krátkým přetížením, proto je červený průběh oříznutý na velikosti 14 V. Z toho nám také vyplývá, že udávaný tlak senzoru 601 od 105 mmHg neudává skutečnou hodnotu tlaku v řízené nádobě, ve které může být stejný tlak jako v druhé nádobě, která je tlakována až do 200,16 mmHg

Na obrázku 51. je také vidět náznak logaritmického nárůstu tlaku, a i jeho exponenciální pokles. Průběhy můžeme aproximovat pomocí rovnice  $u_{RVA} = 4,3135 \ln(t) + 11,583$  při otevření ventilu a  $u_{RVA} = 22,02 \cdot e^{-0,14t}$  při zavření ventilu, viz příloha R. Přibližný detail těchto průběhů je dobře vidět na grafu z osciloskopu 52. Exponenciální průběh je způsoben fyzikálními vlastnostmi plynu v uzavřeném pneumatickém systému. Spojovací hadičky v takovém zapojení způsobují určitý odpor, to způsobuje nemožnost skokového nebo lineárního nárůstu tlaku. Také je z tohoto grafu vidět, velký pokles tlaku v řízené nádobě,

jenž je způsobený nedokonalým utěsnnění pneumatiké soustavy. Avšak díky tomu je nádherně vidět exponenciální pokles tlaku.



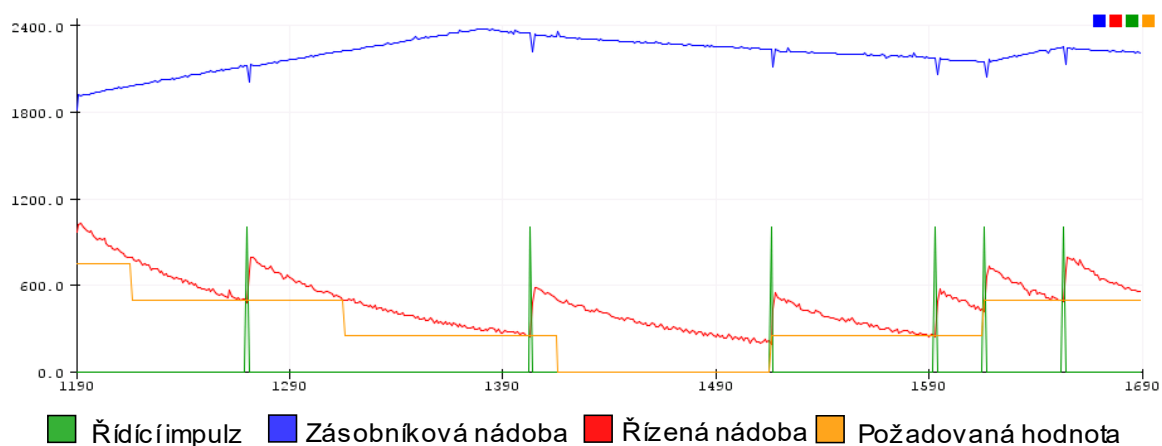
Obr. 52.: Průběh tlaku v řízené nádobě



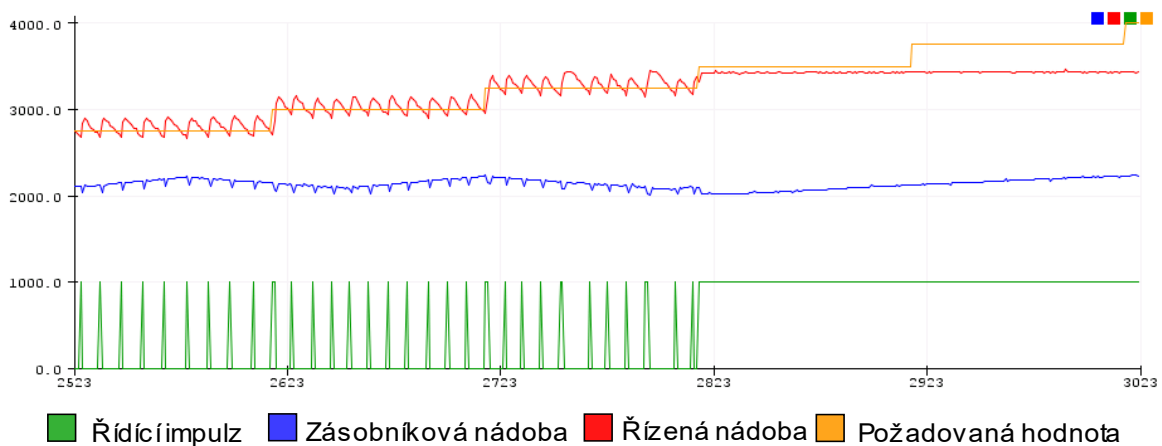
Obr. 53.: Impulzní tlakování řízené nádoby

Na obrázku 53 je vidět postupné naplňování řízené nádoby krátkými řídicími pulzy. Je zde také vidět exponenciální nárůsty a poklesy. Také je vidět na zeleném průběhu zásobovací nádobě poklesy tlaku při otevření ventilu 302.

Následující grafy (Obr. 54. až 56.) jsou získané z mikrokontroleru. Modrá křivka znázorňuje tlakování zásobovací nádoby. Exponenciální napouštění a vypouštění řízené nádoby je ukázáno růžově. Spínání ventilu 302 je vidět na zelených pulzech. Žlutý průběh naznačuje změny požadované hodnoty, kterou sekvenčně mění mikrokontroler podle algoritmu.

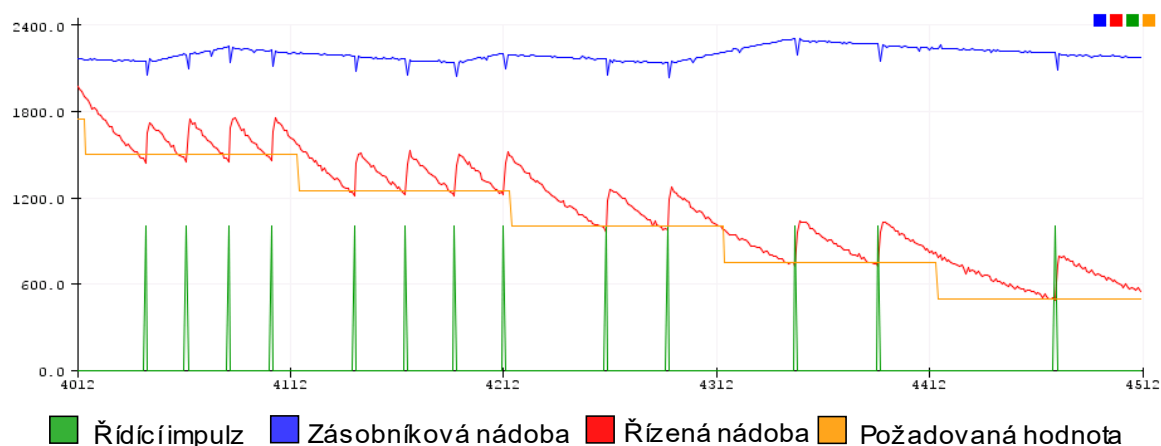


Obr. 54.: Regulace mikrokontrolerem



Obr. 55.: Regulaci při postupném navyšování tlaku





Obr. 56.: Regulace při postupném snižování tlaku

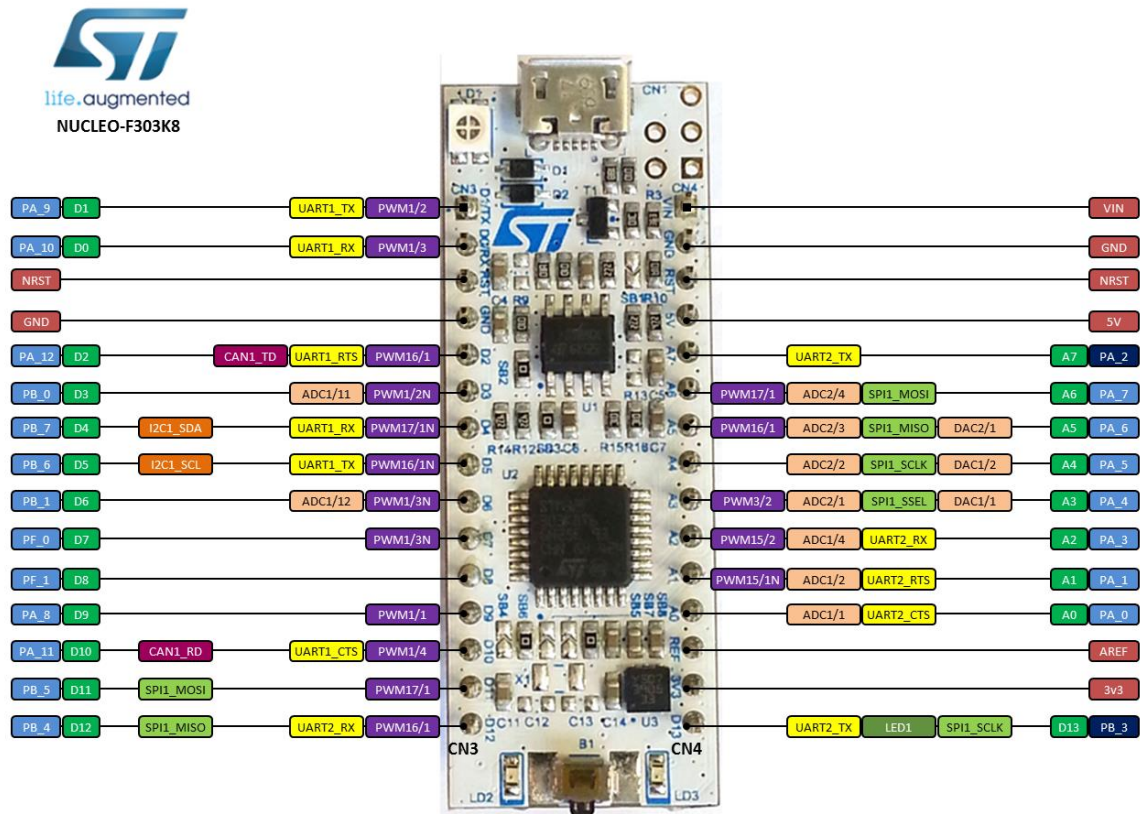
Stejně jako na průbězích z osciloskopu je na datech z mikrokontroleru vidět, jak poklesne tlak v zásobníku při otevření řízeného ventilu. Na obrázku 55. červený konstantní průběh označující velikost tlaku v řízené nádobě názorně zobrazuje saturované napětí ze senzoru ve ventilu 601. Od relativního času označeném jako 2823 je ventil plně otevřen (zeleně), jelikož podle zpětné vazby z ventilu 601 přichází informace (červeně), že v nádobě není požadovaný tlak (žlutě). I když reálně je v nádobě stejný tlak jako v zásobníku, který je zhruba dvojnásobný než ten, který je schopen senzor ventilu 601 změřit.

Lokální minimální a maximální hodnoty v intervalu konstantního požadovaného tlaku znázorňují naprogramovanou hysterezi. Šířka této hystereze jsou 2 % od požadované hodnoty. Na obrázku 56. je vidět, jak probíhá regulace při postupném snižování tlaku v řízené nádobě.

### 3.8 Řídicí program mikrokontroleru

#### 3.8.1 Mikrokontroler Nucleo STM32F303K8

Pneumatickou soustavu řídí mikrokontroler Nucleo STM32 F302 K8 s jádrem M4 pracujícím až při 72 MHz. Výhodou tohoto jádra je možnost debugování při běhu programu. S jádrem se pojí 16 KB SRAM paměť, z anglického Static Random Access Memory, která zde slouží pro předávání dat jádru, což vyplývá i z jejich vlastností. Tento typ paměti je velmi rychlý, ale po odpojení napájení ztrácí veškerá data, a proto zde nemůže být uložený program. Na desce se nachází také 64 KB flash paměť, do které se ukládají data a samotný program. Oproti SRAM je výrazně pomalejší, ale data si uchovává i po odpojení od napájení. Pro mojí aplikaci jsou důležité také A/D převodníky, které jsou tu 2, dohromady s 21 kanály s 12bitovým rozlišením. [24][26]



Obr. 57.: Rozložení pinů mikrokontroleru STM32F303K8 (převzato z [29])

**Labels usable in code**

**PX\_Y** MCU pin without conflict

**PX\_Y** MCU pin connected to other components  
See [PeripheralPins.c](#) (link below) for more information

**XXX** Arduino connector names (A0, D1, ...)

**XXX** LEDs and Buttons (LED\_1, USER\_BUTTON, ...)

**Labels not usable in code (for information only)**

**XXX** Serial pins (USART/UART)

**XXX** SPI pins

**XXX** I2C pins

**XXX** PWMOut pins (TIMER n/c[N])  
n = Timer number c = Channel  
N = Inverted channel

**XXX** AnalogIn (ADC) and AnalogOut pins (DAC)

**XXX** CAN pins

**XXX** Power and control pins (3V3, GND, RESET, ...)

Obr. 58.: Legenda pinů (převzato z [29])

**3.8.2 Program**

Mikrokontroler využívá dva vstupní ADC převodníky pro získávání dat ze senzoru RVA a ze senzoru ventilu 601. Senzor RVA je připojený k pinu A3\_PA4, který je čtený převodníkem ADC2 a je ukládán do proměnné *sensorRVA*. Výstup senzoru 601 je připojen k pinu D6\_PB1, ten je čtený ADC1 a uložen do proměnné *p\_valves601*. Ventil 302 je řízen proměnnou *valve302\_out* ovládající výstupní digitální pin D13\_PB3. Pro měření

realizovaného pneumatického systému se požadovaná hodnota tlaku v řízené nádobě mění programově. Mění se skokově po 5 sekundách o hodnotu 250, tyto hodnoty byly odhadnuty ze zkušeností z předchozích měření. Proměnná je pojmenovaná jako *pozadovana\_hodnota*. Ta se mění vzestupně i sestupně v intervalu od 100 do 4000. tento interval odpovídá intervalu tlaku od 4,98 mmHg do 195,47 mmHg. Přepočítání mezi programovou hodnotou  $H$  a reálným tlakem  $p$  je podle následujících dvou vzorců 67 a 68.

$$p(H) = \frac{200,16}{4096} \cdot H \Rightarrow p(100) = 4,98 \text{ mmHg} \quad (67)$$

$$\Rightarrow p(4000) = 195,47 \text{ mmHg}$$

$$H(p) = \frac{4096}{200,16} \cdot p \quad [-] \quad (68)$$

Bezrozměrné číslo 4096 je maximální číselná hodnota ADC převodníku a hodnota 200,16 je maximální tlak, který je v hlavní zásobníkové lahvi.

Řídící proměnná *valve302\_out*, ovládající ventil 302, je měněna podmínkami porovnávací informací ze senzoru 601 s požadovanou hodnotou vynásobenou konstantou. Pro měření byla zvolena povolená tolerance od požadované hodnoty 2 %, tím vznikla určitá hysterezní šířka tolerančního pásma okolo požadované hodnoty. Tento algoritmus je vidět na obrázku 59.

```

if(p_valve601 < (pozadovana_hodnota * 0.98))
{
    valve302_out = 1;
}
else if(p_valve601 > (pozadovana_hodnota * 1.02))
{
    valve302_out = 0;
}

```

Obr. 59.: Diskrétní řízení ventilu 302 s hysterezi

Ventil je řízen diskretním způsobem, protože je dvou stavový, buď je plně otevřen anebo uzavřen. Z těchto vlastností je neefektivní sestavit spojité řízení, když výstup k ventilu je jen TRUE nebo FALLS. Ve výsledku se na výstupu takové řízení jeví zase jako diskretní.

Mikrokontroler také posílá data přes UART do počítače, ve kterém je lze různými způsoby zobrazit. Data jsou posílána v pořadí podle tabulky 5. Program je připravený i pro příjem dat o požadované hodnotě.

Tabulka 5. Pořadí posílaných dat

Proměnné	senzorRVA	p_valve601	Valve302_out	pozadovana_hodnota
----------	-----------	------------	--------------	--------------------

Informace o	tlaku v zásobníku	tlaku v řízené nádobě	spínání ventilu 302	Aktuální požadované hodnotě
-------------	----------------------	--------------------------	------------------------	--------------------------------

### 3.9 Uživatelská aplikace Windows.Forms pro mikrokontroler

Uživatelská aplikace umožňuje zobrazovat aktuální data podle tabulky 5 v grafech tak i v číselné podobě. Přijaté hodnoty se ukládají pro případné pozdější zpracování. Umožňuje uživateli měnit velikost tlaku v řízené nádobě.

## 4 Zhodnocení a závěr

Práce obsahuje rešerši na téma regulace tlaku a jeho využití v praxi, také obsahuje teorii principů regulátorů a regulačních smyček. Regulace tlaku je často využívána v oblasti zdravotnictví, například u hyperbarické komory nebo umělé plicní ventilace.

Součástí práce bylo navrhnout, realizovat a proměřit systém pro regulaci tlaku v nádobách pomocí mikrokontroleru. V budoucnu má umožnit měření a analyzování různých ventilů a vytváření různých způsobů řízení. Tento systém se skládá ze dvou nádob, ve kterých se reguluje tlak, dvou elektricky řízených ventilů, senzoru tlaku a miniaturního kompresoru, který plní první, zásobníkovou, nádobu. Řízení kompresoru jsem řešil analogovým obvodem s invertujícím komparátorem s hysterezí. Tlak v druhé, řízené, nádobě měl být původně měněn spojitým piezoelektrickým ventilem, ten je nakonec nahrazený limitním ventilem řízeným mikrokontrolerem. Jelikož řízení limitního ventilu regulátorem je nevýhodné a složité, zvolil jsem řízení hysterezí s maximální 2 % odchylkou od požadované hodnoty tlaku.

Po návrhu, dimenzování a realizaci potřebných obvodů ke zprovoznění spojitého piezoelektrického ventilu 603 bylo zjištěno, že tento ventil je trvale poškozen. Z tohoto důvodu nemohl být v projektu použit. Příprava a realizace nutných obvodů k tomuto ventilu a čekání na dodání součástí zabralo významnou část času. Pro náhradní ventil 601 bylo také potřeba navrhnout, realizovat budící odbody a objednat potřebné komponenty.

Z výše uvedených důvodů jsem nestihl realizovat komunikaci po sériové lince mezi počítačem a mikrokontrolerem, pomocí které by bylo možné systém řídit a monitorovat. Součástí tohoto uživatelského rozhraní je zobrazování časových průběhů tlaků v nádobách, stavu kompresoru, ventilu a velikosti požadovaného tlaku. Tento požadavek je možné v uživatelském prostředí měnit. Uživatelské prostředí je připravené k použití a však pro jeho správné fungování je potřeba optimalizovat komunikaci pro předávání dat a jejich ukládání. Je také možné optimalizovat samotnou regulační smyčku a tím docílit rychlejšího chodu programu.

S regulací se setkáváme neustále, jelikož je součástí mnoha odvětvích, jako je zdravotnictví, nebo v průmyslu, kde jsou pneumatické pohony hojně rozšířeny díky jejich univerzálnosti, jednoduchosti a bezpečnosti. Každý systém pracující s tlakem potřebuje regulaci. Díky těmto vlastnostem je toto téma stále aktuální a do budoucna můžeme očekávat jejich rozšíření a nové aplikace těchto řešení.

## **5 Literatura**

- [1] Tlak | Fyzika na Vltavě [online]. Poslední změna 27.1.2020. [Cit. 10.10.2022].  
Dostupné z: <http://www.zsvltava.cz/fyzika/?p=1204>
- [2] Tonometr – WikiSkripta [online]. Poslední změna 22.2.2019. [Cit. 20.10.2022].  
Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Tonometr>
- [3] Měření krevního tlaku – Tonometry [online]. [Cit. 20.10.2022]. Dostupné z:  
<http://www.onhb.cz/Data/files/L%C3%A9k%C3%A1rna/Tonometry.pdf>
- [4] Korotkovova metoda – WikiSkripta [online]. Poslední změna 16.11.2020. [Cit. 20.10.2022]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Korotkovova\\_metoda](https://www.wikiskripta.eu/w/Korotkovova_metoda)
- [5] K čemu slouží hyperbarická komora? | HARTMANN [online]. [Cit. 21.10.2022].  
Dostupné z: <https://www.lecbarany.cz/clanky/k-cemu-slouzi-hyperbaricka-komora>
- [6] Hyperbarická komora | Royal Regent [online]. [Cit. 21.10.2022]. Dostupné z:  
<https://www.royalregent.cz/hyperbaricka-komora>
- [7] Umělná plicní ventilace – WikiSkripta [online]. Poslední změna 9.7.2020. [Cit. 14.11.2022]. Dostupné z:  
[https://www.wikiskripta.eu/w/Um%C4%9Bl%C3%A1\\_plicn%C3%AD\\_ventilace](https://www.wikiskripta.eu/w/Um%C4%9Bl%C3%A1_plicn%C3%AD_ventilace)
- [8] Proporcionální regulátor [online]. [Cit. 2.2.2023]. Dostupné z:  
[http://skola.hellebrand.cz/text1011/au/regulace-regulator\\_P.pdf](http://skola.hellebrand.cz/text1011/au/regulace-regulator_P.pdf)
- [9] Integrační regulátor [online]. [Cit. 2.2.2023]. Dostupné z:  
[http://skola.hellebrand.cz/text1112/mech/regulace-regulator\\_I.pdf](http://skola.hellebrand.cz/text1112/mech/regulace-regulator_I.pdf)
- [10] Regulátory [online]. [Cit. 2.2.2023]. Dostupné z:  
[http://home.pf.jcu.cz/~kyklop/SERYM/automatizace/jer/Kap06/Kap\\_06.htm](http://home.pf.jcu.cz/~kyklop/SERYM/automatizace/jer/Kap06/Kap_06.htm)
- [11] Ventil ASCO JOUCOMATIC Sentronic Series 601. [Cit. 14.11.2022]. Příloha A
- [12] Laser trimming | ACI [online]. [Cit. 14.4.2023]. Dostupné z: <https://www.aci-laser.com/en/applications/processes/laser-trimming/>
- [13] Aventics proportional valves SentronicD 608 160 111. [Cit. 14.4.2023]. Příloha B
- [14] Operační zesilovač OPA 445. [Cit. 10.4.2023]. Příloha C
- [15] Operační zesilovač TS358CD C3G. [Cit. 12.4.2023]. Příloha D
- [16] Zdroj 9V AME10 CJZ. [Cit. 12.4.2023]. Příloha E
- [17] Zdroj 15V RAC20 - 15DK. [Cit. 12.4.2023]. Příloha F
- [18] Zdroj 24V kamn3024. [Cit. 12.4.2023]. Příloha G
- [19] Tranzistor NPN BC635 40. [Cit. 10.4.2023]. Příloha H
- [20] Tlakový senzor RVAQ300GU. [Cit. 10.4.2023]. Příloha I

- [21] Stabilizátor napětí 5V L7805CV. [Cit: 10.4.2023] Příloha J
- [22] Ventil 302 100 10 – P. [Cit: 10.4.2023] Příloha K
- [23] Uživatelský manuál STM32 Nucleo-32 boards. [Cit: 10.4.2023]. Příloha L
- [24] STM32F303FK8. [Cit: 10.4.2023]. Příloha M
- [25] NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-7225-030-2 [Cit: 16.12.2023]
- [26] NUCLEO – F303K8 | arm MBED [online]. [Cit. 16.12.2022]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F303K8/#arduino-nano-compatible-headers>

## **6 Přílohy**

- Příloha A: Ventil ASCO JOUCOMATIC Sentronic Series 601 | datasheet:  
Ventil\_ASCO\_JOUCOMATIC\_Sentronic\_Series\_601-2.pdf
- Příloha B: Aventics proportional valves SentronicD 608 160 111 | datasheet: catalog-series-608-609-sentronic-d-aventics-emea-ap-en-7030190.pdf
- Příloha C: Operační zesilovač OPA 445 | datasheet: opa445.pdf
- Příloha D: Operační zesilovač TS358CD C3G | datasheet: OZ\_TS358CD C3G.pdf
- Příloha E: Zdroj 9V AME10 CJZ | datasheet: Zdroj\_9V\_AME10-CJZ.pdf
- Příloha F: Zdroj 15V RAC20 - 15DK | datasheet: Zdroj\_15V\_RAC20-15DK.pdf
- Příloha G: Zdroj 24V kamn3024 | datasheet: Zdroj\_24V\_kamn3024.pdf
- Příloha H: Tranzistor NPN BC635 40 | datasheet: Transistor\_NPN\_BC635\_40.pdf
- Příloha I: Tlakový senzor RVAQ300GU | datasheet:  
Pressure\_sensor\_RVAQ300GU.pdf
- Příloha J: Stabilizátor napětí 5V L7805CV | datasheet:  
stabilizator\_napeti\_5V\_L7805CV.pdf
- Příloha K: Ventil 302 100 10 – P | datasheet: Asco\_302\_V292\_1\_6.pdf
- Příloha L: Uživatelský manuál STM32 Nucleo-32 boards | datasheet: dm00231744-stm32-nucleo32-boards-mb1180-stmicroelectronics.pdf
- Příloha M: STM32F303FK8 | datasheet: stm32f303k8.pdf
- Příloha N: Ventil 601 00 041 010 713 970 518 | datasheet: Sentronic.pdf
- Příloha O: Ventil 603 000 76 | datasheet: Ventil\_630\_-  
\_ASCO\_JOUCOMATIC\_Piezotronic-1
- Příloha P: Čidlo tlaku SSCDANV 030 PAAA5 SSC Trustability | datasheet:  
Cidlo\_tlaku\_SSCDANV030PAAA5\_SSC-Trustability-en
- Příloha Q: Kompletní schéma zapojení systému | pdf: Kompletni\_schema\_zapojeni.pdf
- Příloha R: Aproximace průběhu tlaku | pdf: Aproximace\_prubehu\_tlaku.pdf
- Příloha S: Fotografie zhotoveného systému | pdf: Zhotoveny\_system.pdf
- Příloha T: Program mikrokontroleru | ZIP: Control\_system
- Příloha U: Program uživatelského rozhraní | ZIP: Control\_Vessel\_Pressure
- Příloha V: Screenshot uživatelského prostředí | PNG:  
Screenshot\_uzivatelskeho\_prostredi
- Příloha W: Měření ventilu 601 (data, grafy, program) | ZIP:  
Ventil\_601\_proporcionalni\_mereni



**CHYBA! V DOKUMENTU NENÍ ŽÁDNÝ TEXT V ZADANÉM STYLU.**

---

Příloha X: Měření ventilu 302 (data, grafy, program) | ZIP: Ventil\_302\_mereni