

**Západočeská univerzita v Plzni**

**Fakulta aplikovaných věd**

**Katedra kybernetiky**

**Řízení kalibračního tunelu tlakových sond**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Plzeň, 2015

Bc. Lukáš Kanta

## PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne: 1. 5. 2015

.....  
*vlastnoruční podpis*

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří přispěli ke vzniku této práce. Především bych chtěl poděkovat svému vedoucímu panu Ing. Jindřichu Liškovi, Ph.D., panu Ing. Janu Jaklovi, Ph.D. a také panu Ing. Kamilu Sedlákovu, Ph.D. za výborné odborné vedení, cenné poznatky, ochotu a trpělivost. Velké poděkování patří také mým rodičům.

## **Anotace**

Diplomová práce se věnuje řízení aerodynamického kalibračního tunelu pro kalibraci pneumatických sond používaného ve společnosti DOOSAN Škoda Power s. r. o. Tyto sondy se v průmyslu běžně používají pro měření proudění páry v turbínách. Za účelem kalibrace pneumatických sond se v rámci této diplomové práce vyvíjí řídicí aplikace, která bude automaticky provádět inicializaci parametrů, řízení otáček kalibračního tunelu, řízení výstupní rychlosti PID regulátorem a monitoring provozních veličin tunelu. Navržená řídicí aplikace bude otestována a získaná data následně vyhodnocena.

## **Klíčová slova**

Aerodynamický kalibrační tunel, pneumatická sonda, kalibrace, identifikace, regulace, LabVIEW, Matlab

## **Annotation**

The diploma thesis deals with control of the aerodynamic calibration tunnel for the calibration of pneumatic probes used by DOOSAN Škoda Power s. r. o. The probes are commonly used in the industry for steam flow measurement in turbines. For calibration of the pneumatic probes, the control application is being developed which consists of automatic parameters initialization, speed control of the calibration tunnel, output rate control with PID controller and monitoring the operation variables of the calibration tunnel. The developed application will be tested and consequently the measured data will be analyzed.

## **Keywords**

Calibration wind tunnel, pneumatic probe, calibration, identification, control, LabVIEW, Matlab

# Obsah

1. Úvod .....	7
2. Teoretická část.....	8
2.1 Problematika kalibrace pneumatických sond .....	8
2.2 Identifikace systémů .....	10
2.2.1 Rekurzivní identifikační metody.....	10
2.3 Syntéza regulátoru .....	13
2.3.1 PID regulátory.....	13
2.3.2 Množina stabilizujících regulátorů.....	14
2.4 Komunikační protokol MODBUS .....	15
3. Praktická část.....	18
3.1 Aerodynamický kalibrační tunel .....	18
3.2 Komunikace s frekvenčním měničem elektromotoru .....	21
3.2.1 Realizace komunikace v LabVIEW .....	21
3.2.2 Komunikační modul FENA-11 .....	24
3.2.3 NI cDAQ-9188 a použité měřicí karty .....	26
3.2.4 Vegamet 624.....	26
3.3 Identifikace modelu kalibračního tunelu.....	28
3.3.1 Naměřená experimentální data .....	28
3.3.2 Použité identifikační metody .....	30
3.4 Syntéza zvoleného typu regulátoru.....	34
3.4.1 Výpočet parametrů regulátoru metodou stabilizujících regulátorů .....	34
3.5 Analýza naměřených dat .....	36
3.6 Řídicí aplikace kalibračního tunelu .....	41
3.6.1 Popis uživatelského rozhraní .....	41
3.6.2 Režim pro řízení otáček.....	45
3.6.3 Režim pro řízení výstupní rychlosti .....	46
3.6.4 Monitorování provozních veličin.....	46
4. Závěr .....	48
5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ .....	49
A    Vnější ložisko ventilátoru SKF 2311K .....	50

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Kalibrační trať, převzato z [1].....	8
Obrázek 2: Model kalibrované pětiotvorové sondy, převzato z [1].....	9
Obrázek 3: Aplikační vrstva ISO/OSI modelu .....	16
Obrázek 4: Struktura rámce vysílaného po sériové lince .....	16
Obrázek 5: Struktura rámce vysílaného po Ethernetu .....	16
Obrázek 6: Ukázka komunikace .....	17
Obrázek 7: Datový model.....	17
Obrázek 8: Kódy funkcí.....	17
Obrázek 9: Zařízení pro kalibraci pneumatických sond .....	18
Obrázek 10: Hlavní části ventilátorů, převzato z [10].....	19
Obrázek 11: 3D model aerodynamického kalibračního tunelu.....	20
Obrázek 12: Ukázka Front panelu.....	21
Obrázek 13: Ukázka Block diagramu.....	22
Obrázek 14: Vytvoření Modbus Master I/O Serveru .....	23
Obrázek 15: Využití sdílených proměnných pro komunikaci .....	23
Obrázek 16: Distributed System Manager.....	24
Obrázek 17: Komunikační modul FENA-11 .....	24
Obrázek 18: Příklad vstupně-výstupního rozhraní.....	25
Obrázek 19: NI cDAQ-9188.....	26
Obrázek 20: Vegamet 624 .....	27
Obrázek 21: Netscanner 9116.....	27
Obrázek 22: Graf otáček elektromotoru .....	28
Obrázek 23: Graf výstupní rychlosti .....	29
Obrázek 24: Statická charakteristika systému .....	30
Obrázek 25: Identifikace pomocí Identification Toolboxu.....	31
Obrázek 26: Vývoj odhadu parametrů pomocí RMNČ.....	32
Obrázek 27: Identifikace pomocí RMNČ.....	33
Obrázek 28: Srovnání výsledků obou identifikačních metod .....	33
Obrázek 29: Přejchodová charakteristika uz. reg. obvodu (simulace) .....	35
Obrázek 30: Průběh PID regulace na aerodynamickém kalibračním tunelu .....	35
Obrázek 31: Graf otáček a výstupní rychlosti.....	36
Obrázek 32: Vývoj teplot motoru, ventilátoru a frek. měniče .....	37
Obrázek 33: Spektrogram signálu s viditelnou vlastní frekvencí .....	37
Obrázek 35: Spektrogram vibračního signálu při provozu elektromotoru na 50 Hz .....	39
Obrázek 36: Zobrazení frekvenčních komponent měřeného vibračního signálu.....	40
Obrázek 37: Řídicí aplikace aerodynamického kalibračního tunelu .....	41
Obrázek 38: Informační panel aplikace.....	42
Obrázek 39: Řídicí panel aplikace.....	43
Obrázek 40: Výstup z kontrakční dýzy .....	44
Obrázek 41: Monitorovací panel aplikace .....	44
Obrázek 42: Řízení otáček kalibračního tunelu .....	45
Obrázek 43: Nájezd tunelu po S-křivce.....	45

Obrázek 44: Řízení výstupní rychlosti kalibračního tunelu.....	46
Obrázek 45: Monitorování provozních veličin kalibračního tunelu .....	47

# 1. ÚVOD

Dnešní svět bez elektrické energie si již snad nelze představit, a proto je energetický průmysl významnou oblastí, které je věnována značná pozornost v oblasti výzkumu a vývoje. Snahou je získávat elektřinu z mnoha zdrojů, přičemž dnes nejvyužívanějšími jsou tepelné, jaderné, plynové, fotovoltaické, vodní a další. Některé z těchto zdrojů jsou však neobnovitelné, proto je třeba stále hledat nové způsoby získávání elektrické energie nebo zdokonalovat ty současné.

Zařízení sloužící pro výrobu elektrické energie si jsou velmi podobné, protože se nejčastěji jedná o turbínu a k ní příslušné součásti. Turbína je složité soustrojí, které v závislosti na své účinnosti rozhoduje o efektivitě výroby elektrické energie, a proto je velmi důležité stále zdokonalovat všechny její části. Právě toho se snaží docílit ve společnosti **DOOSAN Škoda Power s.r.o.**, která má více než stoletou tradici ve výrobě parních turbín a zároveň je zadavatelem této diplomové práce.

Součástí této společnosti je **Research and Development Center (R&D)** se svou experimentální laboratoří, kde je pozornost věnována mimo jiné problematice efektivního usměrnění proudění páry v turbíně za účelem zvýšení její účinnosti. Výkony v současnosti vyráběných turbín se pohybují v řádu stovek megawattů, a proto zvýšení účinnosti i jen o několik desetin procenta má velký vliv na množství vyrobené elektrické energie. Proudění páry v turbínách je velmi složitý děj, který lze zaznamenat pomocí speciálních pneumatických sond, z nichž nejpoužívanější jsou pětiočtové sondy. Nespornou výhodou těchto sond je, že dokáží proudění páry zaznamenat ve třech dimenzích [1], ale musejí být před měřením zkalibrovány ve speciálním kalibračním tunelu. Výsledkem kalibrace jsou kalibrační křivky, ze kterých lze pak vycházet při samotném měření.

Kalibraci lze již v současné době provádět automaticky, což má za následek výrazné snížení celkové doby kalibrace, možnost automatického vyrovnání pneumatické sondy do proudu vzduchu a zvýšení přesnosti výsledných kalibračních rovnic. [8] Vlastní doba kalibrace může být až několik hodin v závislosti na rychlosti výstupního proudu vzduchu, velikosti sondy, počtu měřicích bodů, atd. Vlastní kalibrace pneumatických sond se provádí v aerodynamickém kalibračním tunelu, kde na základě velikosti otáček motoru lze ovlivnit rychlost proudícího vzduchu na výstupu z tunelu.

Jedním z cílů této diplomové práce je navrhnout uživatelsky příjemnou aplikaci, pomocí které bude možné najíždět s elektromotorem kalibračního tunelu na takové otáčky, při kterých bude zajištěna požadovaná výstupní rychlost proudícího vzduchu nutná pro následnou kalibraci pneumatických sond. Pomocí této aplikace by měl být uživatel schopen nastavovat provozní parametry frekvenčního měniče elektromotoru, bezpečně ovládat samotný běh elektromotoru a monitorovat nejdůležitější provozní veličiny aerodynamického kalibračního tunelu.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

V teoretické části bude postupně popsána problematika kalibrace pneumatických sond, dále experimentální identifikace systémů na základě naměřených dat, poté syntéza regulátoru metodou stabilizujících regulátorů a nakonec komunikační protokol Modbus.

### 2.1 Problematika kalibrace pneumatických sond

V této části práce bude popsán proces kalibrace pětiotvorové sondy, která byla prováděna na kalibračním tunelu v laboratořích Katedry energetických strojů a zařízení Západočeské univerzity v Plzni. Dále bude stručně popsána použitá kalibrační trať a metodika kalibrace. [1]

#### Popis kalibrační trati

Kalibrační trať je složena z motoru, ventilátoru, potrubí, kontrakční dýzy a natáčecího zařízení, což je zobrazeno na obrázku 1 níže. Díky škrtkovému ventilu v sání ventilátoru je možné regulovat množství nasávaného vzduchu a tedy i výstupní rychlost vzduchu z dýzy. Na tomto kalibračním tunelu bylo možné nastavovat výstupní rychlost v rozsahu 20 – 120 m/s, která byla měřena prostřednictvím referenční Prandtlovy sondy. Natáčení kalibrované pětiotvorové sondy je realizováno pomocí dvou krokových motorů, které umožňují rotaci sondy ve dvou na sebe kolmých osách.



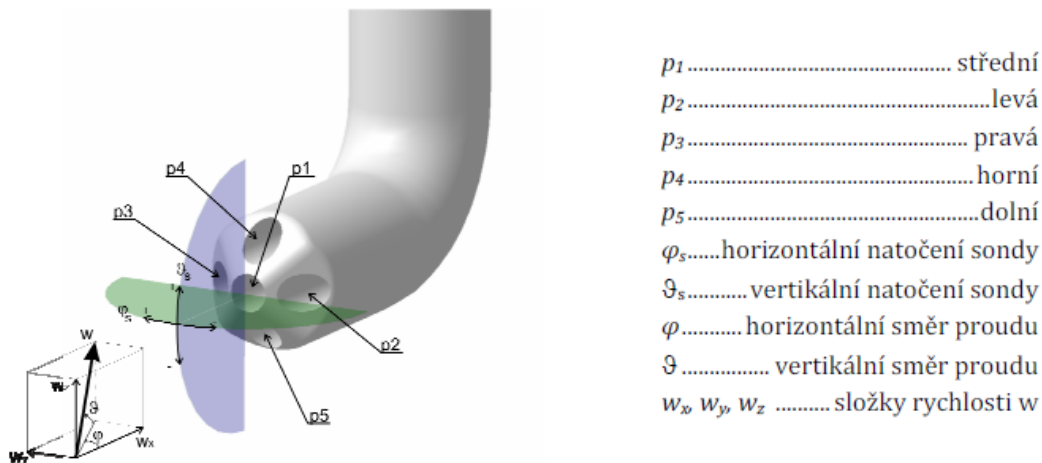
Obrázek 1: Kalibrační trať, převzato z [1]

#### Metodika kalibrace

Kalibrace byla provedena pro tzv. nenulovací režim měření sondou. To znamená, že při měření není nutné sondou natáčet do proudu vzduchu a veličiny jako celkový tlak, statický tlak, modul rychlosti proudění a jeho směr se počítají pomocí bezrozměrných kalibračních koeficientů. Výhodou nenulovacího režimu je úspora času nutného pro natáčení sondy do proudu vzduchu. [1]



Na následujícím obrázku 2 je znázorněn model kalibrované pětiovorové sondy. Úhly natočení sondy při kalibraci jsou shodné s úhly proudu vzduchu. Před vlastní kalibrací byla sonda ještě ustavena tak, že její vertikální osa je kolmá k proudu vzduchu a v horizontální rovině tlaky  $p_2$  a  $p_3$  jsou shodné.



Obrázek 2: Model kalibrované pětiovorové sondy, převzato z [1]

Při vlastní kalibraci je nutné traverzovat sondou v obou směrech, tzn. měnit se zvoleným krokem úhly  $\vartheta_s$  a  $\varphi_s$  a pomocí natáčecího zařízení odměřovat jednotlivé hodnoty tlaků, ze kterých lze následně spočítat následující kalibrační koeficienty

$$C_p^{STAT} = \frac{p_1 - p_s^{ref}}{p_1 - p}, \quad C_p^{TOTAL} = \frac{p_1 - p_c^{ref}}{p_1 - p}, \quad (1)$$

$$C_p^{PHI} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p}, \quad C_p^{THETA} = \frac{p_4 - p_5}{p_1 - p}, \quad (2)$$

$$p = \frac{1}{4}(p_2 + p_3 + p_4 + p_5), \quad (3)$$

kde  $p$  udává průměrný tlak,  $p_c^{ref}$  celkový referenční tlak a  $p_s^{ref}$  statický referenční tlak. Na základě těchto kalibračních koeficientů lze odvodit pro zvolený typ regresní rovnice její koeficienty a určit parametry proudícího média. Vypočtené hodnoty kalibrace jsou platné vždy pro zvolený rozsah úhlů  $\vartheta$  a  $\varphi$ , při měření by tedy nemělo nikdy dojít k extrapolaci mimo kalibrovanou oblast. Rychlost proudění  $w$  lze vypočítat na základě následujících vztahů

$$p_s = p_1 - C_p^{STAT} \cdot (p_1 - p), \quad p_c = p_1 - C_p^{TOTAL} \cdot (p_1 - p), \quad (4)$$

$$w = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho_{vz}}}, \quad (5)$$

kde  $\rho_{vz}$  obecně představuje místní měrnou hmotnost proudícího média. [1]

## 2.2 Identifikace systémů

Identifikace systému je proces, který se zabývá hledáním vhodného modelu systému na základě naměřených experimentálních dat. Obecně můžeme identifikaci dělit na jednorázovou (off line) a rekurzivní (on line). Jednorázová identifikace je charakteristická tím, že všechna data musí být nejdříve naměřena a následně najednou také zpracována.

### 2.2.1 Rekurzivní identifikační metody

Rekurzivní identifikace je charakteristická tím, že probíhá průběžně v čase a odhadované parametry modelu jsou počítány rekurzivně. Tvoří centrální část adaptivních systémů, kde je rekurzivní identifikace použita k automatickému řízení nebo zpracování signálu. Nároky na paměť jsou v tomto případě menší než v případě jednorázové identifikace.

#### 2.2.1.1 ARMAX model systému

Výsledkem identifikace jsou odhadnuté parametry modelu systému, jehož strukturu bylo nutné předem zvolit. Obecný lineární model má podobu ARMAX struktury, která je vyjádřena ve tvaru

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t), \quad (6)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na}, \quad (7)$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb}, \quad (8)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc}. \quad (9)$$

Symbol  $q^{-1}$  představuje operátor zpětného posuvu,  $y(t)$  je  $ny$  dimenzionální výstup v čase  $t$ ,  $u(t)$  je  $nu$  dimenzionální vstup v čase  $t$  a  $e(t)$  je bílý šum s nulovou střední hodnotou a variancí  $\Lambda$ . Další informace o této struktuře a dalších speciálních případech jsou uvedeny v publikaci [7].

V tomto případě je vektor neznámých odhadovaných parametrů dán ve tvaru

$$\theta = [a_1 \dots a_{na}, b_1 \dots b_{nb}, c_1 \dots c_{nc}]^T. \quad (10)$$

### 2.2.1.2 Rekurzivní metoda nejmenších čtverců

Základní metodou pro rekurzivní odhad parametrů modelu systému je rekurzivní metoda nejmenších čtverců, která je založena na minimalizaci kritéria ve tvaru

$$V_t(\theta) = \sum_{s=1}^t [y(s) - \varphi^T(s)\theta]^2 \alpha_s, \quad (11)$$

kde  $\alpha_s$  je váhový koeficient a  $\varphi(s)$  vektor regresorů. Pokud budeme uvažovat ARX strukturu modelu ve tvaru

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + e(t), \quad (12)$$

bude mít vektor regresorů podobu

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-na), u(t-1) \dots u(t-nb)]^T. \quad (13)$$

Rekurzivní odhad neznámých parametrů  $\theta$  má poté následující podobu

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + L(t)\varepsilon(t), \quad (14)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1), \quad (15)$$

$$L(t) = \frac{P(t-1)\varphi(t)}{\frac{1}{\alpha_t} + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}, \quad (16)$$

$$P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{\frac{1}{\alpha_t} + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}. \quad (17)$$

Je nutné poznamenat, že  $\varepsilon(t)$  představuje chybu predikce a vektor  $L(t)$  je zisk, který ukazuje, jak bude chyba predikce modifikována v závislosti na jednotlivých prvcích vektoru parametrů.

Pro použití předchozího algoritmu rekurzivní metody nejmenších čtverců je nutné stanovit počáteční podmínky pro počáteční odhad  $\theta(0)$  a důvěru v tento odhad  $P(0)$ . V případě, kdy nemáme apriorní informace o neznámých parametrech, volíme

$$\theta(0) = 0, \quad (18)$$

$$P(0) = \rho I, \quad (19)$$

kde  $\rho$  představuje libovolné nenulové kladné číslo. Čím větší hodnotu  $\rho$  zvolíme, tím menší důvěru máme v počáteční odhad  $\theta(0)$ .

### 2.2.1.3 Rekurzivní metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním

Modifikací předchozí rekurzivní metody nejmenších čtverců lze získat algoritmus, který bude exponenciálně zapomínat předchozí vstupní hodnoty. Tento algoritmus se využívá v případě, kdy se předpokládá pomalá změna parametrů (parametry již nejsou uvažovány jako konstantní) a proto předchozím vstupním hodnotám je přiřazena menší vypovídací schopnost o aktuální hodnotě odhadovaných parametrů.

Toho je docíleno vhodnou volbou koeficientu  $\alpha_s$

$$\alpha_s = \lambda^{t-s}, \quad (20)$$

kde  $\lambda$  je faktor zapomínání předchozích vstupních hodnot menší nebo roven jedné. Obecně lze říci, že čím je  $\lambda$  menší, tím rychlejší je zapomínání. Pokud by  $\lambda$  bylo rovno jedné, jedná se o rekurzivní metodu nejmenších čtverců. Algoritmus rekurzivních nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním má tedy následující podobu

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + L(t)\varepsilon(t), \quad (21)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1), \quad (22)$$

$$L(t) = \frac{P(t-1)\varphi(t)}{\lambda + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}, \quad (23)$$

$$P(t) = \left\{ P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)P(t-1)}{1 + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \right\} / \lambda. \quad (24)$$

## 2.3 Syntéza regulátoru

Tato část se bude věnovat obecnému popisu PID regulátorů a vybrané metodě návrhu jejich parametrů. Pomocí těchto regulátorů s vhodně nastavenými parametry lze docílit požadovaného tvaru uzavřené regulační smyčky aerodynamického kalibračního tunelu.

### 2.3.1 PID regulátory

PID regulátory patří do skupiny dynamických regulátorů, které jsou popsány dynamickým modelem, pomocí kterého lze ovlivnit polohu pólů a stabilních nul v přenosu uzavřené regulační smyčky. Řízení  $u(t)$  je generováno v závislosti na regulační odchylce  $e(t) = w(t) - y(t)$ , kde  $w(t)$  představuje referenční signál,  $y(t)$  aktuální hodnotu regulované veličiny a zároveň je řízení složeno z proporcionalní, integrační a derivační složky [9]

$$u(t) = K \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (25)$$

kde  $K$  je proporcionalní zesílení,  $T_I$  je integrační časová konstanta a  $T_D$  je derivační časová konstanta. Po následné aplikaci Laplaceovy transformace dostaneme přenos ideálního spojitého PID regulátoru

$$F_R(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K \left[ 1 + \frac{1}{T_I p} + T_D p \right] = K + \frac{K_I}{p} + K_D p = \frac{K_D p^2 + K p + K_I}{p} = \frac{d(p)}{c(p)}, \quad (26)$$

kde  $K_I = K/T_I$ ,  $K_D = K T_D$ . V praxi je však realizace „čisté“ derivační složky obtížná, neboť nastává problém s fyzikální realizací a s nadměrným kmitáním řízení při zatížení výstupu systému vysokofrekvenční poruchou. Tyto prudké změny řízení ovlivňují životnost akčních členů. Proto se běžně v praxi používá PID regulátor s filtrovanou (aproximativní) derivací

$$F_R(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K + \frac{K_I}{p} + \frac{K_D p}{\tau p + 1} = \frac{(K_D + K \tau) p^2 + (K + K_I \tau) p + K_I}{p(\tau p + 1)} = \frac{d(p)}{c(p)}, \quad (27)$$

kde  $\tau$  je malá volená časová konstanta  $\tau = T_D/(3 \div 20)$ . Přenos uzavřené regulační smyčky při použití PID regulátoru s filtrovanou aproximativní derivací a řízeného systému

$$F_S(p) = \frac{b(p)}{a(p)}, \quad (28)$$

bude mít tvar

$$F_{y,w}(p) = \frac{F_O(p)}{1 + F_O(p)} = \frac{\frac{b(p)}{a(p)} \left[ K + \frac{K_I}{p} + \frac{K_D p}{\tau p + 1} \right]}{1 + \frac{b(p)}{a(p)} \left[ K + \frac{K_I}{p} + \frac{K_D p}{\tau p + 1} \right]} = \dots = \frac{b(p)d(p)}{a(p)c(p) + b(p)d(p)}. \quad (29)$$

### 2.3.2 Množina stabilizujících regulátorů

Pro návrh parametrů regulátoru využívajících pro návrh inverzního modelu řízeného systému lze použít metodu založenou na množině stabilizujících regulátorů známou též pod názvem afinní parametrizace. Díky této metodě lze přesně specifikovat vlastnosti uzavřeného regulačního obvodu, jako například požadovanou dobu regulace na zvolenou referenční hodnotu a maximální přeregulování.

Metoda je založena nejprve na specifikaci přímovazebního regulačního obvodu, pro který platí

$$F_{y,w}(p) = F_S(p)R(p) \quad (30)$$

a kde  $R(p)$  představuje přímovazební regulátor s ryzí přenosovou funkcí, čímž zaručíme stabilitu uzavřeného regulačního obvodu. Přímovazební regulátor představuje aproximativní inverzi přenosu systému

$$R(p) = F_Q(p)[F_S(p)]^{-1}, \quad (31)$$

kde  $F_Q(p)$  představuje tvarovací filtr s volnými parametry, díky kterému docílíme požadovaného tvaru uzavřeného regulačního obvodu, neboť

$$F_{y,w}(p) = F_S(p)R(p) = F_Q(p). \quad (32)$$

Dále je nutné specifikovat zpětnovazební regulační obvod, pro který platí

$$F_{y,w}(p) = \frac{F_S(p)F_R(p)}{1 + F_S(p)F_R(p)}. \quad (33)$$

Pokud porovnáme přenosy  $F_{y,w}(p)$  přímovazebního a zpětnovazebního regulačního obvodu, dostaneme následující vztahy pro přímovazební a zpětnovazební regulátor

$$R(p) = \frac{F_R(p)}{1 + F_S(p)F_R(p)}, \quad (34)$$

$$F_R(p) = \frac{R(p)}{1 - F_S(p)R(p)}. \quad (35)$$

Hledaný zpětnovazební regulátor  $F_R(p)$  je tedy parametrizovaný přímovazebním regulátorem  $R(p)$ , díky kterému je jasně definována parametrizovaná množina všech zpětnovazebních stabilizujících regulátorů  $F_R(p)$  pro stabilní systém  $F_S(p)$  a také je zaručena vnitřní stabilita zpětnovazebního regulačního obvodu.

## 2.4 Komunikační protokol MODBUS

### Popis protokolu

Modbus je otevřený komunikační protokol uvedený na trh roku 1979 firmou Modicon. V současné době se používá pro vzájemnou komunikaci různých typů zařízení, jako například PLC (Programmable Logic Controller), dotykové displeje, I/O zařízení a jiné. Původně však Modbus sloužil pro komunikaci s Modicon PLC po sériové lince RS232 nebo RS485 a podrobně je popsán v publikacích [2], [3] a [4].

V průmyslu je Modbus používán z následujících důvodů:

- Otevřenost, publikovatelnost a dostupnost bez poplatků
- Implementovatelnost během krátké doby
- Komunikace Master/Slave pomocí bitů a wordů (16 bitů) bez omezení na výrobce

V současnosti existují 3 základní verze protokolu Modbus – Modbus RTU, Modbus ASCII a Modbus TCP (Modbus over TCP/IP):

- **Modbus RTU** (Remote Terminal Unit)  
Binární verze protokolu, kde na konci příkazu je CRC (cyclic redundancy check).
- **Modbus ASCII** (American Standard Code for Information Interchange)  
Textově srozumitelná verze protokolu, kde na konci příkazu je LRC (longitudinal redundancy check).
- **Modbus TCP** (Transmission Control Protocol)  
Verze protokolu, která pakety posílá uvnitř datagramů IP. Na rozdíl od předchozích dvou verzí komunikujících po sériové lince, Modbus TCP je založen na komunikaci přes Ethernet.

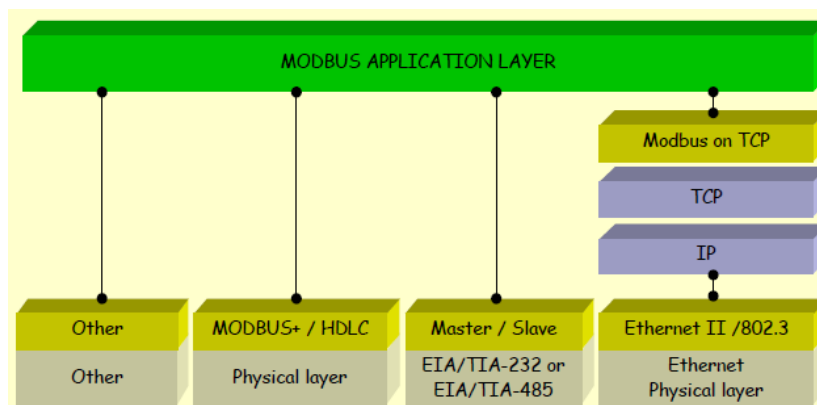
Komunikační protokol Modbus má i několik nedostatků, které plynou z omezení kladených na PLC na konci 70. let minulého století:

- Podpora pouze 1bitových a 16bitových proměnných (wordů)
- Maximální počet zařízení na lince je 254
- Nepodporuje velké bloky binárních dat (například pro stažení konfigurace)
- Díky architektuře Master/Slave nemůže zařízení (Slave) oznámit výjimku z vlastní iniciativy.

Na sběrnici je tedy jedno (v případě Modbus TCP možno i více) Master zařízení (řídící zařízení, například PLC nebo průmyslové PC) posílající dotazy na Slave zařízení (ovládané a sledované prvky, například čidla, měřicí přístroje a jiné), které na tyto dotazy odpovídá.

## ISO/OSI model

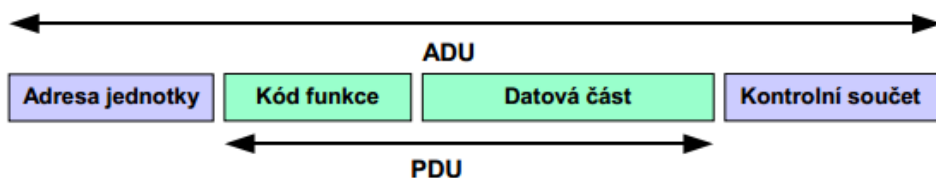
Modbus je komunikační protokol fungující na aplikační vrstvě ISO/OSI modelu, což je znázorněno na obrázku 3. Jedná se o typ protokolu na bázi požadavek/odpověď (request/reply) a všechny jeho služby se specifikují pomocí funkčních kódů (function codes). V rámci ISO/OSI modelu je po různých typech sítí realizována architektura klient/server.



Obrázek 3: Aplikační vrstva ISO/OSI modelu

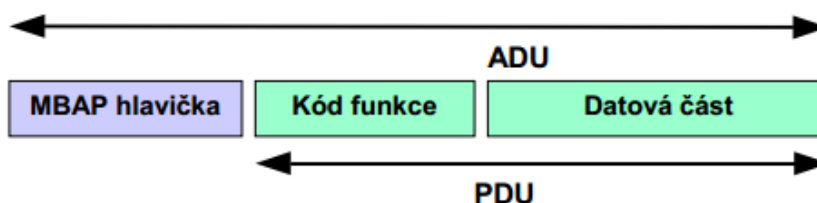
## Struktura rámce

Struktura rámce je definována na úrovni protokolu PDU (Protocol Data Unit) nezávisle na typu komunikační vrstvy. Podle typu sítě, na které je protokol používán, je PDU rozšířen o další části a vytváří ADU (Application Data Unit), což je znázorněno na obrázcích 4 a 5.



Obrázek 4: Struktura rámce vysílaného po sériové lince

Kód funkce je volen klientem pro provedení požadované akce a jedná se o 1 bajt v rozsahu 1 až 255. Data obsahují další dodatečnou informaci pro daný kód funkce zadaný klientem, například adresu registru, počet zpracovávaných položek, atd.



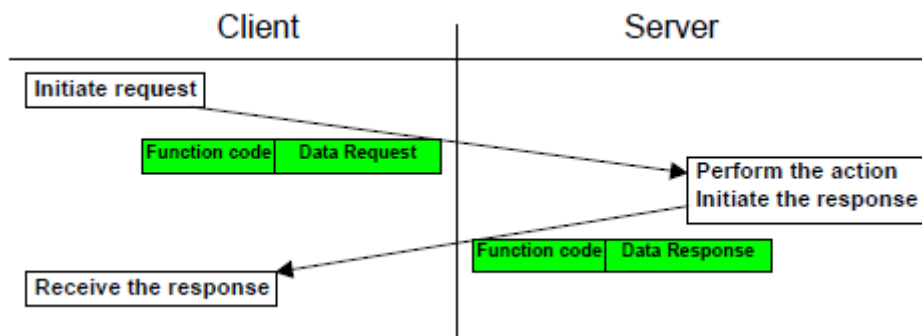
Obrázek 5: Struktura rámce vysílaného po Ethernetu

V rámci protokolu Modbus TCP tvoří ADU tzv. MBAP hlavička (MODBUS Application Protocol Header). Pro přenos Modbus TCP ADU je na TCP vyhrazen registrovaný port 502.



## Zpracování transakce

Příklad komunikace pomocí protokolu Modbus je zobrazen na obrázku 6. Klient provede inicializaci požadavku a tento požadavek vyšle na server, který požadavek přijme a provede příslušnou akci. Pokud tato akce bude v pořádku vykonána, připraví server odpověď se stejným kódem funkce, jaký předtím obdržel od klienta a tuto odpověď odešle zpět klientovi.



Obrázek 6: Ukázka komunikace

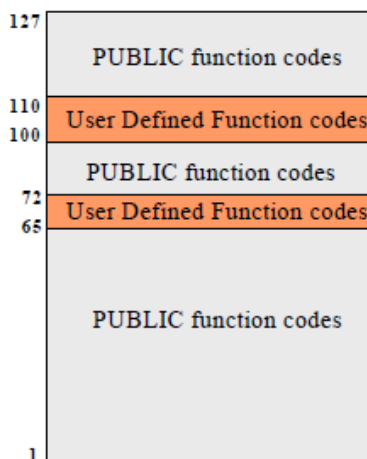
## Datový model a kategorie kódů funkcí

Datový model protokolu Modbus je určen 1bitovými a 16bitovými (word) veličinami, které jsou uvedeny v tabulce na obrázku 7. Pro každou tabulku (Primary tables) Modbus dovoluje až 65 536 hodnot.

Primary tables	Object type	Type of	Comments
Discretes Input	Single bit	Read-Only	This type of data can be provided by an I/O system.
Coils	Single bit	Read-Write	This type of data can be alterable by an application program.
Input Registers	16-bit word	Read-Only	This type of data can be provided by an I/O system
Holding Registers	16-bit word	Read-Write	This type of data can be alterable by an application program.

Obrázek 7: Datový model

Na následujícím obrázku 8 jsou zobrazeny jednotlivé kategorie funkčních kódů používané protokolem Modbus. Jedná se o veřejné kódy funkcí, které jsou veřejně dostupné a zdokumentované a o uživatelsky definované kódy funkcí, které si může uživatel sám zvolit a implementovat.



Obrázek 8: Kódy funkcí

### 3. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části bude popsán aerodynamický tunel pro kalibraci pneumatických sond, poté komunikace s frekvenčním měničem řídícím elektromotor kalibračního tunelu, dále experimentální identifikace modelu kalibračního tunelu a následný návrh vhodného typu regulátoru. Nakonec bude provedena analýza naměřených provozních dat a popsána řídicí aplikace aerodynamického kalibračního tunelu.

#### 3.1 Aerodynamický kalibrační tunel

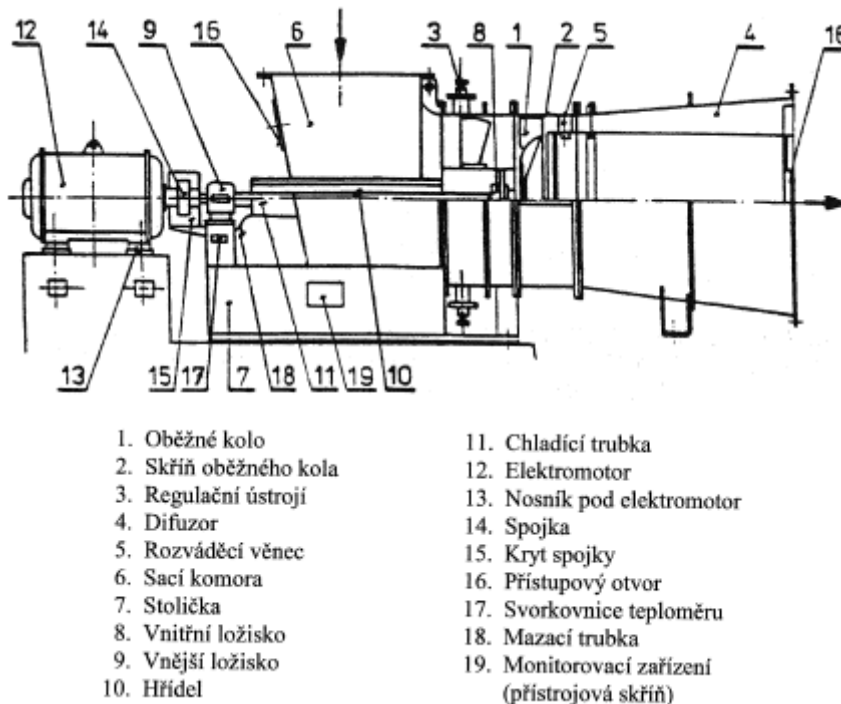
Na následujícím obrázku 9 je ukázáno kalibrační zařízení umístěné v laboratoři Research & Development Center společnosti DOOSAN Škoda Power s. r. o. v Plzni.



Obrázek 9: Zařízení pro kalibraci pneumatických sond

Celé kalibrační zařízení se skládá z axiálního rovnotlakého ventilátoru ARK 800 vyrobeného firmou ZVVZ Machinery, a.s., tedy z difuzoru, kompenzátoru, voštin, soustavy turbulizačních sítí a z kontrakční dýzy. K pohonu ventilátoru je využit elektromotor HG IE2 315L1-2 firmy CAG Electric Machinery s. r. o. o výkonu 160kW a pro jeho ovládání frekvenční měnič ACS 880 dodaný firmou ABB.

Ventilátory tohoto typu jsou určeny pro elektrárenské a průmyslové provozy. Nejvíce se používají u parních kotlů pro dmýchání vzduchu do spalovací komory a odsávání kouřových plynů. Využití nacházejí také v jiných provozech pro dopravu vzduchu a horkých plynů. Obecné schéma těchto ventilátorů je uvedeno na následujícím obrázku 10.

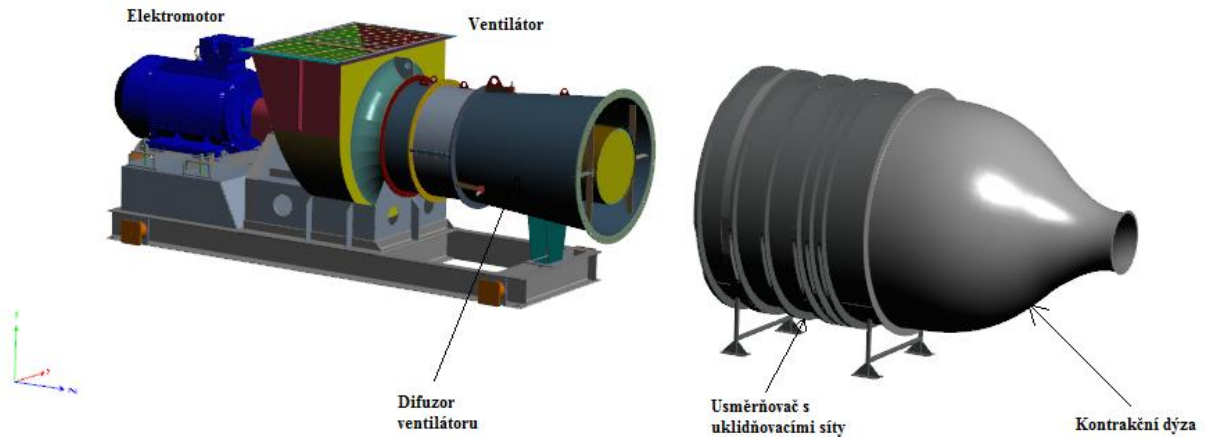


Obrázek 10: Hlavní části ventilátorů, převzato z [10]

Oběžné kolo a rozváděcí věnec jsou uloženy ve společné dělené skříni [10]. V tomto provedení ventilátoru je použito celkem 27 rozváděčích a 19 oběžných lopatek pro nasátí vzdušiny a stlačení na požadované parametry. Maximální rychlost výstupního proudu vzduchu u tohoto provedení tunelu je  $84 \text{ m/s}$ . Vnější naklápěcí kuličkové ložisko ventilátoru typu SKF 2311K uvedené v příloze je umístěno na kozlíku stoličky ventilátoru, zachycuje převážně axiální síly a je uloženo pevně. Vnitřní přírubové ložisko typu SKF 22310W 22JC3 ventilátoru umístěné v jádru regulačního ústrojí zachycuje radiální síly, je uloženo posuvně a je chlazeno vzduchem přísávaným chladicí trubkou podél hřídele ventilátoru. Vnější i vnitřní ložisko jsou vybaveny odporovými snímači teploty Pt100 pro provozní měření teploty obou ložisek. K pohonu ventilátoru je použit elektromotor spojený s ventilátorem pružnou kotoučovou spojkou, která je opatřena ochranným krytem. Rotor elektromotoru je uložěn v jednořadých kuličkových ložiskách SKF 6317.

Při teplotě okolí kolem  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  se provozní teploty ložisek pohybují kolem  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Doporučená hranice pro signalizaci zvýšené teploty je  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , pro blokování chodu ventilátoru pak  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  dle manuálu k ventilátoru ARK 800 [10].

Na následujícím obrázku 11 je zobrazen 3D model aerodynamického kalibračního tunelu včetně usměrňovače s voštinou a turbulizačními sítě, které mají za úkol homogenizovat rychlostní pole a potlačit příčné a podélné fluktuace rychlosti.



Obrázek 11: 3D model aerodynamického kalibračního tunelu

Poslední část ventilátoru představuje kontrakční dýza s výstupním kruhovým průřezem o průměru 0,4m, která plynule navazuje na usměrňovač ventilátoru. Hlavním úkolem kontrakční dýzy je potlačit fluktuace rychlosti v podélném směru a vytvořit na výstupu obdélníkový rychlostní profil s kuželovým potenciálním jádrem.

## 3.2 Komunikace s frekvenčním měničem elektromotoru

V této části bude popsán zvolený způsob komunikace s frekvenčním měničem, který řídí elektromotor kalibračního tunelu, včetně softwarových nástrojů použitých k realizaci.

### 3.2.1 Realizace komunikace v LabVIEW

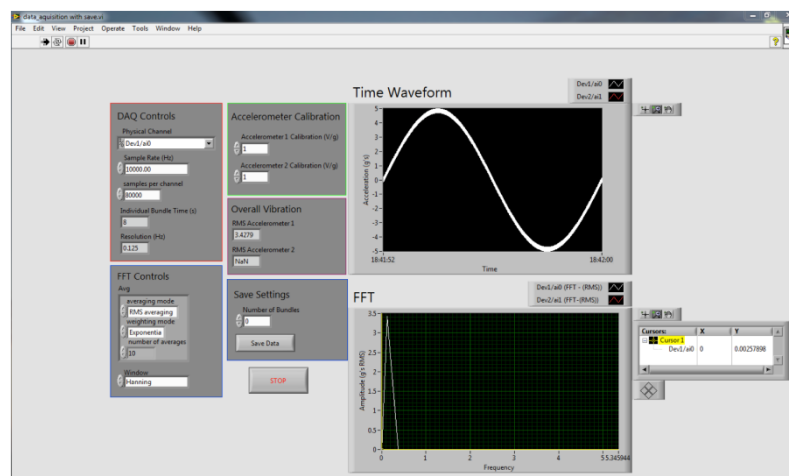
#### Popis vývojového prostředí

Vývojové prostředí LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) je produktem firmy National Instruments. Tato firma je jedním z největších výrobců v oblasti virtuální instrumentace, technické disciplíny, která zažívá veliký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu.

LabVIEW, někdy označované též jako G-jazyk („grafický“ jazyk), je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů, ale také k programování složitých systémů. Uživatelská prostředí programů, které byly vytvořeny v LabVIEW, se často velmi podobají skutečným měřicím přístrojům. To je důvod, proč jsou programy obecně známé jako virtuální přístroje (Virtual Instruments) a proto se také používá zkratka VI. Detailnější informace lze nalézt v [5].

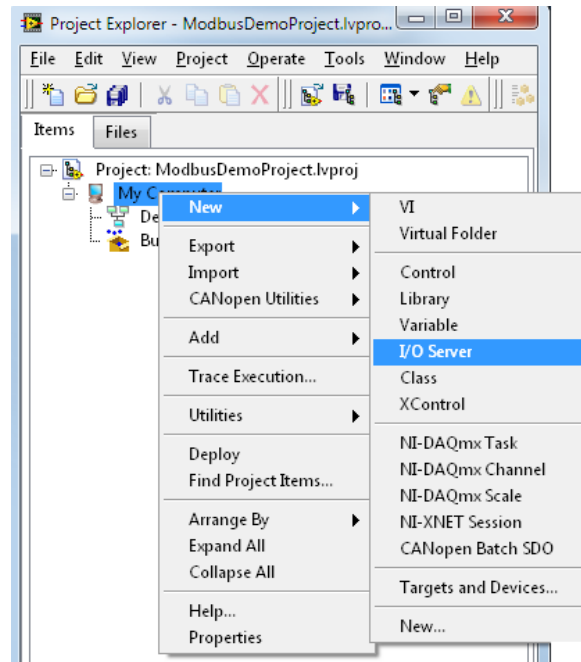
Prostředí LabVIEW se skládá ze tří základních částí:

- **Project Explorer**  
Používá se pro organizaci jednotlivých částí projektu, jako například souborů, složek, knihoven, VIs a připojených zařízení.
- **Front panel**  
Tento panel se používá pro komunikaci mezi uživatelem a řídicí aplikací. Díky tomuto panelu má uživatel aktuální informace o stavu řízeného procesu v grafické podobě.



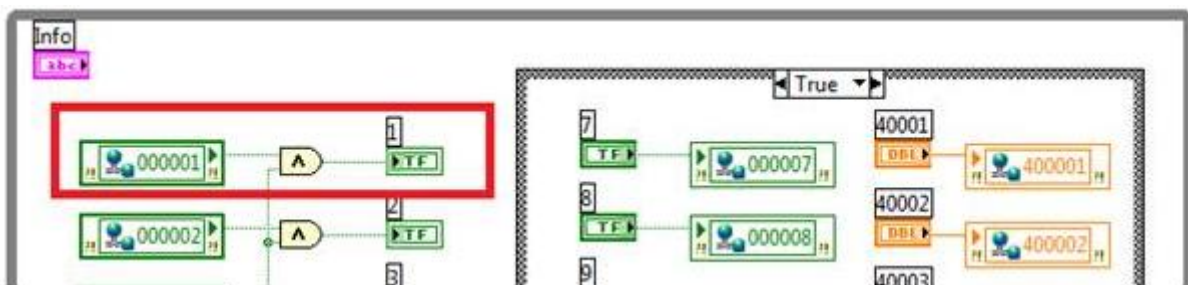
Obrázek 12: Ukázka Front panelu





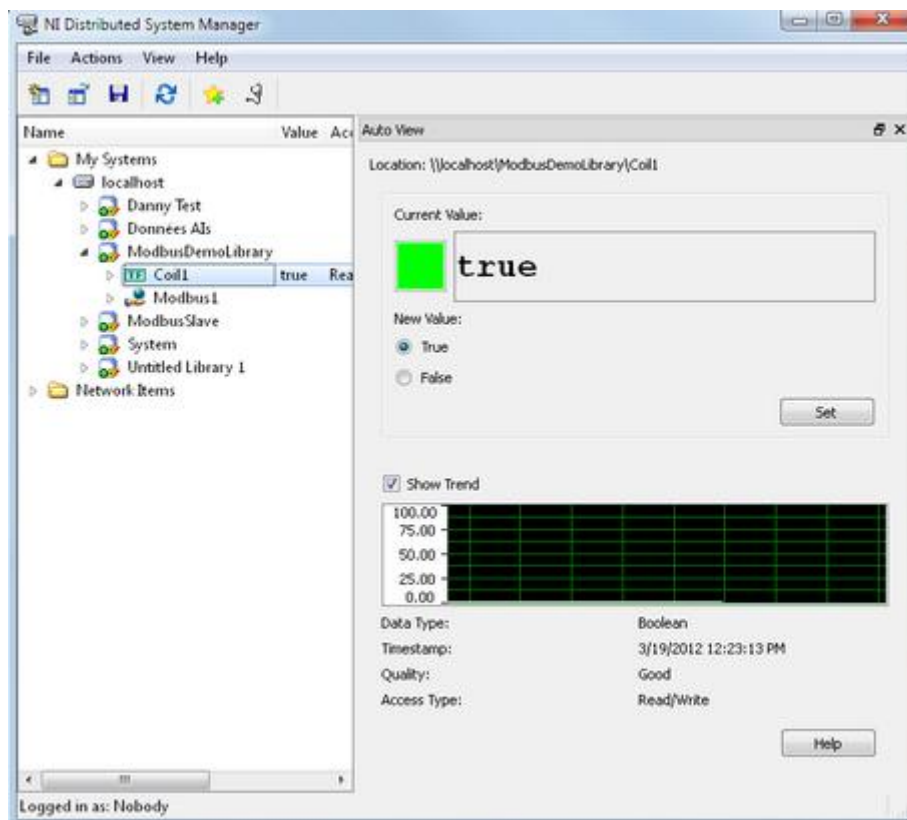
Obrázek 14: Vytvoření Modbus Master I/O Serveru

Pro přístup a sdílení dat v LabVIEW, které jsou obsaženy na jednotlivých adresách Modbus Master I/O Serveru, se využívají takzvané sdílené proměnné (Shared Variables). Díky nim lze získat informace z frekvenčního měniče a zároveň i odesílat požadavky opačným směrem. Příklad takové komunikace je zobrazen na obrázku 15.



Obrázek 15: Využití sdílených proměnných pro komunikaci

Pro správu všech vytvořených sdílených proměnných v LabVIEW lze využít kromě Project Exploreru také takzvaný Distributed System Manager, ve kterém jsou vždy vidět aktuální hodnoty sdílených proměnných. Je možné zobrazit časové průběhy těchto proměnných, měnit jejich vlastnosti a v případě, že se konkrétní sdílená proměnná používá pro zápis dat do frekvenčního měniče, lze změnit i její aktuální hodnotu. Příklad použití tohoto nástroje je na obrázku 16.



Obrázek 16: Distributed System Manager

### 3.2.2 Komunikační modul FENA-11

#### Popis

FENA-11 (F-Series Ethernet Network Adapter) je komunikační modul firmy ABB znázorněný na obrázku 17, který je možné připojit do různých typů frekvenčních měničů (například ACS 880).



Obrázek 17: Komunikační modul FENA-11



Modul je kompatibilní s ethernetovými standardy IEEE 802.3 a IEEE 802.3u a proto ho lze využít pro komunikaci s využitím různých protokolů, jako například Modbus/TCP, EtherNet/IP a Profinet. Modul FENA-11 se tedy nejčastěji používá pro zprostředkování komunikace mezi řídicí aplikací a frekvenčním měničem, což se lze dočíst v [6].

### Navázání komunikace

Jako komunikační protokol byl vybrán Modbus/TCP, který je v současné době jedním z nejpoužívanějších komunikačních protokolů v průmyslu. Požadavky jsou přes modul FENA-11 do frekvenčního měniče zasílány v podobě Control words a frekvenční měnič odpovídá nazpět pomocí Status words. Příklad takovéto komunikace společně s dalšími zvolenými vstupy a výstupy (včetně použitých registrů protokolu Modbus) je znázorněn na obrázku 18.

Output data	Modbus register	Input data	Modbus register
Control word	(4)00001	Status word	(4)00051
Speed reference	(4)00002	Speed actual value	(4)00052
Reference 2 (Not used)	(4)00003	Actual value 2 (Not used)	(4)00053
Constant speed 1 <sup>1)</sup>	(4)00004 (4)00005	Power <sup>1)</sup>	(4)00054 (4)00055
Constant speed 2 <sup>1)</sup>	(4)00006 (4)00007	DC bus voltage <sup>1)</sup>	(4)00056 (4)00057

Obrázek 18: Příklad vstupně-výstupního rozhraní

Control words a Status words jsou datové typy definované jako 16 bit Integer, jejich rozsah je tedy -32768 až 32767. Pro příklad znázorněný na obrázku 18 mohou být jako Control words, které uvedou do chodu frekvenční měnič, použity následující:

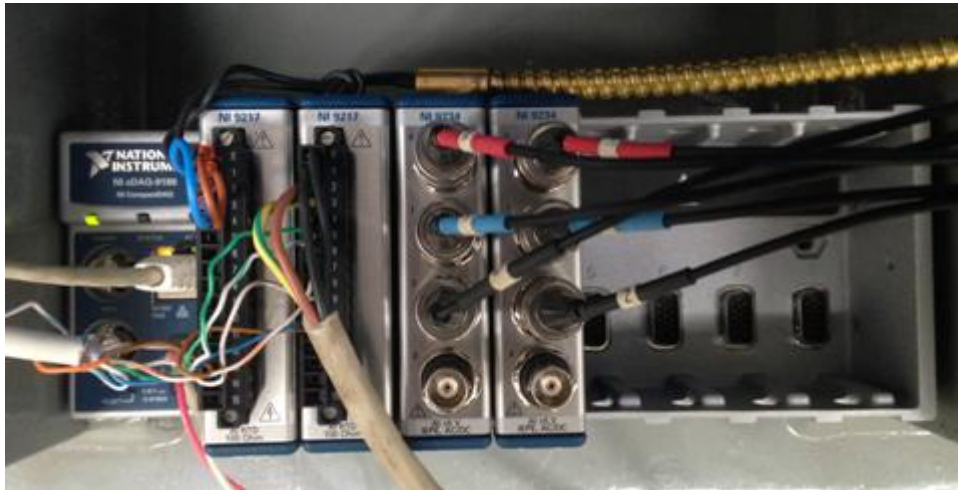
- 1150 (přechod do stavu READY TO SWITCH ON, kdy je frek. měnič připraven na spuštění elektromotoru)
- 1151 (přechod do stavu OPERATION, kdy frekvenční měnič uvede do chodu elektromotor)

Control words a Status words jsou tedy velmi důležitým nástrojem, jak komunikovat s frekvenčním měničem aerodynamického kalibračního tunelu po ethernetové síti z řídicí aplikace vytvořené v LabVIEW. Modul FENA-11 je nastaven do profilu ENHANCED. To znamená, že lze monitorovat současně 15 vstupních a 15 výstupních veličin frekvenčního měniče.

### 3.2.3 NI cDAQ-9188 a použité měřicí karty

#### NI cDAQ-9188

NI cDAQ-9188 (National Instruments Compact Data Acquisition) je 8mi slotové ethernetové šasi určené pro různé typy měřicích karet od NI, přičemž 1 šasi dokáže měřit až z 256ti kanálů různé fyzikální, elektrické, mechanické nebo akustické veličiny, jako například teploty, tlaky, vibrace, zrychlení, otáčky, aj. Toto zařízení je zobrazeno na obrázku 19.



Obrázek 19: NI cDAQ-9188

Každé zařízení má přiděleno v rámci sítě svou vlastní IP adresu a je připojeno pomocí UTP kabelu do ethernetové sítě. Toto zařízení je použito s následujícími měřicími kartami:

- 2x NI 9217 (měření teplot ložisek motoru a ventilátoru)
- 2x NI 9234 (měření zrychlení ve 3 směrech na ložisku motoru a vnějším ložisku ventilátoru)

#### 3.2.4 Vegamet 624

Vegamet 624 je univerzální nástroj určený ke zpracování signálů naměřených pomocí senzorů s rozsahem 4 až 20 mA, přičemž současně měřené hodnoty zobrazuje na svém displeji, jak je vidět na obrázku 20. Jedná se o síťové zařízení, které má přiděleno v rámci sítě svou IP adresu, je připojeno pomocí UTP kabelu a je použito pro měření barometrického tlaku důležitého pro výpočet rychlosti proudu vzduchu na výstupu aerodynamického kalibračního tunelu.



Obrázek 20: Vegamet 624

### 3.2.5 Netscanner 9116

Netscanner 9116 zobrazený na obrázku 21 je inteligentní tlakový převodník určený pro měření na aerodynamických tunelech a na testovacích stendech lopatkových strojů. Jedná se o zcela soběstačný vysoce výkonný tlakový modul určený pro vícenásobné měření suchých plynů, který zahrnuje 16 silikonových piezorezistivních senzorů tlaku a každý z těchto senzorů navíc obsahuje teplotní čidlo a paměť EEPROM pro ukládání kalibračních dat. Na základě informací uložených v této paměti provádí mikroprocesor převodníku kompenzaci chyb teplotních čidel. Pomocí tohoto tlakového převodníku je měřen dynamický tlak potřebný pro výpočet rychlosti proudu vzduchu na výstupu aerodynamického kalibračního tunelu.

Samozřejmostí tohoto inteligentního tlakového převodníku je možnost připojení do ethernetové sítě pomocí UTP kabelu, jelikož podporuje protokoly TCP, UDP a IP.



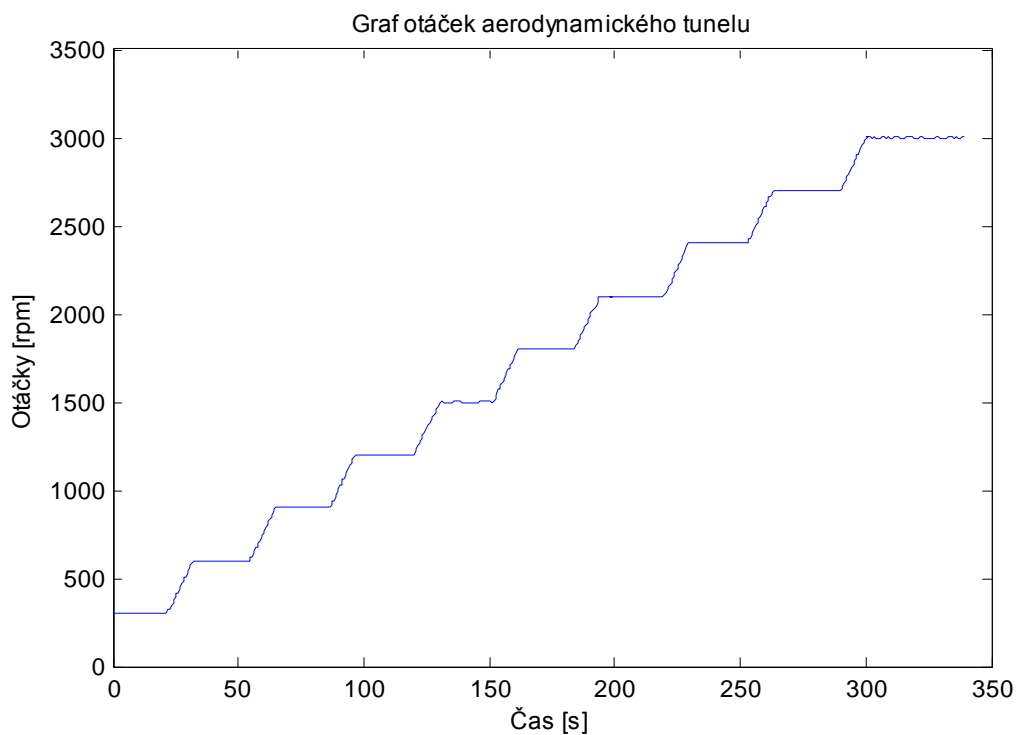
Obrázek 21: Netscanner 9116

### 3.3 Identifikace modelu kalibračního tunelu

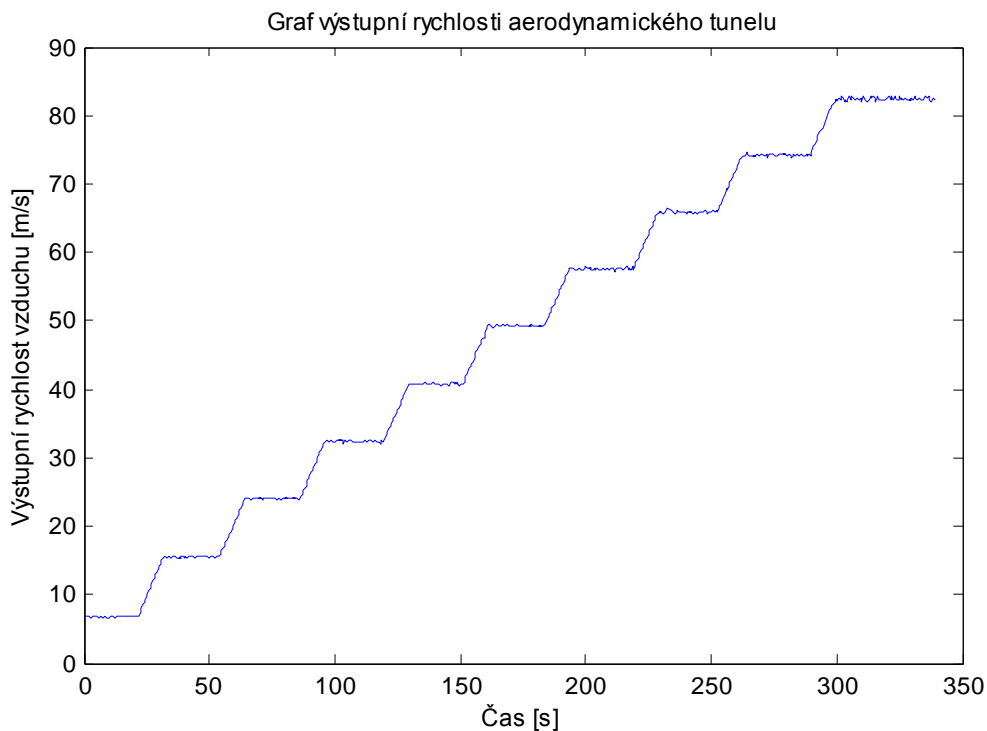
Za účelem řízení výstupní rychlosti proudícího vzduchu z aerodynamického kalibračního tunelu bylo nejprve nutné provést experimentální identifikaci tohoto systému na základě naměřených provozních dat.

#### 3.3.1 Naměřená experimentální data

Naměřené hodnoty výstupní rychlosti v závislosti na otáčkách elektromotoru byly změřeny na kalibračním tunelu při postupném zvyšování otáček v pásmu 300rpm až 3000rpm periodou vzorkování  $T_s = 0,5s$ , jak je vidět na následujícím obrázku 22. Jedná se o efektivní pásmo otáček, ve kterém se elektromotor nejčastěji pohybuje při samotné kalibraci pneumatických sond.



Obrázek 22: Graf otáček elektromotoru



Obrázek 23: Graf výstupní rychlosti

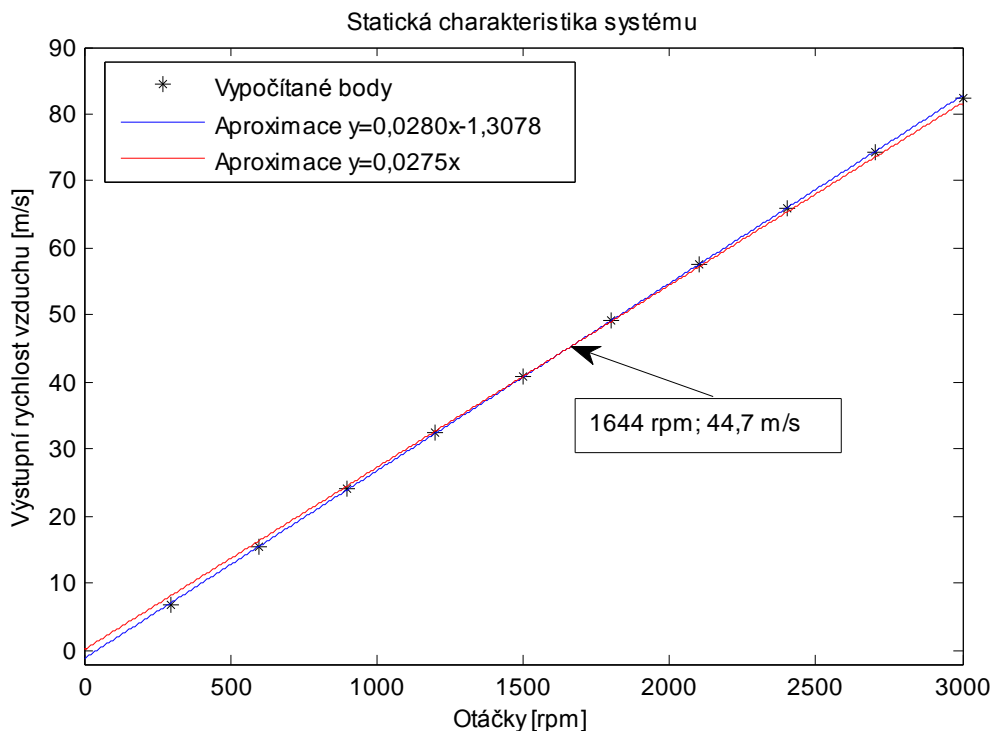
Nejprve byla na základě těchto dat zkonstruována lineární aproximace statické charakteristiky systému ve tvaru rovnice přímky  $y = ax + b$  a poté ve tvaru bez absolutního členu  $b$ , tedy  $y = ax$ . Lineární aproximace statické charakteristiky systému kalibračního tunelu má tvar

$$y = ax + b = 0,0280x - 1,3078. \quad (36)$$

Posun v podobě absolutního členu v rovnici 36 může být způsoben například nelinearitami vzniklými při provozu elektromotoru nebo při měření tlaků nutných pro výpočet výstupní rychlosti vzduchu z aerodynamického kalibračního tunelu. Pokud statickou charakteristiku proložíme přímkou procházející počátkem, získáme

$$y = ax = 0,0275x. \quad (37)$$

Na základě toho lze říci, jak je vidět z následujícího obrázku 24, že nejlepší shody mezi reálným modelem kalibračního tunelu a identifikovaným modelem lineárního systému bude dosaženo v okolí bodu [1644 rpm ; 44,7 m/s].



Obrázek 24: Statická charakteristika systému

### 3.3.2 Použité identifikační metody

#### Identification Toolbox v Matlabu

Nejprve byl pro identifikaci modelu systému kalibračního tunelu použit Identification Toolbox v Matlabu. Důvod použití je ten, že se jedná o toolbox, který využívá různé identifikační metody, jako například metodu maximální věrohodnosti, metodu chyby predikce a jiné. Struktura modelu byla zvolena jako ARX se 2 póly a 1 nulou při periodě vzorkování  $T_s = 0,5s$ . Získaný diskrétní přenos má tvar

$$F_{S_{IT}}(z^{-1}) = \frac{0,0453z^{-1}}{1 + 0,4047z^{-1} + 0,2445z^{-2}} \quad (38)$$

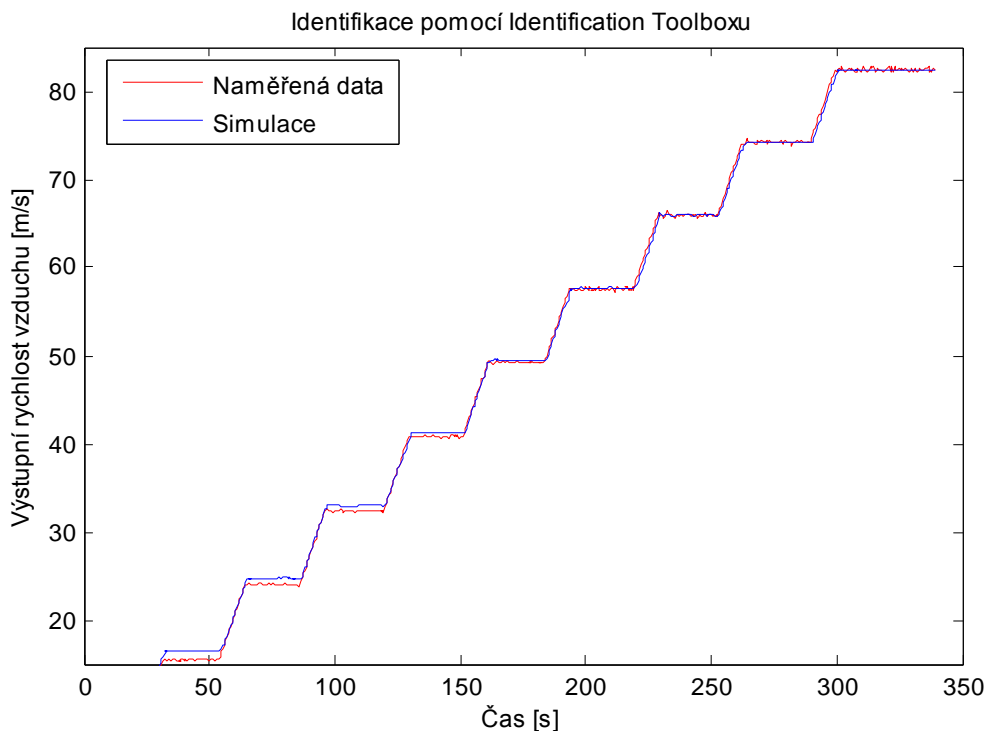
Při použití Tustinovy aproximace odpovídá tento přenos diskrétního systému přenosu spojitého systému ve tvaru

$$F_{S_{IT}}(p) = \frac{0,8631}{p^2 + 7,197p + 31,42} \quad (39)$$

a se střední kvadratickou chybou

$$S_{IT} = \frac{\sum_{i=1}^N (v_{mer} - v_{ident})^2}{N} = 1,1727, \quad (40)$$

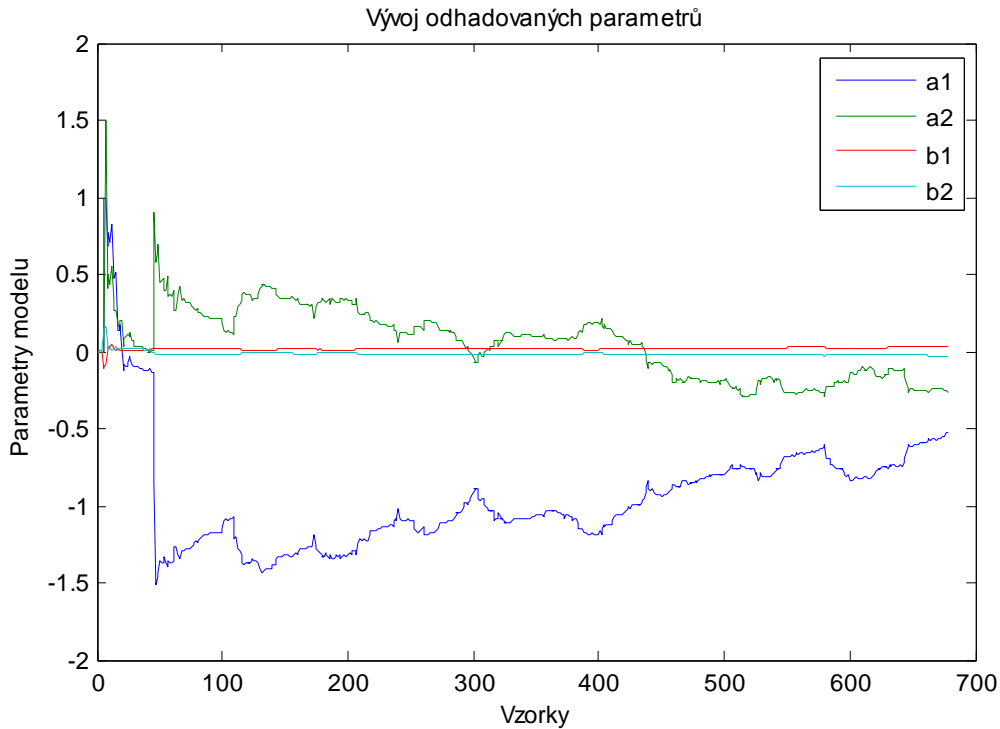
kde hodnoty  $v_{ident}$  byly získány v Matlabu funkcí *lsim* určenou pro vygenerování odezvy zadaného dynamického systému na zvolený budicí signál. Na následujícím obrázku 25 je vidět srovnání identifikovaného systému  $F_{S1}$  s experimentálně naměřenými daty.



Obrázek 25: Identifikace pomocí Identification Toolboxu

### Metoda rekurzivních nejmenších čtverců (RMNČ) s exponenciálním zapomínáním

Jako další byla pro identifikaci modelu použita rekurzivní metoda nejmenších čtverců s exponenciálním zapomínáním, protože díky ní lze vidět průběh identifikovaných parametrů v čase. Při použití této metody k identifikaci kalibračního tunelu bylo také cílem odhadnout neznámé parametry ARX modelu se 2 póly a 1 nulou při periodě vzorkování  $T_S = 0,5s$  a koeficientu zapomínání  $\lambda = 0,99$ , při kterém průběh identifikovaných parametrů vykazoval konvergentní charakter. Průběh identifikace parametrů je zobrazen na následujícím obrázku 26.



Obrázek 26: Vývoj odhadu parametrů pomocí RMNČ

Identifikací byl získán následující diskretní přenos systému

$$F_{S_{RMN\check{c}}}(z^{-1}) = \frac{0,03249 - 0,02682 z^{-1}}{1 - 0,5281 z^{-1} - 0,266 z^{-2}}. \quad (41)$$

S využitím Tustinovy aproximace se jedná o přenos systému vzniklého diskretizací přenosu spojitého systému

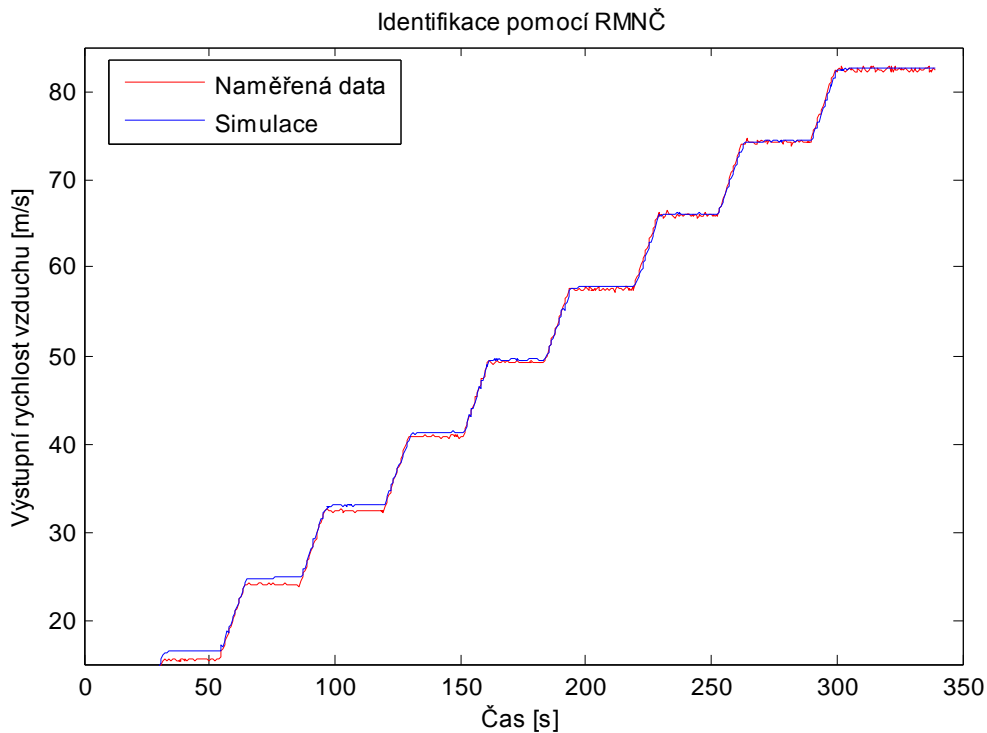
$$F_{S_{RMN\check{c}}}(p) = \frac{0,07188}{p^2 + 8,024 p + 2,611} \quad (42)$$

a se střední kvadratickou chybou

$$S_{RMN\check{c}} = \frac{\sum_{i=1}^N (v_{mer} - v_{ident})^2}{N} = 0,4328. \quad (43)$$

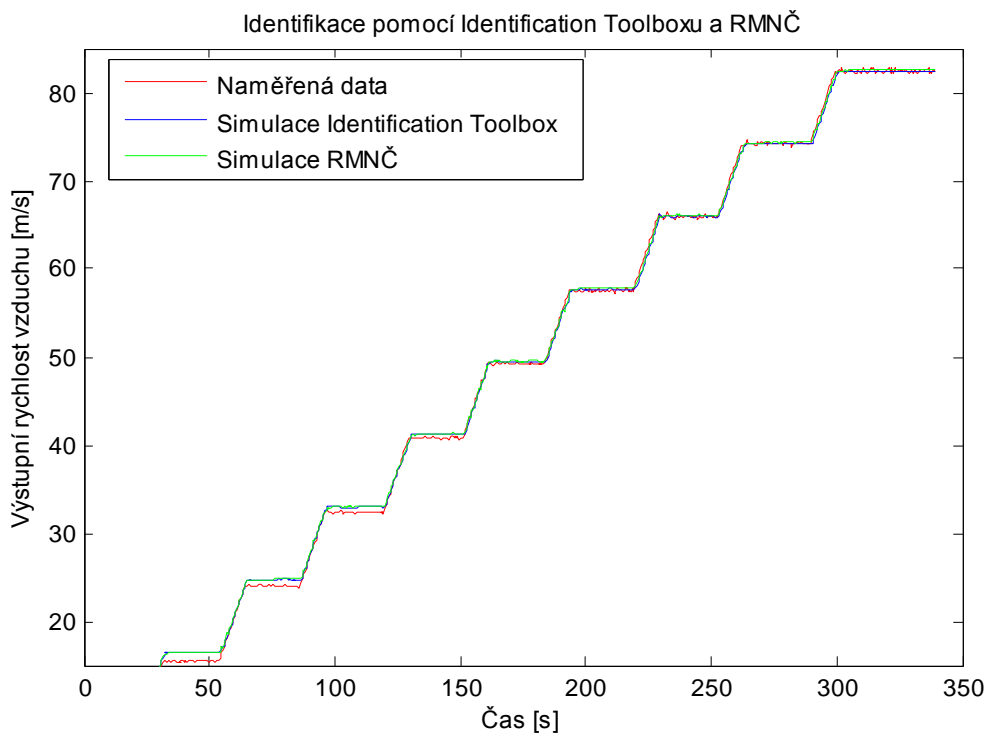
Na dalším obrázku 27 je vidět srovnání identifikovaného systém  $F_{S2}$  s experimentálně naměřenými daty.





Obrázek 27: Identifikace pomocí RMNČ

Pro úplnost je uvedeno srovnání obou odezev systémů získaných předchozími identifikačními metodami, což je vidět na následujícím obrázku 28. Na základě srovnání středních kvadratických chyb obou metod byl pro následný návrh regulátoru vybrán model  $F_{S_{RMN\check{C}}}(p)$ .



Obrázek 28: Srovnání výsledků obou identifikačních metod

### 3.4 Syntéza zvoleného typu regulátoru

Tato část bude věnována konkrétnímu návrhu parametrů PID regulátoru, který zajistí regulaci na zvolenou výstupní rychlost proudícího vzduchu. Pro tyto účely bude použita metoda stabilizujících regulátorů, která zajistí vnitřní stabilitu zpětnovazebního regulačního obvodu.

#### 3.4.1 Výpočet parametrů regulátoru metodou stabilizujících regulátorů

Pro identifikovaný model aerodynamického kalibračního tunelu ve tvaru lineárního systému druhého řádu, kde  $\xi$  představuje relativní činitel tlumení a  $\omega_n$  netlumenou frekvenci systému

$$F_{S_{RMN\check{c}}}(p) = \frac{K_S}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2} = \frac{0,07188}{p^2 + 8,024 p + 2,611} \quad (44)$$

bude navržena parametrizovaná množina zpětnovazebních stabilizujících regulátorů, tak aby přechodová charakteristika uzavřené regulační smyčky vykazovala vždy maximální přeregulování  $\sigma_{MAX} = 0,001$  a dobu regulace  $T_{reg} = 30s$ .

Tvarovací filtr  $F_Q(p)$  byl zvolen v následujícím tvaru

$$F_Q(p) = \frac{1}{\alpha_1 p + 1} = \frac{1}{29,83 p + 1}. \quad (45)$$

Přímovazební regulátor  $R(p)$  bude mít tvar

$$R(p) = F_Q(p)[F_{S_1}(p)]^{-1} = \frac{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2}{K_S(\alpha_1 p + 1)} \quad (46)$$

a zpětnovazební regulátor  $F_R(p)$

$$F_R(p) = \frac{R(p)}{1 - F_S(p)R(p)} = \frac{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2}{K_S\alpha_1 p}. \quad (47)$$

Porovnáním předchozího zpětnovazebního regulátoru  $F_R(p)$  s tvarem klasického PID regulátoru ve tvaru

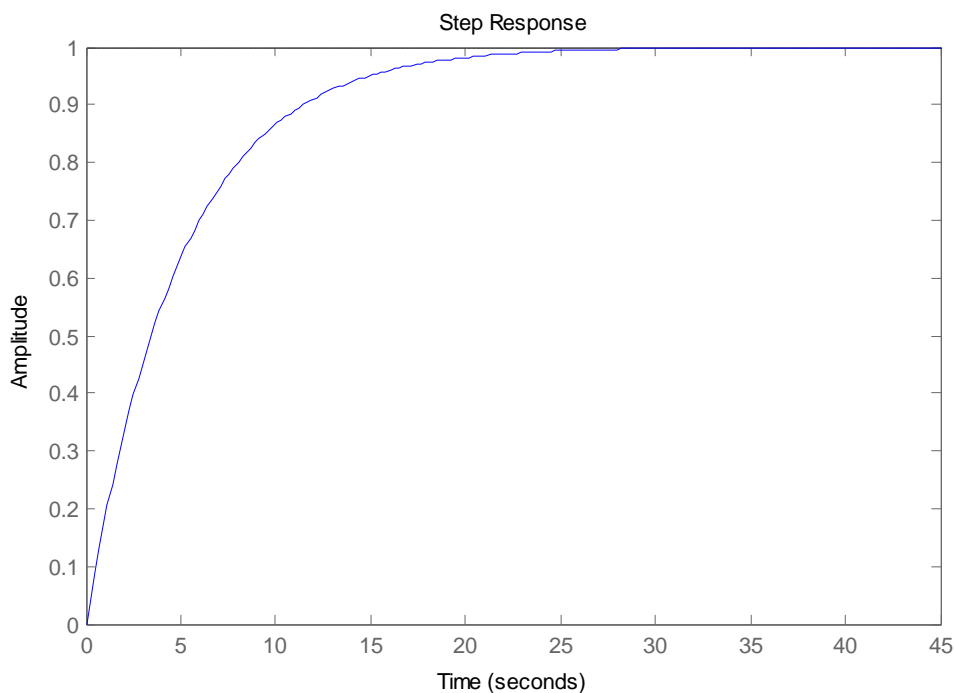
$$F_R(p) = K + \frac{K_I}{p} + K_D p = \frac{K_D p^2 + K p + K_I}{p} \quad (48)$$

získáme parametry hledaného PID regulátoru, které jsou

$$K = 22,4533 \quad K_I = 7,3063 \quad K_D = 2,7983 \quad (49)$$

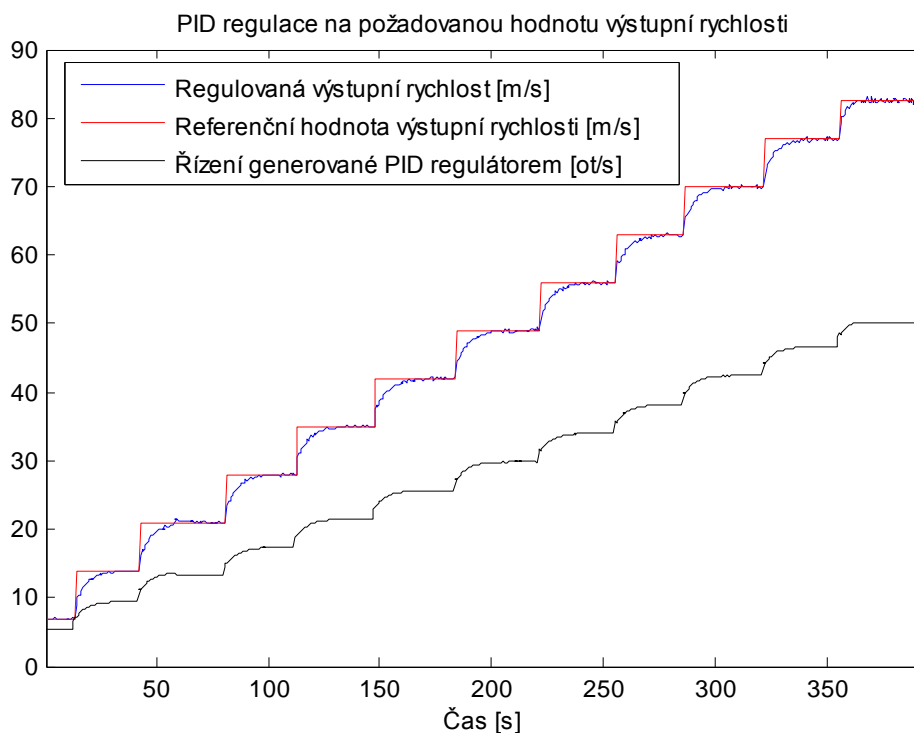
a přechodová charakteristika uzavřeného regulačního obvodu bude mít tedy tvar

$$F_{yw}(p) = \frac{1}{\alpha_1 p + 1} = \frac{1}{29,83 p + 1}. \quad (50)$$



**Obrázek 29: Přechodová charakteristika uz. reg. obvodu (simulace)**

Testování tohoto typu PID regulátoru při řízení aerodynamického kalibračního tunelu proběhlo úspěšně, jak je vidět z následujícího obrázku 30. Při experimentu bylo voleno postupně několik referenčních hodnot výstupní rychlosti v intervalu 7 až 82,5  $m/s$  a na každou z těchto hladin regulace probíhala přibližně požadovaných 30 sekund.

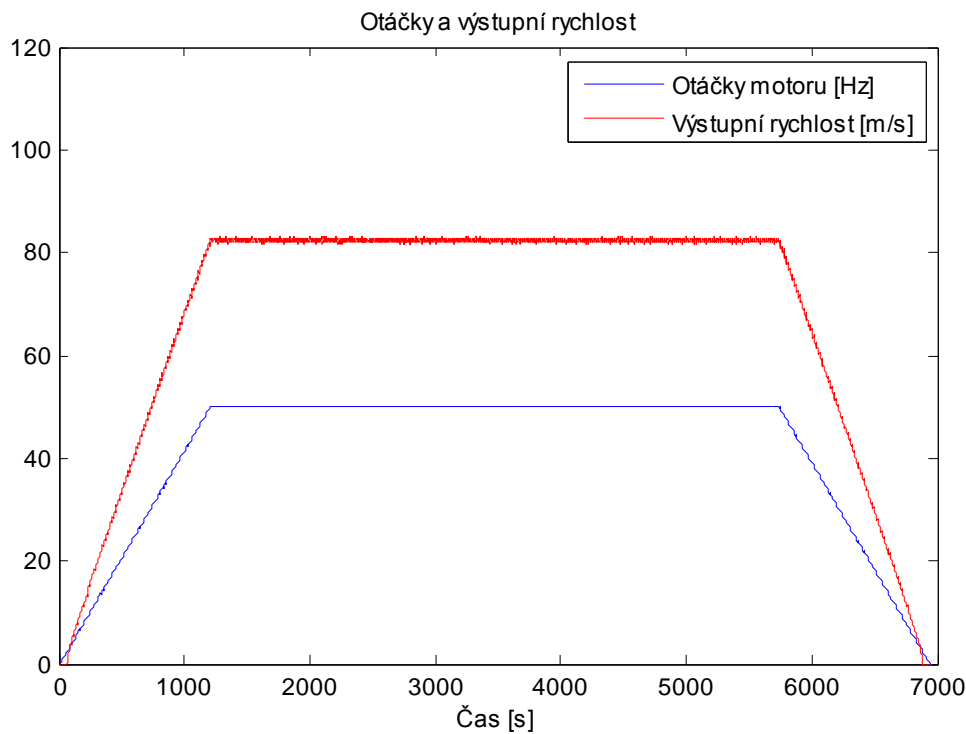


**Obrázek 30: Průběh PID regulace na aerodynamickém kalibračním tunelu**

### 3.5 Analýza naměřených dat

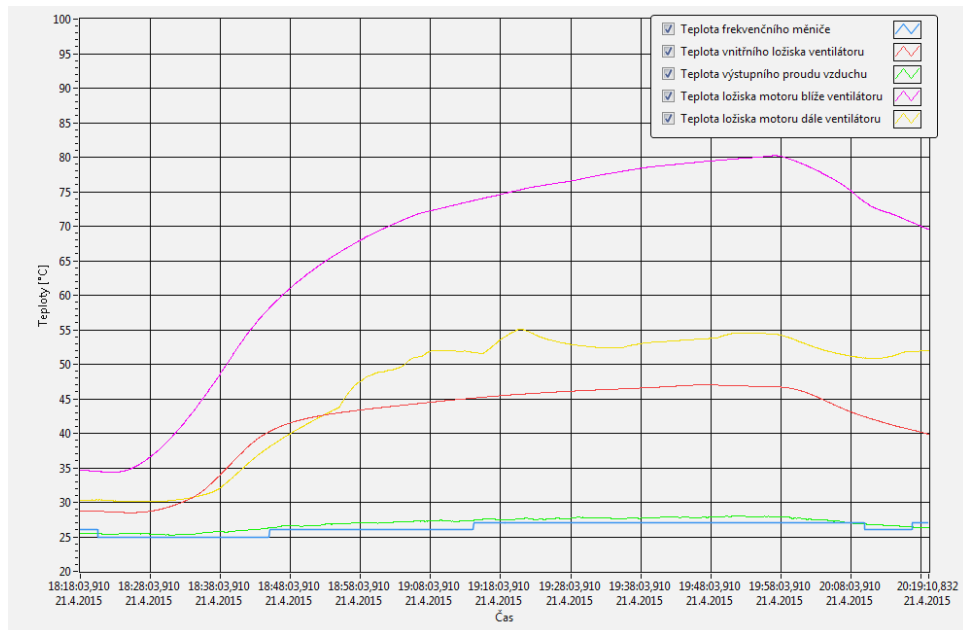
Za pomoci aplikace navržené v programu LabVIEW a popsané v kapitole 3.6 bylo provedeno měření na aerodynamickém kalibračním tunelu. Na frekvenčním měniči elektromotoru byl nastaven lineární nájezd z 0rpm na 3000rpm (50Hz) za dobu 20 minut, poté pokračoval provoz na 3000rpm po dobu 80 minut a nakonec elektromotor ventilátoru sjel z těchto otáček na 0rpm za dobu 20 minut, což je vidět na následujícím obrázku 31.

Během provozu byly měřeny všechny provozní veličiny jako otáčky elektromotoru, výstupní rychlost vzduchu z kalibračního tunelu, teploty ložisek motoru, ventilátoru a frekvenčního měniče. Zároveň byly také pomocí akcelerometrů měřeny vibrace na vnějším ložisku ventilátoru a na ložisku elektromotoru.



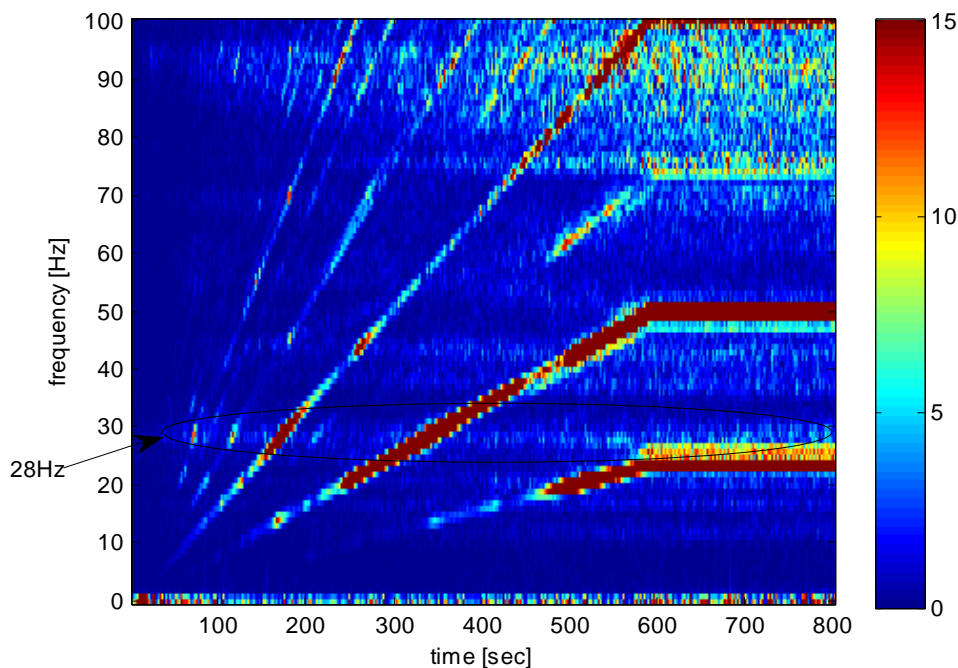
Obrázek 31: Graf otáček a výstupní rychlosti

Na následujícím obrázku 32 je vidět průběh jednotlivých teplot. Nejvyšší teploty kolem 80 °C, kterou již lze klasifikovat jako zvýšenou, dle dostupného manuálu k ventilátoru ARK 800 [10], dosáhlo vnější ložisko ventilátoru. Ostatní teploty se pohybovaly v pásmu do 60 °C, což jsou obvyklé teploty měřené při provozu kalibračního tunelu.



Obrázek 32: Vývoj teplot motoru, ventilátoru a frek. měniče

Na základě toho lze usoudit, že vnější ložisko ventilátoru je jedno z nejméně zatěžovaných ložisek celého aerodynamického kalibračního tunelu. Jedná se o naklápěcí kuličkové ložisko SKF 2311K uvedené v příloze. Proto bude následně provedena časo-frekvenční analýza měřeného vibračního signálu získaného pomocí akcelerometru umístěného právě na tomto ložisku. Bude využito spektrogramů vibračního signálu pro časo-frekvenční vyjádření jeho amplitud. Z následujícího obrázku 33 je vidět frekvenční linie, která je konstantní (nemění se s otáčkovou frekvencí) a při průchodu otáček přes tuto frekvenci dochází k rezonanci. Jedná se nejspíše o vlastní frekvenci některé z komponent kalibračního tunelu, která odpovídá frekvenci  $f_{rez} = 28\text{Hz}$ .



Obrázek 33: Spektrogram signálu s viditelnou vlastní frekvencí

V současné době se v praxi využívají různé způsoby bezdemontážní diagnostiky valivých ložisek. Všechny však vycházejí z toho, že při odvalování poškozeného prvku ložiska dochází k nárazům a ložisko se stává budičem kmitání a tedy zdrojem vibračního signálu, o čemž se lze dočíst v [11]. Na základě znalosti kinematiky ložiska je možné vypočítat frekvence odvalování jeho jednotlivých částí, aby bylo možné určit poškození ložiska. Při výpočtech se předpokládá ideální odvalování (v ložisku nedochází ke skluzům) a vliv setrvačných sil je zanedbán.

Na základě znalosti frekvence otáčení  $f_n = 50\text{Hz}$ , roztečného průměru  $D_T = 87,5\text{mm}$ , průměru valivého elementu  $D_W = 19\text{mm}$ , počtu valivých elementů (kuliček)  $z = 24$  a provozního stykového úhlu  $\alpha_B$  je možné vypočítat následující frekvence odvalování.

- Frekvence vad klece pro fixovaný vnější kroužek

$$f_{FTF} = \frac{1}{2} * f_n * \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B\right) \quad (51)$$

- Frekvence odvalování po vnějším kroužku

$$f_{BPFO} = \frac{1}{2} * f_n * z * \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B\right) \quad (52)$$

- Frekvence odvalování po vnitřním kroužku

$$f_{BPFI} = \frac{1}{2} * f_n * z * \left(1 + \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B\right) \quad (53)$$

- Frekvence odvalování elementu (kuličky) po vnější a vnitřní dráze

$$f_{BSF} = f_n * \frac{D_T}{D_W} * \left[1 - \left(\frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_B\right)^2\right] \quad (54)$$

Nejprve je nutné ale zjistit neznámý stykový úhel  $\alpha_B$  vnějšího ložiska ventilátoru. Na základě znalosti předchozích vztahů musí totiž platit po dosazení.

$$f_{BPFI} + f_{BPFO} = 1200 \quad (55)$$

$$f_{BPFO} \in (600 \pm 130)\text{Hz} \quad (56)$$

Na základě toho tedy získáme hodnoty stykových úhlů  $\alpha_{B1} = 35,55^\circ$ ,  $\alpha_{B2} = 76,69^\circ$ , které použijeme pro výpočet výše uvedených frekvencí odvalování. Pro vnější ložisko ventilátoru tedy vychází

- Frekvence vad klece pro fixovaný vnější kroužek

$$f_{FTF1} = \frac{1}{2} * f_n * \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_{B1}\right) = 20,5 \text{ Hz} \quad (57)$$

$$f_{FTF2} = \frac{1}{2} * f_n * \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_{B2}\right) = 23,75 \text{ Hz} \quad (58)$$

- Frekvence odvalování po vnějším kroužku

$$f_{BPFO1} = \frac{1}{2} * f_n * z * \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_{B1}\right) = 494 \text{ Hz} \quad (59)$$

$$f_{BPF02} = \frac{1}{2} * f_n * z * \left(1 - \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_{B2}\right) = 570 \text{ Hz} \quad (60)$$

- Frekvence odvalování po vnitřním kroužku

$$f_{BPF11} = \frac{1}{2} * f_n * z * \left(1 + \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_{B1}\right) = 706 \text{ Hz} \quad (61)$$

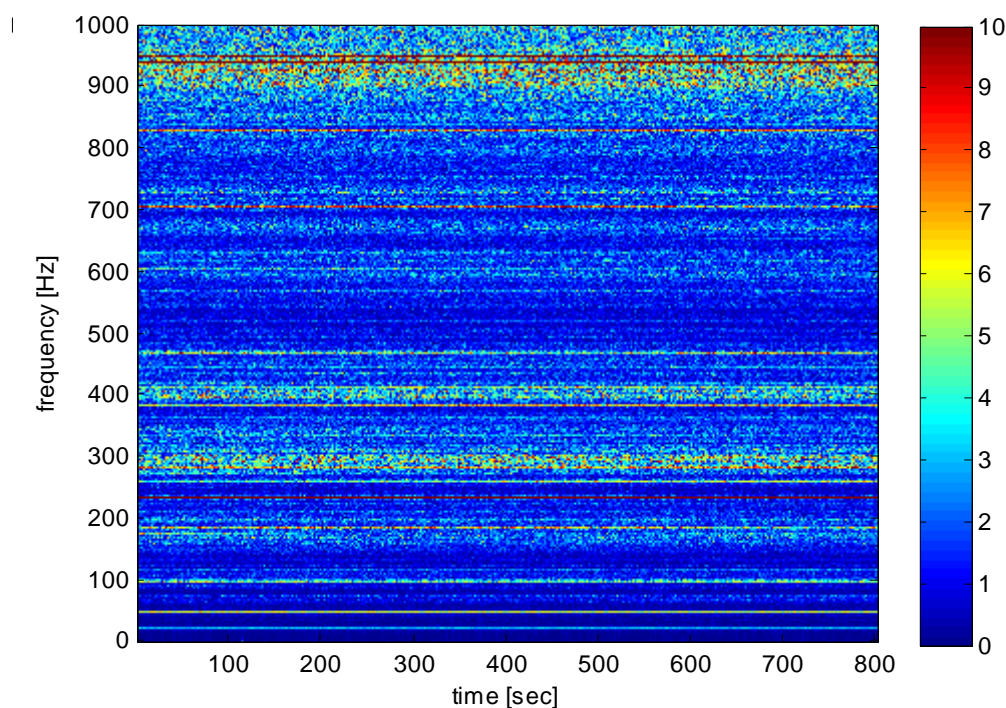
$$f_{BPF12} = \frac{1}{2} * f_n * z * \left(1 + \frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_{B2}\right) = 630 \text{ Hz} \quad (62)$$

- Frekvence odvalování elementu (kuličky) po vnější a vnitřní dráze

$$f_{BSF1} = f_n * \frac{D_T}{D_W} * \left[1 - \left(\frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_{B1}\right)^2\right] = 111 \text{ Hz} \quad (63)$$

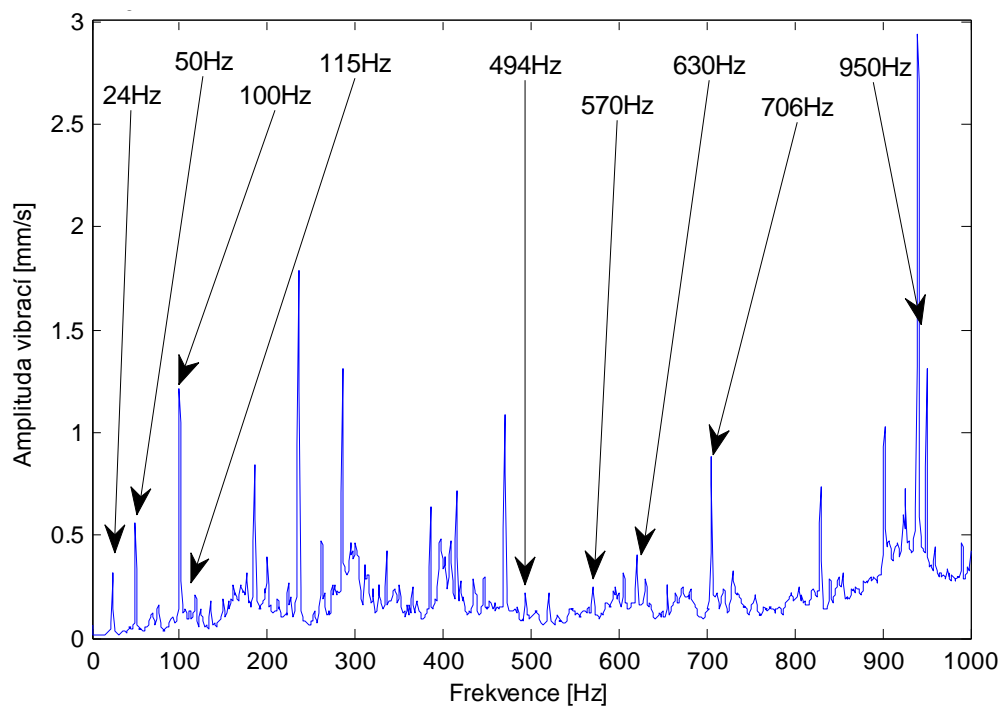
$$f_{BSF2} = f_n * \frac{D_T}{D_W} * \left[1 - \left(\frac{D_W}{D_T} \cos \alpha_{B2}\right)^2\right] = 115 \text{ Hz} \quad (64)$$

Na následujícím obrázku 35, tedy na spektrogramu měřeného vibračního signálu, lze většinu z těchto frekvencí dohledat. Některé z těchto frekvencí jsou nevýrazné a nejsou ve spektrogramu pozorovatelné. Zároveň se ve spektrogramu objevuje frekvence 950 Hz, která odpovídá násobku otáčkové frekvence 50 Hz a počtu oběžných lopatek ventilátoru, kterých je 19.



Obrázek 34: Spektrogram vibračního signálu při provozu elektromotoru na 50 Hz

Pro přehlednější zobrazení jednotlivých frekvenčních komponent měřeného vibračního signálu z předchozího spektrogramu na obrázku 34 bylo použito průměrování všech těchto frekvencí v čase a výsledný graf je zobrazen na následujícím obrázku 36.



**Obrázek 35: Zobrazení frekvenčních komponent měřeného vibračního signálu**

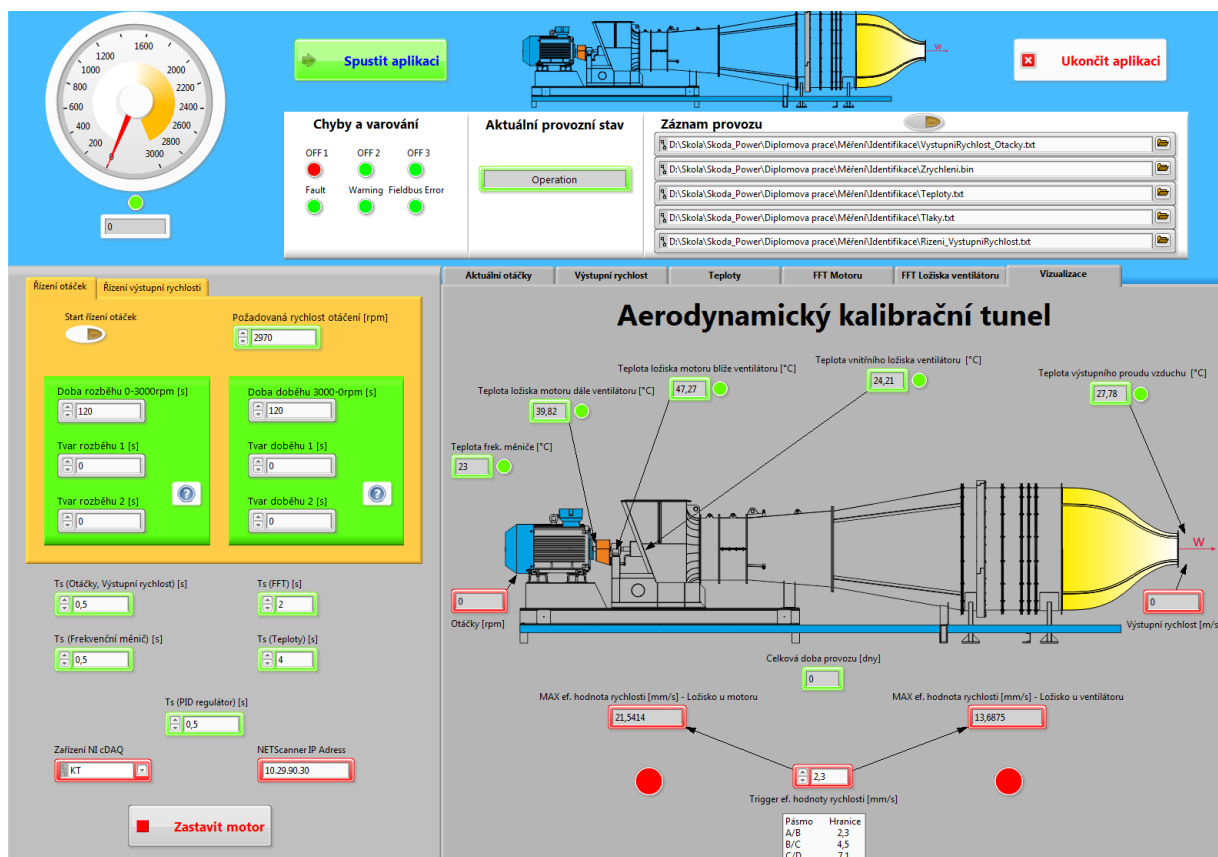


## 3.6 Řídicí aplikace kalibračního tunelu

Za účelem řízení a monitorování provozních veličin aerodynamického kalibračního tunelu byla v programu LabVIEW navržena aplikace, která je zobrazena na následujícím obrázku 37. Díky této aplikaci je uživatel schopný dle potřeby ovládat kalibrační tunel a může tedy provádět následnou kalibraci pneumatických sond.

### 3.6.1 Popis uživatelského rozhraní

Celou aplikaci lze vizuálně rozdělit na 3 hlavní části. V horní části aplikace se nachází informační panel, v levé spodní části řídicí panel a v pravé spodní části monitorovací panel. Blokovaný diagram aplikace je velmi obsáhlý, proto zde není zobrazen a je možno ho najít v příloženém CD této diplomové práce. Struktura blokového diagramu je koncipována jako konečný stavový automat, ve kterém dochází postupně k přepínání mezi jednotlivými stavy, ve kterých se aplikace v daném čase nachází. Dále blokovaný diagram obsahuje několik paralelních smyček WHILE, ve kterých dochází například ke čtení jednotlivých provozních veličin, zápisu do výstupních souborů a monitorování bezpečnosti provozu aerodynamického kalibračního tunelu.



Obrázek 36: Řídicí aplikace aerodynamického kalibračního tunelu

### 3.6.1.1 Informační panel

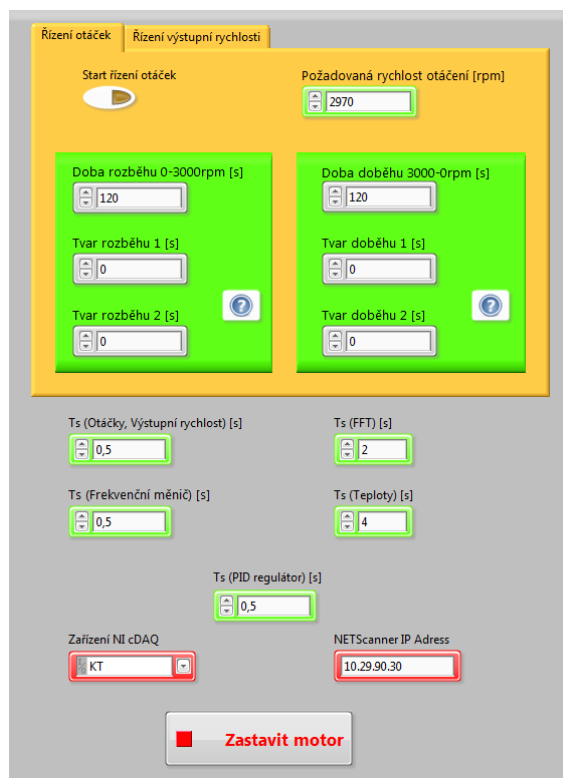
Informační panel aplikace slouží uživateli k ovládání chodu celé aplikace pomocí tlačítek *Spustit aplikaci* a *Ukončit aplikaci*. Zároveň obsahuje informaci o aktuálních provozních otáčkách elektromotoru, které můžeme vidět v jeho levé části jednak na displeji v numerické podobě, tak i v grafické podobě přímo na otáčkoměru a současně se mezi těmito dvěma ukazateli nachází ještě LED dioda, která informuje o činnosti elektromotoru. V další části informačního panelu se nachází celkem 6 LED diod, které uživatele informují o chybách a varováních, které přicházejí přímo z frekvenčního měniče a týkají se výskytu chyb během komunikace a možných bezpečnostních zastavení motoru, které byly vyhodnoceny přímo frekvenčním měničem. V další části se nachází informace o aktuálním provozním stavu aerodynamického kalibračního tunelu. Nejdříve při zapnutí této aplikace se objeví stav *Waiting on START* a poté, co uživatel aplikaci spustí tlačítkem *Spustit aplikaci*, změní se stav na *Connecting with HW*, při kterém dojde k navázání spojení s frekvenčním měničem ACS 880, se zařízením NI cDAQ-9188, s tlakovým převodníkem Netscanner 9116 a se zařízením Vegamet 624 pro měření barometrického tlaku. Součástí informačního panelu zobrazeného na obrázku 38 je také záznam provozu, díky kterému lze ovládat záznam jednotlivých provozních veličin do předem nadefinovaných výstupních souborů.



Obrázek 37: Informační panel aplikace

### 3.6.1.2 Řídicí panel

Řídicí panel aplikace slouží uživateli k vlastnímu ovládání provozních veličin aerodynamického kalibračního tunelu, kterými jsou otáčky motoru a výstupní rychlost vzduchu. Samotné řízení je tedy možné realizovat v režimu řízení otáček nebo v režimu řízení výstupní rychlosti. Zároveň lze pomocí řídicího panelu nastavit doby vzorkování jednotlivých provozních veličin neboli jednotlivých výpočetních smyček WHILE blokového diagramu celé aplikace. Ve spodní části řídicího panelu se nachází také volba konkrétního typu zařízení NI cDAQ viditelného k připojené lokální síti, dále možnost nastavení statické IP adresy používaného tlakového převodníku Netscanner 9116 a nakonec tlačítko *Zastavit motor*, pomocí kterého lze motor zastavit z libovolného provozního stavu. Řídicí panel je zobrazen na následujícím obrázku 39.



Obrázek 38: Řídicí panel aplikace

### 3.6.1.3 Monitorovací panel

Monitorovací panel poskytuje uživateli detailní informace o provozních veličinách, kterými jsou aktuální otáčky elektromotoru, výstupní rychlost vzduchu na výstupu z tunelu, jednotlivé měřené teploty v různých částech tunelu, frekvenční analýza vibračních signálů získaných z akcelerometrů na ložisku motoru a ventilátoru a nakonec v sekci *Vizualizace* aktuální hodnoty všech dříve jmenovaných provozních veličin v grafické podobě pro jejich snadný monitoring.

V sekci *Výstupní rychlost* je možné zobrazit časový průběh výstupní rychlosti vzduchu z kontrakční dýzy kalibračního tunelu. Výstupní rychlost lze vypočítat podle vztahu

$$v = \sqrt{\frac{2 * p_D}{\rho}}, \quad (65)$$

kde  $p_D$  udává dynamický tlak měřený pomocí tlakového převodníku Netscanner 9116 a referenční Prandtlvy sondy a  $\rho$  udává hustotu proudícího vzduchu, která se vypočítá podle vztahu

$$\rho = \frac{p_{BAR}}{z * T} = \frac{p_{BAR}}{287,14 * (273,15 + t)}, \quad (66)$$

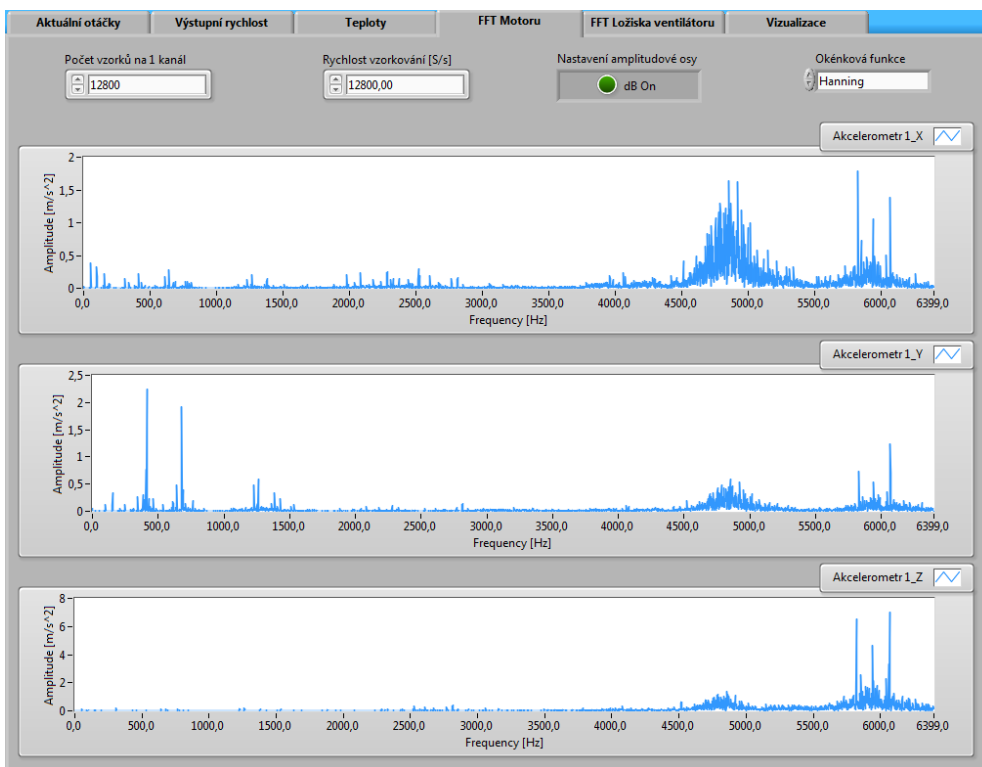
kde  $p_{BAR}$  představuje barometrický tlak a  $t$  teplotu výstupního proudu vzduchu z tunelu.



Obrázek 39: Výstup z kontrakční dýzy

V sekci *Teploty* je možné zobrazit časové průběhy teplot frekvenčního měniče, vnitřního a vnějšího ložiska ventilátoru a ložiska motoru.

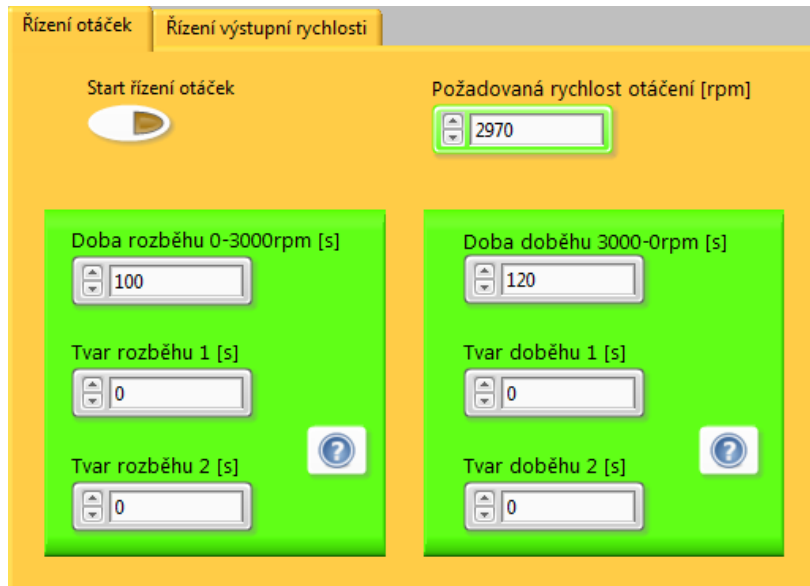
V sekci *FFT Motoru* a *FFT Ložiska ventilátoru* se zobrazují výsledky diskrétní Fourierovy transformace měřených vibračních signálů z akcelerometrů umístěných na ložiskách motoru a ventilátoru. Oba akcelerometry jsou od firmy Brüel & Kjaer, typ 4524B a vibrace měří ve třech směrech.



Obrázek 40: Monitorovací panel aplikace

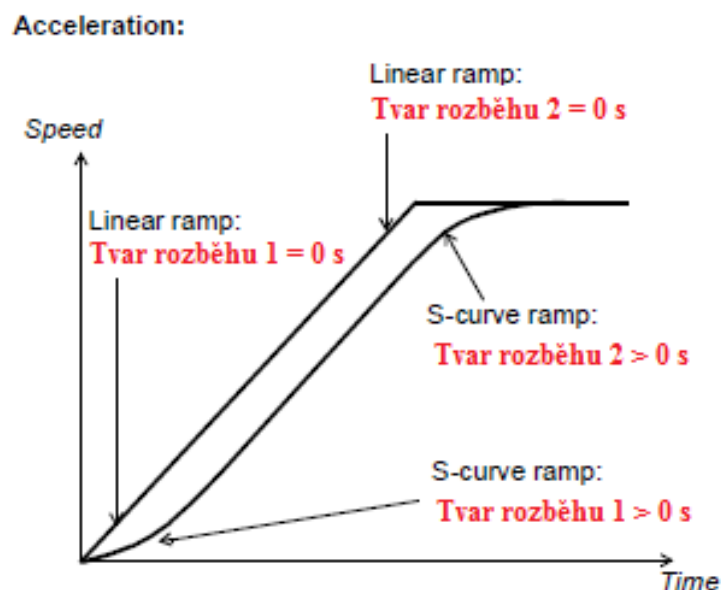
### 3.6.2 Režim pro řízení otáček

Pokud uživatel požaduje řídit otáčky kalibračního tunelu, je nutné se na řídicím panelu přepnout do sekce *Řízení otáček*. Zde lze zapnout tento režim stisknutím tlačítka *Start řízení otáček* a také nastavovat požadovanou rychlost otáčení [rpm], celkovou dobu rozběhu z 0rpm na 3000rpm, celkovou dobu doběhu ze 3000rpm na 0rpm, jak je vidět na následujícím obrázku 42.



Obrázek 41: Řízení otáček kalibračního tunelu

Zároveň je v tomto režimu možné nastavit tvary rozběhu (doběhu) po S-křivce, což je popsáno na následujícím obrázku 43, který lze také vyvolat stiskem nápovědy přímo v aplikaci. Pokud necháme tvary rozběhu (doběhu) nulové, bude aerodynamický kalibrační tunel najíždět po přímce na požadovanou rychlost otáčení.

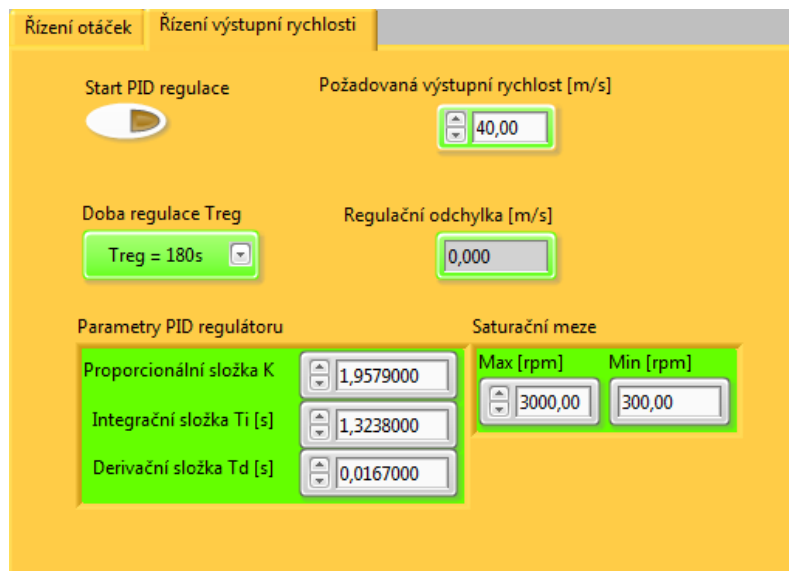


Obrázek 42: Nájezd tunelu po S-křivce

### 3.6.3 Režim pro řízení výstupní rychlosti

Pokud uživatel požaduje řídit výstupní rychlost vzduchu z kalibračního tunelu, je nutné se na řídicím panelu přepnout do sekce *Řízení výstupní rychlosti*, která je zobrazena na následujícím obrázku 44, kde je pro řízení použit PID regulátor. Tento režim lze zapnout stisknutím tlačítka *Start PID regulace*. V této sekci je možné nastavovat požadovanou výstupní rychlost vzduchu [m/s], celkovou dobu regulace na požadovanou hodnotu  $T_{reg}$ , kdy dochází automaticky k nastavení parametrů, vlastní parametry PID regulátoru  $K, T_i, T_D$  a saturační meze regulátoru.

Podle zvolené doby regulace  $T_{reg}$  jsou automaticky nastavovány vypočítané parametry PID regulátoru pomocí množiny stabilizujících regulátorů, ale uživatel si také může nastavit své vlastní parametry PID regulátoru.



Obrázek 43: Řízení výstupní rychlosti kalibračního tunelu

### 3.6.4 Monitorování provozních veličin

Za účelem monitorování provozních veličin aerodynamického kalibračního tunelu je možné použít na monitorovacím panelu sekci *Vizualizace*. Tato sekce umožňuje zároveň sledovat aktuální hodnoty všech provozních veličin na jednom místě. Díky této sekci, která je zobrazena na následujícím obrázku 45, lze přehledně sledovat jednotlivé teploty ložisek ventilátoru, motoru a frekvenčního měniče, výstupní rychlost vzduchu z tunelu, otáčky motoru a maximální efektivní hodnoty rychlostí na ložisku motoru a vnějším ložisku ventilátoru.

U každé ze sledovaných teplot je LED dioda, která podle barvy signalizuje zeleně teploty v bezpečném pásmu do 70ti °C, oranžově zvýšené teploty do 90ti °C a červeně teploty nad 90°C, při kterých dochází k okamžitému zastavení chodu elektromotoru aerodynamického



## 4. ZÁVĚR

Jedním z cílů této diplomové práce bylo navrhnout uživatelsky příjemnou aplikaci, pomocí které bude možné najíždět s elektromotorem kalibračního tunelu na takové otáčky, při kterých bude zajištěna požadovaná výstupní rychlost vzduchu z kalibračního tunelu nutná pro následnou kalibraci pneumatických sond. Aplikace byla vytvořena v programu LabVIEW a díky ní je uživatel schopen nastavovat provozní parametry frekvenčního měniče, bezpečně ovládat elektromotor ventilátoru a monitorovat nejdůležitější provozní veličiny celého aerodynamického kalibračního tunelu.

Ve druhé kapitole byla popsána problematika kalibrace pneumatických sond, konkrétně kalibrace pětiotvorové sondy, která byla umístěna v kalibračním tunelu v laboratořích Katedry energetických strojů a zařízení Západočeské univerzity v Plzni. Dále zde byla popsána experimentální identifikace systému, tedy hledání vhodného modelu systému na základě naměřených experimentálních dat, syntéza vhodného typu regulátoru a nakonec byl popsán komunikační protokol Modbus použitý pro vzájemnou komunikaci mezi navrženou aplikací v LabVIEW a frekvenčním měničem aerodynamického kalibračního tunelu.

Ve třetí kapitole byl popsán aerodynamický tunel pro kalibraci pneumatických sond složený z axiálního rovnotlakého ventilátoru, z kontrakční dýzy navazující na soustavu turbulizačních sítí a voštin, z elektromotoru o výkonu 160kW a z frekvenčního měniče. Dále byla popsána komunikace s frekvenčním měničem řídicí elektromotor kalibračního tunelu, kde byl použit speciální modul LabVIEW Datalogging and Supervisory Control (DSC). Následně byly popsány použité metody identifikace modelu kalibračního tunelu a návrh PID regulátoru metodou stabilizujících regulátorů známou též pod názvem afinní parametrizace. Díky této metodě návrhu parametrů PID regulátoru je zajištěna vnitřní stabilita uzavřeného regulačního obvodu. Pomocí vytvořené aplikace pro ovládání kalibračního tunelu byly během provozu měřeny všechny provozní veličiny jako otáčky elektromotoru, výstupní rychlost vzduchu z kalibračního tunelu, teploty ložisek motoru, ventilátoru a teplota frekvenčního měniče. Zároveň byly také pomocí akcelerometrů měřeny vibrace na vnějším ložisku ventilátoru a na ložisku elektromotoru. Díky tomu mohla být provedena analýza naměřených dat a bezdemontážní diagnostika vnějšího ložiska ventilátoru. Nakonec byla popsána řídicí aplikace aerodynamického kalibračního tunelu, díky které je uživatel schopný dle potřeby ovládat kalibrační tunel a může tedy následně provádět kalibraci zvolených pneumatických sond.

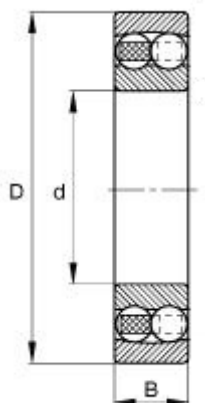
V současnosti je aplikace připravena pro testování na aerodynamickém kalibračním tunelu. Během následujících měřicích experimentů bude provedeno ověření všech implementovaných algoritmů a uživatelská aplikace bude testována pracovníky experimentální zkušebny při kalibraci pneumatických sond. Některá dosud neměřená místa kalibračního tunelu se plánují osadit dalšími snímači, které by měly poskytnout kompletní informaci o stavu tunelu během provozu. Informace z těchto snímačů budou v budoucnu zavedeny do řídicí aplikace s příslušným diagnostickým vyhodnocením.



## 5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] Milčák P., Sedlák K., Krivánka D.: Kalibrace pětiotvorové sondy, Technická zpráva, KKE-FST ZČU, 2008
- [2] <http://home.zcu.cz/~ronesova/bastl/files/modbus.pdf>
- [3] Modbus Application Protocol Specification V 1.1b, <http://modbus.org>
- [4] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Modbus>
- [5] [www.ni.com](http://www.ni.com)
- [6] [www.abb.com](http://www.abb.com)
- [7] Šimandl M.: Identifikace systémů a filtrace, ZČU v Plzni, 2011
- [8] Chaluš M.: Řízení kalibračního stendu tlakové sondy, Plzeň, Bakalářská práce, ZCU, 2011
- [9] Melichar, J.: Lineární systémy 1,2 – studijní texty. ZČU, 2011
- [10] ZVVZ Machinery: Ventilátory axiální rovnotlaké ARK 710 až 2000, Návod k používání
- [11] Liška J.: Metody diagnostiky velkých ložisek v časové a frekvenční oblasti, Plzeň, Diplomová práce, ZCU, 2005

## A VNĚJŠÍ LOŽISKO VENTILÁTORU SKF 2311K



Vnitřní průměr (d)	55 mm
Vnější průměr (D)	120 mm
Šířka (B)	43 mm