

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta aplikovaných věd

Katedra kybernetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

PLZEŇ, 2013

MICHAL CHALUŠ

zadání

P R O H L Á Š E N Í

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 14. května 2013

.....
vlastnoruční podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jindřichu Liškovi, Ph.D. za vedení práce, odborné konzultace a korekci. Dále bych rád poděkoval Ing. Kamilu Sedlákovi za odborné rady a pomoc při testování aplikace.

Anotace

Diplomová práce se zabývá vývojem nástroje pro řízení a vyhodnocení experimentů prováděných na testovacím zařízení pro lopatkové mříže. Řídicí aplikace se skládá z ručního ovládání, automatického měření a vizualizace dat. V další části této práce jsou zkoumány dynamické vlastnosti tlakových snímačů.

Klíčová slova

Lopatková mříž, středně-rychlostní tunel, řídicí aplikace, tlakové snímače, TwinCAT, LabVIEW.

Annotation

The thesis deals with the development of the tool for the control and the analysis of experiments which are carried out on the test stand for blade cascades. The control application consists of the manual control, automatic measurement and data visualization. In the next part of the thesis dynamic features of pressure sensors are researched.

Keywords

Blade cascades, middle-speed tunnel, the control application, pressure sensors, TwinCAT, LabVIEW.

Obsah

1	Úvod	1
2	Popis testovacího zařízení a předchozí aplikace	3
2.1	Testovací zařízení	3
2.2	Původní řídicí aplikace středně-rychlostního tunelu	8
3	Testování přímých lopatkových mříží	10
4	Požadavky a analýza nové aplikace	16
4.1	Požadavky na novou aplikaci	16
4.2	Analýza a návrh komunikačního schématu	17
5	Software	20
5.1	TwinCAT	20
5.2	LabVIEW	23
6	Komunikace s hardwarem	24
6.1	Komunikace s PLC BX9000	24
6.1.1	ADS protokol	24
6.1.2	Řízení krokových motorů	28
6.1.3	KL3454	33
6.1.4	KL3204	34
6.2	Komunikace s NetScanner 9116	34
6.3	Komunikace s vlhkoměrem TH2E	36
7	Řídicí aplikace	38
7.1	Struktura blokového diagramu	38
7.2	Uživatelské rozhraní	39
7.3	Inicializace	40
7.4	Ruční ovládání	42
7.4.1	Ruční ovládání traverzéry	43
7.4.2	Ruční snímání dat	44
7.4.3	Vyrovnání sondy do proudu vzduchu	46

7.5	Automatické měření	47
7.5.1	Měření v rovnoměrné mřížce	49
7.5.2	Měření ve vodorovné nebo svislé přímce	55
7.5.3	Rychlé proměření	56
7.5.4	Měření v nerovnoměrné mřížce	57
7.6	Testování aplikace	59
8	Testování snímačů Kulite	62
8.1	Snímače Kulite	62
8.2	Experiment	64
8.3	Zpracování dat	67
9	Závěr	71
	Literatura	73
A	Schéma aerodynamického tunelu	74
B	ADS parametry local process image	75
C	Seznam použitých registrů karty KL2531-1000	76
D	Ukázka m-filu phi_cpphi_cptheta.m	77
E	Kmitočtová charakteristika reproduktoru ARN-100-60/8	78
F	Obsah příloženého CD	79

Seznam obrázků

2.1	Středně-rychlostní aerodynamický tunel se zařízením pro měření lopatkových mříží.	3
2.2	Traverzér pro polohování sondy za lopatkovou mříží.	4
2.3	Schéma zapojení měření tlakových odběrů v jednotlivých rovinách.	5
2.4	PLC BX9000 s příslušnými kartami pro snímání veličin a řízení krokových motorů.	7
2.5	Uživatelský panel předchozí aplikace.	8
2.6	Schéma měřicí mřížky a označení poloh.	9
3.1	Typy testovaných lopatek založené na profilu VS 33: 1) <i>Prizmatická</i> , 2) <i>Banán I</i> , 3) <i>Banán II</i>	10
3.2	Pětivotrová sonda.	11
3.3	Grafy kalibračních koeficientů sondy používané při testování aplikace.	13
3.4	Popis souřadného systému lopatkové mříže a sondy, složky rychlosti.	14
4.1	Komunikační schéma zařízení.	18
5.1	Nastavení PLC v programu <i>PLC Control</i>	20
5.2	Ukázka nastavení linkování v <i>TwinCAT System Manageru</i>	22
6.1	Struktura ADS protokolu.	25
6.2	Ukázka zápisu dat pomocí ADS protokolu v programu LabVIEW.	28
6.3	Karta KL2531-1000 s popisem a krokové motory řady <i>AS10x0</i> , vše od firmy Beckhoff.	29
6.4	Ukázka komunikace s registry karty KL2531 v programu LabVIEW.	31
6.5	Karty KL3454 (vlevo) a KL3204 včetně popisu.	33
6.6	Inteligentní tlakový převodník <i>NetScanner 9116</i>	35
6.7	Základ blokového schématu subVI <i>cteni_aktualnich_hodnot.vi</i>	36
6.8	Ukázka komunikace s vlhkoměrem TH2E v programu LabVIEW.	37

7.1	Uživatelské rozhraní řídicí aplikace pro testování lopatkových mříží SRT_aplikace.exe	40
7.2	Okna pro nastavení inicializace testovacího zařízení.	41
7.3	Záložka <i>PLC parametry</i> pro nastavení <i>BX9000</i> s přednastavenými doporučenými hodnotami.	42
7.4	Záložka <i>Ruční ovládání</i> pro libovolné polohování s traverzěrem, snímání hodnot atd.	43
7.5	Vlevo okno pro nastavení parametrů snímání dat, vpravo číselné zobrazení měřených veličin.	45
7.6	Ukázka histogramu naměřených dat z kanálu NetScanneru.	46
7.7	Ukázka nastavení a průběhu vyrovnání sondy do proudu vzduchu.	47
7.8	Záložka <i>Automatické měření</i> při probíhajícím testování lopatkové mříže.	48
7.9	Levé okno slouží pro nastavení parametrů měřicí mřížky, vpravo je patrná její vizualizace.	49
7.10	Okno pro nastavení výstupních souborů.	51
7.11	Levé okno slouží pro nastavení parametrů sběru dat během automatického měření, vpravo okno s informacema o měření.	53
7.12	Zobrazení vyhodnocených dat automatického měření na záložce <i>Zpracovaná data</i>	55
7.13	Ukázka nastavení měřicí mřížky pro rychlé proměření (vlevo) a vyhodnocených dat v tomto režimu.	56
7.14	Ukázka nastavení zón pro nerovnoměrnou mřížku.	58
7.15	Ukázka nerovnoměrné mřížky.	59
7.16	Ztrátový součinitel celkového tlaku ζ_M za lopatkovou mříží při měření v rovnoměrné mřížce (vlevo) a nerovnoměrné (vpravo).	61
8.1	Struktura snímačů od firmy Kulite (zdroj [6]).	63
8.2	Popis snímače <i>XCQ-093</i> (zdroj [6]).	64
8.3	Aparatura prováděného experimentu.	65
8.4	Uživatelské okno aplikace <i>Merici_aplikace.vi</i>	66
8.5	Ukázka úpravy primárních dat před dalším zpracováním.	67
8.6	Ukázka vygenerovaného spektra.	68

8.7	Porovnání všech tří snímačů v dolním frekvenčním pásmu. . .	69
8.8	Porovnání procentuálních odchylek dynamických vlastností XCQ-093 a XCEL-100.	70
A.1	Schéma přetlakového středorychlostního aerodynamického tunelu.	74
E.1	Kmitočtová charakteristika reproduktoru ARN-100-60/8. . . .	78

Seznam tabulek

1	Struktura local process image.	26
2	Výsledky testování aplikace.	60
3	ADS parametry.	75

Seznam symbolů a zkratk

SRT	středně-rychlostní aerodynamický tunel
USB	universální sériová sběrnice pro připojení periférií k počítači
TCP/IP	sada protokolů pro komunikaci v počítačové síti
subVI	část blokového diagramu v LabVIEW uzavřená v bloku
SPINEL	protokol pro komunikaci s vlhkoměrem TH2E

1 Úvod

Mezi nejvýznamnější historické milníky v oblasti vědy patří rok 1800 a objevení Voltova článku jako stálého zdroje elektrického proudu. Od této doby ušli vědci a vynálezci velmi dlouho cestu v oblasti poznávání elektrické energie a svými vynálezy učinili svět závislým na její výrobě. V dnešním světě si lze těžko představit den bez ní, naopak každým dnem její spotřeba stoupá. Zdroje, ze kterých ji však lze získávat, nejsou nevyčerpatelné. Jednou z možností, jak je ušetřit, je oblast výzkumu a vývoje pro lepší využití zdrojů, zvýšení účinností celých elektráren. Tato oblast se staví z hlediska zájmu o nové technologie do popředí v celém světě, což sebou nese i velmi zajímavé finanční zhodnocení.

Jeden ze základních prvků elektráren tvoří turbíny, které jsou roztáčeny průchodem páry nebo vody skrz lopatky. Jejich výrobou se u nás zabývá například firma **Doosan Škoda Power s.r.o.** Kromě výroby turbín se však zabývá i výzkumem a vývojem nových návrhů a postupů. Tuto činnost má na starosti **Úsek Rozvoje** Doosan Škoda Power s.r.o. se svojí experimentální laboratoří.

Jednou z oblastí, které jsou zkoumány, je proudění páry resp. vzduchu v experimentálních podmínkách. Snahou je samozřejmě vyvinout tvar lopatky s co nejvyšší účinností, resp. co nejnižšími ztrátami proudícího vzduchu nebo páry. Pro testování lopatek vsazených do mříže se využívá testovací zařízení se středně-rychlostním tunelem umístěné v experimentální laboratoři Doosan Škoda Power s.r.o. Na lopatky je ústím tunelu přiváděn proud vzduchu, který je snímán před i za lopatkovou mříží pomocí tlakových sond. Sondami je nutné pohybovat v prostoru pomocí krokových motorů. Vyhodnocením dat ze snímačů před a za mříží se určí vlastnosti testovaných lopatek. Cílem této diplomové práce je vyvinout novou řídicí aplikaci testovacího zařízení, která nahradí předchozí již nevyhovující. Největším problémem aplikace byl příliš dlouhý sběr dat z prostoru za lopatkovou mříží (přibližně 8 hodin) a chybějící možnosti pro vyhodnocení a vizualizaci dat. Tento nový nástroj by měl

poskytnout širší možnosti v ovládání zařízení s hlavním požadavkem na vyřešení uvedených problémů. Dále by měla zůstat aplikace (oproti předchozímu řešení) otevřená pro další budoucí doplnění funkcemi dle nových požadavků.

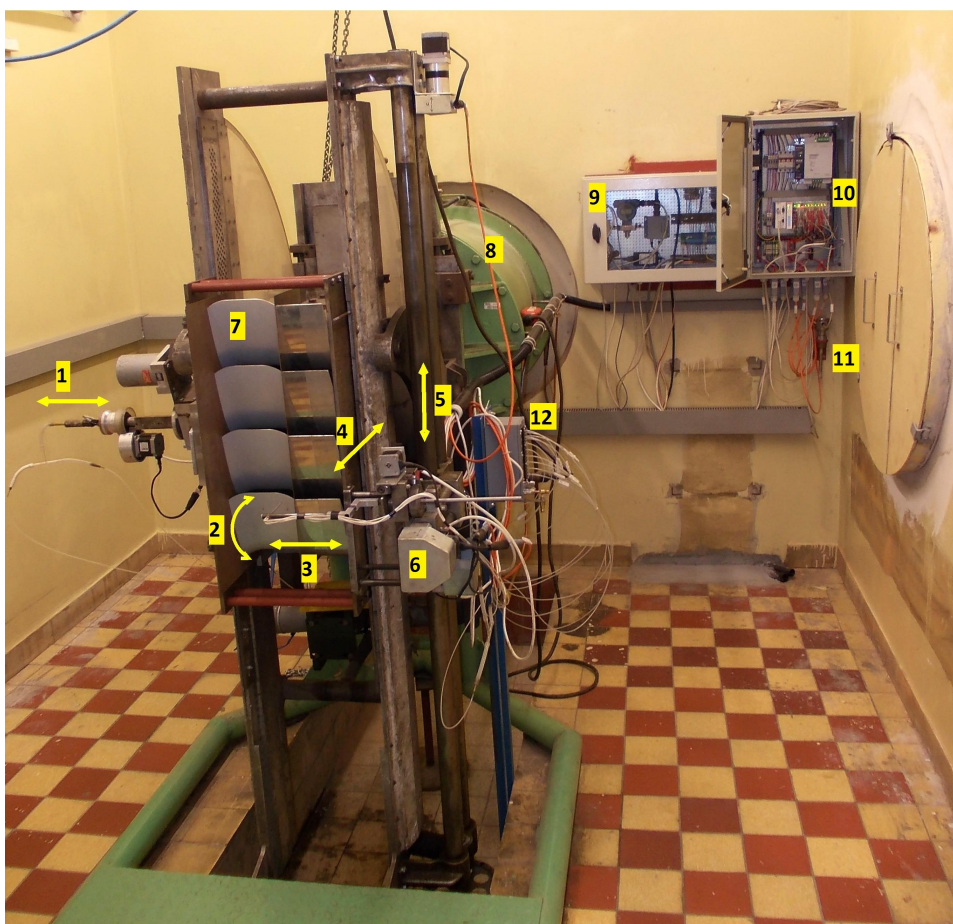
Navíc v rámci spolupráce s Doosan Škoda Power s.r.o. byla využita možnost zapůjčení si tlakových snímačů od firmy **Kulite**, které jsou vhodné pro měření dynamických vlastností proudícího média. Nových znalostí by se následně mohlo využít na testovacím zařízení pro lopatkové mříže, kde jsou zkoumány pouze statické veličiny, nebo při měření v turbínových tělesech v projektech Katedry kybernetiky Západočeské univerzity v Plzni.

2 Popis testovacího zařízení a předchozí aplikace

Před začátkem vývoje nové řídicí aplikace bylo nutné se seznámit s testovacím zařízením, jeho prvky a původní aplikací.

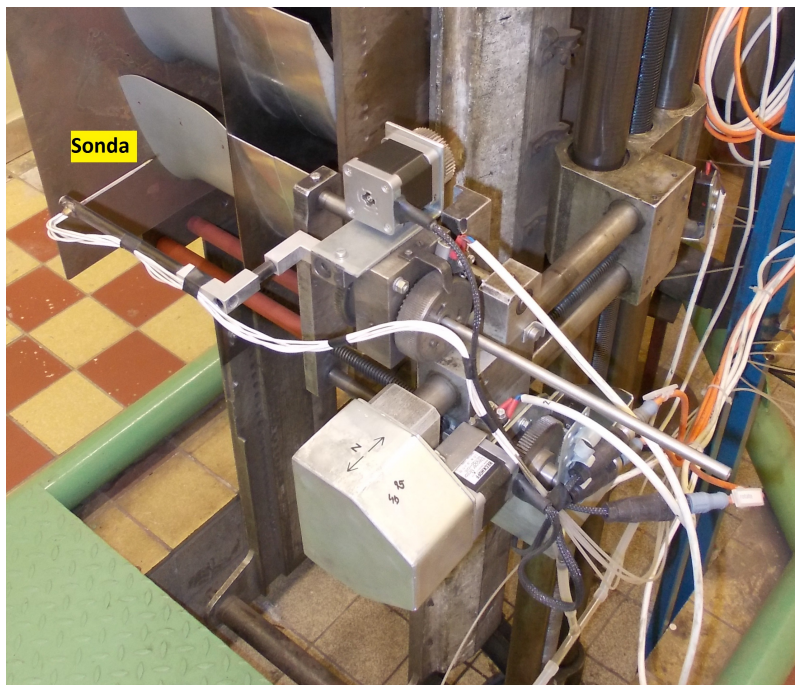
2.1 Testovací zařízení

Zařízení pro testování lopatkových mříží je umístěno v experimentální laboratoři firmy Doosan Škoda Power, s.r.o., obr. 2.1.



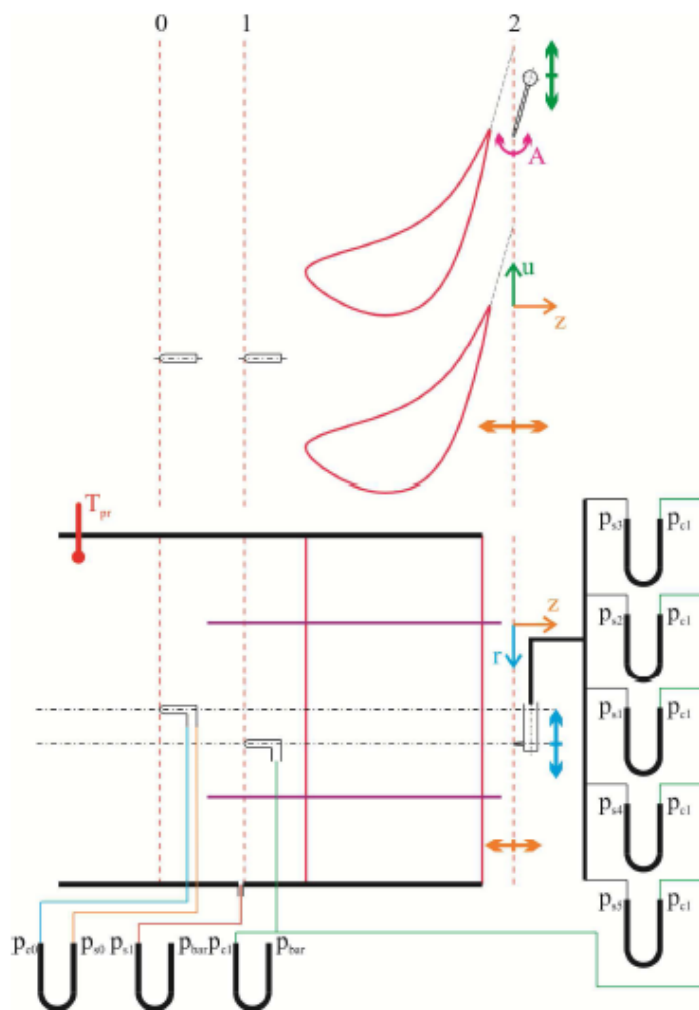
Obr. 2.1: Středně-rychlostní aerodynamický tunel se zařízením pro měření lopatkových mříží.

Základem je středně-rychlostní aerodynamický tunel (SRT), jehož ústí je na obrázku pod číslem 8. Schéma tunelu lze nalézt v přílohách na obr. A.1, popis jeho návrhu a výstavby viz [1]. Proudění vzduchu tunelem je zajištěno 150 kW motorem spojený kotoučovou spojkou s axiálním ventilátorem JU 60 s maximálním průtočným množstvím vzduchu $20 \text{ m}^3/\text{s}$ a stlačením 4400 Pa. Tunel dále obsahuje bypass pro řízení průtočného množství a sítě pro usměrnění proudu. Úhel náběhu proudu na lopatkovou mříž (číslo 7) je nastavitelný v rozmezí 4-115°.



Obr. 2.2: Traverzér pro polohování sondy za lopatkovou mříží.

V tunelu se nachází Prandtlova sonda pro sběr dat v rovině 0 (schéma celého zapojení měření viz obr. 2.3), podle nichž se nastaví parametry tunelu. Ještě před lopatkovou mříží v rovině 1 je pomocí Pitotovy trubice sbírán celkový a statický tlak prostřednictvím odběru tlaku na stěně. Sonda je umístěna do proudu vzduchu a je s ní pohybováno po šířce lopatky (na obr. 2.1 znázorněn směr pod číslem 1). K rámu, ve kterém je uchycena lopat-



Obr. 2.3: Schéma zapojení měření tlakových odběrů v jednotlivých rovinách.

ková mříž, je připevněno traverzovací zařízení (číslo 6), v detailu na obr. 2.2. Ten má za úkol pohybovat s pětivotorovou sondou (obr. 3.2) pro sběr tlaků za lopatkovou mříží v rovině 2 ve třech přímočarých osách a jedné rotační:

- Osa u – přímočará, na obr. 2.1 znázorněn směr pod číslem 5.
- Osa z – přímočará, na obr. 2.1 znázorněn směr pod číslem 4.
- Osa r – přímočará, na obr. 2.1 znázorněn směr pod číslem 3, pohyb Pitotovou trubicí je svázán s touto osou.

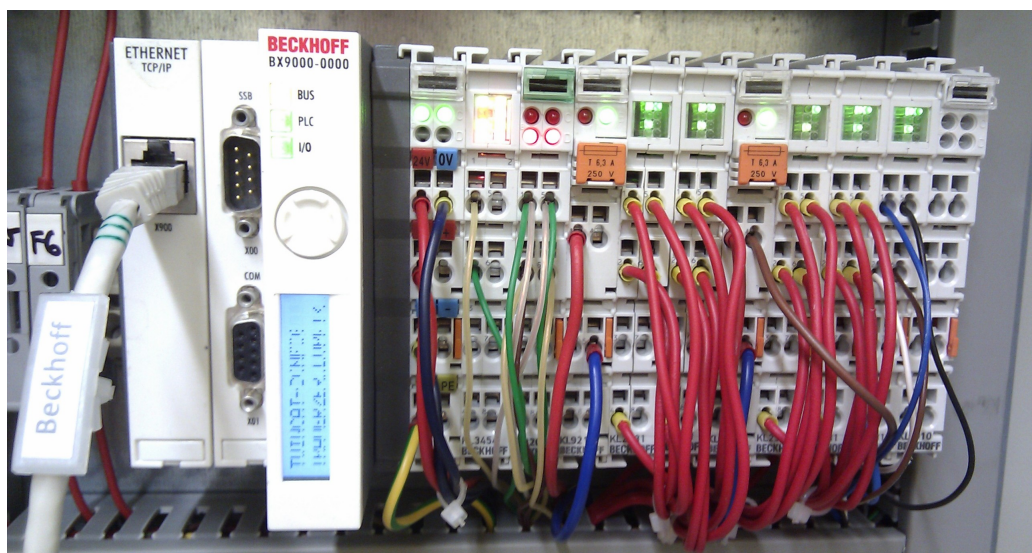
- *Osa rotace A* – rotační osa kolem osy r , na obr. 2.1 znázorněn směr pod číslem 3.

Tlakové odběry ze sond jsou přivedeny na inteligentní tlakový převodník **Netscanner 9116** (na obr. 2.1 pod číslem 12) od firmy **Pressure Systems, Inc.**. Je vybaven 16 samostatnými piezorezistivními tlakovými snímači. Základem každého tlakového kanálu přístroje je Wheatstoneův můstek na samostatném křemíkovém krystalu, jenž dokáže reagovat i na velmi malé změny odporu způsobené změnou tlaku. Systém je extrémně odolný proti přetlakovým impulzům a nepřesnosti. Nelinearity a hystereze jsou omezeny na $\pm 0,05\%$ rozsahu. Výstupní napěťové signály z tlakových snímačů jsou připojeny k digitálně adresovaným analogovým multiplexorům – elektronickým přepínačům. Každý výstup tlakového čidla je vybrán, kódován a nasměrován na vstup zesilovače a v binárním kódu zaveden k danému definovanému multiplexoru. Scanner je také vybaven automatickou vnitřní kalibrací vůči změnám teploty nebo softwarovou kalibrací pro vyrovnání tlakových kanálů. Ke komunikaci s nadřazeným počítačem je vybaven mimo jiné TCP/IP protokolem.

Další důležitou částí testovacího stendu je PLC **BX9000** (detail na obr. 2.4) firmy **Beckhoff**, jež implementuje otevřené automatizační systémy založené na technologii PC Control. Jedná se o sběrníkový řídicí terminál s ethernetovým master/slave rozhraním podporující protokoly ModbusTCP, ADS/TCP a ADS/UDP. Má za úkol řídit, programovat a obstarávat připojené sběrníkové terminály (karty), kterých může být až 64. V tomto případě je osazen následujícími kartami:

- KL3454 – snímání proudového signálu z barometru **Rosemount 2088** umístěného ve skřínce pod číslem 9 na obr. 2.1.
- KL3204 – sběr dat z teplotních snímačů **PT100**, první měří teplotu proudu uvnitř aerodynamického tunelu, druhý teplotu okolí (na obr. 2.1 číslo 11).
- 5x KL2531-1000 – řídicí karty pro ovládání krokových motorů.

- KL9210 – napájecí karty pro krokové motory.
- KL9010 – koncový terminál.



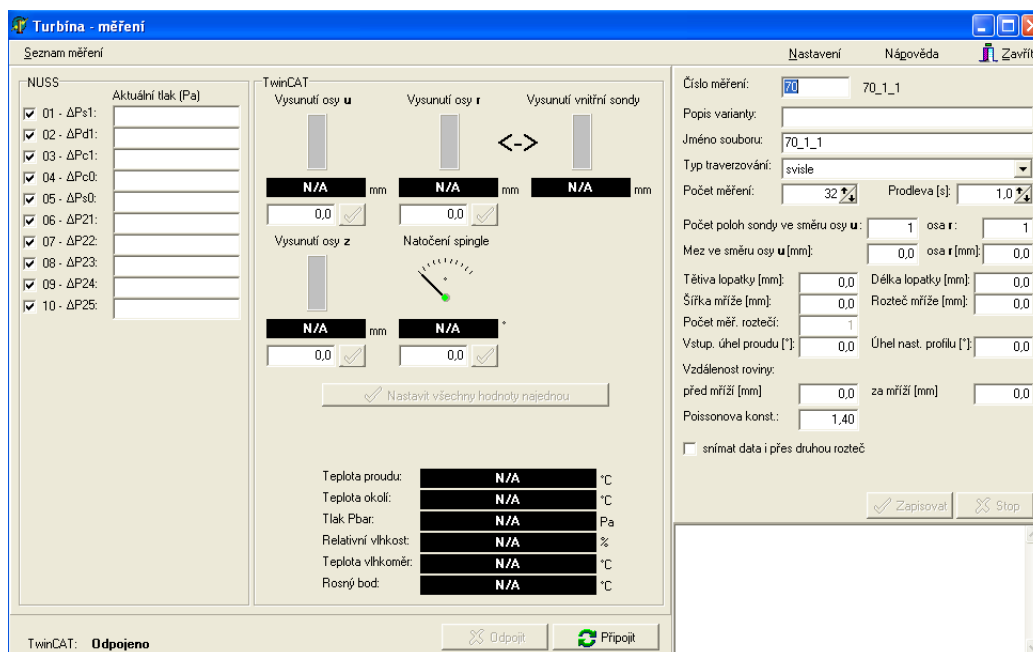
Obr. 2.4: PLC BX9000 s příslušnými kartami pro snímání veličin a řízení krokových motorů.

Pohyb traverzéro v jedné rotační a ve třech přímočarých osách a Pitotovy sondy zajišťují krokové motory typu AS1020-1000 a AS1030-1000 taktéž od firmy Beckhoff. Jde o synchronní motory s vysokým počtem pólů. Mají velký držící moment a velmi dobrou schopnost polohování. Na jednu otáčku disponují 200 kroky, což znamená rozlišení $1,8^\circ$ na krok. Pro převedení na přímočarý pohyb je využito lineárního vedení. Pro velké momenty dané hlavně hmotností traverzéro jsou převody z rotačního na lineární pohyb navíc zpřevodovány. Dále je každá osa vybavena jedním koncovým spínačem pro možnost uvedení zařízení do výchozí polohy.

Posledním prvkem zařízení je síťový vlhkoměr TH2E (umístěn ve skříňce pod číslem 9 na obr. 2.1) od firmy **Papouch s.r.o.** sloužící pro měření teploty okolí, vlhkosti a rosného bodu.

2.2 Původní řídicí aplikace středně-rychlostního tunelu

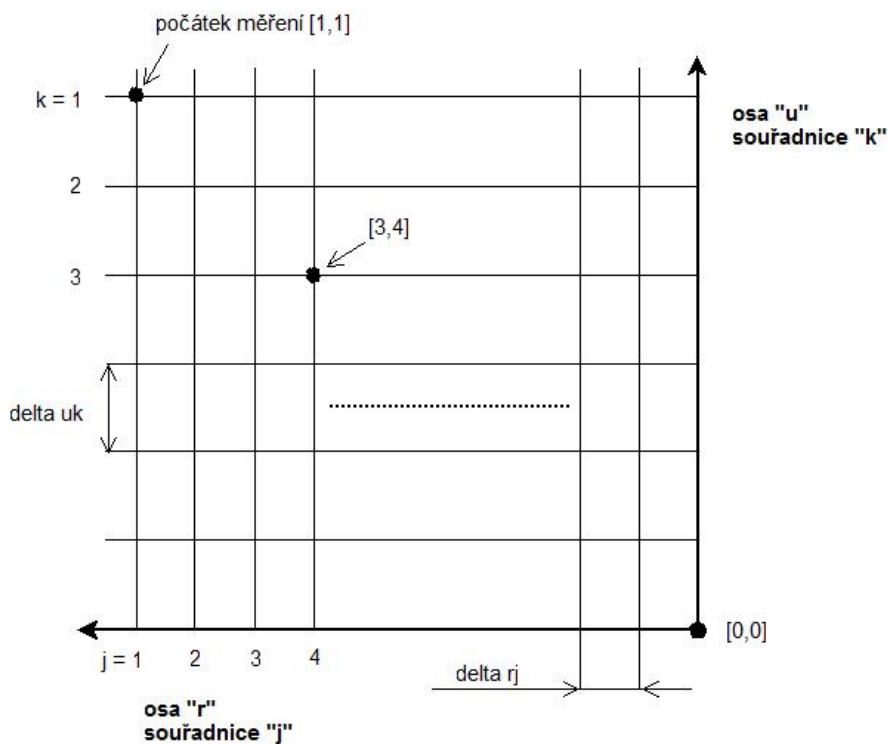
Předchozí aplikace pro ovládání testovacího zařízení se skládá z řídicího programu napsaného v integrovaném vývojovém prostředí *Delphi* (uživatelské rozhraní na obr. 2.5) a programu uloženého v PLC. Po připojení se k testovacímu zařízení, což znamená navázat komunikaci s výše uvedeným hardwarem, umožňuje program ruční nebo automatický režim. V ručním módu může uživatel libovolně pohybovat sondou v oblasti za lopatkovou mříží a snímat v ní aktuální data ze všech senzorů. Lze také uvést zařízení do výchozí (koncové) polohy sjetím na koncové spínače.



Obr. 2.5: Uživatelský panel předchozí aplikace.

Druhou variantou je automatický režim snímání dat, který probíhá v rovině dané osami u a r , schéma měřicí mřížky a označení bodů viz obr. 2.6. Uživatel nastaví traverzér do počátečního bodu $[0,0]$. Nastaví meze v obou osách (bod $[1,1]$) a počet poloh v jednotlivých osách. Program pak vygeneruje rovnoměrnou mřížku. Uživatel dále může nastavit počet měření v každém bodě

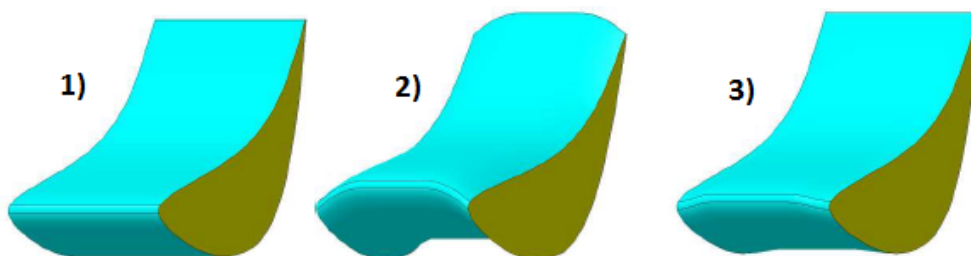
a časovou prodlevu mezi těmito body. Hodnotu veličiny představuje průměr těchto hodnot. Poslední částí je vyplnění informací o měřené lopatkové mřížce jako její rozteč, délku atd. Po spuštění automatického měření začíná měření v bodě [1,1], odkud postupuje proměření mřížky svislým nebo vodorovným travézováním až k počátečnímu bodu [0,0]. Všechna data jsou ukládána do databáze a jejich vyhodnocení je prováděno externě, např. v Matlabu.



Obr. 2.6: Schéma měřicí mřížky a označení poloh.

3 Testování přímých lopatkových mříží

Testovací zařízení je určeno pro měření přímých lopatkových mříží (na obr. 2.1 číslo 7) umístěných na výstupu z tunelu, které se skládají ze 4 lopatek stejného typu. Mezi nimi vzniknou 3 mezilopátkové kanály, které jsou proměřovány. Ukázka testovaných lopatek je na obr. 3.1. V této části bude stručně popsáno vyhodnocení měření testovaných profilů, jež bude využito v nové aplikaci, vycházející včetně obrázků z podrobné zprávy [2].

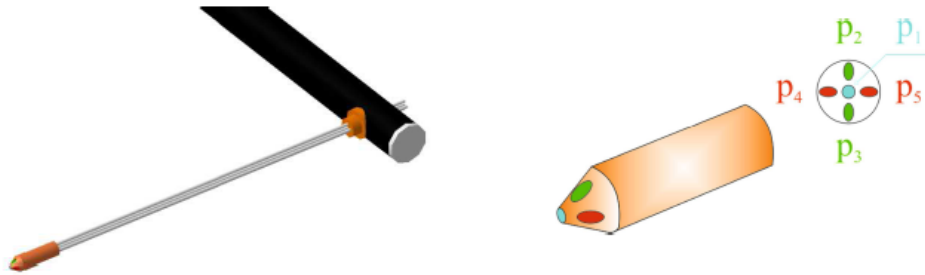


Obr. 3.1: Typy testovaných lopatek založené na profilu VS 33: 1) *Prizmatická*, 2) *Banán I*, 3) *Banán II*.

Snahou je vyvinout tvar lopatky s co nejnižší ztrátou, resp. co nejvyšší účinností. Kromě ztrát termodynamických, které jsou dány ztrátami ve statoru, rotoru a ztrátou výstupní rychlosti, závisí účinnost turbínového stupně také na přídatných ztrátách. Na tomto testovacím zařízení jsou zkoumány 2 druhy:

- *Profilové ztráty* – dány především třením v mezní vrstvě a vířením za odtokovou hranou.
- *Ztráty způsobené sekundárním prouděním* – způsobeny prouděním po výšce lopatky, které vzniklo množstvím vířů v omezujících oblastech mezilopátkového kanálu.

Prostor za mříží je snímán pomocí pětiotvorové sondy umožňující zrekonstruovat trojrozměrné rychlostní pole, viz obr. 3.2. Sonda je popsána následujícími parametry, které se budou dále vyskytovat v matematických vzorcích:



Obr. 3.2: Pětivotvorová sonda.

- p_1 – střední odběr tlaku,
- p_2, p_3 – levý, resp. pravý odběr tlaku,
- p_4, p_5 – horní, resp. dolní odběr tlaku,
- φ – úhel náběhu proudu v rovině $u-z$, viz obr. 3.4,
- ϑ – úhel náběhu proudu v rovině $r-z$, viz obr. 3.4.

Ještě před měřením musí být ale sonda zkalibrována, což probíhá na podobném zařízení ve stejné laboratoři Doosan Škoda Power, s.r.o. Sonda je umisťována do proudu vzduchu pod různými úhly φ a ϑ . V těchto bodech jsou snímány hodnoty tlaků ze všech 5 kanálů sondy a navíc referenční hodnoty celkového p_c a dynamického p_d tlaku proudícího vzduchu. Z nich se vypočte hodnota statického tlaku p_s a průměrná hodnota \bar{p} tlaků z kalibrované sondy, vypouští se prostřední odběr tlaku..

$$p_s = p_c - p_d, \quad (1)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{4}(p_2 + p_3 + p_4 + p_5). \quad (2)$$

Dále jsou spočteny kalibrační koeficienty C_p^{STAT} , C_p^{TOTAL} , C_p^{PHI} a C_p^{THETA} , kde první dva určují vliv směru náběhu proudu na statický, resp. celkový tlak a druhé dva koeficienty určují vliv směru náběhu proudu na protilehlé odběry sondy:

$$C_p^{STAT} = \frac{p_1 - p_s}{p_1 - \bar{p}}, \quad (3)$$

$$C_p^{TOTAL} = \frac{p_1 - p_c}{p_1 - \bar{p}}, \quad (4)$$

$$C_p^{PHI} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - \bar{p}}, \quad (5)$$

$$C_p^{THETA} = \frac{p_4 - p_5}{p_1 - \bar{p}}. \quad (6)$$

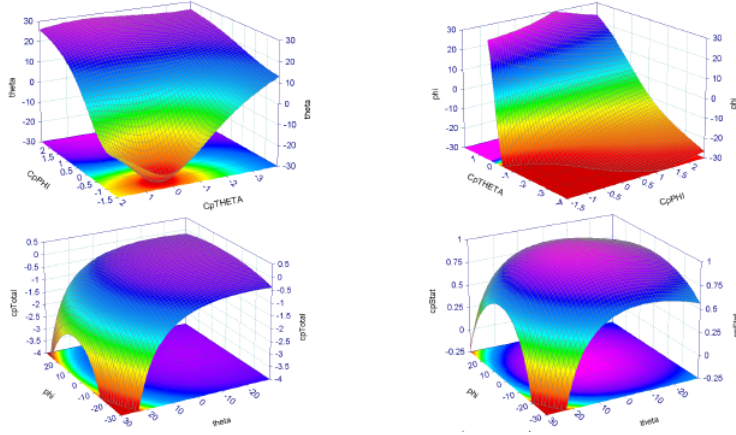
Po zkalibrování sondy, to znamená proměření všech bodů, se výsledná data proloží regresními křivkami (obr. 3.3) a určí se tak funkce dvou proměnných $\varphi(C_p^{PHI}, C_p^{THETA})$, $\vartheta(C_p^{PHI}, C_p^{THETA})$, $C_p^{STAT}(\varphi, \vartheta)$ a $C_p^{TOTAL}(\varphi, \vartheta)$, ze kterých se vychází při testování lopatkových mříží. Zde se také vyhodnocují data pro každý bod. Z dat ze sondy se opět spočte hodnota průměrného tlaku \bar{p} a poté hodnoty kalibračních koeficientů C_p^{PHI} a C_p^{THETA} . Využitím regresních rovnic z kalibrace se zpětně dopočítává úhel náběhu proudu φ a ϑ na pětiovorovou sondu. Pomocí nich se spočtou hodnoty C_p^{STAT} a C_p^{TOTAL} a dále hodnoty celkového a statického tlaku za lopatkovou mříží (rovina 2):

$$p_{s2} = p_1 - C_p^{STAT}(p_1 - \bar{p}), \quad (7)$$

$$p_{c2} = p_1 - C_p^{TOTAL}(p_1 - \bar{p}). \quad (8)$$

Jelikož proudícím médiem je vlhký vzduch, směs suchého vzduchu a přehřáté vodní páry, je třeba provést korekci měření, neboť vlivem odlišné vlhkosti se mění parametry proudícího média. Proto je zařízení doplněno o vlhkoměr snímající teplotu, vlhkost ϕ a teplotu rosného bodu. Nejprve se určí tlak syté vodní páry z teploty proudu t_p :

$$p_{sp} = 9,80665 \cdot (62,28 + 4,5256t_p + 0,14529t_p^2 + 2,7515 \cdot 10^{-3}t_p^3 + 2,7941 \cdot 10^{-5}t_p^4 + 2,7935 \cdot 10^{-7}t_p^5). \quad (9)$$



Obr. 3.3: Grafy kalibračních koeficientů sondy používané při testování aplikace.

Následuje určení měrné vlhkosti vzduchu x pomocí atmosférického tlaku p_b a relativní vlhkosti ϕ :

$$x = 0,622 \frac{\phi \cdot p_{sp}}{p_b - \phi \cdot p_{sp}}. \quad (10)$$

Nakonec jsou spočítány veličiny individuální plynová konstanta vlhkého vzduchu r_{vv} a hustota vlhkého vzduchu ρ_{vv} :

$$r_{vv} = \frac{r_{sv} + x \cdot r_p}{1 + x}, \quad (11)$$

$$\rho_{vv} = \frac{p_{s2} + p_{s1}}{2r_{vv}(t_p + 273,15)}, \quad (12)$$

kde $r_{sv} = 287,14$ je individuální plynová konstanta suchého vzduchu a $r_{vv} = 461,5$ je individuální plynová konstanta páry.

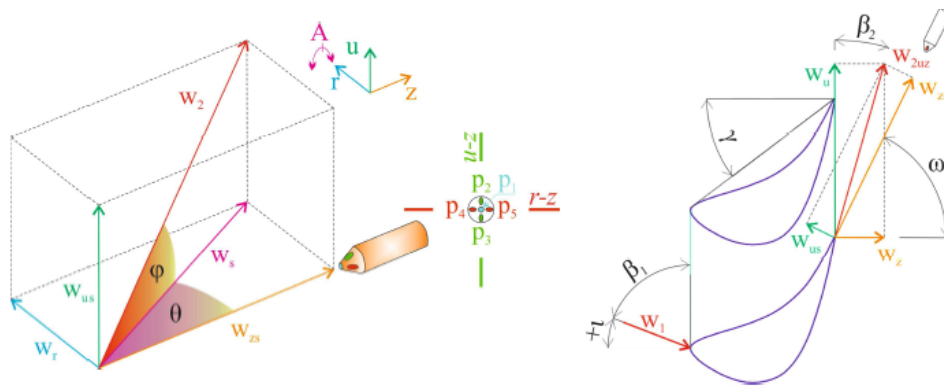
Prvním důležitým parametrem získaným z naměřených dat je rozložení rychlosti proudu w_1 po šířce lopatky před lopatkovou mříží (v rovině 1). K jejímu určení je nutné znát hodnoty statického p_{s1} a celkového p_{c1} tlaku

měřených pomocí Pitotovy trubice umístěné 50 mm před mříží:

$$w_1 = \sqrt{\frac{2(p_{c1} - p_{s1})}{\rho_{vv}}}. \quad (13)$$

Rychlosti proudu jsou měřeny i za lopatkovou mříží pomocí dat z pětio-
tvorové sondy, ale tentokrát už jsou počítány v celé oblasti mezilopatkového
kanálu a ne jen po šířce:

$$w_2 = \sqrt{\frac{2(p_{c2} - p_{s2})}{\rho_{vv}}}. \quad (14)$$



Obr. 3.4: Popis souřadného systému lopatkové mříže a sondy, složky rychlosti.

Tento modul vektoru rychlosti lze rozložit do 6 složek vyznačených na
obr. 3.4. Vlevo se nachází zvolený souřadný systém mříže a vpravo souřadný
systém sondy, který je vůči prvnímu pootočen o úhel ω , což představuje
natočení sondy v ose rotace A . Parametry β_1 , β_2 a γ jsou určeny geometric-
kými rozměry lopatkové mříže. Jejich výpočet už lze snadno získat pomocí

goniometrických funkcí:

$$w_{us} = w_2 \cdot \sin \varphi, \quad (15)$$

$$w_{zs} = w_2 \cdot \cos \varphi \cdot \cos \vartheta, \quad (16)$$

$$w_r = w_2 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \vartheta, \quad (17)$$

$$w_{2uz} = \sqrt{(w_{us}^2 + w_{zs}^2)}, \quad (18)$$

$$w_z = w_{2uz} \cdot \cos \left(\omega + \arctan \left(\frac{w_{us}}{w_{zs}} \right) \right), \quad (19)$$

$$w_u = w_{2uz} \cdot \sin \left(\omega + \arctan \left(\frac{w_{us}}{w_{zs}} \right) \right). \quad (20)$$

Nejdůležitější veličinou v této aplikaci bude výpočet ztrátového součinitele celkového tlaku ζ_M :

$$\zeta_M = \frac{p_{c1} - p_{c2}}{p_{c1} - p_{s2}}. \quad (21)$$

Na závěr je nutné ještě podotknout, že při odvození těchto rovnic je v určitých místech použito zjednodušujících postupů, které mohou být provedeny za předpokladu proudění nestlačitelného média, tedy pro $Ma \leq 0,4$.

4 Požadavky a analýza nové aplikace

Nová aplikace by měla navázat na kalibrační aplikaci pro kalibrační stend umístěný také v experimentální laboratoři v budově Úseku Rozvoje Doosan Škoda Power s.r.o. vytvářenou v programu LabVIEW, viz [3].

4.1 Požadavky na novou aplikaci

Původní aplikace má jednu velmi výraznou negativní vlastnost, kterou je příliš dlouhý průběh automatického měření. Program neumožňuje nižší vzorkovací frekvenci než 1 Hz v měřeném bodě, ve kterém bývá obvykle snímáno alespoň 35 vzorků pro výslednou průměrnou hodnotu. Takže proměření mřížky (obr. 2.6) jednoho mezilopatkového kanálu, kde v ose u je 36 pozic a v ose r 16 pozic, trvá kolem **8 hodin** při rychlejším vodorovném travrozování. Pokud se k tomu ještě připočte příprava měření a přibližně dvaceti minutové prohrátí tunelu před začátkem automatického režimu, přesahuje celkový čas klasickou pracovní dobu. Hlavním požadavkem na novou aplikaci je tedy **zkrácení** doby automatického měření.

Nová aplikace by měla umožňovat stejné možnosti jako původní, tedy ruční snímání dat, ruční pohyb s traverzám včetně najetí na koncové spínače, vložení informací o měřené lopatkové mříži a automatické proměření uživatelem zadané rovnoměrné mřížky v rovině $u-r$.

V rámci vývoje nové aplikace je ovšem velmi vhodné využít možností pro rozšíření potenciálu celého testovacího zařízení. Původní aplikace například neumožňuje žádnou vizualizaci získaných dat, která by mohla pomoci nalézt chybu v nastavení měření již v průběhu měření. Nová aplikace by navíc měla zůstat otevřená, to znamená, že někdo znalý problematiky měření a programování v LabVIEW by mohl přidat další funkce pro uživatele. Po konzultaci s pracovníky Úseku Rozvoje Doosan Škoda Power s.r.o. se dospělo k těmto návrhům pro vylepšení nové aplikace:

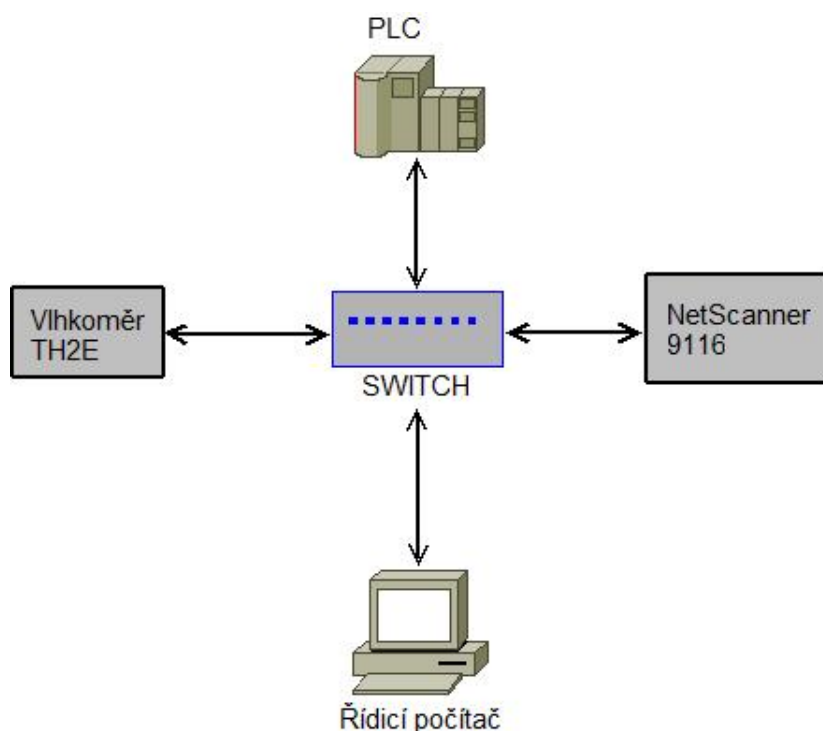
- *Vykreslování měřených veličin* – v ručním i automatickém režimu umož-

nit uživateli vykreslení libovolné měřené veličiny.

- *Statistické zpracování dat* – nastavení intervalu spolehlivosti pro zpracovávaná data, vykreslení histogramu primárních dat.
- *Vyrovnání sondy do proudu vzduchu.*
- *Odhad doby automatického měření* – před spuštěním i v průběhu měření.
- *Rychlé proměření* – uživatel si nastaví svislý a vodorovný řez, který bude automaticky proměřen. Bude si tak moct udělat prvotní obrázek o rychlostním profilu v mezilopatkovém kanálu.
- *Načtení regresních rovnic* – umožnění vkládání regresních rovnic z kalibrační aplikace, které budou dále využity.
- *Online vyhodnocení* – online vyhodnocení a zobrazení měřených dat v průběhu automatického měření.
- *Vyhodnocení rychlého měření a starých proměření* – vyhodnocení a zobrazení rychlého proměření, případně starých měřených dat.
- *Nerovnoměrná měřicí mřížka* – možnost dle zobrazení automatického měření/rychlého proměření nastavit nerovnoměrnou mřížku pro další měření skládající se z rovnoměrné mřížky a zhuštěných oblastí za odtokovými hranami lopatek a při stěně mříže.
- *Výstupní soubory* – změna formátu výstupního souboru s naměřenými daty (odstranění redundantních dat), možnost ukládání vyhodnocených dat a primárních nezprůměrovaných dat.

4.2 Analýza a návrh komunikačního schématu

Před začátkem vytváření nové aplikace bylo nutné pokusit se zjistit příčinu nízké vzorkovací frekvence, která stojí za časově náročným automatickým měřením. Proto byl alespoň náhledově prozkoumán řídicí program v počítači



Obr. 4.1: Komunikační schéma zařízení.

vytvořený v programu Delphi a také program nahraný v PLC. Komunikační schéma prvků testovacího zařízení je na obr. 4.1. PLC obsahuje vnitřní paměť, přes kterou komunikuje s řídicí aplikací. Ta ukládá do této paměti informace o tom, kde se má momentálně traverzér nacházet a zároveň, zda mají být snímána data. V PLC běží smyčka s programem, který testuje hodnoty v paměti a dle nich se řídí. Pokud tedy jsou nastavené nové pozice krokových motorů, převezme je a v rámci svého programu změní jejich pozici. Výslednou pozici pak zpětně zapíše do vnitřní paměti. Pokud mají být i snímána data z tlakového převodníku NetScanner 9116, spojí se s ním přes protokol TCP/IP a získá z něho nové hodnoty, které opět zapíše do své vnitřní paměti. Když jsou splněny všechny požadavky řídicího programu, vyšle mu signál o dokončení. Řídicí program převezme data z vnitřní paměti a uloží je do databáze. Následně pokračuje dalším bodem v měřicí mřížce.

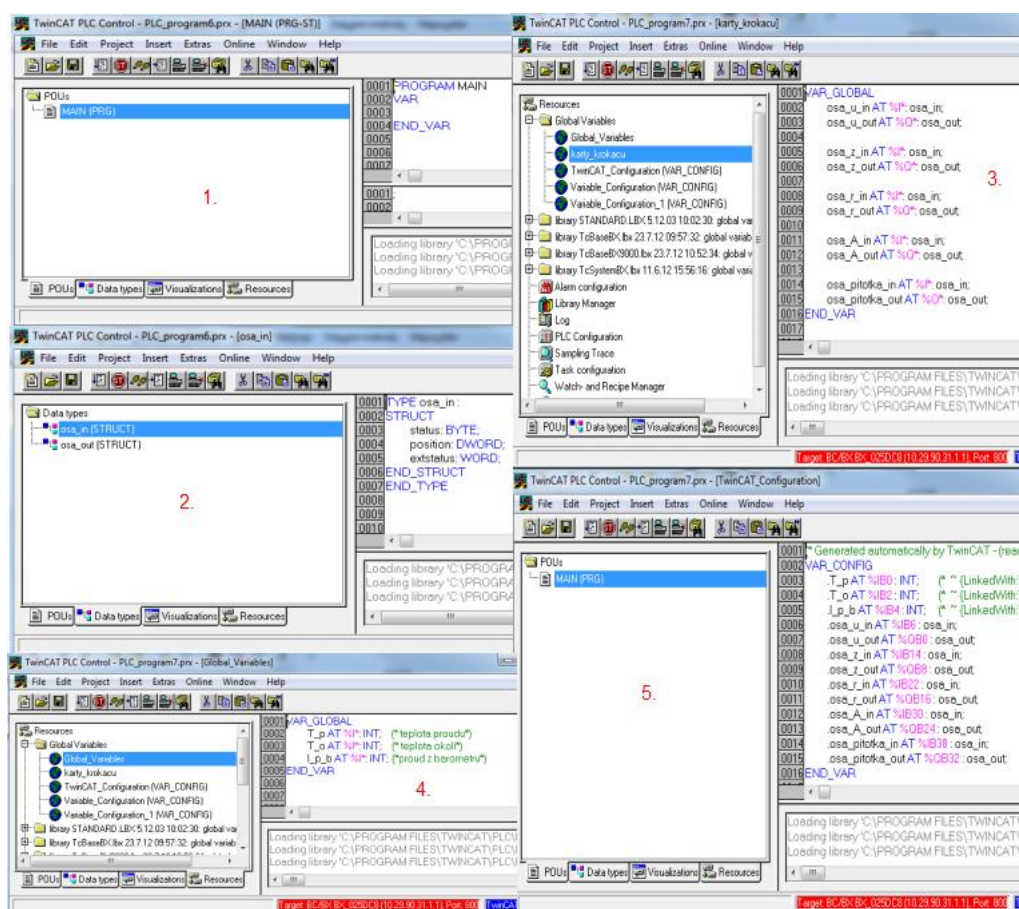
Jako hlavní příčina časově náročného měření byla tedy stanovena komuni-

kace mezi programy v počítači a PLC. Důsledek toho bylo rozhodnutí, že celá aplikace bude řízena jen z počítače a bude vytvořena v programu LabVIEW. Řídicí aplikace bude s každým prvkem komunikovat samostatně, což by mělo mít za důsledek urychlení snímání dat a tím celého měření. Navíc i řízení krokových motorů a snímání informací o teplotách a barometrickém tlaku z karet PLC bude přesunuto do aplikace v počítači. Z PLC se v podstatě stane jen vstupně-výstupní jednotka pro řízení krokových motorů a snímání dat, nebude obsahovat žádný program. V budoucnu se může uvažovat o nahrazení PLC jednoduššími jednotkami a jeho potenciálu využít v jiných zařízeních.

5 Software

Před popisem tvorby řídicí aplikace bude stručně popsán software nutný pro komunikaci s jednotlivými částmi zařízení.

5.1 TwinCAT



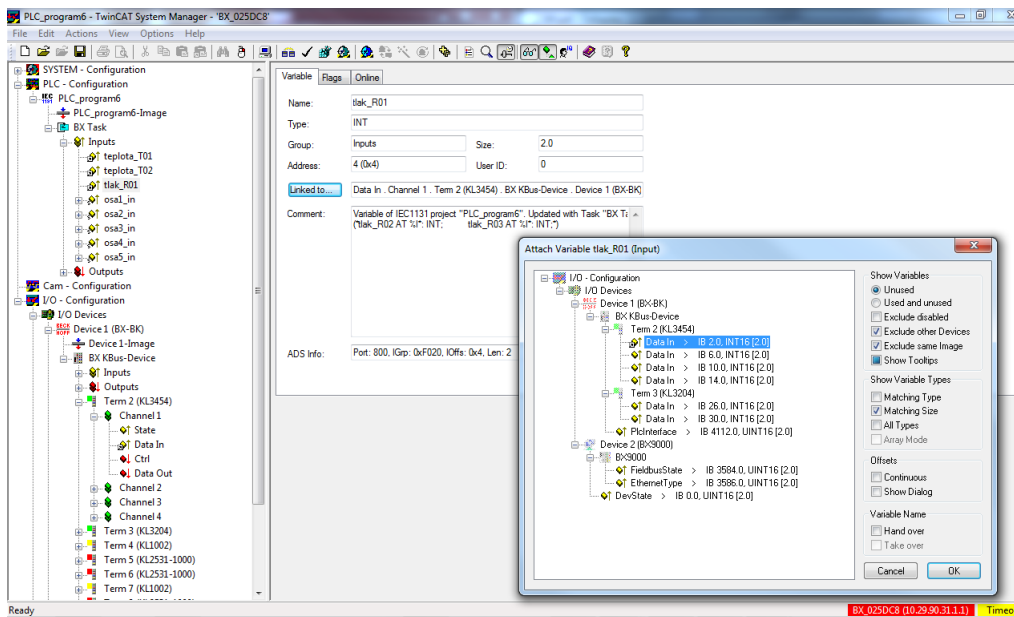
Obr. 5.1: Nastavení PLC v programu *PLC Control*.

Jak již bylo napsáno v předchozí kapitole, PLC BX9000 bude využito pouze jako vstupně-výstupní jednotka, ale i tak je třeba ho nastavit. To je umožněno pomocí softwarového systému *TwinCAT* taktéž od firmy Beckhoff. Skládá se z run-time systému vykonávající řízení programů v reálném čase a z vývojového prostředí pro programování, diagnostiku a konfiguraci. Tento

systém umožní „převést“ téměř každý počítač do real-time kontroleru s PLC systémem, NC zařízením, programovým prostředím a operační stanicí. Mimo jiné taky zahrnuje datovou komunikaci s uživatelským rozhraním a jinými programy přes otevřené Microsoft standardy (OPC, OCX, DLL atd.). TwinCAT poskytuje různé softwarové moduly, v tomto případě budou využity *PLC Control* pro programování PLC systému dle normy IEC 61131-3 a *System Manager* umožňující centrální konfiguraci nástrojů v TwinCAT systému, zde především jde o propojení fyzických a softwarových vstupů/výstupů a správu softwarových tasků.

Nejprve je třeba nastavit PLC v programu PLC Control, postup v tomto případě znázorňuje obr. 5.1. Hlavní program bude pouze příkaz ; (prázdný program), protože PLC nebude mít na starosti žádnou logiku či řízení, okno číslo 1. Důležité je nastavit v programu proměnné ke vstupům a výstupům karet, hlavně jejich datové typy. Zde před definicí proměnných je nutné nastavit novou strukturu pro komunikaci s kartami pro řízení krokových motorů, okno číslo 2, popis struktury bude upřesněn v další kapitole. Poslední částí je nastavení globálních proměnných, což znamená pojmenovat vstupy a výstupy, které budou řízeny a přiřadit jim správné datové typy, okna čísla 3 a 4. Spojení s fyzickými vstupy a výstupy provede až System Manager, proto jsou zde použity příkazy %I* a %Q*. Takto se program uloží (přípona „.prx“) a navíc v liště *Project* se zvolí příkaz *Build*. Program se tak přeloží do formátu pro System Manager (vytvoří soubor se stejným názvem a příponou „.tpy“, kde se pokračuje s nastavením.

Program System Manager má za úkol propojit fyzické vstupy a výstupy s proměnnými nadefinovanými v PLC Control, ukázka na obr. 5.2. V novém projektu se pravým tlačítkem myši rozklikne *PLC – Configuration* a zvolí se možnost *Append PLC Project*, kde se zvolí cesta k vygenerovanému souboru z PLC Control s příponou „.tpy“. Tím se program nahraje do System Manageru a jsou viditelné všechny proměnné, které byly zdefinovány. Dále v liště *Actions* se zvolí možnost *Choose Target System* a vybere se PLC, které má být nastaveno. Následuje výběr možnosti *Scan Devices* po roze-



Obr. 5.2: Ukázka nastavení linkování v *TwinCAT System Manageru*.

vření menu pravým kliknutím na *I/O Devices*. Tento příkaz načte všechny připojené karty k PLC (Term 2 až 10). Nyní uživatel může tzv. „slinkovat“ fyzické vstupy a výstupy s proměnnými programu. Ukázka je na obr. 5.2. Označením proměnné *tlak_R01* (představuje barometrický tlak, kde výstup barometru je přiveden na terminál KL3454) se v pravé části okna zobrazí její informace. Zvolením možnosti *Linked to* se proměnná spojí přímo s fyzickým vstupem, ke kterému je přiveden přívod z barometru. Je dobré si povšimnout řádku *ADS Info*, jehož hodnota bude později využita ke komunikaci pomocí programu LabVIEW. Po „nalinkování“ všech proměnných PLC programu následuje sekvence příkazů z lišty *Actions*: *Check Configuration*, *Generate Mappings* a *Activate Configuration*. Tímto krokem se automaticky vygeneruje propojení vstupů a výstupů v PLC programu, obr. 5.1 okno číslo 5.

Posledním krokem je nahrání programu do PLC, což se provede z PLC Control. V záložce *Online* příkazem *Choose Run-Time System* se opět vybere nastavované PLC a příkazem *Login* se spustí jeho propojení s počítačem. Otestovat program lze volbou *Run* a nahrát program natrvalo příkazem *Cre-*

ate *Bootproject*. Podrobnější informace o naprogramování a nastavení PLC lze najít na [4].

5.2 LabVIEW

Řídicí aplikace pro testování lopatkových mříží v SRT byla vytvářena ve vývojovém prostředí *LabVIEW version 12.0* od firmy **National Instruments**. Jedná se o vývojové prostředí primárně používané v oblasti měřicí techniky, řízení technologických procesů atd. Narozdíl od běžných textově orientovaných jazyků se jedná o grafický (G-jazyk) skládající se ze dvou částí:

- *Front panel* – slouží pro komunikaci s uživatelem, který zde po spuštění celé zařízení ovládá a zároveň vidí zpracovaná data ve vizuální podobě.
- *Block diagram* – zde probíhá vlastní programování, program se skládá z jednotlivých diagramů, jejichž škála je velmi rozsáhlá od komunikace s externími periferiemi, zpracování různých formátů dat, až po širokou nabídku programových struktur včetně základních jako např. for nebo while cyklus.

6 Komunikace s hardwarem

Před započítím vytváření řídicí aplikace v programu LabVIEW bylo nutné prozkoumat možnosti komunikace mezi tímto vývojovým prostředím a hardwarem testovacího zařízení pro lopatkové mříže, tedy s PLC BX9000, NetScanner 9116 a vlhkoměrem TH2E.

6.1 Komunikace s PLC BX9000

PLC BX9000 (obr. 2.4) je sběrnice řídicí terminál pro univerzální komunikaci mezi *fieldbus* systémem a senzory nebo akčními členy, které jsou přivezeny na sběrnice terminály (karty) PLC. Obsahuje programovatelný kontrolér dle *IEC 61131-3* a *K-sběrnici* pro komunikaci mezi kartami a řídicím terminálem. Program lze nahrát pomocí sériového kanálu nebo ethernetového rozhraní. PLC se nastavuje pomocí systému TwinCAT, přesné nastavení v tomto případě je popsáno v kapitole 5.1. Řídicí jednotka má programovatelnou paměť, datovou paměť a paměť pro zdrojový kód, všechny o velikosti 256 kB. Dále obsahuje tyto paměti po 2 kB:

- Paměť uchovávající hodnoty po opětovném zapnutí PLC.
- Paměť pro vstupy.
- Paměť pro výstupy.
- Tzv. „Flag“ pro nastavení příznaků.

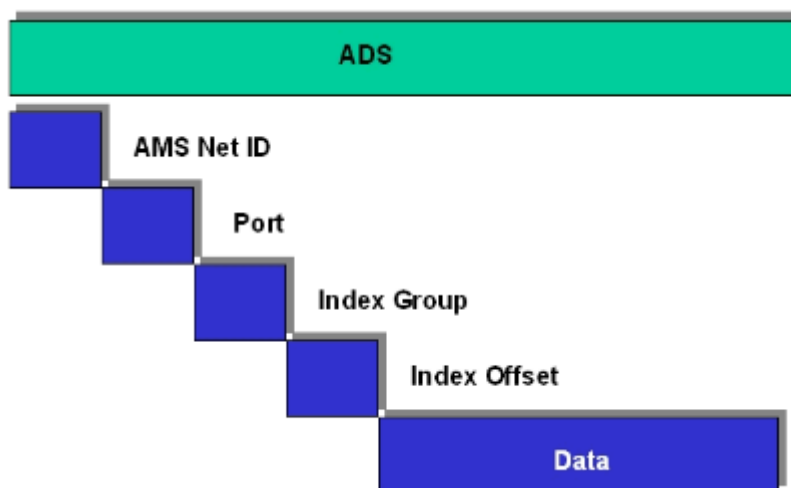
BX9000 podporuje protokoly ModbusTCP, ADS/TCP a ADS/UDP. Pro komunikaci mezi LabVIEW a PLC byla zvolena druhá možnost. Podrobnější popis PLC a jeho nastavení lze nalézt na [4].

6.1.1 ADS protokol

ADS protokol je transportní vrstva vyvinuta pro výměnu dat mezi různými softwarovými moduly. Při komunikaci mezi PLC a počítačem je umístěn na vrchu TCP/IP komunikace, tím umožní dát data k dispozici v celé síti. Mimo Beckhoff systémy existují 3 možnosti pro výměnu dat s jinými softwary:

- **ADS-OCX** – využívá *Active-X* komponent a nabízí standartní rozhraní např. pro Visual Basic nebo Delphi.
- **ADS-DLL** – možnost využití knihovny v programovacím jazyku C.
- **OPC** – využití standartního rozhraní pro komunikaci používaného v automatizačním průmyslu.

Program LabVIEW umožňuje využití všech tří variant. Po konzultaci s pracovníkem firmy **Dyger s.r.o.** (firma zastupující Beckhoff v České republice) byla zvolena druhá možnost, pro kterou je nutné stáhnout knihovnu *TcAdsDll.dll* z [4].



Obr. 6.1: Struktura ADS protokolu.

ADS funkce poskytují metody pro přímý přístup z počítače a je možné využít při komunikaci pomocí výše uvedených možností. Struktura ADS protokolu (obr. 6.1) se skládá z těchto částí:

- **AMS Net ID** – reference na adresované zařízení, skládá se z IP adresy a přidání řetězce „1.1“, např.: „10.29.90.31.1.1“.
- **Číslo portu** – rozlišuje různé části:

- Port 100 – slouží pro nastavení registrů PLC.
 - Port 300 – pro přístup k tzv. „fieldbus process data“.
 - Port 800 – tento port není přítomen vždy, zde ano pro přístup k tzv. „local process data“.
- **Index group** – rozlišení skupiny vstupů, výstupů a částí paměti pro flag.
 - **Index offset** – indikuje byte, od kterého se začne číst nebo psát.
 - **Data** – data, která jsou čtena nebo zapisována.

BX9000 umožňuje číst nebo zapisovat data do tzv. „local process image“ (struktura viz tabulka 1) přes port 800. Do této části paměti byly pomocí nastavení z kapitoly 5.1 nalinkovány všechny globální proměnné z programu PLC Control. To znamená, že je možné číst z karet vstupní informace a zapisovat hodnoty na jejich výstupy přímo z programu v LabVIEW.

Index group	Význam	Index offset
0xF020	Vstupy	0-2047
0xF021	Vstupní bity	0-16376
0xF030	Výstupy	0-2047
0xF031	Výstupní bity	0-16376
0x4020	Flags	0-4095
0x4021	Flag bity	0-32760

Tabulka 1: Struktura local process image.

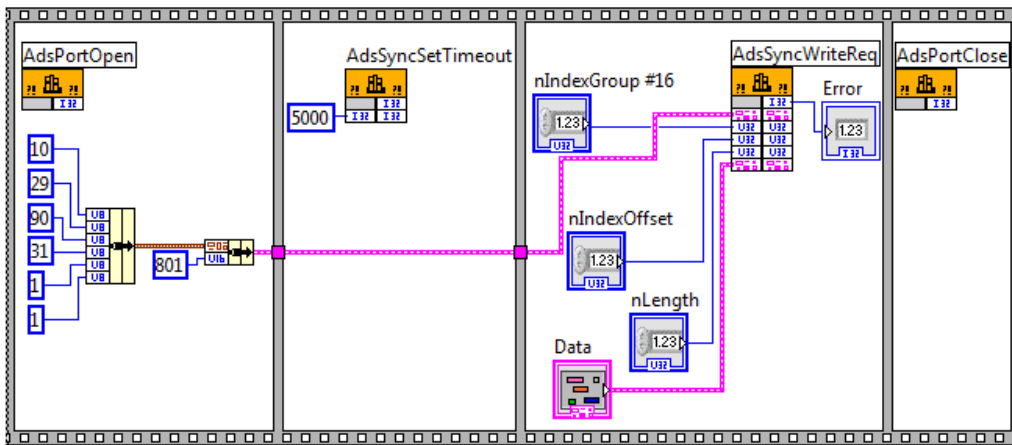
Knihovna TcAdsDll.dll umožňuje komunikaci vzdáleného TwinCAT systému s Win32 systémem pomocí TCP/IP protokolu, je vytvořena v programovacím jazyku C. Funkce jsou poskytovány vytvořeným klientem ve 2 variantách: *C API* nebo *COM* rozhraní. V programu LabVIEW se pracuje s první verzí. Knihovna obsahuje funkce, rozšířené funkce, struktury, výčty a chybové kódy, se kterými uživatel může pracovat. V tomto případě budou využity jen následující funkce:

- *AdsPortOpen* – funkce nemá žádné parametry, pouze návratový typ LONG udávající typ chyby, 0 v případě žádného problému.
- *AdsPortClose* – stejná jako funkce *AdsPortOpen*.
- *AdsSyncWriteReq* – funkce pro zápis do terminálů s následujícími parametry:
 - PamsAddr pAddr – struktura zahrnující AMS Net Id a číslo portu,
 - ULONG nIndexGroup,
 - ULONG nIndex Offset,
 - ULONG nLength – délka zapisovaných dat v bytech,
 - PVOID pData – pointer na data.

Návratový typ opět typu LONG udávající chybu.

- *AdsSyncReadReq* – funkce pro čtení z terminálů, stejná jako *AdsSyncWriteReq*.
- *AdsSyncSetTimeout* – nastavení timeout pro synchroní zápis/čtení. Vstupním parametrem je LONG a hodnota se zadává v *ms*, standartně 5000 *ms*. Stejný návratový typ jako předchozí funkce.

Ukázka využití funkce *AdsSyncWriteReq* v programu LabVIEW je na obr. 6.2. Nejprve pravým kliknutím myši v blokovém diagramu je vyvoláno okno s funkcemi, v něm blok pro vložení funkce z knihovny *Connectivity > Libraries & Executables > Call Library Function Node*. Dále je nutné nastavit tento blok, dvojitým kliknutím se otevře možnost konfigurace. V záložce *Function* se zadá cesta ke knihovně *TcAdsDll.dll*, vybere se jméno funkce v rozevřacím poli *Function name* a zaškrtně se možnost *stdcall (WINAPI)* v rámečku *Calling convention*. Potom se přejde do záložky *Parameters*, kde se musí nastavit všechny parametry funkce dle jejího popisu včetně návratového typu. Blok je již možné použít, uživatel si musí dát pozor na správné připojení odpovídajících si datových typů.



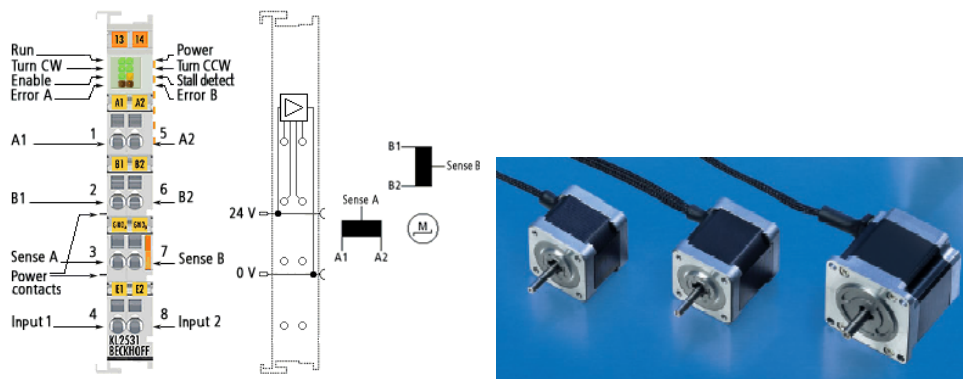
Obr. 6.2: Ukázka zápisu dat pomocí ADS protokolu v programu LabVIEW.

ADS parametry local process image je možné vyčíst z programu System Manager po jejich nalinkování s fyzickými vstupy a výstupy sběrnicových terminálů, viz tabulka 3 v přílohách. Použité parametry pro ADS komunikaci budou popsány u jednotlivých karet.

6.1.2 Řízení krokových motorů

Pomocí krokových motorů je polohováno traverzovacím zařízením s uchytcenou pětiořadovou sondou ve třech přímočarých osách u , z , r a jedné rotační A . Navíc jedním krokovým motorem je pohybováno Pitotovou trubicí uvnitř tunelu rovnoběžně s osou r . Krokové motory jsou typu AS1020 nebo AS1030 (vpravo na obr. 6.3). Jedná se o synchronní motory s vysokým počtem pólů. Mají velký držící moment a velmi dobrou schopnost polohování. Na jednu otáčku disponují 200 kroky, což znamená rozlišení $1,8^\circ$ na krok.

Sběrnice terminál KL2531-1000 je určen pro přímé spojení s malým krokovým motorem. Obsahuje PWM výstupy pro dvě cívky krokového motoru a také 2 vstupy pro koncové spínače. Napájení motoru je 24 V a výstupní proud do cívky 1 A . Maximální krokovací frekvence je 125 kHz . Umožňuje



Obr. 6.3: Karta KL2531-1000 s popisem a krokové motory řady AS10x0, vše od firmy Beckhoff.

mikrokrokování od „full step“ (1 impuls = 1 krok motoru) až do 64 mikrokroků na jeden krok, mechanicky je u normálních aplikací ale možné rozlišit přibližně 5000 pozic na otáčku motoru. Popis karty je vlevo na obr. 6.3 včetně LED indikace.

Pro nastavení způsobu ovládní krokových motorů slouží registry v kartě, každý o velikosti 2 byty. K jejich nastavení je možné využít program *KS2000* nebo je lze nastavit přímo v programu LabVIEW využitím ADS komunikace. Pro tento způsob dává karta k dispozici 7 bytů „input process image“ a 7 bytů „output process image“, které byly v programu PLC Control nastaveny do následujících struktur. Nejprve struktura pro možnost čtení informací z karty:

```

TYPE osa_in :
STRUCT
    SB: BYTE;
    DataIN: DWORD;
    SW: WORD;
END_STRUCT
END_TYPE

```

Význam jednotlivých bytů, popř. důležitých bitů:

- **SB** – tzv. „status byte“. V případě $SB.7 = 0$ udává základní informace o stavu terminálu a krokového motoru, bit $SB.0 = 1$ značí připravenost

terminálu. Pokud $SB.7 = 1$, znamená to režim komunikace s registry karty, konkrétně bit $SB.6$ značí režim čtení(0)/zápis(1) a zbytek bitů určuje číslo registru.

- **DataIN** – při otáčení motoru udává jeho aktuální pozici, pokud probíhá čtení z registrů, je sem vložena jejich hodnota na první 2 byty.
- **SW** – tzv. „status word“, obsahuje přídavné informace o stavu karty a motoru. Bit $SW.3 = 1$ oznamuje dosáhnutí cílové pozice. Bit $SW.0 = 1$ značí sepnutý koncový spínač.

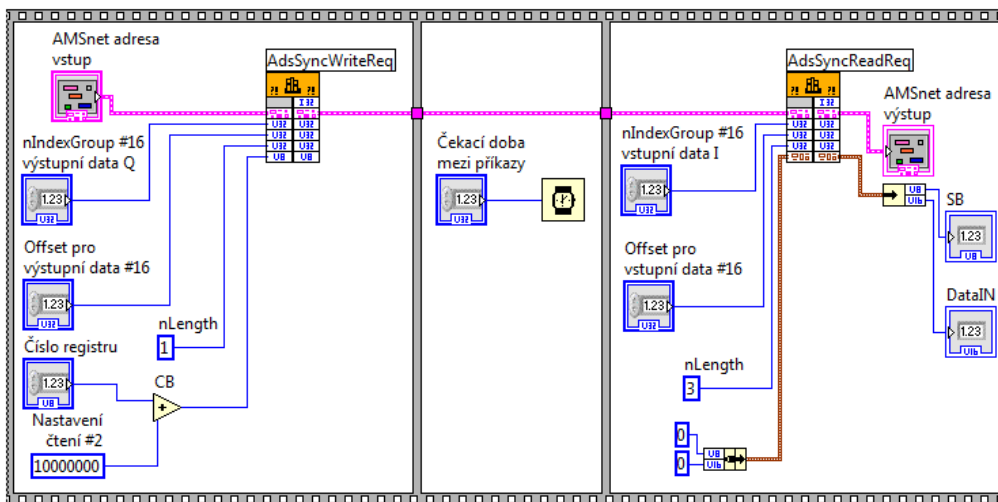
Podobně musela být nadefinována i struktura pro zápis do karty:

```
TYPE osa_out :  
STRUCT  
    CB: BYTE;  
    DataOUT: DWORD;  
    CW: WORD;  
END_STRUCT  
END_TYPE
```

Význam jednotlivých bytů, popř. důležitých bitů:

- **CB** – tzv. „control byte“. V případě $CB.7 = 0$ umožňuje řízení krokových motorů, bit $CB.0 = 1$ dává povolení k přijímání příkazů pro otáčení krokovým motorem. Bitem $CB.2 = 1$ je spuštěno vykonávání příkazů v operačním módu *Path control*. Pokud $CB.7 = 1$, znamená to režim komunikace s registry karty, konkrétně bit $CB.6$ značí režim čtení(0)/zápis(1) a zbytek bitů určuje číslo registru.
- **DataOUT** – např. udává rychlost otáčení krokového motoru nebo v případě zápisu do registrů je sem vložena zapisovaná hodnota na první 2 byty.
- **CW** – tzv. „control word“, Umožňuje nastavení dalších řídicích příkazů. Například bitem $CW.13 = 1$ je vymazána z registrů současná pozice.

Ukázka komunikace s registry je na obr. 6.4, kdy nejprve je nutné terminálu oznámit operaci čtení z registru spolu s jeho číslem (např. čtení z registru 1: $CB = 10000001_2$). Poté je nutnost nechat terminál zpracovat příkaz, otestovaná doba je asi 500 ms . Informace o hodnotě v registru je potom možné přečíst z proměnné *DataIN* na prvních 2 bytech. Před samotným otáčením krokovými motory musí být nastaveny některé registry pro správnou funkčnost dle požadavků zařízení, např. minimální a maximální rychlost, maximální akcelerace, režim mikrokrokování atd. Před změnou hodnot v těchto registrech je nejprve nutné zapsat do registru *R7* heslo, což představuje hodnota $0x1235$. Pokud se tak nestane, je možné měnit tyto hodnoty, ale ty budou uloženy pouze do RAM paměti. Při opětovném spuštění PLC se bude vycházet z předchozích hodnot. Seznam využitých registrů v této aplikaci najdete v přílohách v kapitole C.



Obr. 6.4: Ukázka komunikace s registry karty KL2531 v programu LabVIEW.

Po nastavení příslušných registrů se může přistoupit k otáčení krokovým motorem. Karta nabízí několik operačních módů, jejichž volba se provádí pomocí dvou bitů v registru *R32*:

- *Velocity, direct* – $R32.4 = 0, R32.3 = 0$, mód pro NC stroje.
- *Velocity, with ramps* – $R32.4 = 0, R32.3 = 1$, pro jednoduché ovládání

krokových motorů pomocí PLC.

- *Position tracking* – $R32.4 = 1, R32.3 = 0$, mód pro NC stroje s přednastavenými pozicemi.
- *Path control* – $R32.4 = 1, R32.3 = 1$, mód pro PLC, který umožňuje několik variant ovládání krokových motorů.

Jednou z možností řízení pohybu krokového motoru v režimu Path control je *Travel command (single)*. Pomocí této varianty se s krokovým motorem může pohnout až o $\pm 2^{31}$ pozic oproti současné poloze. Terminál obsahuje čítač provedených kroků, který udává současnou polohu a je zapisován do registrů $R0$ a $R1$. Postup otočením motoru do nové pozice je následovný:

1. $CB.0 = 1$ pro povolení řízení krokového motoru.
2. Nastavení nové pozice do registru $R2$ a $R3$, pozice se zadává v počtu kroků. Pokud chci například otočit motorem o jednu otáčku (200 celých kroků) a registr pro režim mikrokrokování $R46$ je nastaven na poloviční krok, musí se k současné pozici přičíst 400 kroků (odečíst v případě zpětného otáčení). Tato hodnota je pak uložena do registrů $R2$ a $R3$.
3. Vynulovat DataOUT.
4. $CB.2 = 1$ pro start pohybu.
5. Dosáhnutí pozice je indikováno bitem $SW.3 = 1$, následně je nutné vynulovat bity $CB.2$ a pak $SW.3$.

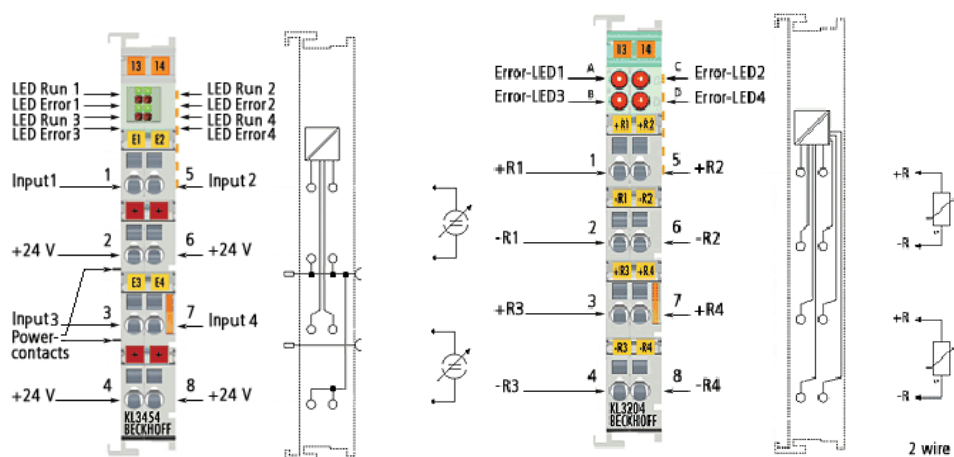
Běh motoru lze kdykoli během otáčení zastavit nastavením bitu $CB.2 = 0$.

Další variantou, kterou je možno využít v módu Path control, je *Referencing*. Tento příkaz otáčí krokovým motorem, dokud není sepnut koncový spínač, následně se pohybuje velmi malou rychlostí opačného směru do rozepnutí spínače. Rychlost sjíždění na koncový spínač lze nastavit registrem $R53$, zpětnou registrem $R54$. Takto je možné uvést zařízení do výchozího stavu a zároveň určit tuto polohu jako počátek souřadného systému. Pro aktivaci této varianty je nejprve nutné zapsat heslo $0x1235$ do registru $R31$.

Poté je využit registr pro vkládání příkazů $R7$ v módu Path control. Příkaz Referencing má hodnotu $0x0520$, dále následuje postup od bodu 3 jako u Travel command.

Veškeré podrobnější informace o ovládní krokových motorů pomocí karty KL2531 lze vyhledat v manuálu, který je k dispozici v [4].

6.1.3 KL3454



Obr. 6.5: Karty KL3454 (vlevo) a KL3204 včetně popisu.

4-kanálový terminál KL3454 (na obr. 6.5 vlevo) slouží pro převod analogového signálu v rozsahu $4-20\text{ mA}$ na digitální s přesností 12 bitů, v této aplikaci je určen k převodu signálu z barometru. Karta má podobné vlastnosti jako KL2531, opět obsahuje registry pro vnitřní nastavení, každý kanál disponuje možností sdílení paměti přes process image, konkrétně 1 status/control byte a 2 byty pro data. Terminál je možné nastavit komunikací přes registry. V tomto případě to ale není nutné, protože v defaultním nastavení stačí číst pouze data na process image, kam je ukládána hodnota snímaného proudu ve formě datového typu integer. Proto jsou v System manageru nalinkovány pouze tyto dva byty jako proměnná I_{pb} pro hodnotu proudu z barometru (viz tabulka 3 v přílohách). Tu již stačí v programu LabVIEW přepočítat dle

rovnice:

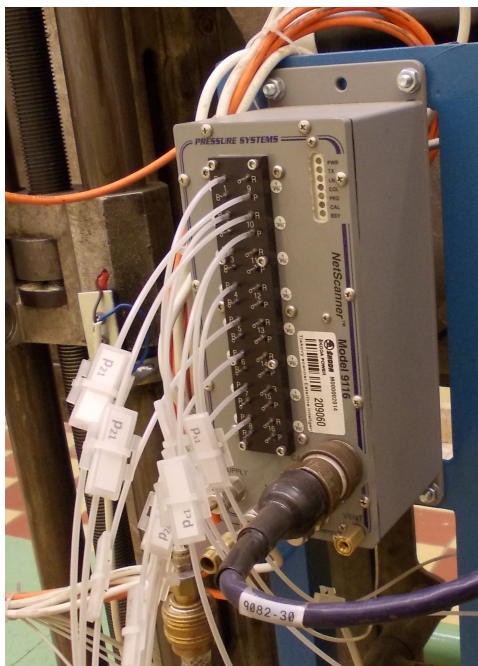
$$p_b = \frac{110000}{32767} I_{pb}, \quad [Pa; mA]. \quad (22)$$

6.1.4 KL3204

Poslední částí BX9000 je 4-kanálová karta KL3204 (vpravo na obr. 6.5) určená pro sběr a zpracování analogového signálu z odporových snímačů, konkrétně zde ze snímačů PT100 pro měření teploty proudu vzduchu T_p a okolí T_o . Stejně jako u karty KL3454 každý kanál disponuje možností sdílení paměti přes process image, konkrétně 1 status/control byte a 2 byty pro data. Terminál také obsahuje registry pro vnitřní nastavení, např. typ senzoru, výstup dat atd. V defaultním nastavení je připraven ke snímání hodnot ze senzorů PT100 s přesností $\pm 0,1$ °C. Jelikož v této aplikaci jsou využity snímače PT100, není třeba přenastavovat registry terminálu, stačí pouze číst data z process image, viz nalinkované proměnné v System manageru v tabulce 3 v přílohách. Výstupní hodnoty jsou ve formě integeru, proto je v programu LabVIEW nutné posunout hodnotu o jedno desetinné místo (přečtená hodnota z karty: 223, výsledná hodnota 22,3 °C).

6.2 Komunikace s NetScanner 9116

NetScanner (na obr. 6.6) je v této aplikaci využit pro převod tlakových odběru z pětivotrové, Pitotovy a Prandtlovy sondy do digitální podoby. Komunikace mezi tlakovým scannerem a vzdáleným počítačem je umožněna pomocí TCP/IP protokolu a ethernetového rozhraní převodníku. Uživatel má k dispozici sadu příkazů odesílající NetScanneru pro nastavení a řízení snímání. Ten zpětně odesílá odpovědi na příkazy nebo informace o stavu. Příkazy jsou představovány písmenem pro určení typu příkazu a následnou sekvencí parametrů pro bližší určení příkazu (např. `r00070` je příkaz pro čtení hodnot z prvních třech kanálů). Běžný uživatel si vystačí s minimem příkazů, navíc pro předchozí model NetScanner 9016 byla vytvořena knihovna *PSI9016.llb* obsahující různá subVI pro program LabVIEW, která sama složí příkaz pro převodník z uživatelem nastavených parametrů. Tato knihovna je v rámci aplikace plně využitelná i pro současný typ.

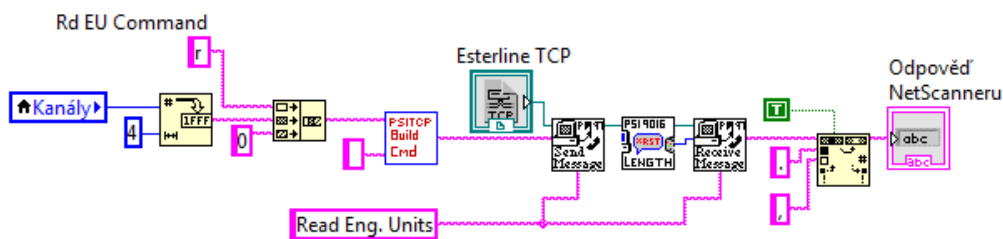


Obr. 6.6: Inteligentní tlakový převodník *NetScanner 9116*.

Před snímáním hodnot z převodníku je nutno provést jeho konfiguraci. K tomu je využito subVI *PSI9016 Raw Command.vi* z knihovny a následující dva příkazy:

- `v01101 6.8948` – scanner defaultně převádí tlakové odběry na hodnoty v jednotkách *psi*, tímto příkazem přepočítá snímané veličiny na *kPa*.
- `w0B00` – umožní automatický posun kalibračních ventilů při nastavování offsetů jednotlivých kanálů v režimu kalibrace převodníku, neboť před měřením je také vhodné využít možnosti automatické kalibrace převodníku tzv. „RE-ZERO“ příkazem (subVI *PSI9016 ReZero*).

Pro čtení hodnot z tlakového převodníku v průběhu aplikace bylo vytvořeno subVI *cteni_aktualnich_hodnot.vi*, jehož základ blokového schématu je na obr. 6.7. SubVI převezme informaci o číslech kanálů, které mají být měřeny, vygeneruje odpovídající příkaz pro NetScanner a následně zpracuje příchozí odpověď. Výstupem pak je pole s výslednými hodnotami z požadovaných kanálů. Testováním subVI byla zjištěna **vzorkovací frekvence**



Obr. 6.7: Základ blokového schématu subVI *cteni_aktualnich_hodnot.vi*.

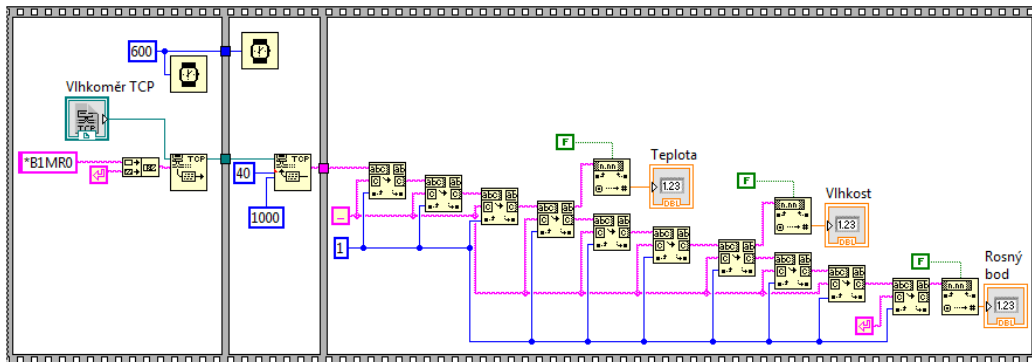
téměř 200 Hz, což by mělo mít za následek výrazné zkrácení doby automatického měření v nové řídicí aplikaci.

Více informací o nastavení NetScanneru 9116 lze nalézt v jeho manuálu, viz [7].

6.3 Komunikace s vlhkoměrem TH2E

Vlhkoměr je používán k měření teploty, relativní vlhkosti a dopočítání rosného bodu. Obsahuje ethernetové rozhraní umožňující několik možností komunikace. Jednou z nich je komunikace přes TCP kanál protokolem SPINEL, který stejně jako vlhkoměr vytvořila firma Papouch s.r.o. Nejprve je však nutné TH2E nastavit přes webové rozhraní připojením přes IP adresu, v tomto případě tedy <http://10.29.90.29/>. Na úvodní stránce se vyskytuje tlačítko *Nastavení*, po jehož volbě je uživateli k dispozici 9 panelů. Pomocí nich může uživatel například nastavit jednotky, ve kterých bude vlhkoměr odesílat hodnoty. Nejdůležitějším nastavením pro správnou komunikaci s programem LabVIEW je volba *Komunikačního režimu* v panelu *Síť*. Z výběru je nutné zvolit režim *TCP server* umožňující komunikaci přes protokol SPINEL založený na principu komunikace formou dotazů a odpovědí.

Ukázka komunikace s TH2E přes protokol SPINEL v LabVIEW je na obr. 6.8. V této aplikaci je nutné sbírat data z vlhkoměru jednorázově, což je umožněno vysláním dotazu *B1MR0 přes TCP/IP. Pokud se nevyskytne žádná



Obr. 6.8: Ukázka komunikace s vlhkoměrem TH2E v programu LabVIEW.

chyba, je odpovědí na dotaz řetězec, který obsahuje hodnoty všech tří veličin. Příklad odpovědi: *B10 1 80 4,1 2 80 57,1 3 80 -3,7. Ten je pak nutné v programu LabVIEW rozparsovat. Uvedený příklad udává teplotu 4,1 °C, relativní vlhkost 57,1 % a rosný bod -3,7 °C.

7 Řídicí aplikace

V předchozí části byly vysvětleny základní principy komunikace s hardwarem testovacího zařízení a zároveň přidány ukázky její aplikace v programu LabVIEW. V této kapitole budou v krátkosti popsány algoritmy aplikace a následně podrobněji její uživatelské rozhraní.

7.1 Struktura blokového diagramu

Celé programové řešení řídicí aplikace je z hlediska rozsáhlosti blokového diagramu nemožné zobrazit a popsat, je-li čtenář seznámen s programováním v LabVIEW, může si strukturu programu najít na přiloženém CD. Blokové schéma hlavního Vi s názvem *Ridici_aplikace.vi* je rozděleno do tří částí pomocí struktury *Flat sequence*.

V první části probíhá počáteční nastavení testovacího zařízení, zejména nastavení komunikace s BX9000, NetScannerem 9116 a vlhkoměrem TH2E. Nejvýznamnější částí programu je její druhé okno ve Flat sekvenci. V ní je totiž umístěna smyčka *While loop* pro opakované vykonávání obsahu této struktury, jíž základ tvoří *Event structure* sloužící pro vykonání určitých příkazů po vzniku programátorem definované události. V tomto případě se jedná především o reakce na stisk tlačítka uživatelem ve Front panelu sloužící například pro pohyb s traverzěrem nebo pro spuštění automatického měření. Pro obsluhu každé takové události bylo vytvořeno samostatné subVi, které se předá řízení. Po vykonání této samostatné úlohy se řízení předává zpět hlavní aplikaci. Poslední okno Flat sekvence slouží pro ukončení aplikace, především k řízenému ukončení komunikace s hardwarem testovacího zařízení.

Pro snímání prostoru za lopatkovou mříží mohou být použity různé pěti-otvorové sondy, které však mají své vlastní kalibrační rovnice, viz kapitola 3. Ve vytvořené aplikaci (*SRT_aplikace.exe*) jsou pro on-line vyhodnocení uloženy kalibrační rovnice platící pro aktuální sondu. V případě změny kalibračních rovnic nebo výměny sondy, je nutné nahrát do složky *Kalibrační rovnice*

nové m-fily vygenerované z programu *TableCurve 3D*. Kalibrační rovnice jsou 4 a musí být přesně pojmenovány:

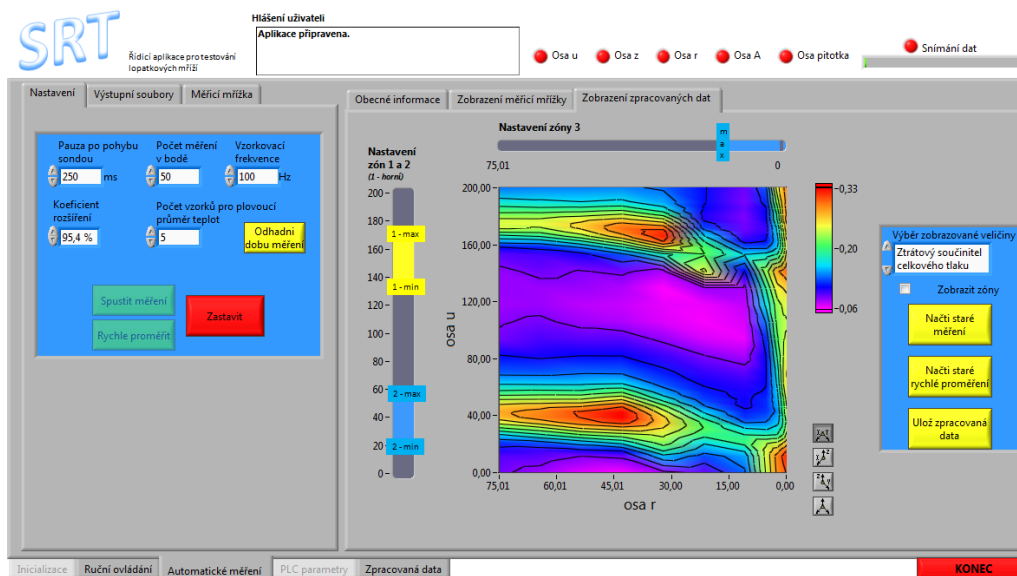
- *phi_cpphi_cptheta.m* – m-file pro vypočtení úhlu φ z veličin C_p^{PHI} a C_p^{THETA} získaných ze sondy a rovnic číslo 5 a 6. Ukázka je uvedena v příloze D. V m-filu nesmí být použity příkazy jako *return* nebo *error*.
- *theta_cpphi_cptheta.m* – m-file pro vypočtení úhlu ϑ z veličin C_p^{PHI} a C_p^{THETA} .
- *cpStat_phi_theta.m* – m-file pro vypočtení koeficientu C_p^{STAT} z úhlů φ a ϑ .
- *cpTheta_phi_theta.m* – m-file pro vypočtení koeficientu C_p^{THETA} z úhlů φ a ϑ .

Pak už stačí přeložit program opět do *exe* soubotu v *SRT_projekt.lvproj*.

7.2 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní v programu LabVIEW bylo vytvářeno v kombinaci dvou aspektů: jednoduchost a přehlednost. To je především výhodné z hlediska případného budoucího rozšíření aplikace. Program pro testování lopatkových mříží je spustitelný pomocí souboru **SRT_aplikace.exe**, jehož ukázka uživatelského prostředí je na obr. 7.1.

V horní části se vedle loga aplikace nachází textové okno *Hlášení uživateli* poskytující informace o aktuálním dění nebo pokynech pro uživatele. V případě oznámení **Aplikace připravena** je zařízení v nečinnosti a uživatel může provést libovolnou dostupnou akci. Dále je ve vrchní části umístěno 5 LED indikátorů pro jednotlivé osy, které zelenou barvou oznamují pohyb traverzéry v dané ose. Poslední částí horní oblasti je LED indikátor a progress bar pro vizualizaci průběhu snímání hodnot z NetScanneru a vlhkoměru.

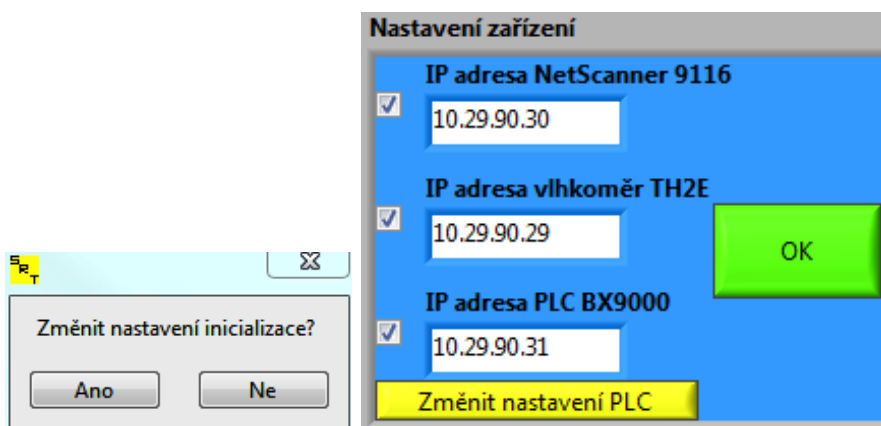


Obr. 7.1: Uživatelské rozhraní řídicí aplikace pro testování lopatkových mříží SRT_aplikace.exe.

Základem uživatelského rozhraní je panel umístěný téměř přes celou aplikaci, který obsahuje několik záložek pro nastavení a obsluhu testovacího zařízení, jejichž popis bude uveden v následujících podkapitolách. Posledním prvkem umístěným v pravém dolním rohu je tlačítko *KONEC* pro ukončení aplikace.

7.3 Inicializace

Po spuštění aplikace je nejprve vyžadováno počáteční nastavení testovacího zařízení, zejména určení některých důležitých parametrů pro hardware. Defaultně jsou všechny hodnoty nastaveny na obvyklou úroveň. Nechce-li uživatel nic měnit, stačí zvolit možnost *Ne* při počátečním dotazu od aplikace, viz okno vlevo na obr. 7.2. V případě volby opačné možnosti je uživatel přeměrován na záložku *Inicializace* (vpravo na obr. 7.2), kde může změnit IP adresy hardwaru testovacího zařízení. Může se totiž stát, že v rámci sítě Doosan Škoda Power s.r.o. dojde k jejich změně, nebo může být například



Obr. 7.2: Okna pro nastavení inicializace testovacího zařízení.

vyměněn současně osazený NetScanner 9116 za jiný.

Navíc pod volbou IP adresy BX9000 je umístěno tlačítko pro přesnější nastavení PLC uživatelem, jež se provádí v záložce *PLC parametry*. Zde mohou být nastaveny hodnoty prvních bytů proměnných sloužící pro komunikaci s PLC, což může být velmi výhodné v případě přeprogramování PLC v programu TwinCAT, viz kapitola 5.1. Kromě toho lze měnit některé hodnoty registrů karet KL2531 určující pohyb travrzéru:

- *Minimální rychlost* – rozsah 0-2047.
- *Maximální rychlost* – rozsah 0-2047.
- *Maximální akcelerace* – rozsah 0-2047.
- *Režim mikrokrokování* – možnosti: plný, poloviční, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64 krok.
- *Posun v ose na 1 otáčku* – kvůli velké hmotnosti travrzéru jsou výstupy z krokových motorů zpřevodovány prostřednictvím ozubených, popř. šroubových převodů a kromě osy *A* je ve zbývajících využito lineárního vedení pro převod rotačního pohybu na přímočarý. Celkový převod je vztažen k pootočení motoru o plný úhel. Nastavení převodo-

vých poměrů bylo z důvodu nedostatečných podkladů prováděno experimentálně. V požadovaném rozsahu byl zadán známý počet otáček motoru, z odměřené hodnoty posunutí (otočení) sondy v dané ose byla získána střední hodnota průměru, viz obr. 7.3.

Vstupní offsety BX9000 pro teploměry a snímač atmosférického tlaku (nutno zadávat hexadecimálně)

Teploměr okolí To: 0 Teploměr proudu Tp: 2 Snímač atm. tlaku pb: 4 OK

Parametry krokových motorů

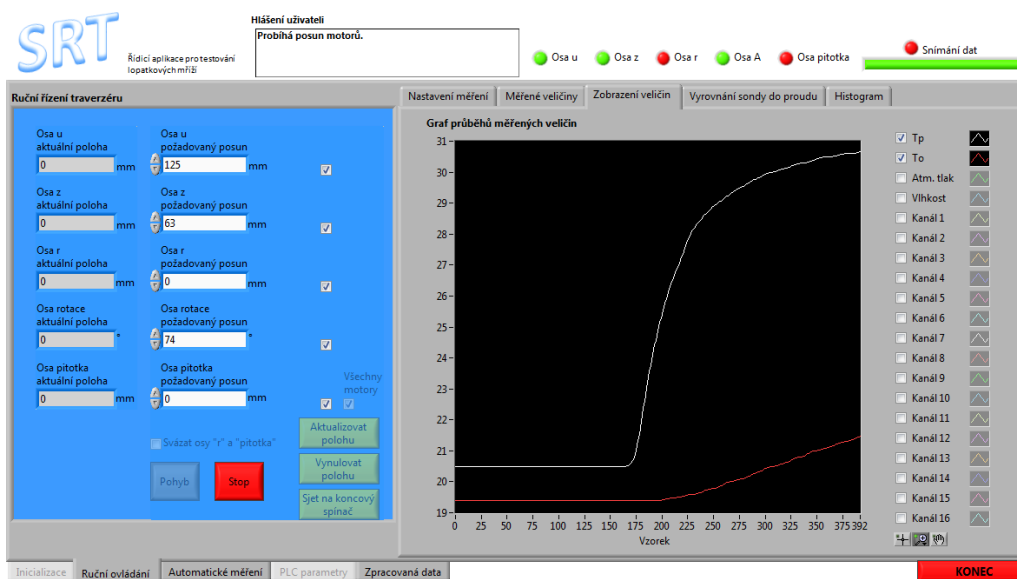
Osa	Vstupní offset (hexadecimálně)	Výstupní offset (hexadecimálně)	Minimální rychlost	Maximální rychlost	Maximální akcelerace	Režim mikrokrokování	Posun v ose na 1 otáčku motoru
u	6	0	1	1800	16	1/64	0,14433 mm
z	E	8	1	600	16	1/64	0,75 mm
r	16	10	1	600	16	1/64	0,75 mm
A	1E	18	1	600	16	1/64	4,11666 *
pitotka	26	20	1	600	16	1/64	1,2071 mm

Obr. 7.3: Záložka *PLC parametry* pro nastavení *BX9000* s přednastavenými doporučenými hodnotami.

Pokud k tomu uživatel nemá důvod, neměl by měnit přednastavené hodnoty (na obr. 7.3), které byly vyzorovány v průběhu testování aplikace. Bude-li nutné hodnoty změnit, je nutné změny potvrdit tlačítkem *OK*, což má za následek návrat do záložky *Inicializace*, kde se dalším potvrzením tlačítka *OK* spustí inicializace testovacího zařízení.

7.4 Ruční ovládání

Stejně jako v předchozí řídicí aplikaci musí být uživateli dostupné ruční manévrování s traverzěrem nebo snímání hodnot ze sond a senzorů. Tyto možnosti a k tomu navíc nové přidané lze nalézt v záložce *Ruční ovládání*, ukázka na obr. 7.4. Záložka je rozdělena na dvě poloviny. V levé části se nachází ovládací prvky pro manuální polohování traverzěrem a Pitotovou sondou, v pravé je vložen další panel, jehož záložky budou popsány v dalším textu.



Obr. 7.4: Záložka *Ruční ovládání* pro libovolné polohování s traverzéro, snímání hodnot atd.

7.4.1 Ruční ovládání traverzéro

Uživatel například před spuštěním automatického měření potřebuje umístit sondu do výchozího bodu [0, 0] (viz obr. 2.6) nebo ho zajímá konkrétní bod za lopatkovou mříží, ve kterém chce snímat dostupné veličiny. K tomuto účelu slouží část *Ruční řízení traverzéro* pro umístění pětioťvorové a Pitotovy sondy do požadované polohy. Každá osa je reprezentována třemi prvky:

- *Aktuelní poloha.*
- *Požadovaný posun* – udává relativní vzdálenost, o kterou se má traverzér/Pitotova sonda posunout v dané ose. Směr určuje znaménko, kladná hodnota znamená pohyb směrem od koncového spínače.
- Zaškrťávací políčko umístěné ve stejné řádce jako předchozí dva prvky. Označuje osy, se kterými budou provedeny příkazy pomocí žlutých tlačítek na obr. 7.4.

Uživatel **musí** dávat pozor, aby při polohování traverzérem nedošlo ke kolizi sondy s některými částmi testovacího zařízení. Pro řízení pohybu jsou dostupné tyto možnosti:

- *Svázat osy „r“ a „pitotka“* – pokud jsou osy pětivotvorové a Pitotovy sondy zarovnány do jedné roviny, je výhodné pohybovat s nimi synchronizovaně.
- *Pohyb* – vyšle příkaz do PLC pro otočení krokovými motory o počet kroků daný hodnotou požadovaného posunu.
- *Všechny motory* – označí všechny zaškrtačací políčka os.
- *Aktualizovat polohu* – načte hodnoty aktuálních pozic v osách, určené pro případ ukončení pohybu uživatelem.
- *Vynulovat polohu*.
- *Sjet na koncový spínač* – mělo by být provedeno vždy po spuštění aplikace!
- *Stop* – uživatel může kdykoli přerušit pohyb traverzéro.

7.4.2 Ruční snímání dat

Napravo od ručního řízení traverzéro je umístěn panel, jehož první 3 záložky slouží k nastavení a vizualizaci ručního snímání veličin. Nejprve je nutné v záložce *Nastavení měření* zadat parametry snímání (okno vlevo na obr. 7.5):

- *Frekvence měření* – vzorkovací frekvence.
- *Počet měření* – počet primárních dat, které budou dále zpracovávány, resp. analyzovány a redukovány.
- *Koeficient rozšíření* – v případě snímání hodnot z NetScanneru se předpokládá normální rozdělení pravděpodobnosti charakterizovaného střední hodnotou μ a rozptylem σ^2 . Odmocněním rozptylu se získá směrodatná



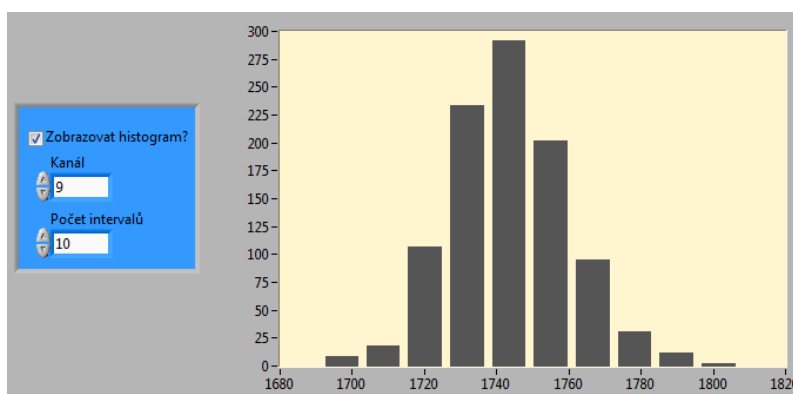
Obr. 7.5: Vlevo okno pro nastavení parametrů snímání dat, vpravo číselné zobrazení měřených veličin.

odchylka σ související s koeficientem rozšíření. Vezme-li se oblast $\mu \pm \sigma$, zahrnuje 68,2 % plochy pod hustotou normálního rozložení. V případě použití $\pm 2\sigma$ to je 95,4 % a $\pm 3\sigma$ pokrývá oblast 99,8 %. Tyto 3 hodnoty obsahuje zmiňované políčko a určuje výřez dat z těch naměřených, ze kterých se bude počítat výsledná průměrná hodnota. Zamezí se tak významnějšímu vlivu nežádoucích hodnot. Pro ověření charakteru normálního rozdělení snímaných dat slouží záložka *Histogram*, ve kterém lze zvolit testovaný kanál NetScanneru a počet sloupců histogramu, viz obr. 7.6.

- *Počet vzorků pro plovoucí průměr teplot* – jelikož sběr dat z teploměrů PT100 probíhá s přesností 0,1 °C, je pro vizualizaci jejich průběhů v grafu v záložce *Zobrazení veličin* používán plovoucí průměr.

Před startem snímání hodnot pomocí tlačítka *Kukátka* je vhodné provést vnitřní kalibraci NetScanneru tlačítkem *REZERO*.

Naměřené hodnoty veličin je možné zjistit v záložce *Měřené veličiny* (okno vpravo na obr. 7.5), kde si uživatel zároveň pomocí zaškrťávacích políček může určit, které kanály z NetScanneru budou snímány. Dále jsou zde hodnoty měřené pomocí vlhkoměru TH2E (teplota, relativní vlhkost a rosný bod)



Obr. 7.6: Ukázka histogramu naměřených dat z kanálu NetScanneru.

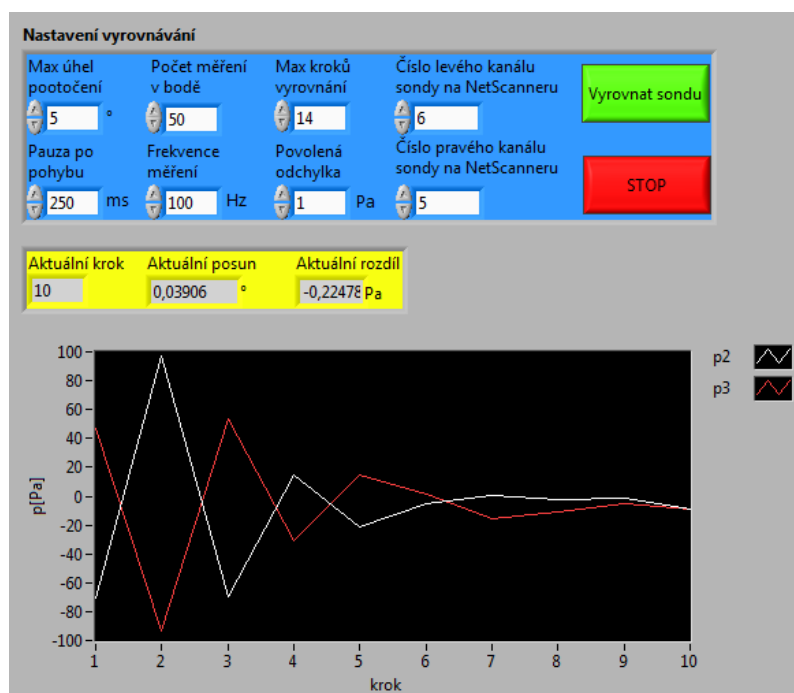
a veličiny sbírané ze senzorů připojené k BX9000 (teplota proudu a okolí, atmosferický tlak). Průběhy všech těchto veličin je možné zhlédnout v záložce *Zobrazení veličin* (viz obr. 7.4), kde vlevo od grafu je umístěna legenda. V ní je u každé veličiny zaškrťovací políčko pro aktuální zobrazení. Pod legendou se nachází nástroje pro práci s grafem, například pro přiblížení určité části. Kliknutím pravým tlačítkem myši do prostoru grafu a zvolením *Clear chart* lze vymazat historii grafu.

7.4.3 Vyrovnání sondy do proudu vzduchu

Jednou z nových funkcí oproti předchozí řídicí aplikaci je možnost vyrovnání pětiočtové sondy do proudu vzduchu v ose *A*, to znamená vyrovnáním tlaků v levém a pravém kanálu, viz obr. 3.2. Parametry pro tuto funkci se nachází v okně *Nastavení vyrovnání*, viz obr. 7.7, z nichž nejdůležitějšími jsou:

- *Max úhel pootočení* – v rámci jednoho kroku.
- *Max kroků vyrovnání* – mezní počet opakování vyrovnávacího algoritmu.
- *Povolená odchylka* – regulační odchylka od „rovnovážného“ stavu.

Před začátkem vyrovnávání musí být sonda aspoň přibližně nastavena do proudu vzduchu, na což je uživatel i dotázán dialogovým oknem po stisk-

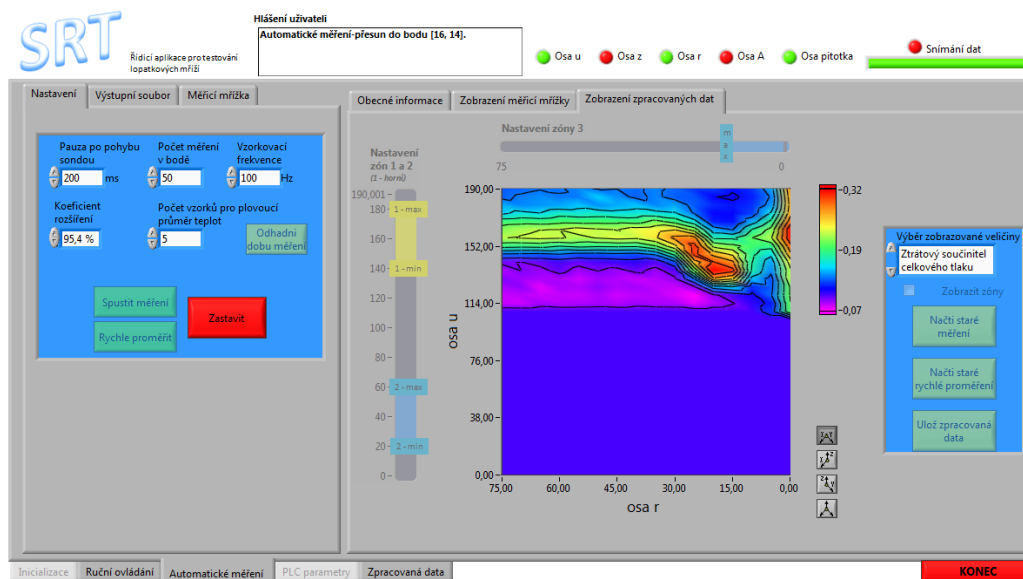


Obr. 7.7: Ukázka nastavení a průběhu vyrovnání sondy do proudu vzduchu.

nutí tlačítka *Vyrovnat sondu*. V první fázi je hledán směr otáčení sondy tak, aby došlo k jejímu vyrovnání. Po jeho nalezení se metodou půlení hodnoty pootočení hledá nejlepší poloha sondy v proudu, dokud není dosaženo alespoň povolené odchylky nebo mezního počtu kroků. Vyrovnávání je možné kdykoli zastavit tlačítkem *STOP*. Průběh regulace je zobrazován numericky i graficky, viz obr. 7.7. O výsledku vyrovnání je uživatel opět informován pomocí dialogového okna.

7.5 Automatické měření

Nejdůležitější částí programu je záložka *Automatické měření* (na obr. 7.8) umožňující proměření prostoru za lopatkovou mříží a tím získání hodnot určujících vlastnosti lopatkové mříže. Panel obsahuje další dva menší panely, kde levý slouží pro nastavení automatického měření a pravý pro jeho vizualizaci. Oproti předchozí řídicí aplikaci, která umožňovala jen měření v rovnoměrné mřížce s ekvidistantními mezerami mezi body v osách u a r , se v nové



Obr. 7.8: Záložka *Automatické měření* při probíhajícím testování lopatkové mříže.

aplikaci vyskytují širší možnosti nastavení, které budou popsány v následujících podkapitolách.

Před jakýmkoliv automatickým měřením musí uživatel provést tyto kroky:

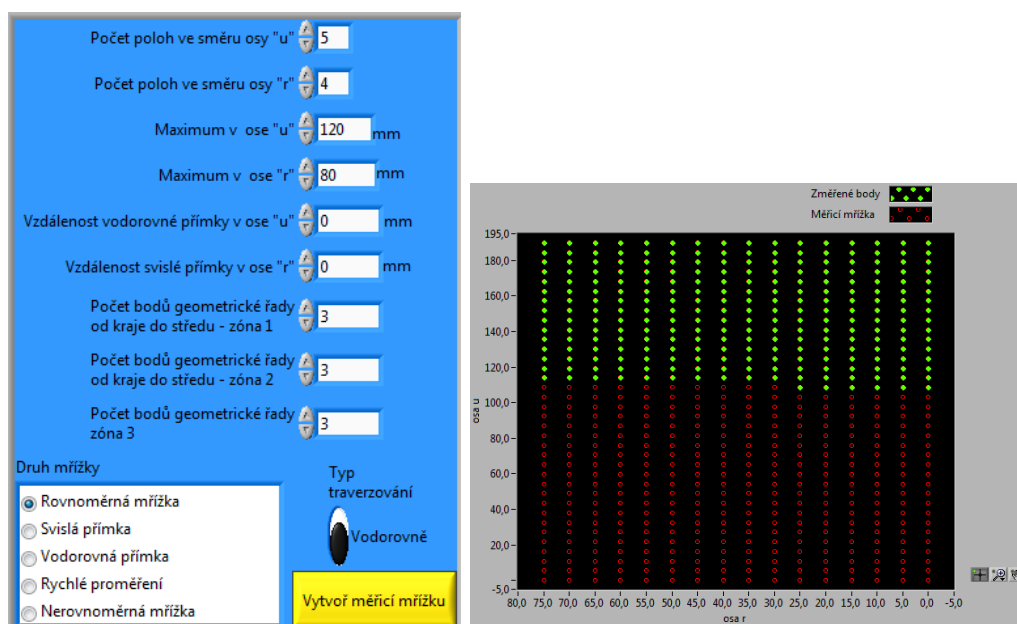
1. Nastavit traverzér a Pitotovu sondu do výchozího bodu $[0, 0]$.
2. Vytvořit měřicí mřížku.
3. Vytvořit výstupní soubory pro ukládání dat.
4. Nastavit parametry snímání.

Traverzér je nutné před začátkem měření nastavit do počáteční polohy, to znamená nastavit vzdálenost roviny $u-r$ za lopatkovou mříž pomocí osy z (měří se ve vzdálenostech 10, 20 a 30 mm za odtokovou hranou lopatek), nastavit sondu do proudu vzduchu pomocí osy A (možnost využití funkce pro vyrovnání sondy v kapitole 7.4.3, testovaná lopatková mříž měla úhel proudu 74°) a najet v osách u a r do bodu $[0, 0]$ (viz obr. 2.6). Uživatel by

měl také zkontrolovat, zda osy pětiočtové a Pitotovy sondy jsou ve stejné rovině. Bod $[0, 0]$ je v rámci automatického měření následně brán jako bod s nulovou polohou v osách u a r , čemuž odpovídají i souřadnicové systémy grafů pro vizualizaci.

7.5.1 Měření v rovnoměrné mřížce

Jedním ze základních požadavků na novou aplikaci bylo vytvoření stejné možnosti pro proměření prostoru za lopatkovou mříží jako v předchozí řídicí aplikaci. Přesněji řečeno roviny, protože poloha v ose z je nastavena na začátku měření a dále už je proměřována jen rovina $u-r$. Detailní popis měření a měřicí mřížky je v kapitole 2.2 a na obr. 2.6.



Obr. 7.9: Levé okno slouží pro nastavení parametrů měřicí mřížky, vpravo je patrná její vizualizace.

K vytvoření měřicí mřížky slouží záložka *Měřicí mřížka*, jejíž uživatelský panel je vlevo na obr. 7.9. Pro konstrukci rovnoměrné mřížky slouží následu-

ující parametry:

- *Druh mřížky* – zaškrtnutí možnosti *Rovnoměrná mřížka*.
- *Počet poloh ve směru osy „u“*.
- *Počet poloh ve směru osy „r“*.
- *Maximum v ose „u“*, *Maximum v ose „r“* – nastavení vzdálenosti bodu [1, 1] od bodu [0, 0], viz obr. 2.6.
- *Typ traverzování* – určení, zda se traverzér bude pohybovat *Vodorovně* (po řádcích) od bodu [0, 0] k bodu [1, 1] nebo *Svisle* (po sloupcích). Z časového hlediska je výrazně rychlejší volba *Vodorovně*.

Po nastavení všech parametrů se rovnoměrná mřížka vygeneruje pomocí tlačítka *Vytvoř měřicí mřížku*. Měřicí mřížka je následně zobrazena ve formě červených prázdných bodů do grafu v záložce *Zobrazení měřicí mřížky*, vpravo na obr. 7.9. Z obrázku je zároveň vidět, jak v průběhu automatického měření jsou změřené body vyplňovány zelenou barvou. Vytvoření měřicí mřížky je indikováno LED diodou na záložce *Obecné informace*, viz okno vpravo na obr. 7.11.

Dalším důležitým krokem před spuštěním měření je vytvoření výstupního souboru pro ukládání dat, k čemuž slouží záložka *Výstupní soubory* na obr. 7.9. Uživatel může vyplnit základní parametry o testovaných lopatkách, které budou vloženy do hlavičky výstupního souboru. Dále je zde k dispozici zaškrtačací políčko *Vytvořit výstupní soubory*, po jehož zatržení se budou v průběhu měření ukládat všechna data měřená NetScannerem do samostatného výstupního souboru. Tato primární data mohou pak sloužit k hlubší analýze dějů v oblasti mezilopatkových kanálů. Po stisku tlačítka *Vytvořit výstupní soubory* je uživatel přesměrován na záložku *Měřené veličiny* v *Ručním ovládní*, viz okno vpravo na obr. 7.5, kde pomocí zaškrtačacích polí označí kanály, které bude chtít ukládat. Zároveň si je může pojmenovat. Výběr je potvrzen tlačítkem *OK*. Pro správné vyhodnocování v průběhu automatického



Obr. 7.10: Okno pro nastavení výstupních souborů.

měření je nutné snímat hodnoty z prvních deseti kanálů se stejným zapojením jako je na obr. 7.5. Uživatel je pro kontrolu dotázán, zda se traverzér nachází ve výchozím bodě $[0, 0]$, neboť jeho vzdálenost od koncových spínačů se zapisuje do hlavičky souboru. Do té se zapisují také informace o měřicí mřížce, takže je nutné, aby byla před vytvářením výstupních souborů vygenerována. Pokud jsou všechny podmínky splněny, uživatel určí místo uložení souboru spolu s jeho názvem s příponou „.txt“ pro textový dokument. Pokud chce současně ukládat i primární data z NetScanneru, provede se naznačený postup také pro tento soubor.

Pro průběžné ukládání dat se vygeneruje soubor s následující hlavičkou například:

Číslo měření: 188
Datum měření: 20.4.2013
Název profilu: Banán 1

Tětiva lopatky(c) [m]: 0.20000
 Délka lopatky(l) [m]: 0.15000
 Šířka mřížce(s) [m]: 0.18000
 Rozteč mřížce(t) [m]: 0.14000
 Úhel nastavení profilu gamma [°]: 37.33
 Vstupní úhel beta1 [°]: 0.00
 Vzdálenost roviny před mříží rov1 [m]: 0.05000
 Vzdálenost roviny za mříží rov2 [m]: 0.01000
 Poissonova konst.: 1.4
 Počet poloh ve směru osy "u": 40
 Počet poloh ve směru osy "r": 17
 Krok ve směru osy "u" [m]: 0.00487
 Krok ve směru osy "r" [m]: 0.00469
 Úhel otočení sondy (osa "A") [°]: 74.00
 Absolutní poloha v ose "u" [mm]: 150.00
 Absolutní poloha v ose "z" [mm]: 62.00
 Absolutní poloha v ose "r" [mm]: 0.00
 Absolutní poloha v ose "pitotka" [mm]: 0.00
 Typ traverzování: vodorovně

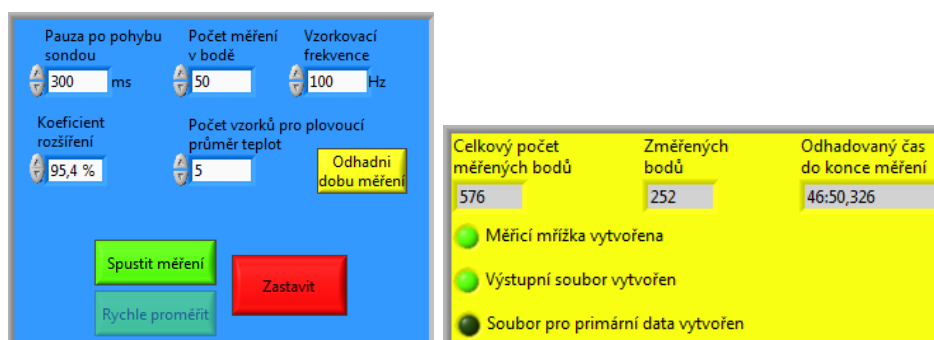
Po hlavičce následují dva volné řádky, na které navazují už sloupce pro ukládání dat během měření v tomto pořadí:

- *sourad_u_k, sourad_r_j* – souřadnice měřeného bodu v měřicí mřížce, viz obr. 7.9.
- *poloha_u, poloha_r* – poloha měřeného bodu.
- *pbar, tproud_tp, tokol_to* – hodnoty atmosferického tlaku, teploty proudu a teploty okolí získávané přes senzory připojené k BX9000.
- *vlhk_phi, vlhk_T, vlhk_ros_b* – hodnoty z vlhkoměru: relativní vlhkost, teplota a rosný bod.
- Poslední sloupce jsou uživatelem vybrané kanály. Pro správné vyhodnocování programem musí být prvních 10 kanálů zapojeno následovně:

1. p_{s0} – hodnota statického tlaku získaného z Prandtlovy sondy.
2. p_{c0} – hodnota celkového tlaku získaného z Prandtlovy sondy.
3. p_{s1} – hodnota statického tlaku získaného z Pitotovy sondy.
4. p_{c1} – hodnota celkového tlaku získaného z Pitotovy sondy.
5. p_{23} – hodnota tlaku pravého kanálu z pětiotvorové sondy.
6. p_{22} – hodnota tlaku levého kanálu z pětiotvorové sondy.
7. p_{24} – hodnota tlaku horního kanálu z pětiotvorové sondy.
8. p_{25} – hodnota tlaku dolního kanálu z pětiotvorové sondy.
9. p_{21} – hodnota tlaku středního kanálu z pětiotvorové sondy.
10. $p_{21} - p_{c1}$ – rozdíl těchto veličin.

Výstupní soubor pro ukládání primárních dat neobsahuje žádnou hlavičku, pouze sloupce *sourad_u_k*, *sourad_r_j*, *poloha_u*, *poloha_r* pro určení polohy měřeného bodu a sloupce uživatelem vybraných kanálů z Net-Scanneru.

Vytvoření výstupních souborů je indikováno LED diodami v záložce Obecné informace, viz okno vpravo na obr. 7.11.



Obr. 7.11: Levé okno slouží pro nastavení parametrů sběru dat během automatického měření, vpravo okno s informacema o měření.

Poslední částí je nastavení parametrů sběru dat během automatického měření v záložce *Nastavení* (okno vlevo na obr. 7.11), které je stejné jako

v případě ručního snímání popsaného v 7.4.2 kromě okna *Pauza po pohybu sondou* pro zadávání času k ustálení hodnot v pětiotvorové sondě při přesunu z jednoho bodu do druhého. Uživatel může pomocí tlačítka *Odhadni dobu měření* zjistit přibližnou dobu měření, vypočtená hodnota je zobrazena na záložce *Obecné informace*. Odhadovaná doba je poměrně přesná při menším počtu bodů (100-200), při větším počtu je odhad pesimistický a skutečná doba měření bývá o něco kratší (v rámci desítek minut). Volbou *Spustit měření* začne automatické měření najetím traverzéro do bodu [1, 1], odkud se svislým/vodorovným traverzováním začne procházet měřicí mřížka. O přesunu traverzéro do dalšího měřeného bodu nebo snímání dat informují prvky nad hlavním panelem, takže uživatel má neustálý přehled o dění. Každý měřený bod je ihned ukládán do výstupního souboru a zároveň je vybarven zelenou barvou v měřicí mřížce v záložce *Zobrazení měřicí mřížky*, viz obr. 7.9. Během automatického měření dochází také k aktualizování odhadu času zbývajících do konce měření.

Důležitou novou funkcí oproti předcházející aplikaci je on-line vyhodnocení měřených dat dle kapitoly 3. V konturovém grafu na záložce *Zobrazení zpracovaných dat* může uživatel pomocí volby *Výběr zobrazované veličiny* volit z následujících veličin:

- Ztrátový součinitel celkového tlaku ζ_M .
- Rychlost proudu vzduchu před mříží w_1 .
- Rychlost proudu vzduchu za mříží w_2 .
- Složky rychlosti w_2 : w_{us} , w_{zs} , w_r , w_{2uz} , w_z , w_u .

Ukázka zobrazení ζ_M během měření je na obr. 7.8. Kromě vizuálního zobrazení lze vyhodnocená data sledovat i v numerické podobě na záložce *Zpracovaná data* hlavního panelu, obr. 7.12, kde zvoleným souřadnicím v měřicí mřížce odpovídají hodnoty veličin v levém horním rohu polí. Uživateli je také k dispozici tlačítko *Ulož zpracovaná data* pro uložení vyhodnocených dat. Výstupem je textový soubor s informacemi o měření ze záložky *Nastavení* v hlavičce a následně data ve sloupcích *sourad_u_k*, *sourad_r_j*,

$poloha_u$, $poloha_r$ pro určení polohy měřeného bodu a sloupcích s vyhodnocenými veličinami.

Poloha v ose u				Poloha v ose r			
177,57	177,57	177,57	177,57	53,58	42,86	32,15	21,43
174,42	174,42	174,42	174,42	53,58	42,86	32,15	21,43
171,66	171,66	171,66	171,66	53,58	42,86	32,15	21,43

Ztrátový součinitel celkového tlaku				Rychlost před mříží w1				Rychlost za mříží w2			
0,2518	0,2648	0,2381	0,1062	25,548	24,74	24,314	22,912	65,317	64,654	66,096	71,248
0,2637	0,2888	0,2712	0,1196	25,697	24,37	23,053	22,682	64,855	63,651	64,418	70,998
0,2636	0,2989	0,2992	0,1244	23,425	23,911	22,845	22,844	64,852	62,945	63,062	70,39

w_us				w_zs				w_r			
-4,5334	-4,3539	-3,6403	-0,8907	64,995	64,383	65,935	71,204	-4,5219	-4,3455	-3,6369	-0,8902
-4,4356	-4,2937	-3,5213	-0,54457	64,498	63,337	64,228	70,962	-4,4215	-4,2823	-3,5162	-0,54431
-4,3945	-4,1692	-3,6071	-0,34718	64,468	62,565	62,82	70,346	-4,3786	-4,1531	-3,5991	-0,3469

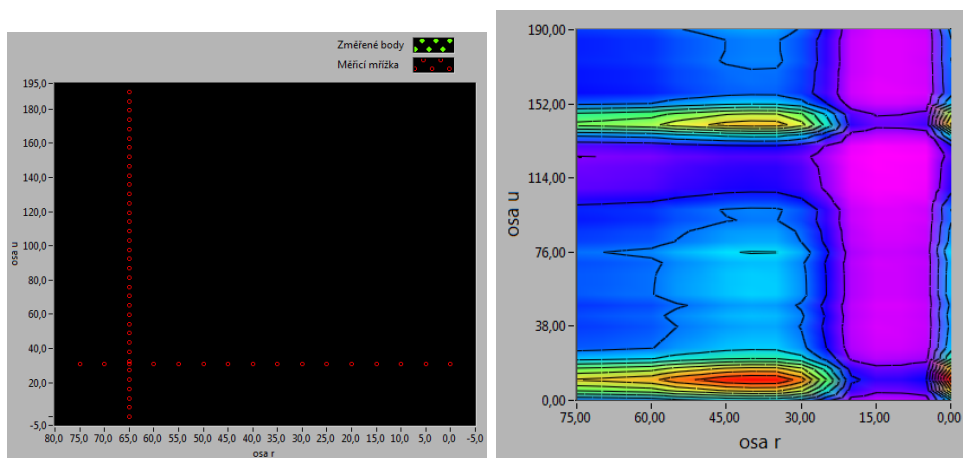
w_žuz				w_z				w_u			
65,153	64,53	66,035	71,21	22,273	21,931	21,673	20,483	61,227	60,689	62,377	68,201
64,65	63,483	64,325	70,964	22,042	21,585	21,089	20,083	60,776	59,7	60,77	68,063
64,618	62,703	62,923	70,347	21,994	21,253	20,783	19,724	60,759	58,992	59,392	67,525

Obr. 7.12: Zobrazení vyhodnocených dat automatického měření na záložce *Zpracovaná data*.

V případě potřeby může uživatel zastavit prováděné automatické měření tlačítkem *Zastavit*.

7.5.2 Měření ve vodorovné nebo svislé přímce

Další formát měřicí mřížky, ve které lze provádět automatické měření, je měření jen konkrétního vodorovného nebo svislého řezu. V tomto režimu jde pouze o sběr dat. V záložce *Měřicí mřížka* se vybere *Druh mřížky* jako *Svislá přímka* nebo *Vodorovná přímka*. Kromě nastavení parametrů jako u rovnoměrné mřížky zde důležitou roli hrají ještě parametry *Vzdálenost vodorovné přímky v ose „u“* nebo *Vzdálenost svislé přímky v ose „r“* určené k posunutí přímky od výchozího bodu $[0, 0]$. Po vygenerování přímky následuje stejný postup ke spuštění automatického měření jako v případě rovnoměrné mřížky.



Obr. 7.13: Ukázka nastavení měřicí mřížky pro rychlé proměření (vlevo) a vyhodnocených dat v tomto režimu.

7.5.3 Rychlé proměření

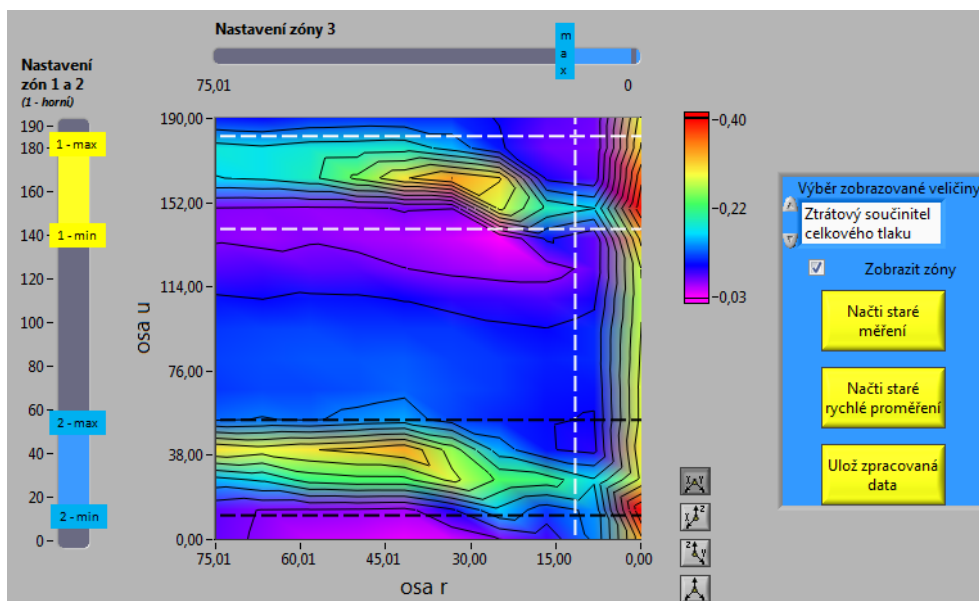
Tento režim je vytvořený s ohledem pro využití poslední možnosti – měření v nerovnoměrné mřížce. Měřicí mřížka pro rychlé proměření je složena ze svislé a vodorovné přímky, viz obr. 7.13, které se nastavují dle předchozí kapitoly, jen je nutné jako Druh mřížky vybrat možnost *Rychlé proměření*. Umožňuje relativně rychle získat ucelenou představu o charakteru výstupního pole za lopatkovou mříží. Rychlé proměření spočívá v minimalizaci počtu měřicích bodů oproti rovnoměrné mřížce, nicméně tímto zjednodušením není potlačena informace o poloze odtokových hran, resp. jejich úplavů a jejich příčném rozměru. Také je možné vytvořit si představu o tloušťce mezní vrstvy na „patě“ lopatky. Stačí jen zvolit správné umístění přímek, vodorovná by měla být umístěna ve středu mezilopatkového kanálu, svislá v polovině délky lopatky. Ke spuštění tohoto režimu měření slouží tlačítko *Rychle proměřit* na záložce Nastavení. V tomto módu nedochází k on-line vyhodnocení. Nejprve jsou proměřeny všechny body, dále jsou zvlášť zpracovány hodnoty ve svislé a vodorovné přímce, které jsou pak vzájemně proloženy. Výsledkem je možnost zobrazení dat v konturovém grafu jako na obr. 7.13, ze kterého je dobře patrné, kde se nachází odtokové hrany lopatkové mříže. Tento režim slouží pouze pro vizualizaci rozložení zpracovávaných veličin.

7.5.4 Měření v nerovnoměrné mřížce

Z hlediska zkoumání výstupního rychlostního pole za lopatkovou mříží jsou z pohledu sekundárního proudění důležité dvě oblasti, a to oblast za odtokovými hranami lopatek a oblast mezní vrstvy u paty lopatek, kde dochází k interakci mezních vrstev lopatky a omezující plochy. Tyto prostory by bylo dobré proměřovat detailněji, zatímco zbytek by stačilo měřit řídce. V původní aplikaci bylo ale umožněno měřit pouze v rovnoměrné mřížce, takže při nastavení hustší mřížky pro detailní zkoumání zajímavých oblastí by se podrobně proměřovaly i ty nezajímavé. Navíc by to mělo za následek neúměrné prodloužení doby měření až do řádů několika desítek hodin.

Proto v nové aplikaci je k dispozici režim automatického měření v nerovnoměrné mřížce. Předpokládá se proměření jednoho mezilopatkového kanálu, což znamená, že se zde nachází dvě oblasti náležitě přetlakové a podtlakové straně lopatky a jedna spojená s omezující stěnou. Tento prostor se nejprve musí proměřit pomocí rychlého proměření nebo řídkou rovnoměrnou mřížkou. Na záložce Měřicí mřížka se jako Druh mřížky zvolí *Nerovnoměrná mřížka*. Jejím základem bude rovnoměrná mřížka, kterou uživatel nastaví, viz její nastavení v kapitole 7.5.1. Měla by být nastavena s ohledem na požadovanou hustotu měřených bodů v oblastech nezajímavých ke zkoumání. Uživatel zatím nepotvrzuje tlačítko pro vytvoření měřicí mřížky.

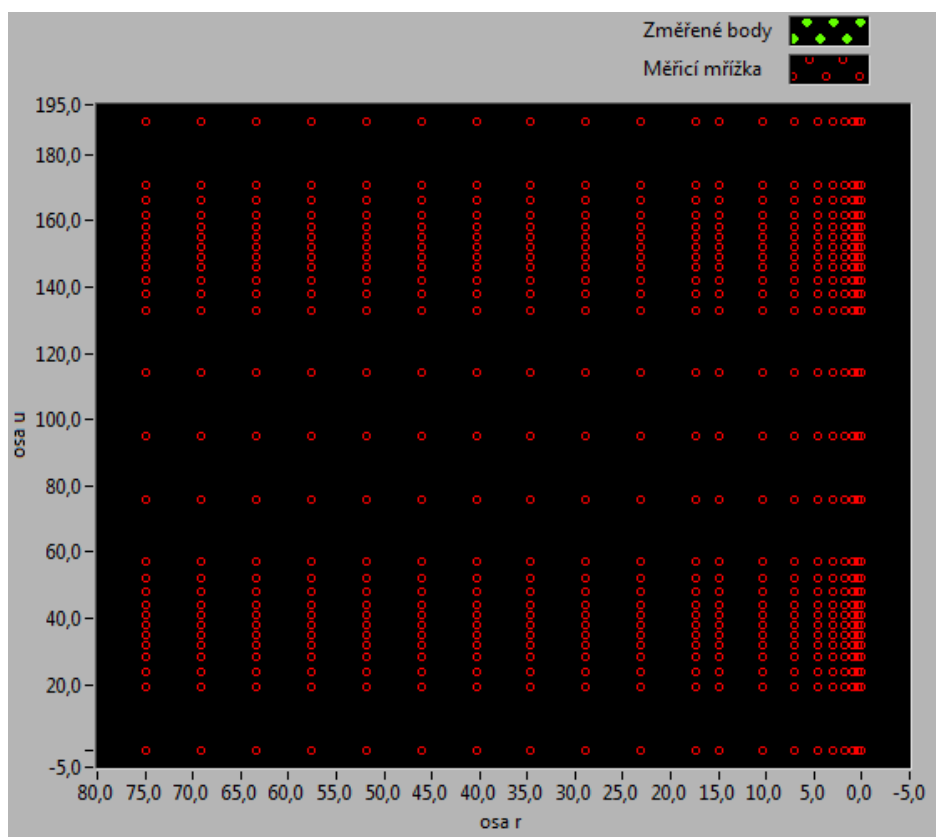
V další části nastavení nerovnoměrné mřížky je nutné přepnout se na záložku Zobrazení zpracovaných dat, kde jsou zobrazeny výsledky z aktuálního měření v rovnoměrné mřížce nebo z rychlého proměření. Uživatel může načíst i dřívější měření pomocí tlačítek *Načti staré měření* nebo *Načti staré rychlé proměření*, takže je možné provést jedno měření a použít ho pro nastavení nerovnoměrné mřížky v rámci jedné sady měření. K vyznačení oblastí pro detailní proměření jsou k dispozici **tři zóny**, které se v konturovém grafu objeví po zaškrtnutí pole *Zobrazit zóny* a měnit je lze posunem jezdců, viz obr. 7.14. První a druhá slouží pro vyznačení oblasti za odtokovými hranami, měnit jejich šířku lze pomocí jezdců *1-max*, *1-min*, *2-max*, *2-min*. První zóna



Obr. 7.14: Ukázka nastavení zón pro nerovnoměrnou mřížku.

vymezuje úplav horní lopatky, druhá zóna odpovídá úplavu spodní lopatky. V těchto zónách budou body rozmístěny v geometrické řadě ve směru osy u od krajů ke středu zóny. Počet bodů se určí pomocí parametrů *Počet bodů geometrické řady od kraje do středu – zóna 1* a *Počet bodů geometrické řady od kraje do středu – zóna 2* umístěných na záložce Měřicí mřížka. Třetí zóna slouží pro vyznačení maximální vzdálenosti od stěny lopatkové mříže, kde dochází ještě k zajímavým jevům, tudíž je opodstatněné zahušťovat měřicí mřížku. Od této hranice k omezující ploše se body vygenerují ve formě geometrické řady ve směru osy r . Počet bodů se určí parametrem *Počet bodů geometrické řady – zóna 3*. Po nastavení parametrů všech zón je možné již potvrdit tlačítko pro vytvoření měřicí mřížky.

Ukázka vygenerované nerovnoměrné mřížky nastavené na obr. 7.14 je na obr. 7.15, tvoří ji 560 bodů. Na obr. 7.9 je ukázka rovnoměrné mřížky používané pro měření ve staré aplikaci, která obsahuje 576 bodů. Při jejich porovnání je jasně patrné mnohem lepší rozprostření měřených bodů v nerovnoměrné mřížce v oblasti velkých gradientů rychlosti, což umožňuje po-



Obr. 7.15: Ukázka nerovnoměrné mřížky.

drobnější zkoumání významných oblastí při téměř stejném počtu bodů.

7.6 Testování aplikace

Nová řídicí aplikace musela být odladěna kvůli odstranění případných nedostatků a hlavně pro porovnání s předchozí aplikací, konkrétně v době trvání automatického měření při testování lopatkových mříží. Před měřením této doby byly nejprve vyzkoušeny funkce v záložce Ruční ovládání, které po několika drobných úpravách splňují požadavky na shodnost s původní aplikací a úspěšně byly otestovány i nově přidané funkce jako vyrovnání sondy do proudu nebo zobrazování histogramu.

Důležitější částí bylo ověření režimů automatického měření. Při testování

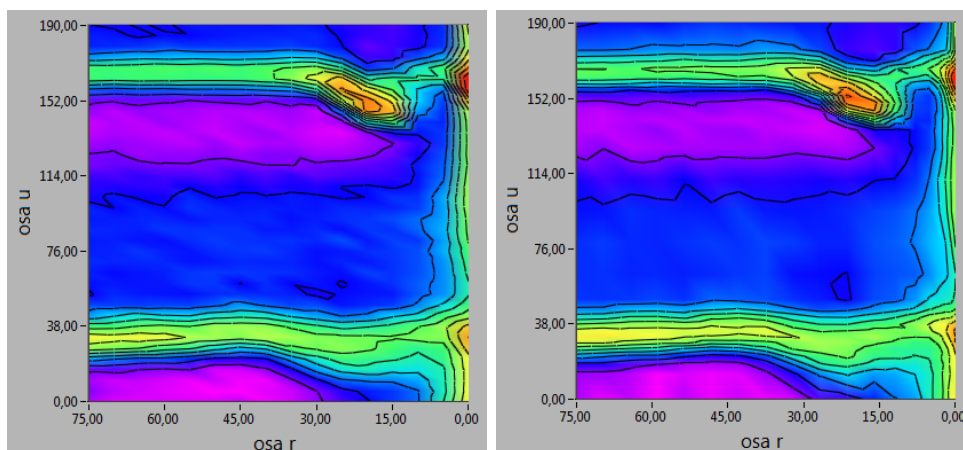
Druh mřížky	Počet bodů	Traverzování	Doba snímání [min]	Doba traverzování [min]	Celková doba [min]
Rovnoměrná mřížka	576	Vodorovné	105	90	195
Rovnoměrná mřížka	576	Vodorovné	7	79	86
Rovnoměrná mřížka	144	Vodorovné	10	30	40
Rovnoměrná mřížka	150	Svislé	5	55	60
Rychlé proměření	52	Vodorovné	1	13	14
Nerovnoměrná mřížka	589	Vodorovné	10	76	86
Nerovnoměrná mřížka	576	Svislé	7	140	147

Tabulka 2: Výsledky testování aplikace.

byly voleny různé druhy mřížek a nastavení snímání, výsledky některých experimentů jsou v tabulce 2. Z tabulky je patrné, že dobu měření se povedlo podstatně zkrátit. Měření v rovnoměrné mřížce o 576 bodech trvalo bezmála 8 hodin v předchozí aplikaci, avšak využitím nové aplikace lze provést obdobné měření přibližně za čtvrtinu času. Hlavním důvodem je zvýšení maximální vzorkovací frekvence snímání dat z 1 Hz na 150 Hz díky přímé komunikaci řídicího počítače s NetScannerem 9116, viz kapitola 4.2. Největší časovou zátěží se tak stala doba traverzování mezi měřenými body místo doby snímání, kterou však již programově ovlivnit nelze. V prvním záznamu tabulky byla použita vzorkovací frekvence 4 Hz , ale v záznamu druhém už 100 Hz , což představuje řádový skok ve vzorkovací frekvenci a výrazný rozdíl ve výsledné časové dotaci na jedno měření.

Dále měření ukázalo, že vodorovné traverzování je výrazně rychlejší než svislé, což je dáno velkou hodnotou převodového poměru v ose u . Narozdíl od předchozí aplikace je ale už svislé traverzování časově dostupné.

Jako silný nástroj se ukázala možnost rychlého proměření, které může být spuštěno například při počátečním prohřívání tunelu, kdy nelze snímat data pro další vyhodnocení vzhledem k změnám některých parametrů. Rychlým proměření se ale tento čas pro ustálení teploty proudu vzduchu může využít pro „osahání“ prostoru za lopatkovou mříží. Pomocí získaných dat lze pak nastavit nerovnoměrnou mřížku pro detailnější měření v oblastech za odtokovou hranou a u stěny lopatkové mříže. Obě tyto měření se dohromady i s nastavením vměstnají do 2 hodin a zároveň dají lepší výsledky oproti měření s předchozí řídicí aplikací.



Obr. 7.16: Ztrátový součinitel celkového tlaku ζ_M za lopatkovou mříží při měření v rovnoměrné mřížce (vlevo) a nerovnoměrné (vpravo).

Poslední částí bylo zkoumání přínosnosti režimu automatického měření pomocí nerovnoměrné mřížky. Ukázka porovnání měření v rovnoměrné a nerovnoměrné mřížce (obě mají stejný počet bodů) je na obr. 7.16, měřeno 20 mm za lopatkovou mříží složenou z prismatických lopatek. Je viditelné, že při použití nerovnoměrné mřížky je detailněji vyobrazen prostor za odtokovými hranami a také u stěny lopatkové mříže (zde je hlavně patrné zúžení skutečného pásma).

8 Testování snímačů Kulite

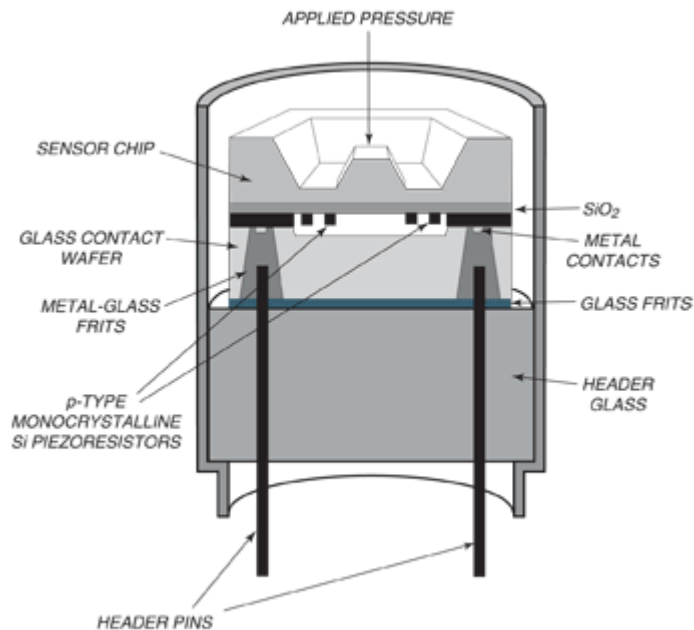
V rámci spolupráce s Doosan Škoda Power s.r.o. se naskytla možnost zapůjčit si a otestovat tlakové snímače od firmy **Kulite**. Ty se vyznačují velmi dobrou schopností pro měření dynamických jevů, čehož by se mohlo využít přímo na testovacím zařízení pro lopatkové mříže přidáním tohoto snímače k pětiotvorové sondě. Další motivace k otestování těchto snímačů plyne z plánů Katedry kybernetiky FAV ZČU, která má v úmyslu je použít pro měření dynamických jevů uvnitř turbínových těles.

Nejprve bylo nutné seznámit se s vlastnostmi snímačů od firmy Kulite dostupných v Doosan Škoda Power s.r.o. a podle toho navrhnout vhodný experiment. Druhou fází byla aplikace experimentu a vyhodnocení naměřených dat. Do testování bylo zahrnuto i testování dynamických vlastností převodníku NetScanner 9116.

8.1 Snímače Kulite

Firma **Kulite** je světoznámý výrobce speciálních tlakových snímačů založených na piezoelektrickém principu, které jsou velmi využívány v leteckém, automobilovém a dalším průmyslu. Tato firma je schopna dodat senzory s prvotřídními vlastnostmi jako například dlouhodobou stabilitou a přesností, jež umožňují jejich použití i v nejnáročnějších podmínkách.

Hlavní odchylkou ve výrobě snímačů firmy Kulite oproti ostatním firmám je dielektrická izolace senzorů pomocí metody *SOI* (křemík na izolantu). Struktura snímače se skládá ze tří vrstev, kdy je nejprve na mechanickou tlakově citlivou membránu nanесena monokrystalická vrstva N-typu křemíku, která zajišťuje mimo jiné dlouhodobou robustní mechanickou životnost. Na ni je nanесena dielektrická izolace z oxidu křemičitého k oddělení N-typu a P-typu křemíku, což eliminuje P-N přechod a umožňuje měřit tlaky při vyšších teplotách. Ve speciálně nanесené vrstvě s P-typem křemíku jsou čtyři odporové tenzometry zapojené do Wheatstonova můstku. Deformací membrány dochází ke změně odporu tenzometrů a nerovnováha v můstku je pak přímo



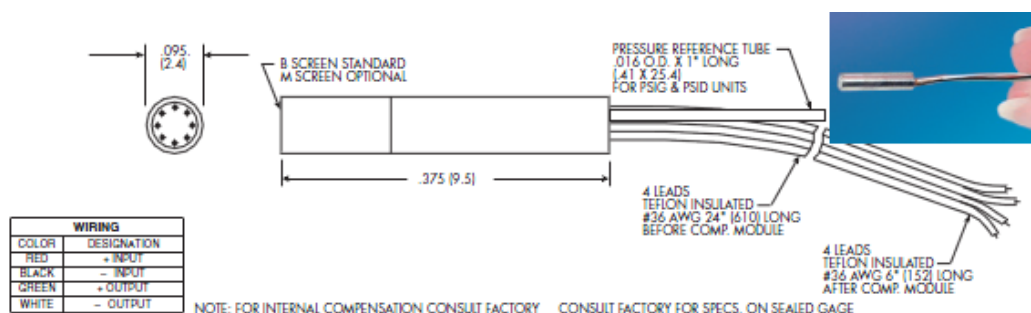
Obr. 8.1: Struktura snímačů od firmy Kulite (zdroj [6]).

úměrná mechanickému napětí. U snímačů jiných firem navíc dochází k problémům při propojení křemíkové vrstvy a zbytku snímače pomocí zlatých drátků, které jsou náchylné na vysoké vibrace nebo opakující se velké změny tlaku. Firma Kulite to vyřešila pomocí tzv. „leadless“ metody umístěním senzoru na hermeticky uzavřenou a mechanicky pevnou skleněnou vrstvu. Struktura snímačů je znázorněna na obr. 8.1.

Pro testování byly zvoleny tyto dva typy:

- *XCQ-093-0.35BARD* – slouží pro měření v diferenčním módu až do 35 kPa , buzení 10 V , výstup $0\text{-}100\text{ mV}$, vlastní frekvence 150 kHz , popis na obr. 8.2.
- *XCEL-100-25A* – absolutní snímač pro měření do 170 kPa , buzení 10 V , výstup $0\text{-}100\text{ mV}$, vlastní frekvence 240 kHz .

Oba snímače jsou určeny pro statické i dynamické měření v teplotním rozmezí

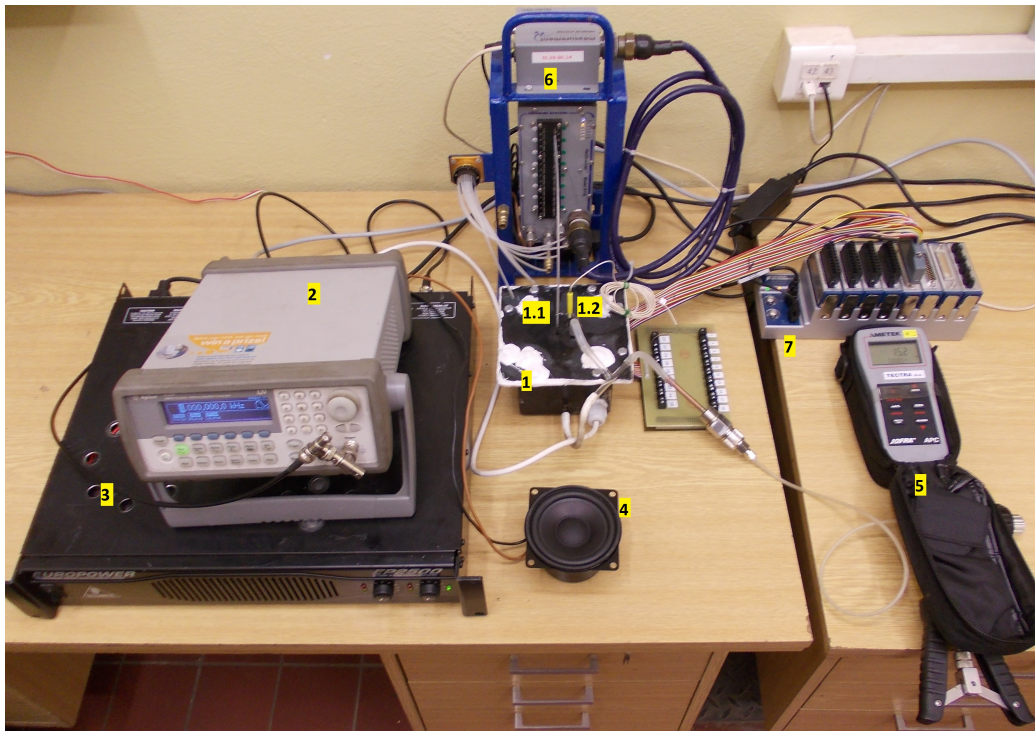


Obr. 8.2: Popis snímače *XCQ-093* (zdroj [6]).

$-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dynamický rozsah je dle prodejce těchto snímačů omezen do 20 % jejich vlastní frekvence. Více informací o snímačích lze nalézt na oficiálních stránkách [6].

8.2 Experiment

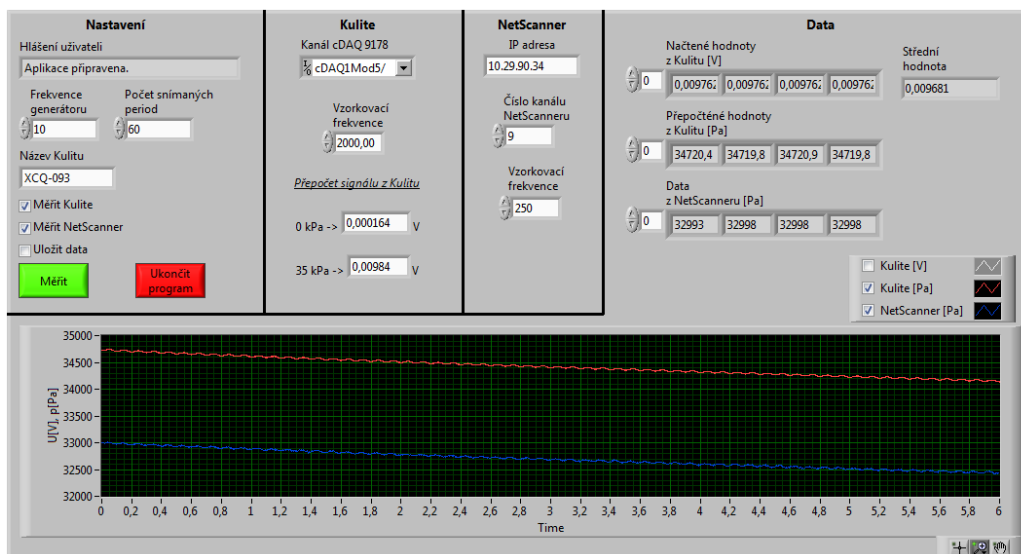
Základem pro otestování dynamických vlastností snímačů bylo vytvoření vzduchotěsné měřicí komory (na obr. 8.3 pod číslem 1), do níž byl umístěn reproduktor *ARN-100-60/8* pro vytvoření harmonického signálu uvnitř. Stejný reproduktor byl umístěn i mimo komoru pro vizuální kontrolu (číslo 4 na obrázku), jehož kmitočtovou charakteristiku lze nalézt na obr. E.1 v přílohách. Buzení reproduktorů bylo prováděno pomocí generátoru *AGILENT 33220A* a zesilovače *EUROPOWER EP2500* (na obrázku pod čísly 2 a 3). Měřicí komora byla vzduchotěsná pro možnost měření při vyšším tlaku než je atmosferický. Ke zvýšení tlaku uvnitř komory byl použit tlakový kalibrátor od firmy **Ametek ATC**. Posledními částmi komory jsou vývody pro tlakové snímače. Pod číslem 1.1 na obrázku se nachází výstup z komory na tlakový převodník *NetScanner 9116*, který byl připojen k počítači přes síťový kabel. Výstup 1.2 na obrázku sloužil pro umístění jednoho ze dvou testovaných snímačů od firmy *Kulite*. Ten byl připojen k můstkovému modulu *NI 9237 D-Sub*, jenž měl za úkol vybuzovat snímač a sbírat z něj data. Karta byla zasunuta do *NI cDAQ 9178*, který slouží pro nastavení vložených modulů pomocí počítače, ke kterému je připojen USB kabelem.



Obr. 8.3: Aparatura prováděného experimentu.

Pro sběr dat ze snímačů byla v programu LabView vytvořena aplikace *Merici_aplikace.vi* (na obr. 8.4). Ta je pomocí černých čar rozdělena na několik sekcí:

- *Kulite* – je nutné nastavit správný kanál, ke kterému je připojen snímač. Vzorkovací frekvence je nastavitelná v rozmezí 1,7-50 kHz . Snímaná data jsou ve formě napětí, které uživatel má možnost přepočítat na tlak vložím 2 bodů, které určují převodní přímku.
- *NetScanner* – nastavení IP adresy a čísla kanálu NetScanneru, do kterého je přiveden výstup z měřicí komory. Vzorkovací frekvence je nastavitelná v rozmezí 1-250 Hz .
- *Data* – číselná i grafická vizualizace dat ze snímačů.



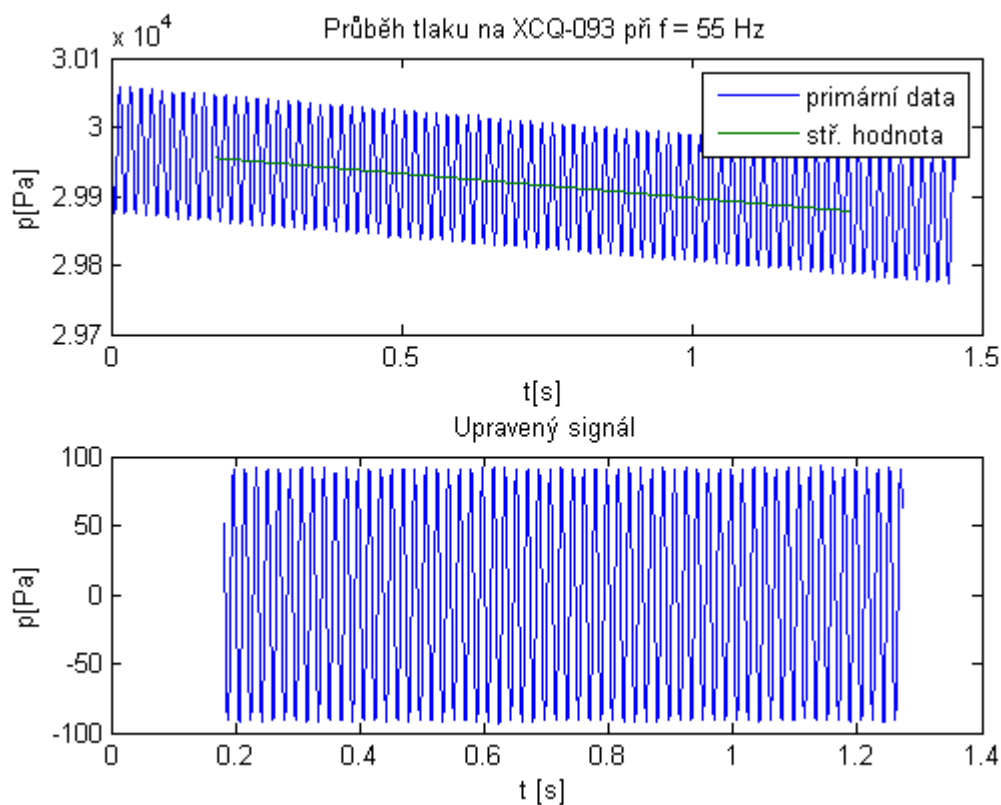
Obr. 8.4: Uživatelské okno aplikace *Merici_aplikace.vi*.

- *Nastavení* – část pro nastavení snímání dat. Pomocí zadané frekvence pouštěné do reproduktoru a počtu žádaných period ke snímání program dopočte počet vzorků, který má být snímán ze sensorů. Aplikace umožňuje zvolit snímač, ze kterého má probíhat sběr dat, lze pracovat i s oběma snímači najednou. Poslední možností je zatrhnutí políčka pro ukládání dat. To vytvoří textový soubor, jehož název se bude skládat z názvu testovaného snímače od firmy Kulite, testované frekvenci a informací, zda jsou v souboru uložena data z NetScanneru nebo z Kulitu, například *XCQ-093_120Hz_dataKulite.txt*. V samotném souboru se pak nachází dva sloupce, kde první slouží pro ukládání času a druhý pro hodnoty tlaků.

Měření probíhalo ve frekvenčním pásmu od 5 do 20 000 Hz pro oba typy Kulitu s podrobnějším zaměřením na nižší frekvence. Od 5 do 15 Hz se postupovalo s krokem 1 Hz , pokračovalo se s krokem 10 Hz až do 195 Hz , od 200 Hz se navyšovala frekvence po 100 Hz až do 1 kHz a nakonec se frekvence s každým krokem zvyšovala o 1 000 Hz až do 20 kHz . Při testování snímačů se zároveň sbírala data z NetScanneru pro porovnání, ale pouze do

125 Hz kvůli vzorkovacímu teorému. Měřicí komora byla natlakována na hodnotu okolo 30 kPa , bohužel se ale nepodařilo zajistit její vzduchotěsnost, takže všechna měření neproběhla na stejné hladině. Vzhledem k tomu, že experiment slouží pro měření dynamických vlastností snímačů, neměl by únik tlaku mít příliš velký vliv. Pro každou generovanou frekvenci byl zaznamenán signál o délce 80 period.

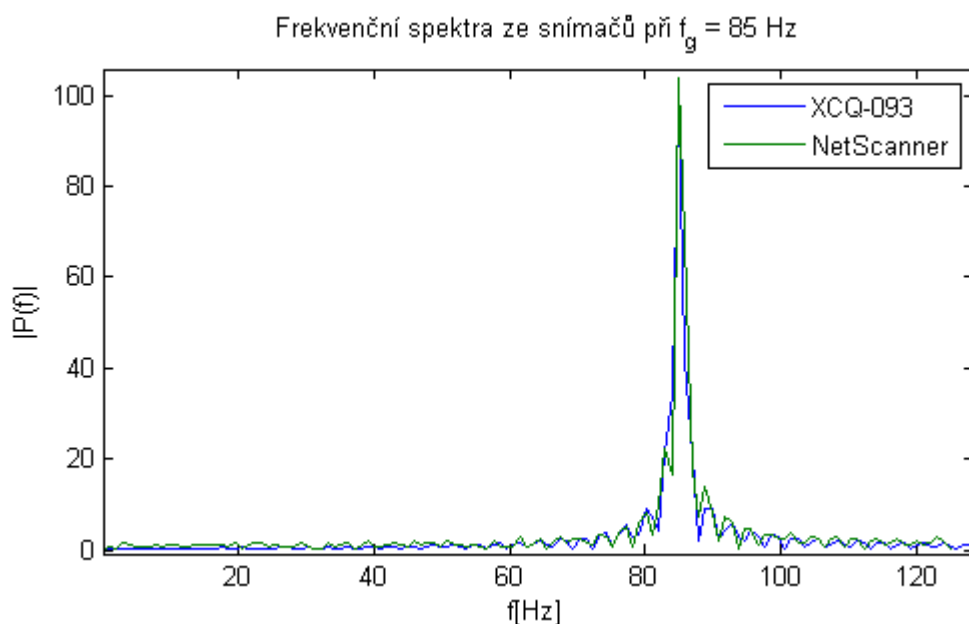
8.3 Zpracování dat



Obr. 8.5: Ukázka úpravy primárních dat před dalším zpracováním.

Naměřená data byla zpracována v programu *Matlab*. Protože měřicí komora nebyla absolutně vzduchotěsná, bylo nutné primární data upravit, protože únik tlaku z komory by zaváděl do signálu zkreslení. Proto byl pro každý

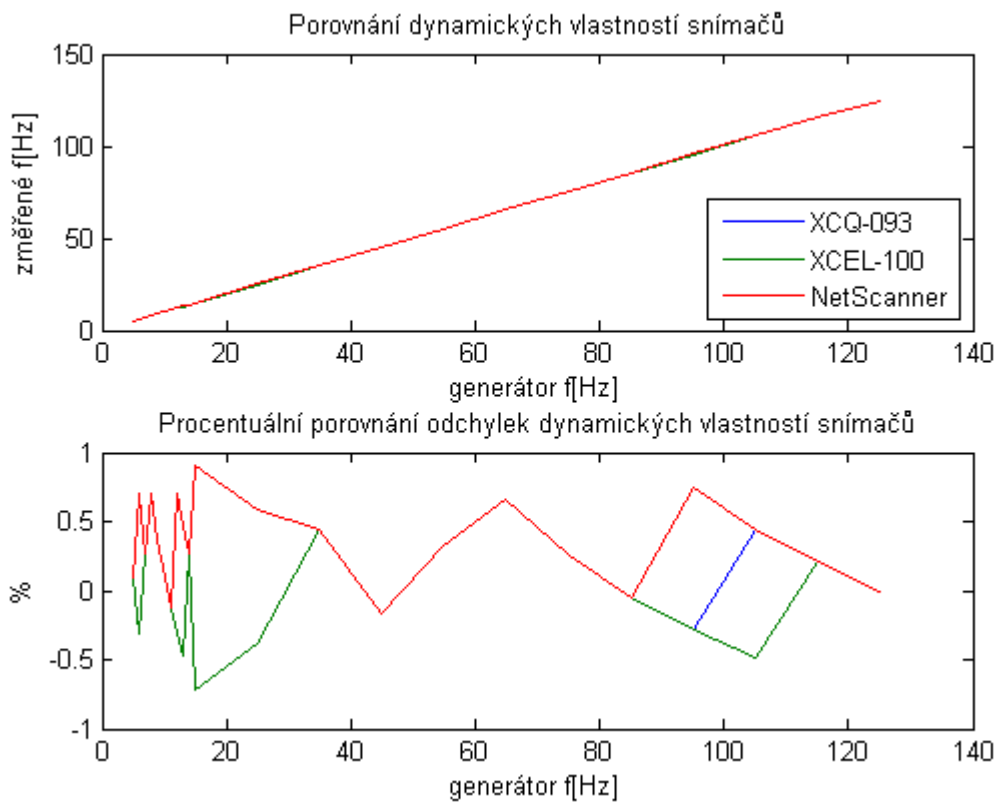
průběh napočítáván klouzavý průměr, který se počítal z dat odpovídající 20 periodám vzorkovací frekvence. Odečtením klouzavého průměru od primárních dat by ale kvůli jeho harmonickému průběhu také došlo ke zkreslení dat, proto byl ještě proložen přímkou a ta teprve byla odečtena. Tím se vyfiltrovala data, která lze dále zpracovávat, ukázka je na obr. 8.5.



Obr. 8.6: Ukázka vygenerovaného spektra.

K nalezení nejvyšší frekvence v signálu byla použita Fourierova transformace, která je v Matlabu dostupná pomocí funkce $fft()$. Na obr. 8.6 je znázorněna ukázka spektra dat naměřených na XCQ-093 a NetScanner 9116 při generované frekvenci 85 Hz. Je patrné, že obě spektra obsahují nejvyšší frekvenci okolo hodnoty generované frekvence.

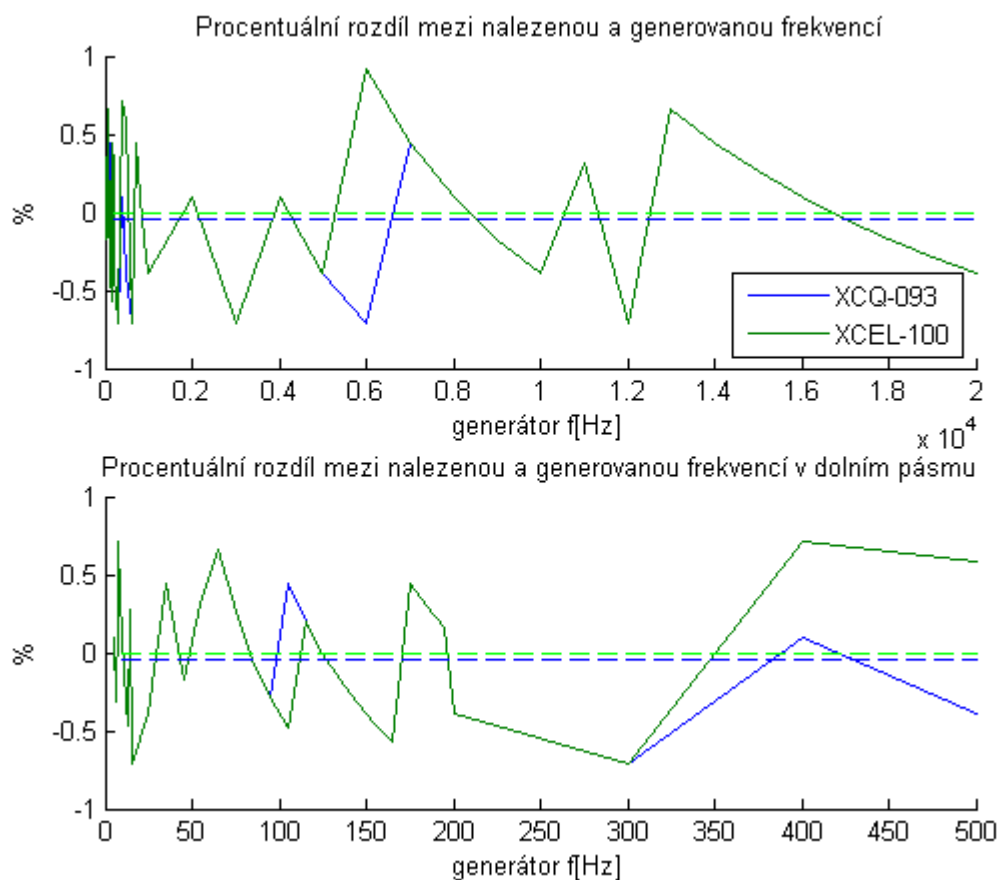
Po vyhledání nejvyšších frekvencí v každém signálu mohlo být provedeno jejich porovnání. V dolním pásmu od 5 do 125 Hz byly zkoumány výsledky ze všech tří snímačů: XCQ-093, XCEL-100 a NetScanner 9116. V horním grafu na obr. 8.7 jsou vykresleny nalezené frekvence v závislosti



Obr. 8.7: Porovnání všech tří snímačů v dolním frekvenčním pásmu.

na generované. Křivky se vzájemně téměř překrývají a diagonální průběh napovídá o velmi dobrých dynamických vlastnostech všech snímačů v tomto rozmezí. To je potvrzeno grafem pod ním, kde jsou vykresleny procentuální odchylky nalezených nejvyšších frekvencí od generovaných, které nejsou vyšší než $\pm 1\%$.

V celém frekvenčním pásmu byly zkoumány dynamické vlastnosti jen snímačů od firmy Kulite, protože NetScanner 9116 nedisponuje dostatečně velkou vzorkovací frekvencí. Pomocí obou snímačů se podařilo velmi přesně nalézt generované frekvence až do 20 kHz . Pro nejvyšší nalezené frekvence byly opět spočteny procentuální chyby oproti generovaným frekvencím, vy-



Obr. 8.8: Porovnání procentuálních odchylek dynamických vlastností XCQ-093 a XCEL-100.

kresleny jsou v grafech na obr. 8.8, kde graf výše zobrazuje celé frekvenční pásmo a graf níže pouze jeho dolní část. Odchytky oproti generovaným frekvencím se opět pohybují v rozmezí $\pm 1\%$. V grafech jsou navíc čárkovanými čarami vykresleny průměrné hodnoty odchylek, pro XCQ-093 činila $-0,05\%$, pro XCEL-100 $-0,01\%$. Zajímavostí je, že z celkových 57 generovaných frekvencí se frekvence nalezené snímači shodují v 53 případech.

9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vyvinout nástroj pro řízení a podporu vyhodnocení experimentů na testovacím zařízení lopatkových mříží umístěného v experimentální laboratoři Doosan Škoda Power s.r.o. Zařízení obsahuje středně-rychlostní tunel, který usměrňuje proudící vzduch na lopatkovou mříž pod různým úhlem. Z dat sbíraných ze snímačů před i za lopatkovou mříží se určí vlastnosti lopatek osazených v lopatkových mřížích a podle výsledků se může navrhnout jejich nový tvar s vyšší účinností.

Před začátkem vývoje bylo nejprve nutné prostudovat testovací zařízení a předchozí řídicí aplikaci, jejíž hlavní problém byl velmi pomalý sběr dat v prostoru za lopatkovou mříží trvajícím až 8 hodin. Navíc uživatel byl omezen funkcemi pro ovládání zařízení a neměl žádné možnosti vyhodnocení a vizualizace měřených dat. Jako hlavní příčina pomalého snímání dat v režimu automatického měření byla určena složitá komunikace mezi řídicím počítačem, PLC a tlakovým převodníkem NetScanner 9116, která dovoľovala vzorkovací frekvenci maximálně 1 Hz . Zjednodušením komunikace mezi prvky zařízení se povedlo zvýšit vzorkovací frekvenci až na 150 Hz . Celkový čas automatického měření při stejném počtu měřených bodů jako v původní aplikaci klesl na přibližně 1,5 hodiny.

Kromě vyřešení hlavního problému byly uživateli zprostředkovány nové funkce k ovládání testovacího zařízení, kde v první řadě šlo o vizualizaci všech měřených dat v módu ručního i automatického měření. V podstatě se podařilo splnit všechny požadavky vypsání v kapitole 4.1. Největší rozšíření nové aplikace proti předchozí bylo uskutečněno v nastavení režimů automatického měření. V původní aplikaci byla možnost proměrování roviny za lopatkovou mříž pouze v rovnoměrné mřížce. V této oblasti se ale nachází místa, která jsou z hlediska měření zajímavější než ostatní. Proto byl vytvořen nový režim měření v nerovnoměrné mřížce, který umožňuje zahustit síť měřených bodů v zajímavějších oblastech pro zkoumání. Posledním režimem je tzv. „rychlé proměření“, jež umožní uživateli udělat si rychlý přehled o prostoru za lopat-

kovou mříží pomoci jednoho svislého a jednoho vodorovného proměřeného řezu. Během režimů automatického měření v rovnoměrné i nerovnoměrné mřížce dochází k online vyhodnocení a zobrazení měřených dat (například ztrátového součinitele celkového tlaku ζ_M), které v předchozí aplikaci chybělo a muselo se provádět offline v jiných výpočetních programech.

Důležitou vlastností nové řídicí aplikace je její otevřenost, to znamená možnosti přidání nových funkcí v budoucnu. Za úvahu jistě stojí přestavba traverzéro, ve kterém je uchycena pětiotvorová sonda. Nahrazení mohutné a těžké konstrukce za lehčí by mohlo umožnit rychlejší pohyb traverzérem a tím i rychlejší průběh celého měření. Pro vyšší přesnost v polohování sondou by se krokové motory mohly doplnit o senzory otáčení. Po konzultaci s firmami dodávající tyto typy stojí za zmínku například magnetické inkrementální snímače *MIRC640* nebo *MIRC610* dodávané firmou **Larm a.s.** Dalším návrhem pro doplnění řídicí aplikace je vytvoření funkcí pro dynamické měření rychlostního pole za lopatkovou mříží.

Poslední částí této diplomové práce bylo zkoumání dynamických vlastností tlakového převodníku NetScanner 9116, a tlakových snímačů XCQ-093 a XCEL-100 od firmy Kulite. K tomuto účelu byl sestaven experiment skládající se z měřicí komory, ve které byl umístěn reproduktor pro generování harmonického signálu uvnitř a výstupy pro senzory. Snímače byly měřeny v pásmu od 5 Hz do 20 kHz , kde oba snímače od firmy Kulite prokázaly velmi dobrou schopnost snímání dynamických jevů, když se jejich chyba pohybovala v pásmu $\pm 1\%$ od generované frekvence. Stejnou chybu měl i tlakový převodník NetScanner 9116, ale ten byl kvůli jeho maximální vzorkovací frekvenci 250 Hz měřen pouze do 125 Hz .

Literatura

- [1] **Peprný, J.; Pekárek, K.** *Výstavba středorychlostního aerodynamického tunelu na lopatkové mřížce*. Plzeň: Technická zpráva SV 3367, ŠKODA Plzeň, 1965.
- [2] **Hoznedl M., Sedlák K.** *Vyhodnocení ztrátových součinitelů přímých lopatkových mříží, měřených na středorychlostním tunelu ŠKODA*. Plzeň: Technická zpráva VZTP 1062, Škoda Power s.r.o., 2012.
- [3] **Chaluš M.** *Řízení kalibračního stendu tlakové sondy*. Plzeň: Bakalářská práce, ZČU Plzeň, 2011.
- [4] *Oficiální stránky firmy Beckhoff* [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.beckhoff.com>>.
- [5] *Oficiální stránky firmy National Instruments* [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.ni.com>>.
- [6] *Oficiální stránky firmy Kulite* [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.kulite.com>>.
- [7] *Model 9116 Intelligent Pressure Scanner User's Manual*. Pressure Systems, Inc., 2007.

B ADS parametry local process image

Proměnná	Index group	Index offset	Velikost v bytech
T_p	0xF020	0x0	2
T_o	0xF020	0x2	2
I_p_b	0xF020	0x4	2
osa1_in.status	0xF020	0x6	1
osa_u_in.position	0xF020	0x7	4
osa_u_in.extstatus	0xF020	0x11	2
osa_u_out.ctrl	0xF030	0x0	1
osa_u_out.velocity	0xF030	0x1	4
osa_u_out.extctrl	0xF030	0x5	2
osa_z_in.status	0xF020	0xE	1
osa_z_in.position	0xF020	0xF	4
osa_z_in.extstatus	0xF020	0x13	2
osa_z_out.ctrl	0xF030	0x8	1
osa_z_out.velocity	0xF030	0x9	4
osa_z_out.extctrl	0xF030	0xD	2
osa_r_in.status	0xF020	0x16	1
osa_r_in.position	0xF020	0x17	4
osa_r_in.extstatus	0xF020	0x1B	2
osa_r_out.ctrl	0xF030	0x10	1
osa_r_out.velocity	0xF030	0x11	4
osa_r_out.extctrl	0xF030	0x15	2
osa_A_in.status	0xF020	0x1E	1
osa_A_in.position	0xF020	0x1F	4
osa_A_in.extstatus	0xF020	0x23	2
osa_A_out.ctrl	0xF030	0x18	1
osa_A_out.velocity	0xF030	0x19	4
osa_A_out.extctrl	0xF030	0x1D	2
osa_pitotka_in.status	0xF020	0x26	1
osa_pitotka_in.position	0xF020	0x27	4
osa_pitotka_in.extstatus	0xF020	0x2B	2
osa_pitotka_out.ctrl	0xF030	0x20	1
osa_pitotka_out.velocity	0xF030	0x21	4
osa_pitotka_out.extctrl	0xF030	0x25	2

Tabulka 3: ADS parametry.

C Seznam použitých registrů karty KL2531-1000

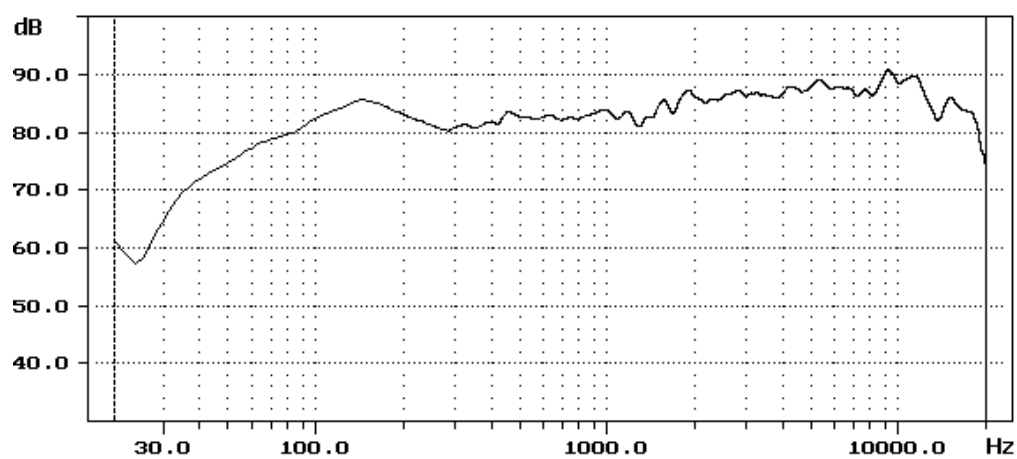
- **R0, R1** – aktuální pozice, R0 obsahuje nižší 2 byty.
- **R2, R3** – nová pozice, R2 obsahuje nižší 2 byty.
- **R7** – umožňuje spustit některé předdefinované funkce, jako například sjetí na koncový spínač.
- **R31** – pro zápis do některých registrů je nutné vložit do tohoto registru heslo 0x1235.
- **R32** – specifikace nastavení terminálu, například operačního módu.
- **R38, R39** – minimální a maximální rychlost.
- **R40** – maximální akcelerace.
- **R46** – režim mikrokrokování, možnosti: plný, poloviční, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64 krok.
- **R53** – rychlost při sjíždění na koncový spínač.
- **R54** – rychlost při sjíždění z koncového spínače.

D Ukázka m-filu phi_cpphi_cptheta.m

```
function [za]=cpStat_phi_theta(xa,ya)

lenx=length(xa);
leny=length(ya);
for(j=1:leny)
    for(i=1:lenx)
        x=xa(i);
        y=ya(j);
        z1=0.9952263662883930+x*(0.003838194404108053+...
            x*(-0.0004180308860759017+...
            *7.365653343405820E-07));
        z2=y*(-0.01583539332108150+...
            y*-0.0003764833924529659);
        z3=1.0000000000000000+x*(0.002981892081544862+...
            x*-0.0001884779165317800);
        z4=y*(-0.01687737373093105+...
            y*-0.0001558038238446686);
        z=(z1+z2)/(z3+z4);
        za(i,j)=z;
    end
end
```

E Kmitočtová charakteristika reproduktoru ARN-100-60/8



Obr. E.1: Kmitočtová charakteristika reproduktoru ARN-100-60/8.

F Obsah příloženého CD

- *SRT aplikace* – složka se spustitelnou aplikací **SRT_aplikace.exe**, soubory z programu LabVIEW a kalibračními rovnicemi.
- *Testování tlakových snímačů* – složka s naměřenými daty a programy pro snímání a zpracování dat.