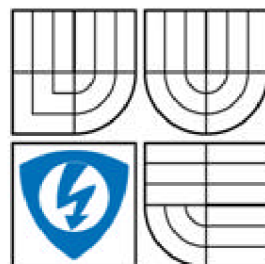


VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNE  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKACNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MERÍČÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# SIMULÁTOR LETECKÉHO MOTORU (ENGINE SIMULATOR) – NÁVRH HW

ENGINE SIMULATOR – HW DEVELOPMENT

BAKALÁRSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

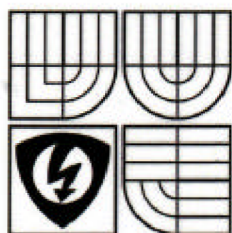
AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL STAROSTA

VEDOUČÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. STANISLAV KLUSÁČEK

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Automatizační a měřicí technika

**Student:** Starosta Michal

**Ročník:** 3

**ID:** 72886

**Akademický rok:** 2008/09

## NÁZEV TÉMATU:

### Simulátor leteckého motoru (Engine simulator) - návrh HW

#### POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem projektu je navrhnout základní koncepci simulátoru leteckého motoru typu Turbo Fan. Výsledné zařízení má sloužit k testovacím účelům řídicích jednotek FADEC (Full Authority Digital Engine Control). Bude se jednat o samostatnou HW jednotku (FPGA) nebo PC aplikaci, která bude pomocí vhodného IO rozhraní generovat signály identické výstupům ze snímačů reálného motoru. Tato semestrální práce bude zaměřena na návrh základní koncepce zařízení včetně hardwarových prostředků. Seznamte se současnými řešeními a zvolte nejvhodnější koncepci z hlediska budoucího rozšíření a celkové modularity. Práce bude probíhat ve spolupráci s Integrated Design Centre firmy Honeywell - divizi Aerospace.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího a konzultantů práce.

**Termín zadání:** 9.2.2009

**Termín odevzdání:** 1.6.2009

**Vedoucí práce:** Ing. Stanislav Klusáček

**Konzultanti bakalářské práce:** Ing. Miroslav Krupa - IDC Brno, Honeywell s.r.o.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.  
předseda oborové rady



#### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Abstrakt**

Práca sa zaoberá konceptom hardwarového simulátora leteckého tryskového motoru za účelom testovania riadiacich jednotiek FADEC. V úvode práce je popísaný hardwarový simulátor a jeho možnosti riešenia z hardwarového hladiska. Ako nástroj pre zber dát a generovanie signálov sú popísane meracie karty a možné platformy, ktoré s meracími kartami spolupracujú. Ďalej sú v práci popísane softwarové nástroje vhodné pre modelovanie tryskového motoru, pričom hlavné zameranie je na prostredie Matlab / Simulink a jeho možnosti komunikácie pomocou toolboxov s kartami pre zber dát tak aby boli splnené požiadavky na rýchlosť odozvy celého simulátora. Na konci práce je popísaný modelársky tryskový motor a navrhnutý koncept s výberom vhodných meracích kariet a softwarových nástrojov.

## **Abstract**

This work deals with concept of hardware simulator of jet engine for test purpose of control unit FADEC. In introduction of work is described hardware simulator and possibilities of hardware construction. As a device for data acquisition and signal generation are described data acquisition cards and possible platform for cooperation with them. Next are described software tools optimal for modeling jet engine, whereby main interest is for Matlab / Simulink and his possibilities of communication with data acquisition cards using toolbox to gain demands for latency of whole simulator. In the end is described jet engine for models and designed concept with selection of data acquisition cards and Simulink toolbox.

## **Kľúčové slova:**

Hardwarový simulátor, Simulácia, Matlab, Simulink, Real Time Ttoolbox, Data Acquisition Toolbox, Real Time Workshop, Real Time Windows Target, Meracie karty, koncept, model, tryskový motor, LabVIEW, FPGA

## **Key words:**

Hardware simulator, Simulation, Matlab, Simulink, Real Time Toolbox, Data Acquisition toolbox, Real Time Workshop, Real Time Windows Target, Data acquisition cards, Concept, Model, Jet Engine, LabVIEW, FPGA

## **Bibliografická citace**

STAROSTA, Michal. *SIMULÁTOR LETECKÉHO MOTORU (ENGINE SIMULATOR) – NÁVRH HW* Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 51 s.,  
Vedoucí práce.: Ing. Stanislav Klusáček.



## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Simulátor leteckého motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informacích zdroje, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona c. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **1. června 2009**

.....  
podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Stanislavovi Klusáckovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Dále děkuji konzultantovi bakalářské práce Ing. Miroslavovi Krupovi a Ing. Róbertovi Hevesovi za odbornou a věcnou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **1. června 2009**

.....  
podpis autora

## OBSAH

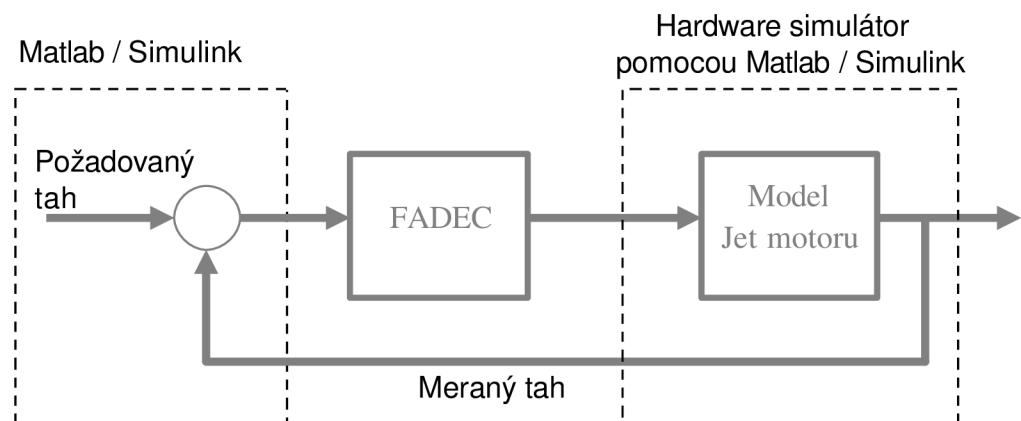
<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2. HW SIMULÁTOR OBECNE .....</b>	<b>10</b>
2.1 Model .....	11
2.2 Hardware in the loop simulácia.....	11
2.3 Požiadavky na simulátor leteckého motoru. ....	12
2.3.1 Požiadavky na hardware simulátoru.....	13
2.3.2 Požiadavky na software simulátoru.....	14
2.3.3 Práca v reálnom case .....	14
<b>3. SOFTWAREOVÉ NÁSTROJE.....</b>	<b>15</b>
3.1 Matlab / Simulink .....	15
3.1.1 Práca s externými signálmi v prostredí Matlab .....	15
3.1.2 Data Acquisition toolbox (DAT) .....	16
3.1.3 Real Time Windows Target (RTWT).....	24
3.1.4 Real Time toolbox (RTT) .....	28
3.2 LabVIEW .....	30
3.3 Zhrnutie softwarových nástrojov .....	31
<b>4. HARDWAREOVÉ NÁSTROJE.....</b>	<b>33</b>
4.1 Meracie karty Obecne .....	33
4.1.1 Analógové vstupy .....	33
4.1.2 Analógové výstupy .....	34
4.1.3 Digitálne linky .....	34
4.1.4 Cítace a casovace .....	34
4.2 FPGA.....	36
4.2.1 Konfigurovanie FPGA .....	36
4.3 FPGA v spojení s meracími kartami .....	36
4.4 Zhrnutie Hardwarových nástrojov .....	37
<b>5. KONCEPT .....</b>	<b>39</b>
5.1 Hardware simulátoru.....	39
5.2 Software simulátoru .....	40
<b>6. OVERENIE KONCEPTU .....</b>	<b>42</b>

6.1 Modelársky tryskový motor P80-SE.....	42
6.2 Princíp cinnosti.....	43
6.3 Výstupné veliciny.....	44
6.3.1 Teplota výstupných plynov.....	45
6.3.2 Otácky motoru .....	47
6.4 Vstupné veliciny.....	47
6.4.1 Palivové čerpadlo .....	47
6.4.2 Štartér.....	47
6.4.3 Solenoidové ventily .....	47
6.5 Testovanie konceptu.....	49
6.6 Zhodnotenie testovania .....	56
<b>7. ZÁVER .....</b>	<b>57</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>62</b>

## 1. ÚVOD

Cielom tejto práce je overiť možnosti pri návrhu hardwarového simulátora (HW) pre účely testovania riadiacich jednotiek leteckých motorov FADEC (Full Authority Digital Engine Control), ktorého hlavnou úlohou je ochrana motoru pred prekročením prevádzkových obmedzení, ovládanie výkonu, automatické spúšťanie motoru a ovládanie spätného tahu. FADEC prijíma od pilota a autopilota požiadavky na požadovaný tah a letový režim (štart, pristátie atd.) a sám vyhodnocuje najvhodnejšie nastavenie motoru.

IDC (Integrated Design Centre) Honeywell v Brne má na starosti vývoj softwaru pre tieto jednotky. Pri vývoji sú potrebné detailné informácie o fyzikálnej podstate asprávaní tryskového motoru, ale vzhľadom na zákony Spojených Štátov Amerických ktoré sa týkajú priemyselnej špionáže, licenčných práv a ochrany know-how vlastníctva USA je veľmi obťažné pre Honeywell v Českej republike zisk detailných informácií o princípe a práci tryskového motoru od americkej divízie za účelom testovania jednotiek FADEC. Vývoj prebieha poskytovaním informácií o tom, ako má jednotka FADEC reagovať na určitý vstupný priebeh na určitom výstupe. Preto vznikla iniciatíva, či je možné a ako je možné skonštruovať hardwarový simulátor leteckého motoru pre testovanie jednotiek FADEC.

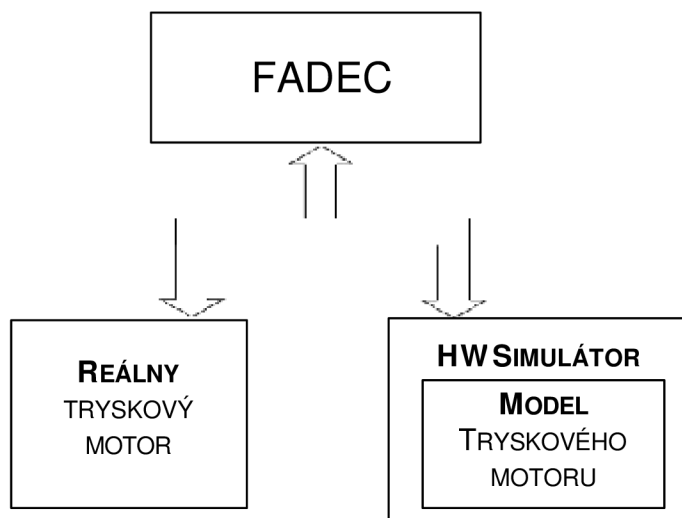


**Obrázok c. 1 Blokové schéma HW simulátoru a FADECu so spätnou väzbou.**

Vzhľadom, že sa jedná prvotnú iniciatívu, nie je cieľom vytvoriť celý simulátor leteckého motoru, čo je obecné veľmi zložitý proces, ale iba navrhnuť a čiastočne overiť koncepciu HW simulátoru na analogicky podobnom modelárskom tryskovom motore.

## 2. HW SIMULÁTOR OBECNE

Pod pojmom hardwarový simulátor sa má na mysli prístroj, ktorý dokáže simulovať správanie iného zariadenia, alebo prístroja tak, že okolité spolupracujúce prístroje nerozoznajú na úrovni simulácie skutočný prístroj od simulátora. Úlohou HW simulátora je popri simulovaní toku informácií v simulovanom zariadení aj simulovanie fyzikálneho interface na rozdiel od softwarového simulátora. Použitím simulátora nie je nutné mať reálny motor. Šetria sa náklady na palivo, nevzniká žiadny hluk a splodiny. Nie sú žiadne mechanické obmedzenia, štart a nastavenie je jednoduché, môžu sa simulovať hazardné situácie a chybné stavy. Hlavnú myšlienku celého projektu simulátora opisuje obrázok c. 2, kde by FADEC nemal rozoznať či komunikuje s reálnym tryskovým motorom alebo s HW simulátorom tohto motoru.



**Obrázok c. 2: Reálny motor vs. HW Simulátor s modelom.**

Pri návrhu simulátora je nutné poznať správanie a vlastnosti simulovaného systému. Parametre je možné získať od výrobcu systému, tieto parametre ale nemusia byť postačujúce, preto často treba vykonať merania pre získanie ďalších parametrov. Niektoré dynamické parametre sa môžu ťažšie získať. Treba zvážiť požiadavky na detailnosť modelu a z toho vyplývajúce úrovne modelu.



## 2.1 MODEL

V technike môžeme definovať model ako napodobenina alebo odraz reálneho systému a samotný proces výstavby modelu potom nazývame modelovaním. Existujú dva základne druhy modelov:

- Fyzikálne modely
- Abstraktné modely

Fyzikálne modely sú reálne systémy, ktoré modelujú či napodobujú iné reálne systémy. Zostaviť model úplne identický s realitou vo väčšine prípadov nie je cieľom modelovania. Obyčajne sa snažíme zostaviť taký model, ktorý je zjednodušením reality, pričom sú zachované vlastnosti, ktoré sú z hľadiska riešeného problému podstatné. Pri hľadaní modelu sa väčšinou vychádza z príslušných fyzikálnych zákonov a používajú sa vhodné zjednodušenia.

Abstraktné modely zvané aj matematické modely sú tvorené matematickými prostriedkami, sústavami rovníc grafmi a pod. a tvoria základ pre výstavbu fyzikálnych modelov.

Matematický model musí byť riešiteľný, pretože fyzikálny systém má vždy nejaké chovanie a v danom časovom okamžiku sú na ňom namerané hodnoty jednoznačné. Model nesmie predpovedať budúcnosť, pretože žiadny fyzikálny systém nereaguje na budúcnosť. Matematické modely sú často zapisované a simulované pomocou diferenciálnych rovníc. [1]

## 2.2 HARDWARE IN THE LOOP SIMULÁCIA

Hardware in the loop (HIL) simulácia je technika, ktorá je používaná pri vývoji a testovaní vnorených systémov akým je napríklad FADEC.

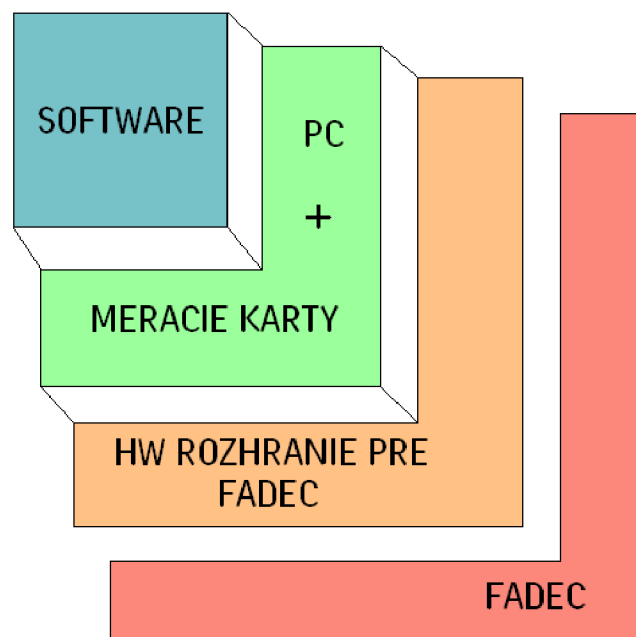
HIL simulácia musí obsahovať elektrickú emuláciu senzorov a aktorov. Táto emulácia sa správa ako interface medzi simulacnou stanicou a vnoreným systémom, ktorý sa testuje. Hodnota každého elektricky emulovaného senzoru je kontrolovaná

simulacnou stanicou a je cítaná testovaným zariadením. Príkladom HIL simulácie môže byť vývoj ABS systému v automobilovom priemysle. [20]

### 2.3 POŽIADAVKY NA SIMULÁTOR LETECKÉHO MOTORU.

Vo výsledku má simulátor slúžiť pre testovanie jednotiek FADEC a preto určitú časť požiadavkou hardwarových ale aj softwarových určuje práve FADEC. Predpokladaná rýchlosť odozvy má byť menšia ako jedna milisekunda, pričom maximálna doba môže byť 5ms z dôvodu trvania najkratšej výpočtovej slucky v jednotke FADEC.

Je taktiež požadovaná modularita, aby bolo možné simulátor použiť pre čo najväčší počet jednotiek FADEC.



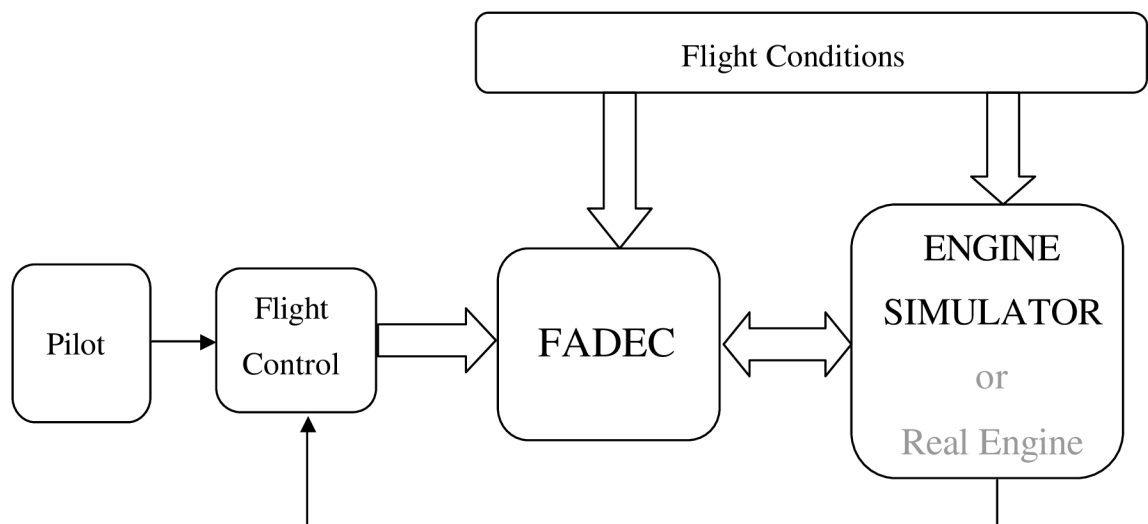
**Obrázok c. 3: Modulárne zloženie simulátoru.**

Je vhodné, aby modul na obrázku c. 3 „Software“ a „PC + meracie karty“ bol čo najviac univerzálny z dôvodu viacerých typov jednotiek FADEC, pričom modul „HW rozhranie pre FADEC“ už bude špecifický pre jednotlivé FADECy a jeho úlohou bude prípadne zosilňovať generované signály arobiť výstupné rozhranie

meracej karty špecifickému rozhraniu FADECu. Táto práca nepopisuje rozhranie pre FADEC, pretože v tejto chvíli ešte nie je presne známa kontúra tohto rozhrania.

### 2.3.1 Požiadavky na hardware simulátoru

Predpokladá sa, že simulátor bude reprezentovaný počítačom s vhodným hardware pre získavanie a generovanie signálov. Hlavnou požiadavkou na hardware je počet vstupne – výstupných kanálov a rýchlosť odozvy celého simulátoru a z toho vyplýva výkon CPU alebo počet hradiel FPGA pola, prípadne veľkosť operacnej pamäte a počet slotov PCI. Ďalšie požiadavky sú kladené na meracie karty, pričom ide hlavne o rýchlosť vzorkovania, rozlíšenie, merací rozsah, počet I/O kanálov, cenu a dostupnosť.



**Obrázok c. 4: Blokové schéma komunikácie jednotky FADEC s okolím.**

Do reálneho turbínového motoru pre konvenčné lietadlá vstupujú nielen akčné zásahy od jednotky FADEC ale aj údaje od okolia ako je teplota, tlak, rýchlosť prúdenia vzduchu, vlhkosť a podobne. Tieto dáta sú potrebné pre detailnejší simulátor turbínového motoru a tým sa zvyšujú nároky na hardwarové vstupy a výstupy.

Jednotka FADEC vyhodnocuje signály nielen od motoru ale aj požiadavky od pilota a „Flight Control“ (auto pilot), tým pre testovanie FADECu je potrebné tieto dáta simulovať a generovať, tým sa ale táto práca nezaobrá.

Z hľadiska budúceho rozšírenia detailnosti simulátoru sú kladené požiadavky na univerzálnosť hardwarového riešenia simulátoru. Je predpoklad, že pri vyššej úrovni modelu turbínového motoru bude potrebných do dvadsať analógových výstupov zo simulácie senzorov, pätnásť analógových vstupov pre akčné veličiny a dvadsať vstupne - výstupných digitálnych liniek. Pri takýchto požiadavkách treba použiť dve a viac meracích kariet.

### **2.3.2 Požiadavky na software simulátoru**

Modelovanie a následná simulácia prebieha väčšinou na počítači a preto sú kladené požiadavky pre komunikáciu softvéru so vstupnými a výstupnými perifériami PC v reálnom čase, čo je pre niektorý software náročná podmienka práve ak sa použije software od iného výrobcu ako hardware. Je vhodné použiť užívateľské prostredie v ktorom sa môžu sledovať priebehy a výstupy zo simulácie.

### **2.3.3 Práca v reálnom case**

Požiadavka na väčšinu simulátorov je, aby boli schopné pracovať v reálnom case. Tento čas nie je vždy rovnaký a závisí od simulovanej veličiny a možností simulátoru. Ak simulujeme teplotu býva potrebné získať dáta každú sekundu, v prípade rýchlo meniacich sa signálov sú to rádovo mikrosekundy. Toto je dobré si uvedomiť pri výbere vhodného HW a treba dbať, aby nebol porušený vzorkovací teorém. Za systém reálneho času považujeme taký, pri ktorom správnosť operácií nezávisí len na výpočte informácií, ale aj na čase, kedy sú tieto informácie vypočítané.

Windows XP ako systém vo všeobecnosti nie je považovaný za systém pre prácu v reálnom case z dôvodu, že je nedeterministický. Systém Windows XP prideliť každému procesu výkon procesoru na krátky ale užívateľom nedefinovaný čas. Sú však nástroje, ktoré dokážu tento nedostatok čiastočne odstrániť ako napríklad RTX (Real-Time eXtension). [2]

Vzhľadom nato, že pri zacyklení alebo páde systému Windows XP na ktorom beží model simulátoru nedôjde k žiadnym škodám a súčasne dokáže systém splniť požadovanú real-time odozvu je možné použiť Windows XP ako operačný systém pre simulátor.

### **3. SOFTWAREVÉ NÁSTROJE**

Pre namodelovanie jednotlivých simulacných rovníc používame softvérové nástroje využívajúce blokové schémy ako Matlab/Simulink alebo LabView prípadne univerzálne vývojové prostredia ako VisualC++, Borland C++ Builder pre jazyk C++. Pri univerzálnych vývojových prostrediach je potrebné často implementovať knižnice vhodné pre komunikáciu s danou zbernicou a kartou.

#### **3.1 MATLAB / SIMULINK**

Matlab je programové prostredie pre vedecko-technické numerické výpočty, modelovanie, počítačové simulácie, analýzu a prezentáciu dát, meranie a spracovanie signálu. Nadstavbou programu je Simulink, vhodný pre modelovanie dynamických systémov, ktorý využíva algoritmy Matlabu pre numerické riešenia. Výhodou Matlabu je jeho modularita, ktorej je dosiahnuté použitím rôznych toolboxov. V Matlabe sú obsiahnuté niektoré základné toolboxy, ďalšie je možné zakúpiť od firmy Mathworks alebo od externých firiem. Rozsah toolboxov vytvára veľkú oblasť využitia od letectva, kozmonautiky, automobilového priemyslu, automatizácie a strojárstva, biotechnológie chémie a farmácie, financií a ekonomiky. Toolboxy si môže zručný užívateľ vytvoriť aj sám. [3]

##### **3.1.1 Práca s externými signálmi v prostredí Matlab**

Aj keď na to pôvodne Matlab nebol určený, dnes dokáže pomocou toolboxov komunikovať s externými zariadeniami a prevádzať signály generované vo vývojovom prostredí na fyzické. Dokáže taktiež zaznamenávať a vyhodnocovať externé signály a dáta. Táto možnosť robí z Matlabu silný nástroj pre modelovanie a simuláciu. Firma Mathworks ako vývojár Matlabu nevyrába meracie karty a ktoré slúžia pre generovanie a zber fyzických signálov a preto je potrebné pre správnu

spoluprácu a komunikáciu meracích kariet so Simulinkom programovať a použiť ovládacov. Použitie ovládacov teda stavia Matlab do konkurenčnej nevýhody napríklad v porovnaní s firmou National Instruments a ich kartami ku ktorým je priamo vyvíjané prostredie LabView. Vzniká tak otázka, či je vhodné použiť pri práci s kartami od National Instruments prostredie Labview, ktoré je podporované na vysokej úrovni, alebo Matlab s pomocou toolboxov a ovládacov. Firma Honeywell ako zadávateľ tejto práce používa v prevažnej miere pre simulovanie a vytváranie svojich modelov prostredie Matlab a preto sa rozhodlo ísť cestou toolboxov a ovládacov.

Základné toolboxy, ktoré dokážu komunikovať s externými kartami rôznych výrobcov, pričom každý z nich je vhodný na iný typ cieľovej aplikácie.:

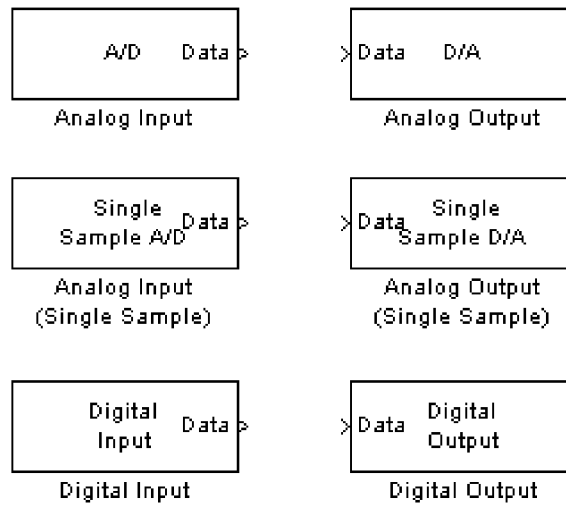
- Data Acquisition toolbox
- Real Time Windows Target
- Real time toolbox (firma Humusoft)
- xPC Target

Real Time Windows Target a xPC Target umožňujú vykonávanie simulácie cieľovej stanice, na ktorej nemusí byť Matlab / Simulink.

### **3.1.2 Data Acquisition toolbox (DAT)**

Knižnica DAT obsahuje šesť blokov. Dva sú pre digitálne signály a štyri pre analógové signály. Na rozdiel od ostatných vyššie popísaných toolboxov pre komunikáciu s meracími kartami podporuje DAT prácu s USB kartami od National Instruments a taktiež s zvukovými kartami PC stanice. Táto knižnica bola odskúšaná v rámci bakalárskej práce s kartami NI – USB 6008 a NI – PCI 6036E. Meracia karta NI – USB 6008 podporuje iba analógové bloky typu (single sample). Vlastnosti DAT boli odskúšané na plne funkčnej trial verzii. Použitý DAT bol verzie 2.13.



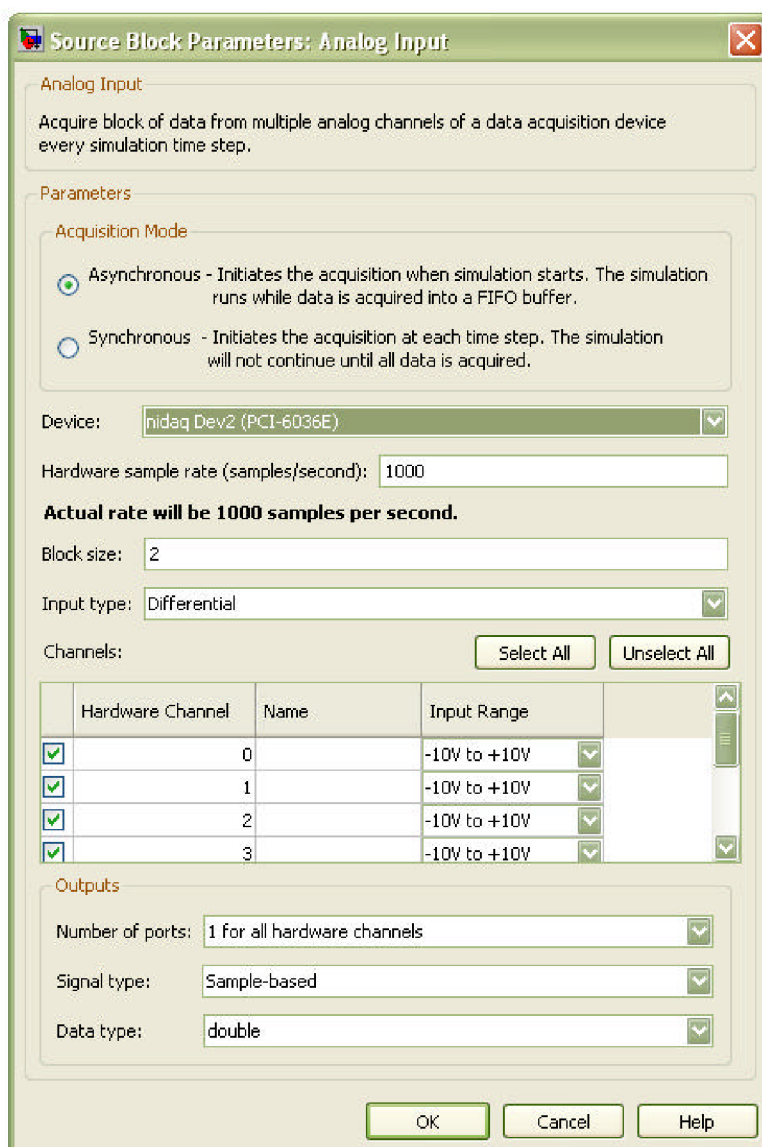


**Obrázok c. 5: Bloky Data Acquisition toolboxu**

S kartami je možné komunikovať cez DAT pomocou blokov alebo príkazov. Pomocou blokov je programovanie intuitívne a jednoduché. Nie je potrebné zložiť konfiguráciu meracej karty. Túto prácu vykoná za užívateľa komunikačný ovládac. Parametre ktoré je možné nastaviť je vidieť na obrázku c. 6.

### **3.1.2.1 Analógový vstup**

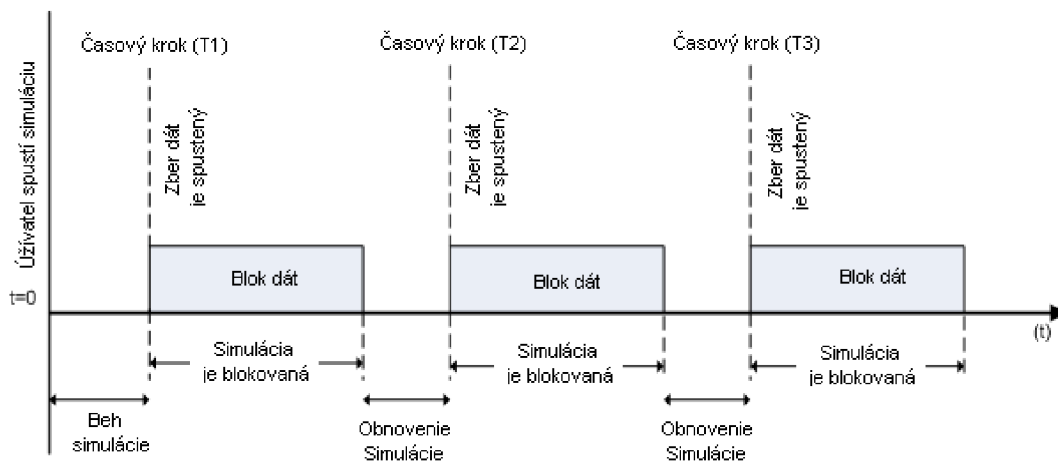
Blok „Analog Input“ (AI) konfiguruje, inicializuje, spúšťa a kontroluje analógové vstupy meracej karty. Blok AI je možné použiť iba s meracími kartami, ktoré podporujú zber dát synchronizovaný s hodinami v simulinku. Pre zber dát za použitia meracej karty, ktorá podporuje zber dát iba po jednom vzorku je nutné použiť blok „Analog Input (single sample)“.



**Obrázok c. 6: Ok no pre nastavenie parametrov bloku „Analog input“**

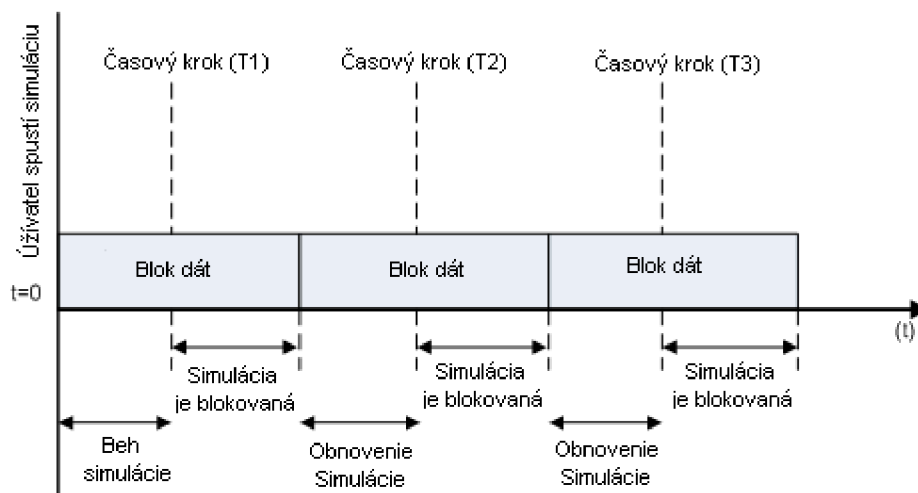
Asynchrónny režim spúšťa získavanie dát keď začne simulácia. Počas behu simulácie sa dáta ukladajú do FIFO zásobníka. Zber dát je spojitý a blok „Analog input“ zhromažďuje dáta aj počas výstupu dát z bloku AI v Simulinku na rozdiel od synchronného režimu.

Synchronný režim spúšťa zber dát s každým časovým krokom. Simulácia nebude prebiehať pokiaľ nie je požadovaný blok dát zmeraný. Blok AI bude v synchronnom režime posielat do Simulinku vždy iba posledný blok dát v každom dátovom kroku, pretože už nepoužíva FIFO zásobník.



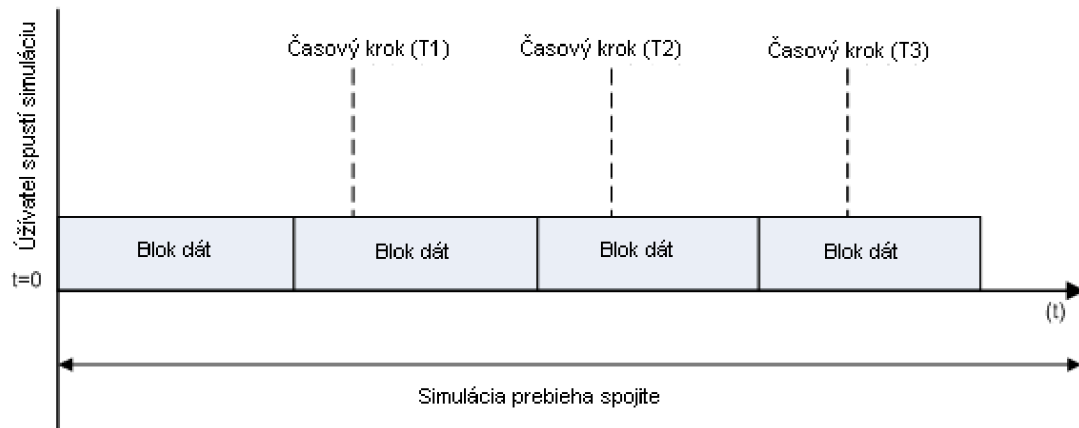
**Obrázok c. 7: Priebeh zberu dát pri synchronnom režime bloku „Analog Input“.**

V prvom časovom kroku (T1), zber dát je spustený pre požadovaný blok dát. Simulácia nepokračuje dotedy, pokiaľ nie je príslušný blok dát celý zmeraný.



**Obrázok c. 8: Priebeh zberu dát pri asynchronnom režime (prvý prípad) bloku „Analog input“.**

Priebeh na obrázku c. 8 ukazuje prípad keď rýchlosť simulácie predbieha rýchlosť zberu dát. V prvom časovom kroku (T1) je požadovaný blok dát stále zaznamenávaný. Preto simulácia nepokračuje pokiaľ nie je blok dát kompletne zmeraný.



**Obrázok c. 9: Priebeh zberu dát pri asynchrónnom režime (druhý prípad) bloku „Analog Input“.**

Obrázok c. 9 ukazuje prípad keď rýchlosť zberu dát predbieha rýchlosť simulácie. V prvom časovom kroku (T1) je požadovaný blok dát kompletne zmeraný. To je dôvod prečo simulácia beží spojitě.

V bloku AI je ďalej možné vybrať meraciu kartu v políčku „device“. V políčku „Hardware sample rate“ je možné vybrať rýchlosť vzorkovania zberu dát, teda akou rýchlosťou za sekundu budú dáta snímané na karte. Toto je čas vzorkovania pre hardware a teda je možné zvoliť iba také hodnoty, ktoré meracia karta podporuje.

Je možné zvoliť veľkosť bloku dát v kolónke „Block size“ a teda požadovaný počet vzoriek ktoré sa pošlú na výstup v Simulinku v každom časovom kroku. Počet vzorkou platí pre každý kanál súčasne. Rozsah v ktorom je možné nastaviť parameter „Block size“ je závislý na konkrétnej meracej karte a musí to byť kladná hodnota v rozsahu povolenom danou vybranou kartou v políčku „Device“.

V políčku „Input type“ sa špecifikuje konfigurácia kanálu vstupnej karty ako „single ended“ alebo „differential“ prípadne iné. Možnosti výberu v bloku „Input type“ sú definované schopnosťami vybranej meracej karty.

Pri konfigurácií kanálov môžeme pomocou zaškrťovacích polícok aktivovať daný kanál, priradiť mu názov a vstupný rozsah. Pri konfigurácii výstupných portov do Simulinku si môžeme zvoliť či chceme jeden port pre všetky kanály a vtedy budú výstupne dáta reprezentované ako matica srozmerní: „veľkosť bloku dát x počet vybraných kanálov“. Pri výbere jedného výstupného portu na kanál bude mať blok „Analog Input“  $n$  portov, kde  $n$  znamená počet aktívnych kanálov. Každý výstupný kanál bude stĺpcový vektor s rozmermi: „veľkosť bloku dát x 1“.

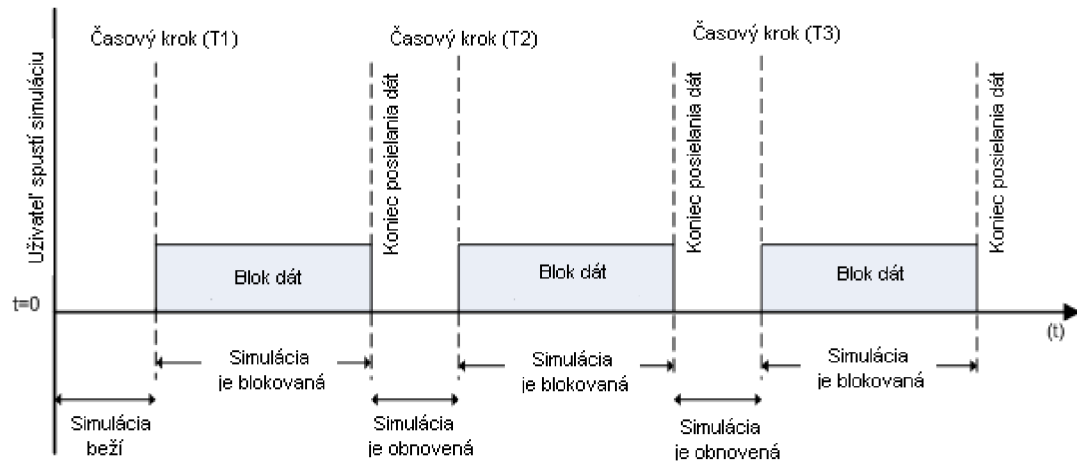
Dalej je možné nastaviť typ signálu buď „Sample-based“, alebo „Frame-based“. V prípade voľby „Frame-based“ je nutné mať nainštalovaný Signal Processing blockset. [4]

### **3.1.2.2 Analógový výstup**

Blok „Analog Output“ (AO) konfiguruje, inicializuje, spúšťa a kontroluje analógové vstupy meracej karty.

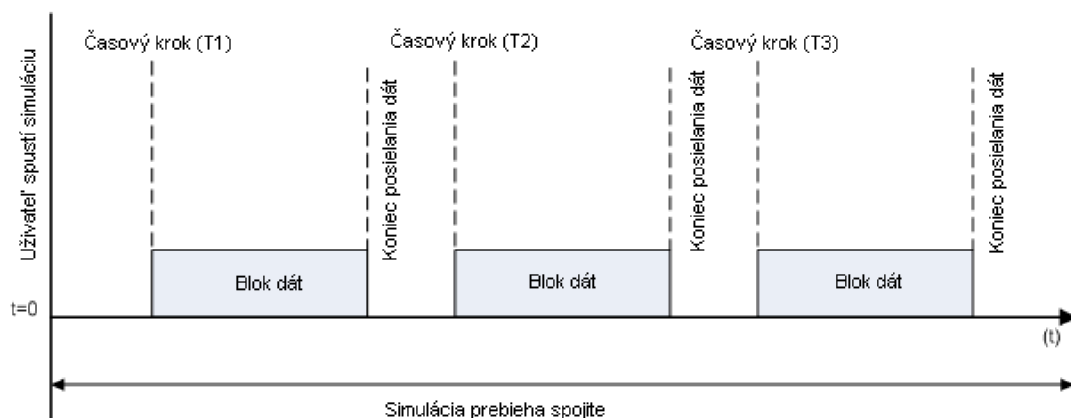
AO blok môže podobne ako AI blok pracovať v režime synchronnom alebo asynchronnom. Nastavenia sú veľmi podobné bloku Analógový vstup.

V synchronnom režime sa iniciuje dátový vstup meracej karty s každým časovým krokom. Beh simulácie nebude pokračovať, až sa súčasný blok dát celý neprenesie na výstup, simulácia je potom obnovená a čaká sa na ďalší časový krok. V synchronnom móde blok AO generuje výstupné dáta synchronne v každom časovom kroku. Situáciu popisuje obrázok c. 10.



**Obrázok c. 10: Priebeh simulácie a posielania dát na výstup bloku Analog output pri synchronnom režime.**

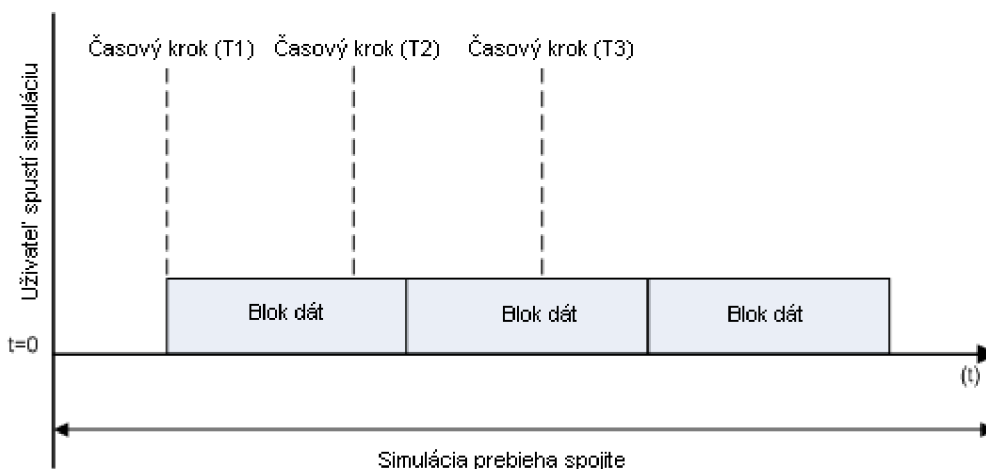
Pri asynchrónnom režime sa iniciuje dátový výstup hardvéru pri spustení simulácie. Simulácia beží hoci sú dáta posielané z FIFO zásobníka. Pri asynchrónnom režime môže nastať prípad (prípád A), kedy rýchlosť odosielenia výstupných dát predbieha rýchlosť simulácie. Dáta sú odosielené zo zaciatkom časového kroku, podobne ako pri synchronnom odosielení, ale nejedná sa o synchronný režim, pretože za určitých okolností môže nastať „prípád B“. Simulácia je teda spojitá. Predchádzajúce riadky popisuje obrázok c 11.



**Obrázok c. 11: Priebeh simulácie a posielania dát pri asynchrónnom režime (prípád A)**



V „případe B“ rychlost simulácie predbieha odosielanie dát k hardware. Pri prvom casom kroku (T1) dôjde k odosielaniu dát a casový krok (T2) príde počas odosielania prvého bloku dát. Dáta sa začnú zoradovat a k odosielaniu nasledujúceho bloku dochádza, až keď je predchádzajúci blok odoslaný. Simulácia prebieha spojite, ale cas simulácie je rýchlejší ako cas pre odosielanie dát. Situácia je popísaná na obrázku c 12.



**Obrázok c. 12: Priebeh simulácie a posielania dát pri asynchrónnom režime (prípade B)**

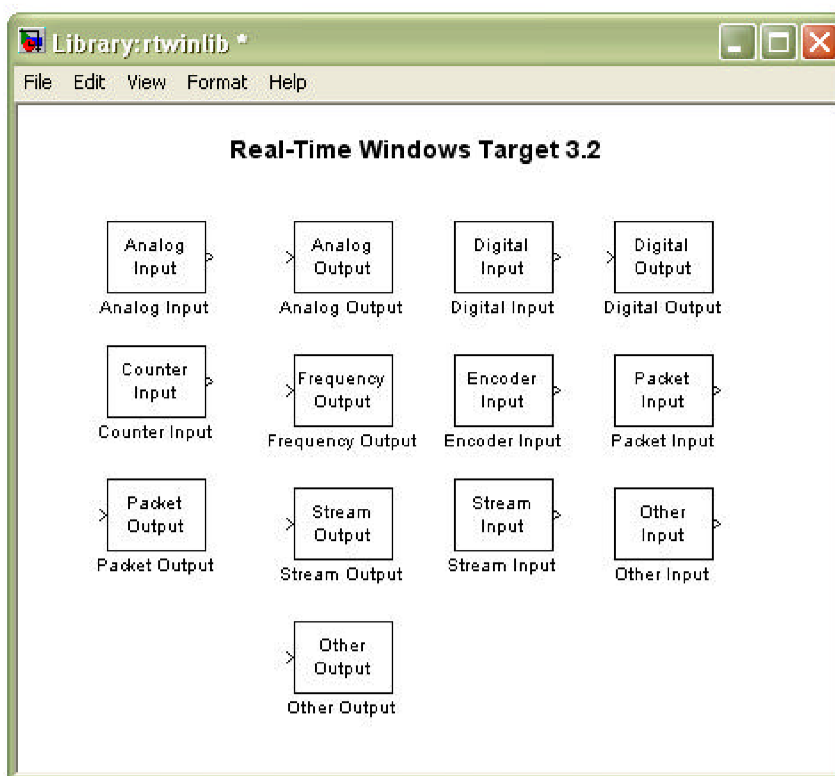
Pri práci atestovaní Data acquisition toolboxu sa zistilo, že je nutné vedieť aký režim (či synchronný alebo asynchronný) je vhodné použiť pre konkrétne riešenie problému. V prípade použitia synchronného režimu v bloku Analógový vstup je z princípu obrázku c. 7 vidieť, že cas simulácie nemusí byť totožný s reálnym casom. Ak je zvolená vyššia frekvencia vzorkovania hardware, zvyšuje sa objem dát, ktoré sa majú v simulácií spracovat a to pri krátkych casoch, kedy sa simulácia naozaj vykonáva, celu simuláciu predlžuje. To je možné odstrániť používaním asynchronného režimu, kedy simulácia beží aj počas zberu dát.

V prípade bloku Analógový výstup a použitie buď asynchronného alebo synchronného režimu, nie je cas simulácie rovnaký s reálnym casom. Ak je simulácia nenáročná na výpočet, cas simulácie ide veľmi rýchlo alebo opacne. Je preto vhodné mať v simulacnej schéme použitý blok AO v asynchrónnom režime.

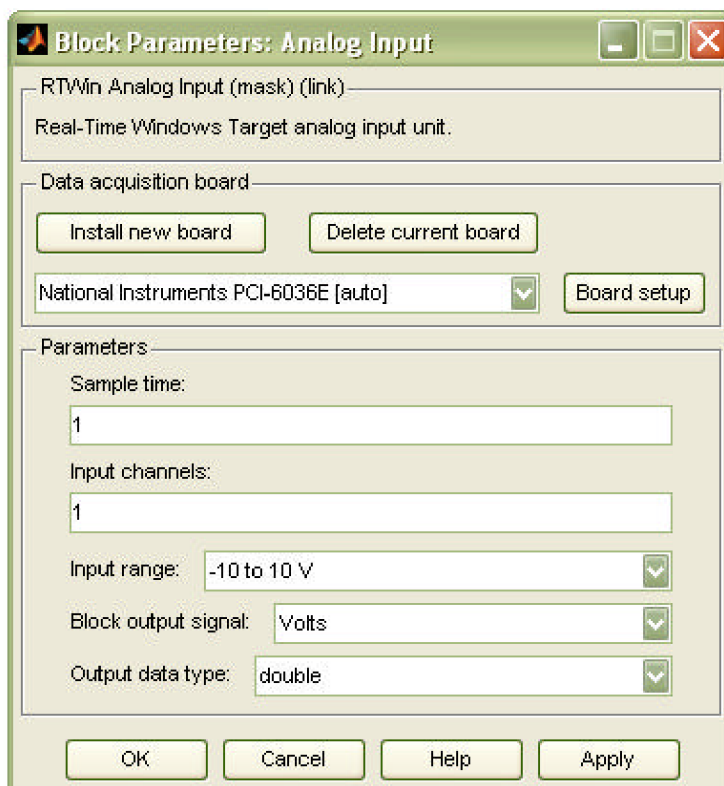
Treba si tiež uvedomiť, že simulácia prebieha na aplikacnej vrstve a tak čas simulácie závisí od výkonu PC. V práci nie sú popísané bloky „Analog output (single sample)“ a „Analog input (single sample)“. Keďže tieto bloky nemajú možnosť nastaviť asynchrónny režim. [4]

### 3.1.3 Real Time Windows Target (RTWT)

Ako už názov hovorí tak Real time Windows Target je toolbox, ktorý umožňuje beh modelu v Simulinku v reálnom čase na platforme Windows XP a Vista. Práca s týmto toolboxom je trochu odlišná od Data Acquisition toolboxu, pričom pri použití máme na výber z trinástich blokov a RTWT podporuje viac ako 300 typov kariet od rôznych výrobcov. RTWT je vhodný pre HIL (hardware in the loop) simulácie. Vlastnosti RTWT boli odskúšané na plne funkčnej trial verzii.



**Obrázok c. 13: Blockset Real-Time Windows Target verzie 3.2**



**Obrázok c. 14: Nastavenie parametrov bloku „Analog input“ v RTWT**

Nastavenie bloku „Analog Input“ je relatívne jednoduché. Pri prvom použití meracej karty je potrebné ju nainštalovať. Inštalácia znamená výber danej karty zo zoznamu ktorý sa objaví po kliknutí na „Instal new Board“. Po inštalácii sa karta zobrazí v roletovom okne.

V políčku „Input channels“ sa pomocou vektorového zápisu v matlabe vyberie počet vstupov. Pre dva vstupy to môže byť zápis 1:2 alebo [1,2].

V políčku „Block output signal“ pri nastavení „Volt“ sa očakáva na výstupe bloku hodnota rovná vstupnému napätiu na karte. Nastavenia blokov „Analog Output“, „Digital Input“ a Digital Output“ sú veľmi podobné.

Pre komunikáciu medzi meracou kartou a blokom RTWT toolboxu nepostacuje správne nastavenie bloku aspustenie simulácie vnormálnom móde. („Normal mode“ je základný model v ktorom sa simuluje väčšina modelov) Simulácia sa spustí ale bloky RTWT sú ako keby ignorované a neprebieha

komunikácia medzi blokmi RTWT a hardware. Simulácia potom prebieha tak rýchlo, ako jej to výkon PC stanice umožní.

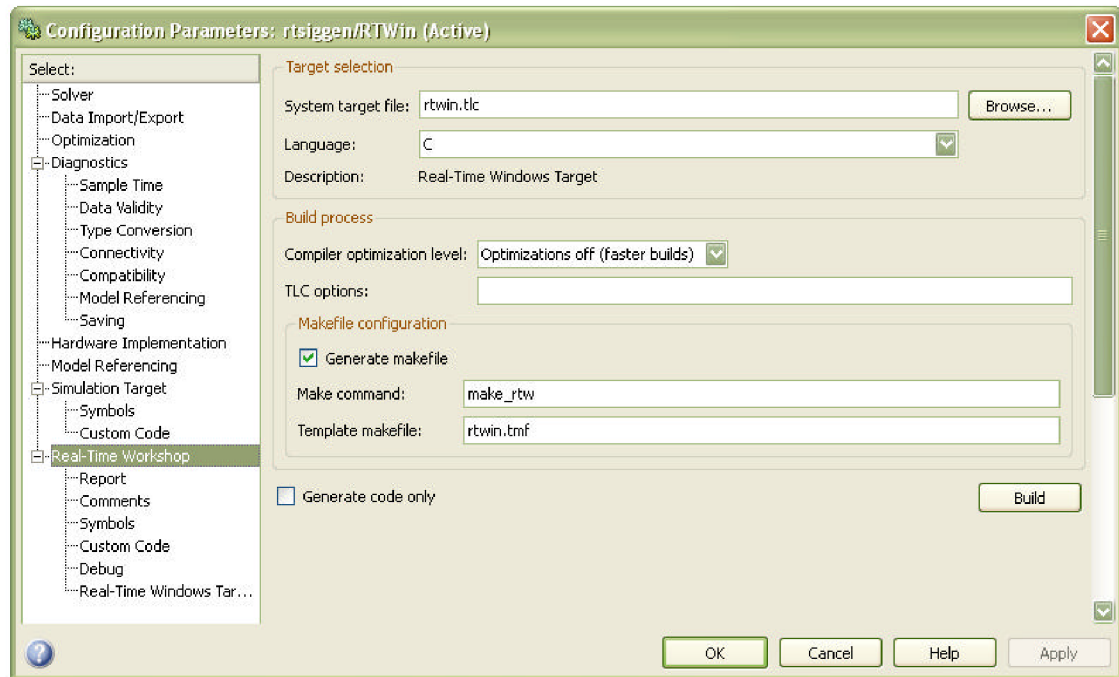
Pre komunikáciu medzi blokom AO a meracou kartou je potrebné nastaviť „solver“ v parametroch simulácie, kde sa nastaví typ simulácie na „Fixed-step“. Veľkosť kroku „Fixed-step size“ je doporučené zvolit na konkrétnu hodnotu, pričom by ju mali mať rovnakú všetky bloky v schéme, pokiaľ sa to nastavením neupraví inak. Ďalej je nutné preložiť schéma v Simulinku do príslušných súborov uložených v zložke prednastavenej Matlabom s názvom: „*názov simulinkového modelu\_rtwin*“. Tento preklad sa vykoná cez príkaz „Tools ? Real-Time-Workshop ? Build model“. Ďalej je potrebné prepnúť simuláciu do „External mode“ pomocou „Simulation ? External“ a následne načítať vygenerované súbory pomocou príkazu „Simulation ? Connect to Target“. Po načítaní je možné simuláciu spustiť pomocou „Simulation ? Start Real Time code“. Po spustení simulácie už prebieha komunikácia medzi blokmi RTWT a meracou kartou.

Pre tento proces je nutné mať v Simulinku nainštalovaný a správne nastavený Real Time Workshop (RTW), ktorý slúži pre generovanie kódu v jazyku C alebo C++ zo Simulinku. Vygenerovaný C kód je potom možné ďalej použiť a implementovať do iných zariadení. (napr. mikroprocesory Pic24 / Pic 30, TI C2000DSP a ďalšie...)

### ***3.1.3.1 Nastavenie Real Time Workshop***

Real time workshop dokáže generovať nie len kód v jazyku C ale aj spustiteľné súbory typu exe a iné, a vďaka tomu dochádza k optimalizácii rýchlosti simulácií. Konfigurácia prebieha v okne „Configuration Parameters“. V položke „System target file:“ sa zvolí Target. Ak je cieľová stanica PC so systémom Windows vyberie sa „Real-Time Windows target“, teda súbor *rtwt.tlc*.

Môže sa použiť aj iná voľba pri ktorej je cieľová stanica Windows (často dochádzalo k chybe pri generovaní kódu), alebo môže byť cieľová stanica napríklad procesor od Texas Instruments. Teda výberom súboru *tlc* sa definuje, v akom tvare bude výsledný kód v jazyku C alebo C++.



**Obrázok c. 15: Nastavenie parametrov Real Time Workshop**

Dalej sa môže zvolit jazyk bud C alebo C++. Pokiaľ nie je potrebné vytvorit súbor typu exe, musí byt zaškrtnuté políčko „Generate code only“. Ostatné dôležité parametre sa nastaviva automaticky pri výbere cielového zariadenia v polícku „System target file“. [4]

### *3.1.3.2 Externý mód (External mode)*

V externom móde RTW zaradí komunikačné spojenie medzi modelom bežiacim v simulinku (host) a kódom vykonávajúcim sa na cielovom systéme (target). Simulink vysiela správy požadujúce po cieľi zmenu parametrov alebo nahratie dát. Cielový systém odpovedá vykonaním požiadavky. Komunikácia v externom móde je založená na architektúre klient - server, kde Simulink je klient.

Externý mód umožňuje modifikovat alebo ladit parametre blokov v Simulinku v reálnom case počas behu simulacej schémy a Simulink sa správa ako grafické okno pre vykonávaný program na cielovej stanici, pricom rutiny ktoré by sa inak vykonávali v Simulinku nezatažujú systém. Dochádza tak k optimalizácií výkonu.

### **3.1.3.3 Real Time Windows Target Kernel**

Jeden z klíčových součástí RTWT je jádro reálného času (real time Kernel), které prepojuje operační systém Windows (skúšané na XP) tak, aby mohli real time aplikácie vytvorené pomocou RTWT a RTW bežať na zvolenej vzorkovanej frekvencii pričom Kernel im priraduje najvyššiu prioritu pre procesor. Toto je výhodne využívať hlavne pri aplikáciách, ktoré sú testované na PC stanici. Kernel sa automaticky nenainštaluje s inštaláciou RTWT, a preto sa musí doinštalovať. Inštalácia je veľmi jednoduchá. Do príkazového okna Matlabu sa napíše bez úvodzoviek: „rtwintgt –install“. Matlab zobrazí správu, či sa užívateľ chystá nainštalovať Real – Time Windows Target Kernel. Táto správa sa potvrdí. Úspešnú inštaláciu Matlab oznámi. Pre overenie stačí napísať príkaz „rtwho“.

Po nainštalovaní sa Kernel tvári ako nečinný, čo umožňuje systému Windows kontrolovať vykonávanie hociktovej štandardnej aplikácie vrátane Matlabu. Kernel je aktívny iba počas spustenia real time aplikácie vytvorenej v Simulinku, pričom sa len uistuje, či je mu poskytnutá maximálna priorita CPU a zasahuje iba v prípade potreby. Po skončení simulácie sa znova Kernel tvári ako nečinný.

To, či je priebeh simulácie skutočne real time, záleží na akej cieľovej stanici je simulácia realizovaná. V prípade PC stanice budeme asi ťažko hovoriť o Hard Real time. [4]

### **3.1.4 Real Time toolbox (RTT)**

Real time toolbox slúži pre komunikáciu v reálnom čase medzi meracími kartami, a tým aj určitým externým zariadením, a modelom v Simulinku. RTT ponúka pre prácu dvanásť rôznych toolboxov, ktoré sú produktom firmy Humusoft.

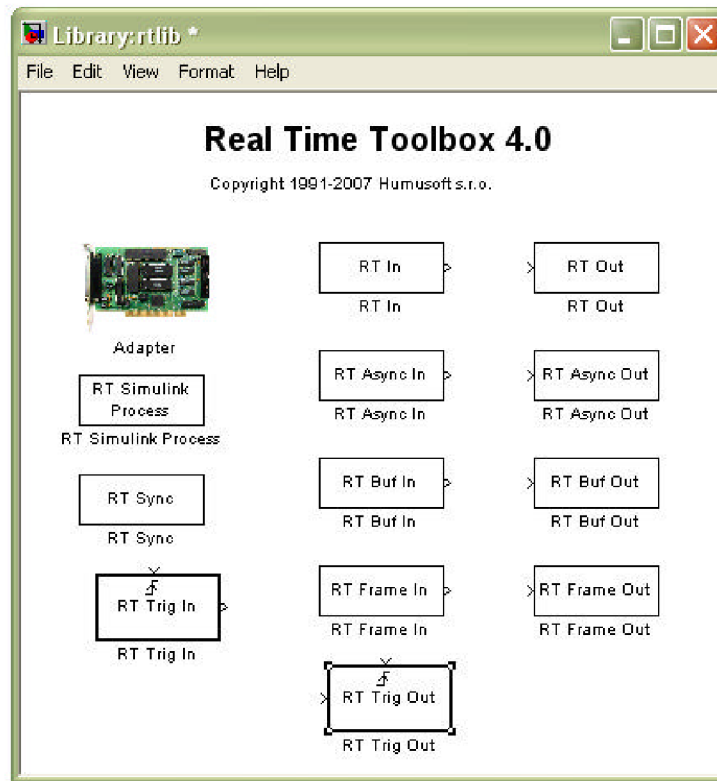
RTT bol skúšaný iba v demo verziách, ktorej obmedzenie spočíva v tom, že blok „Adapter“ pomocou ktorého sa vyberie meracia karta pre komunikáciu podporuje iba myš. Teda nie je možné odskúšať RTT v demo verzii s meracou kartou. RTT nemá bloky Analog Input, Analog Output atď, ale pre výstupné dáta slúži blok „RT Out“, pričom to, či ide o analógový alebo digitálny, prípadne iný výstup sa nastaví priamo v bloku. To isté platí aj pre vstupné bloky.



Toolbox si klade za úlohu komunikáciu v reálnom case s meracími kartami, pričom beh RTT prebieha na aplikacnej vrstve MS Windows (prípadne iného operacného systému). Pri náročnejších simuláciách a pomalšej PC stanici sa môžu značne predĺžiť komunikačné casy. Tento nedostatok je čiastočne odstránený tým, že RTT obsahuje blok „RT Simulink Proces“ v ktorom je možné nastaviť prioritu procesoru pre Simulink na úkor ostatných aplikácií operacného systému. Je to ale to isté ako nastavenie priority v „Task Manager“ systéme Windows XP. Bežné aplikácie sú schopné pracovať na vzorkovacej frekvencii až 25 kHz v závislosti na zložitosti modelu a použitej meracej karty. Obecné je ale pomalšie ako Real Time Windows Target z dôvodu, že počas simulácie bežia potrebné rutiny v Simulinku a Matlabe avšak medzi jeho výhodou oproti RTWT patrí to, že dokáže pracovať spolu so Matlabom na viacerých platformách PC a to:

- Windows Server 2003 SP1/2, Windows XP SP1-3, Windows Vista 32/64bit
- Windows Server 2003 x64 SP1/2, MS-Windows XP x64 SP1/2
- Linux 32/64bit - Kernel 2.4.x, 2.6.x a glibc 2.3.6 a vyššie
- Mac OS X 10.4.8 a vyššie (Intel) a Mac OS X 10.5.1 a vyššie (Intel)
- Solaris 10 (ultraSPARC) [5]

RTT ponúka tiež jeden zaujímavý blok, ktorý je prípadne možné využiť samostatne v iných aplikáciách, kde sa nepoužíva RTT. Je to blok „RT Sync“ a zaisťuje synchronizáciu hodín reálneho casu s casom simulácie v Simulinku.



**Obrázok c. 16: Bloky Real Time Toolboxu.**

### 3.2 LABVIEW

LabVIEW je moderné programovacie vývojové prostredie k vytváraniu programu vo forme blokových diagramov od firmy National Instruments. Prostredie je najčastejšie používané pre zber a analýzu dát, kontrolu prístrojov a pre priemyselnú automatizáciu. Dáta je možné získavať cez sériové a paralelné rozhranie využitím meracích kariet rôznych meracích prístrojov. Vykonávanie je urcované štruktúrou grafických blokových diagramov, v ktorých programátor prepája funkčné body pomocou liniek. Spracovávanie programu prebieha na základe toku dát namiesto vykonávania inštrukcií.

Medzi výhody LabVIEW patrí intuitívny grafický spôsob programovania, ktorý je zvlášť vhodný pre užívateľov bez predchádzajúcich skúseností programovania. Množstvo funkcií pre meranie a analýzu dát. Podpora pre veľké

portfólio produktov od firmy National Instruments. Táto práca sa nesústredovala na použitie tohto programovacieho prostredia. [6]

<b>Produkt</b>	<b>Verzia</b>	<b>Cena[Kc]</b>
LabView	Base Package	58 900
LabView	Full Development system	79 600
Podpora FPGA (pre programovanie hradlových polí)	8.1	79 690
Real Time ETS Module		79 600

**Tabulka c. 1: Ceny softvérových produktov firmy National Instruments [7]**

### 3.3 ZHRNUTIE SOFTWAREVÝCH NÁSTROJOV

Ako už bolo vyššie napísane firma Honeywell používa väčšinou software Matlab/Simulink pre simulácie a presadzuje model based desgin. Prostredie Simulinku umožňuje beh simulácie v nekonečnom case, a taktiež vkladať do schémy bloky podobné prepínačom, potenciometrom, či diódam podobne ako je tomu v prípade LabVIEW. Avšak prostredie LabVIEW je viac graficky prepracované napríklad v prípade rôznych signalizačných a zobrazovacích blokov alebo debuggera. LabVIEW pomocou modulov dokáže rovnako vykonávať simulácie na vzdialenej PC platforme. Samozrejmosťou je podpora pre meracie karty NI. Pre prostredie Matlab/Simulink hovorí napríklad jednoduchá implementácia kódu v jazyku C alebo C++ do prostredia, jednoduchý vývoj vlastných funkcií.

Pre prácu s Real Time Windows Target je nutné použiť nástroj Real Time Workshop. To kladie požiadavky na čiastocné znalosti RTW na druhú stranu však poskytuje možnosť zasahovať do behu simulácie zmenou niektorých parametrov blokov. Pri cene RTW je otázka či je RTWT vhodné použiť iba na simuláciu v reálnom case na systéme Windows XP a či nie je lepšie využiť Real Time Toolbox. Vzhľadom na to, že Honeywell má už dávnejšie zakúpenú licenciu pre RTW sa stráca nevýhoda vyššej celkovej ceny použitia RTWT.

Software	Verzia	Individuálna licencia [Kc]	Multiplatformová licencia [Kc]
Data Acquisition Toolbox	2.14	32 980	126 980
Real Time Workshop	7.5	236 980	941 980
Real Time Windows Target (vyžaduje RTW)	3.3	63 980	251 980
Real Time Toolbox	4.0	52 980	Nie je

**Tabulka c. 2: Ceny toolboxov pre Simulink [8]**

## 4. HARDWAREOVÉ NÁSTROJE

### 4.1 MERACIE KARTY OBECNE

Meracie karty, alebo karty pre zber dát (Anglicky Data Acquisition – DAQ), slúžia pre priame meranie poprípadne generovanie signálu počítačom. Najčastejšia zbernica pre pripojenie k počítaču je PCI. Jedná sa o štandardnú zbernicu pre pripojenie periférnych zariadení k základnej doske počítača. Disponuje hodinami s kmitočtom 33,33MHz a synchronným prenosom. Prenosová rýchlosť zbernice je do 132MB/s. Táto rýchlosť závisí od taktovacej frekvencie a od šírky dátovej časti. Meracie karty väčšinou obsahujú jeden, či viac z týchto typov funkcií:

- analógové vstupy
- analógové výstupy
- digitálne linky
- čítace alebo časovacie

#### 4.1.1 Analógové vstupy

##### 4.1.1.1 Vzorkovacia frekvencia

Najdôležitejším parametrom analógových vstupov je ich počet, rozlíšenie, maximálna vzorkovacia frekvencia a napäťový rozsah. Rozlíšenie závisí na použítom A/D prevodníku. Bežne sú karty vybavené s 12bitovým prevodníkom, no postupne sa začínajú používať aj 16bitové. Maximálna vzorkovacia frekvencia môže byť skresľujúci údaj. Často sa uvádza maximálna rýchlosť A/D prevodníku, ale väčšinou lacnejšie karty prepínajú do jedného prevodníku všetky svoje výstupy. Takáto karta pri použití prevodníku s maximálnou vzorkovaciu frekvenciou 200kHz a pri meraní 10-tich kanálov získa iba 20 000 vzorkou na každom z nich. Karty s plnohodnotným reťazcom pre každý kanál netrpia týmto nedostatkom. Tie ale bývajú podstatne drahšie. Je vhodné si zistiť maximálnu vzorkovaciu frekvenciu na kanál, aby nedochádzalo k porušovaniu vzorkovacieho teorému.

#### **4.1.1.2 Napätové rozsahy.**

U napätových rozsahov je dôležité skontrolovať, či meraný signál nepresahuje možnosti karty ale aj či bude merací rozsah dobre využitý. Niektoré karty majú osem a viac softvérových prepínateľných rozsahov, iné majú iba jeden rozsah. Napríklad pri meraní rozsahu 0 až 2V by sa určite mala použiť karta s voliteľným unipolárnym rozsahom 0-2,5V pred kartou s jediným rozsahom  $\pm 10$  V. Pri rovnakom rozlíšení A/D prevodníku bude u prvej karty menší šum. Dôležitým ukazovateľom je tiež miera ochrany proti prepätiu.

#### **4.1.2 Analógové výstupy**

U analógových výstupov sa hodnotia rovnaké parametre ako u vstupov. Niektoré karty majú výstupy iba statické, čiže ide o nevyšlat vždy iba jednu hodnotu a rýchlosť zmeny je daná softvérom. Karty s hardvérovými časovými výstupmi a vyrovnávacou pamäťou dokážu presne generovať aj pomerne rýchle priebehy.

#### **4.1.3 Digitálne linky**

Digitálne linky majú takmer všetky meracie karty. Priemerné karty majú často len osem digitálnych liniek. Neizolované linky používajú úroveň TTL a CMOS, opticky izolované umožňujú snímať napätie do 60V. U lacnejších kariet sú vstupy a výstupy statické, čiže dovoľujú precíť alebo vyslať iba jeden jediný stav.

#### **4.1.4 Čítace a časovacie**

Poslednou funkciou sú čítacie a časovacie. Tie sa používajú k počítaniu impulzov, alebo k pripojeniu inkrementálnych snímacov. U čítacov je rozhodujúcim parametrom dĺžka registra. Tá je najčastejšie medzi 24 a 32 bity. Využitie čítacov a časovacov sa pri simulátore nepredpokladá. [9]

Karta	Analogové vstupy (AI)	Rozlišení AI	Rozsah AI	Vzorkovacia frekvencia AI	Analogové výstupy (AO)	Rozlišení AO	Rozsah AO	Vzorkovacia frekvencia AO	Digitálne I/O	Cena ( \$ )
NI PCI-6733	0	-	-	-	8	16-bit	±10V	740k Hz	8	1 799
NI PCI-6713	0	-	-	-	8	12-bit	±10V	740k Hz	8	1 399
NI PCI-6703	0	-			16	16-bit	Static Update		8	1 399

**Tabulka c. 3: Prehľadová tabuľka meracích kariet do PC zbernice od NI ktoré podporuje Real Time Windows Target a majú osem a viac analógových výstupov. [10]**

Karta	Analogové vstupy (AI) SE	Rozlišení AI	Rozsah AI [V]	Vzorkovacia frekvencia AI	Analogové výstupy (AO)	Rozlišení AO	Rozsah AO [V]	Vzorkovacia frekvencia AO	Digitálne I/O	Cena ( \$ )
PCI-6250	16	16-bit	±10, ±5, ±2, ±1, ±0.5, ±0.2, ±0.1	1 MHz	0	-	-	-	24	999
PCI-6251	16	16-bit	±10, ±5, ±2, ±1, ±0.5, ±0.2, ±0.1	1 MHz	2	16-bit	±10, ±5,	2MHz	24	1 049
PCI-6220	16	16-bit	±10, ±5, ±1, ±0.2	250 kHz	0	-	-	-	24	449
PCI-6221	16	16-bit	±10, ±5, ±1, ±0.2	250 kHz	2	16-bit	±10	2MHz	24	549

**Tabulka c. 4: Prehľadová tabuľka meracích kariet od NI vhodných pre zber signálov s 16-timi analógovými vstupmi a podporou od RTWT.**



## 4.2 FPGA

Patrí do skupiny PLD, čo znamená Programmable logic device. FPGA je výhodne použiť pri aplikáciách, ktoré vyžadujú spracovanie veľkých dátových tokov, kde nestací procesorové riešenie svojím výkonom a plánuje sa malá séria výrobkov. Casto sa FPGA používa pri výrobe emulátorov.

Medzi výhody FPGA patrí, že prakticky nie je aplikácia ktorú by FPGA nezvládli, stací iba aby boli vybavené patricným počtom hradiel ale tým stúpa aj cena. FPGA taktiež zvláda komunikáciu v reálnom case na vysokej úrovni.

### 4.2.1 Konfigurovanie FPGA

Pre konfigurovanie FPGA sa najcastejšie používa jazyk HDL. Konfigurovat sa môžu vo viacero módoch, bud po JTAG portu alebo sériovým interfejsom. Pri navrhovaní je doporučené používat synchrónny dizajn (bez oneskorenia medzi bunkami).

FPGA je rekonfigurovatelné a niektoré lepšie rodiny sú dokonca ciastocne rekonfigurovatelné, kedy jedna polovica obvodu funguje a druhá polovica obvodu sa môže prekonfigurovat. Pre vývoj je nutné použiť minimálne dva nástroje. Prvým je nástroj pre syntézu, ktorý prevedie väčšinou textový popis návrhu v niektorom HDL jazyku na netlist využívajúci obecné logické bloky. Druhý nástroj zaisť konverziu obecného netlistu na netlist využívajúci prostriedky konkrétneho FPGA a zaisť ich „optimálne“ rozmiestnenie a prepojenie. Nástroje pre rozmiestnenie a prepojenie obvykle ponúkajú iba výrobcovia programovatelných hradlových polí. Prostriedky pre syntézu ponúkajú aj iné firmy. Je možnosť použiť aj freeware aplikácie. [11]

## 4.3 FPGA V SPOJENÍ S MERACÍMI KARTAMI

Niektoré meracie karty využívajú RIO (Reconfigurable I/O) techniku. Princíp spočíva v umiestnení FPGA pola do meracej karty, pricom toto pole konfiguruje užívateľ. Táto metóda je vhodná pre rýchle systémy s rýchlostami až 40MHz.

Spustenie programu priamo v FPGA znamená dosiahnutie niekoľkých zásadných zmien. Program, vďaka tomu, že ho kompilátor preloží priamo do

štruktúry hradíel je vykonávaný omnoho rýchlejšie než v strojovom kóde. Všetky procesy, ktoré v PC zdiela jeden procesor bežia na FPGA celkom nezávisle, paralelne, deterministicky a bez akejkoľvek možnosti prerušenia procesom s nižšou prioritou. Pretože čas procesoru nie je zdieľaný, je možné dosiahnuť presného casovania. Výhodou je, že vnútornú štruktúru digitálnych vstupov (koľko I/O kanálov bude vstup, výstup, casovac, cítac) si určuje sám užívateľ. Takéto karty ponúka napríklad firma National Instruments pre PCI a PXI zbernicu a sú vhodné na „Hardware in the loop“ simuláciu. Výhodou je, že software LabVIEW dokáže vytvorené schéma preložiť do HDL jazyka a zároveň hneď implementovať do FPGA. Vygenerovať kód v HDL jazyku dokáže taktiež Simulink. [12]

V portfóliu firmy NI sú iba tri karty, ktoré majú FPGA pole a zbernicu PCI, tieto karty sú v prehľadovej tabuľke c.5.

Karta	Analogové vstupy (AI)	Rozlíšenie AI	Rozsah AI	Vzorkovacia frekvencia AI	Analogové výstupy (AO)	Rozlíšenie AO	Rozsah AO	Vzorkovacia frekvencia AO	Pocet hradíel	Digitálne I/O	Cena ( \$ )
NI PCI-7830R	4	16-bit	±10V	200 kHz	4	16-bit	±10V	1 MHz	1M	56	2 199
NI PCI-7831R	8	16-bit	±10V	200 kHz	8	16-bit	±10V	1 MHz	1M	96	2 699
NI PCI-7833R	8	16-bit	±10V	200 kHz	8	16-bit	±10V	1 MHz	3M	96	3 499

**Tabuľka c. 5: Prehľadová tabuľka meracích kariet od NI s PCI zbernicou a FPGA polom Virtex-II. [10]**

#### 4.4 ZHRNUTIE HARDWAROVÝCH NÁSTROJOV

Pre zber dát a generovanie signálov je najvýhodnejšie použiť meracie karty. Za predpokladu, že sú v reálnom motore použité pre snímanie teploty termoclánky, ktorých výstupné napätie je v jednotkách mV je vhodnejšie použiť 16-bitové

rozlíšenie kariet. Vzorkovacia frekvencia kariet vzhľadom na požadovanú odozvu je postacujúca v 10tkách kHz. Fakt, že meracích kariet s vyšším počtom analógových výstupov je menej je pri výbere limitujúci. Sú dve základné možnosti pri výbere meracej karty, buď použiť bežnú alebo tzv. RIO kartu. Meracie RIO karty sú samozrejme drahšie a na trhu sú v malom zastúpení. No pre ich výhody v podobe rýchlej odozvy a deterministického správania sú výhodnejšie pre HIL simulácie. Ich nevýhodou môže byť, že počet hradiel nemusí byť dostatočný pri detailnejšom modeli motora. Obmedzením na ktoré som narazil pri výbere klasickej karty bola podpora danej zbernice pre softwarové nástroje, hlavne Matlab / Simulink. Prícom najvhodnejšie sú PCI a PXI zbernice. Podpora pre zbernicu USB, alebo PCMCIA je malá. Ak chceme využiť výhodu FPGA je potrebné použiť SW nástroje pre generovanie HDL kódu z prostredia v ktorom prebieha vývoj modelu tryskového motora a tým sa stráca možnosť sledovať v reálnom čase priebehy v simulacnom modeli, čo je nevýhodne hlavne pri vývoji modelu motora. Pri požiadavke dvadsať analógových výstupov a 16 analógových vstupov je nutné použiť viac meracích kariet. Pri použití kariet s FPGA je odhadovaná cena na hardware 140 000 Kč. S bežnými kartami je táto cena 90 000 Kč.

## 5. KONCEPT

Cielom tejto práce je nahrnúť vhodný koncept simulátoru leteckého motoru pre simulovanie jednotiek FADEC, pričom jednotka FADEC by nemala rozoznať či komunikuje s reálnym motorom alebo so simulátorom.

Pri vyššom počte meracích kariet, a po odpocítaní už zakúpeného softwaru sú práve meracie karty najdrahšou položkou simulátoru. Karty sFPGA polom sú vhodnejšie pre HIL simulácie a výhodami ale aj cenou prevyšujú klasické meracie karty. Preto som sa v rámci návrhu konceptu vydal cestou použitia meracích kariet bez FPGA pola a snažil som sa dosiahnuť čo najmenšiu časovú odozvu simulátora pomocou vhodného nástroja v Simulinku. Hlavným dôvodom tohto rozhodnutia bola vyššia cenová výhodnosť.

### 5.1 HARDWARE SIMULÁTORU

Firma Honeywell uprednostňuje meracie karty od National Instruments z dôvodu jednoduosti a znovu použitia v iných projektoch. Preto som pri výbere vhodnej karty vyberal z produktov NI. Okrem hardwarových požiadaviek bola pri výbere obmedzujúcim parametrom aj podpora ovládacov jednotlivých toolboxov.

Kartu som vyberal z prehľadovej tabuľky c. 3, pričom výber bol po uvážení požadovaných parametrov iba z dvoch kariet a to NI PCI-6731 a NI PCI-6733. Odporúčam kartu NI PCI-6733 na základe jej parametrov, a to hlavne rozlíšenia, čo je jediný parameter v ktorom sa karty odlišujú okrem ceny. Základné parametre popisuje tabuľka c.6

Zbernica	PCI
Pocet analógových výstupov	8
Obnovovacia frekvencia	1Ms/s, (740ks/s pre osem kanálov)
Výstupné rozlíšenie	16-bit
Výstupný rozsah	±10V
Pocet digitálnych I/O liniek	8
Cena	\$ 1 799

**Tabuľka c. 6: Parametre karty NI PCI - 6733**

Karta NI PCI – 6713 nemá analógový vstup a v portfóliu firmy NI nie je karta ktorá by mala osem a viac analógových výstupov a súčasne analógové vstupy a podporu pre Real Time Windows Target. Maximálne mávajú karty štyri analógové výstupy. Pre splnenie požiadaviek na počet analógových výstupov treba minimálne dve takéto karty adalej je nutné použitie ďalšej karty, ktorá bude vhodná pre snímanie signálov.

Kartu vhodnú pre snímanie signálov som vyberal zprehľadovej tabulky c. 4 kde sú karty ktoré majú požadovaný počet analógových vstupov, teda 16nást a súčasne podporu pre RTWT. Odporúčam kartu NI PCI – 6220, ktorá má najnižšiu cenu a tým aj najhoršie parametre, ktoré sú však postacujúce. Parametre sú popísané v tabulka c. 7

Zbernica	PCI
Pocet analógových vstupov	16 (v zapojení „single ended“)
Pocet analógových výstupov	0
Vzorkovania frekvencia analógových vstupov	250kHz (pre multikanál)
Vstupný rozsah	$\pm 10$ V, $\pm 5$ V, $\pm 1$ V, $\pm 0.2$ V
Vstupné a výstupné rozlíšenie	16Bit
Velkost vstupného FIFO zásobníka	4 095 vzorkov
Pocet digitálnych I/O liniek	24
Cena	\$ 449

**Tabulka c. 7: Parametre karty NI PCI – 6220**

## 5.2 SOFTWARE SIMULÁTORU

Ako vývojové prostredie pre model a simulátor tryskového motoru sa z už vyššie zmienených dôvodov predpokladá Matlab / Simulink. Na výber sú tri toolboxy, ktoré umožňujú prepojenie Simulinku s meracími kartami. Data Acquisitoin toolbox nesplna požiadavky pre komunikáciu, pretože nemá možnosti ako zabezpečiť požadovanú odozvu, ktorá je minimálne 1 milisekunda a menej.

Real Time Toolbox od firmy Humusoft má prostriedky pomocou ktorých je možné zabezpečiť realtime odozvu, avšak s tým, že simulácia prebieha v Simulinku, to kladie vyššie nároky na výkon CPU a RAM pamäť, a preto je predpoklad, že odozva je pomalšia ako v prípade RTWT. RTT však nebol testovaný z dôvodu, že

má demo, ktoré nekomunikuje s meracími kartami. RTT umožňuje využívať všetky možnosti Simulinku ako napríklad „Variable Step“ a nepotrebuje RTW na rozdiel od RTWT. Podpora kariet RTWT a RTT je takmer rovnaká. Ako vhodný nástroj odporúčam Real Time Windows Target s jeho nutnou súčasťou Real Time Workshop. Táto voľba je z cenového hľadiska menej výhodná, no prináša výhody, ktoré ostatné toolboxy neponúkajú.

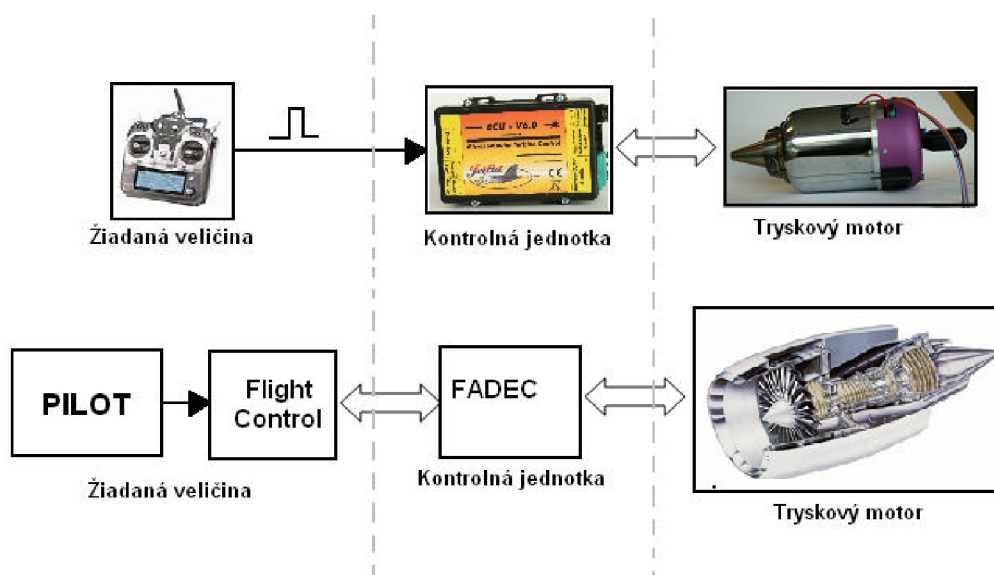
Medzi hlavné prednosti tohto nástroja patrí odozva v požadovanom case, čo má byť zabezpečené prekladom do jazyka C a tým zjednodušenia výpočtu a priradením maximálnej priority CPU pre tento výpočet, ďalej možnosť meniť parametre blokov počas simulácie, čo je výhodné pri ladení programu a preklad do kódu v jazyku C a v poslednom rade preklad do jazyka C, čo je možné využiť v prípade nutnosti používať hardware na ktorý sa kód v jazyku C nahrá.

Navrhnutý koncept obsahuje software Matlab / Simulink spolu s Real Time Windows Target a Real Time Workshop a hardware meracie karty od National Instruments NI PCI – 6220 a 2 x NI PCI – 6733. Cena takto navrhnutého konceptu vrátane hardware (tri meracie karty) a software je približne 150 000Kč. (Pocíta sa cena jednej licencie v prípade Real Time Windows Target, pričom licencia na Real Time Workshop je už zakúpená).



## 6. OVERENIE KONCEPTU

Vývoj simulátoru a hlavne jeho podstatnej casti, modelu tryskového motoru je dlhodobý a finančne náročný proces, z toho dôvodu je vhodné v úvodnej casti vývoja overiť správnosť vybraného hardware a software. Pre toto overenie slúži modelársky tryskový motor. Chovanie motoru pre RC lietadlá je analogické ku konvencnému motoru. V konvencnom motore je celý proces vytvárania tahu iba dokonalejší a prepracovanejší.



**Obrázok c. 17: Analógia modelárskeho tryskového motoru k tryskovým motorom z konvencných lietadiel.**

### 6.1 MODELÁRSKY TRYSKOVÝ MOTOR P80-SE

Jedná sa o malý modelársky turbínový motor ktorý vyrába nemecká firma JetCat pod typovým označením P-80SE. Používa sa pre pohon RC lietadiel, lodí a vrtulníkov. Tento motor má slúžiť na testovacie účely a na overenie modelu v simulátore av optimálnom prípade by riadiaca jednotka tohto motoru, ktorá je umiestená mimo motor adáva mu príkazy nemala rozoznať, či riadi tento motor alebo komunikuje so simulátorom.





**Obrázok c. 18: Modelársky turbínový motor P-80SE od firmy JetCat.**

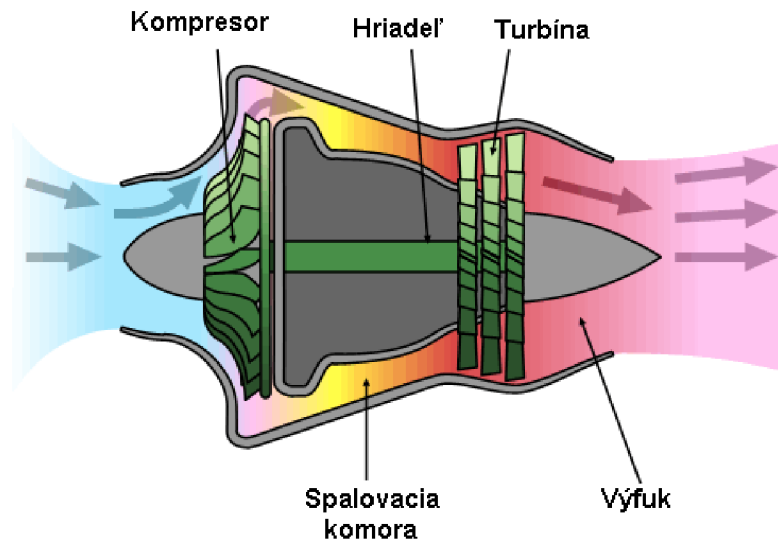
Tah motoru [kg]	9,97kg pri 125,000 RPM
Hmotnosť [kg]	1,32kg
Rozsah otáčok [ot/min <sup>-1</sup> ]	35,000 - 125,000
Teplota výstupných plynov [°C]	690 °C
Spotreba paliva [ml/min]	275ml/min pri plnom výkone
Palivo	Kerosin, 1-K
Mazanie	pridaním približne 5% syntetického turbínového oleja k palivu
Interval údržby	25 hodín
Cena	\$ 2 190

**Tabulka c. 8: Parametre turbínového motoru [13]**

## 6.2 PRINCÍP ČINNOSTI

Podobne ako aj konvenčný motor do automobilu má turbínový motor štyri fázy. Na vstupe turbínového motora, je nasávaný vzduch kompresorom, ďalej je stláčaný v potrubí medzi kompresorom a spalovacou časťou. (niektoré typy motorov používajú pre stlačenie viac kompresorov za sebou) Stlačený vzduch je zmiešaný v spalovacej časti s palivom a dochádza k expanzii a tým k roztoceniu turbíny, ktorá je cez hriadel spojená s kompresorom. Následne horúci vzduch vystupuje veľkou rýchlosťou precz výfukové časti a roztocení kompresor nasáva ďalší vzduch. Na

základe Newtonovho zákona akcie a reakcie sa celý motor pohybuje opačným smerom ako výstupné plyny.



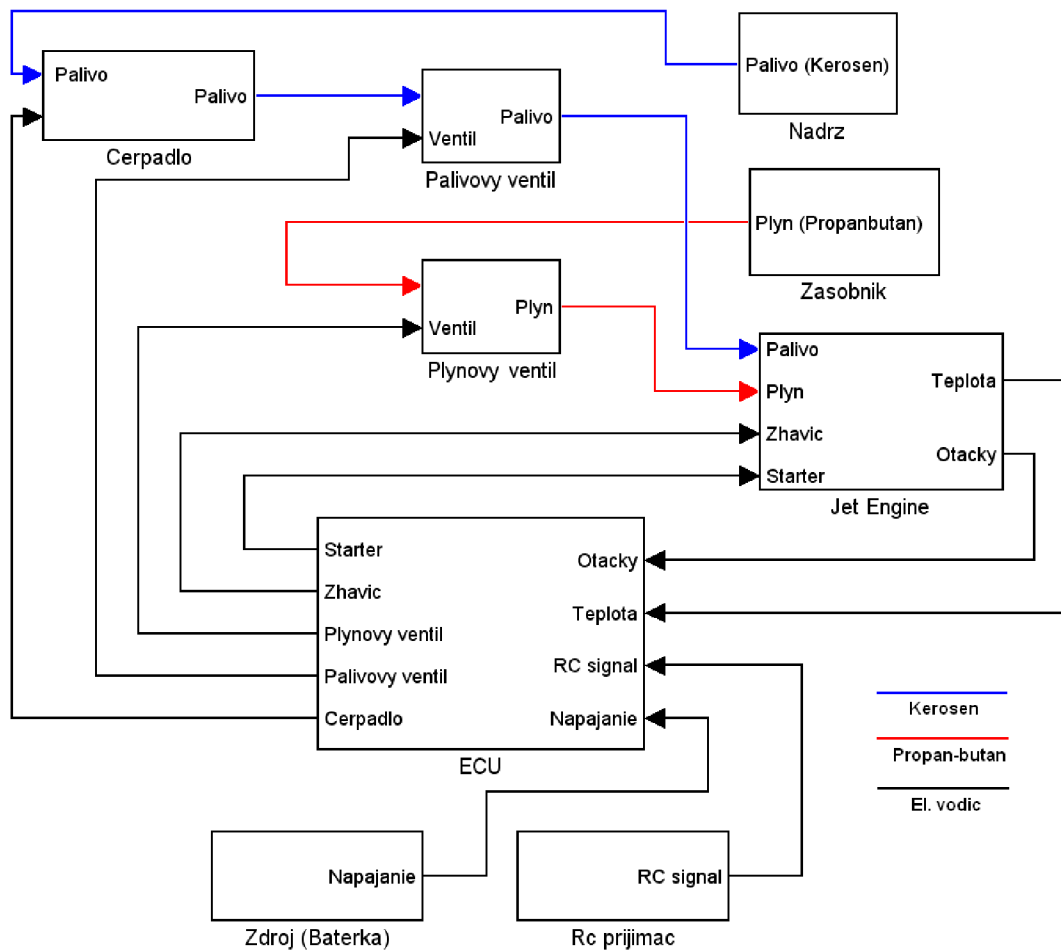
**Obrázok c. 19: Princíp turbínového motoru**

### 6.3 VÝSTUPNÉ VELICINY

Konštrukcia modelárskeho turbínového motoru je omnoho jednoduchšia ako konvenčného motoru a preto postacuje meranie dvoch velicín. Meria sa teplota výstupných plynov aotáčky motoru. Pomocou týchto dvoch velicín vyhodnocuje ECU (elektronická kontrolná jednotka) výkon motoru zcoho je potom možné určiť množstvo paliva potrebného pre dosiahnutie žiadaného výkonu. Teplota výstupných plynov je zároveň najdôležitejší údaj vypovedajúci o stave motoru.

<b>Teplota výstupných plynov</b>	
Rozsah merania [°C]	-20 ÷ 1 150
Rozlíšenie [°C]	5
<b>Ootáčky motoru</b>	
Rozsah merania [ot/s]	30 ÷ 130 000
Rozlíšenie [ot/s]	15

**Tabulka c. 9: Rozsahy a rozlíšenia meraných velicín**



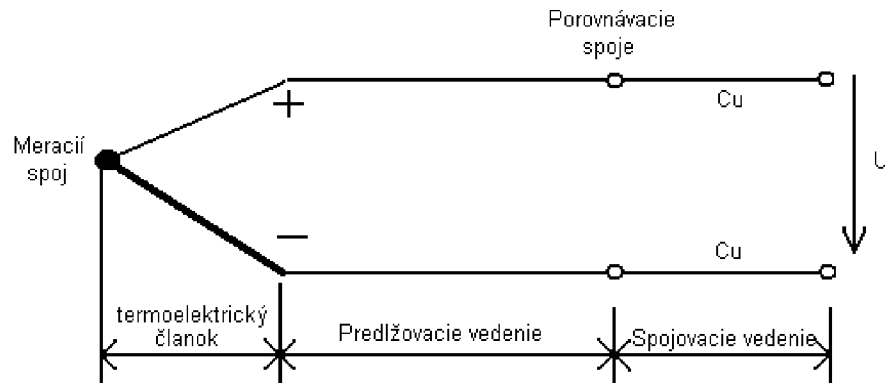
**Obrázok c. 20: Blokové schéma zapojenia turbínového motoru s kontrolnou jednotkou (ECU)**

### 6.3.1 Teplota výstupných plynov

Identifikátorom, či došlo k úspešnému zapáleniu spalovacej komory je práve teplota výstupných plynov pri presiahnutí určitej prahovej hodnoty. Taktiež je teplota výstupných plynov jedným z hlavných bezpečnostných parametrov. Teplota za turbínou nesmie prekročiť určitú konštrukčnú úroveň v žiadnej fáze behu motoru.

Pre meranie parametrov teploty výstupných plynov slúži termoelektrický prevodník – termoclánok. Termoclánok je tvorený dvomi vodičmi s rôznou koncentráciou voľných elektrónov, teda rôznou vodivosťou. Tieto vodice sú na konci

spojené bodovým zvarom. Spoj je umiestnený v priestore v ktorom je potrebné merať teplotu a druhý koniec vodičov je v priestore so známou teplotou.



**Obrázok c. 21: Zapojenie termoclánku**

Obidva konce termoclánku spája kompenzačné vedenie, ktoré je z rovnakého materiálu ako je termoclánok. Ak sú teploty na oboch koncoch termoclánku rôzne, vzniká na výstupe vplyvom Seebeckova javu jednosmerné napätie, pre jeho veľkosť platí:

$$U_T = K_T (T_M - T_S) \text{ [V]} \quad (5.1)$$

- kde  $U_T$  je napätie na výstupe termoclánku [V],  
 $K_T$  konštanta termoclánku [ $V/^\circ C$ ],  
 $T_M$  meraná teplota [ $^\circ C$ ],  
 $T_S$  teplota studeného konca termoclánku [ $^\circ C$ ].

Pre väčší rozsah teplôt nie je charakteristika termoclánku lineárna a konštanta  $K_T$  sa mení. Pri vyjadrení pomocou vzťahu (5.1) sa používa polynóm vyššieho stupňa alebo sa závislosť výstupného napätia na rozdielu teplôt udáva tabuľkou.

K meraniu teploty výstupných plynov prúdových motorov sa najčastejšie používa termoclánok typu K, ktorý je tvorený materiálmi CHROMEL a ALUMEL. Stredná hodnota konštanty medzi teplotami  $-50^\circ C \div 1000^\circ C$  je  $K_T=42\mu V/^\circ C$ . [18]

### 6.3.2 Otáčky motoru

Motor P-80SE má ako každý iný definovaný rozsah maximálnych a minimálnych pracovných otáčok, pričom otáčky turbíny sú hlavným regulovateľným parametrom. Pri prekročení maximálnych otáčok hrozí deštrukcia motoru. Otáčky sa môžu merať pomocou hallovej sondy alebo optickej závory. Konkrétny typ senzoru nebol v príručke k motoru špecifikovaný.

## 6.4 VSTUPNÉ VELICINY

Hodnoty vstupných veličín sú generované z kontrolnej jednotky, pričom sú nastavované nasledujúce prvky – štartér, palivové čerpadlo, žhaviacia sviečka a solenoidové ventily paliva a plynu. Blokové schéma zapojenia vstupných veličín je na obrázku Obrázok c. 20.

### 6.4.1 Palivové čerpadlo

Množstvo paliva dodávaného do turbíny je akcnou veličinou pre reguláciu tahu, pričom je závislé na okamžitých otáčkach a polohe plynovej páky a je definované charakteristikou. Množstvo paliva sa reguluje pomocou čerpadla.

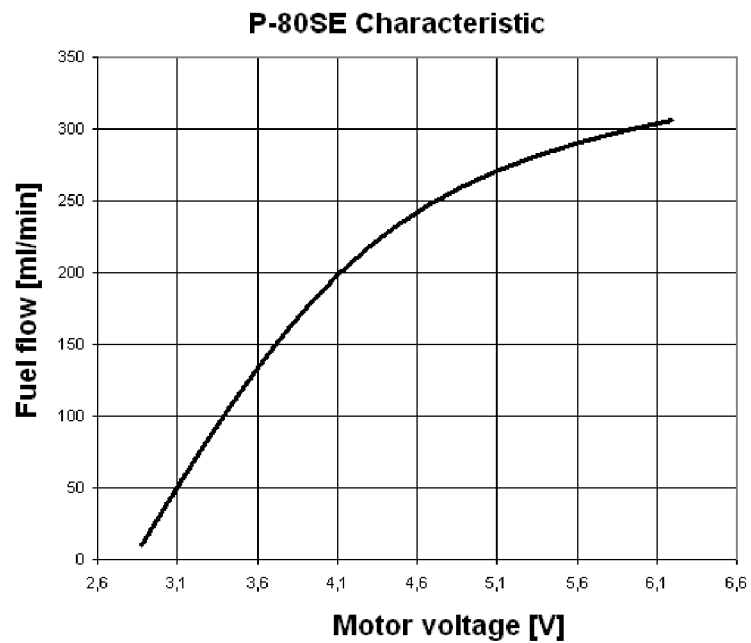
### 6.4.2 Štartér

Štartér je umiestnený v prednej časti motoru a slúži k roztocení motoru v priebehu štartovacej sekvencií a k ochladzovaniu motoru po vypnutí paliva.

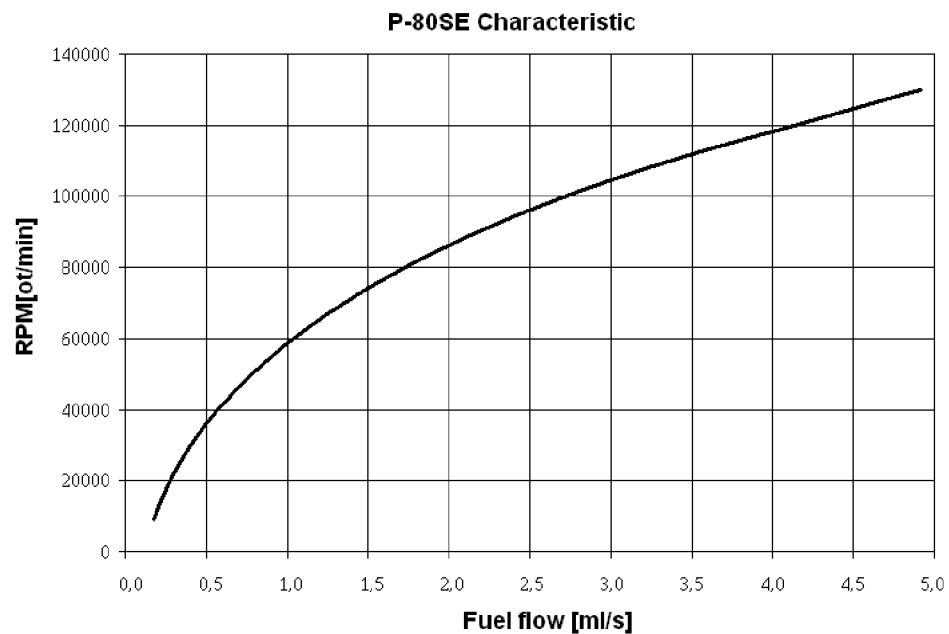
### 6.4.3 Solenoidové ventily

Slúžia pre otvorenie prívodu paliva alebo plynu do spalovacej komory. Plyn sa používa pri štarte motoru na predhriatie spalovacej komory, potom je potrebné prívod plynu uzavrieť. Palivový ventil je otvorený iba v prípade činnosti čerpadla, inak je zatvorený, aby nedochádzalo k horúcemu štartu.

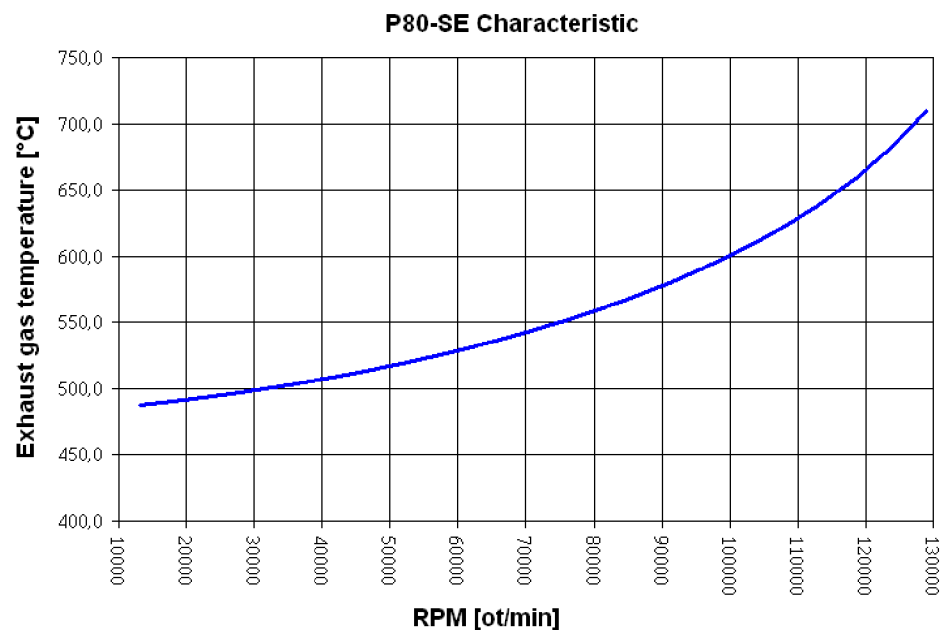
Vzhľadom na oneskorenú dodávku motoru P-80SE a pre jednoduché demonštrovanie konceptu sa navrhli takéto charakteristiky motoru.



Obrázok c. 22: Závislost prietoku paliva od napätia motoru čerpadla.



Obrázok c. 23: Závislost otáčok tryskového motoru od prítoku paliva.



**Obrázok c. 24: Závislost teploty výstupných plynov od otociek tryskového motoru.**

### 6.5 TESTOVANIE KONCEPTU

Z viacerých toolboxov, pre I/O komunikáciu niesu všetky vhodné pre simulátor leteckého motoru.

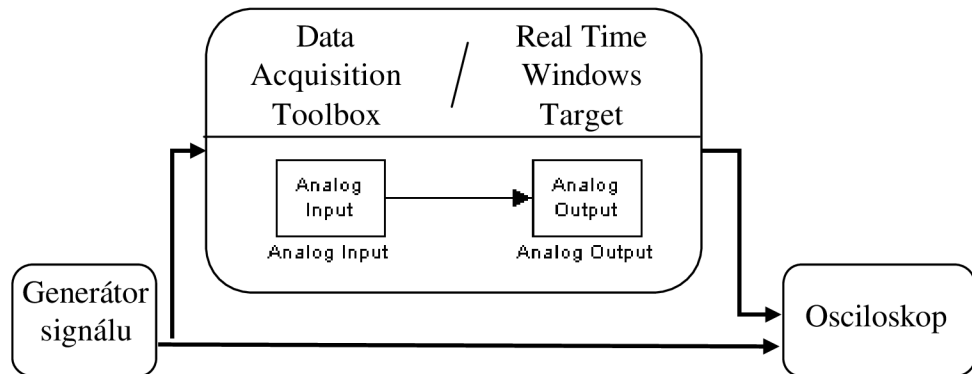
Data acquisition toolbox komunikuje s I/O kartami ale nie je schopný komunikovať v reálnom čase, toto som sa snažil overiť, kde pri jednoduchom zapojení podľa obrázku c. 25, kde je generovaný signál posiadaný priamo do osciloskopu a zároveň do PC, kde je získaný Simulinkom a hneď aj Simulinkom (jednoduchým prevodom) generovaný bolo namerané oneskorenie takéhoto signálu 156 milisekúnd. Parametre blokov „Analog Input“ a „Analog Output“ boli nastavené na maximálne limitné hodnoty. Dôvodom takej veľkej odozvy bolo aktuálne zataženie systému.

Konfigurácia PC bola systém Windows XP, procesor „Intel Core 2 Duo 2,99GHz, 1,96GB RAM pamäte. Pri počte 65-70 spustených procesov pod Windows XP. Meracia karta bola NI PCI-6036E.



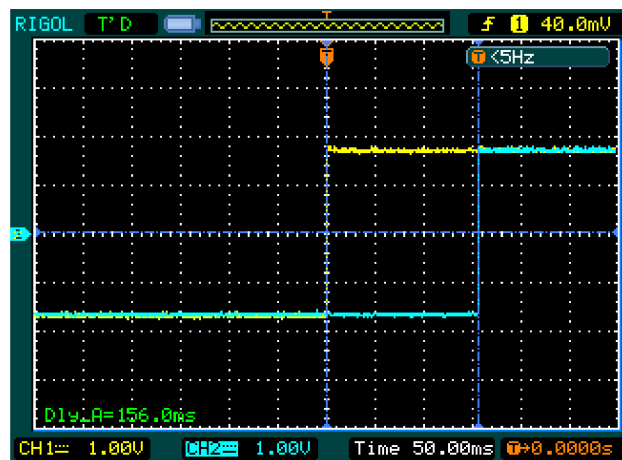
Zbernica	PCI
Pocet analógových výstupov	2
Obnovovacia frekvencia výstupu	10kHz
Výstupné rozlíšenie	16-bit
Výstupný rozsah	±10V
Pocet digitálnych I/O liniek	8
Pocet analógových vstupov	8
Vzorkovacia frekvencia vstupov	200kHz
Vstupné rozlíšenie	16-bit
Vstupný rozsah	±0.5V až ±10V

**Tabulka c. 10: Parametre meracej karty NI P036E**



**Obrázok c. 25: Schéma zistovania odozvy DAToolboxu.**

Meranie potvrdilo, že Data Acquisition Toolbox je nevhodný pre simulátor tryskového motoru.



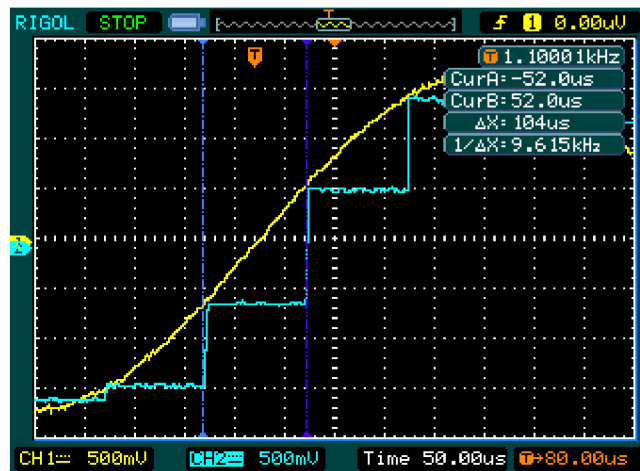
**Obrázok c. 26: Odozva výstupného signálu (modrý) na nábežnú hranu vstupného signálu (žltý) v DAT.**

Pre prácu s Real Time Windows Target je nutné použiť nástroj Real Time Workshop. Pri meraní sa zistilo, že RTWT pracuje s omnoho menšou odozvou ako DAT. Odozva sa zistovala pomocou zapojenia podľa obrázku c. 25.

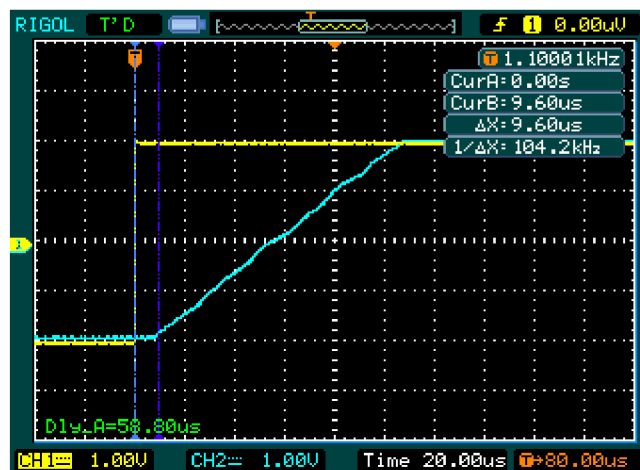
Meracia karta	NI PCI – 6036E		
Maximálna vzorkovacia frekvencia analógového výstupu	10kHz		
Maximálna vzorkovacia frekvencia analógového vstupu	200kHz		
Nastavená vzorkovacia. Frekvencia v bloku „Analog output“	10kHz		
Nastavená vzorkovacia. frekvencia v bloku „Analog input“	200kHz		
Typ signálu	Odozva [ $\mu$ s]		
	MIN	MAX	AVG (256 vzorkov)
Obdlžnik	9,6	106,0	58,8
Sínus	6,0	104,0	58,0

**Tabulka c. 11: Rýchlosť odozvy RTWT s meracou kartou NI PCI-6036E**

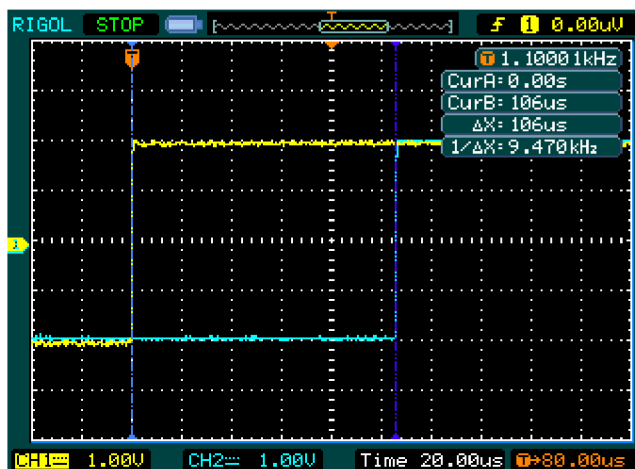
Zmena amplitúdy ani frekvencie nemala vplyv na rýchlosť odozvy. Maximálne frekvencie signálov sú dané vzorkovacím teorémom, čiže v prípade analógového vstupu a obdlžnikového signálu nesmie byť dĺžka impulzu (pozitívneho alebo negatívneho) menšia ako  $200\mu$ s. Rýchlosť odozvy bola daná vzorkovacou frekvenciou analógového výstupu a z toho vyplýva že pri jednoduchom zapojení je najslabší článok celého reťazca meracia karta. Výsledky boli porovnateľné lepšie ako v prípade DAT.



Obrázok c. 27: Priebeh odozvy výstupného signálu (modrý) na vstupný sínusový signál (žltý) pre RTWT.

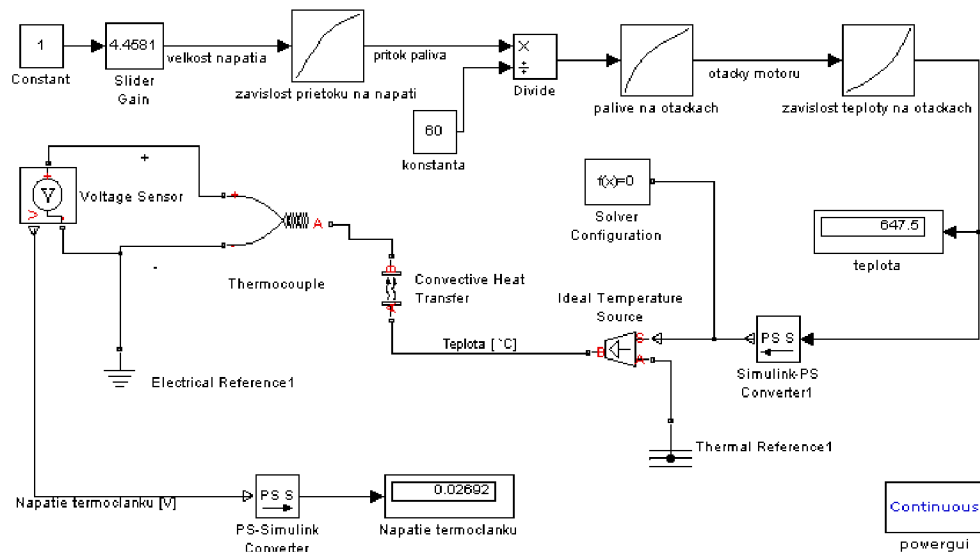


Obrázok c. 28: Priebeh odozvy výstupného signálu (modrý) na vstupný obdĺžnikový signál (žltý) pre RTWT so zobrazením priemernej a minimálnej odozvy.



**Obrázok c. 29:** Priebeh odozvy výstupného signálu (modrý) na vstupný obdĺžnikový signál (žltý) pre RTWT so zobrazením maximálnej odozvy.

Pre overenie konceptu sa plánovalo, že sa zmerajú parametre výstupných signálov z motora, ale vzhľadom na neskorú dodávku motora od dodávateľskej spoločnosti neboli tieto parametre získané. Súcastou HIL simulácie je aj simulovanie senzorov a pretože je známa charakteristika termoclánku typu „K“, ktorý je použitý v motore, tak je možné namodelovať tento termoclánok. Môže sa namodelovať pomocou jednoduchšej „look-up“ tabuľky a časovou konštantou alebo pomocou knižnice „Simscape“ v ktorej signálové prepojenia medzi blokmi sú reprezentované fyzikálnymi veličinami. Teplota ktorú termoclánok sníma je získavaná zo závislosti teploty na otáčkach motoru. Otáčky motoru sú získané zo závislosti otáčok od prítoku paliva a prítok paliva je závislý od napätia na motore čerpadla.

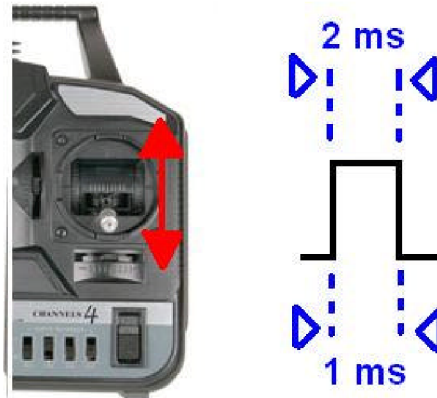


**Obrázok c. 30: Simulačné schéma modelu termoclanku s predpokladanými charakteristikami motoru.**

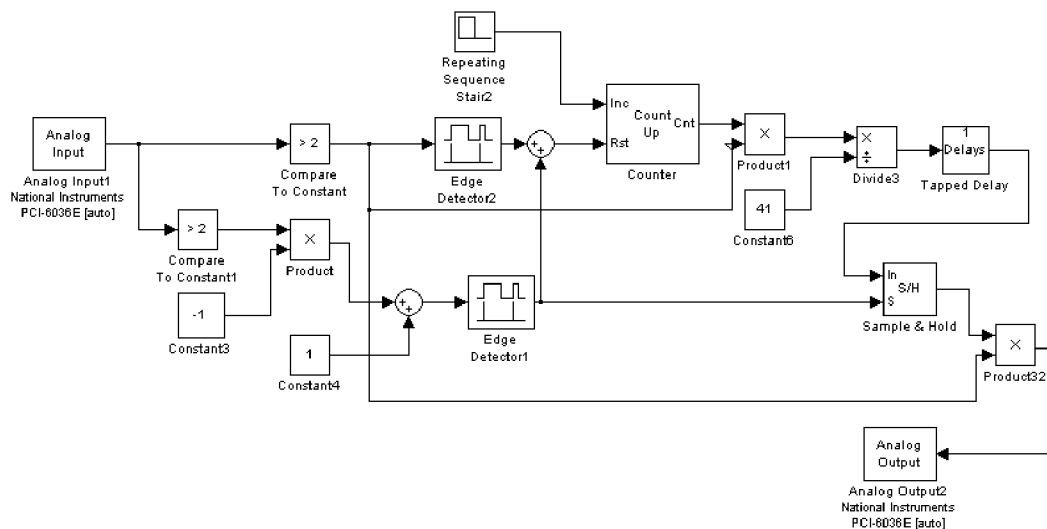
S obrázku c. 30 vidieť, že teplota výstupných plynov motoru je 647,5 °C a tomu zodpovedá napätie termoclanku typu „K“ 26,92mV. Hodnota zodpovedá hodnote, ktorá je uvedená v Americkom národnom inštitúte pre štandardy a technológie (pre 647°C je to 26,94mV). [16] Pribeh teploty a napätia na termoclanku je vidieť v prílohe 1. Modelovanie termoclanku pomocou „look-up“ tabulky spriechom závislosti napätí na teplote je v prípade jedného termoclanku jednoduchšie, no pri modelovaní zložitejších teplotných dejov ktoré prebiehajú v tryskovom motore je výhodnejšie použiť knižnicu Simscape. Nástroj RTW spolu s RTWT dokáže od verzie Simscape 3.0 prekladať schémy do jazyka „C“. To som overil, ale nemohol som to odskúšať, pretože firma Honeywell disponuje iba nástrojom Simscape verzie 2.0.

Schéma v Simulinku schéma pri ktorom má celý systém maximálnu odozvu 100μ je jednoduché, a preto som vytvoril demonštracné schéma, kde som sa snažil zistiť dĺžku pozitívneho pulzu, pretože Simulink nedisponuje (nie je mi známe) blokom ktorý by to dokázal spraviť musel som si vytvoriť vlastné schéma. Dĺžka

pozitívneho impulzu reprezentuje žiadanú veľicinu, ktorá vstupuje do ECU kontrolnej jednotky z RC prijímaci.

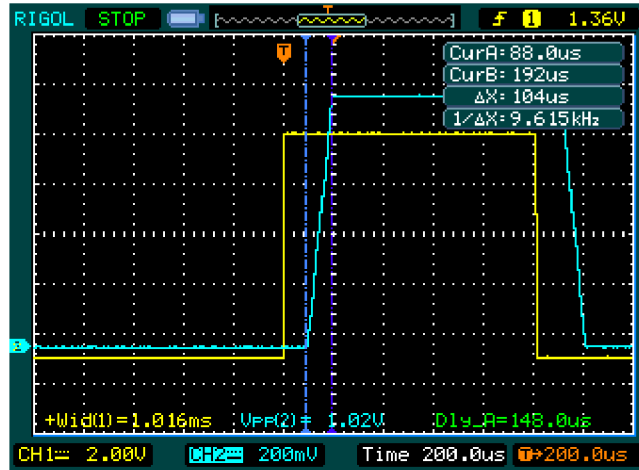


**Obrázok c. 31: Pohyb páčky znamená zmenu dĺžky pozitívneho pulzu od 1ms do 2ms.**



**Obrázok c. 32: Schéma pre zistovanie dĺžky pozitívneho pulzu.**

Toto schéma som viacnásobne skopíroval v okne pre tvorenie schémy, tak aby som čo najviac zatažil procesor výpočtom. Dosiahol som tak toho, že jedna sekunda vsimulovanom modeli trvala 7,5s reálneho času. Toto schéma som potom pustil v „Externom režime“ a dosiahol som odozvu priemernú odozvu. 148.0 $\mu$ s a dĺžka impulzu 1ms zodpovedala amplitúde 1V.



**Obrázok c. 33: Odozva (modrý signál) na vstupný signál (žltý) pri náročnejšom výpocte v Simulinku.**

Typ signálu	Odozva [ $\mu$ s]		
	MIN	MAX	AVG (256 vzorkov)
Obdĺžnik	88.0	192	148.0

**Tabulka c. 12: Odozvy PC stanice pri náročnejšom výpocte v Simulinku.**

Pri vykonávaní tohto modelu bola PC stanica zamrznutá a úplne nepoužiteľná. Toto bolo spôsobené pridelovaním maximálnej priority vykonávanému modelu, ale tým sa stráca jedna z výhod RTWT a to, že nie je možné meniť niektoré parametre blokov a ani sledovať žiadne priebehy v Simulinku.

## 6.6 ZHODNOTENIE TESTOVANIA

Testovaním som si čiastočne overil, že vybraný koncept je funkčný a dáva zmysel a je ho možné použiť pre simulátor leteckého motoru. Testovanie bolo hlavne zamerané na zistenie odozvy celého simulátora. Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou odozvou pri jednoduchej a náročnej schéme v Simulinku je približne rovnaký. Z toho sa dá usúdiť, že náročnosť simulácie má minimálny vplyv na komunikačný čas, a maximálny vplyv na výpočtový čas. Zamrznutie a nutný reštart systému Windows XP pri náročnejšej simulácii je veľmi nepraktické.



## 7. ZÁVER

Cielom tejto práce bolo navrhnuť koncept hardwarového simulátoru tryskového motoru, ktorý bude slúžiť pre testovacie účely pre firmu Honeywell, konkrétne pre testovanie jednotiek FADEC. Práca popisuje, akým spôsobom funguje hardwarový simulátor, aké sú možnosti jeho vytvárania a aké nástroje na to slúžia.

Prvotný predpoklad bol, že hlavnú časť reťazca hardwarovej časti budú tvoriť meracie karty s programovateľným FPGA polom. Pri uvážení nákladov na toto riešenie (minimálne 180tisíc Kč vrátane SW + HW) sa začali hľadať iné cesty pomocou ktorých je možné dosiahnuť požadované parametre simulátoru, pričom sa vychádzalo z toho, že ako prioritný softwarový nástroj sa bude používať Matlab / Simulink. Preto sa hľadali možnosti akým spôsobom je možné prepojiť Simulink s meracími kartami a či bude pomocou tohto prepojenia možné realizovať HIL simulácie. Pre koncept je navrhnutý software Matlab – Simulink s toolboxmi „Real Time Windows Target“ v spolupráci s „Real Time Workshop“ a hardware sú meracie karty NI PCI – 6733(2x) a NI PCI – 6220 pre komunikáciu v reálnom čase, pričom hlavná výhoda tohto riešenia je v jeho rýchlej odozve, ktorá spĺňa požadované kritérium. Najväčšou nevýhodou je, že pri náročnejšej simulácii dochádzalo k zamrznutiu systému XP s nutným reštartom. Toto je veľmi nepraktické a pri riešení s kartami s FPGA polom sa takéto chovanie nepredpokladá. Pri overovaní konceptu sa zistilo, že v prípade náročnejšej simulácie, pri ktorej je reálny čas niekoľko násobne rýchlejší ako simulacný je priemerná doba odozvy celého systému 148  $\mu$ s, čo sa pokladá za dobrý výsledok. Je predpoklad, že pri použití iba potrebných systémových procesov v systéme MS Windows by bola táto odozva ešte menšia. Predpokladá sa, že pri stredne náročnom simulacnom modeli bude takto navrhnutý koncept spĺňať nariadené požiadavky. Na základe tohto sa domnievam, že navrhnutý koncept s použitím nástrojov RTW a RTWT je reálny. Pre jednoduché overenie konceptu mal slúžiť reálny modelársky tryskový motor, avšak pre neskorú dodávku nebolo možné previesť identifikáciu tohto motoru, to však nebolo súčasťou zadania. K projektu overovania jednotiek FADEC firmy Honeywell existuje viacero bakalárskych prác a jednou z nich je návrh jednoduchého FADECU. Vytvorenie

modelu tryskového motoru bude dalšou prioritou v pokračování vytvárania simulátoru leteckého motoru.

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok c. 1	Blokové schéma HW simulátoru a FADECu so spätnou väzbou.....	8
Obrázok c. 2:	Reálny motor vs. HW Simulátor s modelom.....	10
Obrázok c. 3:	Modulárne zloženie simulátoru.....	12
Obrázok c. 4:	Blokové schéma komunikácie jednotky FADEC s okolím.....	13
Obrázok c. 5:	Bloky Data Acquisition toolboxu.....	17
Obrázok c. 6:	Okno pre nastavenie parametrov bloku „Analog input“.....	18
Obrázok c. 7:	Priebeh zberu dát pri synchronnom režime bloku „Analog Input“.....	19
Obrázok c. 8:	Priebeh zberu dát pri asynchronnom režime (prvý prípad) bloku „Analog input“.....	19
Obrázok c. 9:	Priebeh zberu dát pri asynchronnom režime (druhý prípad) bloku „Analog Input“.....	20
Obrázok c. 10:	Priebeh simulácie a posielania dát na výstup bloku Analog output pri synchronnom režime.....	22
Obrázok c. 11:	Priebeh simulácie a posielania dát pri asynchronnom režime (prípady A).....	22
Obrázok c. 12:	Priebeh simulácie a posielania dát pri asynchronnom režime (prípady B).....	23
Obrázok c. 13:	Blockset Real-Time Windows Target verzie 3.2.....	24
Obrázok c. 14:	Nastavenie parametrov bloku „Analog input“ v RTWT.....	25
Obrázok c. 15:	Nastavenie parametrov Real Time Workshop.....	27
Obrázok c. 16:	Bloky Real Time Toolboxu.....	30
Obrázok c. 17:	Analógia modelárskeho tryskového motoru k tryskovým motorom z konvenčných lietadiel.....	42
Obrázok c. 18:	Modelársky turbínový motor P-80SE od firmy JetCat.....	43
Obrázok c. 19:	Princíp turbínového motoru.....	44
Obrázok c. 20:	Blokové schéma zapojenia turbínového motoru s kontrolnou jednotkou (ECU).....	45
Obrázok c. 21:	Zapojenie termoclánku.....	46
Obrázok c. 22:	Závislosť prietoku paliva od napätia motoru čerpadla.....	48
Obrázok c. 23:	Závislosť otáčok tryskového motoru od prítoku paliva.....	48

Obrázok c. 24: Závislost teploty výstupných plynov od otociek tryskového motoru.	49
.....	49
Obrázok c. 25: Schéma zistovania odozvy DAToolboxu.	50
Obrázok c. 26: Odozva výstupného signálu (modrý) na nábežnú hranu vstupného signálu (žltý) v DAT.	50
Obrázok c. 27: Priebeh odozvy výstupného signálu (modrý) na vstupný sínusový signál (žltý) pre RTWT.	52
Obrázok c. 28: Priebeh odozvy výstupného signálu (modrý) na vstupný obdĺžnikový signál (žltý) pre RTWT so zobrazením priemernej a minimálnej odozvy.	52
Obrázok c. 29: Priebeh odozvy výstupného signálu (modrý) na vstupný obdĺžnikový signál (žltý) pre RTWT so zobrazením maximálnej odozvy.	53
Obrázok c. 30: Simulacné schéma modelu termoclánku s predpokladanými charakteristikami motoru.	54
Obrázok c. 31: Pohyb pácky znamená zmenu dĺžky pozitívneho pulzu od 1ms do 2ms.	55
Obrázok c. 32: Schéma pre zistovanie dĺžky pozitívneho pulzu.	55
Obrázok c. 33: Odozva (modrý signál) na vstupný signál (žltý) pri náročnejšom výpocte v Simulinku.	56
Obrázok c. 34 Priebeh napätia termoclánku a teploty výstupných plynov v závislosti na veľkosti napätia motoru čerpadla v case 5s.	5

## SEZNAM TABULEK

Tabulka c. 1: Ceny softvérových produktov firmy National Instruments [7].	31
Tabulka c. 2: Ceny toolboxov pre Simulink [8].	32
Tabulka c. 3: Prehľadová tabuľka meracích kariet do PC zbernice od NI ktoré podporuje Real Time Windows Target a majú osem a viac analógových výstupov. [10].	35
Tabulka c. 4: Prehľadová tabuľka meracích kariet od NI vhodných pre zber signálov s 16-timi analógovými vstupmi a podporou od RTWT.	35

Tabulka c. 5: Prehľadová tabuľka meracích kariet od NI s PCI zbernicou a FPGA polom Virtex-II. [10].....	37
Tabulka c. 6: Parametre karty NI PCI - 6733.....	39
Tabulka c. 7: Parametre karty NI PCI – 6220.....	40
Tabulka c. 8: Parametre turbínového motoru [13].....	44
Tabulka c. 10: Parametre meracej karty NI P036E.....	50
Tabulka c. 11: Rýchlosť odozvy RTWT s meracou kartou NI PCI-6036E.....	51
Tabulka c. 12: Odozvy PC stanice pri náročnejšom výpočte v Simulinku.....	56

## SEZNAM SKRATEK

Skratka	Popis
FADEC	Jednotka pre riadenie a kontrolu chodu motoru lietadiel
AI	Analógový vstup
AO	Analógový výstup
RTWT	Toobox v Simulinku pre komunikáciu s meracími kartami
RTT	Toobox v Simulinku pre komunikáciu s meracími kartami
DAT	Toobox v Simulinku pre komunikáciu s meracími kartami
RTW	Toolbox v Simulinku pre preklad do kódu jazyka „C“
RIO	Meracie karty s rekonfigurovatelným FPGA polom
HIL	Simulácia v slucke

## 8. LITERATURA

- [1] ŠOLC, F. – VÁCLAVEK, P. *Modelování a Simulace*. Brno: VUT. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2007, 167 s.
- [2] JOSEPH, M.. *Real-Time Systems Specification, Verification and Analysis*. London : Prentice Hall, [online] 1996  
Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Operacní\\_systém\\_reálného\\_casu](http://cs.wikipedia.org/wiki/Operacní_systém_reálného_casu)>
- [3] Wikipédia, *MATLAB* 2008 [online]  
Dostupné z: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/MATLAB>>
- [4] Pomocník programu *MATLAB R2008b*. 2008.
- [5] The MathWorks, Inc. *Platform Road Map for MATLAB and Simulink* [online] 2009. Dostupné z: <<http://www.mathworks.com/support/sysreq/roadmap.html#roadmapfootnote>>
- [6] LASÁK, P. *Osobné stránky. Úvod do LabVIEW*. [online] Dostupné z: <<http://pavel.lasakovi.com/znalosti/elektrotechnicky-sw/labview-uvod/>>
- [7] DEWETRON-PRAHA spol. s r.o. *Ceník produktu NATIONAL INSTRUMENTS* [online] 2009. Dostupné z: <[http://www.dewetron.com/fileadmin/user\\_upload/images\\_local/cz/ceniky/ni.pdf](http://www.dewetron.com/fileadmin/user_upload/images_local/cz/ceniky/ni.pdf)>
- [8] HUMUSOFT s.r.o. *Ceník produktu systému Matlab* [online] 2009. Dostupné z: <<http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/cenik/matlab.pdf>>
- [9] FCC Public s. r. o. *Merící karty – jak správně vybírat* [online] 2004. Dostupné z: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=32427](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=32427)>
- [10] National Instruments Ltd. *Data Acquisition cards (DAQ)* [online]. 2009. Dostupné z: <<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/1037>>
- [11] ZOUBEK, O. *Úvod do FPGA*. [online]. 2006 Dostupné z: <<http://hafik.zuban.name/skola-fpga/index2.htm>>
- [12] FCC Public s. r. o. *RIO – revoluce v měření, řízení a automatizaci*. 2006 [online]. Dostupné z: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=30937](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30937)>

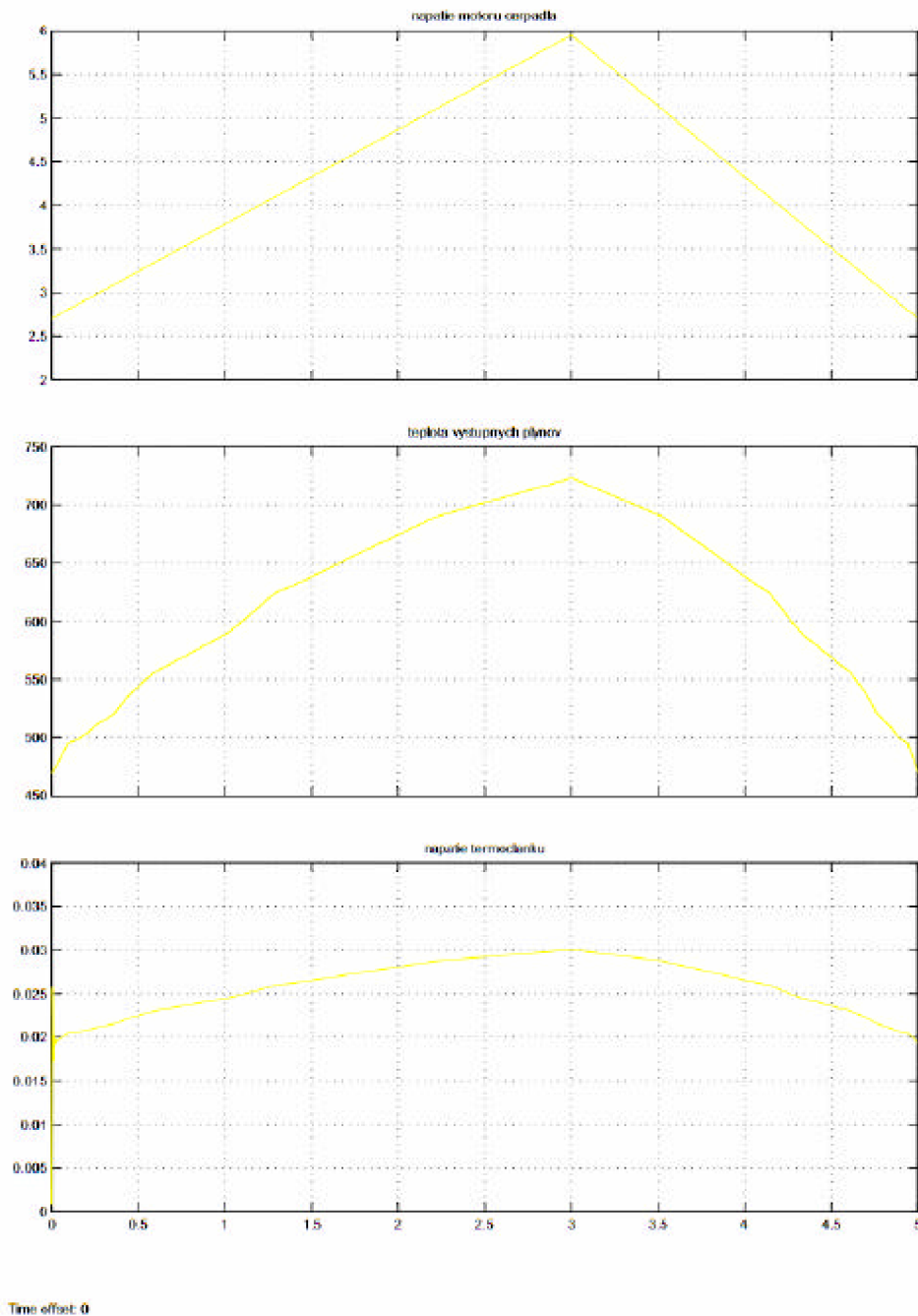
- [13] Ingenieurbüro CAT. *Modelové turbíny JetCAT* 2009 [online] Dostupné z: <<http://www.jetcat.de/jetcatturbinen/strahlurbinen.htm>>
- [14] JURÍCEK, T. *Rídicí jednotka modelářského turbínového motoru*. Praha : České Vysoké Učení Technické, Fakulta elektrotechnická, 2006. 70 s.
- [15] Wikipédia. *Turbofan engine*. 2008 [online] Dostupné z: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Turbojet\\_operation-centrifugal\\_flow.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Turbojet_operation-centrifugal_flow.png)>
- [16] National Institute of Standards and Technology. *Tables of Thermoelectric Voltages and Coefficients for Download*. 2009 [online] Dostupné z: <<http://srdata.nist.gov/its90/download/download.html>>
- [17] Wikipédia. *Turbofan engine*. 2008 [online] Dostupné z: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Turbojet\\_operation-centrifugal\\_flow.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ce/Turbojet_operation-centrifugal_flow.png)>
- [18] JetCatUSA. *JetCat Turbine Manuals* 2007 [online] Dostupné z: <<http://www.jetcatusa.com/manuals.html>>
- [19] Wikipedia. *Hardware in the loop simulation* 2009. [online] Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Hardware-in-the-loop>>



# ZOZNAM PRÍLOH

Príloha 1    Priebehy simulacnej schémy termoclánku.

## Príloha 1:



Obrázok c. 34 Priebeh napätia termoclánku a teploty výstupných plynov v závislosti na veľkosti napätia motoru čerpadla v case 5s.