

Fyzikální praktikum pro nefyzikální obory

Úloha č. 4: Automatizace měření

jarní semestr 2012

Automatizace měření pomocí výpočetní techniky patří mezi moderní fyzikální metody měření v laboratorní i průmyslové praxi. Nejčastěji měřenou fyzikální veličinou je elektrické napětí. Ostatní fyzikální veličiny, i neelektrické, se většinou na měření elektrického napětí převádí. Avšak současné počítače, dříve též označované jako číslicové či digitální, nejsou přímo na měření elektrického napětí vybaveny. Nezpracovávají totiž přímo fyzikální veličiny, ale čísla (jakkoli elektrickým napětím kódované). Existují proto speciální obvody, tzv. převodníky, které umí převádět mezi číslem (např. určitou hodnotou fyzikální veličiny v příslušných jednotkách) a skutečnou realizací (např. el. signálem o napětí 1,5 V).

1. Reprezentace čísel v počítači

Číselná hodnota je v současných počítačích ukládána a zpracovávána ve dvojkové (binární) soustavě. To znamená, že číslo je možné zapsat pouze pomocí dvou číslic, 0 a 1. Dvojkové číslici se také říká bit (binary digit). Srovnáme tyto příklady (index znamená vyjádření v příslušné soustavě):

$$\begin{aligned}235_{10} &= 2 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0 \\110_2 &= 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 6_{10}.\end{aligned}$$

Číslo 110_2 je tedy zkráceným zápisem, který vyjadřuje počet různých řádů se základem 2. Mezi čísla vyjádřených v různých číselných soustavách je možné samozřejmě převádět. Převod z dvojkové do desítkové soustavy je naznačen výše. Pro převod z desítkové do dvojkové soustavy se používá následující algoritmus:

1. Převáděné číslo zapíšeme do prvního řádku tabulky vlevo. Do stejného řádku vpravo zapíšeme dvojkou.
2. Číslo vlevo vydělíme dvěma, celou část zapíšeme o řádek níže pod něj a celočíselný zbytek po dělení (dělíme dvěma, zbytkem tedy může být nula nebo jednička) zapíšeme opět na nižší řádek vpravo.
3. Opakujeme krok 2., až dospějeme k dvojici 0, 0. Potom zbytky přečteme v obráceném pořadí.

235	2	
117	1	↑
58	1	
29	0	
14	1	
7	0	
3	1	
1	1	
0	1	
0	0	

Pro kontrolu spočteme opět vyjádření v desítné soustavě:

$$\begin{aligned}
 11101011_2 &= 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = \\
 &= 128 + 64 + 32 + 0 + 8 + 0 + 2 + 1 = \\
 &= 235_{10}.
 \end{aligned}$$

Hodnota binární číslice je v počítači reprezentována různým způsobem. Příkladem je logika TTL, při které je nula reprezentována napětím v intervalu 0 – 0,8 V a jednička napětím v rozsahu 2,5 – 5 V.

Úkoly:

1. Najděte ekvivalenty čísel v dvojkové či desítkové soustavě (255_{10} , 1101_2 , 2048_{10})
2. Jaké největší celé kladné číslo lze uložit do 1 bajtu? (bajt, B, je složen z osmi bitů). Předpokládá se, že nejmenší hodnotou je nula.

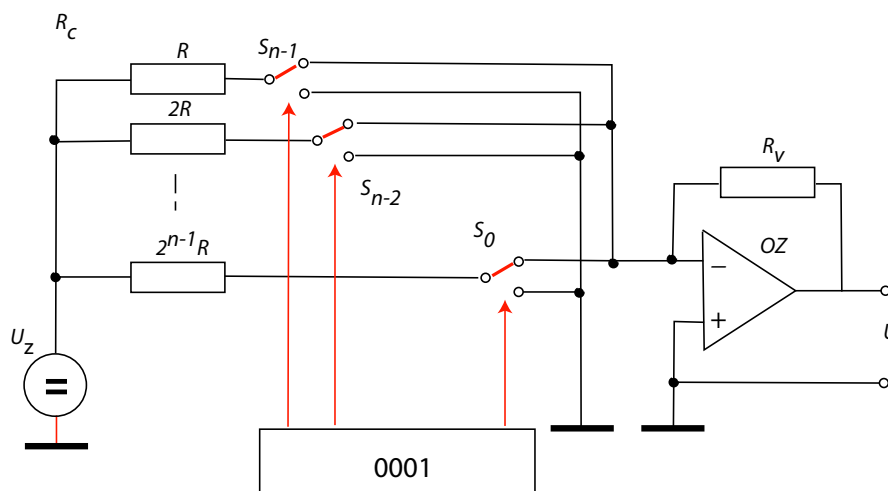
2. Digitálně-analogový převodník (D/A převodník)

Jak již bylo uvedeno výše, mezi skutečnou fyzikální veličinou (tzv. analogovou veličinou, která spojitě nabývá libovolných reálných hodnot) a jejím číselným vyjádřením je nutné převádět pomocí převodníku. Digitálně-analogový převodník (D/A) dovoluje převádět číslo na analogovou veličinu, analogově-digitální převodník (A/D) převádí veličinu na číslo. D/A převodník tedy veličinu generuje (převodník na napětí lze tedy použít jako regulovatelný zdroj), A/D převodník naopak veličinu měří. Důležitým parametrem převodníku je rozlišení převodníku, neboli počet bitů čísla, které je možné do převodníku poslat (u D/A) nebo naopak z něj přečíst (u A/D).

2.1. Princip činnosti D/A převodníku

Jednoduchý n -bitový D/A převodník je zobrazen na obrázku 2.1. Vstupem jsou hodnoty bitů, výstupem napětí U . Napětí zdroje je U_z . Pro výstupní napětí použitého operačního zesilovače OZ platí

$$U = \frac{R_v}{R_c} \cdot U_z$$



Obrázek 2.1: D/A převodník s váhovými rezistory

Hodnota odporu R_c je měněna podle dodaných bitů pomocí spínačů S_i (např. tranzistorů), které zapojují jednotlivé větve paralelně zapojených rezistorů. Např. pro 4bitový převodník ($n = 4$) a číslo 1 bude výsledné napětí

$$U = \frac{R_v}{8R} \cdot U_z.$$

Protože u paralelního zapojení rezistorů se sčítají převrácené hodnoty jejich odporů, v případě čísla 3 bude výsledné napětí

$$U = 3 \frac{R_v}{8R} \cdot U_z,$$

tedy trojnásobné ve srovnání s napětím pro číslo 1. Převodník na obr. 2.1 je tzv. převodník s váhovými rezistory. V praxi se ovšem používají převodníky různých typů.

2.2. Charakteristiky převodníku

Statické vlastnosti převodníku charakterizuje převodní charakteristika (viz obr. 2.2). Důležitým parametrem převodníku je ideální kvantizační krok D/A převodníku

$$U_q = \frac{U_r}{2^n - 1}$$

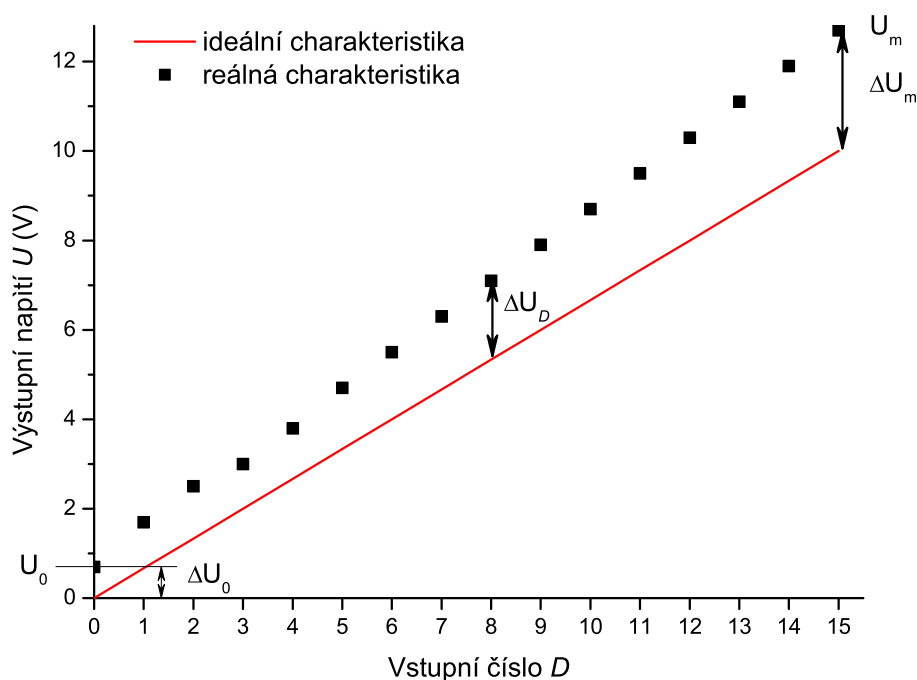
kde U_r je nominální napěťový rozsah převodníku a n počet bitů převodníku. Z dalších parametrů se zavádí např.

- chyba nuly (ofsetu)

$$\delta_0 = \frac{\Delta U_0}{U_r},$$

- chyba měřítka (zesílení)

$$\delta_m = \frac{\Delta U_m - \Delta U_0}{U_r},$$



Obrázek 2.2: Převodní charakteristika D/A převodníku

kde U_0 a U_m jsou minimální a maximální hodnoty napětí reálně nastavitelné na převodníku a ΔU_0 a ΔU_m jejich odchylky od nominálních hodnot.

V této úloze jsou k dispozici dva D/A převodníky (viz obrázek 2.3), čtyřkanálový šestnáctibitový převodník USB-9263 s typickým nominálním rozsahem $-10,7\text{ V}$ až $10,7\text{ V}$ a jednoduchý osmibitový D/A převodník MDAC-08 s nominálním rozsahem 0 V až 10 V . Převodník USB-9263 se připojuje přímo k počítači přes rozhraní USB; v úloze se používá pouze nultý kanál. Převodník MDAC-08 je připojen přes digitální výstup multifunkčního USB modulu USB-6008. Tento převodník navíc vyžaduje stabilizovaný zdroj napětí 12 V . Při zapojení je nutné dávat pozor na správnou polaritu zapojení zdroje. Na převodníku je umístěno osm barevných LED diod, které svým stavem (svítí/nesvítí) vyjadřují číslo v binárním tvaru, které je z počítače vystaveno na vodičích a které tedy převodník převádí na napětí. Generované napětí je možné měřit na předních svorkách převodníku.

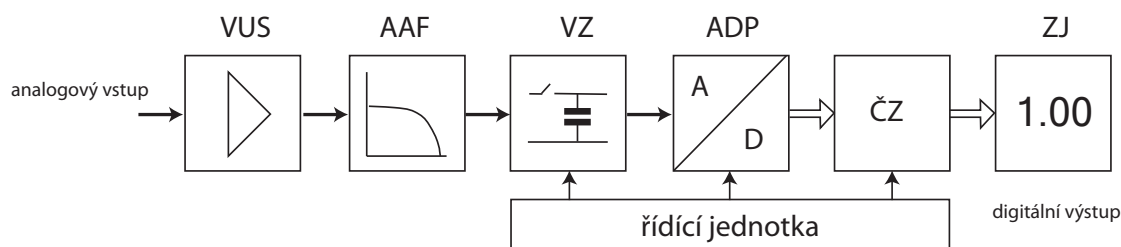
3. Digitální měřicí přístroj, A/D převodník

Digitální přístroj je elektronický systém, který provádí převod měřené analogové veličiny na digitální signál. Převod spojitého analogového signálu na digitální proud čísel vyžaduje provádění:

- vzorkování signálu v čase – odběr vzorku vstupního signálu v určitých okamžicích daných vzorkovacími impulsy,
- kvantování vzorků v hodnotě – zaokrouhlení odebraného vzorku na hodnotu nejbližší tzv. kvantovací úrovně,
- kódování – vyjádření kvantovaných hodnot určitým kódem (např. nezáporným celým číslem).



Obrázek 2.3: Dva D/A převodníky: vlevo profesionální 4-kanálový 16-bitový převodník USB-9263 firmy National Instruments, vpravo jednoduchý osmibitový D/A převodník MDAC-08

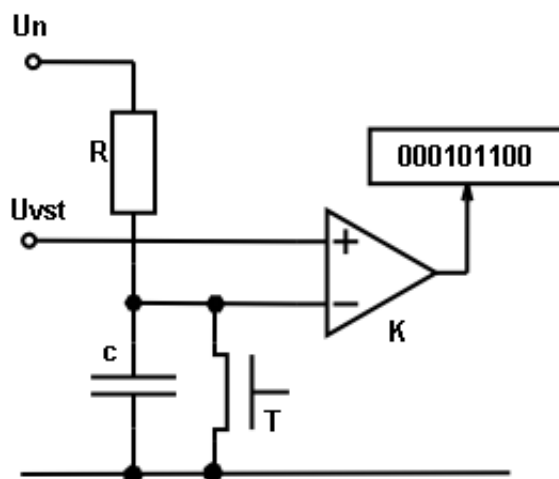


Obrázek 3.4: Obecné schéma digitálního přístroje. VUS – vstupní úprava signálu, AAF – antialiasingový filtr, VZ – vzorkovač, ADP – analogově digitální převodník, ČZ – číslicové zpracování, ZJ – zobrazovací jednotka

Blokové schéma digitálního přístroje je na obrázku 3.4. Analogový signál může být nejprve vhodně upraven (např. zesílen) v bloku vstupní úpravy signálu (VUS). Antialiasingový filtr (AAF) zajistí korektní záznam rychlých periodických dějů. Je to v principu dolnofrekvenční propust, která ze signálu odstraňuje frekvence vyšší než je polovina vzorkovací frekvence. Vzorkovač (VZ) provede odběr vzorku analogového signálu a zajistí jeho neměnnost během převodu. Samotný převod (kvantování a kódování) provede analogově/digitální převodník (A/D převodník, ADP). Výsledné číslo je zpracováno v bloku číslicového zpracování (ČZ), např. přepočteno podle kalibrace přístroje, a zobrazeno na displeji.

Protože digitální měřicí přístroje pracují s číselnou reprezentací měřené hodnoty, je poměrně snadné je doplnit o obvody, které zajistí přenesení naměřené hodnoty do počítače po některém ze standardních rozhraní (RS-232, USB, GPIB, atd.). Digitální přístroje lze proto často ovládat přímo z počítače. Případně, jsou určeny pouze pro práci s počítačem, který pomocí obslužného softwaru využívá pro zobrazování, záznam či další zpracování dat.

Mezi digitální přístroje řadíme např. univerzální digitální multimetry, digitální osciloskopy nebo měřicí karty, které se připojují přímo na sběrnici počítače nebo přes standardní rozhraní. Významnou vlastností digitálních přístrojů je vysoký vnitřní odpor, který zajišťuje velmi malý odběr elektrického proudu při vlastním měření.



Obrázek 3.5: Zjednodušené schéma integračního A/D převodníku.

3.1. A/D převodník

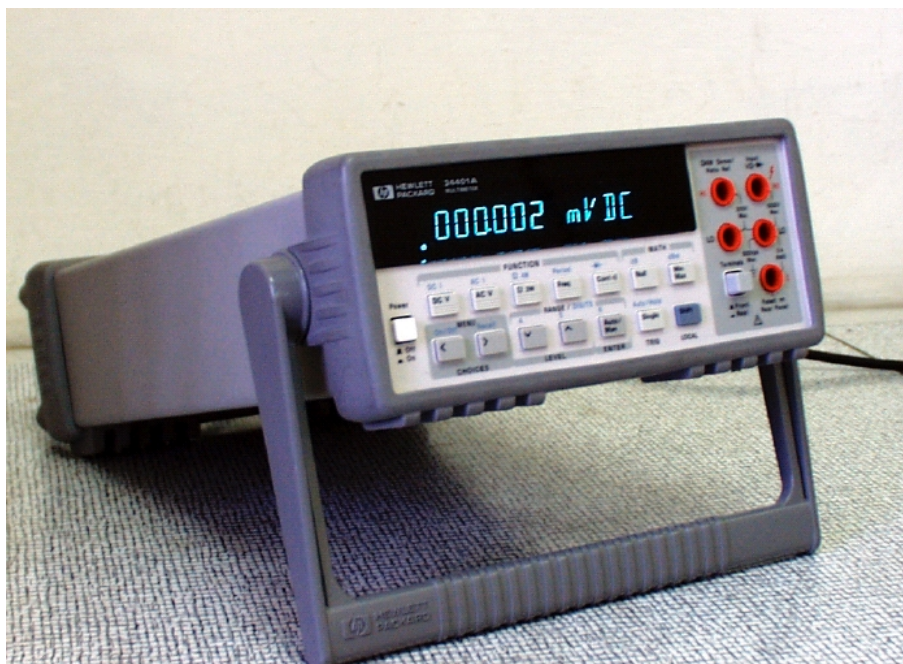
Jednoduchý integrační A/D převodník je zobrazen na silně zjednodušeném schématu na obrázku 3.5. Tranzistor T krátce zkratuje (a tedy i vybije) kondenzátor C . Kondenzátor se začne přes odpor R nabíjet z napájecího napětí U_n . Komparátor K (operační zesilovač) srovnává rostoucí napětí na kondenzátoru se převáděným napětím U_{vst} . Současně čítač (digitální stopky) měří dobu, po kterou se kondenzátor nabíjí. V okamžiku, kdy napětí na kondenzátoru dosáhne napětí U_{vst} , komparátor zastaví čítání. Čas nabíjení se potom prohlásí za výsledek převodu. Je zřejmé, že důležitým požadavkem bude linearita převodu.

V této úloze budete postupně pracovat s dvěma digitálními přístroji: s multimetrem HP34401A (viz obrázek 3.6) a měřicí kartou systému ISES (viz níže). Multimetr je k počítači připojen přes speciální rozhraní GPIB. Počítač lze potom použít nejen k jednoduchému získávání hodnot měřených veličin, ale i k poměrně detailnímu nastavení přístroje.

Úkoly:

1. Určete číselný rozsah osmibitového a šestnáctibitového D/A převodníku. Víte přitom, že do převodníku je možné zadávat pouze celá nezáporná čísla.
2. Zadávejte do převodníku MDAC08 taková čísla, aby svítily a) všechny diody, b) třetí, c) všechny liché, d) žádná. Použijte program *TestDA*.
3. Určete reálný napěťový rozsah a kvantizační krok D/A převodníku. Porovnejte šestnáctibitový modul USB-9263 a osmibitový převodník připojený přes digitální výstup modulu USB-6008. K přesnému měření výstupního napětí použijte multimetr HP 34401A, připojený k počítači přes rozhraní GPIB. Pro ruční zadávání libovolných čísel do D/A převodníků je připraven program *TestDA*. Z naměřených závislostí stanovte chybu nuly a chybu zesílení.
4. Nastavte na převodníku USB-9263 napětí 3,2 V. Potřebné číslo předem odhadněte výpočtem. Použijte program *TestDA*.

Pro zadávání čísel můžete použít program *TestDA*, který zadané číslo posílá jak do šestnáctibitového převodníku USB-9263, tak přes modul USB-6008 do osmibitového převodníku MDAC08. Výstup z právě zkoumaného převodníku je samozřejmě nutné připojit k



Obrázek 3.6: Multimetr HP 34401A.

napětovému vstupu multimetru HP 34401A. Program umožňuje i záznam měřené hodnoty multimetrem, vždy je navíc možné číst měřenou hodnotu na displeji multimetru.

4. Počítačová analýza a syntéza zvuku

Zatímco hluk či šum má neperiodický průběh, hudební tóny, např. samohlásky, jsou periodické zvuky. Ačkoliv obecně nemají harmonický časový průběh, podle Fourierovy teorie je lze považovat za tóny složené z více harmonických (jednoduchých) tónů. Matematicky zformulováno, libovolnou periodickou funkci lze zapsat jako nekonečnou Fourierovu řadu složenou z lineárních kombinací funkcí sinus a kosinus, jejichž úhlové frekvence ω_n jsou násobkem jisté základní úhlové frekvence ω :

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_n t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(\omega_n t)$$

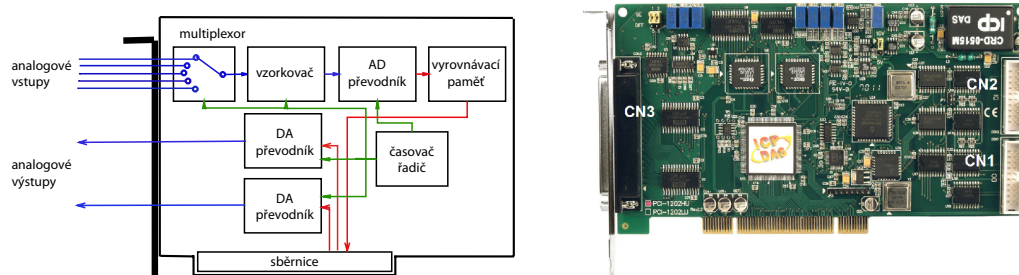
$$\omega_n = n\omega, \quad n \in \mathbf{N}$$

Základní frekvence ω (příp. f) udává objektivní výšku tónu a je určena periodou výsledné funkce $g(t)$:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad f = \frac{1}{T}.$$

Ze zkušenosti víme, že zvuky stejné výšky (frekvence) vydávané různými nástroji znějí odlišně. Právě tuto odlišnost, tzv. barvu zvuku, popisují koeficienty a_n , b_n , které určují, jak jsou jednoduché tóny o vyšších frekvencích (tzv. vyšší harmonické) ve složeném tónu zastoupeny. Známe-li tyto koeficienty, můžeme zvuk, který popisují, uměle syntetizovat sečtením několika prvních členů Fourierovy řady a přehráním výsledku.

V praktiku jsou připraveny programy *Analýza* a *Syntéza*. Program *Analýza* provádí Fourierovu analýzu zvukového signálu z mikrofonu připojeného ke zvukové kartě. Vykres-



Obrázek 5.7: Jednoduché schéma měřicí karty a skutečná realizace (karta ICP DAS PCI-1202LU)

luje frekvenční spektrum signálu a poskytuje možnost odečíst hodnoty koeficientů řady. Program *Syntéza* slouží k vyrábění zvukového signálu podle zadaných koeficientů.

Úkoly:

1. Studujte frekvenční spektra různých zdrojů zvuku (ladičky, lidského hlasu, ...). Z grafu odečtěte na ose y hodnoty několika prvních frekvencí (koeficienty Fourierovy řady).
2. S pomocí stanovených koeficientů syntetizujte tento zvuk. Porovnejte s originálem.
3. Ověřte, že platí Ohmův akustický zákon, který říká, že lidské ucho vnímá jednotlivé harmonické tóny a nikoliv jejich výsledný součet. Sluchem tedy nerozlišíme dva složené tóny (dvě řady), u nichž jsou jednotlivé harmonické tóny (členy řady) navzájem fázově posunuty a které se tedy liší pouze vzhledem k výslednému časovému průběhu, zatímco relativní zastoupení jednotlivých jednoduchých tónů zůstává stejné.

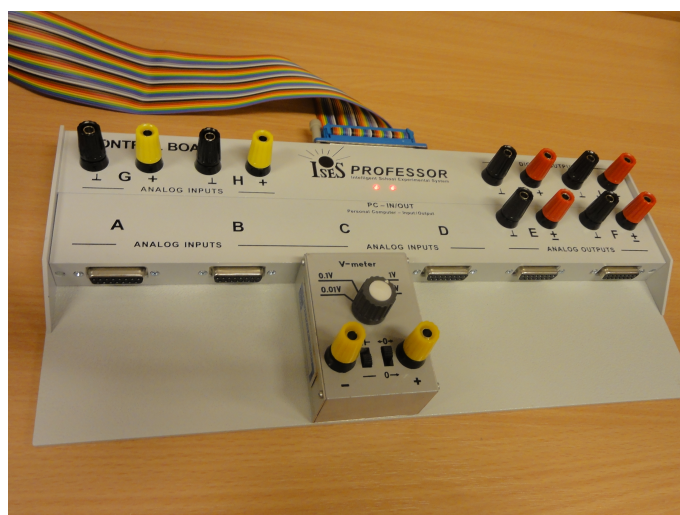
5. Měřicí systém ISES

Mezi digitální měřicí přístroje patří i rozšiřující karty do sběrnice počítače. Na využití měřicí karty je založen i školní měřicí systém ISES.

5.1. Charakteristika měřicího systému ISES

Školní měřicí systém ISES je tvořen měřicí kartou, ovládacím programem, konektorovým panelem a malými moduly pro měření fyzikálních veličin, které se připojují ke konektorovému panelu. Měřicích karet používaných systémem je více druhů, pro operační systém Windows XP a vyšší je používána PCI karta ICP DAS PCI-1202LU (viz obrázek 5.7) s následujícími parametry:

- 32/16 analogových vstupů do s rozsahem do 5 V (10 V),
- 2 analogové výstupy,
- 16 digitálních vstupů/výstupů,
- dvanáctibitové A/D a D/A převodníky,
- maximální vzorkovací frekvence je 110 kHz.



Obrázek 5.8: Konektorový panel ISES Professor.

Konektorový panel systému ISES (viz obrázek 5.8) má z boční strany vyvedeny 4 napěťové analogové vstupy A, B, C, D, ke kterým se připojují moduly pro měření různých fyz. veličin, převádějící tyto veličiny na napětí. Např. na obrázku 5.8 je na vstup C připojen modul voltmetr. Moduly systém dokáže rozpoznat, a je tedy schopen měřené napětí správně interpretovat a zobrazovat hodnoty přímo v jednotkách měřené veličiny. (Např. při měření teploty se zobrazuje teplota ve °C a nikoliv ve voltech.) Další analogové vstupy G, H jsou sice vyvedeny, v programu ISESWin32 však nejsou zpřístupněny. Panel navíc obsahuje dva analogové výstupy (E, F) a digitální výstupy (I, J).

Modulů dodávaných se soupravou je celá řada, mezi nejběžnější patří modul voltmetr, ampérmetr, ohmmetr, relé, siloměr, teploměr, tlakoměr, ukazatel polohy, optická závora, mikrofon, ukazatel tepu srdce, modul EKG atd.

Podstatnou částí systému je program ISESWin32. Při nastavení experimentu (viz obrázek 5.9) je zapotřebí nastavit zejména dobu měření, vzorkovací frekvenci a kanály s moduly, na nichž má měření probíhat. Dále je možné konfigurovat analogové výstupy, způsob zobrazení dat apod.

5.2. Pokusy s ISESem

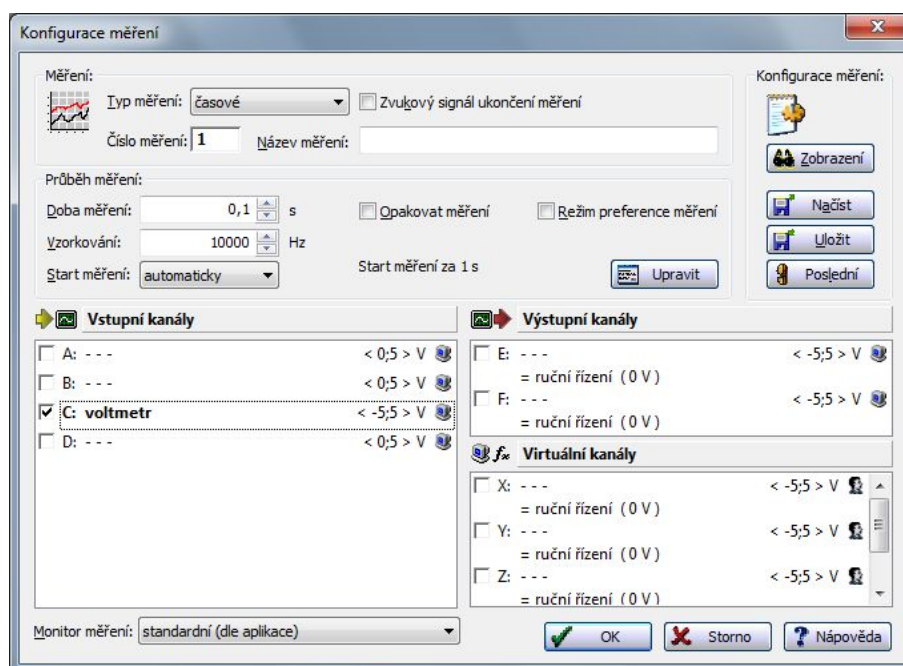
5.2..1 Matematické kyvadlo

Pro periodu matematického kyvadla platí

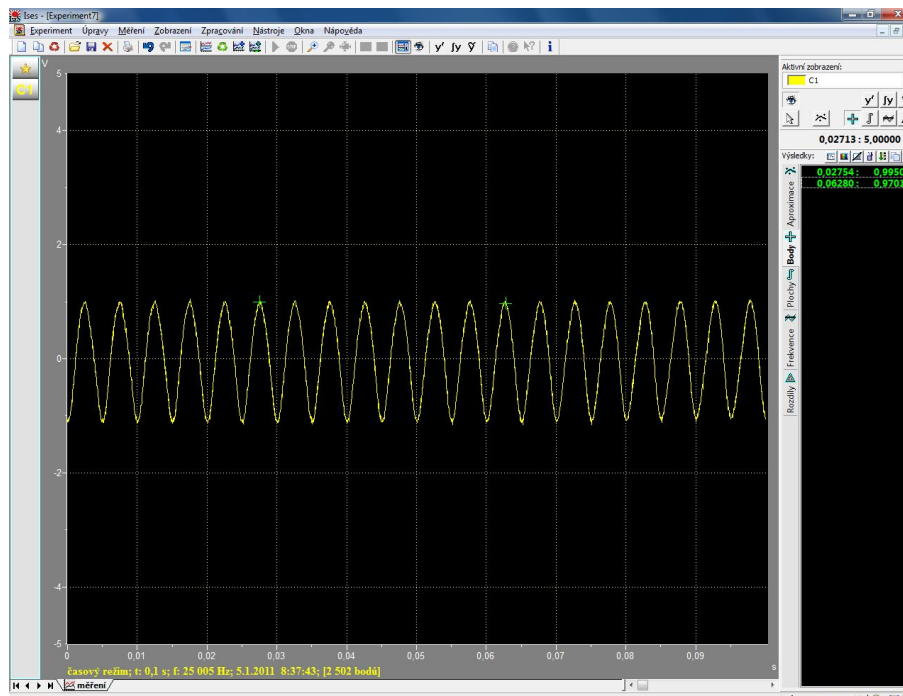
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

kde l je délka závěsu a g je tíhové zrychlení. Stanovíme-li tedy periodu kmitání kyvadla a jeho délku, můžeme určit tíhové zrychlení g . Periodu určíme tak, že v programu pro ISES zaznameneáme několik průchodů kyvadla přes optickou závoru a v grafu pomocí kurzoru odečteme čas odpovídající několika periodám.

Úkoly:



Obrázek 5.9: Nastavení měření v programu ISESWin32. Všimněte si zejména automatické detekce modulů a nastavení vzorkovací frekvence.



Obrázek 5.10: Okno programu ISESWin32 se záznamem měření. V pravém bočním panelu je zobrazeno okno, které umožňuje provést odečet hodnot z grafu. V prvním sloupci se vypisuje horizontální souřadnice (v tomto případě čas), v druhém vertikální souřadnice kurzoru.

1. Zaznamenejte pomocí optické závory kmitání kyvadla. Zakrývání závory kyvadlem se projevuje pravoúhlými pulzy. Jaká vzdálenost v grafu na ose x odpovídá periodě kmitání?
2. Naměřte několikrát vzdálenost 5 – 10 period. Určete periodu kmitání.
3. Pravítkem změřte vícekrát délku závěsu. Zpracujte statisticky toto měření.
4. Určete tíhové zrychlení, odhadněte jeho chybu.

5.2..2 Těleso na pružině

Zanedbáme-li odpor prostředí a předpokládáme-li lineární závislost velikosti síly pružiny na jejím protažení $F = k \cdot y$, závaží o hmotnosti m zavěšené na pružině o tuhosti k a uvolněné z maximální výchylky v čase $t = 0$ kmitá podle vztahu

$$y(t) = A \cos(\omega t),$$

kde ω je úhlová (kruhová) frekvence

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

K ověření výše uvedených vztahů použijeme moduly siloměr, akcelerometr, příp. detektor polohy. Modul siloměr dokáže měřit (podle nastavení přepínače na něm) přímo sílu v newtonech nebo hmotnost v gramech. (Vysvětlete, jak je to možné.)

Úkoly:

1. Pomocí modulu siloměr zaznamenejte kmitání oscilátoru. Určete jeho periodu.
2. Stanovte pomocí siloměru hmotnost tělesa a tuhost pružiny.
3. Ověřte platnost vztahu pro úhlovou frekvenci.

5.2..3 Zvuk ladičky

Ke zvukovému záznamu použijeme modul mikrofón. U tohoto měření je důležité vhodně nastavit vzorkovací frekvenci. Platí totiž Shannonův vzorkovací teorém, který říká, že ke ztrátě informace (tj. vlastně ke zkreslení) nedochází, je-li vzorkovací frekvence aspoň dvojnásobkem nejvyšší frekvence obsažené ve spektru zvuku.

Úkoly:

1. Zaznamenejte zvuk ladičky. Jaký má zvukový signál průběh?
2. Určete periodu zvuku ladičky. Odpovídá perioda předpokládáné frekvenci komorního a' ?
3. Jakou vzorkovací frekvenci byste použili pro záznam koncertu? A pro záznam lidské řeči? Frekvence sykavek je 8 – 10 kHz.
4. Otestujte vliv vzorkovací frekvence na kvalitu záznamu harmonického signálu ladičky. Vzorkovací frekvenci v systému ISES měňte mezi 10 kHz, 440 Hz, 400 Hz, 44 Hz.

5.2..4 Dvě ladičky, rázy

Složení dvou netlumených vln o velmi blízkých frekvencích f_1 , f_2 a stejné amplitudě dostaneme

$$\begin{aligned} y(x, t) &= y_1(x, t) + y_2(x, t) = A \cdot \sin[2\pi f_1 t + \phi_1(x)] + A \cdot \sin[2\pi f_2 t + \phi_2(x)] = \\ &= 2A \cdot \cos\left[2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t + \frac{\phi_1(x) - \phi_2(x)}{2}\right] \cdot \sin\left[2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t + \frac{\phi_1(x) + \phi_2(x)}{2}\right] = \\ &= 2A \cdot \cos\left[2\pi \frac{\Delta f}{2} t + \frac{\Delta\phi(x)}{2}\right] \cdot \sin[2\pi \bar{f} t + \bar{\phi}(x)]. \end{aligned}$$

Jsou-li frekvence f_1 , f_2 velmi blízké, je \bar{f} prakticky rovno f_1 nebo f_2 a Δf je velmi malé. Potom část

$$A(t) = 2A \cdot \cos\left[2\pi \frac{\Delta f}{2} t + \frac{\Delta\phi(x)}{2}\right]$$

má ve srovnání se zbylou částí význam pomalu se měnící amplitudy (obálky), amplitudově modulující vlnu o prakticky původní frekvenci:

$$y(x, t) = A(t) \cdot \sin[2\pi \bar{f} t + \bar{\phi}(x)].$$

Frekvence rázů je dvojnásobná vůči frekvenci obálky, neboť do jedné periody obálky se vtěsnaří dva rázy:

$$f_{\text{rázů}} = 2 \cdot \Delta f / 2 = \Delta f.$$

Úkoly:

1. Pozměňte frekvenci ladičky. Na jaké frekvenci nyní kmitá?
2. Rozezvučte zároveň dvě ladičky, jednu s pozměněnou frekvencí. Kterou ladičku je lepší rozezvučet jako první?
3. Jaká je frekvence rázů? Odpovídá rozdílu frekvencí?

5.2..5 Další experimenty

Vyzkoušejte si činnost dalších modulů, např. snímač srdečního tepu, EKG apod.