



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost



OKRESNÍ HOSPODÁŘSKÁ
KOMORA OLMOUC

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzikální chemie



APLIKACE POČÍTAČŮ V MĚŘÍCÍCH SYSTÉMECH PRO CHEMIKY
S VYUŽITÍM LabVIEW

JAN HRBÁČ

Olomouc, 2013

Předmluva

Moderní výpočetní technika v nedávné minulosti zcela změnila způsob laboratorní i provozní praxe v chemii. Práce chemika, ať již v provozní laboratoři, výzkumné laboratoři nebo přímo ve výrobní praxi je neoddělitelně spojena s ovládáním měřicích přístrojů sloužících k získávání informací o studovaných látkách nebo chemických procesech. Komerční přístroje pro rutinní chemické analýzy jsou ovládány pomocí počítačů a na zvládnutí jejich obsluhy zpravidla postačuje základní uživatelská znalost práce s PC. Experimentální vědecký výzkum však klade vyšší nároky na hloubku znalostí v této oblasti, zejména pokud jde o komunikaci mezi počítačem a přístrojem, získávání dat a jejich analýzu. Výsledky měření jsou zpracovávány, vyhodnocovány a archivovány zejména v digitální podobě, prostřednictvím výpočetní techniky. Chemické procesy jsou velmi často na základě výsledků měření kontinuálně řízeny. Realizaci uvedených činností se zabývá celá řada společností a uvedený interdisciplinární obor představuje celou řadu zajímavých pracovních příležitostí.

Předkládaný učební text se zabývá elementárními základy měření fyzikálních a chemických veličin; základy elektroniky, jejichž zvládnutí představuje odrazový můstek k hlubšímu pochopení problematiky měření a sběru dat v chemii; představuje hardware potřebný pro realizaci měřicích systémů v chemii a v neposlední řadě uvádí základy práce v programovacím prostředí LabVIEW, které je pro realizaci měřicích systémů velmi často používáno. Protože cílem předmětu Aplikace počítačů v měřicích systémech je nejen vybavit studenty teoretickými znalostmi, potřebnými k účelnému použití počítačů při chemických experimentech a analýze získaných dat, ale i praktickými dovednostmi v tomto směru, jsou součástí skriptu i řešené příklady z oblasti měření v chemii, z nichž část je prakticky realizována studenty během výuky. Skriptum je určeno zejména studentům druhého ročníku bakalářského oboru Aplikovaná chemie.

Obsah

1	Senzory, převod neelektrických veličin na elektrické, měřící řetězec.....	7
2	Měření fyzikálních a fyzikálně chemických veličin.....	12
2.1	Měření teploty	12
2.2	Měření síly a tlaku	13
2.3	Měření polohy	15
2.4	Měření světla	18
2.5	Měření koncentrace iontů – potenciometrie	20
2.5.1	Měření redox potenciálu – ORP	23
2.5.2	Měření pH.....	23
2.6	Vodivost	25
2.7	Měření koncentrace rozpuštěného kyslíku	27
2.8	Měření obsahu toxických plynů v atmosféře.....	29
3	Operační zesilovače a jejich využití v chemické instrumentaci	31
3.1	Operační zesilovač – základní popis	31
3.2	Základní zapojení OZ	32
3.2.1	Sledovač napětí.....	33
3.2.2	Převodník proud/napětí.....	33
3.2.3	Invertující zapojení	33
3.2.4	Neinvertující zapojení.....	34
3.2.5	Komparátor.....	34
3.2.6	Integrátor a derivátor	34
3.3	Reálný operační zesilovač	35
3.4	Využití OZ v elektrochemii – potenciostat.....	37
4	Číslicová technika	40
4.1	Logické stavy, číselné systémy, binární kódy	41
4.2	Typy logických obvodů	43
4.2.1	Kombinační logické obvody.....	43
4.2.2	Sekvenční logické obvody	46
4.2.3	Realizace logických obvodů.....	49
5	Převod AD a DA	51
5.1	Vzorkování – vzorkovací teorém	51
5.2	Převodník D/A.....	51
5.3	Principy činnosti A/D převodníků.....	52
5.4	obvody Sample and Hold (S/H).....	54
5.5	Multiplexer	54

5.6	Parametry AD a DA převodů	55
6	Číslicové počítače a jejich využití pro získávání dat.....	56
6.1	Hardware počítače – sběrnice, porty	56
6.2	Přehled sběrnic PC se sloty využitelnými pro multifunkční karty	57
6.3	Rozhraní počítačů.....	59
6.3.1	Sériový port (rozhraní RS232C).....	59
6.3.2	Paralelní port (Centronics, IEEE 1284).....	61
6.3.3	IEEE 488 – GPIB rozhraní pro připojování měřicích zařízení.....	62
6.3.4	USB – charakteristiky, principy komunikace.....	63
6.4	Multifunkční karty pro sběr dat, výrobci a parametry.....	64
6.4.1	Analogové vstupy	64
6.4.2	Analogové výstupy	65
6.4.3	Digitální linky.....	65
6.4.4	Čítače/časovače	65
6.4.5	Multifunkční karty National Instruments, řada E.....	67
6.4.6	Multifunkční karty karty National Instruments, řada M.....	68
6.4.7	Konektorové bloky, SCXI	69
6.5	Měřicí řetězce – VME, PXI, VXI apod.	71
6.6	Základní programovací techniky vstupu a výstupu dat	72
6.6.1	softwarové řízení vstupu a výstupu dat	72
6.6.2	řízení pomocí přerušení	73
6.6.3	DMA – přímý přístup do paměti	73
7	Lab View – úvod do programovacího prostředí pro tvorbu „virtuálních přístrojů“	74
7.1	Paleta nástrojů (Tools Palette).....	75
7.2	Ovládání chodu VI	75
7.3	Tvorba čelního panelu	76
7.4	Block diagram	77
7.5	První VI a jeho modifikace.....	79
7.6	Datové typy a struktury – přehled	80
7.6.1	Prvky typu Numeric	80
7.6.2	Typ Boolean	80
7.6.3	Typ Řetězec (String).....	81
7.6.4	Datová struktura Cluster.....	81
7.6.5	Datová struktura Array (pole).....	81
7.6.6	Datová struktura Waveform	81
7.6.7	Datová struktura Enumeration.....	81
7.7	Základní programové struktury	82

7.7.1	Sekvence.....	82
7.7.2	Case struktura	83
7.7.3	Cykly FOR a WHILE	83
7.7.4	Práce s grafy (Graphs, Charts).....	83
7.7.5	VI pro práci s časem	84
7.7.6	Tvorba výstupních protokolů – Report Generation	84
7.7.7	Práce se soubory	84
7.8	Tvorba podprogramu (Sub-VI).....	85
7.9	LabView – provádění programu – polymorfizmus, Data flow, multitasking, threading 86	
7.10	NI-DAQ.....	88
7.10.1	Sběr dat pomocí NI-DAQ.....	88
7.10.2	Tradiční DAQ	88
7.10.3	NI-DAQmx.....	91
7.11	NI-VISA	92
7.12	LabVIEW – design aplikací, kompilace, tvorba instalátoru.....	93
8	Praktické ukázky využití LabVIEW pro měření v chemii.....	95
8.1	Generování napětí trojúhelníkového průběhu pro cyklickou voltametrii (CV).....	95
8.2	Generování pulsního průběhu napětí pro diferenční pulsní voltametrii	97
8.3	Programování jednoduchých experimentů v LabVIEW.....	99
8.3.1	Propojení kyslíkové elektrody Orion Research 97-08 s PC	99
8.3.2	Potenciometrie se skleněnou elektrodou (měření pH).....	101
8.3.3	Konduktometrie	102
8.4	Ovládání experimentu, využití NI-VISA.....	106
8.4.1	Tvarování (změna šířky) digitálních impulsů.....	106
8.4.2	Komunikace multimetru Metex s PC	106
8.4.3	Ovládání rtuťové „tužkové“ elektrody	108
8.4.4	Řízení krokového motoru – ovládání monochromátoru	109
8.5	Převod AD a DA – elektrochemické experimenty pomocí LabVIEW.....	113
8.5.1	Konstrukce jednoduchého počítačem řízeného potenciostatu a programování základních elektrochemických technik.....	113
8.5.2	Diferenční pulsní voltametrie	118
8.5.3	Chronoamperometrie v míchaném roztoku	121
8.5.4	Zapojení fotonásobiče jako čítače fotonů	123
9	Použitá a doporučená literatura	126

1 Senzory, převod neelektrických veličin na elektrické, měřící řetězec

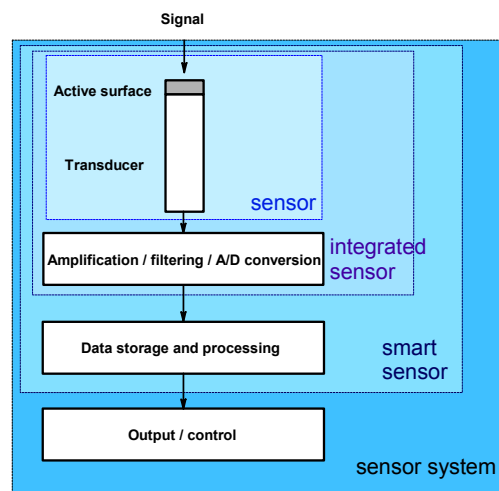
Senzor je zařízení, které snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a transformuje ji na veličinu výstupní, nejčastěji elektrickou (napětí, proud, odpor apod.). Stav sledované veličiny snímá citlivá část senzoru zpravidla označovaná jako čidlo a zpracovává ho vyhodnocovací obvod senzoru (převodník). Na senzory jsou kladeny následující požadavky:

- jednoznačná závislost výstupní veličiny na veličině vstupní,
- vhodný tvar základní přenosové charakteristiky,
- vhodná citlivost senzoru,
- přesnost senzoru,
- časová stabilita senzoru,
- frekvenční charakteristika (časová konstanta),
- závislost na parazitních vlivech (teplota, vlhkost, tlak, prašnost apod.),
- minimální zatěžování měřeného objektu,
- spolehlivost senzoru.

Nejčastěji používané senzory slouží k měření:

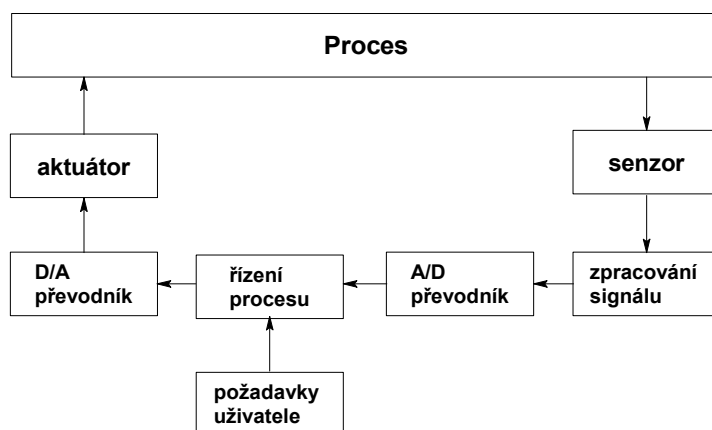
- geometrických veličin (měření polohy, posunutí atd.),
- mechanických veličin (měření rychlosti, akcelerace, síly, tlaku, průtoku, mechanického napětí atd.),
- teplotních veličin (teplota, tepelný tok atd.),
- elektrických a magnetických veličin,
- intenzity vyzařování (elektromagnetické, radiační veličiny ve viditelném, infračerveném a jiném spektru, zvukové atd.),
- chemických veličin (koncentrace iontů nebo plynů, pH, iontově selektivní analýza atd.),
- biologických veličin (koncentrace enzymů, DNA analýza apod.).

Možné stupně integrace senzoru s elektronikou jsou znázorněny na Obr. 1:



Obr. 1: Senzor a stupně jeho integrace s elektronikou

Je-li na základě vyhodnocení signálu ze senzoru měřený proces zpětně ovlivňován, děje se tak prostřednictvím *aktuátoru*. Praktická realizace měření od snímání procesu po jeho řízení je obecně nazývána *měřicím řetězcem*. Blokové schéma měřicího řetězce se senzorem a aktuátorem je znázorněno na Obr. 2.



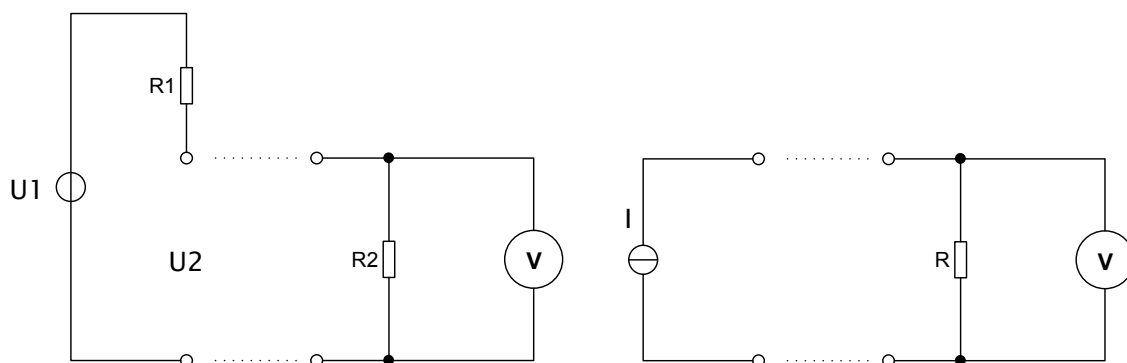
Obr. 2: Měřicí řetězec

Podle měřené veličiny máme na výběr z nepřeberného množství nejrůznějších senzorů, které mohou poskytovat výstupní signály různých typů a parametrů. Některé jsou uvedeny v následující tabulce:

Snímač	měřená veličina	výstupní veličina
ISE	aktivita iontu v roztoku	napětí
termoelektrický článek	teplota	napětí
tachodynamo	rychlost otáčení	napětí
fotonásobič	intenzita světla	proud
fotonka	intenzita světla	proud
voltametrická elektroda	koncentrace depolarizátoru	proud
Termistor, odporový teploměr	teplota	odpor
bolometr	teplota	odpor
tenzometrické tělísko	síla	odpor
optočlen	rychlost otáčení, počet	frekvence
kmitající krystal (EQCM)	hmotnost	frekvence

Senzor s napěťovým výstupem se chová jako zdroj elektromotorického napětí. Reálný senzor je charakterizován tzv. vnitřním odporem (R_1 na Obr. 2A), který má charakter odporu zapojeného v sérii s odezvou senzoru (U_1). Naproti tomu vnitřní odpor měřidla R_2 (voltmetru) má charakter odporu zapojeného paralelně ke svorkám měřidla. Při připojení senzoru k měřicímu systému proto vznikne dělič napětí (Obr. 2A), měřené napětí U_2 je nižší než odezva senzoru U_1 (zdroj je zatížen vnitřním odporem měřidla). Vnitřní odpor měřidla proto musí být o hodně vyšší, než je vnitřní odpor senzoru, nemá-li dojít ke zkreslení měřené odezvy po zapojení měřidla (tj. má-li se odezva senzoru U_1 rovnat měřenému napětí U_2). Vnitřní odpor měřidla (např. napěťového vstupu A/D karty, pH metru apod.) je proto důležitým údajem, který lze nalézt v dokumentaci

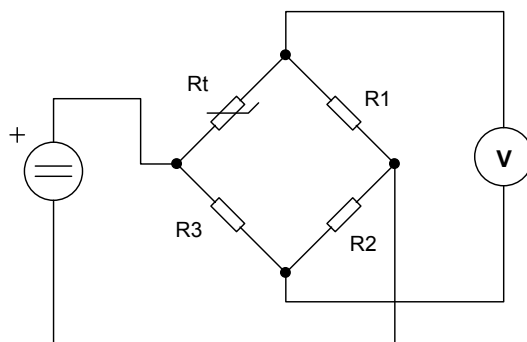
měřicího zařízení. V případě, že vnitřní odpor měřidla není dostatečně vysoký, je třeba provést tzv. impedanční přizpůsobení, což se nejčastěji provede zařazením operačního zesilovače v zapojení sledovače napětí (viz Obr. 27 na str. 33).



Obr. 3: Měření odezvy senzoru s napěťovým (A) a proudovým (B) výstupem

Senzor s proudovým výstupem se chová jako zdroj proudu. Proudový zdroj udržuje konstantní proud tekoucí jeho výstupními svorkami a zátěží. Velikost tohoto proudu se nemění při změně odporu zátěže a proud protéká i při zkratu výstupních svorek senzoru (tzv. „režim nakrátko“). Dle Ohmova zákona je při připojení zdroje proudu na zatěžovací odpor (R na Obr. 3B) na tomto odporu napětí o hodnotě $U = I \cdot R$. U zátěže s nekonečně vysokým odporem, což znamená rozpojené výstupní svorky zdroje, má tedy výstupní napětí dosahovat nekonečně velké hodnoty. Tento stav se nazývá režim naprázdno, u reálného proudového zdroje pochopitelně nekonečného napětí dosáhnout nelze, v režimu naprázdno se na výstupu objeví maximální možné dosažitelné napětí, jehož velikost závisí na typu a uspořádání zdroje. Při praktickém provedení měřicího řetězce se senzorem s proudovým výstupem se buďto měří napětí na zatěžovacím odporu, nebo se zařadí operační zesilovač v zapojení jako proudově-napěťový převodník (viz Obr. 27B na str. 33).

Termistory, odporové teploměry, tenzometrická čidla, případně fotoodpory jsou typickými představiteli senzorů, u nichž je výstupní veličinou odpor, měnící se v závislosti na měřené veličině. *Odporové snímače* bývají zapojeny do obvodů s pomocným napětím, na což je nutné pamatovat při návrhu konkrétního zapojení, protože procházející proud senzor zahřívá, což může vést ke zkresleným výsledkům. Na druhou stranu, odporovými senzory jsou též některé analyzátory plynů nebo analyzátory rychlosti proudění kapalin, pracující na principu ochlazování teplotně závislého odporu okolním médiem (tj. plynem nebo kapalinou), přičemž odpor je zahříván procházejícím elektrickým proudem. Odporové senzory se nejčastěji zapojují jako součást vyváženého nebo nevyváženého Wheatstoneova můstku (Obr. 4). U delších vzdáleností mezi senzorem a měřidlem je třeba uvažovat vliv odporu spojovacího vedení, které může nepříznivě ovlivnit parametry snímače i přesnost měření. Závislost napětí měřidla na měřené veličině se stanoví kalibrací ve zvoleném rozsahu hodnot.

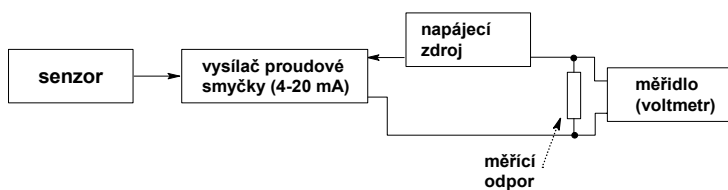


Obr. 4: Můstek pro měření pomocí čidel s odporovým výstupem. V případě, že $R1/R_t = R2/R3$ je můstek vyrovnan a měřidlo ukazuje nulové napětí

Senzory, jejichž výstupem je periodický signál, jehož frekvence se mění v závislosti na měřené veličině, využívají pro vyhodnocení měřeného signálu buďto převodník frekvence/napětí, nebo je periodický signál vyhodnocován digitálně pomocí čítače. Čítačovým vstupem jsou osazeny některé multifunkční karty (viz str. 65).

Připojení senzoru k měřicímu zařízení, proudová smyčka

Výstupní signál senzorů s analogovým (tj. napěťovým, proudovým nebo odporovým výstupem) bývá zpravidla převáděn na napětí, které může být přímo digitalizováno např. pomocí A/D karty. Tento způsob zpravidla vyhovuje pro jednoduché aplikace charakterizované malou vzdáleností (několik decimetrů až metrů) mezi senzorem a místem vyhodnocení, tj. v laboratorních podmínkách. V průmyslových a podobných provozech jsou však běžnější situace, kdy u systémů monitorující např. tlak, teplotu, pH a další fyzikálně chemické veličiny dosahují vzdálenosti mezi senzorem a vyhodnocovacím místem desítek až stovek metrů. Při těchto tzv. *procesních měřeních* se pro přenos signálu mezi senzorem a A/D převodníkem zpravidla zařazuje tzv. *proudová smyčka* (Obr. 5).



Obr. 5: Proudová smyčka 4-20 mA, schéma a ukázka vysílače

Nejčastěji je implementována dvou vodičová proudová smyčka 4 až 20 mA, která je *de facto* standardem při vysílání sensorových informací pro monitorování průmyslových procesů. Jde o jednoduchou dvoudrátovou techniku, používající pro přenos výstupního signálu senzoru jeden kabel se stočeným párem vodičů. Činnost smyčky je velmi jednoduchá: výstupní signál senzoru je nejprve převeden na proud, kdy 4 mA obvykle představují nulovou nebo nejnižší měřenou úroveň výstupu senzoru a 20 mA představuje nejvyšší možnou nebo potřebnou úroveň na výstupu senzoru. Jako příklad je možné uvést měření teploty, kdy hodnota 20 mA např. znamená, že je teplota monitorovaného procesu na maximální povolené úrovni a hodnota 4 mA znamená, že teplota je na úrovni minimální. Hodnoty proudů mezi maximem a minimem

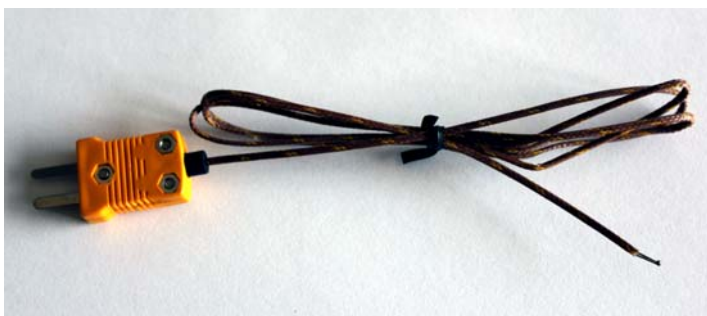
znamenají, že se měřená teplota pohybuje mezi danými mezními teplotami. V uvedeném rozsahu proudů pracuje smyčka správně. Hodnota proudu 0 mA indikuje přerušení obvodu nebo výpadek napájení smyčky, případná porucha obvodu proudové smyčky je tedy snadno odhalitelná. Výhodou techniky proudové smyčky 4 až 20 mA jsou skutečnosti, že přesnost měření není ovlivněna úbytkem napětí ve vedení mezi senzorem a vyhodnocovacím, a že smyčka má značnou imunitu vůči elektromagnetickému rušení často se vyskytujícím v průmyslovém prostředí. I v případě velkého elektrického odporu ve vedení udrží vysílač proudové smyčky správný proud až do maximální napěťové hladiny. Proudovou smyčku lze používat i pro přenos digitálních signálů, hodnota 4 mA zpravidla reprezentuje logickou nulu a 20 mA logickou jedničku. Nicméně, velmi často je potřeba přenášet jak analogový, tak i digitální signál. Technologie HART (Highway Addressable Remote Transducer) umožňuje digitální komunikaci po proudové smyčce bez ovlivnění měřeného analogového signálu, digitální signál je převeden na frekvenčně modulovaný sinusový signál nízké úrovně a přímo namodulován na proudový signál smyčky.

2 Měření fyzikálních a fyzikálně chemických veličin

2.1 Měření teploty

Měření a kontrola teploty je důležitou součástí praxe v laboratoři. Senzory pro měření teploty, využitelné pro počítačové měření a řízení, jsou termočlánky, teplotně závislé odpory (polovodičové – termistory, kovové) a polovodičové senzory na bázi PN přechodu.

Termočlánky jsou čidla založená na termoelektrickém (Peltier-Seebeckově) jevu. Skládají se ze dvou kovů zapojených do série se dvěma spoji (kov A – spoj AB – kov B – spoj BA – kov A; kov A je materiál přívodů). Měrný spoj je zpravidla proveden svařováním. Mají-li spoje navzájem různou teplotu, vzniká na každém ze spojů odlišný elektrický potenciál. Citlivost se pohybuje v řádech desítek mikrovoltů na °C. Termočlánky dělíme dle použitých kovů a maximální teploty. Nejrozšířenější jsou tyto typy termočlánků: typ J pro teplotní rozsah 0–750 °C, citlivost 52,3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, materiál železo-konstantan, typ K (–200–1250 °C, 40,8 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, chromel-alumel (Cr-Al, viz Obr. 6) a typ R (0–1450 °C, platinarhodium-platina). Výhodou termočlánků je široký rozsah měřených teplot, nízká tepelná setrvačnost (rychlá odezva), nevýhodou je poměrně značná nelinearita odezvy.



Obr. 6: Termočlánek typu K dodávaný k digitálnímu multimetru

Termistory využívají značné teplotní závislosti odporu některých materiálů. Základním parametrem těchto součástek je teplotní koeficient odporu. Termistory se dělí do tří základních skupin:

- termistory NTC (negative temperature coefficient) se zápornou hodnotou teplotního koeficientu odporu, typické hodnoty se pohybují od -2 do $-10 \text{ } \%/^\circ\text{C}$. Vyrábějí se z oxidů Mn, Ni, Ti, Co, Fe, Cu apod. nebo z jejich směsí, práškové oxidy se lisují, spékají nebo taví.
- termistory PTC (positive temperature coefficient), s kladnou hodnotou koeficientu, typicky $+5$ až $+70 \text{ } \%/^\circ\text{C}$. Materiálem pro tyto součástky je nejčastěji keramika na bázi titanátu baria (BaTiO_3).
- termistory CTR (critical temperature coefficient), u kterých při určité teplotě dochází ke skokovému snížení odporu, v okolí této hodnoty může teplotní koeficient odporu dosahovat hodnot až $-70 \text{ } \%/^\circ\text{C}$. Materiálem pro jejich výrobu bývá oxid vanadu nebo titanu dopovaný nejrůznějšími příměsmi. Čistý VO_2 vykazuje při teplotě 68 °C skokové snížení specifického odporu z 0,1 na $10^{-5} \Omega\cdot\text{m}$. Příměsmi Ge, Sn a Fe je možno nastavit při výrobě kritickou teplotu v rozmezí -20 až 90 °C.

Moderním prostředkem pro měření teploty jsou *odporová čidla na bázi kovů*, zejména platiny. Tato čidla postupně vytlačují termočlánky v aplikacích, při kterých měřená teplota nepřesahuje cca 600 °C. Při zahřívání kovů roste jejich elektrický odpor, teplotní koeficient je však nižší než u termistorů (např. pro platinové čidlo je 0,4 %/°C). Odporová čidla se vyrábějí napařením tenké kovové vrstvy na keramický substrát. Rozsah měřených teplot je poměrně velký, odporové senzory též vykazují teplotní závislost velmi blízkou lineárnímu průběhu. Nejběžnějšími odporovými senzory jsou platinová čidla Pt100 a Pt1000, kde číslice udává odpor v ohmech při 0 °C.

2.2 Měření síly a tlaku

Pro *měření statické mechanické síly* se nejčastěji využívají magnetické snímače pracující buďto na magnetostrikčním principu, nebo snímače magnetoizotropní. U magnetostrikčních snímačů je využíván obrácený magnetostrikční jev – deformací ferromagnetické látky se mění její permeabilita. Pokud je ferromagnetická látka součástí (jádro) elektromagnetu, mění se při její deformaci indukčnost, která je vyhodnocována můstkovými metodami. U magnetoizotropních senzorů se používá dvou vinutí, které jsou natočeny tak, že nenastává indukce. Působí-li na senzor síla, magnetický tok budícího vinutí zasáhne sekundární vinutí, v němž se indukuje napětí úměrné působící síle. Pro *měření proměnné síly* lze použít piezoelektrických snímačů. Piezoelektrické snímače jsou tvořeny výbrusem krystalu vykazujícího piezoelektrický jev opatřeným vodivými kontakty. Při deformaci výbrusu přechodně vzniká na kontaktech napětí. Materiály vykazující uvedený jev jsou např. známý vínan sodno-draselný, tj. Seignettova sůl, v současnosti se však používá prakticky výhradně tzv. PZT keramika, což je směsný titaničitan a zirkoničitan olovnatý s perovskitovou strukturou, vlastnosti lze ovlivňovat stechiometrickým poměrem ($Zr_{0,52}Ti_{0,48}O_3$), eventuálně příměsí lanthanu (PLZT keramika).

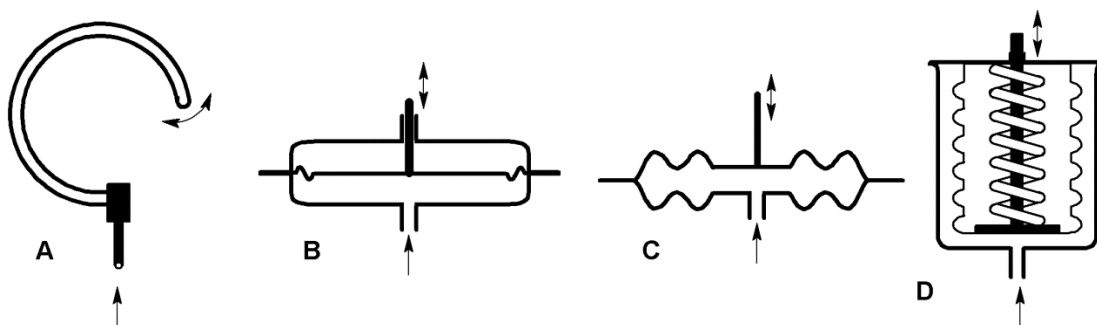
Pro *měření tlaku kapalin a plynů* se používá řada měřidel založených na různých principech. U tlakoměrů se silovým účinkem je měření tlaku převedeno na měření síly. K zařízením tohoto typu patří pístový a zvonový tlakoměr. Pístový tlakoměr (Obr. 7) využívá pístu, který je umístěn ve válci, na píst působí tlak měřeného plynu nebo kapaliny.



Obr. 7: Pístový tlakoměr firmy Fluke

Síla vzniklá působením měřeného tlaku na píst je kompenzována tíhou pístu, kterou lze upravovat přidáním závaží. Při rovnováze sil se z hmotnosti pístu a závaží při znalosti plochy pístu snadno vypočte působící tlak. Kompenzační sílu lze určit velmi přesně, proto se využívají pístové tlakoměry pro ověřování a kalibraci jiných tlakoměrů. Analogií pístového tlakoměru používanou pro nízké tlaky, které jsou nepříliš odlišné od tlaku atmosférického, je tlakoměr zvonový. Měřený tlak působí na dno zvonu ponořeného do nádoby částečně naplněné kapalinou. Je-li uvnitř zvonu přetlak, zvon se vynořuje.

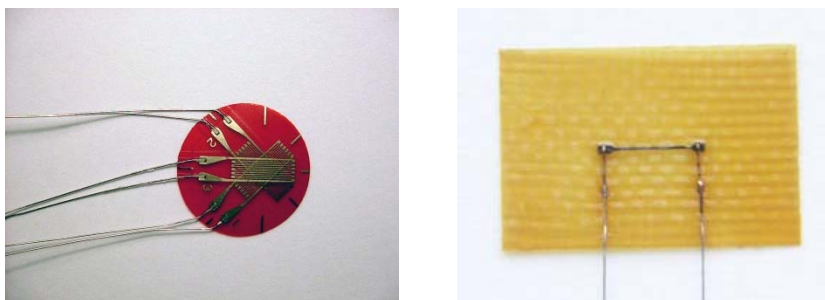
Velmi rozšířeným typem tlakoměrů jsou tlakoměry využívající převod působícího tlaku na mechanickou deformaci mechanického elementu, kterým bývá Bourdonova trubice, membrána, tlakoměrná krabice nebo tzv. vlnovec (Obr. 8).



Obr. 8: Deformační tlakoměry (A: Bourdonova trubice, B: membránový, C: s tlakoměrnou krabicí, D: s vlnovcem)

Mechanický element je namáhán pouze tak, aby nebyla překonána oblast platnosti Hookova zákona, protažení deformačního elementu se mechanicky převádí na ručku stupnice. Přestože jsou deformační tlakoměry s mechanickým vyhodnocením postupně nahrazovány pokročilejšími snímači, pro své přednosti, kterými jsou nízká cena, jednoduchost, robustnost, odolnost vůči otřesům, spolehlivost, nezávislost na napájení a odolnost proti elektromagnetickému rušení stále zaujímají důležité místo v oblasti měření tlaku.

V současné době jsou široce využívány senzory tlaku poskytující elektrický výstup. Prvky, které uvedený výstup poskytují jsou odporové, kapacitní a piezoelektrické tenzometry. Odporové tenzometry (Obr. 9) využívají piezorezistivního jevu, kdy při mechanické deformaci kovu nebo polovodiče dochází ke změně odporu.



Obr. 9: Kovový tenzometr (tenzometrická růžice) a polovodičový tenzometr firmy VTS Zlín (tenzometr je nalepen na kus sklolaminátové tkaniny)

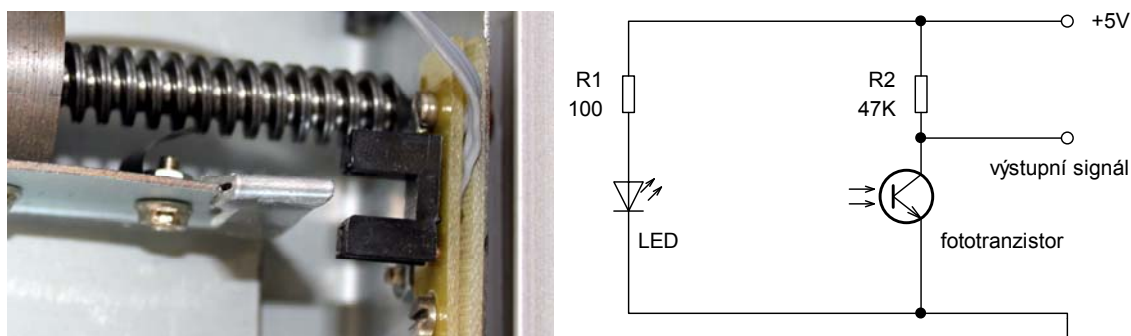
Kovové tenzometry jsou tvořeny meandrem z jemného drátku (často konstantanového z důvodu nezávislosti odporu tohoto materiálu na teplotě) pevně spojeného s elastickou podložkou lepením nebo zalisováním, eventuálně je meandr vytvořen leptáním kovové fólie nalepené na nosné podložce. Odpor tenzometru se mění při průhybu podložky ve směru delších podélných úseků drátků, zatímco krátké příčné úseky mají na citlivost zanedbatelný vliv. Změna odporu v závislosti na měřeném mechanickém napětí je u kovových tenzometrů lineární. Pro snímání deformace ve více směrech jsou vyráběny tenzometry s více vzájemně natočenými mřížkami na jedné podložce – tenzometrické růžice. K úplnému určení napjatosti v daném místě povrchu jsou zapotřebí tři mřížky; dva základní druhy růžic mají rozložení mřížek buď 0° – 120° – 240° nebo 0° – 45° – 90° . Jednotlivé mřížky jsou vzájemně galvanicky odděleny (izolovány).

U *polovodičových tenzometrů* je změna odporu s mechanickou deformací mnohem výraznější, než u kovových tenzometrů. Aktivní část (proužek z polovodiče vyříznutý z monokrystalu polovodiče tak, aby byl orientován v určité krystalografické ose) se lepí vhodným lepidlem na plochu podléhající deformaci. Příводы jsou kovové. Polovodičové tenzometry vykazují nelineární závislost odporu na deformaci. Přesnost měření je ovlivněna parazitními vlivy (např. teplota, velikost procházejícího proudu). Proto se používá můstkových zapojení, zpravidla se ve Wheatstoneově můstku používá čtyř identických tenzometrů, z nichž pouze jeden je namáhán, ostatní pak slouží k vykompenzování nelinearity odezvy a teplotní závislosti odporu polovodičového materiálu, ze kterého je tenzometr vyroben. V ČR se výrobou polovodičových tenzometrů zabývá firma VTS Zlín (<http://www.vtsz.cz>).

Kapacitní snímače jsou zapojeny jako kondenzátory, přičemž jedna z elektrod tvoří tlakoměrnou membránu a druhá elektroda je nehybná. Při změně vzdálenosti elektrod kondenzátoru se mění jeho kapacita, informace o kapacitě se zpravidla převádí na napěťový signál. V situacích, kdy senzor tlaku nesmí obsahovat kovové části, může být užitečný *senzor na bázi optického vlákna*. Mechanická deformace optického vlákna má za následek změnu šíření světelného svazku, protože se mění geometrie jádro-plášť vlákna a také index lomu optického prostředí vlákna vlivem účinku mechanického namáhání.

2.3 Měření polohy

Informace o poloze měřeného objektu či soustavy mohou být buďto získávány kontrolou pohonu, nebo lze použít snímače polohy. V případě řízení kontrolou pohonu (např. ovládání pohybující se mikrodestičky v analyzátoru, otáčející se mřížky monochromátoru apod.) se používá pohon pomocí krokového motoru a postačuje pak *detekce krajní polohy (dorazu)*. Za tímto účelem se používají dorazové spínače, optické závory (nejčastěji, Obr. 10), magnetické závory na principu Hallova jevu nebo indukční závory. Počítání kroků motoru od krajní polohy pak poskytuje informaci o aktuální poloze pohybující se součásti zařízení.



Obr. 10: Optická závora a její typické zapojení. Dopadá-li paprsek světla z LED na fototranzistor, je na výstupu napětí blíží se 0V, při zastínění fototranzistoru se na výstupu objeví napětí blíží se 5V

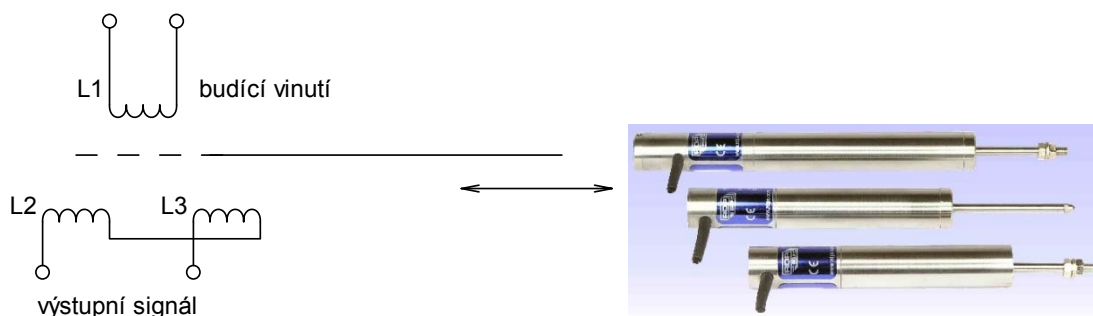
Měření polohy snímači je prováděno pro lineární pohyb (podél osy), nebo pro pohyb otáčivý (okolo osy). Pro oba typy pohybu existují dva základní přístupy k měření polohy – spojitý a nespojitý (inkrementální). Zatímco u spojitého je stanovení polohy provedeno analogovým způsobem a je dosahováno velmi vysokého rozlišení (v praxi asi 0,01 mm), inkrementální čidla pracují digitálním způsobem – sledovaný rozsah poloh je rozdělen na konečný počet dílků, které jsou počítány.

Nejjednodušším a často používaným typem spojitého snímače polohy je *snímač potenciometrický*. Snímače tohoto typu jsou dostupné jak v rotačním, tak i v posuvném provedení, jsou tvořeny proměnným odporem s lineární charakteristikou, jehož jezdec se pohybuje po odporové dráze tak, že výstupní napětí je závislé na jeho poloze. Odporová dráha

je vyráběna z vodivého plastu. Vzhledem k mechanickému principu měřidla nelze měřit rychlé změny polohy, dosažitelné jsou rychlosti okolo 10 m/s. Metoda je nevhodná do prostředí, kde dochází k nadměrným vibracím – může docházet k odskoku jezdce od odporové dráhy. Přes tento nedostatek je potenciometrická měřicí metoda hojně užívána, neboť poskytuje řadu výhod. Jedná o měření absolutní, což v praxi znamená, že naměřená hodnota zůstává zachována i při výpadku napájecího napětí. Měřidla poskytují napětí úměrné aktuální poloze bez složitě vyhodnocovací elektroniky, přenos informace o měřené poloze lze snadno realizovat připojením snímače k analogovému vstupu multifunkční karty (viz str. 64). Komerčně dostupná jsou potenciometrická měřidla v rozmezí délek od cca 10 mm do 2000 mm.

Dalšími, široce používanými spojitými měřidly polohy jsou *indukční snímače*. Indukční snímače se často používají pro vyhodnocování změny polohy menšího rozsahu, zpravidla několik milimetrů až centimetrů, dostupné jsou ale i měřidla, jejichž rozsah je delší (např. 0,5 m). Výhodou je, že měření indukčními měřidly je bezkontaktní. Na trhu jsou dostupné indukční snímače pracující buďto na principu změny indukčnosti cívky při přiblížení či oddálení ferromagnetického (nejčastěji feritového) materiálu, na principu LVDT (linear variable differential transformer), snímače s potlačeným magnetickým polem, které využívají vířivé proudy a magnetostrikční snímače. U měřidel využívajících změnu indukčnosti cívky se pro vyhodnocování využívají můstkové metody měření indukčnosti.

Indukčnostní snímače LVDT jsou transformátory, jejichž primární vinutí je tvořeno válcovou cívkou, do níž je vloženo sekundární vinutí tvořené dvěma cívkami umístěnými vedle sebe (Obr. 11: LVDT indikátor polohy). Sekundární cívky transformátoru jsou propojeny tak, aby indukovaná napětí na jednotlivých cívkách měla opačný směr. Dovnitř sekundárního vinutí je vloženo pohyblivé jádro. Pokud je toto jádro zasunuté tak, že indukovaná napětí jsou stejná pro obě sekundární cívky (nulová poloha), je na výstupu LVDT senzoru nulové napětí. Pokud je jádro povytaženo, indukuje se v jedné ze sekundárních cívek střídavé napětí o větší amplitudě než ve druhé cívice, v závislosti na vzdálenosti od nulové polohy.



Obr. 11: LVDT indikátor polohy

Snímače s potlačeným magnetickým polem, tj. ty, které využívají vířivé proudy, jsou tvořeny cívkou, která je součástí oscilačního obvodu. Při přiblížení kovového předmětu k cívice se v něm indukují vířivé proudy, které zvyšují odběr proudu nutného k udržení oscilací (z oscilátoru je odebírána energie) v závislosti na vzdálenosti cívky od předmětu. Kovový předmět nemusí být z ferromagnetického materiálu, ale z jakéhokoli kovu.

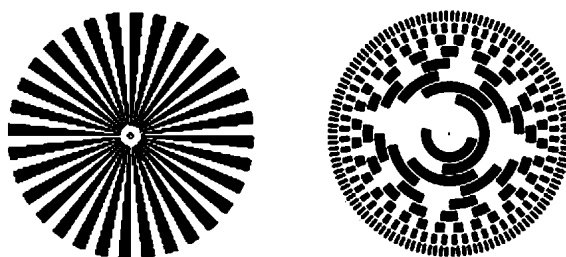
Magnetostrikční snímače polohy se používají v extrémních podmínkách, v místech, kde je vysoký tlak, zvýšená prašnost, vlhkost apod. Jsou založeny na jevu magnetostrikce, tj. změně rozměrů ferromagnetických materiálů (feritového typu) při magnetizaci. Ferromagnetickou měřicí trubicí je provlečen vodič sloužící jako budící vinutí. Trubice je magnetizována krátkým proudovým impulsem vloženým na toto vinutí. Na trubici je navlečen prstencový permanentní magnet, mechanicky spřažený s měřeným objektem. V místě interakce magnetických polí prstence a trubice dochází k magnetostrikci namáhající trubici do zkrutu, což následně způsobí

šíření zvukové vlny šířící se do obou směrů podél trubice. Na jednom konci trubice je zvuková vlna utlumena tlumícím prvkem (aby se zabránilo odrazu vlny a tím falešnému signálu na detektoru), zatímco na druhém konci je umístěn detektor. Detektorem je nejčastěji kovový pásek pevně spojený s měřicí trubicí, okolo kterého je navinuta detekční cívka. Pásek je mechanicky namáhán při příchodu zvukové vlny, což způsobí změnu jeho permeability (Villariho jev), která je detekována. Doba mezi vysláním budícího pulsu a detekcí ultrazvukové vlny je závislá na poloze měrného magnetu. Typické provedení magnetostrikčního snímače je ukázáno na Obr. 12.



Obr. 12: Magnetostrikční snímač lineární polohy

Přes značné rozšíření potenciometrických i indukčních snímačů je v současné době nejpoužívanější metodou měření vzdáleností *optické snímání polohy*. Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, jde o *inkrementální čidla* pracující digitálně. Principy činnosti tohoto druhu snímačů lze demonstrovat na příkladu počítačové myši, která je de facto rovněž snímačem polohy. U mechanické myši kulička přenáší pohyb na dvě kolečka s otvory, kolečko je vloženo dovnitř optické závory. Elektronika myši ve spojení s řízením z PC generuje impulsy, které jsou počítány. Mechanické myši jsou již v současnosti nahrazeny optickými. Moderní optické myši periodicky snímají obraz podkladu osvětlený pomocí LED nebo laserové diody malou kamerou a vyhodnocují posuv obrazu vůči předchozímu snímku. Využívají k tomu speciální čipy pro zpracování obrazu v reálném čase a převodu pohybu do osy X a Y. Oba uvedené principy jsou používány u inkrementálních snímačů polohy. V případě lineárních snímačů jsou měřicí dílky naneseny na lineární pravitko, nebo je lineární pohyb převeden na pohyb otáčivý. Použitím dvou čtecích hlav lze určit též směr otáčení nebo lineárního pohybu. Pokud je čtecí hlava osazena několika optickými závorami (devíti v případě Obr. 13 vpravo, což znamená rozlišení $2^9 = 512$ poloh), lze použít kódovací kolečko využívající binární kód a stanovit polohu absolutně bez počítání impulsů od výchozí polohy. Většinou se používá tzv. Grayův kód vyznačující se tím, že při přechodu kolečka do sousední polohy se mění pouze v jednom bitu a proto je detekce a korekce případných chyb snadná.



Obr. 13: Příklady kódovacích koleček pro inkrementální snímače polohy. Kolečko vpravo využívá Grayův kód

Podobně jako u optické myši jsou k dispozici i snímače s kamerami. Čtecí hlava pořizuje snímky stupnice sestávající z dlouhého, neopakujícího se čárového kódu. Snímky jsou

analyzovány a na jejich základě je vyhodnocována poloha. Špičkovým výrobkem tohoto druhu je např. systém Resolute firmy Renishaw, u kterého je dosahováno rozlišení polohy až 1 nm (!).

2.4 Měření světla

Podle druhu energie, na kterou je světlo převáděno, se pro měření světla využívají tři typy detektorů – tepelné, fotoelektrické a fotochemické. *Tepelné detektory* reagují na množství pohlcené světelné energie, která je převedena na teplo, zvýšení teploty je pak registrováno. Tepelné detektory se dále dělí na termočlánky (černěný svar termočlánek je zahříván dopadajícím zářením), bolometry (zahříván je termistor – tyto prvky jsou základem infračervených kamer, které využívají tzv. mikrobolometr tvořený maticí citlivých prvků na bázi V_2O_5 vytvořených na křemíkovém čipu), pyroelektrické snímače (založené na vzniku elektrického náboje při zahřátí) a opticko akustické detektory (využívají změny objemu plynu v závislosti na teplotě). Citlivost u tepelných detektorů nezávisí na vlnové délce. *Fotoelektrické detektory* využívají transformaci optického záření na kinetickou energii nabitých částic (fotoelektrický jev). V případě vakuových detektorů, tj. fotonek a fotonásobičů je využíván vnější fotoelektrický jev, tj. vyražení elektronů z mřížky kovu, v případě polovodičových detektorů (fotoodpor, fotodiody apod.) je činnost založena na vnitřním fotoelektrickém jevu, tj. změně koncentrace, pohyblivosti, distribuce v objemu polovodiče. *Fotochemické detektory* jsou založeny na fotochemických reakcích (fotografie, zrak, chemické aktinometry apod.). Citlivost fotoelektrických a fotochemických detektorů závisí na vlnové délce měřeného světla.

V praxi se však nejčastěji používají fotoelektrické detektory (Obr. 14), a to zejména následující součástky:

- Fotoodpory,
- Polovodičové prvky na bázi PN přechodu (fotodiody, fototranzistory, ev. fototyristory, CCD prvky apod.),
- Vakuové detektory (fotonky a fotonásobiče).



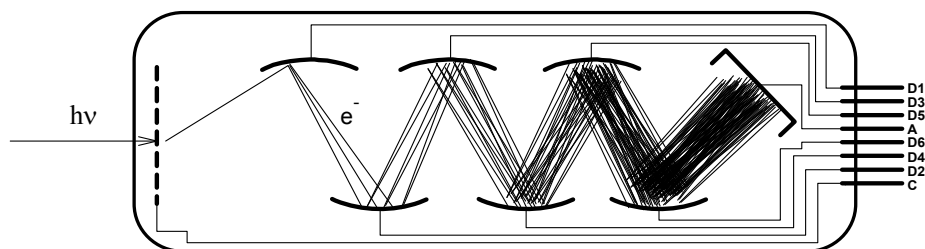
Obr. 14: Fotoelektrické detektory (vlevo: fotonka, vpravo: fototranzistor)

U *fotoodporů* je využívána změna (zvýšení) vodivosti některých polovodičových materiálů, způsobená generováním párů elektron-díra při osvětlení. Jako materiál se nejčastěji používá CdS, CdSe, případně PbS a PbSe, z historického hlediska je důležitý selenový fotočlánek.

Citlivost fotoodporů je výrazně závislá na vlnové délce dopadajícího záření, např. pro CdS, který má spektrální citlivost s maximem při cca 500 nm, je citlivost při 400 resp. 600 nm přibližně poloviční oproti citlivosti v maximu.

Fotodiody a fototranzistory využívají rovněž generování párů elektron-díra při osvětlení, nikoli v celém objemu polovodiče, ale na PN přechodu. Při spojení polovodiče typu N s polovodičem typu P zrekombinují v oblasti styku volné elektrony, které jsou majoritními nosiči náboje v polovodiči typu N s děrami P-polovodiče. Zbylé nepohyblivé „protináboje“, situované na atomech příměsí, vytvářejí v oblasti PN přechodu stálé elektrické pole (oblast prostorového náboje). Osvětlením PN přechodu světlem s dostatečnou energií dojde k vytvoření páru díra-elektron, vzniklé nosiče náboje jsou elektrickým polem přechodu, odvedeny z oblasti PN přechodu do hloubky materiálu, čímž je zabráněno rekombinaci osvětlením vzniklého páru nosičů náboje. Vzniklý potenciálový rozdíl je úměrný intenzitě dopadajícího světla. Klasický PN přechod absorbuje záření v infračervené oblasti spektra s přesahem do červené oblasti, pro použití v celém spektrálním rozsahu viditelné oblasti se používají fotodiody PIN, u nichž je mezi oblastí polovodiče s vodivostí P a N vložena vrstva nedopovaného křemíku.

Fotonky a fotonásobiče využívají vnější fotoelektrický jev, při kterém jsou z kovové fotokatody dopadem fotonů světla vyraženy elektrony. U *fotonky* je v určité vzdálenosti od fotokatody umístěna anoda, prostor mezi anodou a katodou je evakuován. Mezi anodu a katodu je vloženo napětí o hodnotě cca 100 V. Má-li foton dopadající na fotokatodu energii, která překračuje tzv. výstupní práci materiálu fotokatody, dojde k vyražení elektronu, který vlivem elektrického pole putuje na anodu. Vzniklý fotoproud je registrován vhodným vyhodnocovacím obvodem. Fotonásobič (Obr. 15) pracuje na stejném principu jako fotonka s tím rozdílem, že primární fotoproud je zesilován v soustavě tzv. dynod, které jsou umístěny mezi fotokatodou a anodou.



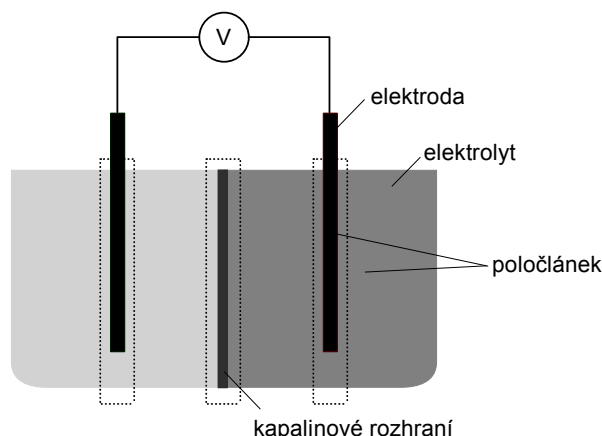
Obr. 15: Schematický náčrt fotonásobiče. C: fotokatoda, D1-D6: dynody, A: anoda

Na jednotlivé dynody jsou externím děličem přivedena napětí tak, aby sousední dynoda měla vždy o cca 100 V vyšší vložené napětí než dynoda, která je blíže fotokatodě. Nejvyšší napětí pak má anoda fotonásobiče. Materiál dynod je zvolen tak, aby vykazoval co nejvyšší sekundární emisi, tj. jev, kdy dopadající elektron vyrazí z materiálu dynody několik sekundárních elektronů. Výsledný fotoproud je sekundární emisí „násoben“ a citlivost je typicky 10^6 až 10^8 krát vyšší, než u fotonky. V poslední době jsou dynody nahrazovány tzv. mikrokánálovými destičkami (microchannel plate). Jde o skleněné destičky o tloušťce cca 2 mm opatřené velkým počtem (až několik milionů) otvorů o průměru 12–20 μm . Na stranách destiček jsou napařeny kovové vrstvy, které umožňují na destičku vložit napětí okolo 1000 V. Každá kapilára působí jako zesilovač elektronů se ziskem cca 10^4 . Mikrokánálové destičky lze řadit za sebou a dosáhnout zesílení až 10^{10} . Fotonásobič jak s klasickými dynodami, tak i s mikrokánálovými destičkami je možné používat buďto v analogovém zapojení, nebo v módu čítače fotonů. V analogovém zapojení se chová jako typický proudový zdroj, signál je měřen jako napětí na zatěžovacím odporu nebo pomocí převodníku proud-napětí. V zapojení čítače fotonů je fotonásobič jedním z nejcitlivějších detektorů, lze dosáhnout registrace jednotlivých fotonů dopadajících na fotokatodu. V tomto módu je fotonásobič zatížen malým odporem (typicky 50 Ω), každý foton pak způsobí napěťový impuls o velikosti několika milivoltů a době trvání několika nanosekund. Vzniklé pulsy jsou po tvarování a zesílení počítány. Největším světovým

výrobce detektorů světla, zejména fotonásobičů, ale i fotodiod apod. je japonská firma Hamamatsu Photonics (www.hamamatsu.com). V Evropě vyrábí fotonásobiče např. britská firma ET Enterprises (dříve Electron Tubes, Inc.; <http://www.et-enterprises.com/>).

2.5 Měření koncentrace iontů – potenciometrie

Potenciometrická měření jsou založena na stanovení elektromotorického napětí galvanického článku (Obr. 16) který je sestaven tak, aby jeho elektromotorické napětí záviselo na koncentraci (přesněji aktivitě) stanovovaného iontu. Každý galvanický článek je tvořen minimálně dvěma (nejčastěji kovovými) elektrodami, které jsou ve styku s elektrolytem. Místo styku se nazývá rozhraní elektroda-elektrolyt a na tomto rozhraní se utváří potenciálový rozdíl. Elektromotorické napětí je pak výslednicí všech potenciálových rozdílů v galvanickém článku.



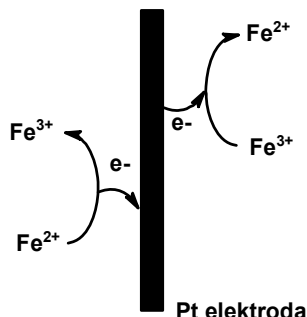
Obr. 16: Galvanický článek (schéma)

Potenciálový rozdíl se vytváří v místě, kde dochází k separaci elektricky nabitých částic – jedním z takových míst je rozhraní elektroda-elektrolyt. Ponoříme-li kovovou elektrodu do roztoku, malé množství kationtů přejde z kovu do roztoku, zatímco elektrony zůstanou uvnitř kovu. Kov tak získá záporný náboj oproti roztoku, ve kterém je ponořen. Tento proces probíhá jen ve velmi omezeném rozsahu, protože záporný náboj lokalizovaný na kovu zabraňuje dalším kationtům opustit krystalovou mřížku. Probíhá i opačný proces, kationt kovu se může zpátky zapojit do krystalové mříže. Mezi kovem a elektrolytem tedy probíhá neustálá dynamická výměna kationtů, přičemž v roztoku je kationtů malý přebytek (a tedy i potenciálový rozdíl stálý v čase). Uvedené procesy lze prokázat metodami izotopického značení – je-li v kovu přítomen radioaktivní izotop, pak se díky uvolňování kationtů kovu do elektrolytu radioaktivita objeví v roztoku (a naopak, pokud se v elektrolytu nachází izotopicky značená sůl, objeví se radioaktivita po čase i v materiálu kovu). Velikost potenciálového rozdílu lze ovlivnit přidáním soli se stejným kationtem, jako má kov do elektrolytu (budou-li v okamžiku vložení kovu do roztoku kationty kovu již přítomny, bude uvolňování kationtů probíhat v menší míře a vzniklý potenciálový rozdíl mezi elektrodou a elektrolytem bude menší). Velikost potenciálového rozdílu je dána Nernstovou rovnicí:

$$E = E_{M^{z+}/M}^0 + \frac{RT}{zF} \ln[M^{z+}],$$

kde $E_{M^{z+}/M}^0$ je standardní potenciál (potenciálový rozdíl pro jednotkovou koncentraci kationtu kovu v roztoku), R je univerzální plynová konstanta ($8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$), T teplota v Kelvinech, F je Faradayova konstanta ($96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$), z je nábojové číslo kationtu, $[M^{z+}]$ je číselná hodnota koncentrace kationtu kovu.

Potenciálový rozdíl mezi kovem a elektrolytem vzniká též v případě, že se v roztoku nachází oxidovaná a redukována forma téže látky (redox pár, např. Fe^{3+} a Fe^{2+} ionty apod.) a do takového roztoku je ponořen kov (ušlechtilý, např. Pt). V tomto případě dochází k přenosu elektronu z redukované formy redox aktivní látky v roztoku na kov (výsledkem je záporný náboj na kovu) a též k opačnému procesu (viz Obr. 17).



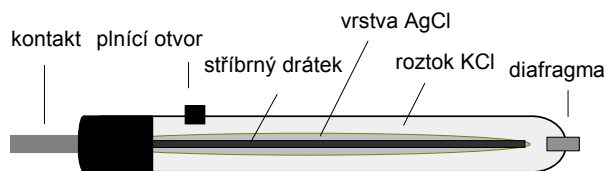
Obr. 17: Vznik potenciálu mezi inertní elektrodou a elektrolytem obsahující $\text{Fe}^{2+/3+}$ ionty

Tyto přenosy obecně probíhají různými rychlostmi, což zapříčiňuje vznik potenciálového rozdílu, jehož velikost je řízena poměrem mezi koncentracemi oxidované (ox) a redukované (red) formy látky, který vystupuje ve variantě Nernstovy rovnice platné pro tento příklad. Uvedený mechanismus je principem ORP měření.

$$E = E_{\text{ox/red}}^0 + \frac{RT}{zF} \ln \frac{[\text{ox}]}{[\text{red}]}$$

Potenciálové rozdíly mohou v galvanických člancích vznikat nejen na rozhraní elektroda-elektrolyt, ale i v místě styku dvou elektrolytů. Jednotlivé poločlánky jsou od sebe odděleny tzv. kapalinovým spojem, který může být tvořen membránou zabraňující smíchání elektrolytů nebo soustavou membrán, mezi kterými se nachází elektrolyt (ten může být odlišný od obou elektrolytů, které jsou kapalinovým spojem odděleny). Mezi oběma stranami kapalinového spoje může různými způsoby docházet ke vzniku potenciálového rozdílu (podle vlastností bariéry tvořící kapalinový spoj – diafragma, polopropustná nebo iontově selektivní membrána). Zatímco u některých článků se snažíme potenciál kapalinového spoje eliminovat (diafragma), u jiných článků jej naopak využíváme k analytickým účelům (např. měření pH).

Elektromotorické napětí je, jak již bylo zmíněno, výslednicí všech potenciálových rozdílů v galvanickém článku. Z praktických důvodů je výhodné, aby potenciál jednoho poločlánku byl známý a dobře definovaný (tj. aby poločlánky ze stejného materiálu, ale různých konstrukcí různými výrobci, měly identické potenciály). Poločlánky, které splňují tyto požadavky, se nazývají referentní elektrody. Nejlépe reprodukovatelný potenciál má elektroda vodíková, proto je zvolena jako počáteční bod elektrochemické stupnice potenciálů. Vodíková elektroda je primárním standardem při určování elektrodových potenciálů a její potenciál je definicí určen jako nulový. U vodíkové elektrody je platinová elektroda ve styku s vodíkem rozpuštěným v jednomolární kyselině (HCl). Nasycení roztoku vodíkem je realizováno vháněním plynného vodíku do okolí platinové elektrody. Protože je vodíková elektroda nepraktická pro běžné použití, byly vyvinuty sekundární standardy. Těmi jsou tzv. elektrody druhého druhu, a když hovoříme o referentních elektrodách, zpravidla máme na mysli právě tyto elektrody. Argentochloridová elektroda je typickou a nejčastěji používanou referentní elektrodou druhého druhu (Obr. 18).



Obr. 18: Ag/AgCl elektroda

Tvoří ji stříbrný drátek, opatřený vrstvou AgCl a ponořený v elektrolytu tvořeném rozpustným chloridem (obvykle 3M KCl – tj. koncentrace o něco nižší, než je nasycený roztok). Vrstva AgCl zajišťuje nasycení roztoku ionty Ag^+ . Argentochloridová elektroda je realizována stříbrným drátkem, ponořeným do elektrolytu obsahujícím KCl a AgCl. Potenciálový rozdíl na rozhraní elektroda-elektrolyt vzniká mechanismem popsáným v předchozím oddílu (viz str. 20) a jeho velikost je dána Nernstovou rovnicí:

$$E = E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}}^0 + \frac{RT}{F} \ln[\text{Ag}^+].$$

Koncentrace Ag^+ iontů však v elektrolytu obsahujícím KCl a AgCl nemůže být libovolná – je řízena tvorbou a rozpouštěním sraženiny AgCl. AgCl je nerozpustná sůl, nicméně jako každá sraženina není nerozpustná absolutně. V elektrolytu existuje nízká koncentrace rozpuštěného AgCl ve formě iontů Ag^+ a Cl^- . Rozpustnost AgCl se řídí tzv. součinem rozpustnosti:

$$K_s = [\text{Ag}^+][\text{Cl}^-].$$

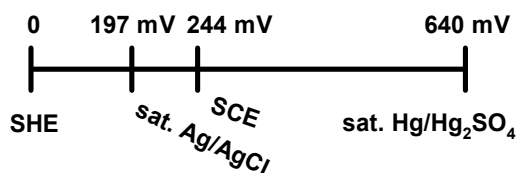
Součin rozpustnosti je specifický případ rovnovážné konstanty – pokud dojde v roztoku ke zvýšení koncentrace chloridových iontů, musí dojít k poklesu koncentrace iontů Ag^+ (a naopak). Kombinací Nernstovy rovnice pro stříbrnou elektrodu a výrazu pro součin rozpustnosti získáme variantu Nernstovy rovnice pro argentochloridovou elektrodu:

$$E = E_{\text{Ag}^+/\text{Ag}}^0 + \frac{RT}{F} \ln \frac{K_s}{[\text{Cl}^-]}.$$

Z rovnice vyplývá, že potenciál argentochloridové elektrody je řízen koncentrací KCl v elektrolytu. Argentochloridová elektroda je schopna do určité míry „odolávat“ pokusům o změnu jejího potenciálu (tato její vlastnost je označována jako nepolarizovatelnost). Pokud by např. došlo ke zvýšení koncentrace Ag^+ iontů (např. rozpuštěním stříbra průchodem elektrického proudu), okamžitě budou z roztoku odstraněny přebytečné Ag^+ ionty díky srážecí reakci s KCl. Naopak, pokud by došlo ke snížení koncentrace Ag^+ iontů, dojde k rozpuštění části AgCl.

Kromě argentochloridové elektrody se používá též elektroda kalomelová, tvořená rtuť, chloridem rtuťným a chloridem draselným a též elektroda merkurosulfátová, vhodná pro galvanické články, kde by mohly vadit chloridy pronikající diafragmou. Merkurosulfátová elektroda je tvořená rtuť, síranem rtuťným a síranem draselným.

Potenciály měřené s pomocí různých referentních elektrod můžeme snadno přepočítat. Např. je-li elektromotorické napětí galvanického článku 400 mV se standardní vodíkovou elektrodou (SHE), při použití saturované kalomelové elektrody (SCE) naměříme 156 mV a s elektrodou merkurosulfátovou –240 mV (viz Obr. 19):

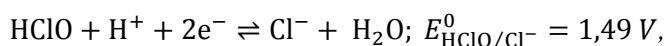


Obr. 19: Potenciály srovnávacích elektrod

2.5.1 Měření redox potenciálu – ORP

Existuje-li v roztoku dvojice látek, kterou lze považovat za oxidovanou a redukovanou formu téže molekuly (formy na sebe vzájemně přecházejí přijetím a odevzdáním elektronů při redoxních reakcích), existuje v roztoku oxidačně – redukční potenciál (redox potenciál, ORP – z angl. oxidation-reduction potential). Tato veličina se měří pomocí inertní (nejčastěji platinové) elektrody, která nabyde potenciálu rovnému redox potenciálu zkoumaného roztoku mechanismem popsaným na str. 20, tj. dynamickou výměnou elektronů mezi redukovanou formou redox látky, inertní elektrodou a oxidovanou formou redox aktivní látky. ORP elektrody měří elektromotorické napětí galvanického článku tvořeném měřicí celou (Pt elektroda + měřený roztok) a referentní elektrodou. Protože princip ORP měření je identický s měřením pH, běžné pH metry často umožňují měřit i ORP – pH metr je nutno nastavit do režimu zobrazování potenciálu v mV. ORP se měří za účelem monitorování některých chemických procesů. Oblastmi, ve kterých se měření ORP provádí, jsou především úprava průmyslových vod, studie biologických systémů, oxidace kyanidů, bělení papírové drti, výroba bělicích lázní a likvidace odpadů s obsahem chromanů přidávkem redukčních činidel apod.

Měření ORP je užitečné při úpravě bazénových vod. Slouží k indikaci hygieny ve vztahu k obsahu volného chlóru. Chlór ve vodě podléhá přeměně (disproporcionaci) na kyselinu chlornou a chloridový anion, přičemž redox potenciál tohoto roztoku je popsán poločlánkovou reakcí, které odpovídá příslušná Nernstova rovnice:



$$E = E_{\text{HClO}/\text{Cl}^-}^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{[\text{HClO}][\text{H}^+]}{[\text{Cl}^-]},$$

Hodnota ORP v bazénových vodách tedy závisí na koncentraci HClO (volného chlóru), chloridů, i na hodnotě pH. Optimální hodnoty pH leží mezi 7.2 a 7.6. V závislosti na kontaminaci vody je trend ke zvyšování hodnoty pH na 8.0 až 9.0. Aby se udržovala optimální hodnota pH bazénových vod, je nutné do nich přidávat vhodné chemické přípravky. Je-li hodnota pH v požadovaném rozsahu a ORP hodnota pod 700 mV, musí se přidávat do bazénových vod oxidační činidla. Ověření činnosti ORP elektrody a její kalibrace spočívá ve změření odezvy chinhydronu rozpuštěného ve standardním pufru. Chinhydron je v pevné fázi zelenočerná krystalická látka, jde o ekvimolární komplex hydrochinonu a chinonu. Po rozpuštění poskytuje roztok, ve kterém se nachází chinon (oxidovaná forma) a hydrochinon (redukováná forma) v poměru přesně 1:1. Redox potenciál tohoto systému závisí na pH. Do standardního pufru o pH = 7 (cca 10–20 ml) přidáme na špičku nože (25 mg) chinhydronu a necháme rozpustit. Redox potenciál tohoto roztoku je cca 80 mV (měřeno standardním ORP čidlem s argentochloridovou srovnávací elektrodou). Stejný postup s pufrem o pH = 4 poskytuje cca 255 mV.

2.5.2 Měření pH

Pro stanovení hodnoty pH měřeného vzorku lze využít:

- pH indikátory (tj. využití barevné látky citlivé na změnu pH) Používají se ve formě papírků nebo se barevná změna stanovuje spektrofotometricky.
- skleněné elektrody.
- další elektrody indikující H_3O^+ ionty, např. paladiové, iridiové nebo chinhydronové elektrody.
- ISFET senzory.

Nejčastěji je pro měření pH používána tzv. skleněná elektroda (Obr. 20), patřící do skupiny iontově selektivních elektrod.



Obr. 20: Skleněná elektroda

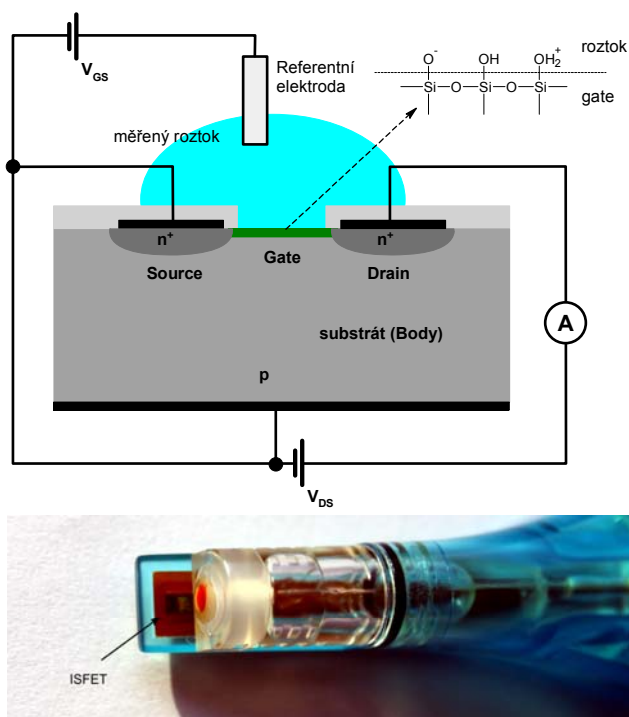
Činnost skleněné elektrody je založena na schopnosti povrchu skla vázat H_3O^+ ionty. Skleněná elektroda je tvořena tenkou (cca 0,2 mm) skleněnou membránou, jejíž jedna strana je v kontaktu s měřeným roztokem a druhá je v kontaktu s roztokem o definovaném pH ve směsi s KCl (součást vnitřní Ag/AgCl elektrody, viz dále). Po určité době se na povrchu skla při styku s vodným prostředím utvoří hydratovaná (tzv. Haugaardova, případně Haber-Haugaardova) vrstva o tloušťce cca 100 nm. Do Haugaardovy vrstvy mohou vstupovat pouze ionty H_3O^+ , ostatní ionty do této vrstvy nevnikají, takže nedochází k interferencím tak typickým pro jiné iontově selektivní elektrody. Vstupem iontů H_3O^+ získává Haugaardova vrstva kladný náboj, čímž vznikne mezi touto vrstvou a okolním elektrolytem potenciálový rozdíl. Stejná situace nastává na druhé straně membrány, kde se rovněž tvoří (vnitřní) Haugaardova vrstva. Vodivé spojení (elektrický obvod musí být uzavřen) mezi vnější a vnitřní Haugaardovou vrstvou tvoří lithné, sodné a draselné ionty obsažené ve skle. Výsledkem uvedených pochodů je ustavení elektrochemické rovnováhy na membráně mezi vnějším měřeným roztokem a vnitřním pufrem. Rovnováha je charakterizována variantou Nernstovy rovnice (Nikolskiho rovnice), která udává závislost potenciálového rozdílu mezi vnitřním a vnějším elektrolytem odděleným skleněnou membránou (membránový potenciál) na rozdílu pH těchto elektrolytů (c_1 a c_2 jsou koncentrace iontů H_3O^+ v jednotlivých elektrolytech).

$$E = E_{\text{assy}} + \frac{RT}{F} \ln \frac{c_1}{c_2}.$$

Je-li pH vnitřního elektrolytu shodné s pH měřeného elektrolytu (nejčastěji se jako vnitřní elektrolyt používá pufr s pH = 7 s přidavkem rozpustné soli nutné pro vytvoření vnitřní referentní elektrody), je membránový potenciál teoreticky roven 0 mV, v praxi je malý potenciálový rozdíl (asymetrický potenciál). Membránový potenciál skleněné elektrody je měřitelný jako napětí galvanického článku tvořeného skleněnou elektrodou (ta je tvořena vnitřní referentní elektrodou, vnitřním elektrolytem, skleněnou membránou a měřeným roztokem) a referentní elektrodou, jejíž potenciál nezávisí na pH (pro vytvoření galvanického článku jsou nezbytné dvě elektrody). Jako referentní elektrody jsou používány obvykle Ag/AgCl elektrody, ale i Ag/Ag₂SO₄, Hg/Hg₂Cl₂ aj.). V minulosti se při měření pH vkládaly do roztoku dvě elektrody – skleněná (měřicí) a referentní elektroda. Dnes se používají tzv. kombinované elektrody, které mají v jednom “těle” zakomponováno jak měřicí, tak i referentní elektrodu, takže se při měření pH se dnes vkládá do měřené matrice pouze jeden senzor. Z Nernstovy rovnice plyne, že membránový potenciál se mění s teplotou, proto některé pH elektrody obsahují i teplotní senzor.

V současnosti se na trhu začínají běžně objevovat i pH metry s čidlem ISFET (ion selective field effect transistor – iontově selektivní polem řízený tranzistor). Výhodou těchto čidel je mechanická pevnost, odolnost vůči nešetrnému zacházení (výrobci například doporučují čištění

pomocí kartáčku na zuby), možnost miniaturizace, nevýhodou je vysoká cena. Činnost ISFET čipu (Obr. 21) je stejná jako u tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem. ISFET čip je realizován na křemíkové podložce (substrátu), který je velmi málo dopován příměsí typu P. Na povrchu substrátu jsou vytvořeny oblasti s vysokou dopací typy N (n^+), které slouží jako elektrody Source a Drain. Mezi elektrodami Source a Drain je vytvořena elektroda Gate, materiálem je tenká vrstva izolantu, který je schopen interakce s H^+ ionty v roztoku (nejčastěji SiO_2 nebo Ta_2O_5 , ale i Al_2O_3 apod.). Díky nízkému stupni dopace substrátu neprobíhá mezi elektrodami Source a Drain proud, pokud není na elektrodě Gate kladný náboj. Kladný náboj vznikne na elektrodě Gate interakcí s H^+ ionty. V povrchové vrstvě substrátu, těsně po elektrodou Gate vznikne vodivý kanál odpuzením děr a přitažených volných elektronů ze substrátu. Díky tomu, že počet elektronů převládne nad počtem děr se vodivý kanál chová jako polovodič s vodivostí typu N.



Obr. 21: ISFET čidlo – schéma a praktické provedení

2.6 Vodivost

Měrná vodivost je velmi důležitým parametrem hodnocení nejrůznějších roztoků, zejména v průmyslu a v životním prostředí. Její hodnota je úměrná koncentraci, náboji a druhu iontů měřeného roztoku. Vodivost je široce používaný parametr pro hodnocení čistoty vody jak při její úpravě, tak i v průmyslových aplikacích. Měření vodivosti se využívá v chemickém, petrochemickém, polovodičovém a textilním průmyslu, potravinářství, zdravotnictví, hornictví, strojírenství a při výrobě papíru a celulózy. Specifickou oblastí je měření vodivosti u demineralizačních stanic, odpadních vod, topných médií, kondenzátu chladicích věží a v oceánografii.

Vodivost (G) je reciprokou hodnotou elektrického odporu (R). U kovových vodičů závisí na pohybu elektronů uvnitř krystalové mřížky. U roztoků vodivost závisí na obsahu iontů – čím větší je obsah iontů v matici, tím menší je odpor a tím větší je vodivost. V obou případech je vodivost definována jako reciproká hodnota odporu a platí pro ni Ohmův zákon:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}.$$

G – vodivost (Siemens S), R – elektrický odpor (Ohm), I – proud (A), U – napětí (V). Měření vodivosti je založeno na platnosti Ohmova zákona – měří se proud při známém vloženém napětí. Vodivost závisí na rozměrech měřeného materiálu – u kovových vodičů je nepřímo úměrná délce vodiče a přímo úměrná jeho průřezu. Podobná situace nastává i při měření vodivosti roztoků – do roztoku je vložena vodivostní cela (Obr. 22), tvořená dvěma elektrodami, které mají stejné rozměry a jsou vůči sobě rovnoběžné.



Obr. 22: Vodivostní cela

Vodivost je pak nepřímo úměrná vzdálenosti těchto elektrod a přímo úměrná jejich průřezu. Vodivost přepočtená na jednotkovou plochu elektrod a jednotkovou vzdálenost mezi nimi se nazývá měrná vodivost κ :

$$G = \kappa \frac{S}{l}.$$

S – plocha elektrod (cm^2), l – vzdálenost mezi elektrodami (cm). Jednotkou měrné vodivosti je tedy S/cm . Měření vodivosti roztoků je možné, pokud je odpor roztoku mnohem vyšší, než je odpor rozhraní mezi elektrodami vodivostní cely a roztokem. Tato podmínka je splněna pro střídavý proud o dostatečné frekvenci – platí Ohmův zákon a měření nekomplikují jevy omezující procházející proud na rozhraní mezi elektrodami a měřeným roztokem (polarizace elektrody). Moderní konduktometry využívají střídavé napětí o velikosti 0,2–1 V, jehož frekvence se řídí vodivostí měřeného roztoku. Měření spočívá ve snímání napětí na odporu, zapojeném v sérii s konduktometrickou celou, která je ponořena do měřeného roztoku. Obvykle používané frekvence střídavého napětí jsou uvedeny v následující tabulce:

vodivost	frekvence
< 50 μS	$\approx 400 \text{ Hz}$
50–1000 μS	1 kHz
1–0 mS	10 kHz
0,1–1 S	50 kHz

Konduktometrem měříme vodivost roztoku (G), kterou je nutno převést na měrnou vodivost. Platí $\kappa = C \cdot G$, kde konstanta úměrnosti C je tzv. odporová konstanta cely. Tuto konstantu zjistíme výpočtem po změření vodivosti G roztoku o známé specifické vodivosti κ v této nádobce. Obvyklým standardem je $0,01 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ KCl, jehož vodivost je při teplotě 25°C $0,1413 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$. Moderní přístroje kalibraci nevyžadují – zohlední parametry cely a výpočtou hodnotu měrné vodivosti automaticky. Některé konduktometry mají možnost měřit tzv. čtyřelektrodovou celou. U čtyřelektrodové cely je rozděleno měření proudu (měří se mezi jednou dvojicí elektrod) od ukládání napětí (napětí se ukládá na druhou dvojici elektrod). Čtyřelektrodové měření je výhodné pro roztoky s vysokou vodivostí. Informativní rozsahy vodivostí různých typů vod:

Roztok	Vodivost
Technologická voda kotlů elektráren	$1,0 \text{ } \mu\text{S/cm}$
Surová voda	100 mS/cm
Oceánská voda	53 mS/cm
Destilovaná voda	$0,5 \text{ } \mu\text{S/cm}$
Deionizovaná voda	$0,1\text{--}10 \text{ } \mu\text{S/cm}$
Demineralizovaná voda	$0\text{--}80 \text{ } \mu\text{S/cm}$
Pitná voda	$0,5\text{--}1 \text{ mS/cm}$
Odpadní voda	$0,9\text{--}9 \text{ mS/cm}$

S vodivostí úzce souvisí často sledovaný faktor TDS (Total Dissolved Solids), tj. celkový obsah rozpuštěných pevných látek. Konduktometricky lze měřit jen látky rozpuštěné ve formě iontů tj. pouze část parametru TDS. Proto je vztah mezi TDS a vodivostí jen velmi volný a koreluje se pro určitou matici empiricky. Pro parametr TDS platí: $\text{TDS} = \text{vodivost} \times \text{konverzní faktor}$. Konverzní faktor je závislý na aplikaci a stanovuje se empiricky. TDS se vyjadřuje v mg/L , ppm nebo ppt. S vodivostí také souvisí měření salinity. Salinita je empirický parametr udávající množství solí ve vzorku vody (někdy je parametr omezen na sledování pouze určitých solí – např. NaCl, NaHCO_3 , MgSO_4 , CaSO_4 apod.). Salinita je běžně sledovaným parametrem kvality vod v zemědělství, akvaparcích, hydroponii, lázních a v potravinářském průmyslu. Salinita se vyjadřuje v ppt nebo v %.

2.7 Měření koncentrace rozpuštěného kyslíku

DO – „Dissolved Oxygen” je parametr udávající množství plynného kyslíku rozpuštěného ve vodném roztoku. Kyslík patří mezi plyny, které se mísí s vodou, aniž by s ní chemicky reagovaly (podobně jako dusík, oxid uhelnatý, argon aj.). Jiné plyny s vodou reagují, jako např. amoniak, oxid uhličitý nebo chlorovodík. Zdroji kyslíku ve vodě jsou hlavně atmosféra a fotosyntéza. Vlnění a pohyb vody a vzduchu způsobuje jejich vzájemné míchání a tím dochází k rozpouštění kyslíku ve vodě až do jeho úplné saturace. Kyslík je také vyráběn vodními rostlinami a řasami jako výsledný produkt fotosyntézy. Jiné přírodní procesy kyslík rozpuštěný ve vodě spotřebovávají, např. tlení, kvašení apod. Proto je měření DO důležité zejména pro monitorování biologických procesů, jako je např. čištění odpadních vod, v biotechnologiích (kvašení a jiné aerobní pochody) apod.

Pro stanovení DO elektrochemickými metodami se využívají dva typy senzorů, zpravidla v literatuře označované jako polarografické a galvanické sondy. Stanovení rozpuštěného kyslíku *polarografickými sondami* je založeno na amperometrickém měření využívající tzv. Clarkovu

elektrodu. Clarkova elektroda je galvanický článek skládající se z katody (nejčastěji Pt nebo Au) a anody (kterou je nejčastěji argentochloridová elektroda), na který je vloženo napětí z externího zdroje, který je zpravidla součástí analyzátoru (polarizační napětí). Elektrolytem je roztok KCl, který je od měřeného roztoku oddělen membránou propouštějící plyny s malou velikostí molekuly (používá se teflonová nebo polypropylenová membrána). Velikost polarizačního napětí (cca 800 mV) je zvolena tak, aby docházelo k elektrolýze, přičemž na katodě dochází k redukci kyslíku podle rovnice elektrodové reakce:



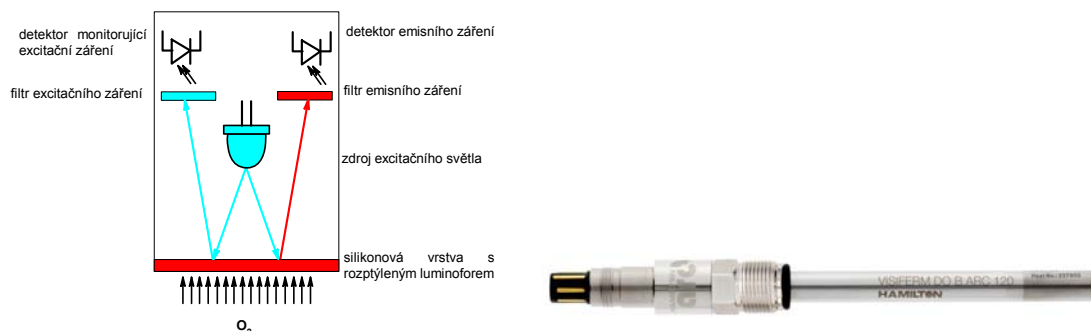
Kyslík je tedy spotřebováván na katodě a procházející proud je úměrný koncentraci kyslíku difundujícího přes membránu do katodového prostoru. Anodickou reakcí je rozpouštění stříbra argentochloridové elektrody: $4 \text{Ag} + 4 \text{Cl}^- \rightarrow 4 \text{AgCl} + 4 \text{e}^-$. Jelikož po připojení polarizačního napětí je odezva elektrody nestabilní, vyžadují polarografické sondy určitou dobu stabilizace před použitím (zpravidla 15 min). Odezva se též mírně mění s časem v důsledku změny složení elektrolytu díky tvorbě KOH v důsledku elektrodových reakcí. Při měření je důležité, aby na vnější straně membrány byla koncentrace kyslíku konstantní, tj. neklesala s časem v důsledku vyčerpávání kyslíku v okolí katody elektrodovou reakcí. Tato podmínka je zajišťována měřením v míchaném roztoku.

Galvanická sonda pracuje na principu zatíženého galvanického článku. Článek je tvořen olověnou nebo zinkovou anodou a stříbrnou, zlatou eventuálně platinovou katodou, na které dochází k redukci kyslíku (elektroda má podobnou funkci jako platinová elektroda ORP senzoru, tj. pouze přenáší elektrony na kyslík). Kyslík proniká do katodového prostoru přes plynopropustnou membránu. Elektrolytem je roztok hydroxidu sodného, který se stykem s materiálem anody nasatí hydroxidem zinečnatým resp. olovnatým. Článek je zatížen odporem (5–10 kΩ), přičemž elektrodové reakce, které spontánně probíhají (redukce kyslíku a oxidace materiálu anody), poskytují proud protékající tímto odporem. Jelikož katodovou reakcí je redukce kyslíku, je proud úměrný množství kyslíku difundujícího přes membránu. Jako výstupní signál senzoru slouží napětí měřené na svorkách zatěžovacího odporu, úměrné koncentraci kyslíku přítomnému ve vzorku. Výhodou galvanických elektrod je odstranění nutnosti ustálení odezvy na začátku práce. Odpadá též problém s alkalizací elektrolytu, protože vzniklé OH⁻ ionty reagují se zinečnatými ionty za tvorby omezeně nerozpustného hydroxidu zinečnatého. Nevýhodou je malý rozsah výstupního napětí (několik desítek mV), který ovlivňuje dosažitelnou přesnost měření. Galvanická sonda rovněž vyžaduje míchání roztoku při měření.

Optické senzory pro měření rozpuštěného kyslíku

Optické senzory pro měření rozpuštěného kyslíku využívají obecnou schopnost kyslíku zhaset fluorescence. Fluorescence je jeden z pochodů, kterými se molekula zbavuje přebytečné energie, kterou získala pohlcením (absorpcí) kvanta světelné energie. Při fluorescenci molekula vyzařuje světelné kvantum, ovšem část excitační energie se ztrácí vibračními pochody, proto má vyzářené (emisní) fluorescenční záření nižší energii, tj. delší vlnovou délku než excitační záření. Stykem s molekulami kyslíku dochází ke zhasení fluorescence u části excitovaných molekul fluoroforu, což se projeví jednak snížením intenzity fluorescenční emise, jednak zkrácením jejího dosvitu při přerušení excitačního (budícího) záření. Pro stanovení DO se jako fluorofory nejčastěji využívají komplexy na bázi ruthenia, např. hexafluorofosforečnan tris(4,7-difenyl-1,10-fenanthrolin)ruthenatý, imobilizovaný ve vhodné polymerní matici, která je propustná pro kyslík (nejčastěji silikonová guma). Komplexy ruthenia se vyznačují extrémně dlouhou dobou života fluorescence (desítky milisekund ve srovnání s jednotkami až desítkami nanosekund u běžných látek vykazujících fluorescence), proto je jejich zhasení kyslíkem účinné a dostupnou elektronikou je měřitelné jak snížení intenzity, tak i dosvitu fluorescence. Komerčně dostupné systémy tohoto typu, např. produkt VIsiferm™ DO firmy Hamilton využívá jednu excitační LED a dvě fotodiody, z nichž jedna je opatřena modrým filtrem a sleduje aktuální intenzitu

světla, kterou excitační LED ozařuje fluorofor (Obr. 23). Druhá fotodioda s červeným filtrem snímá fluorescenční emisi, která je závislá na koncentraci rozpuštěného kyslíku.



Obr. 23: Optická metoda měření koncentrace rozpuštěného kyslíku, praktické provedení senzoru (provedení rozměrově odpovídá klasické Clarkově elektrodě)

Měření koncentrace kyslíku založené na snížení intenzity fluorescence není příliš spolehlivé, protože velmi závisí na účinnosti ukotvení fluoroforu a jeho fotochemické stabilitě při ozařování. Naopak měření založené na změně dosvitu při interakci fluoroforu s kyslíkem není citlivé na změny obsahu fluoroforu v polymerní vrstvě. Při praktickém provedení měření DO je intenzita excitačního záření modulována sinusovým průběhem. V nepřítomnosti kyslíku existuje fázový posuv mezi intenzitami excitačního a emisního záření. Tento posuv se v přítomnosti kyslíku snižuje v důsledku snížení doby dosvitu fluorescence.

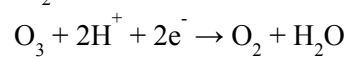
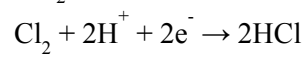
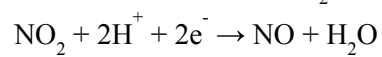
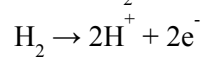
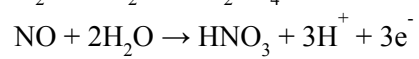
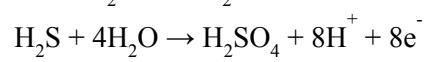
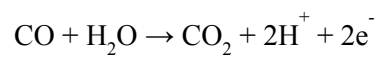
2.8 Měření obsahu toxických plynů v atmosféře

Senzory plynů v atmosféře, zejména toxických, nacházejí uplatnění v řadě situací, jako např. ve výrobních provozech, garážích, požárních hlásičích apod. V současnosti používané senzory pracují buďto na principu pelistoru, tj. součástky měnící odpor při styku s určitým plynem, nebo jsou využívána čidla na principu Clarkovy elektrody (Obr. 24).



Obr. 24: Detektory toxických plynů

Detaily konstrukce, použité materiály elektrod, složení elektrolytů jsou obvykle úzkostlivě střeženým know-how výrobců. Detekce plynů probíhají na základě následujících elektrodových reakcí:

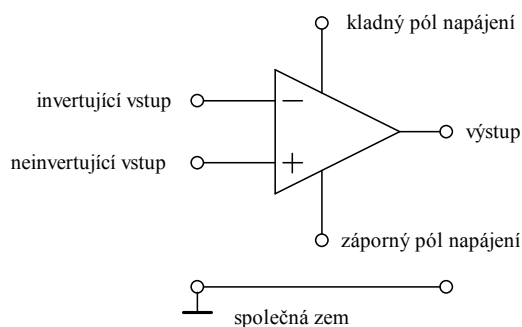


3 Operační zesilovače a jejich využití v chemické instrumentaci

Signál ze senzoru je často zapotřebí upravit (např. zesílit, odstranit šum apod.), nebo přizpůsobit pro připojení k dalším částem měřicího řetězce (např. analogovému vstupu A/D převodníku). K uvedeným účelům se v současné době nejčastěji využívají operační zesilovače.

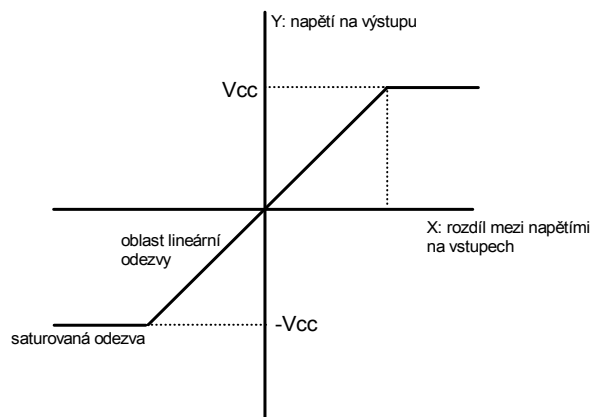
3.1 Operační zesilovač – základní popis

Operační zesilovač (OZ, operational amplifier) je diferenční (rozdílový) zesilovač s velmi vysokým zesílením pro stejnosměrné i střídavé signály. Schematická značka a popis jsou uvedeny na Obr. 25. Při analýze činnosti OZ se vychází z modelu tzv. ideálního operačního zesilovače, který je charakterizován nekonečným zesílením, nekonečným vstupním odporem a nekonečně širokým frekvenčním pásmem.



Obr. 25: Operační zesilovač

OZ bývá napájen ze zdroje tzv. symetrického napětí (typicky ± 9 až ± 15 V). Takový zdroj má tři svorky, z nichž jedna dodává kladné a druhá záporné napětí vzhledem ke společné zemi, která tvoří třetí svorku. Napájecí vývody se ve schématech zpravidla vynechávají, z důvodu přehlednosti schématu. OZ má dva vstupy (symetrické vzhledem ke společné zemi), z nichž je jeden je neinvertující a druhý je invertující (na výstupu OZ se po připojení napětí na invertující vstup objeví napětí opačného znaménka, je-li neinvertující vstup spojen se zemí). Výstup zesilovače je nesymetrický, vztahuje se ke společné zemi.

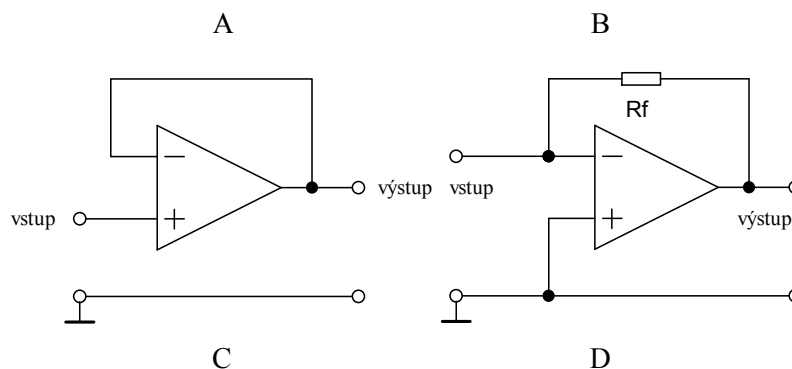


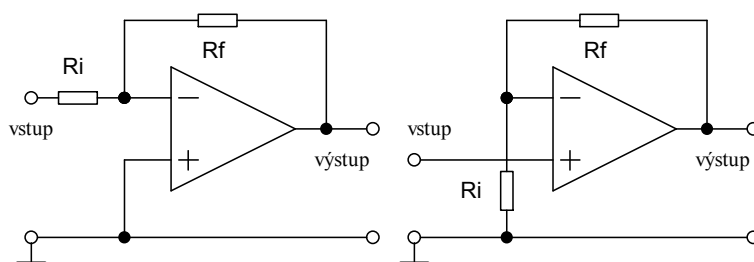
Obr. 26: Chování OZ bez zavedené zpětné vazby

Jak již bylo uvedeno, OZ je diferenční (rozdílový) zesilovač s velmi vysokým zesílením pro stejnosměrné i střídavé signály. Na Obr. 26 je uvedena závislost výstupního napětí na rozdílu mezi napětími na jednotlivých vstupech. Je-li napětí na obou vstupech stejné (např. propojíme-li oba vstupy), pak je výstupní napětí nulové. Je-li zesílení OZ např. 10^6 (tento údaj je možné nalézt v katalogovém listu (datasheet) OZ jako parametr *open loop gain*), pak je např. výstupního napětí 10 V dosaženo, je-li rozdíl napětí na vstupech pouhých $10\ \mu\text{V}$. Napětí na výstupu OZ nemůže překročit napájecí napětí, proto po jeho dosažení již OZ na rostoucí rozdíl mezi vstupními napětími nereaguje, odezva je saturována. Uvedeného chování OZ je využíváno v obvodu komparátoru (viz str. 34).

3.2 Základní zapojení OZ

Při analýze činnosti zapojení OZ se vychází z teoretického modelu tzv. ideálního OZ. Ten je charakterizován nekonečným zesílením, nekonečně velkým vstupním odporem (tj. proudy tekoucí invertujícím a neinvertujícím vstupem „dovnitř“ zesilovače jsou nekonečně malé) a nekonečnou šířku pásma přenášených frekvencí. Na následujícím obrázku (Obr. 27) jsou znázorněny čtyři základní zapojení OZ:





Obr. 27: Základní zapojení OZ. A: sledovač napětí, B: převodník proud/napětí (proudový sledovač), C: invertující zesilovač, D: neinvertující zesilovač

Vlastnosti jednotlivých základních zapojení OZ lze odhadnout použitím následujících představ:

- Funkční vlastnosti OZ do značné míry nezávisí na konkrétních parametrech OZ, ale jsou dány tzv. zpětnou vazbou, která tvoří externí obvod.
- Zpětná vazba je realizována propojením výstupu OZ s jeho vstupem, často prostřednictvím zpětnovazebního odporu nebo odporové sítě. Pokud je část výstupního napětí přenášena na invertující vstup, jde o negativní zpětnou vazbu (výstupní napětí je snižováno), v případě propojení neinvertujícího vstupu s výstupem jde o kladnou zpětnou vazbu.
- Protože je OZ rozdílový zesilovač s velkým zesílením, již malý rozdíl mezi napětími na obou vstupech způsobí saturaci výstupu OZ. Proto, je-li některý vstup OZ spojen se zemí, musí být napětí na druhém vstupu prakticky identické, pokud není výstup saturován (tj. výstupní napětí je v rozmezí mezi napájecími napětími).

3.2.1 Sledovač napětí

Nejjednodušší, ale často využívané zapojení OZ je sledovač napětí (Obr. 27A). Sledovač napětí je obvod, vytvořený propojením výstupu OZ s jeho neinvertujícím vstupem. Vstupní signál je přiveden na neinvertující vstup. Na výstupu OZ je napětí identické se vstupním napětím. Toto zapojení slouží jako převodník impedance – „izoluje“ zdroje napětí o vysokém výstupním odporu („měkký“ zdroj, tj. zdroj, který není schopen dodávat proud) od vstupů s nízkou impedancí.

3.2.2 Převodník proud/napětí

Převodník proud/napětí (Obr. 27B) se používá k vyhodnocení signálu z čidel s proudovým výstupem, např. fotonásobičů, elektroda apod. Protože vstupní odpor OZ je velký, prochází proud zpětnovazebním odporem R_f . Vzhledem k velkému zesílení OZ se zpětná vazba snaží udržet napětí blízké potenciálu neinvertujícího vstupu, tedy nulové (virtuální zem). Výstupní napětí je tedy úbytek napětí na odporu R_f :

$$u_{\text{výstup}} = -i_{\text{vstup}} R_f.$$

3.2.3 Invertující zapojení

Invertující zapojení je ukázáno na Obr. 27C. Za předpokladu ideálního zesilovače se proud i_{vstup} vstupující do zesilovače musí rovnat proudu $i_{\text{výstup}}$, který prochází zpětnou vazbou a výstupní napětí se musí rovnat napětí na zpětnovazebním odporu R_f .

$$A_U = \frac{u_{\text{výstup}}}{u_{\text{vstup}}} = \frac{R_f i_{\text{výstup}}}{R_i i_{\text{vstup}}} = \frac{R_f}{R_i}.$$

Vstupní odpor (impedance) zesilovače v invertujícím zapojení je rovna hodnotě R_i .

3.2.4 Neinvertující zapojení

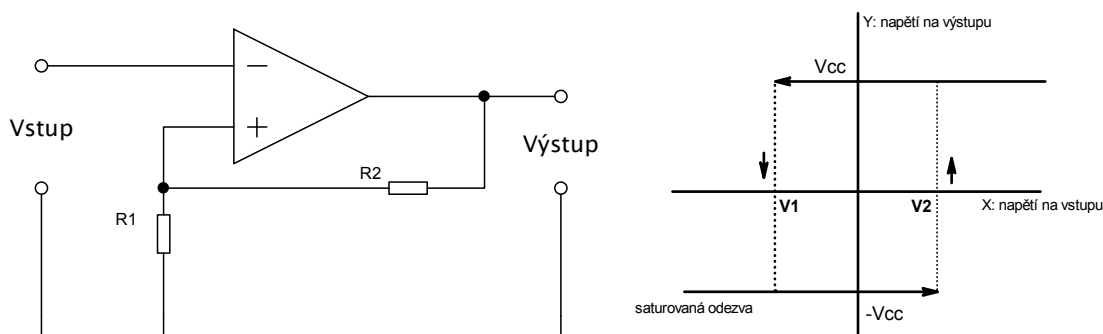
U neinvertujícího zapojení (Obr. 27D) je za předpokladu ideálního zesilovače $u_d = 0$. Platí tedy, že napětí na vstupu OZ je rovno napětí na R_i . U ideálního zesilovače jsou nulové vstupní proudy, což odpovídá nekonečně velkým vstupním odporům. Z toho vyplývá, že proud $i_{vstup} = i_{výstup}$. Můžeme tedy odvodit zesílení A_U :

$$A_U = \frac{u_{výstup}}{u_{vstup}} = \frac{(R_i + R_f) i_{výstup}}{R_i i_{vstup}}, \quad A_U = \frac{R_i + R_f}{R_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i}.$$

Vstupní odpor (impedance) zesilovače v neinvertujícím zapojení je u ideálního OZ nekonečná, u reálného OZ je rovna vstupní impedanci použitého OZ.

3.2.5 Komparátor

OZ reaguje na rozdíl napětí na vstupech. Protože zesílení OZ bez zavedené zpětné vazby je velmi vysoké (reálně 10^5 – 10^6), stačí velmi malý rozdíl napětí na vstupech a na výstupu se objeví saturační napětí (kladné, nebo záporné, podle smyslu difference napětí na vstupech, viz Obr. 28). OZ v takovémto zapojení slouží jako komparátor. Komparátoru se nejčastěji využívá jako signalizátoru odchylky napětí na senzorech (např. tepelné čidlo apod.) od referenční hodnoty hlídané veličiny. Ve výše uvedeném příkladu teplotního čidla pak při poklesu teploty dojde k překlacení komparátoru a sepnutí zahřívání (termostat). Při praktické realizaci je téměř vždy nutné do zapojení zavést tzv. hysterezi. U termostatu hystereze znamená mírný rozdíl teplot, při kterém dojde k zapnutí a vypnutí zahřívání. Tím se zabrání neustálému zapínání/vypínání termostatu. Zavedení hystereze se realizuje zavedením kladné zpětné vazby, která má navíc i pozitivní vliv na rychlost překlápění komparátoru.



Obr. 28: Komparátor s hystezí. Výstup komparátoru se nachází na hladině $-V_{cc}$, dokud vstupní napětí nedosáhne hodnoty V_2 . Poté dojde k překlacení výstupu na hladinu $+V_{cc}$. K opětovnému překlacení dojde až po snížení vstupního napětí na úroveň V_1

Komparátor s hystezí se nazývá Schmittův klopný obvod. Na trhu jsou k dostání speciální OZ pro komparátory, zaručující velmi rychlé překlacení – např. LM311.

3.2.6 Integrátor a derivátor

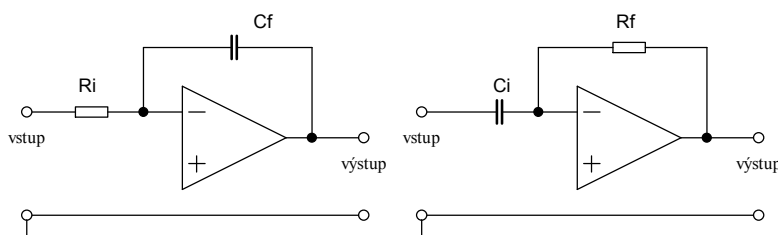
Mezi poměrně často využívaná zapojení OZ se řadí i integrátor a derivátor (Obr. 29). Pro výstupní napětí integrátoru a derivátoru platí vztahy:

$$U_{výstup} = \frac{1}{R_i C_f} \int_0^t U_{vstup} dt \quad (\text{integrátor}) \quad \text{a} \quad U_{výstup} = R_f C_i \frac{dU_{vstup}}{dt} \quad (\text{derivátor}).$$

Jak napovídá název, na výstupu integrátoru je napětí, které je úměrné integrálu napětí vstupního. Přivedeme-li na vstup konstantní napětí, napětí na výstupu postupně vzrůstá, protože

$$\left(\int_0^t U_{\text{vst.}} dt = U_{\text{vst.}} \cdot t \right).$$

Výstupní napětí ovšem nemůže překročit napětí napájecí, proto integrátor pracuje pouze do doby, než je dosaženo maximálního (nebo minimálního) výstupního napětí – dojde k tzv. „přetečení“ integrátoru. Poté je nutno integrátor „vynulovat“ zkratováním integračního kondenzátoru C_f .



Obr. 29: Integrátor (vlevo) a derivátor (vpravo)

3.3 Reálný operační zesilovač

Reálné OZ se ideálnímu OZ pouze přibližují. U OZ konkrétních typů bývá kladen důraz na jeden nebo skupinu parametrů. Údaje o vlastnostech konkrétních OZ jsou uváděny v katalogových listech, které lze nalézt na internetových stránkách jednotlivých výrobců, nebo na specializovaných stránkách (např. www.alldatasheet.com).



ANALOG DEVICES

**Ultralow Offset Voltage
Operational Amplifier**

OP07

FEATURES

- Low V_{os} : 75 μV maximum
- Low V_{os} drift: 1.3 $\mu V/^{\circ}C$ maximum
- Ultrastable vs. time: 1.5 μV per month maximum
- Low noise: 0.6 μV p-p maximum
- Wide input voltage range: $\pm 14 V$ typical
- Wide supply voltage range: $\pm 3 V$ to $\pm 18 V$
- 125 $^{\circ}C$ temperature-tested dice

APPLICATIONS

- Wireless base station control circuits
- Optical network control circuits
- Instrumentation
- Sensors and controls
- Thermocouples

PIN CONFIGURATION

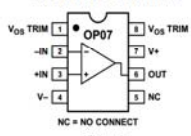
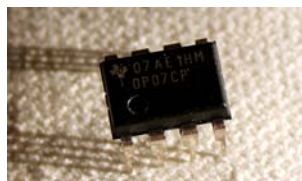


Figure 1.

The wide input voltage range of $\pm 13 V$ minimum combined with a high CMRR of 106 dB (OP07E) and high input impedance provide high accuracy in the noninverting configuration. Excellent linearity and gain accuracy can be



Obr. 30: Ukázka části první strany katalogového listu operačního zesilovače OP07 a fotografie tohoto OZ

Důležité jsou zejména následující parametry:

Zesílení naprázdno (open loop gain). Operační zesilovač pracuje téměř výhradně se zpětnou vazbou, vedenou z výstupu zpět na vstup. Je to obvykle zpětná vazba záporná a zmenšuje zesílení. O celkovém zesílení pak nerozhoduje vlastní operační zesilovač, nýbrž nastavení prvků zpětné vazby. Aby toto tvrzení platilo beze zbytku, musel by mít operační zesilovač nekonečně velké zesílení (ideální OZ), reálné hodnoty se pohybují v rozmezí 10^4 až 10^8 . Např. u typu

$\mu A741$ výrobci obvykle uvádějí hodnotu 50 000 až 150 000, což je zesílení vysoké vzhledem k tomu, že v běžných situacích se používá zesílení např. stokrát.

Vstupní impedance (odpor). Tento parametr je důležitý zejména u situací, kdy nelze zatěžovat obvody, ke kterým je OZ připojen a od kterých získává signál. Vstupní odpor se liší podle technologie, kterou byla vyrobena vstupní část obvodu OZ. Zatímco OZ vyrobené běžnou bipolární technologií mají vstupní odpor v rozmezí přibližně 50 k Ω až 2 M Ω (samozřejmě záleží i na použitém zapojení), OZ s polem řízenými tranzistory na vstupech se vyznačují vstupním odporem o mnoho řádů vyšším, takže připojené obvody prakticky nezatěžují (ideální OZ má vstupní odpor nekonečný). Vstupní odpory OZ typu JFET se pohybují v oblasti 10¹² Ω , u BIFET a BIMOS OZ může vstupní odpor dosahovat až 10¹⁵ Ω .

Výstupní impedance (odpor). Požaduje se, aby zesílení bylo nezávislé na zatížení výstupu zesilovače. Jinak řečeno, neměla by ho ovlivňovat velikost impedance zátěže (odporu), což u tranzistorového zesilovače nelze dosáhnout. Ani operační zesilovač tento požadavek nesplní stoprocentně, ale velmi se tomu blíží. Výstupní impedance OZ má být co nejmenší, nejlépe rovna nule (ideální OZ).

Nulovému vstupnímu napětí musí odpovídat nulové výstupní napětí (ideální OZ). U reálného OZ se nepříznivě projevuje několik skutečností:

a) Vstupní napěťová nesymetrie

Způsobuje ji nedokonalá symetrie vstupních obvodů. Ty nejsou nikdy naprosto stejné, a tak se objeví určité, třebaže malé výstupní napětí, a to za situace, kdy na vstupu není žádný signál. Tuto chybu je možné a zpravidla i nutné dodatečně kompenzovat, některé OZ mají vstupy, ke kterým se připojí kompenzační obvod (nejčastěji jde o proměnný odpor – konkrétní zapojení lze nalézt v katalogovém listu OZ). Změna vstupní napěťové nesymetrie v čase se označuje jako drift. Protože nejzávažnějším původcem driftu je teplota polovodičových přechodů, vstupní napěťovou nesymetrii se podaří vykompenzovat zpravidla až po zahřátí integrovaného obvodu na provozní teplotu.

b) Vstupní klidový proud

Způsobují ho nestejně velké proudy, které tečou do každého vstupu. Bipolární OZ mají o několik řádů vyšší vstupní klidové proudy, což je dáno podstatou činnosti bipolárních tranzistorů proti unipolárním. Na druhou stranu, vlivem driftu dochází k poměrně značné změně klidového proudu právě u operačních zesilovačů s FET na vstupu. Velký vliv na vznik klidového proudu mají rezistory připojené ke každému vstupu, tj. zařazené do cesty proudu. Požaduje se proto, aby k oběma vstupům byly připojeny identické odpory. To ale není vůbec jednoduché dodržet. Do druhého vstupu se musí zapojit stejně velký odpor, který se rovná výsledné hodnotě paralelního spojení odporů, které vedou k neuzemněnému vstupu (např. u zapojení OZ jako invertující zesilovač (Obr. 27C) je tento odpor zapojen mezi neinvertující vstup a zem). Zařazení odporu kompenzujícího vstupní proud OZ je tím potřebnější, čím mají zapojené odpory vyšší hodnoty.

Při *zesilování střídavého napětí* se zesílení směrem k vyšším kmitočtům zmenšuje. Mění se i fáze výstupního signálu ve srovnání s fází signálu vstupního, což bývá příčinou nestability zesilovače, projevující se zakmitáváním, případně úplným rozkmitáním, k němuž dojde tehdy, když se fáze otočí až o 180°, takže z původní záporné zpětné vazby se stane zpětná vazba kladná. Proto se zavádí kmitočtová kompenzace pomocí jedné nebo několika pasivních součástek, připojených zvenku k operačnímu zesilovači. Některé mají tuto kmitočtovou kompenzaci již zabudovanou uvnitř a nazýváme ji vnitřní kmitočtovou kompenzací. V katalogovém listu bývá uvedena závislost zesílení OZ na frekvenci vstupního signálu pro OZ bez zavedené zpětné vazby (open loop gain). Pro OZ OP07 je tato závislost uvedena na Obr. 31. Od určité frekvence (označené bodem „1“) zesílení OZ klesá přibližně desetkrát při desetinásobném zvýšení frekvence vstupního signálu (tj. o dvacet decibel na dekádu). Od určité, tzv. mezní frekvence (označené na obr. jako bod „2“) již zesilovač nezesiluje (zesílení je 1, tj. 0 dB). Zavedeme-li zpětnou vazbu (tj. realizujeme-li zapojení OZ jako invertujícího nebo

neinvertujícího zesilovače), je zesílení konstantní pro vstupní signály o frekvenci nižší, než je frekvence určená jako průsečík křivky na obr. s hodnotou na ose Y udávající nastavené zesílení – např. pro desetinásobné zesílení (tj. 20 dB) je mezní frekvence cca 100 kHz, bod je v grafu vyznačen křížkem. Potřebujeme-li desetinásobné zesílení frekvencí vyšších než uvedených 100 kHz, je třeba zvolit místo OP07 jiný typ OZ.

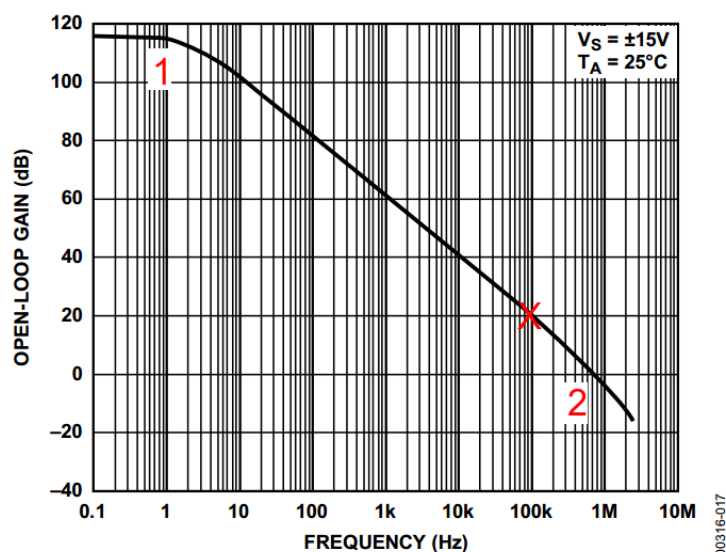


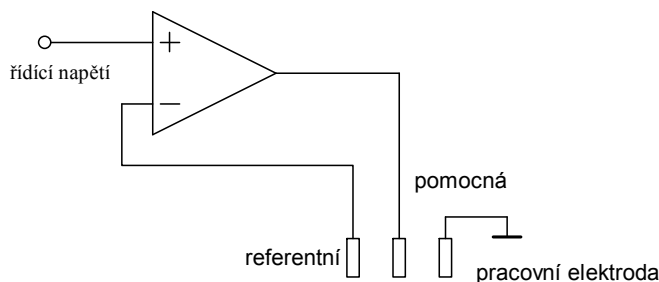
Figure 17. Open-Loop Frequency Response

Obr. 31: Závislost zesílení na frekvenci, převzatá z katalogového listu OZ OP07

Důležitý parametr je tzv. *rychlost přeběhu*. V podstatě jde o rychlost změny výstupního napětí, kterou operační zesilovač dokáže vyvinout za zlomek sekundy, přesněji za jednu mikrosekundu. Udává se ve voltech za mikrosekundu (V/μs). Platí, že čím vyšší rychlost, tím větší šíře přenášeného pásma a menší nelineární zkreslení (pokles zesílení se zvyšujícím se kmitočtem).

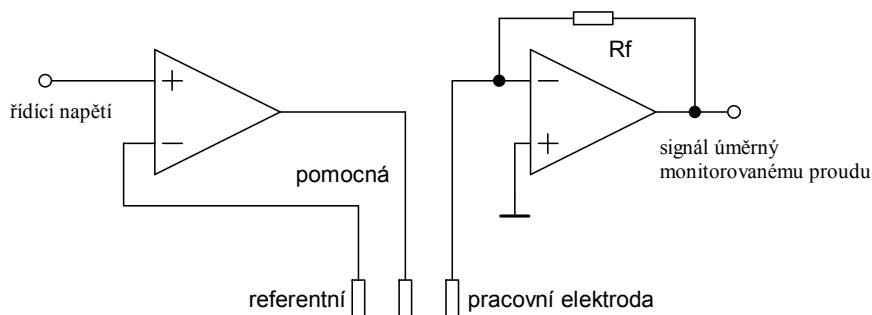
3.4 Využití OZ v elektrochemii – potenciostat

Voltametrická měření se téměř výhradně uskutečňují v tzv. tříelektrodovém zapojení, při kterém je kromě pracovní a referentní elektrody přítomna ještě tzv. pomocná elektroda. Prostřednictvím řídicího napětí je kontrolován potenciál pracovní elektrody, podle jeho časového průběhu můžeme uskutečňovat různé elektrochemické techniky (např. polarografii, cyklickou voltametrii, diferenční pulsní voltametrii apod.). Tříelektrodové zapojení má dvě výhody: precizní kontrolu potenciálu (ve srovnání se zapojením dvouelektrodovým), protože referentní elektrodou neprochází proud. Proud naopak prochází mezi pomocnou a pracovní elektrodou. Druhou výhodou je částečná kompenzace ztrát způsobených vnitřním odporem zkoumaného roztoku (IR spád). Použití OZ jako potenciostatu (Obr. 32) spočívá ve faktu, že na vstupech OZ je při zavedené zpětné vazbě vždy stejné napětí. Zapojíme-li referentní elektrodu na invertující vstup OZ, k výstupu OZ pomocnou elektrodou a požadovaný potenciál vkládáme na neinvertující vstup, pak při uzeměné pracovní elektrodě bude potenciál mezi pracovní a referentní elektrodou vždy známý a roven vkládanému napětí. Referentní elektrodou prochází zanedbatelný vstupní proud OZ, naopak veškerý proud je veden pomocnou elektrodou do výstupu OZ, který změnou výstupního napětí udržuje potenciál referentní elektrody, nastavený na neinvertujícím vstupu OZ.



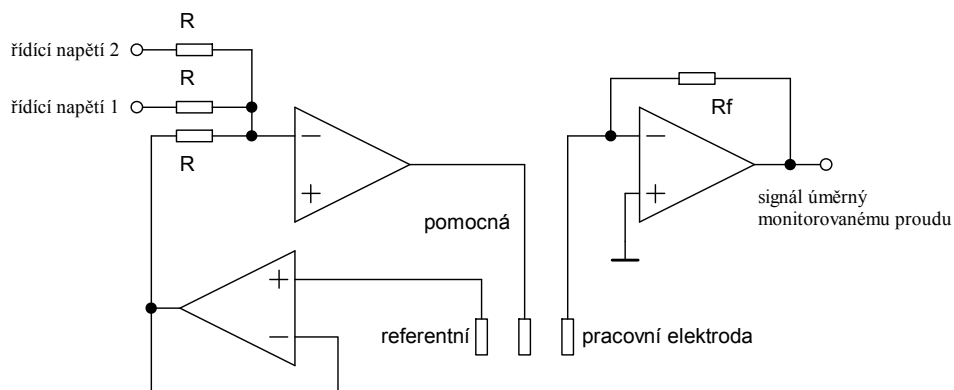
Obr. 32: Potenciostat

U potenciostatu tohoto typu je, jak již bylo uvedeno, pracovní elektroda připojena k nulovému potenciálu (zemi). Pro sledování elektrochemického experimentu je nutno obvod doplnit obvodem, který umožňuje měřit proud protékající pracovní elektrodou. Nejčastějším řešením této úlohy je zapojení pracovní elektrody na vstup převodníku proud/napětí (Obr. 33). Na výstupu OZ převodníku je napětí, které je úměrné proudu protékajícímu pracovní elektrodou. Elektroda již sice není přímo uzemněna, ale nachází se na virtuální zemi OZ, tím pádem je její potenciál konstantní a prakticky roven potenciálu země.



Obr. 33: Potenciostat s pracovní elektrodou připojenou k proudovému sledovači

V literatuře je často uváděno jiné zapojení potenciostatu, založené na sčítacím obvodu. Referentní elektroda je přes sledovač napětí (aby nebyla proudově zatěžována) připojena k invertujícímu vstupu OZ, k invertujícímu vstupu je přivedeno i řídící napětí. Toto tzv. zapojení se třemi OZ (three opamp circuit, též de Fordův potenciostat, Obr. 34) nevykazuje zvláštních výhod oproti předchozímu zapojení – je zajímavé spíše z historického hlediska, protože umožňuje řídící napětí složit z dílčích napěťových průběhů (např. u diferenční pulsní voltametrie je možné na vstup přivést lineárně rostoucí napětí a napěťové pulsy ze dvou různých zdrojů).



Obr. 34: De Fordův potenciostat

Snímání proudu pomocí proudového sledovače se používá spíše pro malé proudy a vnáší do potenciostatu nestabilitu. Elektrodová dvojvrstva na pracovní elektrodě má značnou kapacitu, což mění napěťový sledovač na derivátor. Potenciostat je náchylný k rozkmitání, tento jev lze omezit buďto zapojením kondenzátoru paralelně ke zpětnovazebnímu odporu, nebo vložením kondenzátoru mezi pomocnou a referentní elektrodu. Jiným způsobem monitorování proudu je vřazení odporu mezi výstup OZ a pomocnou elektrodu. Jelikož proud v tříelektrodovém zapojení protéká mezi pomocnou a pracovní elektrodou, napěťový úbytek na měřicím odporu je přímo úměrný protékajícímu proudu. Snímání napětí na měřicím odporu se realizuje pomocí OZ zapojeného jako diferenční zesilovač. Zapojení využívající tento princip označována jako zapojení podle Wenkinga.

4 Číslicová technika

Elektronické obvody dělíme na:

- analogové (jsou založené na kontinuální formě informace; např. ručičkové hodiny s mechanickými převody). Analogová elektronika není pro řešení některých problémů vhodná či dokonce selhává.
- číslicové (informace je reprezentována a zpracovávána v diskrétní a ne kontinuální podobě; např. hodiny, které zobrazují čas jako čísla).

Číslicový (digitální) systém je takový systém, který nějakým způsobem pracuje s informacemi reprezentovanými v číselné formě. Typickým příkladem číslicového systému je počítač. Informace je v digitálním systému reprezentována a zpracovávána v diskrétní podobě. Opakem je analogový systém, který pracuje s hodnotami, které mění spojitě. Na pomezí analogového a číslicového elektronického obvodu je komparátor, který jako výsledek porovnání dvou analogových napětí vrátí logickou hodnotu. V číslicových obvodech jsou součástky používány ve spínacím režimu. To umožňuje abstrahovat od jejich analogové povahy a pracovat s nimi jako by byly diskrétní a zpracovávaly pouze číslicovou informaci. Logické obvody lze realizovat nejen elektronicky, ale též na elektromechanickém, čistě mechanickém, optickém nebo jiném principu. Proti převažující elektronice mají ale dnes tyto realizace zanedbatelný význam. Elektronické logické obvody se skládají ze stejných základních prvků, tzv. logických členů (nazývaných též hradla).

Logické obvody dělíme na:

- kombinační, u kterých jsou hodnoty výstupních proměnných pouze funkcí hodnot vstupních proměnných. Kombinační proto, že výstupní hodnoty jsou nějakou kombinací vstupních hodnot.
- Sekvenční, u kterých výstupní hodnoty závisejí nejen na kombinaci vstupních hodnot, ale též na určité posloupnosti sekvencí předchozích vstupních hodnot.

Sekvenční logické obvody lze dále dělit na

- asynchronní – logický systém je systém dynamicky pracující v čase. Hodnoty výstupních proměnných se mění v určitých časových okamžicích. Pokud se změny stavu výstupů dějí v okamžiku změn vstupních proměnných, jde o asynchronní logický systém.
- synchronní – u synchronních systémů jsou okamžiky změn výstupů určeny periodou tzv. synchronizační (hodinové) proměnné (hodiny, CLK). Signál CLK je generován speciálním oscilátorem v okolí systému. Zpravidla se nepovažuje za vstupní proměnnou.

4.1 Logické stavy, číselné systémy, binární kódy

Čísla mohou být reprezentována v různých číselných soustavách. Od raného mládí drtivá většina lidí používá desítkovou soustavu. Tato soustava reprezentuje čísla v mocninách deseti a byla pravděpodobně vyvinuta vzhledem k faktu, že člověk má deset prstů. Základ této soustavy je 10, neboť je použito 10 základních číslic (0–9). Poloha číslice v čísle určuje jeho váhu, čímž je možné vyjádřit čísla větší než 10. Říkáme, že 10 je základem tzv. desítkové soustavy. Desítková soustava není jediná možná, vybudovat lze číselnou soustavu s libovolným kladným celočíselným základem z . Obecně libovolné racionální číslo vyjádřené v číselné soustavě s celočíselným kladným základem z můžeme zapsat jako:

$$(P)_n = V_n z^n + V_{n-1} z^{n-1} + \dots + V_1 z^1 + V_0 z^0 + V_{-1} z^{-1} + \dots + V_{-n'} z^{-n'},$$

kde mocnina základu z^n vyznačuje váhu číslice V_n . Váha číslice se označuje jeho polohou. Např. v desítkové soustavě:

$$524,6 = 5 \cdot 10^2 + 2 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0 + 6 \cdot 10^{-1}.$$

Dělicí čárka (.) odděluje tzv. celočíselnou a neceločíselnou část čísla. Výpočetní stroje mohou být zkonstruovány na základě libovolné číselné soustavy, nicméně všechny moderní počítače jsou založeny na binární soustavě. Pro elektronické obvody je totiž mnohem snadnější rozlišit mezi dvěma stavy než mezi např. deseti stavy. S případy, kdy předměty nebo vlastnosti nabývají jen dvou užitečných stavů, se lze setkat ve všech oborech lidské činnosti. Tyto stavy jsou často vzájemně opačné: žárovka svítí nebo nesvítí, spínač je zapnut nebo vypnut, materiál je magnetován nebo odmagnetován, proud obvodem protéká nebo neprotéká atd.

Základem binární číselné soustavy je číslo 2. Možné číslice jsou pouze 0 a 1, uvedené možnosti se nazývají bity (označují se malým písmenem b , např. 1 b). Pomocí tohoto schématu můžeme převádět dvojková čísla na dekadická, jejichž velikost můžeme snadněji odhadnout. Např. binární číslo 11010 je v dekadické soustavě vyjádřeno jako 26:

$$11010 = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 26.$$

Opačný převod z dekadické soustavy na binární je složitější a existuje několik algoritmů převodu, např. metoda postupného odečítání. Na internetu existuje celá řada stránek, které po zadání číslice v dekadické soustavě převod do binární soustavy provedou. Binární číslo lze chápat jako posloupnost bitů, z nichž bit vlevo (u číslice 26 jde o bit 1 ($1 \cdot 2^4$)) je tzv. nejvýznamnější bit – MSB, most significant bit – jeho změnou dojde k významné změně hodnoty čísla z 26 na 10 (obecně je MSB nejvyšší číslice, pokud však datový typ podporuje obor záporných čísel, je MSB bit určen pro znaménko). Bit vpravo ($0 \cdot 2^0$) je nejméně významný – LSB, least significant bit, jeho změnou dojde ke změně hodnoty čísla pouze o jednotku (z 26 na 27). Odvozenou jednotkou pro binární číslice je byte, vyjadřující skupinu osmi bitů, označuje se velkým písmenem B (8b = 1B). Násobné hodnoty se tvoří předponami kilo-, mega-, giga-, nicméně se nejedná o dekadické násobky, ale o násobky čísla 2^{10} , tj. 1024 (např. 1 kB = 1024 B).

Ve výpočetní technice je poměrně často používáno i vyjadřování číslic pomocí šestnáctkové soustavy, tj. hexadecimálním kódem. V něm mají číslice 0 až 9 stejný význam jako v desítkové soustavě a číslice 10 až 15 jsou vyjádřeny znaky A–F. Popularita této soustavy je dána faktem,

že rozdělíme-li bity binárního čísla po čtveřicích (není-li počet číslic v binárním čísle dělitelný čtyřmi, doplníme číslo ze strany MSB nulami), mohou jednotlivé čtveřice nabývat hodnot právě 0–F. Převod z binární do hexadecimální soustavy a zpět je tedy velmi jednoduchý a značně zpřehledňuje zápis jinak nepřehledných binárních čísel. Pro odlišení hexadecimálních od desítkových číslic se často používá označení „H“ za číslicí, např. 10H = (16)₁₀. Někdy bývá obdobně využíván i osmičkový kód, osmičková (oktalová) soustava umožňuje jednoduché převody mezi soustavami po rozdělení binárního čísla na trojice bitů. Kromě hexadecimální a oktalové soustavy se občas využívá i tzv. BCD kód, kdy je desítková číslice zakódována do čtyř bitů, např.:

$$(726)_{10} = (0111\ 0010\ 0110)_{\text{BCD}}$$

Protože v každé čtveřici bitů je možné zakódovat nikoli jen 10, ale 16 znaků, říkáme, že BCD kód je redundantní, tj. nevyužívá všechny možnosti. Jeho výhodou je ovšem snadný převod mezi číslicemi vyjádřenými v tomto kódu a desítkovou soustavou.

Pro kódování číslic, znaků anglické abecedy a některých dalších znaků je nejčastěji využíváno tzv. ASCII kódu (American Standard Code for Information Interchange). Původně jde o sedmibitový kód (obsahuje tudíž 128 položek), zahrnující tzv. netisknutelné znaky (sloužící k formátování textu (např. odřádkování) a řízení tisku na historických tiskárnách) a řadu tisknutelných znaků. Na Obr. 35 je znázorněn ASCII kód ve formě tabulky. Potřebujeme-li přiřadit ASCII hodnotu určitému znaku, postupujeme následujícím způsobem: požadovaný znak (např. písmeno X) najdeme v tabulce, je v řádku označeném číslicí 5 a ve sloupci s číslem 8. Uvedená dvě čísla tvoří ASCII kód v hexadecimálním tvaru (58H). Převodem do desítkové soustavy obdržíme 88, v počítačové paměti je znak X reprezentován binárním číslem 1011000 (pro převádění číslic mezi různými číselnými systémy je možné využít nepřeberné množství konverzních nástrojů dostupných na internetu, nebo kalkulačky Windows po přepnutí do programátorského módu).

ASCII Code Chart																
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	NUL	SOH	STX	ETX	EOT	ENQ	ACK	BEL	BS	HT	LF	VT	FF	CR	SO	SI
1	DLE	DC1	DC2	DC3	DC4	NAK	SYN	ETB	CAN	EM	SUB	ESC	FS	GS	RS	US
2		!	"	#	\$	%	&	'	(	)	*	+	,	-	.	/
3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[	\	]	^	_
6	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{		}	~	DEL

Obr. 35: ASCII kódová tabulka, netisknutelné znaky jsou vybarveny

Protože je potřebné kódovat větší počet znaků, než 128 (zejména jde o znaky různých národních abeced, ale např. i matematické symboly apod.) doplňuje se sedmibitový ASCII kód jedním bitem navíc na kód osmibitový. To umožňuje zakódovat dalších 128 znaků. Definice těchto znaků navíc jsou závislé na výběru konkrétní kódovací tabulky, pro českou abecedu používá firma Microsoft v operačních systémech Windows kódovou tabulku Windows-1250. Uvedená osmibitová rozšíření ASCII jsou ovšem postupně nahrazována kódováním Unicode. Unicode je tabulka znaků všech existujících abeced, která v současnosti obsahuje více než 110 000 znaků. Na rozdíl od dřívějších osmibitových tabulek znaků jako je Windows-1250 lze znaky zobrazit

zároveň; v jednom textu lze tedy kombinovat např. češtinu (latinka), ruštinu (azbuka) a řečtinu (alfabeta).

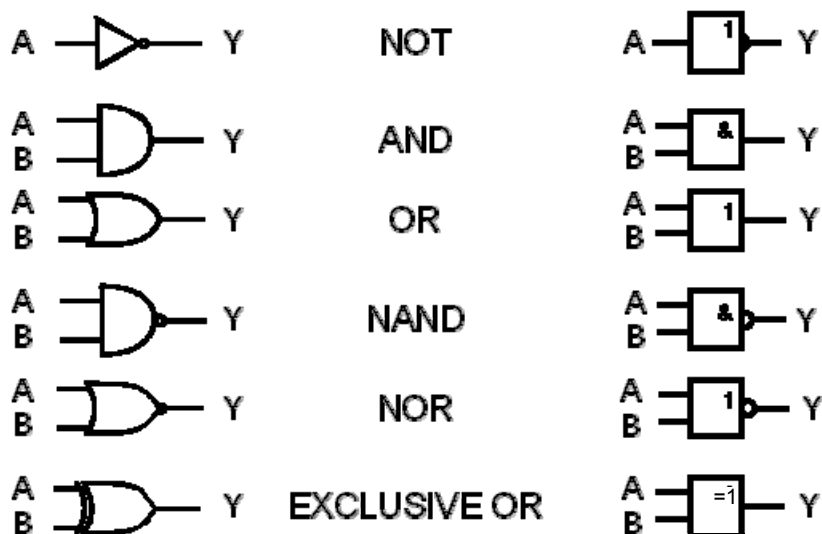
4.2 Typy logických obvodů

4.2.1 Kombinační logické obvody

Hradla

Základními logickými obvody, tvořící základní stavební prvky pro obvody složitější jsou hradla. Hradlo má jeden nebo dva vstupy a jeden výstup. I když pro kombinace dvou vstupních proměnných existuje 16 možností, jak se bude chovat výstupní signál, v praxi se vyrábí pouze několik typů hradel. Jsou to hradla NOT, AND, OR, NOR a exclusive OR (Obr. 36). Ve schématech jsou logické členy – hradla znázorňovány dvěma způsoby (oba jsou definovány normami ANSI/IEEE Std 91-1984 a dodatkem ANSI/IEEE Std 91a-1991):

- Značky složené z křivek (ANSI), rozšířené ve většině profesionálních systémů pro návrh logických obvodů.
- Čtvercové značky (IEC) – funkce logického členu je označena znaky „&“ je pro funkci AND a „≥1“ pro funkci OR negovaný výstup je označen kolečkem (funkce NOT je proto znázorněna jako jednovstupový OR s negovaným výstupem)



Obr. 36: Značky nejdůležitějších logických hradel

Ke každé logické funkci, jejíž realizaci hradlo zabezpečuje, lze sestavit tzv. pravdivostní tabulku. V záhlaví pravdivostní tabulky jsou (zleva) uvedeny jednotlivé vstupy hradla. V řádcích jsou uvedeny možné hodnoty vstupů, jejichž kombinace má za následek určitou výstupní hodnotu. Přehled hradel, jejich značek a popis funkce lze nalézt v přehledné tabulce na str. 45. Pro realizaci číslicových obvodů nepotřebujeme všechna uvedená hradla. Lze ukázat, že pomocí základních logických členů (hradel) AND, OR a NOT lze realizovat libovolný logický obvod a tedy i číslicový systém. Dále lze ukázat, že funkce AND a OR jsou za pomoci funkce NOT komplementární, což znamená, že je lze vhodným způsobem vzájemně nahradit. Pro implementaci jakéhokoli číslicového systému je potřeba pouze dvou logických členů, např. AND a NOT, či OR a NOT. Větší výběr hradel ovšem značně usnadňuje návrh číslicových

obvodů. Pomocí hradel se realizují následující složitější typy kombinačních obvodů, jejichž zapojení lze nalézt např. na internetu:

- **obvody, zabezpečující převod mezi kódy**

Kódem se rozumí předpis, který určité skupině signálů přiřazuje určitý význam nebo hodnotu. Nejčastěji se jedná o následující obvody:

kodér – dekadická soustava (výběrový kód 1 z n) → binární kód (BCD)

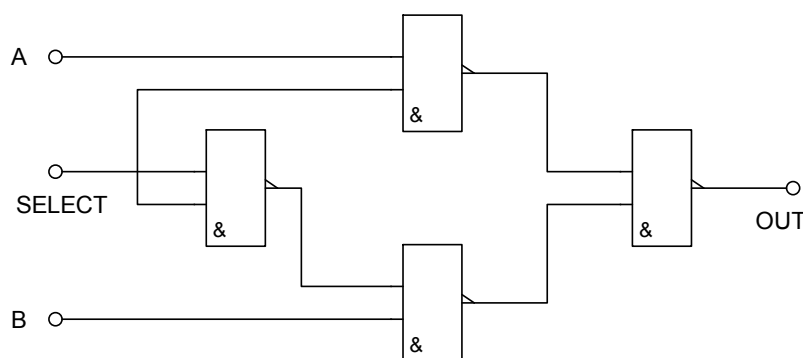
dekodér – binární kód (BCD) → dekadická soustava (výběrový kód 1 z n)

převodník - kód → kód (všeobecně)

- **multiplexery a demultiplexery**, tj. přepínače číslicových signálů.

multiplexer – n vstupů → 1 výstup (viz příklad na Obr. 37)

demultiplexer – 1 vstup → n výstupů



Obr. 37: Dvojbitový multiplexer realizovaný pomocí hradel NAND. Je-li na vstupu SELECT logická 1, objeví se na výstupu signál A (při log. 0 na vstupu SELECT bude výstup propojen se vstupem B)

- **aritmetické obvody**

komparátor – porovnávací obvod

sčítačka – aritmetické sčítání

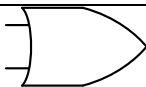
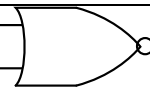
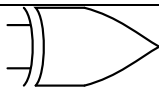
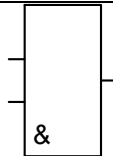
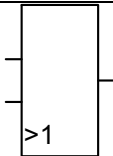
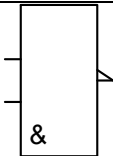
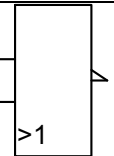
generátor parity – kontrola

selektor sig. – výběr signálů

slučovač – vytvoření 2n-bitového signálu z 2 n-bitových signálů

aritmeticko-logická jednotka

- **oddělovače a budiče pro sběrnice**

Název hradla	NOT	AND	OR	NAND Shefferova funkce	NOR Pierceova funkce	XOR Exclusive or																																																																																	
ANSI/MIL																																																																																							
IEC																																																																																							
Logická operace	inverze	Logický součin (konjunkce)	Logický součet (disjunkce)	Negovaný logický součin	Negovaný logický součet	Exklusivní logický součet																																																																																	
Symbolický zápis	$Y = \overline{X}$	$Y = X1 \cdot X2$	$Y = X1 + X2$	$Y = \overline{X1} \cdot \overline{X2}$	$Y = \overline{X1} + \overline{X2}$	$Y = X1 \oplus X2 =$ $= \overline{X1} \cdot X2 + X1 \cdot \overline{X2}$																																																																																	
Význam		Pravda, právě když obě vstupní hodnoty jsou pravda	Pravda, když je alespoň jedna vstupní hodnota pravda			Pravda, pokud nejsou na vstupech stejné hodnoty																																																																																	
Pravdivostní tabulka	<table><tr><td>X</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X	Y	0	1	1	0	<table><tr><td>X1</td><td>X2</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X1	X2	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table><tr><td>X1</td><td>X2</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	X1	X2	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<table><tr><td>X1</td><td>X2</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X1	X2	Y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	<table><tr><td>X1</td><td>X2</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X1	X2	Y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	<table><tr><td>X1</td><td>X2</td><td>Y</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	X1	X2	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
X	Y																																																																																						
0	1																																																																																						
1	0																																																																																						
X1	X2	Y																																																																																					
0	0	0																																																																																					
0	1	0																																																																																					
1	0	0																																																																																					
1	1	1																																																																																					
X1	X2	Y																																																																																					
0	0	0																																																																																					
0	1	1																																																																																					
1	0	1																																																																																					
1	1	1																																																																																					
X1	X2	Y																																																																																					
0	0	1																																																																																					
0	1	1																																																																																					
1	0	1																																																																																					
1	1	0																																																																																					
X1	X2	Y																																																																																					
0	0	1																																																																																					
0	1	0																																																																																					
1	0	0																																																																																					
1	1	0																																																																																					
X1	X2	Y																																																																																					
0	0	0																																																																																					
0	1	1																																																																																					
1	0	1																																																																																					
1	1	0																																																																																					

4.2.2 Sekvenční logické obvody

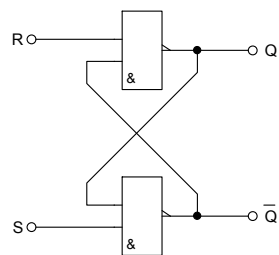
Sekvenční logické obvody jsou stejně jako obvody kombinační složeny z logických členů. Sekvenční obvod se skládá ze dvou částí – kombinační a paměťové. Abychom mohli určit stav výstupu, je potřeba u sekvenčních obvodů sledovat kromě vstupních proměnných ještě i jeho vnitřní proměnné, které jsou uchovány v paměťových členech. Existence vnitřních proměnných způsobuje, že stejné hodnoty vstupních proměnných přivedené na vstup obvodu, nevyvolávají vždy stejnou odezvu na výstupu obvodu. Jak již bylo uvedeno, sekvenční logické obvody lze dále dělit na: asynchronní, u kterých probíhají změny stavu výstupů ihned v okamžiku změny vstupních proměnných. U synchronních systémů se stavy výstupů mění v okamžiku, kdy se na vstupu synchronizační (hodinové) proměnné (hodiny, CLK) objeví logická jednička. Signál CLK je periodický a je generován speciálním oscilátorem v okolí systému a zpravidla se nepovažuje za vstupní proměnnou. Z běžného života je pojem znám z oblasti výpočetní techniky, např. „procesor Core2duo s taktovací frekvencí 3,33 GHz“. Podle reakce na hodinový signál lze synchronní sekvenční obvody dále dělit na úroňové a hranové:

- Úroňové – sekvenční obvod sleduje hodnoty vstupních proměnných a tím i jejich změny po celou dobu trvání hodinového signálu a průběžně na ně reaguje.
- Hranové – sekvenční obvod reaguje na hodnoty vstupních proměnných jen při příchodu hrany hodinového signálu (náběžná nebo sestupná hrana).

Nejvýznamnější sekvenční obvody jsou:

- **elementární sekvenční obvody** – klopné obvody (např. RS, T, D, JK). Ostatní sekvenční obvody jsou z klopných obvodů složeny,
- **registry** – obvody sloužící k uchování n-bitové informace:
 - o paralelní registr,
 - o sériový (posuvný) registr.
- **čítače:**
 - o asynchronní čítač s plným nebo zkráceným cyklem počítání,
 - o synchronní čítač s plným nebo zkráceným cyklem počítání,
 - o speciální čítače – Johnsonův, kruhový, vratný.
- **paměti:**
 - o SRAM – statická paměť RAM,
 - o DRAM – dynamická paměť RAM.

Klopné obvody se dělí na monostabilní, astabilní a bistabilní. Monostabilní klopný obvod má jeden stabilní stav (log. 0 nebo 1), ze kterého se překlopí příchodem impulsu do tzv. kvazi-stabilního stavu (log. 1 nebo 0), po určité době se vrátí zpátky do stabilního stavu. Astabilní klopný obvod (multivibrátor) periodicky přepíná mezi log. 0 a 1, slouží jako zdroj hodinových impulsů (CLK). U bistabilních klopných obvodů se výstupy mohou nacházet v obou logických stavech, lze je přepínat pomocí signálů přivedených na vstupy. Právě bistabilní klopné obvody se používají jako paměťové prvky. Nejjednodušším bistabilním klopným obvodem je klopný obvod R-S. Lze jej realizovat ze dvou hradel NAND (Obr. 38), případně i jiných hradel, viz str. 43. Přehled základních typů klopných obvodů, včetně popisu funkce a pravdivostních tabulek je uveden na str. 48.



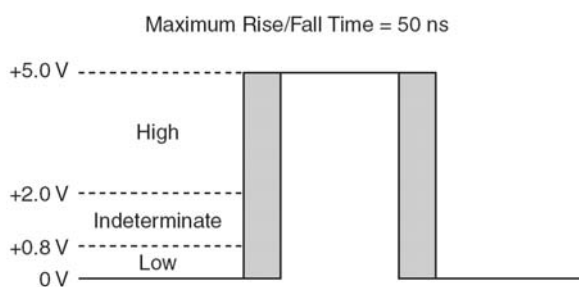
Obr. 38: Realizace klopného obvodu R-S pomocí hradel NAND. Poskytuje stejnou odezvu na výstupech Q, a jako obvod RS v Tab. XX, pokud jsou na vstupech R a S opačné logické hodnoty – při praktické realizaci formou integrovaného obvodu jsou před vstupy R a S ještě zařazeny invertory

Název klopného obvodu	Asynchronní R-S	Synchronní R-S	J-K	D	T																																																															
Schematická značka																																																																				
Varianta obvodu	Obvody s prioritou log. 0 nebo 1 – při hazardním stavu je výstup nastaven na log. 0 nebo 1.																																																																			
Význam vývodů	S (Set), R (Reset), – Q a Q̄ (výstup a negovaný výstup)	C (Clock) Trojúhelník u vývodu znamená, že je obvod řízen náběžnou hranou hod. pulsu (tj. jde o hranový synchronní obvod)	J,K – vstupy pojmenované podle vynálezce obvodu (Jack Kilby). Mnemotechnicky: J (Jump – „Nahod“), K (Kill – „Zruš“)	D – Data Vyrábí se pouze jako synchronní obvod.	T – Toggle (Přepni) Jde o JK obvod s propojenými vstupy J a K. Vzniklý vstup je označován jako T.																																																															
Popis funkce	V okamžiku vložení log. 1 na vstup R se na výstupu objeví log. 0. Při přepnutí vstupu S do stavu log. 1 se na Q nastaví log. 1. Jsou-li vstupy R a S ve stavu log. 0, na výstupu Q je naposledy nastavená hodnota.	Synchronní RS – stejná činnost jako asynchronní, přepíná však pouze, pokud je log 1 na vstupu C	Pokud je na vstupech J a K log. 1, pak je výstup Q invertován, tj. nacházel-li se ve stavu log. 1, je výstup přepnut do stavu log. 0. Jinak je chování stejné jako u obvodu RS,	Každý hodinový puls způsobí zapamatování hodnoty vstupu. Český název zdrž, anglicky delay.	Je-li na vstupu T log. 0, stav na výstupu se nezmění. Je-li na něm log. 1, výstup se překlápí do opačného stavu.																																																															
Typická oblast využití	Ošetření zákmitů tlačítek		JK je základem mnoha obvodů – posuvných registrů, generátorů impulsů apod.	Obvod D realizuje jednobitovou paměť.	Dělička frekvence pulsů hodnotou 2.																																																															
Pravdivostní tabulka	<table><tr><th>R</th><th>S</th><th>Q</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>zachovej stav</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>X</td></tr></table> X = hazardní stav (nesmí nastat)	R	S	Q	0	0	zachovej stav	1	0	1	0	1	0	1	1	X	Stejná jako u asynchronní varianty	<table><tr><th>C</th><th>J</th><th>K</th><th>Q</th></tr><tr><td>0</td><td>cokoli</td><td>cokoli</td><td>zachovej stav</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>zachovej stav</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>invertuj stav</td></tr></table>	C	J	K	Q	0	cokoli	cokoli	zachovej stav	1	0	0	zachovej stav	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	invertuj stav	<table><tr><th>C</th><th>D</th><th>Q</th></tr><tr><td>0</td><td>cokoli</td><td>Zachovej stav</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	C	D	Q	0	cokoli	Zachovej stav	1	0	0	1	1	1	<table><tr><th>C</th><th>T</th><th>Q</th></tr><tr><td>0</td><td>cokoli</td><td>zachovej stav</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>zachovej stav</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>invertuj stav</td></tr></table>	C	T	Q	0	cokoli	zachovej stav	1	0	zachovej stav	1	1	invertuj stav
R	S	Q																																																																		
0	0	zachovej stav																																																																		
1	0	1																																																																		
0	1	0																																																																		
1	1	X																																																																		
C	J	K	Q																																																																	
0	cokoli	cokoli	zachovej stav																																																																	
1	0	0	zachovej stav																																																																	
1	0	1	0																																																																	
1	1	0	1																																																																	
1	1	1	invertuj stav																																																																	
C	D	Q																																																																		
0	cokoli	Zachovej stav																																																																		
1	0	0																																																																		
1	1	1																																																																		
C	T	Q																																																																		
0	cokoli	zachovej stav																																																																		
1	0	zachovej stav																																																																		
1	1	invertuj stav																																																																		

4.2.3 Realizace logických obvodů

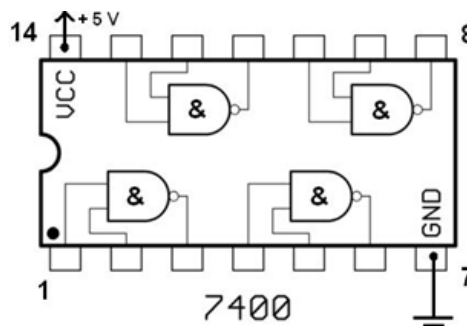
Obvody TTL (transistor-transistor logic, tj. tranzistorovo-tranzistorová logika) se vyznačují tím, že převažujícími prvky v obvodu jsou tranzistory. Hlavním obvodem logiky TTL je hradlo NAND. Parametry obvodů TTL jsou uvedeny v následující tabulce:

Napájecí napětí	$U_{cc} = 5V \pm 5\%$			
Vstupní napěťové úrovně a proudy	$U_{vst\ L} = 0,4\ V$ a méně	$U_{vst\ H} = 2,0\ V$ až $5\ V$	$I_{vst\ L} = 1,6\ mA$	$I_{vst\ H} = 2\ \mu A$
Výstupní napěťové úrovně a proudy	$U_{výst\ L} = 0,8\ V$	$U_{výst\ H} = 2,4\ V$	$I_{výst\ L} = 16\ mA$	$I_{výst\ H} = 20\ \mu A$
(mezi těmito napětími 0,4 a 2 V je stav neurčitosti, nelze předpovědět, zde se na výstupech hradel objeví jednička nebo nula, viz Obr. 39)				



Obr. 39: Napěťové úrovně TTL

Jak je vidět ze specifikace, výstupní proudy jsou desetkrát větší, než proudy vstupní. To znamená, že k výstupu jednoho hradla lze připojit deset jiných vstupů, tzv. zisk hradla je 10. U výkonových hradel je zisk dvojnásobný, čili $N = 20$ a znamená to, že je možné připojit až 20 vstupů na jediný výstup. Hradla, případně jiné obvody, jsou sdružovány do integrovaných obvodů (Obr. 40).



Obr. 40: Integrovaný logický obvod SN7400 a zapojení vývodů

TTL obvody jsou značeny následujícím kódem – např. MH74LS XX nebo XXX:

- MH, případně jiná písmena udávají výrobce (MH je Tesla, SN je Fairchild atd.).
- 74 určuje teplotní řadu. Běžné jsou 64 (0–80°), 74 (10–120°), 84 (15–125°). xx je typ obvodu.
- Následuje zvolená technologie výroby obvodu:
 - N Běžná řada N, často se písmeno N vynechává.
 - L Řada se sníženou spotřebou, od N se liší většími odpory, je však pomalejší.
 - H Dnes se již nepoužívá, je rychlá a má naopak menší hodnoty odporů a odlišné provedení koncového stupně.
 - S řada, která přebrala místo obvodům H. Tato řada využívá tzv. Schottkyho desaturační diody, tím je výrazně rychlejší, protože má výrazně menší zpoždění.
 - LS Řada, nejběžnější řada, stejně jako předchozí využívá Schottkyho diod a tranzistorů, ale má diodový vstup a nízkou spotřebu.
 - AS a ALS Vylepšené předchozí dvě řady.
 - F řada, o jejíž vývoj se postarala firma Fairchild. Tyto obvody se vyznačují mírně větší spotřebou, nižším zpožděním a velkým ziskem (kolem 30).
- Další dvě nebo tři číslice udávají typ obvodu, např. 00 je obvod obsahující čtyři dvouvstupová hradla NAND v jednom pouzdře, 74 je J-K klopný obvod apod. Dostupných obvodů je několik set typů, seznamy lze dohledat na internetu.

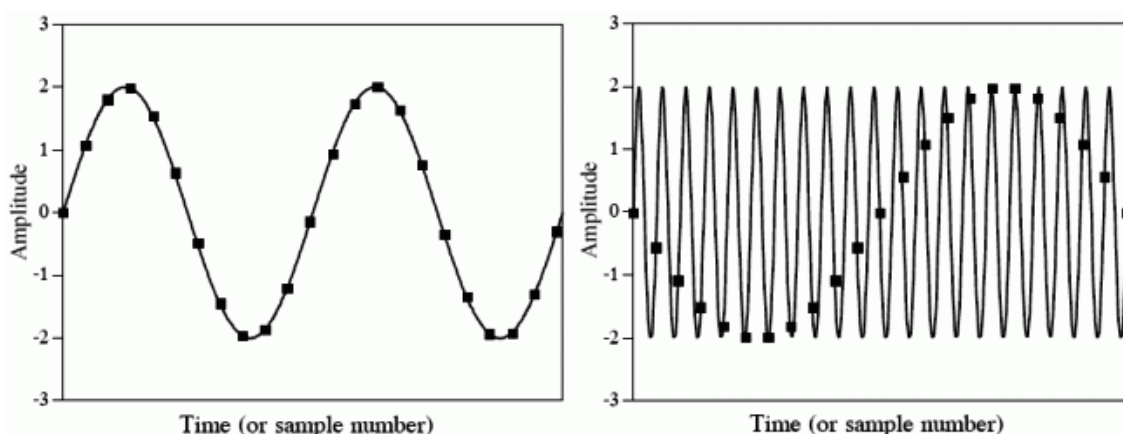
Kromě TTL jsou na trhu i jiné typy logických obvodů, vyznačující se např. nižší spotřebou, vyšší rychlostí apod. Logické obvody ECL (emitter coupled logic, tj. emitorově vázané obvody) jsou schopny zpracovávat signály o frekvenci až 5 GHz. Dosažení velké rychlosti je dosaženo minimalizováním saturačního napětí na tranzistorech. Další výhodou je schopnost zpracovat i velmi malé signály. Aplikace této řady však vyžaduje splnění náročných konstrukčních podmínek. Obvody PMOS, NMOS a CMOS využívají plem řízené tranzistory. Mají nízkou spotřebu, pokud jsou provozovány při nižších rychlostech. Logické úrovně jsou odlišné od TTL obvodů, kromě řady HCT, která je kompatibilní. Číselné označování typu obvodu bývá pro jednoduché logické obvody shodné s TTL řadou. Obvody MOS jsou nejčastěji využívanými prvky v dnešní výpočetní technice.

5 Převod AD a DA

Převodníky umožňující transformaci číslicově vyjádřené informace na analogové napětí a naopak zaujímají v měřicích systémech klíčové postavení. Značná část měřených veličin bývá obvykle zaznamenána ve formě časově spojitého průběhu analogového napětí a do číslicové formy se musí převést pomocí převodníku. Přesnost a rychlost převodu použitých převodníků je jedním z hlavních faktorů určujících použitelnost a kvalitu celého měřicího systému.

5.1 Vzorkování – vzorkovací teorém

Při převodu analogového signálu do digitální formy je signál podroben procesu vzorkování. Vzorkovací teorém (Nyquistovo kritérium) vyžaduje, aby vzorkování probíhalo nejméně dvojnásobnou frekvencí, než je nejvyšší frekvence vzorkovaného signálu. Pokud toto kritérium není dodrženo, dochází k nepřijatelnému zkreslení vzorkovaného signálu, tzv. aliasingu. Obr. 41 ukazuje analogový signál vzorkovaný s dostatečnou frekvencí (vlevo), při které je Nyquistovo kritérium splněno, vpravo je ukázka aliasingu – vznik „falešného“ signálu se zdánlivě nižší frekvencí, než má digitalizovaný signál.

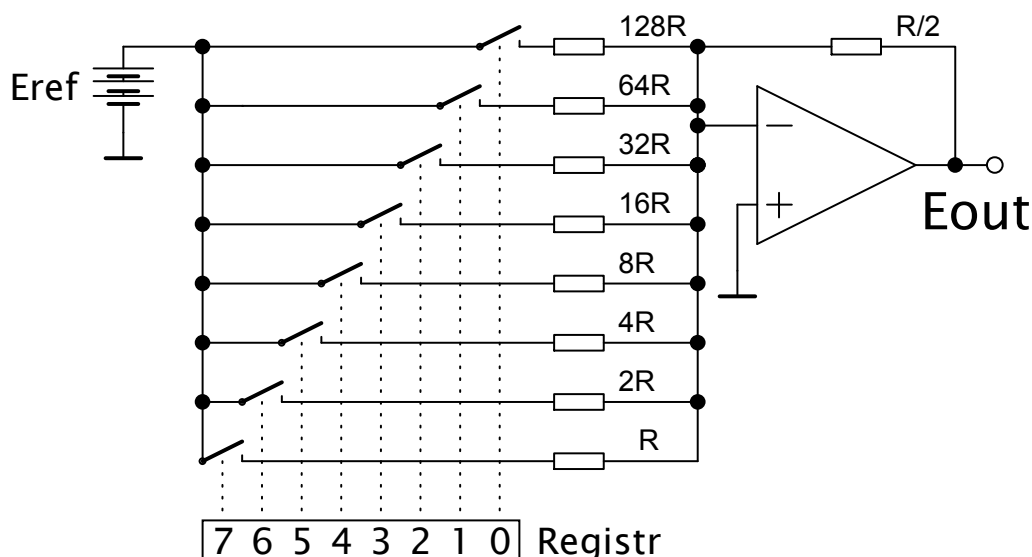


Obr. 41: Převod analogového signálu do digitální formy – vzorkování. Vpravo: vznik aliasingu

Projevy aliasingu jsou známy z běžného života, např. při pozorování televizního obrazu se někdy zdá, že kolo jedoucího auta zdánlivě stojí, nebo se otáčí opačným směrem v důsledku interference cyklického pohybu kola se snímkovou frekvencí, časté je též komíhání obrazu, pokud má hlasatel kostkovanou kravatu apod.

5.2 Převodník D/A

Převodník D/A (Obr. 42) slouží k převodu digitálního signálu na signál analogový, tj. ke generování napětí počítačem. Převodník D/A se skládá z OZ v invertujícím zapojení. Hlavní částí převodníku je odporová síť, jejíž jednotlivé odpory lze zapojovat pomocí počítačem řízených spínačů. Hodnota odporů je nepřímo úměrná tzv. váhové hodnotě bitu (tj. řádu binární číslice).

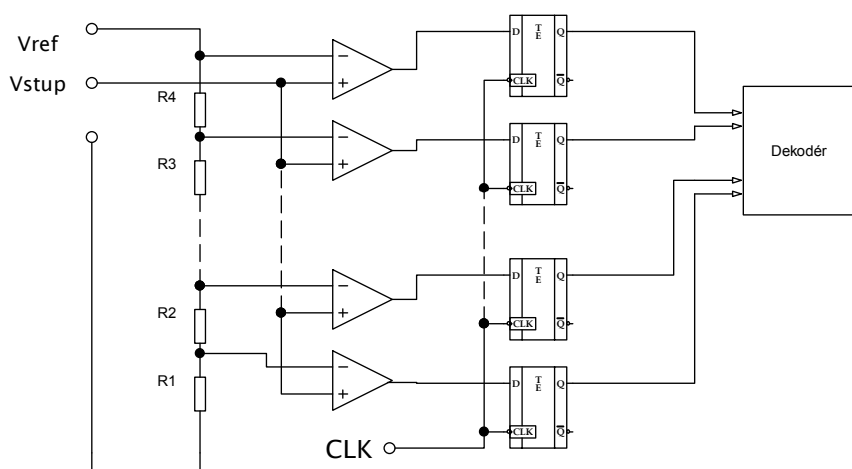


Obr. 42: Osmibitový D/A převodník

5.3 Principy činnosti A/D převodníků

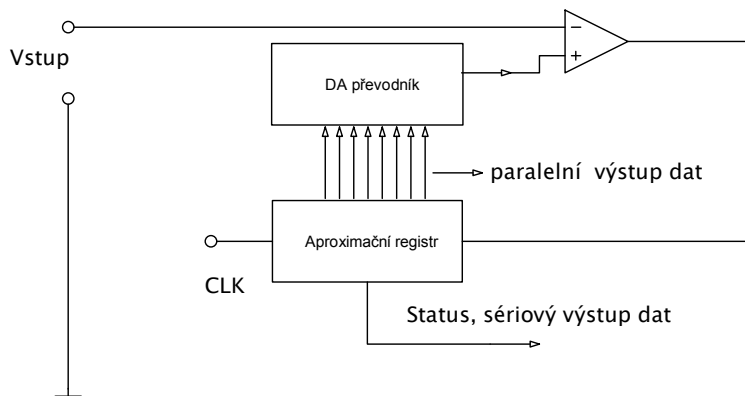
Převodníky analogového signálu v číslicový – analogově digitální převodníky – jsou založeny buď na principu transformace napětí na jinou fyzikální veličinu (většinou čas), která se snadněji digitalizuje, nebo na principu srovnávání převáděného analogového napětí se známým napětím. Podle principu činnosti a provedení rozeznáváme tři druhy převodníků:

Komparační převodníky – jejich představitelem je např. paralelní A/D převodník (Obr. 43), který je nejrychlejším typem A/D převodníku, protože převod probíhá v jednom časovém okamžiku. U paralelního převodníku je převáděné napětí přivedeno na vstupy komparátorů (viz kap. 3.2.5), které porovnávají vstupní napětí se srovnávacím napětím, které se vytváří v odporové síti z referenčního napětí. Na výstupech komparátorů se objeví logická 1 u těch, jejichž srovnávací napětí je nižší (nebo vyšší, podle provedení) než napětí převáděné. Převodník s rozlišitelností n -bitů obsahuje $2^n - 1$ komparátorů. Klopné obvody zařazené za výstupy komparátorů zajišťují, že je převod proveden při příchodu hodinového impulsu. Obvod zpravidla obsahuje dekodér, což je kombinační obvod, který převádí informaci o výstupech komparátorů na určitý kód. Nevýhodou je značná složitost zapojení převodníku.



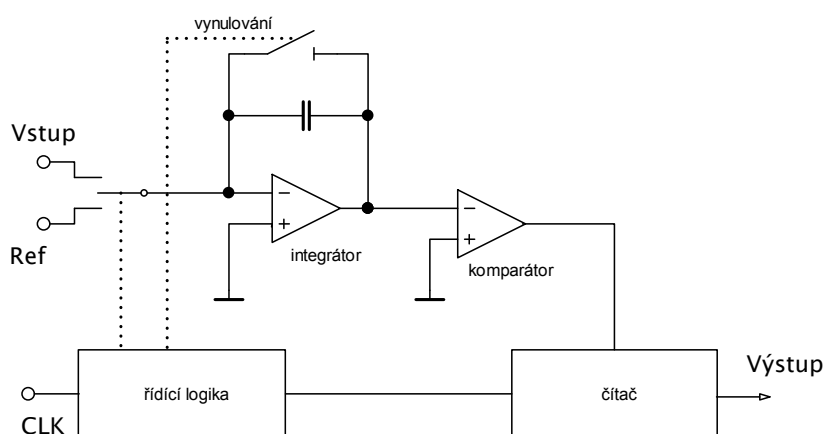
Obr. 43: Paralelní A/D převodník

Kompenzační převodníky – srovnávají vstupní napětí s napětím vytvářeným pomocí převodníku D/A (Obr. 44). Obvod tedy obsahuje pouze jeden komparátor. V okamžiku, kdy rozdíl mezi srovnávanými napětími je menší než určitá mez, se převod zastaví a předá se vstupní číslo (obsah registru) D/A převodníku, které odpovídá měřenému napětí.



Obr. 44: Kompenzační A/D převodník

Integrační A/D převodníky využívají přetečení integrátoru. Obvod obsahuje zdroj hodinových pulsů, čítač, řídicí obvod, komparátor a OZ v zapojení jako integrátor (viz Obr. 29). Převod začíná tím, že řídicí obvod vynuluje integrátor. Poté je na vstup integrátoru přivedeno převáděné napětí a začnou se čítat hodinové impulsy. Napětí na výstupu integrátoru se postupně zvyšuje, až dosáhne úrovně, při které se překlápí komparátor. Počet hodinových impulsů načtený v okamžiku překlapaní je úměrný převáděnému napětí. Nevýhodou je závislost doby převodu na velikosti měřeného napětí. V praxi se využívá poněkud složitější zapojení – převodník s dvojitou integrací (Obr. 45).



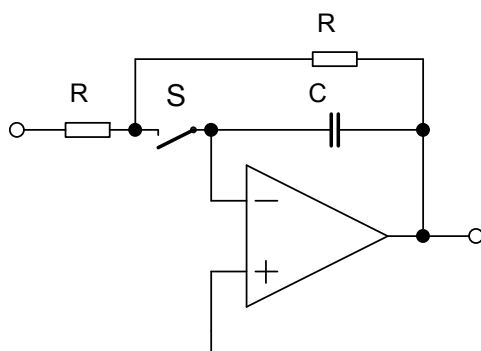
Obr. 45: Převodník A/D s dvojitou integrací

Řídící logika přivede na vstup převodníku převáděné napětí. Po přesně určené době se měřené napětí odpojí, v tu chvíli dosáhne napětí na výstupu integrátoru určité hodnoty. Na vstup se přivede srovnávací napětí Ref, které má opačnou polaritu, než převáděné napětí, a současně se pošle hodinový signál do čítače, který spustí čítání hodinových impulsů. Na výstupu integrátoru se napětí snižuje. V okamžiku, kdy je napětí na integrátoru nulové, komparátor vypne počítání

impulsů. Počet impulsů je úměrný přivedenému napětí. Převodník s dvojitou integrací patří k nejpřesnějším A/D převodníkům, často se využívá v digitálních měřicích přístrojích.

5.4 obvody Sample and Hold (S/H)

Účelem vzorkovacího a paměťového obvodu je držet konstantní napětí po dobu A/D převodu. Vzorkovací a paměťový obvod je buď samostatný, nebo součástí převodníku (sampling A/D converter). Schéma vzorkovacího a paměťového obvodu, využívající jednoho OZ je na Obr. 46. Je-li spínač S v sepnutém stavu, pracuje obvod jako invertující zesilovač (se zpožděním daným časovou konstantou RC). Jakmile se spínač rozeptne (u obvodu S/H na převodníkové kartě jde o elektronický spínač, řízený počítačem), odpojí se vstup zesilovače a kondenzátor C zůstane nabit na hodnotu napětí před rozpojením, dokud nedojde znovu k připojení vstupu.



Obr. 46: Obvod Sample and Hold

Vyšší kapacita paměťového kondenzátoru umožňuje delší dobu, po kterou je uchovávána informace o vstupním signálu, popřípadě též může během vzorkování vstupní signál částečně integrovat, což vede k potlačení nežádoucího šumu. Vysoká kapacita však vyžaduje delší čas, aby napětí na výstupu dosáhlo hodnoty napětí na vstupu při vzorkování. Je zde tedy nutnost kompromisu ohledně kapacity paměťového kondenzátoru.

5.5 Multiplexer

Aby nebylo nutné mít pro každý kanál speciální A/D převodník, což by bylo poměrně drahé řešení, je u většiny multifunkčních karet pouze jeden A/D převodník, na jehož vstup je zařazen obvod označovaný jako multiplexer, jehož jedinou úlohou je přepínat mezi jednotlivými vstupy – kanály. A/D převodník potom postupně převádí napětí na jednotlivých kanálech, což se v případě velmi rychlého přepínání jeví jako současné měření všech kanálů. Jak karty PCI6023, 6024, tak i karta PCI 6251 jsou vybaveny multiplexerem. Na Obr. 47 je znázorněna schematická značka multiplexeru – podle logické úrovně nastavené na řídicím vstupu (select) je výstup multiplexeru propojen buďto se vstupem IN1, nebo IN2. Varianta multiplexeru pro přepínání čtyř vstupů obsahuje dvě řídicí linky (třemi linkami můžeme řídit 8 vstupů, osmi linkami 256 apod.)



Obr. 47: Multiplexer dvou (vlevo) a čtyř vstupů (vpravo)

5.6 Parametry AD a DA převodů

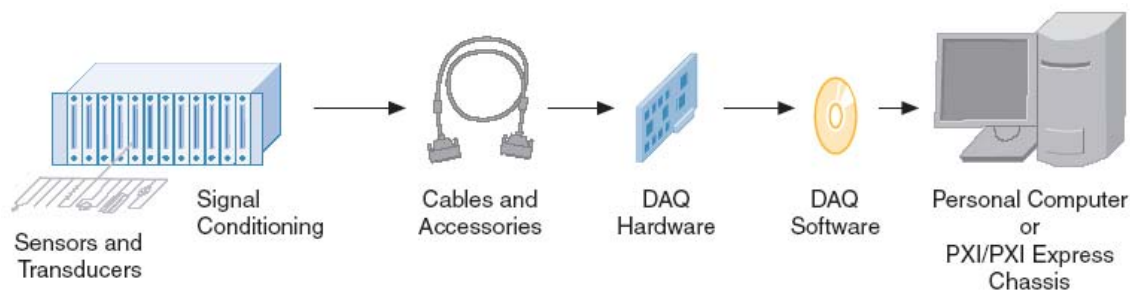
Nejdůležitější charakteristikou A/D převodníku je jeho rozlišovací schopnost – počet úrovní, na které je rozdělen vstupní napětíový rozsah převodníku. Udává se jako počet bitů. Následující tabulka uvádí výpočet parametrů převodníků odvozených od počtu bitů.

Počet (n)	bitů	Počet (2^n)	úrovní	Přesnost v % z max. signálu	Rozlišení pro rozsah $\pm 2V$ (mV)	Rozlišení pro rozsah $\pm 10V$ (mV)
8		256		0,4	15,63	78,13
10		1024		0,1	3,90	19,53
12		4096		0,025	0,98	4,88
16		65536		0,0015	0,061	0,305

Neméně důležitou charakteristikou je maximální dosažitelná vzorkovací rychlost, udávaná jako počet vzorků za sekundu (tj. frekvence vzorkování v Hz, častěji se místo Hz udává v kS/s – kilosamples per second, případně MS/s – jde ovšem o identické jednotky). Další parametry, které hrají roli při A/D převodu, jsou např. linearita, časová stabilita, vstupní odpor převodníku apod.

6 Číslicové počítače a jejich využití pro získávání dat

Současné technologie dovolují nahradit složité jednoúčelové přístroje pro měření a zpracování dat výkonným počítačem se zařízením pro sběr dat (DAQ – digital acquisition) a DSP (digital signal processing) softwarem. Typický měřicí řetězec je znázorněn na Obr. 48.



Obr. 48: Realizace měřicího řetězce

Signál ze snímače měřené veličiny je spojen s konektorovým blokem, případně se zařízením na úpravu signálu (filtry, podpůrná elektronika), poté je veden do DAQ zařízení, které může být spojeno s PC prostřednictvím sběrnice nebo portu. V současné době je většina DAQ zařízení na bázi PCI (PCIe), ISA, PCMCIA, GPIB, USB, VME, VXI, PXI, Ethernet, sériový a paralelní port, USB. DAQ zařízení komunikuje s PC pomocí softwarového ovladače (driveru), aplikační software (např. LabVIEW) pak umožňuje měření provádět, ovládat jeho chod a zpracovat výsledky.

6.1 Hardware počítače – sběrnice, porty

Současné osobní počítače (PC) jsou do značné míry modulární systémy. Základními komponentami jsou základní deska (motherboard), která je osazena procesorem (CPU) a paměťovými moduly. K PC se připojuje celá řada vstupně-výstupních (I/O) zařízení (např. úložiště dat, grafický systém, USB rozhraní apod). Uvedené komponenty potřebují komunikovat (předávat data) zejména s pamětí a procesorem, ale i mezi sebou. Uvedená zařízení nejsou spojena „každý s každým“, ale prostřednictvím sběrnic. Sběrnice (angl. bus) je skupina společných signálových vodičů, ke které jsou paralelně připojena uvedená zařízení. Komunikace ovšem probíhá vždy mezi dvěma zařízeními, proto je nutné přenos dat po sběrnici řídit. Z tohoto hlediska lze jednotlivé signálové vodiče sběrnice rozdělit na skupiny řídicích (určují, co má sběrnice provádět, např. kterým směrem má posílat data), adresových (určuje, která zařízení spolu mají komunikovat) a datových vodičů v případě paralelní sběrnice, nebo sdílení dat a řízení na společném vodiči (nebo vodičích) u sériových sběrnic. Přenos dat na sběrnici se řídí stanoveným protokolem. Osobní počítače musí být navrženy tak, aby bylo možné jejich snadné rozšiřování o další zařízení (zvukové karty, síťové karty, řadiče disků apod.). Sběrnice je proto po mechanické stránce vybavena konektory uzpůsobených pro připojení modulů, tzv. slotů. Zařízení pro sběr dat jsou často prováděna jako zásuvná karta do sběrnice počítače.

Mezi základní parametry každé sběrnice patří:

- Šířka přenosu (tj. počet bitů, které lze zároveň po sběrnici přenést) v bitech,
- maximální frekvence, se kterou může sběrnice pracovat v Hz a
- rychlost (propustnost) – tj. počet bytů přenesených za jednotku času.

Podle způsobu práce a zapojení rozlišujeme několik základních typů sběrnic:

- synchronní sběrnice: sběrnice pracující synchronně s procesorem počítače. Platnost údajů na sběrnici jednoznačně určuje hodinový signál. Tímto způsobem dnes pracuje převážná většina všech sběrnic.
- pseudosynchronní sběrnice: dovoluje zpoždit přenos údajů o určitý počet hodinových period.
- multimaster sběrnice: dovoluje tzv. busmastering, jedná se o sběrnici, která může být řízena několika zařízeními, nejen procesorem.
- lokální sběrnice: spočívá ve vytvoření technické podpory toho, že se náročné operace s daty realizují rychlou systémovou sběrnici. Tato systémová sběrnice se prodlouží a umožní se tak přístup na ni i ze zásuvných modulů dalších zařízení. O rozvoj lokálních sběrnic se nejvýrazněji zasloužili výrobci videokaret, pro něž byly dosavadní sběrnice pomalé. Nevýhodou lokálních sběrnic je o něco vyšší cena samotné základní desky s lokální sběrnici a také zařízení pro ni určených.

Komunikace po sběrnici může probíhat jedním ze třech způsobů:

- programovaný vstup a výstup dat – sběrnice je v průběhu přenosu řízena přímo procesorem.
- Řízení pomocí přerušení – Procesor přeruší práci a provede požadovanou činnost (ošetří přerušení). K podání žádosti o přerušení se využívají k tomu určené řídicí vodiče sběrnice. Každé zařízení má přidělenou svoji linku přerušení (řídicí vodič sběrnice) a je určena jejich priorita. Obvod zpracovávající žádosti o přerušení upřednostní zařízení s vyšší prioritou a zařídí přerušení činnosti prováděné procesorem.
- Řízení pomocí přímého vstupu do paměti (DMA) – Aby se procesor méně zatěžoval jednoduchými operacemi, je umožněno zařízením, která to dovedou, přímo přistupovat (číst nebo zapisovat) do paměti. Na požadavek zařízení procesor pouze potvrdí žádost o přímý přístup do paměti, vlastní přenos dat poté probíhá bez účasti procesoru.

6.2 Přehled sběrnic PC se sloty využitelnými pro multifunkční karty

PC Bus a ISA

Z historického hlediska je důležitá sběrnice PC Bus, což je sběrnice používaná v prvních počítačích řady PC XT s procesorem 8088. Přídavné desky se zasunovaly do jejího slotu se 62 linkami. Měla osmibitovou přenosovou šířku, neboli pro přenos dat sloužilo 8 pinů. To bylo pro tehdejší procesor plně dostačující, neboť ten měl též osmibitovou šířku přenosu. Šest vodičů bylo určeno pro zasilání požadavků na hardwarová přerušení (IRQ2 až IRQ7) a další tři pro přímý přístup do paměti (DMA1 až DMA3). 20 linek zajišťovalo adresování paměti. Mohlo se jimi jednoznačně určit 2^{20} paměťových míst (neboli bytů jakožto nejmenší adresovatelné jednotky), což představuje přibližně 1 MB paměťového prostoru (pro procesor 8088 též naprosto vyhovující). Kromě paměti se pomocí těchto pinů adresovaly též adresy vstupu a výstupu a na jejich rozlišení bylo vyhrazeno několik dalších vodičů. Zbývající linky zajišťovaly elektrické napájení, resetování, obnovování informací v paměti či zasilání hodinových signálů. Sběrnice běžela na stejné frekvenci jako procesor (to jest 4,77 MHz resp. u rychlejších verzí XT 7,16 MHz).

Sběrnice ISA vychází z předchozí PC Bus. Byla vyvinuta pro implementaci v počítačích PC AT s procesorem 80286 (proto byla ze začátku nazývána Bus AT). Ten měl 16bitovou šířku přenosu, a tudíž pro něj byl osmibitový PC Bus nevyhovující. Aby bylo možné využívat i starší přídavné karty, bylo nutné zachovat zpětnou kompatibilitu nové sběrnice s původní sběrnici PC Bus. Zmíněné kompatibility dosáhli vývojáři tím, že zachovali původní 62linkový slot a za něj přidali dalších 36 pinů, takže ISA sestává celkem z 98 vodičů. Přidaný konektor zvyšuje

přenosovou šířku na 16 bitů, která byla požadována pro plné využití možností procesoru 80286. Zároveň jsou další čtyři piny určeny pro adresování paměti, díky čemuž lze adresovat 2^{24} adresovatelných jednotek, tedy přibližně 16 MB paměti. Počet kanálů pro přímý přístup do paměti vzrostl na sedm (DMA1 až DMA7), také počet linek pro hardwarová přerušení se zvýšil o pět (IRQ 10, 11, 12, 14, 15). ISA, stejně jako PC Bus, běžela na stejné frekvenci jako procesor (u prvních AT 6 MHz, později 8 MHz), což bylo nepraktické, neboť přídavné desky vyrobené pro jednu rychlost často nefungovaly na frekvencích ostatních. Proto firma Compaq, když zaváděla počítač s rychlostí procesoru 12 MHz, oddělila hlavní systémové hodiny od hodin sběrnice, jejichž frekvence 8 MHz pak již zůstala nezměněna.

PCI

Díky překotnému rozvoji výpočetní techniky přestávaly parametry sběrnice ISA postačovat zejména vysokým požadavkům grafické karty počítače – vyšší rozlišení, barevná hloubka a obnovovací frekvence přinášejí zvýšené nároky na datový tok mezi pamětí a grafickou kartou. Proto bylo nutné vyvinout rychlejší sběrnici. U počítačů s procesorem 486 použili vývojáři podobný přístup jako při návrhu sběrnice ISA. Přidáním dalšího konektoru za ISA sběrnici vznikla sběrnice VL-Bus, která sloužila pouze pro rychlé DMA přenosy. Tato sběrnice (která byla *de facto* vyvedením vnitřní sběrnice propojující procesor 486 s pamětí PC) se neprosadila, protože u procesoru Pentium byla architektura paměťové sběrnice změněna.

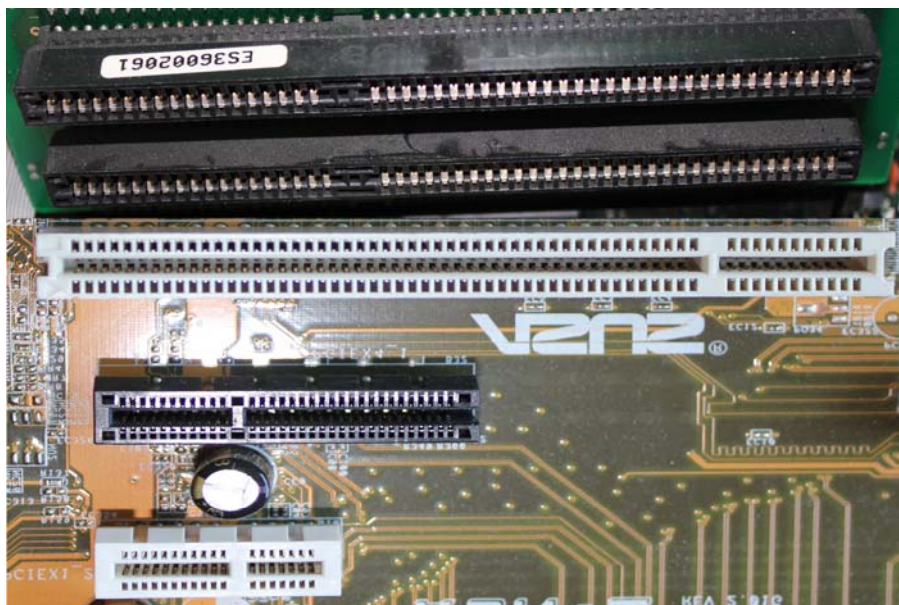
Sběrnici PCI (Peripheral Component Interconnect), která VL-Bus nahradila, vyvinula firma Intel. Řadí se též mezi Local busy. Na rozdíl od VL-Bus má bus mastering i programové nastavení desek, zahrnuje standard Plug and Play. Je relativně nezávislá na typu CPU, neboť s ním nekomunikuje přímo, ale pomocí přemostovacího obvodu (bridge circuit). Podporuje 64bitovou šířku toku dat s tím, že u starších počítačů umožňuje 32bitovou šířku. Běží do frekvence 33 MHz, tudíž teoretická propustnost činí až 264 MB/s. Sběrnice PCI může být snadno implementována na jedné základní desce společně se sloty ISA. Podobně jako sběrnice ISA i sběrnice PCI po určité době přestala vyhovovat požadavkům grafického systému počítače, ten byl pak řešen samostatnou grafickou sběrnici (AGP).

PCI-express

Sběrnice PCI-express (známá též jako 3GIO = 3rd Generation I/O) je nová implementace PCI sběrnice. Používá existující programovací návrhy a komunikační standardy, je ale založena na mnohem rychlejší sériové komunikaci. PCI-express (zkráceně PCI-E) je navržena jen pro použití jako lokální sběrnice. Protože je založena na původním PCI systému, rozšiřující karty a systémy mohou být převedeny na PCI-express pouze změnou fyzické vrstvy. Původní systém může být restartován s podporou PCI-express a nic nepozná. Vyšší rychlosti sběrnice ji předurčují k použití místo všech existujících interních sběrnic včetně AGP a PCI. PCI-express ale není dost rychlá na to, aby byla použita jako paměťová sběrnice. V tomto ohledu je to výrazná nevýhoda oproti podobnému systému – HyperTransport, který je pro tento účel vhodný. Navíc PCI-Express nenabízí takovou pružnost jako systém InfiniBand, který má srovnatelný výkon, ale může být použit jak pro vnitřní, tak pro vnější sběrnice. Od r. 2004 se PCI-express stává novým standardem pro osobní počítače. High-end grafické karty obou hlavních výrobců (ATI Technologies a nVidia) byly postupně převedeny z AGP na PCI-express, což nakonec donutilo i ostatní firmy se přizpůsobit.

Pro komunikaci s měřicími přístroji se v praxi nejvíce rozšířilo rozhraní RS 232 a GPIB (General Purpose Interface Bus – IEEE 488). Sériové rozhraní RS 232 má výhody v jednoduché kabeláži, v tom, že toto rozhraní je standardní součástí architektury PC a že komunikace může probíhat na větší vzdálenost (řádově až stovky metrů). Nevýhodou tohoto rozhraní je malá propustnost a schopnost komunikace s pouze jedním protějškem. Paralelní rozhraní GPIB má výhodu ve větší propustnosti a schopnosti komunikovat s více protějšky. Nevýhodou je nutnost doplnění architektury PC speciální kartou s tímto rozhraním. Kromě těchto dvou základních a častých možností existuje ještě možnost komunikace s VXI měřicími přístroji.

Obr. 49 ukazuje vzhled konektorů nejpoužívanějších sběrnic.



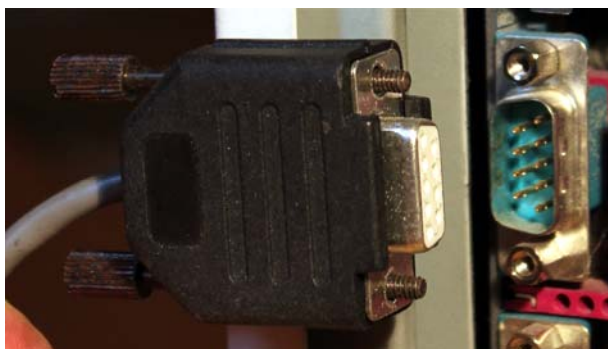
Obr. 49: Konektory sběrnic ISA (nahore), PCI (uprostřed) a PCI Express (PCIex4 a PCIex2)

6.3 Rozhraní počítačů

Rozhraní počítačů umožňují připojení externích zařízení. Navenek jsou tvořeny konektorem (často označovaným jako *port*) a uvnitř příslušnými obvody, které zajišťují jejich činnost. Implementace rozhraní (konektory, napěťové úrovně, komunikační protokoly, obsluha chyb apod.) je popsána v dokumentaci rozhraní, která je zpravidla veřejně přístupná. Rozhraní jsou zpravidla označena kódem začínajícím písmeny příslušné instituce, která rozhraní standardizovala (např. Electronic Industries Alliance (EIA) označovala svá rozhraní prefixem RS (recommended standard), The Institute of Electrical and Electronics Engineers označuje své standardy zkratkou IEEE apod), často existuje i vžitý název. Existuje nepřeberné množství rozhraní, určených pro různá zařízení a různé oblasti využití. Některá rozhraní jsou dodávána standardně s PC (sériový port, USB apod.), u jiných je nutné vybavit PC příslušnou kartou nebo redukcí do USB portu.

6.3.1 Sériový port (rozhraní RS232C)

Sériový port (Obr. 50) je jedním z nejstarších rozhraní. V současnosti se již neosazuje u notebooků, většina stolních PC je však stále standardně vybavena dvěma sériovými porty. Původní určení sériového portu bylo zprostředkovat spojení mezi PC a modemem pro přenos dat po telefonní lince. U starších počítačů byla k sériovému portu zpravidla připojena myš.



Obr. 50: Sériový port

Sériový port má několik výhodných vlastností:

- Zařízení lze připojovat a odpojovat za chodu počítače.
- Je velmi odolný proti zničení.
- Výstupy jsou schopny dodávat poměrně značný proud.

Rozhraní obsahuje devět vodičů (5 vstupů, tři výstupy a signálovou zem), napětíové úrovně pro log. 1 jsou -3 až -25 V, pro log. 0 $+3$ až $+25$ V. Typické hodnoty jsou však pouze cca ± 8 až ± 12 V (což je dáno hodnotami napájecích napětí dodávanými zdrojem PC). Doporučené přenosové rychlosti se pohybují do 20 kbit/s (typicky 19 200 b/s). Běžně jsou však užívány rychlosti do 115200 b/s na vzdálenost 10 až 15 m.

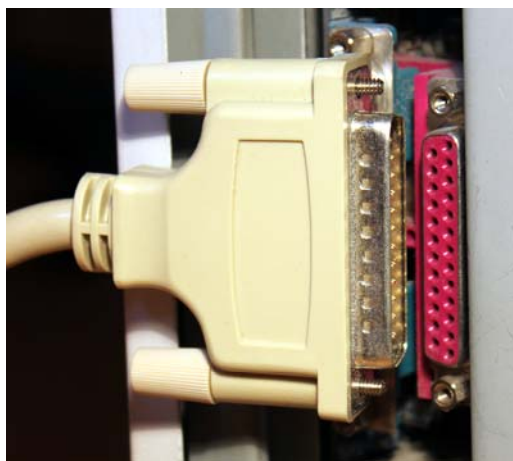
Standard rozlišuje dva typy zařízení – DTE (Data Terminal Equipment, obvykle počítač) a DCE (Data Circuit-terminating Equipment, obvykle modem). Signál Transmitted Data (často značen TxD) využívá DTE zařízení pro vysílání dat, obdobně je signál Received Data (RxD) využit DTE zařízením pro příjem dat. Signál DTE Ready (DTR) oznamuje připravenost DTE zařízení, obdobně DCE Ready (DSR) oznamuje připravenost DCE zařízení. Signál Request to Send (RTS) slouží DTE zařízení pro indikaci požadavku vysílání ze strany DTE, signál Clear to Send (CTS) indikuje připravenost k vysílání ze strany DCE. Signálem Ring Indicator (RI) informuje DCE o příchozím spojení, signálem Data Carrier Detect (DCD) o přítomnosti nosné. Signal Ground (SG) je signálová zem rozhraní. Kompletní rozhraní obsahuje ještě další signály (viz tabulka), které se však v reálných aplikacích téměř nepoužívají.

DIN 9	DIN 25	Význam	I/O
1	8	DCD – Data Carrier Detect (detekce přijmaného signálu)	vstup
2	3	RxD – Receive Data (příjem dat)	vstup
3	2	TxD – Transmit data (vysílání dat)	výstup
4	20	DTR – Data Terminal Ready (pohotovost terminálu)	výstup
5	7	GND – Ground (zem)	—
6	6	DSR – Data Set Ready (pohotovost vysílače)	vstup
7	4	RTS – Request To Send (výzva k vysílání)	výstup
8	5	CTS – Cleat To send (pohotovost k vysílání)	vstup
22	9	RI – Ring Indicator (indikátor volání)	vstup

Výhodou RS232 je, že se velmi snadno programuje. Jednotlivé vstupy a výstupy programově ovládat přímo (např. prostřednictvím VISA knihovny v LabVIEW). Proto se i v současnosti RS232 velmi často používá, v řadě případů je přístroj připojován pomocí USB, uvnitř však obsahuje převodník USB → RS232.

6.3.2 Paralelní port (Centronics, IEEE 1284)

Paralelní port (Obr. 51) donedávna sloužil prakticky výhradně k připojení tiskáren. Přesto se používal i k jiným úlohám, např. pro připojení levných scannerů, propojení dvou PC, hardwarové klíče apod. Umožňuje totiž poměrně rychlou komunikaci při nízké ceně příslušných obvodů.



Obr. 51: Paralelní port

Vstupy a výstupy paralelního portu nejsou chráněny proti přetížení, proto lze paralelní port snadno poškodit.

- Přístroje lze k paralelnímu portu zapojovat pouze při vypnutém PC.
- Na vstupy se smí přivést napětí v rozmezí 0–5 V.
- Výstupy se nesmí zkratovat nebo připojit na jiné výstupy.
- Výstupy nesmí přijít do styku s cizím napětím.

Čtyřbitový paralelní port – byl jím osazen původní IBM PC/XT, jeho rychlost přenosu je 40–60 kB/s.

SPP (standard parallel port) – obousměrný (bi-directional) osmibitový port, který pracuje ve třech módech:

- Compatibility Mode (Centronics mode) – mód používaný k přenosu dat z počítače do tiskárny, rychlost přenosu je 100–200 kB/s (pouze výstup).
- Nibble Mode – pro vstup dat do PC, využívá pěti linek z periferního zařízení pro indikaci stavu tohoto zařízení tak, že zařízení pošle po čtyřech zbývajících linkách osm bitů dat posláním dvou tzv. nibbles (čtyř bitů) ve dvou přenosových cyklech. Rychlost tohoto reverzního módu je 50 kB/s.
- Byte Mode – druhá možnost reverzního módu pro obousměrnou komunikaci, na rozdíl od Nibble módu využívá osmi linek a v jednom přenosovém cyklu pošle osm bitů,

rychlost přenosu je 80–300 kb/s (pouze vstup). Pokud jsou obvody paralelních portů osazeny tzv. FIFO pamětí, lze zvýšit rychlost přenosu dat až na 500 kB/s.

EPP (Enhanced Parallel Port) EPP byl vyvinut pro zrychlení komunikace obousměrnou metodou, pracuje s osmibitovým vstupem i výstupem a podporuje více zařízení na jednom portu, rychlost přenosu je 0,5–2 MB/s.

ECP (Extended Capabilities Port) ECP využívá také obousměrný osmibitový přenos dat a zahrnuje podporu datové komprese RLE* (Run Length Encoding), využívá přímý přístup do paměti (DMA), rychlost přenosu dat může být i vyšší než 2 MB/s.

* RLE je typ komprese, kdy opakující se znak je zakódován typem a počtem opakování (např. AAAAA jako 5A).

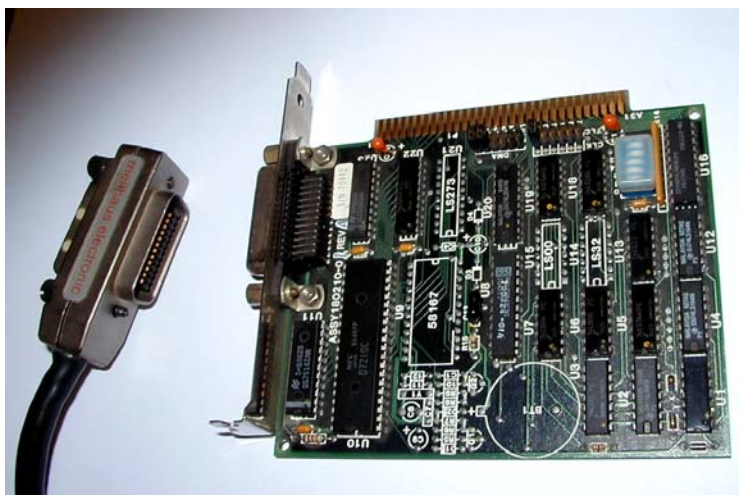
6.3.3 IEEE 488 – GPIB rozhraní pro připojování měřicích zařízení

Rozhraní GPIB (General Purpose Interface Bus) je osmibitové paralelní rozhraní s přenosovou rychlostí až 1 MB/s. Umožňuje k PC připojit až 15 zařízení, z nichž musí být dvě třetiny napájených, maximální celková délka GPIB propojení nesmí přesáhnout 20 m. Rozhraní je často používáno k propojení měřicích přístrojů do jedné sítě, kontrolované PC. GPIB rozhraní je používáno zejména u dražších měřicích zařízení (nad \$1000, levnější jsou zpravidla řízeny přes USB nebo RS232). GPIB pro PC bývá realizováno jako zásuvná karta do ISA nebo PCI sběrnice, v současnosti jsou k dispozici i redukce GPIB-USB. Propojovací kabely jsou zakončeny masivními oboustrannými (stacking – lze spojit několik kabelů s uvedenými konektory a celek zasunout do konektoru GPIB karty v PC) konektory s 24 kontakty (Obr. 52). Z 24 vodičů je 8 datových (DIO 1–8), 8 řídících (3 pro korespondenci (handshake – DAV, NRFD, NDAC), 5 pro řízení sběrnice (EOI, IFC, SRQ, ATN, REN)), 8 zemnicích. Maximální rychlost sběrnice je 1MB/s, 8MB/s pro vysokorychlostní verzi (higspeed, HS-488). Signály jsou kompatibilní s negativní TTL logikou.

IEEE 488 rozlišuje tři typy GPIB zařízení:

- Kontroler – počítač,
- Posluchač – pouze poslouchá,
- Mluvčí – jednotka vysílá data.

Jednotky mohou být pouze posluchači např. generátory signálu, nebo mluvčími i posluchači např. voltmetr. GPIB se zařízeními komunikuje pomocí sady instrukcí. Jak již bylo uvedeno, v systému existuje jeden kontroler (PC), ten zajišťuje řízení přenosu dat. Kontroler ovládá linku ATN – v případě, že je tato linka ve stavu log. 0 (tj. ATN = false), předávají se tzv. interfejsové zprávy, které lze dále dělit na univerzální příkazy (příkazy zajišťující činnost všech ovládaných přístrojů), adresované příkazy (příkazy pro konkrétní zařízení v systému), tzv. sekundární příkazy. Pokud je ATN = true, předávají se programovací příkazy, naměřená data a informace o stavu jednotlivých přístrojů v měřicím systému.



Obr. 52: GPIB karta (do osmibitové ISA sběrnice) + propojovací kabel s konektorem

6.3.4 USB – charakteristiky, principy komunikace

USB (Universal Serial Bus) – standard sběrnice vyvinutý firmami Compaq, Intel, IBM, Microsoft, NEC a dalšími v roce 1995. Hlavním cílem bylo definovat externí rozšiřující sběrnici umožňující snadné připojování periferních zařízení. Periferní zařízení, která jsou k této externí sběrnici připojována, se v terminologii USB označují jako tzv. functions. Počítač, ve kterém je osazeno rozhraní pro USB sběrnici, tzv. (USB) host controller, bývá označován jako host. Host může být v systému pouze jeden. Z toho vyplývá, že podle původního standardu, nebylo možné USB sběrnici použít k propojení více počítačů. K host controlleru je bezprostředně připojen tzv. root hub (kořenový rozbočovač) obsahující většinou dva (popř. více) porty. Ke každému z těchto portů je možné připojit:

- USB hub: zařízení, které slouží jako rozbočovač pro připojení dalších USB zařízení, popř. USB hubů.
- USB zařízení – function (function může jako svou součást obsahovat i USB hub).

Tímto vzniká stromová fyzická topologie, avšak logická topologie (princip komunikace) odpovídá topologii sběrnice. Každý uzel tohoto stromu, který není listem, je tvořen pomocí USB hubu (popř. zařízení, které USB hub obsahuje). Zařízení, které obsahuje jako svou součást USB hub, se nazývá compound device.

Data se po USB sběrnici posílají buďto v krátkých paketech (8 B), nebo po delších paketech (až 256 B). Žádné zařízení nemůže vysílat data samo od sebe, PC vždy požaduje data od zařízení. Veškerý přenos dat se uskutečňuje v tzv. rámcích (frame), které trvají přesně 1 milisekundu. Uvnitř jednoho rámce mohou být postupně zpracovávány pakety pro několik zařízení. Programování přenosu dat po USB je složité a vyžaduje mikrokontrolér na straně zařízení. Navíc přistupuje problém s VID (Vendor ID) a PID (Product ID), které je pro USB zařízení povinné. Kombinace (dvoubajtových) čísel VID a PID udává, jaké zařízení je připojeno a dle této kombinace PC vyhledá vhodný ovladač (Technologie Plug and Play). Ve Windows je tato kombinace údajů uložena v souboru *.inf.USB 2.0. Vendor ID přiděluje organizace USB Implementers Forum (www.usb.org), je možné být řádným členem USB-F za poplatek \$4000/rok nebo nečlenem za \$2000/dva roky. V ceně je poplatek za používání loga pro USB. Třetí a nejlevnější cesta jak získat VID je koupit si jej za 2000 USD bez nároku na používání loga USB. Dále je nutné připočítat náklady na certifikaci každého výrobku. I to je jeden z důvodů, proč se u jednodušších zařízení často používá převod USB-RS232.

6.4 Multifunkční karty pro sběr dat, výrobců a parametry.

Měřicí karty neboli karty pro sběr dat (data acquisition – DAQ), slouží pro přímé měření, popř. generování signálu počítačem. Tím se liší např. od karet realizujících rozhraní GPIB (General Purpose Instrumentation Bus, IEEE 488), které pouze komunikují se specializovaným měřicím přístrojem. Sdružují v sobě funkce vícekanálového analogového vstupu, analogového výstupu, obvykle 2-kanálového, čítače impulsů/ měřiče frekvence, číslicových vstupů a výstupů. Karty s více než jedním z uvedených typů funkcí se označují jako multifunkční.

Multifunkční karty vyrábí celá plejáda výrobců. U nás jsou dostupné karty tuzemské firmy Adicom (jejich karta ADC 1216 do ISA sběrnice bývala nejlevnější na trhu), Advantech (dražší varianty školního měřicího systému ISES jsou osazeny kartou PCL818L (rovněž pro ISA slot)) K této kartě jsou zdarma dostupné ovladače i pro programovací prostředí LabVIEW.

Firma National Instruments (www.ni.com) je v současnosti světovou jedničkou v oblasti počítačové měřicí techniky, vyrábí a prodává ucelenou řadu multifunkčních karet v širokém rozsahu parametrů. Do přístrojové techniky zavedla koncept tzv. virtuálních přístrojů, tvořených multifunkční kartou a programovým vybavením napsaným ve vývojovém prostředí LabVIEW, které tato firma vyvíjí a prosazuje. Cílem je, aby se virtuální přístroj svými parametry blížil k původnímu samostatnému přístroji, nebo měl dokonce parametry lepší. National Instruments proto garantuje parametry svého hardware, desky mají zabudovanou samokalibraci apod.

6.4.1 Analogové vstupy

Nejdůležitějšími parametry analogových vstupů jsou jejich počet, rozlišení, maximální vzorkovací frekvence a napěťové rozsahy. Rozlišení je sice v principu dáno použitým A/D převodníkem, ovšem ostatní zařazené obvody mohou výsledné vlastnosti karty zlepšit i zhoršit až o několik tříd. Není proto vhodné soustředit se pouze na jediné číslo, ale naopak je třeba důkladně se seznámit se všemi údaji ohledně přesnosti karty. Zatímco u levných karet výrobce uvádí pouze počet bitů nebo jednoduché charakteristiky typu „přesnost lepší než 1 %, INL < 1,5 LSB“, dokumentace ke kvalitním kartám většinou obsahuje také složky chyb (offset, chyba z údaje a šum pro každý rozsah) a často i jejich závislost na teplotě. Má-li být karta použita ke skutečně závaznému měření, určitě bude žádoucí získat spolu s ní i její kalibrační certifikát, údaj o době jeho platnosti a informace o provádění dalších kalibrací. Díky poklesu cen A/D převodníků s větším rozlišením lze v současné době pozorovat přechod od osmibitových a dvanáctibitových karet ke kartám šestnáctibitovým. S menším rozlišením se lze nyní setkat jen u nejrychlejších (osciloskopických) karet. Nebezpečí komplikací může být skryto i v údajích o maximální vzorkovací frekvenci. Často se uvádí maximální rychlost A/D převodníku, ale zejména levnější karty přepínají do jednoho převodníku všechny své vstupy. Má-li taková karta převodník s maximální vzorkovací frekvencí 200 kHz, získá se při měření deseti kanálů pouze 20 000 vzorků za sekundu na každém z nich. Navíc mezi odměry v jednotlivých kanálech bude zpoždění nejméně 5 s. Těmito nedostatky netrpí karty s plnohodnotným měřicím řetězcem (vstupní zesilovač a A/D převodník) pro každý kanál. Ty ale bývají podstatně dražší. Některé karty mívají na vstupu filtr typu dolnofrekvenční propusti, který zabraňuje porušení vzorkovacího teorému a brání zkreslení frekvenčního spektra signálu (anti-aliasing). Spolu s maximální vzorkovací frekvencí je vhodné zjistit i krok nebo způsob vytváření nižších frekvencí, popř. možnost taktování externím signálem. Karty používající dělič kmitočtu totiž nedovedou vytvořit libovolnou vzorkovací frekvenci (např. 44,1 kHz, často vyžadovanou v akustice). U napěťových rozsahů je třeba si zkontrolovat, nejen zda měřený signál nepřesahuje možnosti karty, ale i zda bude její měřicí rozsah dobře využit. Zatímco některé karty mají osm i více softwarově přepínatelných rozsahů, jiné karty mají jen jeden rozsah. Je-li třeba měřit signál v rozmezí 0 až 2 V, určitě by měla dostat přednost karta s volitelným unipolárním rozsahem 0 až 2,5 V před kartou s jediným rozsahem ± 10 V. Při stejném rozlišení A/D převodníku totiž bude u první z karet osmkrát menší kvantizační šum. Kromě napěťových rozsahů je důležitým ukazatelem i míra ochrany vstupů karty proti přepětí.

6.4.2 Analogové výstupy

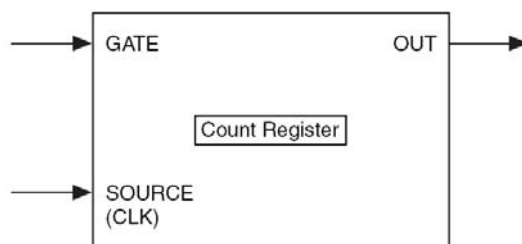
U analogových výstupů se hodnotí tytéž parametry jako u vstupů. Některé karty mají výstupy pouze statické, na které lze vyslat vždy pouze jednu hodnotu, a rychlost změny je tudíž dána pouze chováním softwaru. To u běžných operačních systémů znamená velkou nejistotu. Naopak karty s hardwarově časovanými výstupy a vyrovnávací pamětí dokážou přesně generovat i poměrně rychlé průběhy a často mohou nahradit specializované generátory (při měření frekvenčních charakteristik apod.). U analogových výstupů se lze méně často než u vstupů setkat s přepínatelnými rozsahy. Co se týče napětových výstupů, nejčastěji se používá rozsah ± 10 V, v průmyslu se mnohdy používají karty s proudovými výstupy (0 až 20 nebo 4 až 20 mA). Rozlišení se pohybuje mezi 12 a 16 bity; u specializovaných karet (audioměření) může být až 24 bitů. Zejména u statických výstupů bývá na jedné kartě větší počet kanálů (až 32).

6.4.3 Digitální linky

Digitální linky má alespoň jako „vedlejší produkt“ většina měřicích karet. Někdy jsou linky obousměrné (směr vstup či výstup se přepíná softwarově), ovšem zejména u izolovaných (galvanicky oddělených) linek je směr signálu pevně dán. Multifunkční karty často mají jen osm digitálních linek, zatímco specializované karty jich nabízejí až 96 i více. Neizolované linky používají úrovně TTL a CMOS, opticky izolované umožňují spínat a snímat napětí do 60 V, popř. i více. U karet nižší výkonnostní kategorie jsou vstupy a výstupy statické, tj. dovolují přečíst nebo vyslat vždy jen jediný stav. Výjimkou je nová řada digitálních I/O karet firmy National Instruments – díky architektuře založené na programovatelném hradlovém poli (Field Programmable Gate Array – FPGA) dokáže i jednoduchá levná karta vykonávat pokročilé funkce, důležité zejména v průmyslových aplikacích: nastavitelný stav každé linky ihned po zapnutí PC, detekce změny stavu na vstupech (tj. není nutné stav vstupu testovat ve smyčce), programovatelné filtry pro omezení zákmitů kontaktů nebo rušivých impulsů na vstupech a časovač (watchdog) pro nastavení předem definované binární kombinace v případě, že pauza v komunikaci aplikačního programu s kartou je delší, než je určeno. Pro rychlé delší záznamy nebo generování digitálních posloupností jsou určeny speciální karty (tzv. digital waveform generator) s hardwarově časovanými digitálními linkami a vyrovnávací pamětí o velikosti až několik megabajtů. Takové karty lze použít jako analyzátor logických stavů, rychlý binární generátor (k programování pamětí apod.), nebo jako univerzální rozhraní pro digitální komunikaci.

6.4.4 Čítače/časovače

Poslední funkcí (a součástí), se kterou se lze u měřicích karet setkat, jsou čítače a časovače. Ty se používají k počítání impulsů, dělení frekvencí nebo vytváření signálů s požadovanou frekvencí a pro připojení inkrementálních čidel (např. optická čidla polohy a pohybu generující impulsy). U čítačů je rozhodujícím parametrem délka registru (maximální hodnota registru, po jejímž dosažení čítač přeteče a začne opět čítat od nuly). Ta se většinou pohybuje mezi 24 a 32 bity. Dále se uvádí i maximální frekvence, kterou čítač dokáže zpracovat, popř. stabilita použité časové základny. Čítače obvykle pracují s TTL signálem, monitorují přechod z jednoho TTL stavu do druhého. Čítač lze obvykle naprogramovat tak, že může detekovat buďto náběhovou hranu signálu, tedy přechod z log. 0 do log. 1, nebo jeho sestupnou hranu, nebo obojí (vzestupnou i sestupnou hranu). Doba náběhu a doba poklesu signálu je pro TTL signál specifikována (< 50 ns). Čítač má dva vstupy a výstup (Obr. 53).



Obr. 53: Základní schéma čítače/časovače

Vstup GATE kontroluje čítání. Naprogramovat lze následující chování čítače v závislosti na vstupu GATE:

- No gating – čítání je spouštěno a ukončováno softwarově, tj. bez použití GATE.
- Level gating – čítání je povoleno, je-li na vstupu GATE log. 0 nebo log. 1.
- Edge-triggered gating – čítání je zahájeno hranou (náběžnou nebo sestupnou) pulsu na vstupu GATE.

Na vstup SOURCE (CLK) se přivádí počítaný TTL signál. Count register ukládá aktuální hodnotu čítače. Na aktuální hodnotu se lze dotazovat pomocí software. Maximální hodnota, kterou je schopen čítač registrovat je dána počtem bitů registru čítače ($2^{\text{počet bitů}}$) – např. 24bitový čítač čítá od 0 do $2^{24} = 16777216$ (potřebujeme-li větší rozsah čítání, lze kaskádově zapojit dva nebo více čítačů, jsou-li na kartě k dispozici). Po dosažení maximální hodnoty čítače se čítá znovu od nuly. Výstup OUT lze různě naprogramovat, aby v závislosti na stavech vstupu GATE a SOURCE (CLK) generoval puls nebo sérii pulsů.

Režim čítače spočívá v tom, že na GATE vložíme puls, kterým čítač nastartujeme a na vstup SOURCE (CLK) přivádíme počítané impulsy. Čítání ukončíme vložení dalšího pulsu na vstup GATE. Výsledný počet pulsů je předán počítači z registru čítače.

Režimu časovače docílíme tak, že na vstup SOURCE (CLK) přivádíme periodický sled pulsů o zvolené rychlosti (časová základna), čítání spustíme vložení pulsu na vstup GATE, dalším pulsem čítání ukončíme. Hodnota registrovaná čítačem je úměrná době, která uběhla mezi vložení pulsů na vstup GATE. Podobně lze měřit i šířku pulsu na vstupu GATE. V tom případě je čítač nakonfigurován tak, že se čítání spustí náběžnou a ukončí sestupnou hranou pulsu na vstupu GATE. S režimem časovače úzce souvisí pojem kvantizační chyba (quantization error).

Režim generace pulsu resp. série pulsů (pulse train) – chování výstupu čítače OUT lze naprogramovat dvěma způsoby. První způsob: poté, co čítač dosáhne určité hodnoty, změní se stav výstupu OUT. Druhá varianta: poté, co čítač dosáhne určité hodnoty, je generován puls, jehož šířka je shodná s pulsem na vstupu SOURCE (CLK).

Z výše uvedeného nástinu lze vidět, že existuje mnoho možností, jak čítače/časovače zapojit a nakonfigurovat. Pro řešení většiny situací lze využít řešených příkladů LabVIEW.

6.4.5 Multifunkční karty National Instruments, řada E

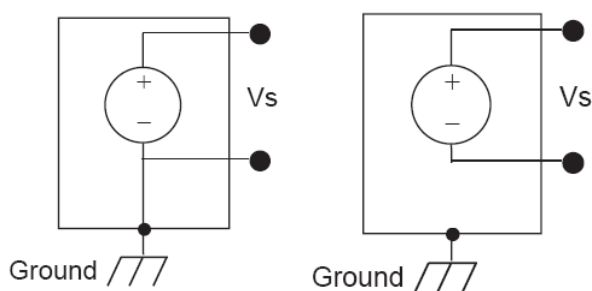


Obr. 54: Multifunkční karty série E, PCI 6023 (vlevo) a PCI 6024 (vpravo)

Multifunkční karty série E PCI 6023 a PCI 6024 (Obr. 54) jsou identické, liší se pouze absencí D/A převodníků u karty PCI 6023E. PCI 6024 má následující parametry:

- A/D převodníky: 8 diferenčních nebo 16 uzemněných vstupů, rozlišení 12 bitů, 200 kS/sec, vnitřní odpor 100 G Ω , 4 programovatelné vstupní rozsahy (od ± 100 mV do ± 10 V)/kanál.
- D/A převodníky: 2 ks, 10 kS/sec, rozsah ± 10 V, výstupní odpor 0,1 Ω .
- 8 digitálních linek (10 MHz).
- 2 čítače/časovače (24 bit, 20 MHz vnitřní hodiny).

Zdroje signálů lze rozdělit na uzemněné (referenced, grounded), kdy je napětí vztaženo proti zemi nebo kostře přístroje a plovoucí (nonreferenced, floating), kdy zdroj signálu není spojen se zemí. Příklady uzemněných zdrojů jsou přístroje s konektory (signální generátory, zdroje napětí apod.). Příklady plovoucích signálů jsou baterie a přístroje s bateriovým napájením, termočlánky, transformátory, izolační zesilovače apod. Uzemněné a plovoucí zdroje signálu jsou schematicky znázorněny na Obr. 55



Obr. 55: Uzemněný a plovoucí zdroj signálu

Analogové vstupy (AI) multifunkční karty PCI 6023/24 mohou být konfigurovány jako diferenční (differential) nebo jako uzemněné, a to ve dvou variantách – referenced single ended (měřené napětí vztaženo k zemi AIGND) a nonreferenced single ended (měřené napětí vztaženo ke speciální svorce AISENSE).

AI 8	34	68	AI 0	AI 8	34	68	AI 0
AI 1	33	67	AI GND	AI 1	33	67	AI GND
AI GND	32	66	AI 9	AI GND	32	66	AI 9
AI 10	31	65	AI 2	AI 10	31	65	AI 2
AI 3	30	64	AI GND	AI 3	30	64	AI GND
AI GND	29	63	AI 11	AI GND	29	63	AI 11
AI 4	28	62	AI SENSE	AI 4	28	62	AI SENSE
AI GND	27	61	AI 12	AI GND	27	61	AI 12
AI 13	26	60	AI 5	AI 13	26	60	AI 5
AI 6	25	59	AI GND	AI 6	25	59	AI GND
AI GND	24	58	AI 14	AI GND	24	58	AI 14
AI 15	23	57	AI 7	AI 15	23	57	AI 7
NC	22	56	AI GND	AO 0	22	56	AI GND
NC	21	55	AO GND	AO 1	21	55	AO GND
NC	20	54	AO GND	NC	20	54	AO GND
P0.4	19	53	D GND	P0.4	19	53	D GND
D GND	18	52	P0.0	D GND	18	52	P0.0
P0.1	17	51	P0.5	P0.1	17	51	P0.5
P0.6	16	50	D GND	P0.6	16	50	D GND
D GND	15	49	P0.2	D GND	15	49	P0.2
+5 V	14	48	P0.7	+5 V	14	48	P0.7
D GND	13	47	P0.3	D GND	13	47	P0.3
D GND	12	46	AI HOLD COMP	D GND	12	46	AI HOLD COMP
PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE	PFI 0/AI START TRIG	11	45	EXT STROBE
PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND	PFI 1/AI REF TRIG	10	44	D GND
D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK	D GND	9	43	PFI 2/AI CONV CLK
+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC	+5 V	8	42	PFI 3/CTR 1 SRC
D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE	D GND	7	41	PFI 4/CTR 1 GATE
PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT	PFI 5/AO SAMP CLK	6	40	CTR 1 OUT
PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND	PFI 6/AO START TRIG	5	39	D GND
D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK	D GND	4	38	PFI 7/AI SAMP CLK
PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC	PFI 9/CTR 0 GATE	3	37	PFI 8/CTR 0 SRC
CTR 0 OUT	2	36	D GND	CTR 0 OUT	2	36	D GND
FREQ OUT	1	35	D GND	FREQ OUT	1	35	D GND

NC = No Connect

NC = No Connect

Obr. 56: Konektory karet PCI 6023E a 6024E

6.4.6 Multifunkční karty karty National Instruments, řada M

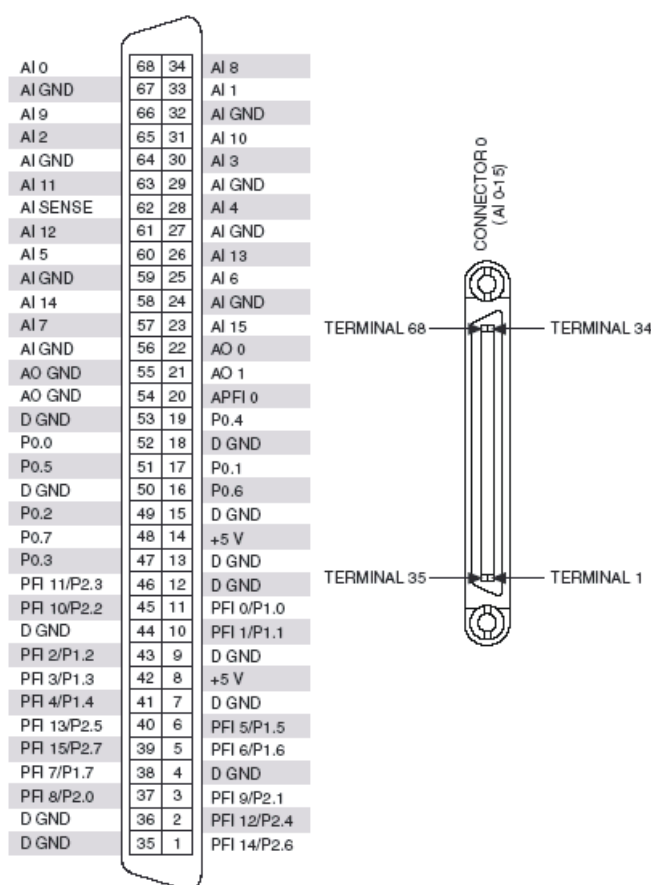
V současné době jsou multifunkční karty firmy National Instruments řady E nahrazovány novou řadou M, která se vyznačuje lepšími parametry při nižší ceně. Jistou nevýhodou nových karet je, že série M již nepodporuje programování pomocí nástrojů Traditional DAQ (vyžaduje použití DAQmx). Nelze tak využít VI naprogramovaných dříve např. pro kartu řady E.



Obr. 57: Multifunkční karta PCI 6251 (série M)

PCI-6251 je rychlá multifunkční karta řady M, optimalizovaná pro vysokou rychlost snímání dat. Má následující parametry:

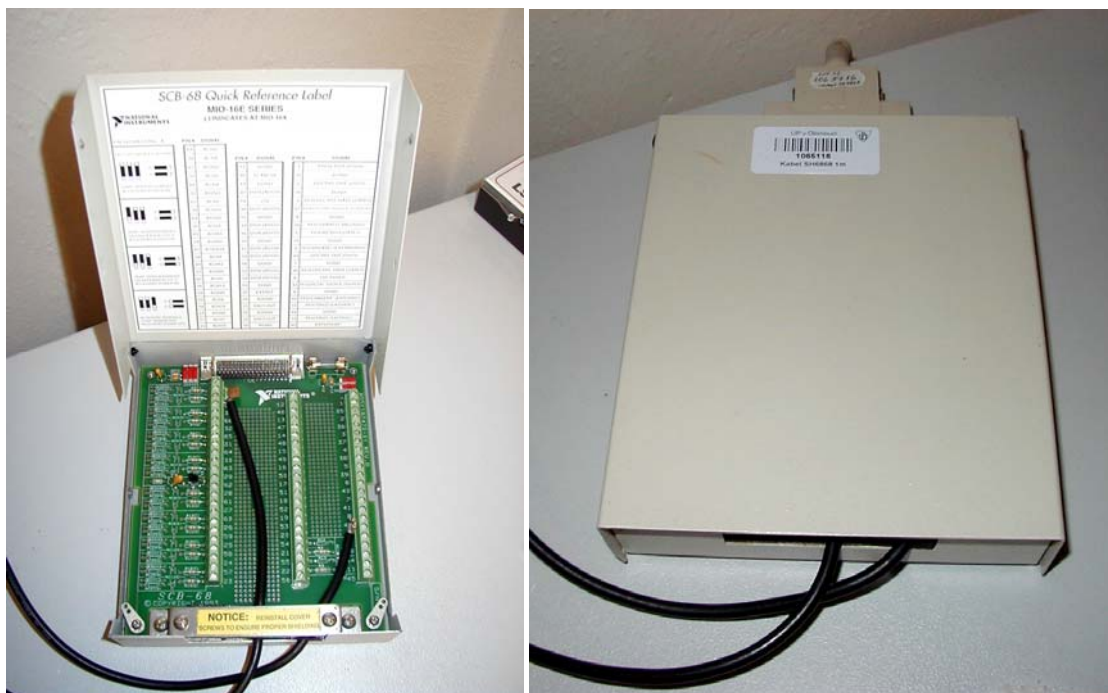
- A/D převodníky: 8 diferenčních nebo 16 uzemněných vstupů, rozlišení 16 bitů, 1,25 MS/sec (1 MS/sec při současném snímání více kanálů), vnitřní odpor $> 10 \text{ G}\Omega$, 7 programovatelných vstupních rozsahů (od $\pm 100 \text{ mV}$ do $\pm 10 \text{ V}$)/kanál.
- D/A převodníky: 2 ks, 2,86 MS/sec (2 MS/sec při současném běhu obou kanálů), rozsahy $\pm 10 \text{ V}$ nebo $\pm 5 \text{ V}$, výstupní odpor $0,2 \Omega$.
- 24 digitálních linek (10 MHz).
- 2 čítače/časovače (32 bit, 80 MHz vnitřní hodiny).
- Cena této karty je přibližně stejná jako cena PCI6024E.



Obr. 58: Konektor karty PCI 6251

6.4.7 Konektorové bloky, SCXI

Konektorové bloky slouží k propojení čidel a přístrojů s multifunkčními kartami. Na Obr. 59 je zobrazena stíněná a na Obr. 60 nestíněná varianta konektorového bloku. Konektory jsou v obou případech v provedení „pod šroubek“ a jednotlivé pozice jsou očíslovány – číslování souhlasí s číslováním přívodního konektoru. Zapojení konektoru je provedeno jednotně u celé řady multifunkčních karet (srovnej konektory karet PCI 6023, 24 a PCI 6251).



Obr. 59: Stíněný konektorový blok SCB 68



Obr. 60: Konektorový blok CB68LP

Jednoduché systémy sběru dat, tvořené multifunkční kartou a konektorovým blokem nemusejí být vhodné pro náročnější aplikace, např. měření v průmyslu. Bývá tomu tak v prostorách s vysokou hladinou rušení, při velké vzdálenosti jednotlivých měřících míst apod. V mnoha případech je rovněž vhodné signál z čidla upravit (např. galvanicky oddělit, odfiltrovat šum apod.) V takovém případě se namísto jednoduchých konektorových bloků používají složitější zařízení – tzv. bloky předzpracování signálu SCXI (Signal Conditioning Extension for Instrumentation). SCXI prvky mají podobu zásuvných jednotek vsazovaných do rámu s vlastním napájením. Zásuvnými jednotkami jsou např. izolační zesilovače, konvertory signálů z čidel, filtry apod.



Obr. 61: Blok předzpracování signálu SCXI

6.5 Měřicí řetězce – VME, PXI, VXI apod.

Zásuvné multifunkční karty doplňující pro účely měření architekturu personálního počítače mají omezení hlavně v parametru dosažitelné vzorkovací frekvence a současnosti snímání z více kanálů. Běžné měřicí karty pro ISA sběrnici dosahují maximální vzorkovací frekvence řádu stovek tisíc až milionů vzorků za sekundu (100 kS/s–1 MS/s, interval mezi vzorky 1–10 mikrosekund) pro signál, který není periodický. Špičkové osciloskopy dnes mají tento parametr až o čtyři řády lepší (10 GS/s – t.j. deset miliard vzorků za sekundu – interval mezi dvěma vzorky 100 ps). Toto omezení rychlosti měření je u zásuvných multifunkčních karet dáno především použitou architekturou A/D převodníku a též šířkou a časováním sběrnice mezi kartou a počítačem. Pro překonání tohoto omezení se začíná rozšiřovat speciální architektura měřicích systémů – systémy na bázi VME (starší) VXI (novější) sběrnice. Architektura těchto systémů je tvořena tzv. mainframem (tj. rámem s napájecím zdrojem a sběrnicí o šířce 32 bitů propojující až 13 pozic v tomto rámu). Na pozici 0 se do tohoto rámu nasazuje buď jednodeskový počítač, nebo konvertor sběrnice na protokol GPIB s následným propojením na řídicí počítač vybavený kartou GPIB. Do zbývajících pozic v rámu se zasouvají měřicí přístroje v redukované podobě zásuvných modulů (nemají tudíž ani čelní panel s ovládacími prvky, pouze konektory pro připojení měřených signálů).

Uspořádání VME sběrnice neumožňuje dosáhnout parametrů srovnatelných s laboratorními systémy se sběrnicí IEEE 488 (GPIB) složených ze špičkových laboratorních přístrojů (např. z hlediska přesnosti, elektromagnetické kompatibility, synchronnosti spouštění apod.). Proto na bázi sběrnice VME (v podstatě na požadavek americké armády) vznikla jejím rozšířením nová sběrnice pro měřicí systémy se zásuvnými moduly – VXI bus (VMEbus eXtension for Instrumentation), kde jednotlivé moduly z hlediska svých parametrů plně nahrazují samostatné měřicí přístroje (např. číslicový osciloskop, voltmetr apod.). Nedostatky VME lze shrnout:

- Malá velikost karet,
- Chybí specifikace EMC,
- Žádná specifikace chlazení,
- Žádné zdroje spouštění,
- Žádné komunikační protokoly.

Uvedené problémy řeší VXI, které je stejně jako VME otevřeným modulárním systémem. Sběrnice VXI se vyznačuje velkou propustností a přesným časováním (spouštěním měření), malými rozměry, menší náchylností k ovlivnění měření rušivými signály, delší střední dobou mezi opravami a kratší dobou opravy. VXI systém se nejčastěji skládá se ze základní jednotky (mainframe), která poskytuje vlastní VXI sběrnici, napájecí zdroje a chladič podsystem s přesně definovanými parametry. Mainframe se osazuje zásuvnými moduly, realizujícími

požadované přístrojové a výpočetní funkce. Základní jednotka obsahuje maximálně 13 pozic pro zásuvné moduly, které jsou číslovány zleva 0 až 12. Modul v pozici 0 musí splňovat veškeré požadavky kladené VME standardem na modul v pozici 1 a kromě toho i další požadavky kladené na něj přímo VXI standardem. VXI specifikace rozeznává čtyři velikosti modulů, které označuje písmeny A až D. Velikosti A a B odpovídají modulům jednoduché a dvojnásobné výšky podle standardu VME, moduly velikosti C a D mají dvojnásobnou délku. Další rozdíl je v šířce modulů, pro VME je to 0,8 palce, pro VXI, kde se předpokládá použití stínění, je to 1,2 palce. Při použití příslušného adaptéru je ovšem možné použít moduly menší velikosti v jednotce velikosti větší. Sběrnice systému VXI je ve srovnání s VME doplněna o signály, které mají za úkol doplnit podporu přístrojových aplikací, vytvořit dalších cesty pro vysokorychlostní přenos dat mezi moduly a dále je zavedena podpora automatizované konfigurace systému. Rozšířením VME na VXI je podpořeno vytváření hierarchických struktur, konfigurace systému a částečně je vyřešena standardizace protokolů pro komunikaci mezi prvky systému. Nabídka komponent pro VXIbus systémy je dnes již velice široká. Přes sto výrobců VXIbus modulů a přes deset výrobců základních jednotek nabízí prakticky celou škálu měřicích přístrojů a řídicích počítačů na bázi různých procesorů a operačních systémů. K dispozici jsou multimetry, funkční generátory, čítače, spektrální analyzátoři, číslicové osciloskopy a další přístroje. Kromě toho jsou samozřejmě nabízeny moduly s AD a DA vstupy/výstupy s rozličnými parametry vstupních a výstupních signálů, multiplexery pro různé kmitočtové rozsahy atd.

Podobná modulární instrumentální platforma jako je VXI je nabízena firmou National Instruments. Jde o PXI systém, který je ale na rozdíl od VXI (rozšíření VME sběrnice) založen na sběrnici PCI. PXI systém ovšem využívají jiný typ konektorů, než je klasický PCI konektor uvedený na Obr. 49, jde o CompactPCI konektor. Na Obr. 62 jsou uvedeny ukázky moderního PXI systému a staršího VXI systému od firmy Hewlett-Packard.



Obr. 62: PXI a VXI systém

6.6 Základní programovací techniky vstupu a výstupu dat

6.6.1 softwarové řízení vstupu a výstupu dat

Data jsou zapsána nebo čtena v okamžiku, kdy je příslušná operace v programu aktivní. Programová smyčka (polling): Ve smyčce jsou čtena stavová data desky a hlásí-li deska připravenost dat nebo připravenost pro přijetí dat (např. konec AČ převodu), je proveden programový v/v a spuštění dalšího odměru řídí buď interní časovač desky, nebo externí spouštěcí signál. Při softwarovém řízení vstupu dat se obvykle nedosahuje vysokých rychlostí přenosu dat, polling ovšem při efektivním způsobu programování může umožnit rychlý přenos.

6.6.2 řízení pomocí přerušení

Přerušení (interrupt): Na základě vyhodnocení signálu přerušení desky (Interrupt ReQuest – IRQ) je přerušen běh programu, požadavek desky obslužen obslužným programem a poté běh programu pokračuje od místa jeho přerušení. Střední rychlost přenosu, vhodný pro nepravidelné intervaly, při provádění dalších činností mimo sběru dat. Střední rychlost dána nutnou manipulací s registry, úklid stavu procesoru, výběr startovací adresy, test konce, reinicializace řadiče přerušení atd. Nutná paměť FIFO, neboť mezi požadavkem přerušení a obslužením přerušení je určitá doba latence, která může být u PC v určitých případech velká (stovky μ s).

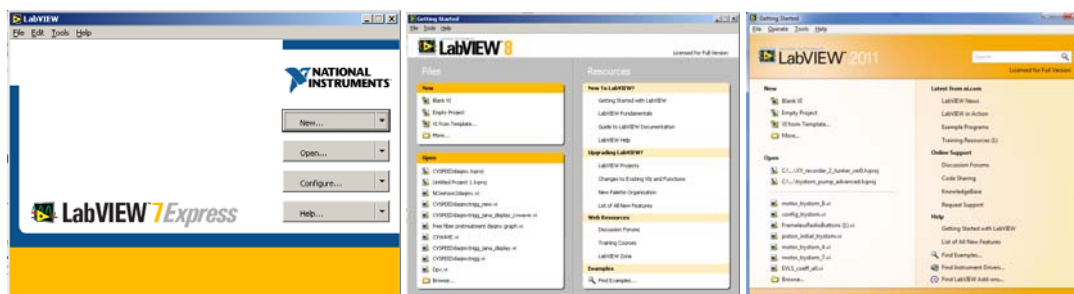
6.6.3 DMA – přímý přístup do paměti

Přímý přístup do paměti (Direct Memory Access – DMA): Po vyhodnocení požadavku desky na DMA (Dma ReQuest – DRQ) je mikroprocesor PC odpojen od sběrnice a řízení sběrnice je předáno řadiči DMA; řadič DMA provede požadovaný přenos dat a vrátí řízení sběrnice PC mikroprocesoru, který pokračuje v provádění programu. Generace DRQ při určitém naplnění FIFO na desce, nejrychlejší, vhodná pro velké bloky dat.

7 Lab View – úvod do programovacího prostředí pro tvorbu „virtuálních přístrojů“

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) je vývojové prostředí grafického programovacího jazyka G. Je vyvíjeno firmou National Instruments. Programovací nástroj LabVIEW je určen pro vytváření vědeckých a technických aplikací, zejména z oblasti měření a řízení. Na rozdíl od klasických programovacích jazyků nemá výsledný programový kód formu textu, ale tvoří schéma, ve kterém jsou jednotlivé grafické objekty, představující jednotlivé akce, pospojovány dráty (wires). Po spuštění LabVIEW se ukáže uvítací obrazovka (Obr. 63), která umožňuje:

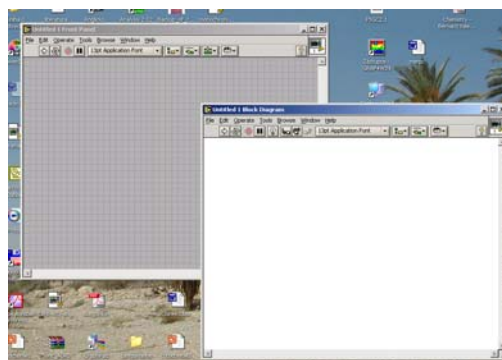
- začít programovat buďto „od začátku“ (blank VI), nebo pomocí předlohy (New from template),
- otevřít dříve programované VI nebo otevřít příklady,
- konfigurovat DAQ zařízení,
- číst dokumentaci a nápovědu.



Obr. 63: LabVIEW – uvítací obrazovka (verze 7, 8, 2011)

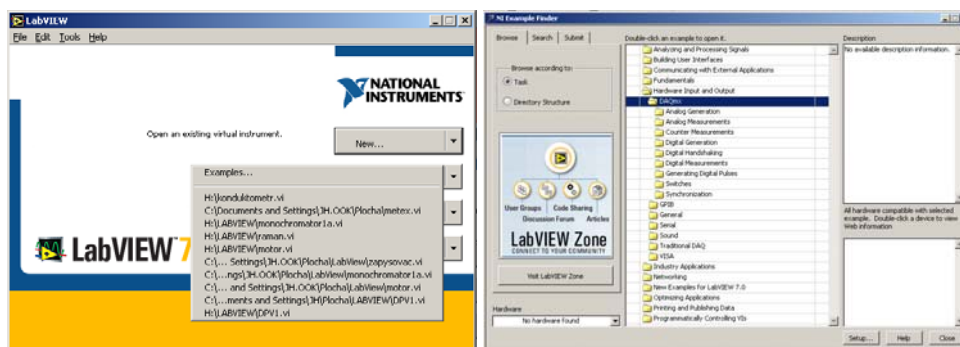
Výsledkem programování je tzv. virtuální přístroj (virtual instrument, VI). VI je složen ze dvou částí (Obr. 64):

1. čelní panel (front panel) – tvoří uživatelské rozhraní VI, je možno zadávat číselné veličiny, zobrazit výstupy apod.,
2. blokový diagram (block diagram) – vlastní kód programu.



Obr. 64: LabVIEW – prázdná aplikace – čelní panel (vlevo) a blokový diagram (vpravo)

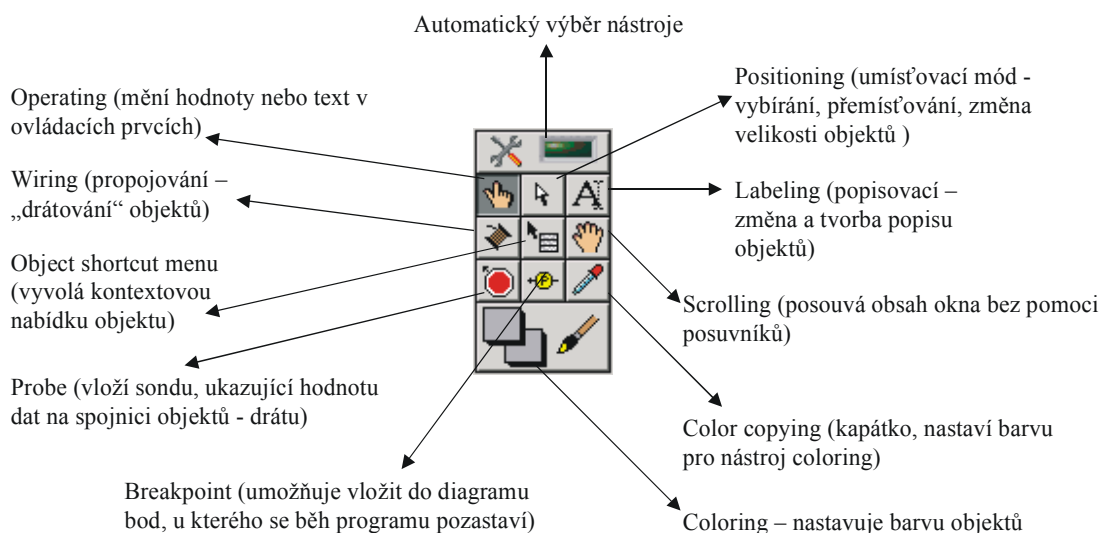
Součástí prostředí je obsáhlá nápověda, včetně nejrozličnějších příkladů a hotových řešení, které lze použít přímo, nebo po úpravě. Příklady jsou uspořádány do kategorií v okně Example Finder (Obr. 65).



Obr. 65: LabVIEW – Example Finder

7.1 Paleta nástrojů (Tools Palette)

Paleta nástrojů je společná pro obě okna LabVIEW. Používá se pro modifikaci objektů předního panelu i blokového schématu a operace s nimi. Vyvolá se kontextovým tlačítkem myši se současně stisknutým levým shiftem. Přehled jednotlivých nástrojů je na Obr. 66.



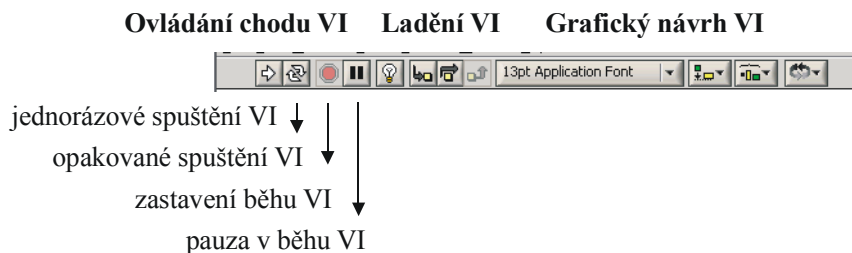
Obr. 66: Tools palette

Tools Palette slouží k rychlému výběru nástroje při zamýšlené změně činnosti při programování, ladění i chodu programu. Alternativně k Tools Palette lze nástroje volit též tabulátorem (cyklicky se mění nástroje, které v daném kontextu dávají smysl – v čelním panelu např. nelze použít nástroj Wiring), dále lze zapnout automatický výběr nástroje (pomocí Tools Palette nebo pomocí hlavního menu Tools | Options) – nástroj se automaticky mění nad částmi objektu (např. ocitne-li se ukazatel myši nad rohem objektu, zvolí se nástroj Positioning, který umožňuje zvětšení/zmenšení objektu).

7.2 Ovládání chodu VI

K spuštění VI a ovládání jeho chodu slouží čtyři první čtyři tlačítka na panelu nástrojů LabVIEW. Druhá čtveřice obsahuje nástroje k ladění programu (tj. k analýze jeho chodu za účelem nalezení a odstranění případných chyb). Poslední čtyři tlačítka slouží k usnadnění

rozmístění objektů na panelu nástrojů a ke změně velikosti písma na ovládacích prvcích. Panel nástrojů je znázorněn na Obr. 67.



Obr. 67: Spouštění a zastavení VI

Je-li v návrhu VI chyba, změní se tlačítko pro jednorázové spuštění způsobem zobrazeným na Obr. 68. Dvojklikem na tlačítko se zobrazí okno se seznamem nalezených chyb.

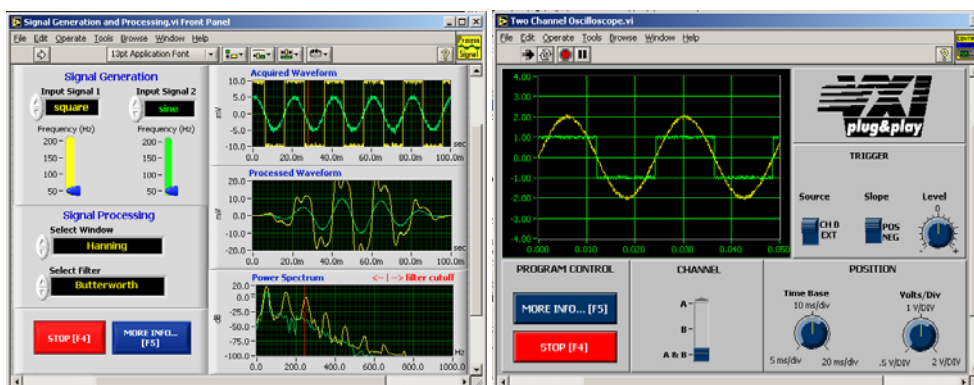


Obr. 68: VI s chybou

7.3 Tvorba čelního panelu

Čelní panel se zpravidla navrhuje jako první a jeho tvorba spočívá ve výběru jednotlivých komponent uživatelského rozhraní z palety nástrojů (má formu kontextového menu) a jejich rozmísťování v hlavním okně programu. Tyto komponenty lze rozdělit do dvou hlavních skupin na:

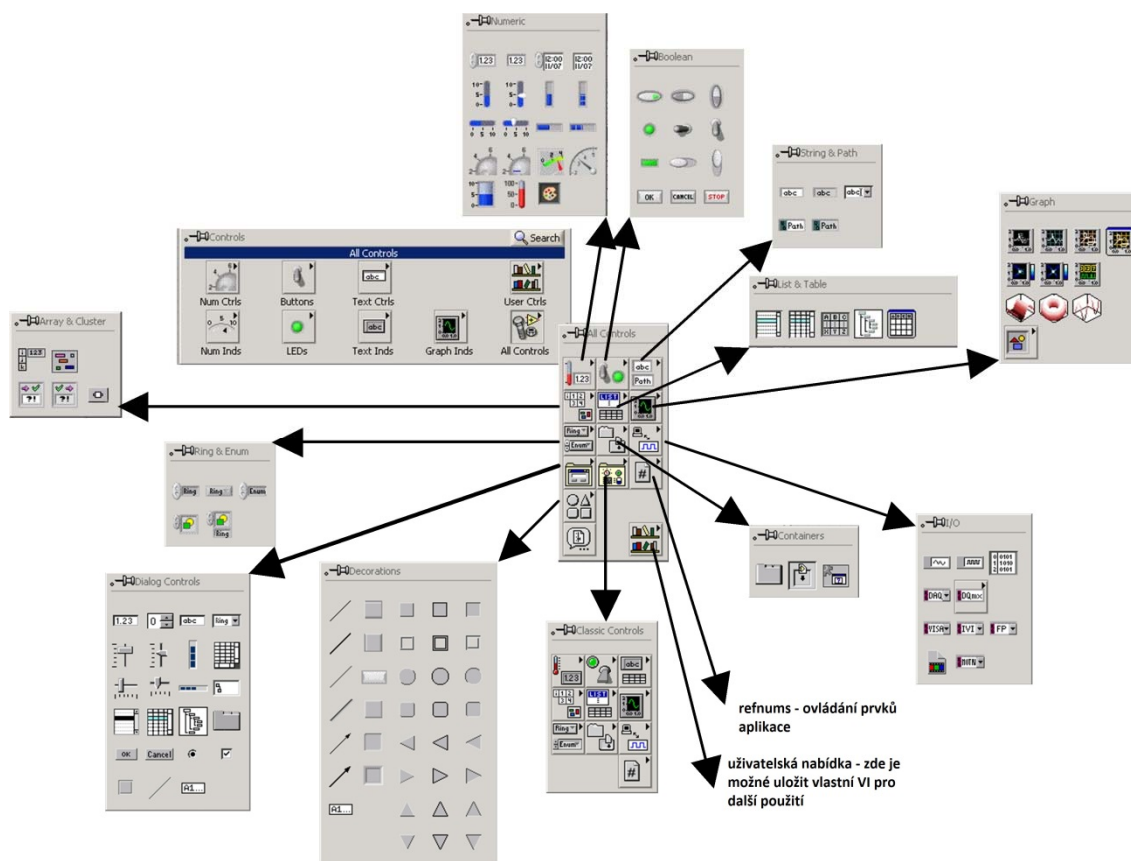
- ovládací prvky (slouží pro vstup hodnot – jsou jimi např. různé typy knoflíků, tlačítek, posuvných prvků apod.),
- indikátory (pro výstup hodnot, např. grafy, LED diody, tabulky),
- dekorace – sada objektů decorations pak slouží k docílení estetického vzhledu čelního panelu.



Obr. 69: Příklady čelních panelů VI (Signal generator a Oscilloscope z knihovny příkladů)

Graficky znázorněný přehled obsahu palety nástrojů pro tvorbu čelního panelu je na následujícím obrázku (Obr. 70). Po umístění některých ovládacích prvků na čelní panel je nutné

z kontextové nabídky prvku nastavit jeho chování (např. u tlačítek lze nadefinovat, jak se chovají během a po stisku).



Obr. 70: Prvky čelního panelu Blokový diagram

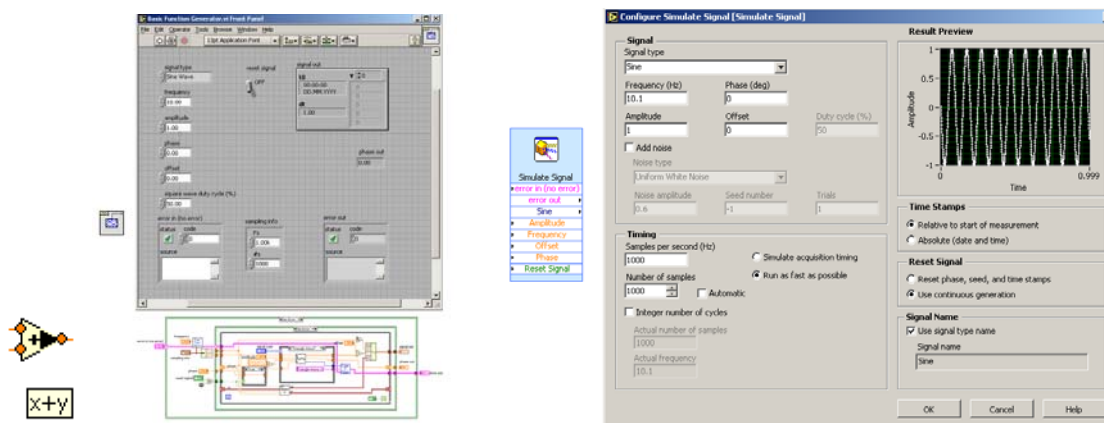
7.4 Block diagram

Po vytvoření předního panelu se v okně Block Diagram objeví terminály jednotlivých objektů čelního panelu, které je třeba spojit do funkčního celku, což se děje vložením programových struktur (cyklů, sekvencí apod.), funkcí (aritmetické a logické operace), podprogramů (SubVI) do schématu a jejich pospojování pomocí drátů (wires).

Paleta nástrojů blokového diagramu (Functions palette) obsahuje funkce a operátory pro vytváření programu. Vyvolá se kontextovým tlačítkem.

Z palety nástrojů Function Palette můžeme do schématu umísťovat následující komponenty:

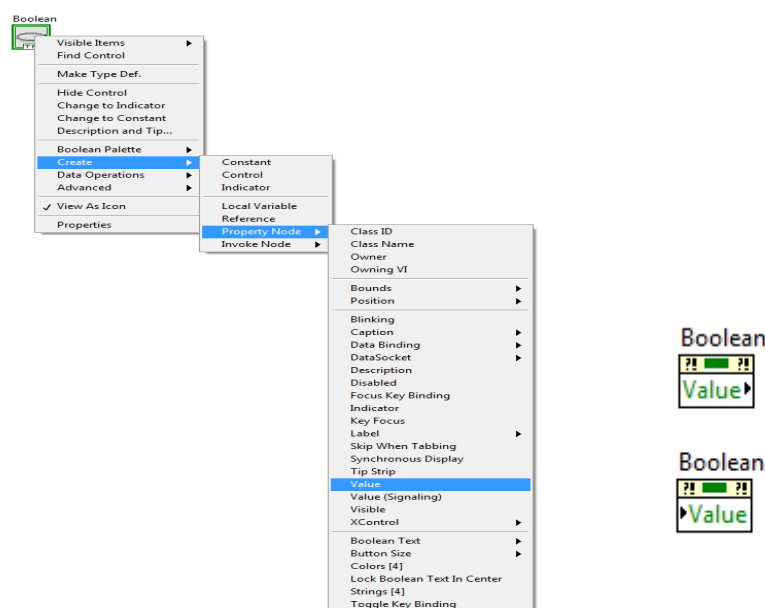
- Funkce: základní operační prvek v LabVIEW (nemá front panel a block diagram),
- Standardní VI: podprogramy (SubVI's) mají block diagram i front panel (objeví se po dvojkliku na konektor),
- Express VI: interaktivní VI s konfigurovatelným dialogovým oknem (od verze 7.0, konfigurační okno se vyvolá dvojklikem na konektor, po uzavření konfiguračního okna se konektor (jeho položky) přizpůsobí nastavené konfiguraci).



Obr. 71: Funkce (součet), Standardní VI (konektor, front panel, block diagram), Express VI (konektor, konfigurační okno)

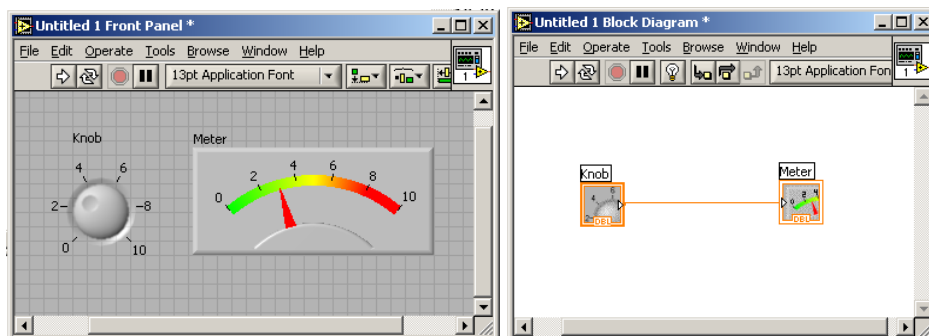
Programové řízení ovládacích prvků

Ovládací prvky na čelním panelu lze ovládat nejenom interakcí uživatele, tj. myši, klávesnicí apod., ale i programově, tj. z blokového diagramu. K tomu slouží tzv. Property Node, který je dostupný v blokovém diagramu v kontextové nabídce terminálu prvku, jehož Property Node chceme vytvořit. Na Obr. 72 je uvedena kontextová nabídka pro tlačítko, které může nabývat hodnoty True nebo False. Vytvořením Property Node s hodnotou Value a jeho nastavením na Read nebo Write můžeme zjišťovat aktuální hodnotu tlačítka bez nutnosti natahovat drát od terminálu tlačítka (zpřehlednění diagramu), nebo tlačítko přepnout (např. je uvést do původního stavu pro proběhnutí nějaké akce).



Obr. 72: Vytvoření Property Node pro tlačítko a vytvořené Property Nodes nastavené pro čtení a zápis

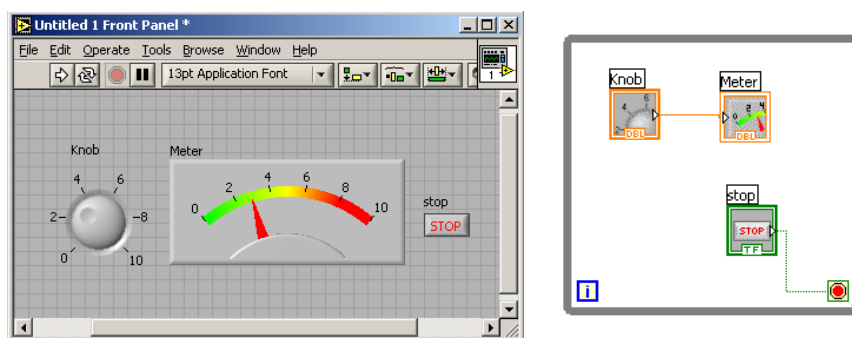
7.5 První VI a jeho modifikace



Obr. 73: První VI

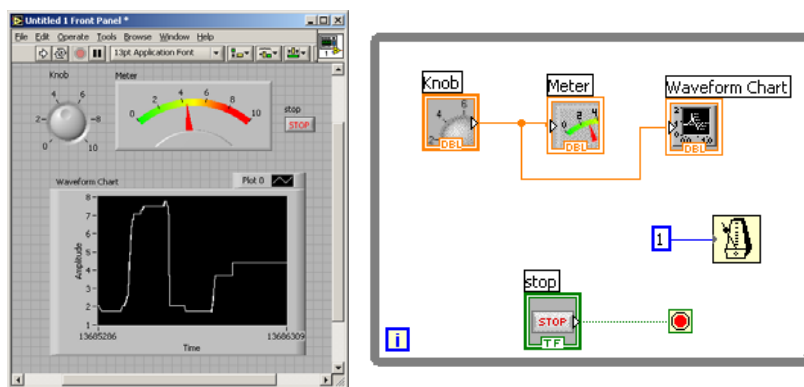
Způsob práce s LabVIEW si ukážeme na jednoduchém příkladu. Do prostoru čelního panelu umístíme jeden z prvků Numeric Controls (na Obr. 73 jde o knoflík – knob) a druhý ze skupiny Indicators (Meter). Poté přepneme do okna blokového diagramu (tam se nacházejí terminály prvků na čelním panelu), zvolíme nástroj Wiring („propojování“, kurzor se změní v piktogram cívky) (např. pomocí Tools palette, nebo tabulátorem) a propojíme terminály „drátem“ (wire). Tím je tvorba VI ukončena. Přepneme znovu do okna blokového diagramu, zvolíme nástroj Operating, kterým můžeme „otočit“ (tj. přenastavit hodnotu). VI spustíme. Na prvku Meter se ukáže hodnota nastavená prvkem Knob.

Chceme-li docílit, aby program pohyboval ručičkou prvku Meter v závislosti na nastavení polohy knoflíku, musíme VI periodicky spouštět. K tomu složí tlačítko pro opakované spuštění. Aby takto VI pracoval při normálním chodu, je nutné zajistit opakované spuštění zařazením cyklu. Uvnitř cyklu (jde zde o cyklus typu While) se zobrazuje hodnota nastavená na knoflíku na panelovém měřidle a kromě toho se testuje, zdali není stisknuto tlačítko, které cyklus ukončí. Čelní panel a blokový diagram modifikovaného VI je znázorněn na Obr. 74.



Obr. 74: Modifikace „prvního VI“, umožňující činnost „v reálném čase“

Další modifikace VI naznačuje, jak docílit zobrazení historie nastavení knoflíku pomocí grafu. Dvnitř cyklu vložíme indikátor Waveform Chart (All controls | Graph) a propojíme jej s prvkem knob. Protože cyklus běží velmi rychle, je nutné zařadit prvek umožňující zpomalení jeho běhu. To je realizováno pomocí VI Wait until next millisecond multiple (All functions | Time&Dialog), na jehož terminál je přivedena konstanta udávající časování (zde je provedena další obrátka cyklu po uplynutí jedné milisekundy). Vše je znázorněno na Obr. 75.



Obr. 75: Další modifikace „prvního VI“ umožňuje zobrazit historii nastavení knoflíku v grafu

Uvedené příklady mají za cíl demonstrovat, že práce se systémem LabVIEW je velmi jednoduchá a intuitivní.

7.6 Datové typy a struktury – přehled

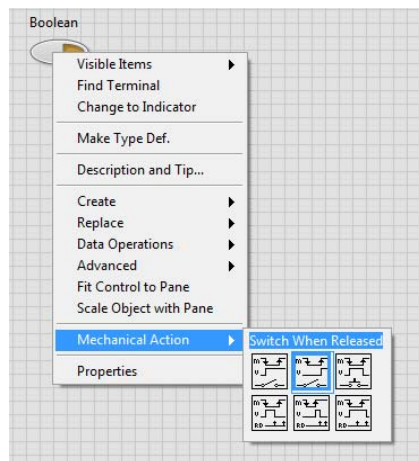
7.6.1 Prvky typu Numeric

Prvky typu Numeric slouží k zadávání číselných proměnných a konstant (prvky typu Controls) a zobrazování číselných výstupů (Indicators). Pro prvky Numeric je v LabVIEW implementováno dvanáct datových typů:

- šest celočíselných datových typů – tři pro kladná celá čísla (unsigned integer) U8 (unsigned byte), U16 (unsigned integer), U32 (unsigned long), tři pro celočíselná kladná a záporná čísla (integer) – I8 (Byte), I16 (Word) a I32 (typ Long). Číslo ve zkratce datového typu udává počet bitů čísla. Např. proměnná typu U8 je osmibitové kladné číslo, které může nabývat hodnot od 0 do 255 ($2^8 = 256$). Proměnná I16 může nabývat hodnot od 0 do ± 32767 (2^{15} , nejvyšší bit (MSB) je znaménkový, tj. určuje, je-li číslo kladné nebo záporné).
- tři typy desetinných čísel SGL (single precision), DBL (double precision), EXT (extended precision). SGL je 32 bitové, DBL 64 bitové a EXT 128 bitové číslo. Desetinné datové typy jsou reprezentovány zápisem $zM \times 10^E$, kde z je znaménko, M mantisa a E exponent. U typu SGL je 23 bitů vyhrazeno pro mantisu, 8 pro exponent, MSB bit je znaménkový. Analogické informace pro ostatní datové typy lze získat v nápovědě LabVIEW.
- tři typy komplexních čísel CSG (complex single), CDB (complex double), CXT (complex extended).

7.6.2 Typ Boolean

Proměnná typu Boolean může nabývat pouze dvou hodnot: True (pravda, logická 1), nebo False (logická 0, nepravda). Typ Boolean se využívá v logických výrazech, strukturách pro řízení chodu programu (větvení), pro indikaci stavu ovládacích prvků – tlačítek, přepínačů, které nabývají hodnot True nebo False. U ovládacích prvků typu Boolean můžeme nastavit okamžik překlopení z jednoho stavu do druhého (např. Switch When Released – přepne se v okamžiku uvolnění tlačítka myši a zůstane v přepnutém stavu), viz Obr. 76.



Obr. 76: Nastavení mechanické akce u tlačítek

7.6.3 Typ Řetězec (String)

Řetězec je sevice ASCII znaků. Užívají se pro zobrazení textových zpráv, některé VI používají řetězců určitého formátu pro předávání některých parametrů (např. při naměřených dat pomocí VI SaveToSpreadsheet je pomocí speciálního řetězce zadává, kolik platných číslic a kolik desetinných míst mají mít data po uložení). Pro práci s řetězci má programátor k dispozici celou řadu funkcí, umožňující např. spojování řetězců, vyhledávání, převod řetězců na čísla a opačně apod.

7.6.4 Datová struktura Cluster

Cluster je datová struktura sdružující prvky odlišného datového typu. V textových programovacích jazycích odpovídá tomuto datovému typu datový typ Záznam (Record). Vložení dat do clusterů umožňuje snížit počet „drátů“ v programu (zpřehlednění kódu), dále se používá pro snížení počtu přívodů konektoru při tvorbě SubVI, pokud by jejich počet přesáhl povolený počet 28. Pro vytvoření datové struktury Cluster se používá funkce Bundle, pro přístup k jednotlivým proměnným clusteru pak funkce Unbundle.

7.6.5 Datová struktura Array (pole)

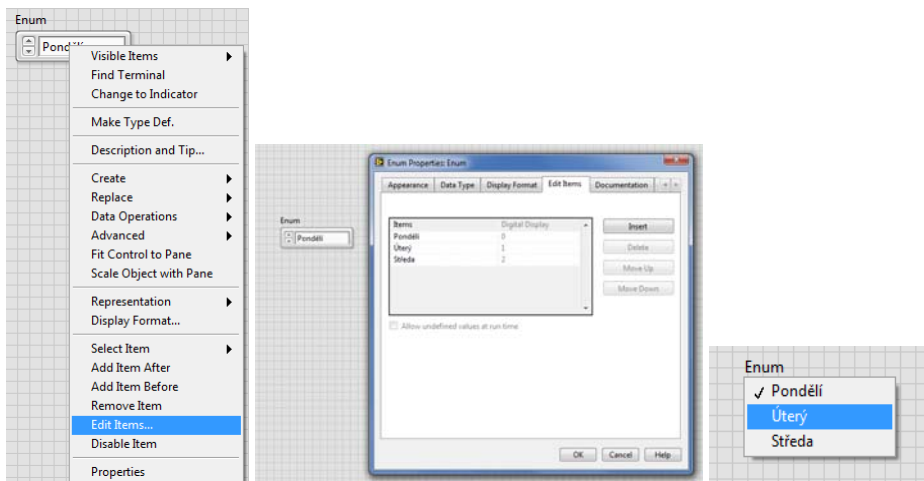
Pole je datová struktura sdružující prvky stejného datového typu. Charakteristickým rysem pole je jeho rozměr (dimenze). Nejčastěji používaným polem je pole jednorozměrné (jednodimenzionální, vektor). Jde o prostou řadu čísel (nebo jiných prvků). Dvoudimenzionálním polem je matice (poloha každého prvku dvojrozměrné struktury je charakterizována dvojicí indexů, řádkovým a sloupcovým). Pole mohou být i vícedimenzionální. Pro manipulaci s poli existuje knihovna funkcí Functions | Array.

7.6.6 Datová struktura Waveform

Waveform je cluster, skládající se ze Start Time (t_0), který určuje první bod průběhu, následuje Delta t (krok), určující časový interval mezi jednotlivými daty. Poté následuje pole dat typu DBL, reprezentující nejčastěji napěťový průběh. Waveform je nejčastěji používanou datovou strukturou pro snímání dat analogovými vstupy multifunkční karty a pro generaci průběhů napětí pro analogový výstup karty.

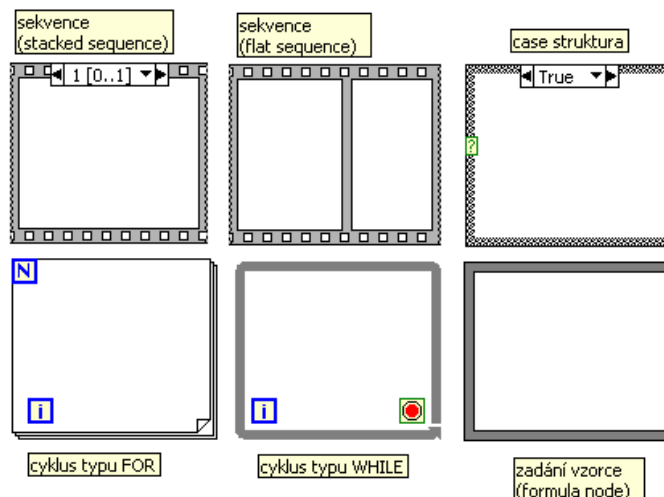
7.6.7 Datová struktura Enumeration

Enumeration (Obr. 77) je datová struktura vytvářející páry hodnot. Z pohledu uživatele se jednotlivé položky jeví jako řetězec a z pohledu počítače (Blokového diagramu) jako číslo.



Obr. 77: Datová struktura Enumeration

7.7 Základní programové struktury



Obr. 78: Základní programové struktury

7.7.1 Sekvence

Programová struktura sekvence nemá ekvivalent v textově orientovaných programových jazycích – tam je sekvenčnost provádění příkazů dána jejich pořadím ve zdrojovém kódu. Programování v LabVIEW je (na rozdíl od textově orientovaných programovacích jazyků) kontrolováno tokem dat (tzv. dataflow programming model). Objekt v blokovém diagramu je uveden v činnost, pokud se na vstupech objeví všechna vstupní data. Tato jsou poté zpracována a výsledky jsou postoupeny na výstupní terminály objektu a pak předány dalším objektům. V situacích, kdy je potřeba vykonávat jednotlivé činnosti v určeném pořadí a neexistuje-li mezi nimi datová závislost, je třeba použít sekvenční strukturu. Dva typy sequence struktury se liší jen grafickou reprezentací, nikoli činností. U stacked sequence je v horní části číselný přepínač, do jednotlivých „políček filmu“ – rámců se lze dostat pomocí myši. Flat sequence připomíná film, kódy uvnitř jednotlivých rámců se vykonávají postupně zleva doprava. U obou typů sekvence lze rámce přidávat a odebírat pomocí kontextové nabídky myši.

7.7.2 Case struktura

Case struktura je analogická podmíněnému příkazu, eventuálně přepínači textových programovacích jazyků. Používá se k větvení algoritmu. K otazníku („selector“, je umístěn na okraji rámečku) je připojen ovládací prvek nebo proměnná typu Boolean. Podle stavu (true nebo false) se provede odpovídající kód. Jednotlivé případy se přepínají pomocí nabídky, která je analogická nabídce Stacked sequence. Přivedeme-li k selectoru místo proměnné typu boolean např. některý z typů Numeric, je možné case strukturu změnit na přepínač (tj. přizpůsobit ji pro výběr z více možností). Pomocí kontextové nabídky lze přidávat další větve programu.

7.7.3 Cykly FOR a WHILE

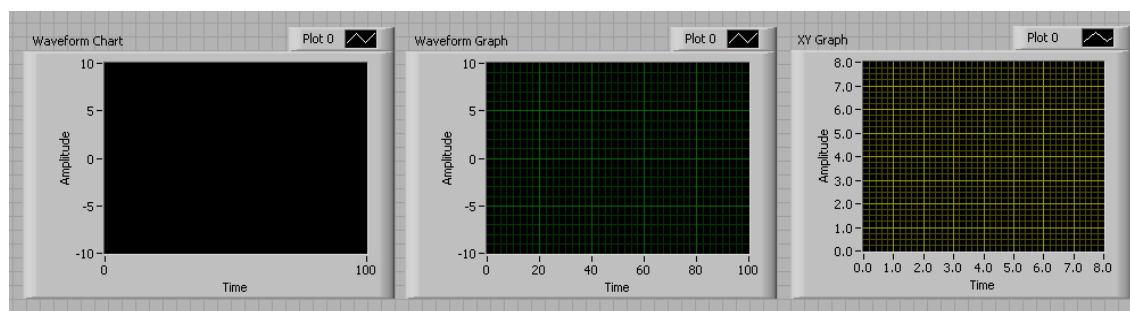
Cykly se používají k opakování algoritmu, který je v cyklu uzavřen. U cyklu typu For je počet opakování předem dán a je určen proměnnou, přivedenou zvenčí k terminálu N (v levém horním rohu). Proměnná i (nalézá se u levého dolního rohu) zvyšuje svou hodnotu při každém provedení cyklu, při prvním průchodu je její hodnota 0. U cyklu typu While není počet opakování znám předem, cyklus se ukončí, je-li splněna tzv. ukončovací podmínka. Nejčastěji bývá běh tohoto typu cyklu ukončen tlačítkem stop, jehož indikátor se nachází uvnitř cyklu a je připojen k řídicímu terminálu cyklu (v pravém dolním rohu).

Indexace tunelů a posuvné registry

U obou typů cyklů procházejí data, která do cyklu vstupují nebo z něj vystupují tzv. tunelem. U tunelu lze pomocí kontextové nabídky zapnout nebo vypnout indexaci (Enable/Disable Indexing). Je-li v případě výstupu z cyklu indexace zapnuta, je výstupem pole hodnot. Je-li vypnuta, je předána hodnota, kterou proměnná nabyla při posledním průchodu cyklu.

Posuvné registry (shift registers) jsou potřebné, pokud požadujeme přístup k hodnotě některé z proměnných kódu uvnitř cyklu, kterou tato proměnná nabývala v některém z dřívějších průchodů cyklem. Nejčastěji jde o předchozí průběh cyklem, i když danému posuvnému registru lze počet pamatovaných kroků přidávat a ubírat volbou Add/Remove Element z kontextové nabídky.

7.7.4 Práce s grafy (Graphs, Charts)



Obr. 79: Grafy

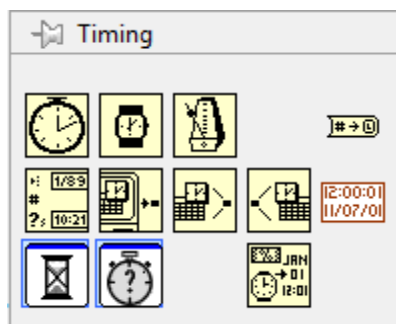
Grafy (Obr. 79) jsou dvou základních typů:

- Charts – vstupní data jsou předávána bod po bodu, popř. jako bloky dat představující úseky zobrazovaného průběhu. Data se zobrazují tak, jak jsou grafu dodávána. Charts jsou často používány uvnitř cyklů.
- Graphs (grafy) – data se zobrazují „najednou“.

Podle zvoleného typu grafu je nutno pro něj připravit i vhodnou datovou strukturu odpovídající vybranému typu grafu a počtu požadovaných průběhů v něm zobrazených datových struktur. Nejčastěji jde o jednorozměrné pole prvků y, pro zobrazení více průběhů pak o pole clusterů.

7.7.5 VI pro práci s časem

Tyto VI jsou soustředěny na paletě Timing (Obr. 80). Důležité jsou zejména první tři funkce.



Obr. 80: Timing

Tick count vrací hodnotu milisekundového časovače Windows. Funkci je nutné používat s opatrností, neboť po dosažení hodnoty $2^{32}-1$ začíná čítač počítat znovu od nuly. VI *Wait(ms)* přeruší běh programu na daný počet milisekund. Tato funkce se často používá uvnitř cyklů („čekací smyčka“), protože během přerušení běhu může počítač pracovat na jiných úlohách. VI *Wait until next millisecond multiple* se rovněž používá uvnitř cyklu, kde stanoví „časové body“, při kterých může nastat iterace čekací smyčky. Např. je-li uvnitř cyklu tento VI nastaven na 10 ms, smyčka může pokračovat v okamžiku uplynutí 10, 20 30 atd. milisekund od startu cyklu. Trvá-li např. vykonání jiné činnosti uvnitř cyklu 21 milisekund, smyčka po dokončení této činnosti počká dalších 9 ms a poté se při dosažení 30 ms překloupí. Další VI obsažené na paletě Timing slouží k získání informace o datumu a čase v různých formátech.

7.7.6 Tvorba výstupních protokolů – Report Generation

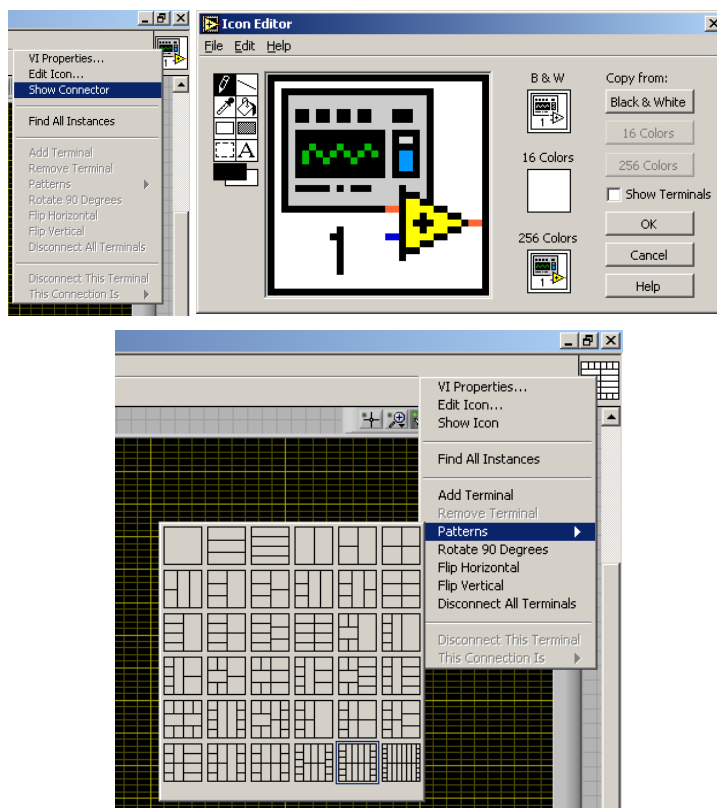
Report generation umožňuje vytvořit výstupní soubor obsahující výsledky činnosti programu (např. měření a vyhodnocení), který může být uložen na disk nebo vytištěn na tiskárně počítače. V LabVIEW je standardně implementován pouze jednoduchý nástroj pro vytváření reportů, který umožňuje vložit název a datum protokolu a přidat do protokolu obrázky grafů, tabulek s výsledky apod. Větších možností lze dosáhnout dokoupením přídatného modulu k LabVIEW s názvem Report Generation Toolkit (cca 12 tis. Kč), který spolupracuje s MS Office a tím umožňuje tvorbu reportů ve formátu .doc, xls a html při využití možnosti vytvoření šablón (např. Excelovského šablónu s příponou .xlt), do kterých LabVIEW pouze vloží požadovaná data.

7.7.7 Práce se soubory

Práce se soubory je soustředěna v knihovně File I/O (input/output). Knihovna nabízí funkce dvou úrovní – high level VI a low level VI. Nejčastější činností je zápis prvků pole do souboru typu spreadsheet (tj. tabulky, kterou lze importovat například do programu MS Excel). VI *Write To Spreadsheet File* umožňuje uložit jedno, nebo dvojrozměrné pole, u jednorozměrného pole umožňuje zvolit, jestli budou data ukládána do řádku nebo do sloupce, dále umožňuje nastavit počet platných číslic a desetinných míst u ukládaných číselných hodnot. Příklady použití lze najít v příkladech na konci tohoto skriptu.

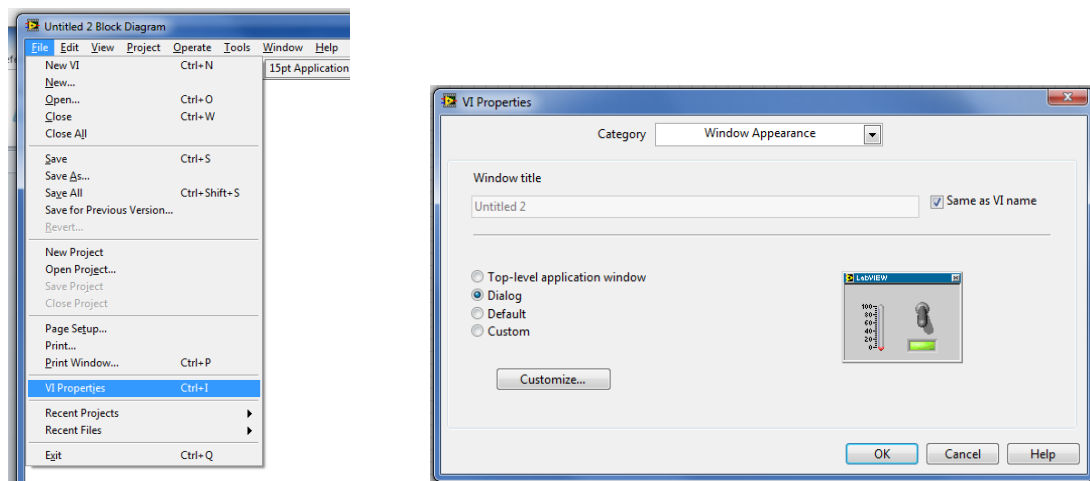
7.8 Tvorba podprogramu (Sub-VI)

Každý vytvořený VI lze lehce přispůsobit do podoby podprogramu (SubVI). SubVI je reprezentován ikonou, vybaven vstupními a výstupními terminály a lze jej využít při tvorbě jiných VI. Úprava VI do podoby Sub-VI spočívá právě v nadefinování ikony a terminálů (Obr. 81). Ikona Sub-VI se nalézá v pravém horním rohu okna VI. Po dvojkliku na tuto ikonu se otevře Icon editor, ve kterém lze ikonu navrhnout (ovládá se jako program Malování/Paintbrush). Knávrhu konektoru lze přejít volbou Show Connector z kontextové nabídky, vyvolané kliknutím pravým tlačítkem myši v prostoru ikony. Obvykle je programem vybráno optimální rozložení vstupů a výstupů, pokud z nějakého důvodu nevyhovuje, lze zvolit jiné (položka Patterns). Přiřazení vstupů a výstupů se provádí pomocí nástroje Wiring tak, že propojujeme jednotlivé vývody konektoru s požadovanou komponentou na čelním panelu. Klikneme nejprve na vývod konektoru a poté na komponentu, kterou s vývodem propojujeme. Správně propojený vývod konektoru změní barvu.



Obr. 81: Tvorba SubVI (práce s konektorem)

SubVI lze používat jen jako podprogram, tj. k zřehlednění kódu např. při opakovaném použití v dané aplikaci – při tomto použití není vyvoláván čelní panel, nebo můžeme SubVI spouštět jako dialogové okno a tím vytvářet programy, které nejsou tvořeny pouze jedním čelním panelem, ale zahrnují více oken. V tom případě je nutné čelní panel nastavit jako dialogové okno (Obr. 82).

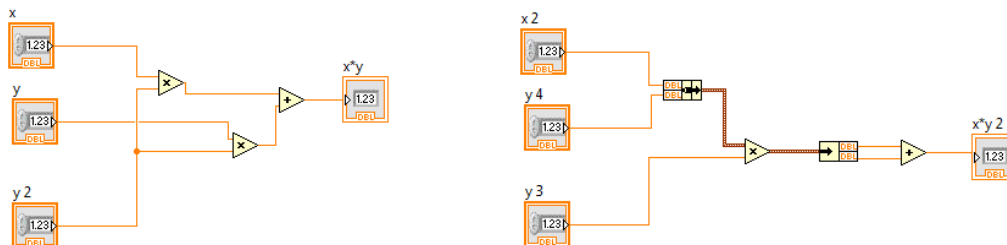


Obr. 82: Nastavení čelního panelu SubVI jako dialogového okna

7.9 LabView – provádění programu – polymorfismus, Data flow, multitasking, threading

Polymorfismus

Programovací jazyk podporující polymorfismus je ten, který umožňuje zpracovávat různé datové typy stejným rozhraním. V LabVIEW se polymorfismus projevuje tak, že je možné připojit k funkci nebo subVI různé datové typy a výstup se automaticky přizpůsobí (samozřejmě musí uvedená aktivita v daném kontextu „dát smysl“, Obr. 83).



Obr. 83: LabVIEW: polymorfismus u funkce násobení

Data flow

Funkce nebo podprogram (SubVI) je provedena ihned, jakmile jsou k dispozici hodnoty proměnných na vstupech dané funkce nebo SubVI. Tento základní princip chodu programu LabVIEW se označuje jako Data flow control.

Multitasking, threading

Počítače jsou obvykle vybaveny jediným procesorem, který může v jeden okamžik zpracovávat jen jednu úlohu. Pro lepší využití výkonu procesoru se však provádí zpracování celé řady úloh současně. To je možné pouze tak, že procesor je přidělován podle určitého algoritmu postupně všem zpracovávaným úlohám na krátký časový okamžik (časové kvantum). Tomuto procesu přidělování časových kvant se říká multitasking. Podle způsobu přidělování a odebrání časových kvant rozlišujeme dva základní způsoby – kooperativní multitasking a preemptivní multitasking. Kooperativní multitasking je způsob současného zpracování více úloh na počítači,

vyžadující jejich aktivní spoluúčast. Na rozdíl od preemptivního multitaskingu není operační systém schopen sám odebrat úloze procesor. Od běžících úloh se vyžaduje, aby v pravidelných intervalech předávaly řízení zpět operačnímu systému, který pak spouští ostatní úlohy. Výhodou tohoto řešení je jednodušší implementace, podstatnou nevýhodou skutečnost, že chybně naprogramovaná úloha nemusí vrátit řízení zpět operačnímu systému a tím způsobit úplné zastavení systému i ostatních úloh. Kooperativní multitasking používaly například Microsoft Windows do verze 3.11. Při preemptivním multitaskingu o přidělování a odebírání časových kvant jednotlivým úlohám plně rozhoduje operační systém. Výhodou tohoto řešení je, že nedochází k „zatloučení“ počítače, neboť i v případě, že úloha zhavaruje, odebere operační systém dané úloze řízení a přidělí časové kvantum ostatním úlohám. Nevýhodou jsou vyšší nároky na hardwarové vybavení počítače. Preemptivní multitasking používají MS Windows od verze 95 (v řadě NT je od začátku) a jádro Linux od svého vzniku.

Podobně jako současný běh několika programů zároveň může být užitečné současné provádění několika operací v rámci jedné spuštěné aplikace. Analogie multitaskingu u programů je threading (někteří autoři ovšem používají termín multitasking místo termínu threading). Běh aplikace je rozdělen do několika vláken (threads), které mohou být zpracovány po časových kvantech, u víceprocesorových systémů může (v ideálním případě) běžet jedno vlákno na jednom procesoru.

V LabVIEW se v souvislosti s threadingem rozlišuje synchronní a asynchronní provádění bloků aplikace (např. skupin SubVI nebo jednotlivých SubVI). Je-li blok prováděn asynchronně, je procesor uvolněn až poté, co je provádění kódu bloku dokončeno. Naproti tomu synchronní provádění znamená, že procesorový čas je bloku přidělován podle pravidel multitaskingu.

Threading je v systému LabVIEW široce využíván. Existují-li v rámci jedné aplikace dva navzájem nezávislé VI, zpracovávají se paralelně v jednotlivých vláknech, mezi kterými systém přepíná podle pravidel preemptivního multitaskingu. Vzhledem k tomu, že je k dispozici pouze omezený počet vláken, může u aplikací s velkým množstvím paralelních úloh systém přejít na kooperativní multitasking, jsou-li všechna vlákna již využita. Threading je u LabVIEW založen na frontě aktivních úloh. Do této fronty vstupují bloky, na kterých je splněno pravidlo data flow – na všech svých vstupech mají platná data. Systém přidělí úloze na vrcholu fronty kapacitu procesoru na definovaný čas a po jeho uplynutí mohou nastat následující situace:

- úloha je ukončena a poté vyřazena z fronty aktivních úloh,
- úloha není po uplynutí přiděleného času ukončena a je zařazena na konec fronty aktivních úloh,
- úloha není po uplynutí přiděleného času ukončena a pokračuje ve svém provádění, je-li fronta aktivních úloh v tomto okamžiku prázdná.

V LabVIEW běžícím v operačním systému Windows jsou vlákna přepínána po uplynutí doby 155 ms. Kromě aktivních funkcí existují v LabVIEW i funkce čekání – nebylo by efektivní, kdyby blok, který vykonává čekání, blokoval vrchol fronty aktivních úloh. Existuje proto ještě druhá fronta tzv. spících úloh, do které blok přechází po dobu vykonávání čekání. V nastavení voleb pro běh VI | VI Properties | Execution je možno určit pro daný VI vlákno, ve kterém má běžet. Celkem jsou k dispozici tato vlákna:

- user interface,
- standard,
- instrument I/O,
- data acquisition,
- other 1,
- other 2,
- same as caller.

Cílem je rozdělit aplikaci na části, které běží relativně nezávisle na jiných částech aplikace. Standardně běží VI ve vlákně standard. Kromě tohoto vlákna existují význačná vlákna pro obsluhu přístrojů (instrument I/O), vlákno pro obsluhu hardware pro sběr dat (data acquisition) a pro obsluhu grafického rozhraní k uživateli (user interface). Každé z vláken si vytváří svou vlastní frontu aktivních úloh. Grafické rozhraní je řízeno vláknem user interface.

7.10 NI-DAQ

Funkce pro obsluhu multifunkčních zásuvných karet se jsou dostupné z Functions Palette v části All functions | NI Measurements | Data Acquisition resp. DAQmx. Aby bylo zajištěno, že uživatel bude mít k dispozici vždy nejnovější verzi této knihovny v situaci, kdy svůj systém doplní o novou multifunkční kartu, je spolu s multifunkční kartou dodáváno CD s aktuální verzí NI-DAQ ovladačů. Aktualizované verze pak lze stáhnout zdarma z internetu (www.ni.com). Driver má Application Programming Interface – API, což je knihovna funkcí, VI (virtuálních přístrojů – LabVIEW), tříd, atributů a vlastností pro tvorbu aplikací. Součástí DAQ je obsáhá dokumentace – User Manual, Function Reference Manual a On-line help. V roce 2004 vypracovala firma NI nový driver NI-DAQ verze 7. Tento projekt byl největším softwarovým projektem firmy. Nový NI-DAQ 7.x obsahuje dva NI-DAQ drivery:

- tradiční NI-DAQ (Traditional DAQ),
- NI-DAQmx.

Výhodou je, že je možno použít tradiční NI-DAQ i NI-DAQmx na tom samém počítači. Tradiční NI-DAQ je upgradem dřívějších verzí NI-DAQ. NI-DAQmx je nový NI-DAQ driver, který má mnoho předností a výhod oproti tradičnímu NI-DAQ:

- DAQ assistant – grafický způsob konfigurace kanálů a měřicích úloh a generování kódu na základě NI-DAQmx pro vybrané kanály a úlohy pro použití v LabWindows/CVI, LabVIEW a Measurement Studio,
- možnost vícevláknových operací a zvýšení rychlosti snímání dat,
- jednodušší a intuitivní API,
- podpora generování průběhů přímo v hardware,
- podobné API pro ANCI C, LabWindows/CVI a Measurement studio, C++ interface.

Nový hardware společnosti National Instruments již zpravidla Traditional DAQ nepodporuje (např. multifunkční karty řady M).

7.10.1 Sběr dat pomocí NI-DAQ

Při řešení programování sběru dat je velmi výhodné se inspirovat příklady uvedenými v Example Finder v části Hardware Input and Output | DAQmx a Traditional DAQ. Příklady pokrývají všechny standardní situace a uživatel zde obvykle nalezne tu, která splňuje jeho požadavky. Kód pak může přenést do své aplikace. Na příkladech je též možné nastudovat použití funkcí z knihovny DAQ.

7.10.2 Tradiční DAQ

V tradičním DAQ lze sběr dat zajistit pomocí tří sad funkcí:

- Easy I/O,
- Intermediate I/O,
- Advanced I/O.

Základní (nejjednodušší) úroveň snímání dat představuje použití Easy Input and Output funkcí:

- vstupní a výstupní parametry dané funkce je možné vyčíst z okna nápovědy (help v kontextové nabídce),
- tučně vytištěné vstupy v nápovědě označují parametry základní, které je nutno zadat,
- tenčí zobrazené vstupy jsou parametry pomocné (nepovinné, nebo mají default nastavení – hodnota v závorce u parametru znamená přednastavenou hodnotu),
- Při výskytu chyby se otevírá dialogové okno s možností ukončit program nebo pokračovat v jeho činnosti.

Nevýhodou Easy I/O funkcí je jejich synchronní provádění – po dobu snímání dat je přerušena multitaskingová blokována ve vývojovém prostředí a aplikace čeká na dokončení I/O funkce. Dále jsou tyto funkce nepoužitelné pro dlouhodobá kontinuální měření na vyšších vzorkovacích frekvencích s požadavkem současného zobrazení, případně analýzy měřených dat bez ztráty měřených dat (Gap Free Measurement Methods). Pro tento typ aplikací jsou v knihovně sběru dat funkce umožňující asynchronní provádění sběru dat s využitím dvojité vyrovnávací paměti. Tyto funkce se nacházejí v úrovni Intermediate této knihovny a jejich typické použití ukazují i příklady, které jsou standardní součástí instalace vývojového prostředí.

Intermediate VI – Traditional DAQ

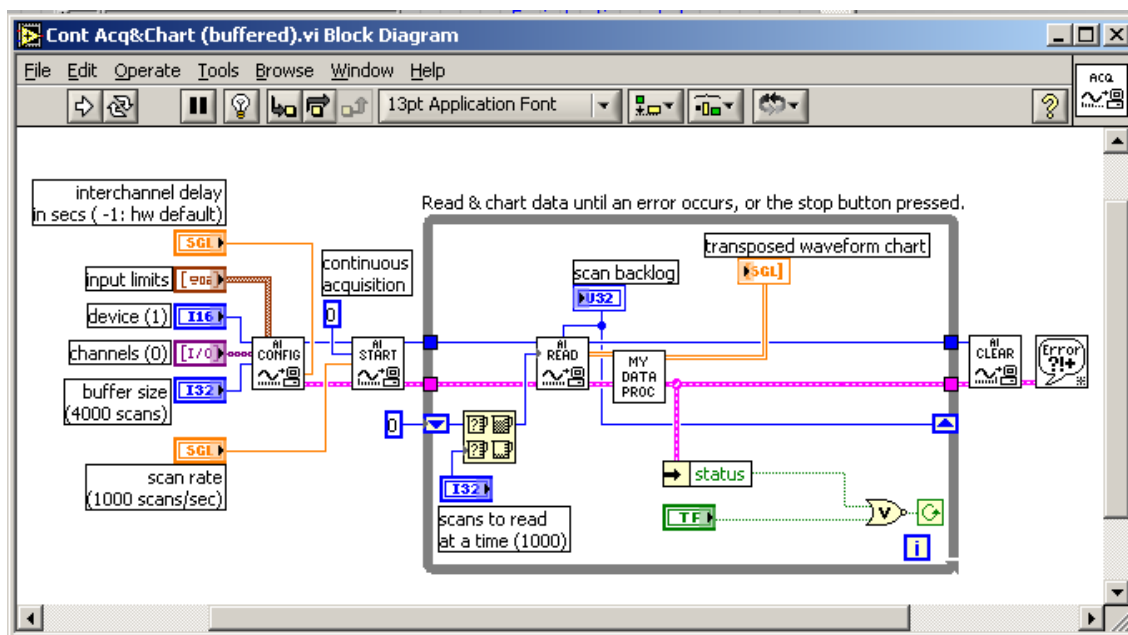
Každá funkce této úrovně má mezi vstupními parametry parametr error in, což je cluster obsahující proměnnou typu Boolean (je-není chyba), proměnnou typu Integer s kódem chyby a proměnnou typu String s popisem zdroje chyby. Mezi výstupními parametry je parametr error out, který obsahuje tytéž proměnné. Jedná se tedy obdobně jako u funkcí pro obsluhu souborů o průchozí parametr, který má tři účely:

- určuje sekvenci provádění jednotlivých funkcí podle principu Data Flow,
- při výskytu chyby identifikuje typ chyby – dá se jednoduše ošetřit funkcí ze skupiny Utility Error Handlers,
- při výskytu chyby se funkce následující za zdrojem chyby již neprovádějí – identifikují výskyt chyby podle proměnné typu Boolean z clusteru, čímž je zabráněno kolizním situacím v případě, že předchozí funkce neukončily svou činnost korektně. Tuto metodu se dá použít i v cyklech typu while, kdy proměnná typu Boolean z chybového clusteru může být použita pro předčasné ukončení cyklu, nabude-li hodnoty TRUE.

V paměti počítače je alokována kruhová vyrovnávací paměť. To znamená, že při dosažení jejího konce začíná proces jejího plnění znovu od počátku. Při přenosu dat z vyrovnávací paměti typu FIFO (paměť typu zásobník – first in first out) měřící karty do této kruhové vyrovnávací paměti se přitom uplatňují standardní mechanismy přerušení a blokových přenosů dat řízených řadičem přímého přístupu do paměti. Speciální funkce lze otestovat, kolik nevyčtených naměřených dat kruhová vyrovnávací paměť aktuálně obsahuje:

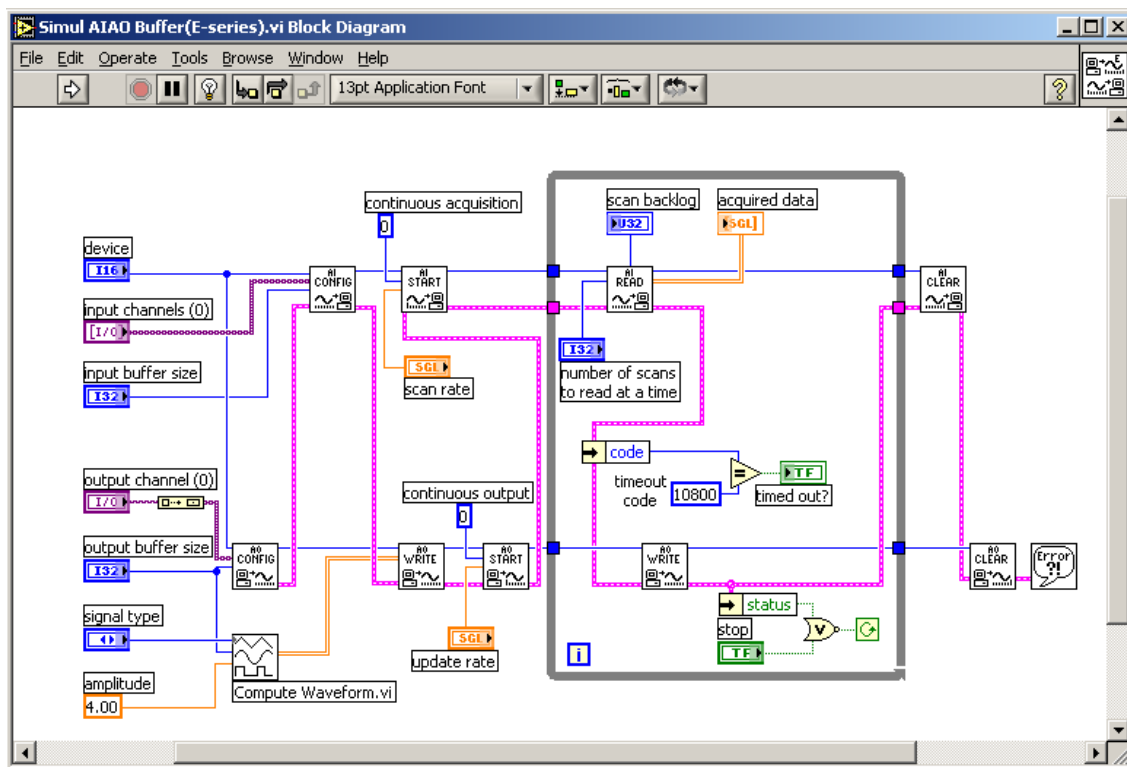
- Dosáhne-li počet nevyčtených dat velikosti druhé vyrovnávací paměti, která je alokována v operační paměti počítače, přenesou tato data z kruhové vyrovnávací paměti do této paměti.
- Proces plnění kruhové vyrovnávací paměti přitom běží na pozadí a umožňuje tak, aby v době, kterou systém nepotřebuje pro přenos dat z kruhové vyrovnávací paměti tato data dále zpracovával.
- Navenek je tedy možné i při běžícím sběru dat jejich současné zpracování do žádané podoby (funkce sběru dat tedy pracuje asynchronně).

Následující obrázek ukazuje realizaci dříve popsaného mechanismu na příkladu, který je součástí vývojového prostředí:



Obr. 84: Asynchronní funkce sběru dat pro kontinuální sběr dat s využitím dvojité vyrovnávací paměti

Další typickou DAQ úlohou je současné použití analogového vstupu a výstupu. Simultánní vstup a výstup dat je např. základem ovládání činnosti počítačově řízeného potenciostatu (viz str. 113). U multifunkčních měřicích karet bývá udávána maximální rychlost každé části karty zvlášť. Při použití analogového výstupu i vstupu současně (např. pro změření přenosu obvodu apod.) se uživatel k maximálním udávaným hodnotám nemusí ani zdaleka přiblížit. Tato situace se může vyskytnout zejména u karet s pouze jedním kanálem pro přímý přístup do paměti (Direct Memory Access – DMA), který je nejrychlejší způsobem přenosu dat po sběrnici PCI. Má-li karta tento kanál jen jeden, zabere ho např. operace s analogovým vstupem a analogový výstup se musí spokojit s přenosem dat pomocí přerušování. To je ale mnohonásobně pomalejší. Pro takovéto úlohy je tedy nutné vybrat kartu s několika kanály DMA. Často se však stává, že tento údaj v dokumentaci ke kartě chybí. Následující příklad (Obr. 85) ukazuje použití intermediate VI pro realizaci současné generace průběhu napětí na analogovém výstupu a sběr dat na analogovém vstupu.



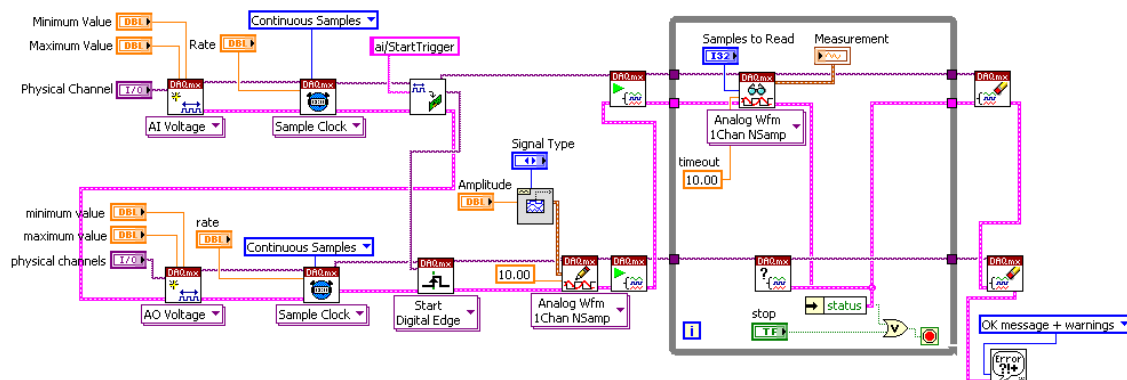
Obr. 85: Současný vstup a výstup dat

7.10.3 NI-DAQmx

NI-DAQmx nahrazuje VI úrovně easy jedním Express VI – DAQ assistantem. Po jeho volbě se spustí průvodce, který umožní požadovanou úlohu nakonfigurovat. Poté se VI vygeneruje – umožní připojit vstupy a výstupy dat. Většina jednodušších úloh v tomto skriptu je řešena pomocí DAQ assistantu.

Intermediate VI – DAQmx

Použití VI úrovně intermediate jsou pro DAQmx demonstrovány na stejných příkladech, které byly použity pro ilustraci použití u tradičního DAQ. Následující příklad demonstruje současné použití analogového výstupu a analogového vstupu.



Obr. 86: Současný vstup a výstup dat implementovaný pomocí NiDAQmx

Vytvoření VI spočívá v těchto krocích:

- Vytvoření AI a AO kanálů.
- Nastavení rychlosti, s jakou jsou sbírána data z AI a vkládáno napětí na AO. V tomto případě jsou tyto rychlosti nastaveny nezávisle na sobě, pomocí dvojice VI sample clock.
- Následuje použití VI Get Terminal Name with Device Prefix. Tento VI vygeneruje správné jméno úlohy, potřebné pro spouštěč (trigger).
- Definování způsobu spuštění měření (zde spuštění hranou digitálního pulsu – Digital Edge Start Trigger). Spuštění snímání dat analogovým vstupem je zde startováno zahájením generování napětí analogovým výstupem. Takto je zajištěno současné spuštění AI a AO.
- Analogový signál je v tomto případě generován pomocí VI Basic function generator (je možné zvolit sinusový, čtvercový nebo trojúhelníkový signál).
- Start VI spustí obě funkce. AO musí být spuštěn před AI.
- Data z AI jsou čtena v cyklu, dokud uživatel nestiskne tlačítko stop nebo nenastane chyba. VI Is The Task Done? testuje výskyt chyby VI is used to check for errors in the Analog Output Task.
- Úloha je ukončena spuštěním Clear VI.
- Případné hlášení o chybě je zobrazeno v popup menu.

7.11 NI-VISA

NI-VISA (Virtual Instruments Standard Architecture), vyvíjené společností National Instruments je rozhraní vyšší úrovně pro ovládání periferií. Jde o sadu tzv. API (advanced programming interface) funkcí, které lze používat v různých programovacích jazycích (včetně LabVIEW, resp. jazyka G) a které umějí pracovat s širokou škálou různých zařízení (zejména sériový a paralelní port, USB port, GPIB, Ethernet, PXI a VXI instruments aj.) – VISA funkce zajišťují komunikaci s ovladači nejrůznějších zařízení a není třeba zvládat programování každého zařízení zvlášť.

Přístroje používající komunikaci pomocí GPIB, sériové linky, ethernetu, a některá VXI zařízení používají komunikaci založenou na zprávách (message-based communication). Ovládání přístrojů tohoto typu pomocí VISA spočívá v zasílání ASCII řetězců, které lokální procesor přístroje vyhodnocuje a na základě jejich vyhodnocení provádí požadované operace. Součástí VISA, zvaná SCPI (The Standard Commands for Programmable Instruments), standardizuje ASCII řetězce tak, aby byly použitelné pro ovládání všech kompatibilních přístrojů. Nejčastěji používané VISA funkce pro komunikaci založenou na zprávách jsou VISA Read, VISA Write, VISA Assert Trigger, VISA Clear, and VISA Read STB.

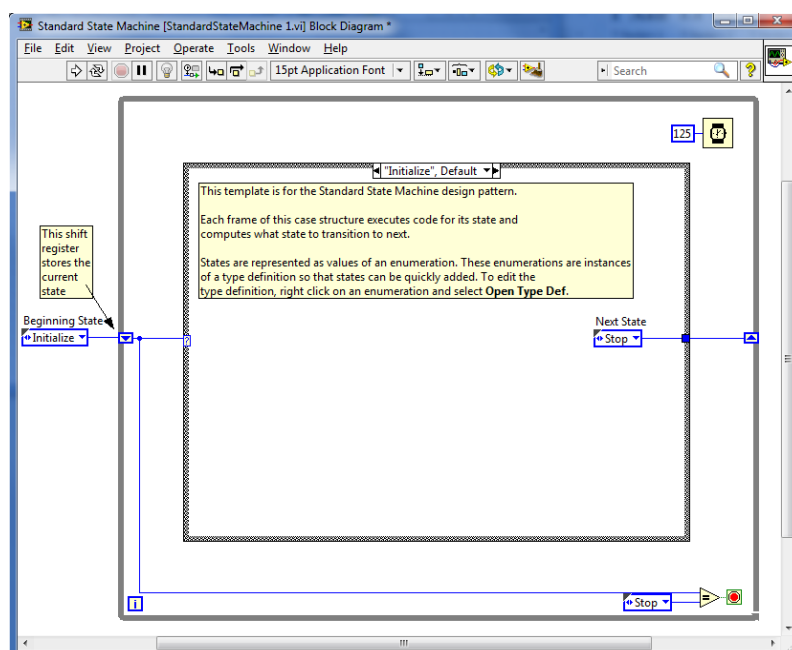
PXI a mnohé VXI přístroje používají komunikaci založenou na registrech (register-based communication). Tyto přístroje se programují pomocí zápisu binárních kódů přímo do odpovídajících registrů, tj. manipuluje se přímo s hardwarem na nejnižší úrovni. Výhodou tohoto způsobu je vysoká rychlost, protože odpadá nutnost překladu ovládacích ASCII řetězců.

Nejčastěji používané VISA funkce sloužící pro přímé ovládání registrů jsou VISA In, VISA Out, VISA Move In a VISA Move Out. Některé možnosti práce s VISA lze nalézt v příkladech na konci tohoto skriptu.

7.12 LabVIEW – design aplikací, kompilace, tvorba instalátoru

Aplikace v LabVIEW mohou být různě rozsáhlé, složitost je určena jednak složitostí ovládaného nebo měřeného zařízení resp. procesu, jednak požadavky na vyhodnocení dat apod. Při vytváření aplikace se zpravidla vytvářejí jednotlivé SubVI odpovídajícího blokového diagramu, které jsou pak součástí hlavního programu. Hlavní program může mít např. podobu sekvence, do jejíchž jednotlivých snímků jsou umístěny subVI v pořadí, v jakém je potřeba uskutečňovat jednotlivé činnosti programu (např. inicializace měřicího systému, měření, vypnutí měřicího systému, zpracování, zobrazení a uložení dat). Po vykonání všech činností se takovýto program ukončí a je třeba jej znova spustit. Situace se komplikuje, pokud např. chceme ponechat uživateli možnost rozhodnout, zdali se data budou ukládat, nebo ne. V tom případě musíme v programu implementovat čekací smyčku, která testuje, jestli je stisknuto tlačítko pro uložení dat. Dalším stupněm požadavků, které můžeme na aplikaci mít je umožnění opakování celého cyklu měření. V tom případě je nutné hlavní program umístit dovnitř case struktury a implementovat tlačítko, které tuto strukturu ovládá – tj. zahájí měření. Navýšením podobných požadavků na uživatelské rozhraní může být struktura výsledné aplikace značně složitá.

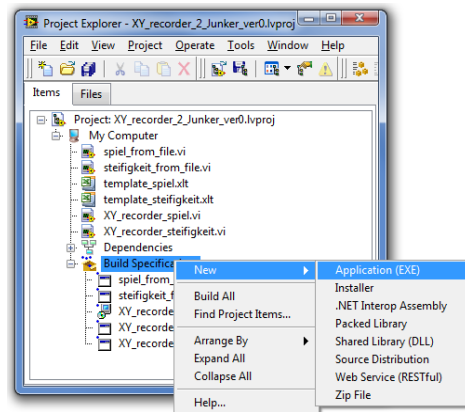
Požadavky tohoto typu se poměrně často řeší pomocí tzv. State machine, což je složitější programová struktura složená z 1) cyklu typu While, do kterého je umístěna 2) Case struktura, v jejíchž jednotlivých rámcích jsou umístěny jednak funkce, které vykonávají funkce příslušné pro daný rámec Case struktury, jednak tzv. přechodový kód, který určuje, případně umožňuje rozhodnout, který rámec se bude vykonávat následně po ukončení činnosti daného rámce. Pro řízení Case struktury se často využívá datové struktury Enum. State machine není třeba programovat „od začátku“, ale je možné využít předdefinovaného templátu, který je k dispozici na uvítací obrazovce po spuštění LabVIEW (Obr. 87). Kromě State machine existují i jiné architektury aplikací, v LabVIEW jsou implementovány též templáty pro VI typu Producer-Consumer, Master-Slave apod.



Obr. 87: Templát pro stavový stroj (State Machine)

Po naprogramování je možné aplikaci provozovat v rámci systému LabVIEW, nebo ji zkompileovat do podoby samostatné aplikace. Ve vyšších verzích LabVIEW (≈ od verze 8.0) je nutné nejprve vytvořit tzv. projekt, do něj zahrnout potřebná VI, pomocné soubory (jsou-li

součástí aplikace) apod. Projekt se vytvoří volbou z menu Project | NewProject (Obr. 88). V rámci projektu pak lze vytvořit novou aplikaci volbou Create | New Application, nastavit chování aplikace, vzhled a rozměry oken, vytvořit ikonu a nakonec aplikaci zkompilevat (Build Application).



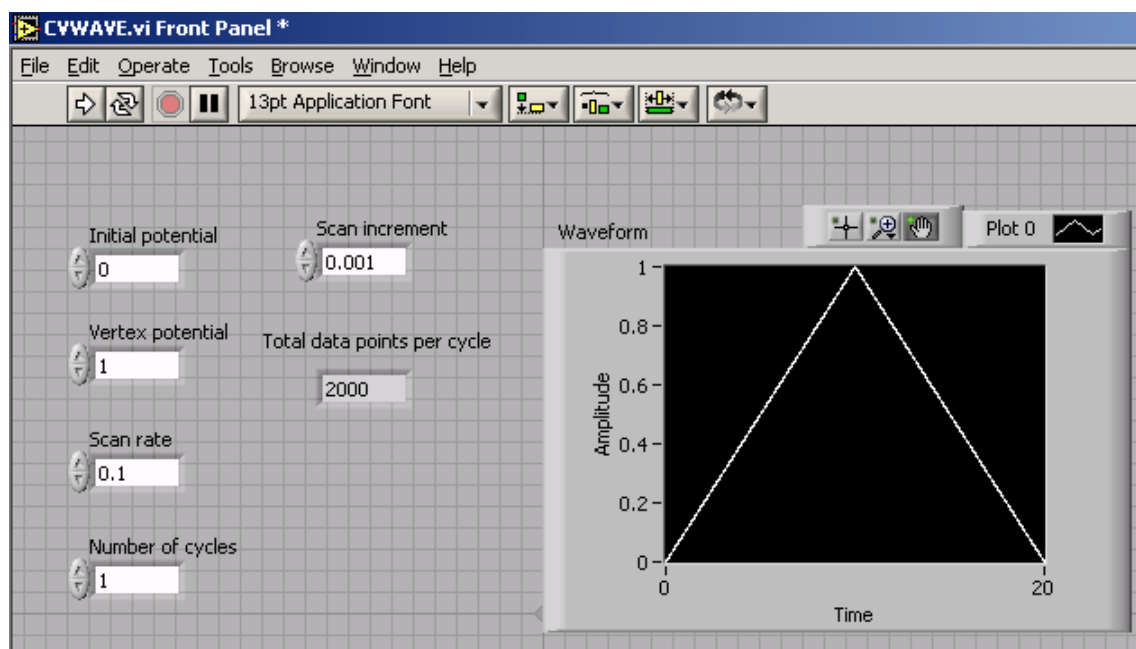
Obr. 88: Project Explorer

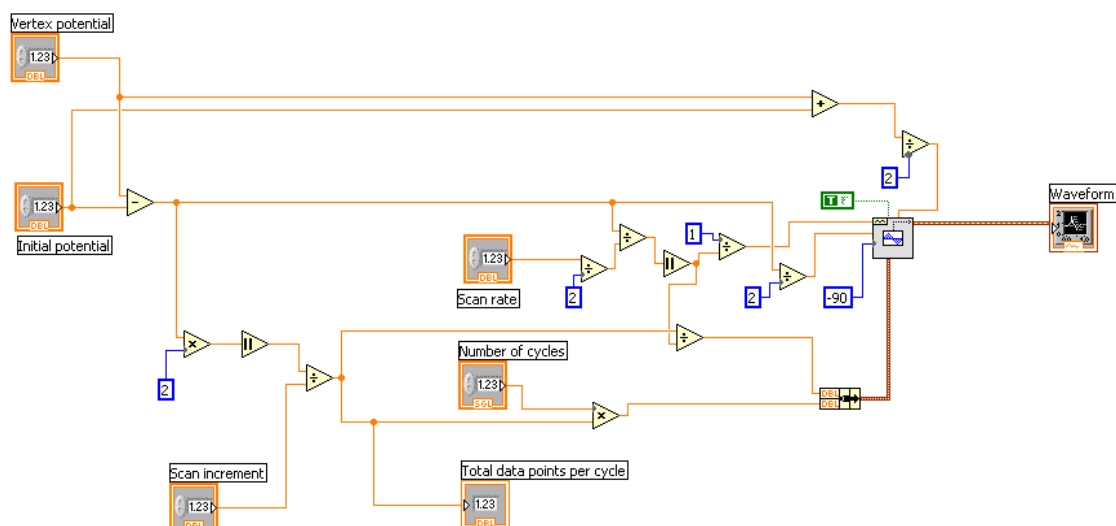
Pro zkompilevanou .exe aplikaci nebo skupinu aplikací lze následně vytvořit instalátor, v rámci kterého se kromě vlastní aplikace přidají též potřebné knihovny (LabVIEW Run-time Library), které jsou nutné pro chod aplikace na počítačích bez nainstalovaného systému LabVIEW.

8 Praktické ukázky využití LabVIEW pro měření v chemii

8.1 Generování napětí trojúhelníkového průběhu pro cyklickou voltametrii (CV)

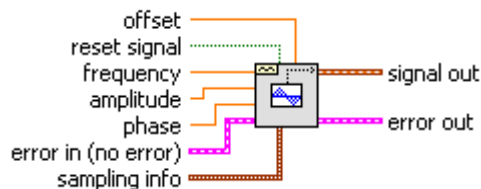
Při CV je zkoumaný roztok podroben potenciálu vloženému na elektrody následujícím způsobem: potenciál je lineárně zvyšován od počátečního (initial) k „zlomovému“ (vertex) potenciálu, což je tzv. dopředný (forward) scan a poté je snižován ke konečnému (final) potenciálu (zpětný – reverse scan); počáteční potenciál je zpravidla shodný s konečným potenciálem, dopředný a zpětný scan pak tvoří jeden cyklus. Podle potřeby se provádí jeden nebo více cyklů, pokud je technika omezena jen na polovinu cyklu, hovoříme o LSV technice (linear sweep voltammetry). Rychlost, s jakou je potenciál měněn (scan rate), určuje časové okno experimentu. VI, který umožňuje zadat potenciály, scan rate a vygenerovat odpovídající napěťový průběh (waveform) je zobrazen na Obr. 89, postup návrhu a jeho činnost je rozebrána v následujícím textu.





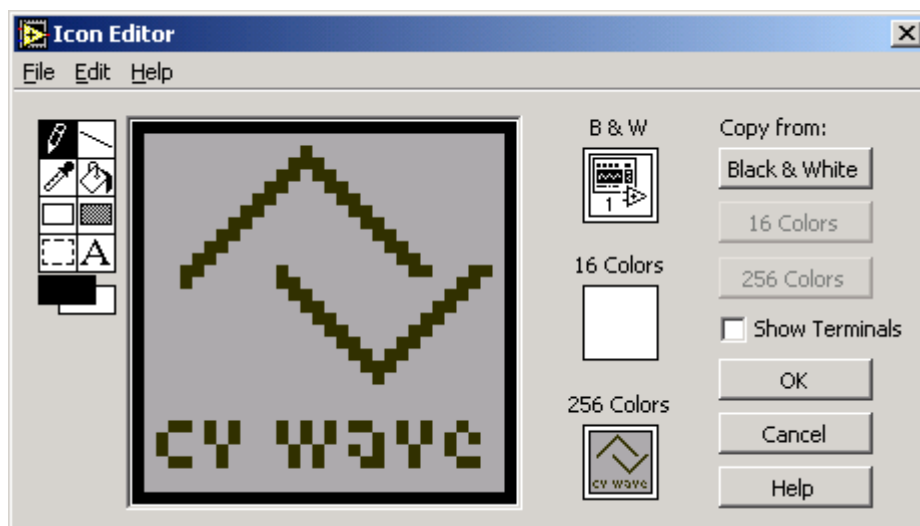
Obr. 89: Čelní panel a blokový diagram VI CVWAVE

VI ke své činnosti využívá Triangle waveform.vi (Obr. 90), který se nalézá na paletě funkcí All functions | Waveform | Analog Waveform | Waveform Generation. Tento VI generuje trojúhelníkové napětí, parametry trojúhelníku jsou dány proměnnými frekvence (v Hz), amplituda (V) a offset (V). Pokud je např. amplituda 1 V a offset 0 V, je generován trojúhelník začínající a končící u 0 V, se zlomem u 1V, který je následován trojúhelníkem 0 V | -1V| 0 V. Počet opakování tohoto motivu je dán proměnnou frekvence a clusterem Sampling Info, který je složen z informace o počtu vzorků za sekundu a celkového počtu vzorků. Pomocí proměnné fáze lze volit posun trojúhelníku na ose x. V případě CV požadujeme jeden trojúhelník Initial | Vertex | Initial potential, proto Amplituda = Vertex – Initial / 2



Obr. 90: VI Triangle waveform

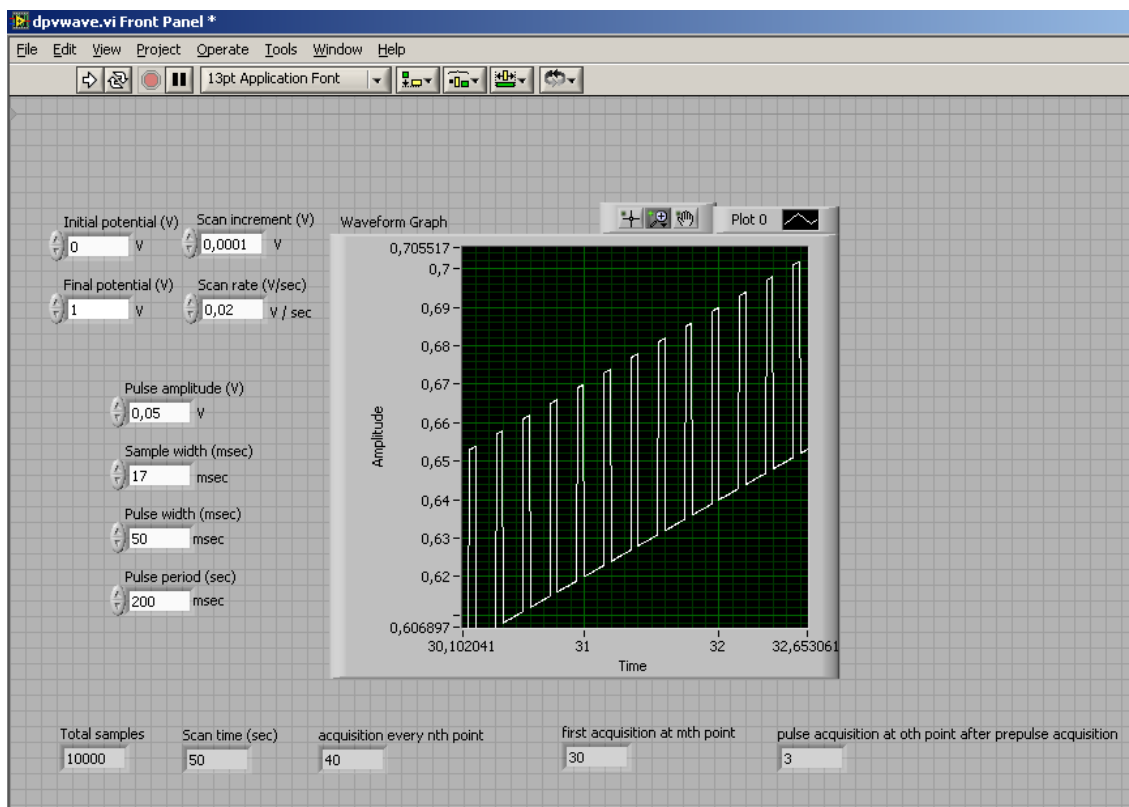
K naprogramovanému VI byl postupem uvedeným na str. 85 vytvořen konektor a též ikona (Obr. 91), aby mohl být VI použit jako SubVI pro další úlohy.



Obr. 91: Tvorba ikony CVWAVE pomocí Icon Editoru

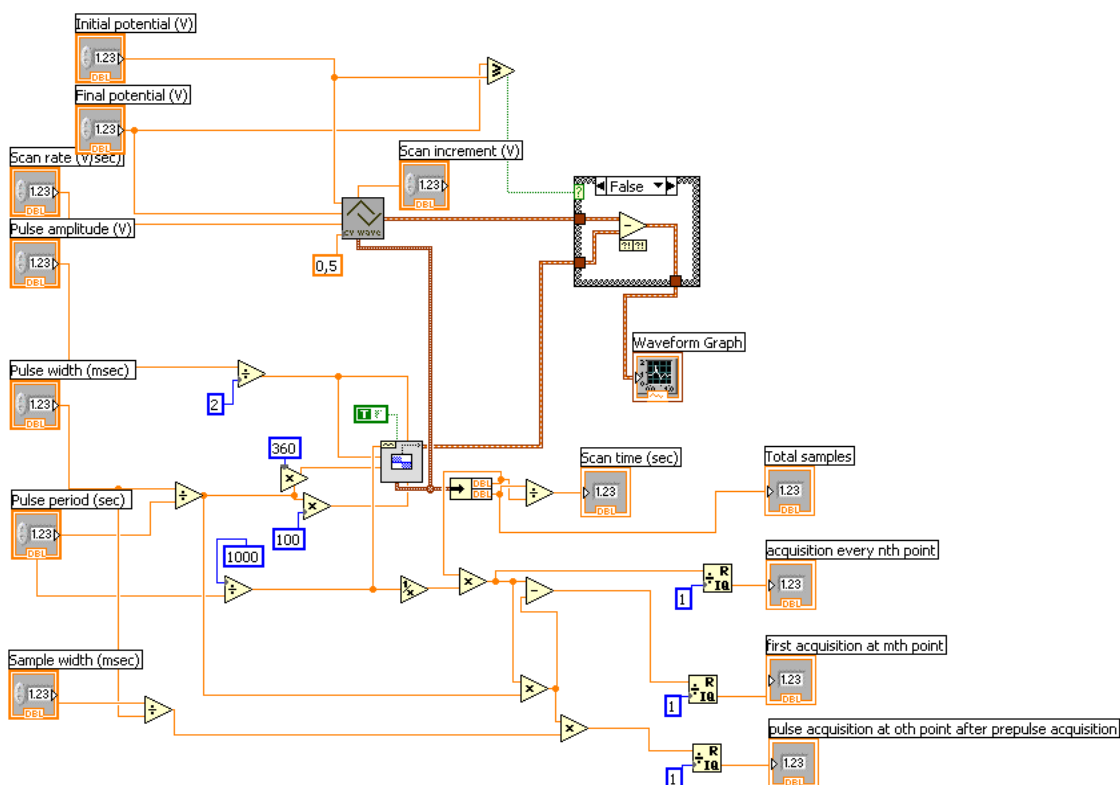
8.2 Generování pulsního průběhu napětí pro diferenční pulsní voltametrii

Citlivost a detekční limity voltametrických (polarografických) a amperometrických měření lze úspěšně zlepšit pomocí metod, kdy se na elektrodu vkládají potenciálové pulsy nebo pulsy superponované na lineárně rostoucí napětí. V podstatě jde o vylepšení poměru signál/šum eliminací (nežádoucího avšak vždy přítomného) kapacitního proudu. Za podmínek reálného elektrochemického experimentu klesá kapacitní proud s časem po vložení konstantního napětí (tzn. pulsu) podstatně rychleji než proud faradayický. Nejčastěji používanou pulsní elektrochemickou metodou je diferenční pulsní voltametrie (DPV). Při DPV se na lineárně rostoucí napětí vkládají pulsy o malé amplitudě, přičemž se měří proud těsně před vložním pulsu a následně před koncem pulsu. Výsledný záznam je dán rozdílem těchto dvou měření a křivka má tvar píku (závislost I na E), jehož maximum je blízké hodnotě $E_{1/2}$, výška je úměrná koncentraci elektrolyzované látky. Na Obr. 92 je zobrazen čelní panel VI pro generaci průběhu napětí pro DPV, z něhož jsou patrné zadávané parametry a parametry výstupní, včetně jejich typických hodnot a výsledný průběh napětí (na obrázku ukázán zvětšený výřez).



Obr. 92: Čelní panel VI pro generování napětového průběhu pro DPV

Jak je možné rozeznat z Obr. 92, je napětový průběh složen z lineárně rostoucího napětí, k jehož tvorbě je s výhodou použito dříve popsaného VI CVWave, mírně pozměněného tak, aby poskytoval informaci o celkovém počtu vzorků a počtu vzorků za sekundu – tyto informace jsou potřebné pro generaci pulsního průběhu. Pulsní průběh, který je superponován na lineárně rostoucí napětí, je generován pomocí VI Square waveform (All functions|Waveform|Analog Waveform|Waveform Generation). Vygenerované lineární a pulsní průběhy napětí (data typu waveform) jsou sečteny pro anodický scan (v případně scanu katodického jsou z pochopitelného důvodu odečteny) a výsledný průběh je zobrazen pomocí grafu. Dalším úkolem VI je umožnit vybrat správné vzorky proudů (před pulsem a v určeném místě pulsu). Za tímto účelem VI vypočítává tři parametry (acquisition every nth point, first acquisition at nth point a pulse acquisition at oth point after prepulse acquisition). Protože kombinace vstupních parametrů může vést k tomu, že výše uvedené tři parametry nemusí nabývat celočíselných hodnot, což by mohlo vést k chybnému vzorkování, je použita celočíselná část případného desetinného čísla.



Obr. 93: Blokový diagram VI pro generování napěťového průběhu pro DPV

8.3 Programování jednoduchých experimentů v LabVIEW

8.3.1 Propojení kyslíkové elektrody Orion Research 97-08 s PC

Kyslíková elektroda je zařízení určené k měření koncentrace kyslíku rozpuštěného ve vodných roztocích. Elektroda Orion Research 97-08 je složena ze dvou stříbrných elektrod ponořených do roztoku KCl, které jsou od zkoumaného roztoku odděleny membránou propustnou pro plyny. Na katodě probíhá reakce $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. Elektrony potřebné k této reakci jsou produkovány anodovou reakcí $Ag + Cl^- \rightarrow AgCl + e^-$. Proud, který protéká mezi katodou a anodou je přímo úměrný koncentraci kyslíku ve zkoumaném roztoku. Součástí elektrody je proudově napěťový převodník, který umožňuje přímé připojení elektrody s měřicím zařízením (doporučován je pH metr). Měří se v míchaném roztoku, za tímto účelem se se elektroda zasune do nálevky, jejíž ústí je opatřeno magnetickým míchadélkem. Na elektrodě se nalézají následující ovládací prvky:

- Přepínač s polohami OFF (vypnuto),
BATT (zkouška baterií),
ZERO (nastavení nuly),
AIR (kalibrace pomocí vzduchu nasyceného vodními parami),
H₂O (vlastní měření),
- potenciometr pro nastavení hodnoty ZERO,
- potenciometr pro nastavení hodnoty AIR.

Kalibrace elektrody

Při použití nové membrány je třeba 15–30 minut vyčkat před započítáním kalibrace.

1. Elektrodu připojte k pH-metru.
2. Vložte elektrodu do nádoby, která na dně obsahuje vodu. Membrána elektrody nesmí být ponořena, ani na ní nesmějí ulpívat kapičky vody.
3. Elektrodu ponořte do OFF módu, pH metr nastavte na 25 °C a pH = 7.
4. Přepněte do polohy BATT, je-li baterie elektrody v pořádku, na displeji pH metru se objeví číslo větší než 13,4.
5. Přepněte elektrodu do polohy ZERO, pomocí potenciometru ZERO nastavte na displeji hodnotu 0,00.
6. Přepněte elektrodu do polohy AIR, pomocí potenciometru AIR nastavte na displeji hodnotu barometrického tlaku dělenou 100 a násobenou korekčními faktory pro nadmořskou výšku a „zasolenost“ vzorku.
7. Po přepnutí do polohy H₂O je elektroda připravena k měření, pH metr ukazuje koncentraci rozpuštěného kyslíku v ppm.

Korekční faktory pro nadmořskou výšku (m)

nadmořská výška (m)	korekční faktor	opravená hodnota AIR nastaven
0	1,000	7,60
250	0,970	7,37
500	0,942	7,16
750	0,914	6,95

Korekční faktory pro salinitu vzorku (ppt Ct) (ppt = parts per thousands)

0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
1,00	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86	0,85	0,83	0,81	0,80
24	26	28	30	35	40	45	50				
0,78	0,76	0,75	0,73	0,70	0,66	0,63	0,60				

Ověření správné funkce elektrody:

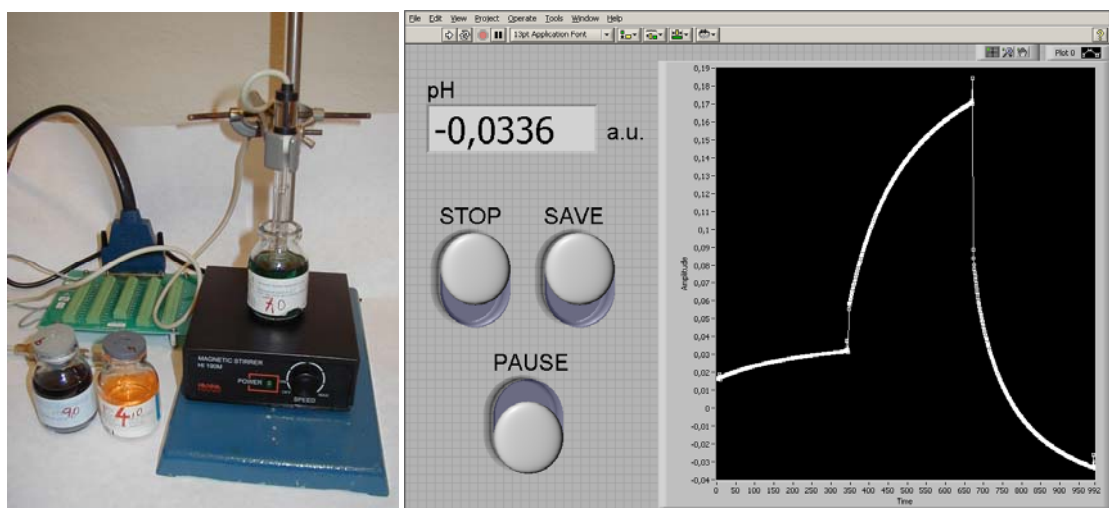
Připravte 5% roztok Na₂SO₃. Elektrodu s magnetickým míchadélkem ponořte do tohoto roztoku a měřte za stálého míchání (rychlost míchání nemá výrazný vliv na výsledek měření). Po 2,5 minutách by měla koncentrace O₂ klesnout po 0,3 ppm.



Obr. 94: Propojení kyslíkové elektrody s konektorovým blokem a kontrolním pH metrem

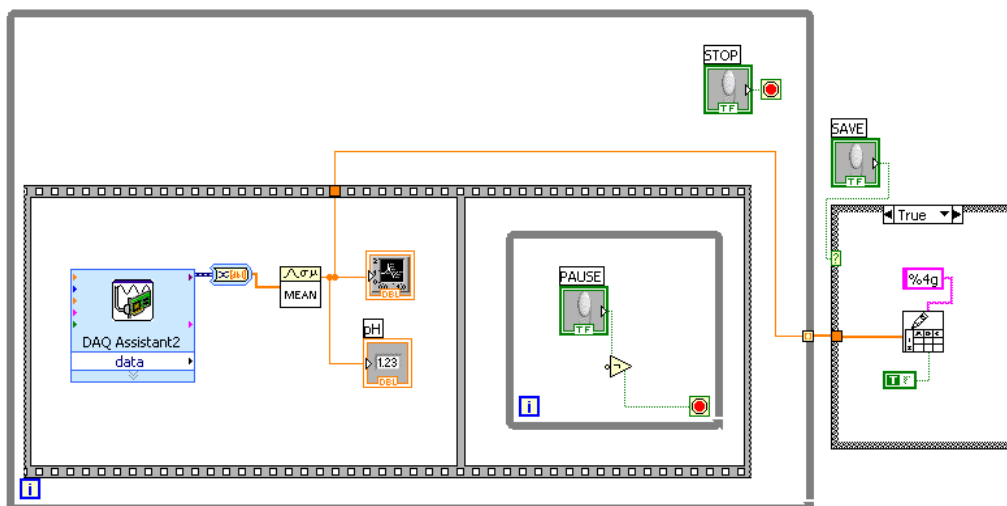
8.3.2 Potenciometrie se skleněnou elektrodou (měření pH)

Vysoký vstupní odpor multifunkční karty PCI6251 umožňuje připojit skleněnou elektrodu přímo na analogový vstup bez nutnosti vložení napěťového sledovače.



Obr. 95: Měření pH – uspořádání experimentu a čelní panel ovládacího VI

Obr. 95 ukazuje experimentální uspořádání a výsledek měření napětí článku tvořeného argentochloridovou a skleněnou elektrodou (kombinovaná pH elektroda) pro tři kalibrační pufrů o pH = 7, pH = 4 a pH = 9. Pro experiment byla použita vyřazená elektroda (pomale ustavení rovnovážného potenciálu).



Obr. 96: Měření pH – blokový diagram

VI snímá vždy 1000 vzorků po dobu 1 sekundy, poté je výsledek zprůměrován, zobrazen číselným indikátorem a na grafu. Je-li stisknuto tlačítko „Pauza“, následuje čekací smyčka. Naměřené hodnoty pH je možno uložit.

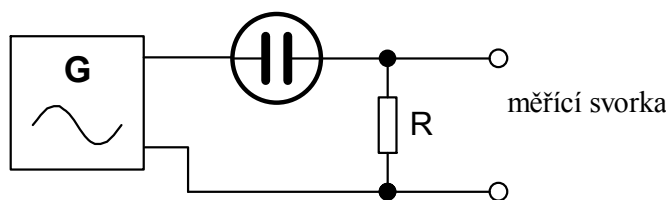
8.3.3 Konduktometrie

Konduktometrem měříme vodivost G roztoku, jednotkou je siemens (S). Její velikost však závisí na velikosti, tvaru a vzdálenosti elektrod. Na těchto parametrech nezávislá je tzv. specifická vodivost (konduktivita) κ . Platí:

$$\kappa = C \cdot G,$$

kde konstanta úměrnosti C je tzv. odporová konstanta nádoby. Tuto konstantu zjistíme výpočtem po změření vodivosti G roztoku o známé specifické vodivosti κ v této nádobce. Obvyklým standardem je $0,01 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3} \text{ KCl}$, jehož vodivost je při teplotě 25°C $0,1413 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$.

Moderní konduktometry využívají střídavé napětí o velikosti $0,2\text{--}1 \text{ V}$, jehož frekvence se řídí vodivostí měřeného roztoku. Měření spočívá ve snímání napětí na odporu, zapojeném v sérii s konduktometrickou celou, která je ponořena do měřeného roztoku (Obr. 97).



Obr. 97: Schéma konduktometru

Obvykle používané frekvence střídavého napětí jsou uvedeny v následující tabulce:

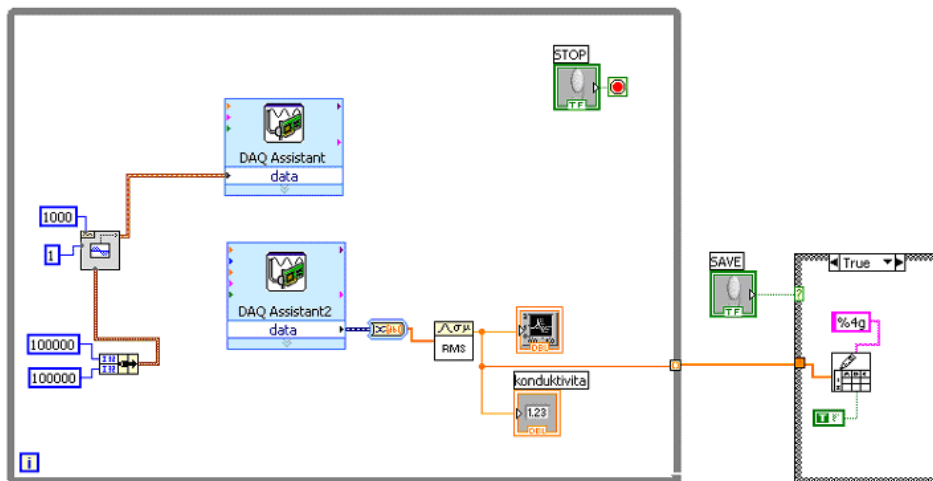
vodivost	frekvence
$< 50 \mu\text{S}$	$\approx 400 \text{ Hz}$
$50\text{--}1000 \mu\text{S}$	1 kHz
$1\text{--}10 \text{ mS}$	10 kHz
$0,1\text{--}1 \text{ S}$	50 kHz

Zapojení lze velmi snadno realizovat pomocí multifunkční karty PCI6251. Analogový výstup lze naprogramovat tak, aby dodával sinusové napětí zvolené frekvence a amplitudy, analogovým vstupem se snímá průběh napětí na odporu zapojeném do série s konduktometrickou celou, hodnota efektivního napětí je úměrná konduktivitě. Zapojení konduktometrické cely je zobrazeno na Obr. 98.



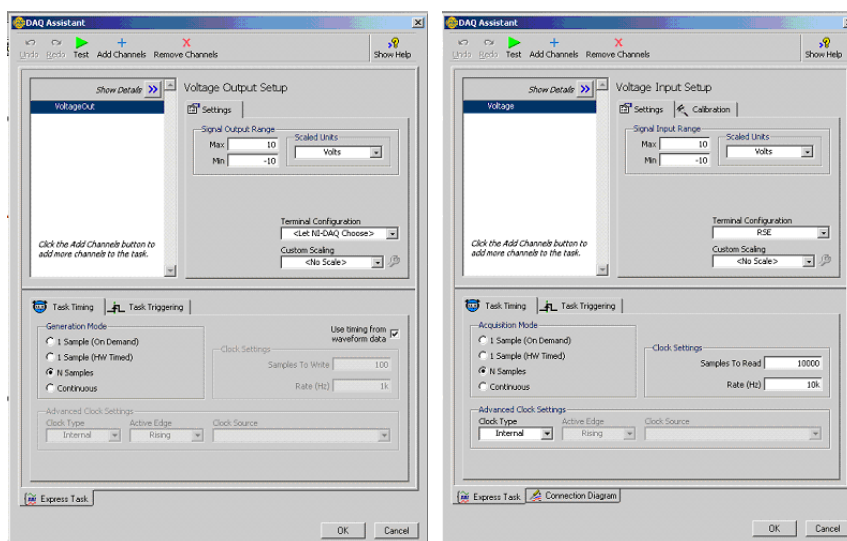
Obr. 98: Připojení konduktometrické cely ke konektorovému bloku

Jednoúčelový program pro konduktometrické měření (Obr. 99) se skládá z cyklu, uvnitř kterého je na kanálu AO 0 generováno sinusové napětí o frekvenci 1 kHz po dobu jedné sekundy, sinusovka je aproximována 1000000 vzorků za sekundu (tj. jedna perioda sestává z 1000 vzorků). Současně je měřen úbytek napětí na rezistoru ($1 \text{ k}\Omega$), který je přímo úměrný konduktivitě roztoku měřené pomocí v sérii s rezistorem zapojené konduktometrické cely. Střídavé napětí na rezistoru je snímáno kanálem AI 0, 10000 vzorků rychlostí 10 kHz (minimum, které poskytuje dostatečně stabilní údaj). Snímaný signál je převeden na střední hodnotu (RMS), jejíž velikost je úměrná konduktivitě vzorku. Celý děj se opakuje s periodou 1 s . Po ukončení cyklu je možné naměřené hodnoty uložit.

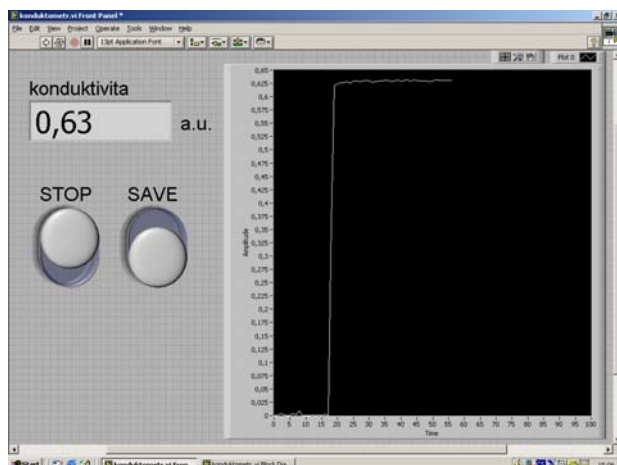


Obr. 99: Jednoduchý VI pro konduktometrické měření

Program využívá Express VI NIDAQmx. Nastavení konfiguračních oken je naznačeno na Obr. 100. Zaškrtnutím položky use waveform data se VI nastaví tak, aby bylo možné přivést sinusové napětí na výstup AO0.



Obr. 100: Konfigurační okna ExpressVI použitých při konduktometrickém měření



Obr. 101: Čelní panel VI konduktometru, ukazující odezvu na ponoření cely do měřeného roztoku

Specifická vodivost silně závisí na koncentraci studované látky v roztoku. Ve snaze eliminovat tuto závislost byla zavedena tzv. molární vodivost Λ vztahem:

$$\Lambda = \frac{\kappa}{c}$$

Pozor na jednotky při dosazování! Udáváme-li specifickou vodivost v jednotkách $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$, dosazujeme koncentraci v jednotkách $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$. Molární vodivost pak vyjde v $\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$. Také molární vodivost však závisí na koncentraci studované látky v roztoku, a to pro silné elektrolyty podle vztahu:

$$\Lambda = \Lambda_0 - ac,$$

kde a je konstanta, Λ_0 je molární vodivost při nekonečném (mezním) zředění. Její hodnotu lze vypočítat z tabelovaných molárních iontových vodivostí při mezním zředění podle Kohlrauschova zákona o nezávislé migraci iontů:

$$\Lambda_0 = \Lambda_0^+ \text{N}^+ + \Lambda_0^- \text{N}^-,$$

kde Λ_0^+ , resp. Λ_0^- jsou molární iontové vodivosti kationtu, resp. aniontu při mezním zředění a N^+ , resp. N^- jsou počty stejných kationtů, resp. aniontů vznikajících úplnou disociací jedné molekuly zkoumané látky.

Úkol: Ověřte platnost vztahu $\Lambda = \Lambda_0 - ac$.

Potřeby: Konduktometr, kádinky, vodivostní cely, roztoky KCl o koncentracích: 0,1; 0,05; 0,0025; 0,00125; 0,000625; 0,0003125 $\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$. Postup:

- Sestavte experiment a naprogramujte příslušný VI.
- Stanovte odporovou konstantu konduktometrické cely.
- Proměřte vodivosti roztoků KCl.
- Pomocí nelineární regrese experimentálních dat ověřte platnost vztahu $\Lambda = \Lambda_0 - ac$.
- Srovnajte hodnotu Λ_0 získanou z nelineární regrese s tabulkovou hodnotou.

Úkol2: Konduktometrické sledování hydrolýzy acetanhydridu.

Potřeby: acetanhydrid, voda, konduktometr, vodivostní cely, kádinky. Postup práce:

- Sestavte experiment a naprogramujte příslušný VI.
- Do kádinky s 90 ml vody přidejte 10 ml acetanhydridu a pečlivě zamíchejte.
- Snímejte hodnoty vodivosti po dobu cca 1 hodiny.
- Výsledná data vyhodnoťte nelineární regresí pomocí formalismu kinetiky prvního řádu.

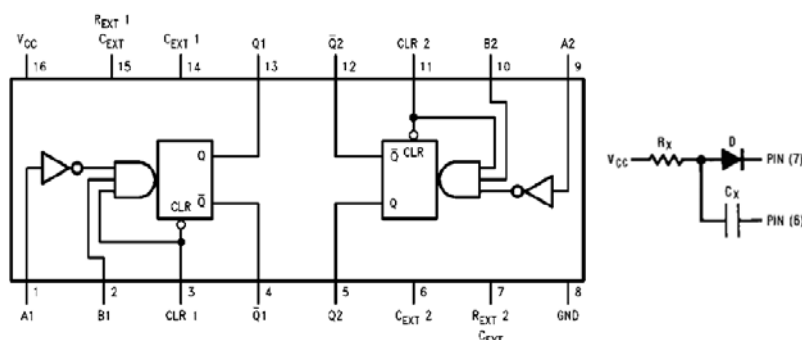
8.4 Ovládání experimentu, využití NI-VISA

8.4.1 Tvarování (změna šířky) digitálních impulsů

Výstup TTL ze soupravy pro čítání fotonů je snímán 24 bitovým čítačem A/D karty National Instruments PCI 6023E. Protože na výstupu C3886 jsou TTL pulsy o šířce 10 ns, zatímco vstup čítače AD karty vyžaduje minimální šířku pulsu 40 ns, je vřazen monostabilní klopný obvod (Obr. 102) s časovou konstantou 45 ns (Použitý integrovaný obvod HCT 74123 na bázi rychlé CMOS logiky (Obr. 103) pracuje na hranici možností, pouze Texas Instruments zaručuje ve svém katalogu činnost od 5 ns širokého vstupního pulsu, ostatní výrobci zaručují funkci až od 20 ns. Ve stávajícím přístroji je použit vybraný kus firmy Signetics).



Obr. 102: Monostabilní obvod pro změnu šířky impulsů



Obr. 103: HCT 74123

Konstanta $K = 0,28$. V jednom pouzdře jsou obsaženy dva monostabilní klopné obvody. Každý má tři vstupy – vstup A je spouštěč (trigger), který obvod aktivuje, pokud jeho stav přechází z log. 1 na log. 0, vstup B aktivuje výstup, pokud jeho stav přechází z log. 0 na log. 1, log. 1 na vstupu CLR předčasně ukončuje výstupní puls a deaktivuje vstup. Šířka výstupního pulsu pro $C_x > 1000 \text{ pF}$ je definována vzorcem $TW =$ je udána v nanosekundách. Výstupní puls je na vývodu Q, Q' je inverzní puls.

8.4.2 Komunikace multimetru Metex s PC

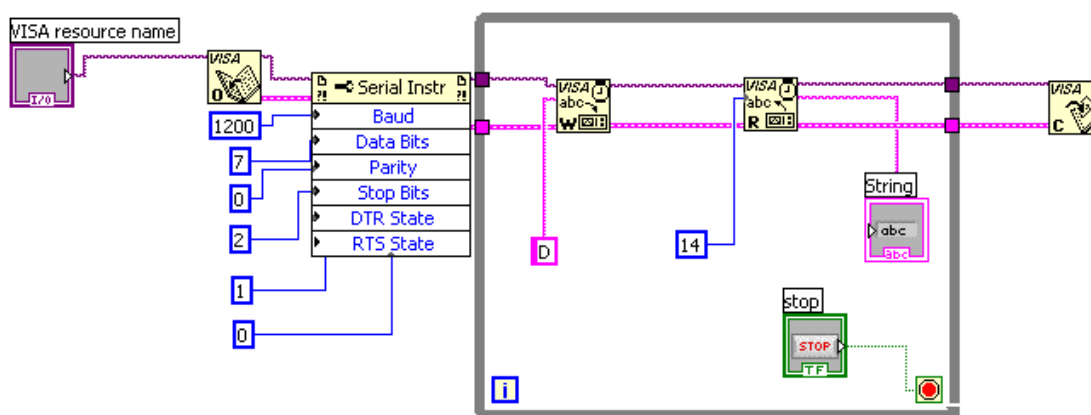
Digitální Multimetr Metex M-3860D je schopen odeslat právě změřenou veličinu přes RS-232 do PC. Komunikační protokol multimetru je velice jednoduchý. Multimetr po vyzvání vyšle přes sériový port do PC typ měřené veličiny, její hodnotu a jednotku. Pro pomalá měření (multimetr samotný vzorkuje cca $3 \times$ za sekundu) jej tedy lze využít namísto převodníkové karty. Data jsou reprezentována čtrnáctiznakovým řetězcem. Multimetr využívá při komunikaci pět

linek sériového rozhraní: TxD, RxD, DTR a RTS. Linka TxD je využita k posílání příkazu do multimetru. Linka RxD slouží pro příjem dat z multimetru. Zbývající řídicí linky DTR a RTS nemají žádný praktický význam, avšak linka DTR musí být během komunikace nastavena na úroveň log. 1 a linka RTS na úroveň log. 0, jinak sériové rozhraní multimetru nepracuje. Multimetr rozumí třem příkazům: Na příkaz „D“ pošle právě změřenou hodnotu. Příkaz „M“ pošle obsah vnitřní paměti. Příkaz „C“ obsah vnitřní paměti vymaže. První dva znaky čtrnáctiznakového řetězce, identifikují měřenou veličinu, v následujících sedmi znacích je zakódována hodnota měřené veličiny, předposlední 4 znaky identifikují její jednotku a následuje znak konce řádku.

Měřené veličiny a jejich jednotky

Veličina	Jednotka	Význam
DC-AC	mV, V	stejnoseměrné a střídavé elektrické napětí
DC-AC	mA, A	stejnoseměrný a střídavý elektrický proud
OH	Ω , k Ω , M Ω	elektrický odpor
CA	nF, μ F	kapacita kondenzátoru
FR	KHz, MHz	frekvence střídavého signálu
hF		test tranzistoru
DI	mV	test diody
TM	C	teplota ve stupních Celsia
LO		logická úroveň napětí

Multimetr používá následující komunikační protokol – přenosová rychlost (Baud Rate) 1200 bps, počet datových bitů (Data Bits) 7, počet stop bitů (Stop Bits) 2, bez parity. VI pro měření údajů z multimetru je na Obr. 104.

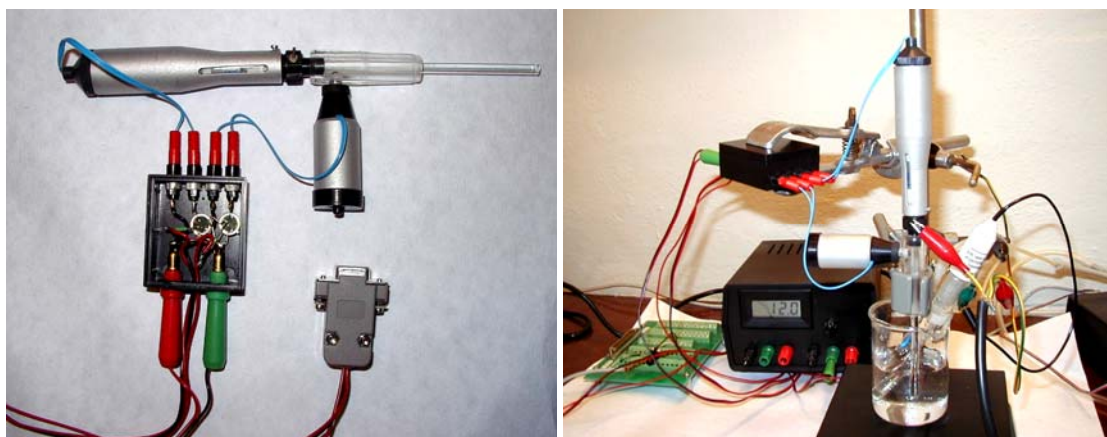


Obr. 104: VI pro čtení údajů z multimetru METEX

Před měřením se na uvedené parametry nastaví port, na kterém je multimetr připojen. Většinou je možné použít portů COM1 nebo COM2, odpovídající označení NI VISA je ASRL1(2). Tato konstanta je připojena k terminálu VISA Resource Name. VISA Open otevře sériový port. Parametry otevřeného portu nastavíme v uzlu Functions | Instrument I/O | VISA | VISA Advanced – Property Node. Tento uzel má nastavitelný počet vstupních a výstupních terminálů. Kontextové menu umožňuje v jednotlivých polích nastavit požadovanou vlastnost. U některých vlastností je třeba nastavit, zdali se jedná o čtení nebo zápis (položka Change to Read, resp. Change to Write). Následuje cyklus, v rámci kterého je vždy vyslán (VISA Write) požadavek na čtení, poté je řetězec přečten pomocí VISA Read. Snímání dat je ukončeno stiskem tlačítka a poté je port uzavřen (VISA Close).

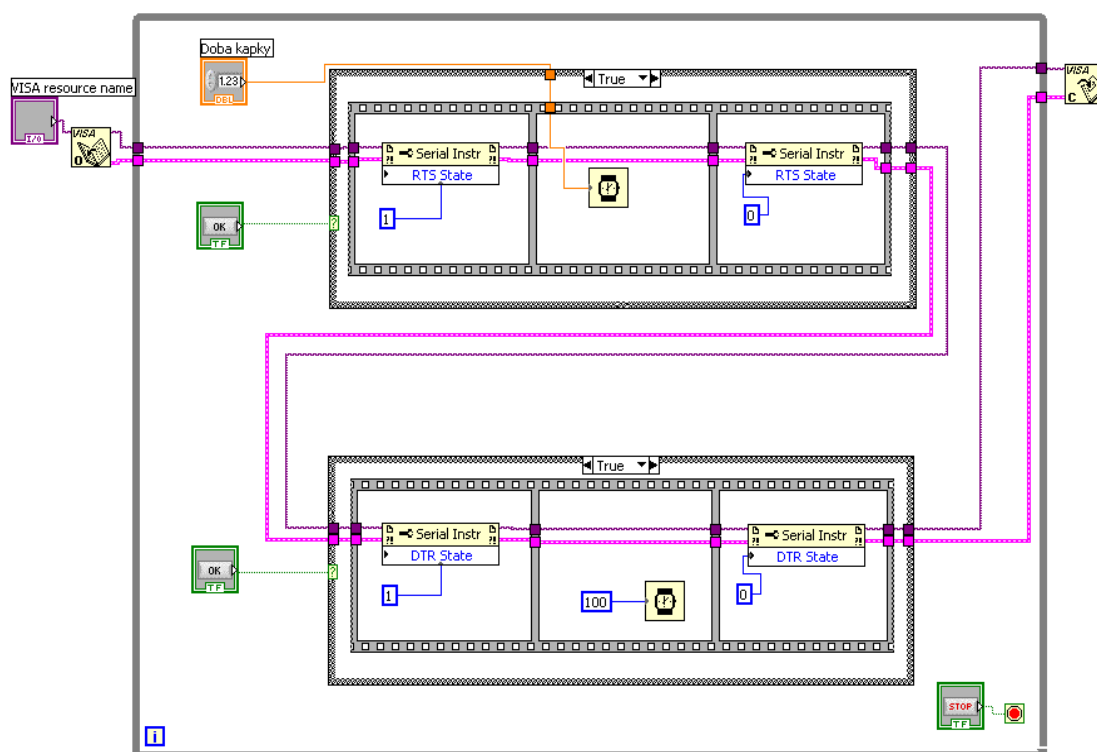
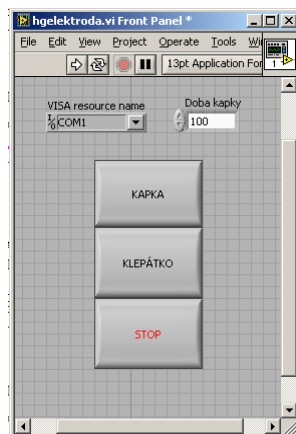
8.4.3 Ovládání rtuťové „tužkové“ elektrody

Rtuťová „tužková“ elektroda s visící kapkou (HMDE, Obr. 105), vyráběná firmou Polaro-Sensors Praha, byla standardně dodávána k potenciostatu EcoTribo. Rtuť je uzavřena v rezervoáru, odkud je přes jehlový ventil vypouštěna do kapiláry, na jejímž konci se vytvoří kapka, která tvoří aktivní povrch elektrody. Podle doby, po kterou je ventil otevřen, lze v určitých mezích řídit velikost kapky. Pro „střední“ velikost kapky je třeba ventil otevřít na dobu 100–200 ms. Po skončení analýzy lze kapku odtrhnout klepátkem.



Obr. 105: Rtuťová „tužková“ elektroda s visící kapkou a připojeným klepátkem

Pokud má být elektroda použita ve spojení s jiným potenciostatem, je třeba ovládat ventil a klepátko. Asi nejjednodušší možnost, jak toho dosáhnout, je použít sériového portu. I když výstupy sériového portu dodávají dostatečný proud pro ovládání ventilu resp. klepátka, pro jistotu je při praktické realizaci elektroda, jejíž elektromagnetický ventil a klepátko má značnou indukčnost, oddělena od sériového portu spínacím tranzistorem. VI pro ovládání elektrody využívá NI VISA a je znázorněn na Obr. 106.



Obr. 106: Čelní panel a blokový diagram VI pro ovládání rtuťové tužkové elektrody

VI cyklicky testuje, jestli došlo ke stisku tlačítka Kapka, Klepátko nebo Stop. Je zřejmé, že tlačítka Kapka a Klepátko musí být nastaveny v módu Latch when released. Nastavení provedeme v kontextovém menu tlačítka na čelním panelu výběrem položky Mechanical action | Latch when released. Kapka je ovládána pomocí RTS linky, na kterou je vložena logická jednička po dobu nastavenou pomocí proměnné doba kapky. Klepátko je ovládáno linkou DTR, ovládací puls má pevnou šířku 100 ms.

8.4.4 Řízení krokového motoru – ovládání monochromátoru

Krokový motor umožňuje realizaci pohonu, který umí přesně nastavit svoji polohu a tuto polohu i přes působící síly udržet (např. souřadnicové zapisovače nebo počítačem řízené obráběcí stroje). Krokový motor obsahuje otočný magnet a několik pevných elektromagnetů (cívky), které jsou postupně zapínány. Kotva se vždy natočí mezi póly právě zapojeného

elektromagnetu, natočení pak lze postupně po krocích měnit a tím lze kontrolovat natočení kotvy. Obvyklé krokové motory mívají 200 kroků na jednu obrátku (Obr. 107). Výhoda krokového motoru spočívá v tom, že není potřeba mít v soustavě měřicí systém polohy (stačí počítat kroky). Malé motory jsou buzeny unipolárně (proud prochází jednotlivými cívkami stejným směrem) a typický motor obsahuje čtyři cívkové systémy (a tedy 8 vývodů).



Obr. 107: Krokový motor s 200 polohami, stator a rotor

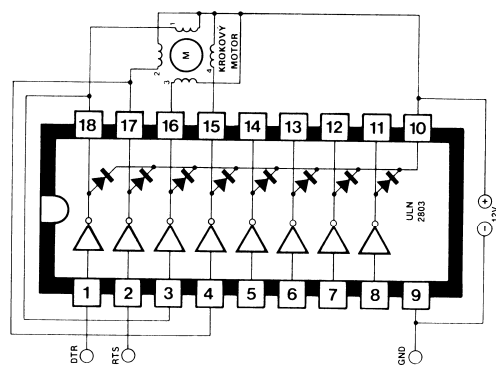
Řídící obvody motorku musí zajistit postupné zapínání cívek. Pro postupné zapínání vždy jedné cívky je spínací schéma vyjádřeno následující tabulkou. Řídící hodnota je dekadicky vyjádřené binární číslo odpovídající jednotlivým řídicím stavům.

Cívka 1	Cívka 2	Cívka 3	Cívka 4	Řídící hodnota
1	0	0	0	8
0	1	0	0	4
0	0	1	0	2
0	0	0	1	1

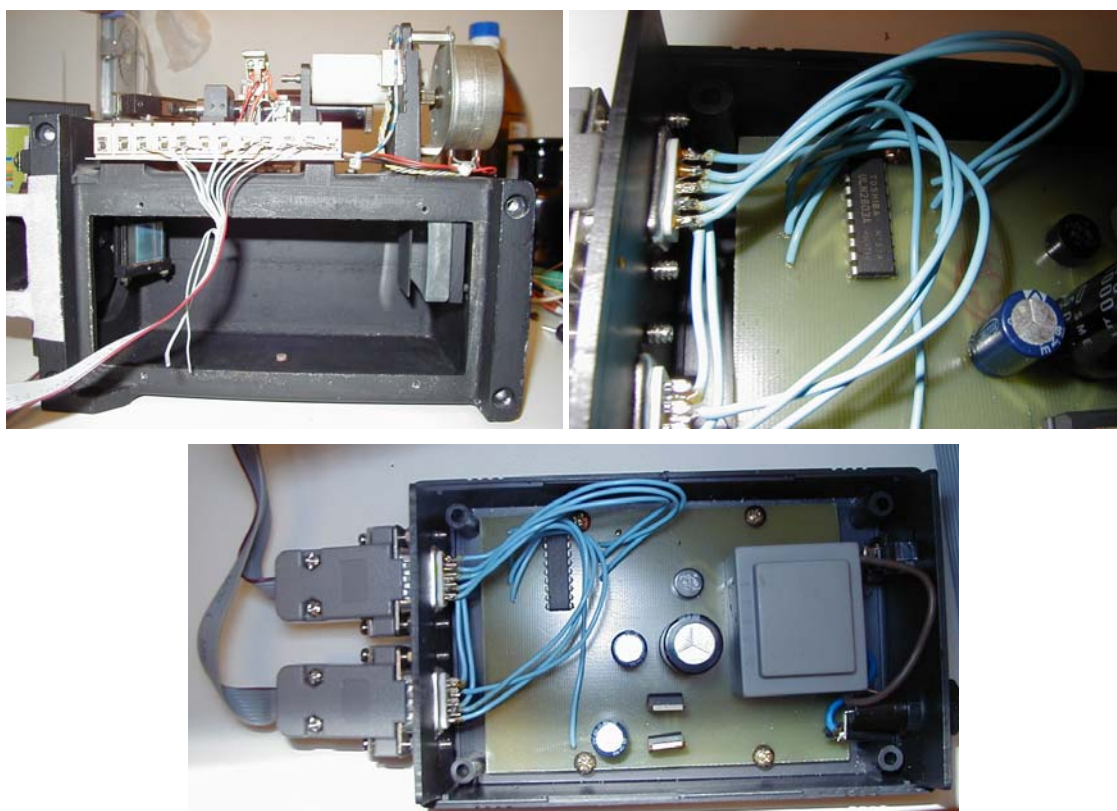
Je zřejmé, že k řízení motorku by postačovaly dvě výstupní linky sériového rozhraní a dekodér (elektronický obvod, který by ovládal čtyři vstupy cívek dvěma řídicími linkami). Existuje jednodušší varianta řízení krokového motoru, při které jsou zapojeny vždy dvě sousední cívky společně. Při tomto zapojení prochází motorem dvojnásobný proud (jeho točivý moment se ovšem zdvojnásobí). Řídící tabulka vypadá následovně:

Cívka 1	Cívka 2	Cívka 3	Cívka 4	Řídící hodnota
1	1	0	0	3
0	1	1	0	1
0	0	1	1	0
1	0	0	1	2

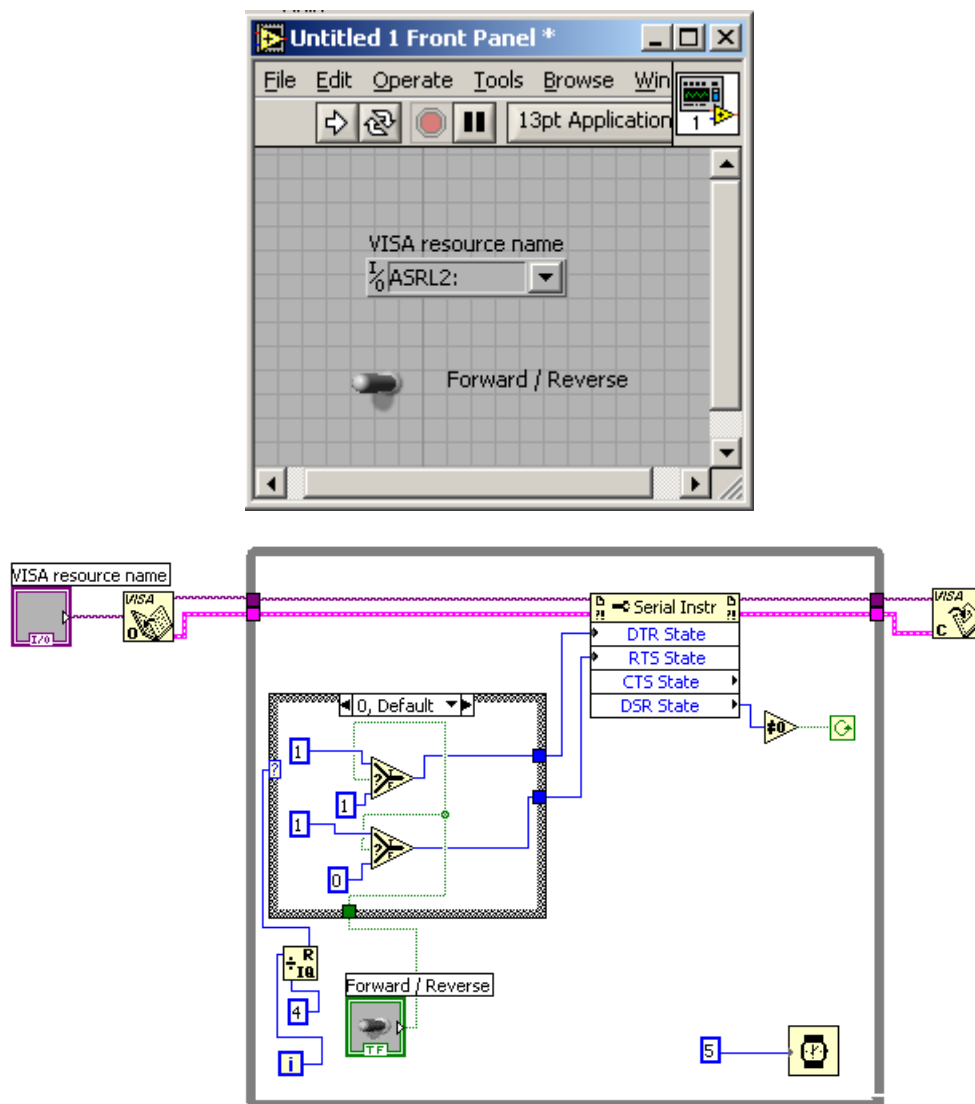
Protože cívky 1,3 a 2,4 jsou zapojeny vždy inverzně (tj. pokud je na cívce 1 napětí, cívka 3 buzena není), lze za řídicí hodnotu považovat dvoubitové binární číslo, dané stavy cívek 1 a 2. Pro buzení krokových motorů se vyrábějí speciální budicí obvody. Jedním z nejrozšířenějších je obvod ULN2803 (vyrábí jej mnoho firem, např. Motorola, STMicroelectronics apod.), který je schopen pracovat s napětím do 50 V a dodávat proud až 0,5 A, a který má zabudovanou ochranu proti napěťovým špičkám, které vždy chod motoru doprovázejí. Zapojení je uvedeno Obr. 108.



Obr. 108: Zapojení IO ULN2803 pro řízení krokového motorku

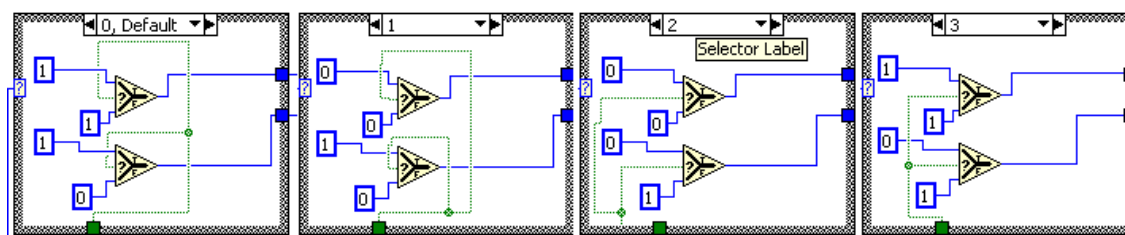


Obr. 109: Monochromátor (krokový motorek je vpravo nahoře), detailní pohled na zapojení ULN2803, celkový pohled na zdroj a ovládací obvod



Obr. 110: Čelní panel a blokový diagram VI pro chod krokového motorku vpřed/vzad

Ovládací program (Obr. 110) je velmi jednoduchý, využívá pouze třech funkcí NI VISA. Před spuštěním se nastaví port, na kterém je motor připojen. Většinou je možné použít portů COM1 nebo COM2, odpovídající označení NI VISA je ASRL1(2). Zvolený port je předán VI VISA Open, který jej inicializuje. Uvnitř cyklu jsou postupně zapínány linky DTR a RTS (viz tabulka). Řízení DTR a RTS probíhá ve čtyřech krocích. Počítadlo cyklu je při každé obrátce děleno čtyřmi a vyhodnocen zbytek dělení, který může nabývat hodnot 0,1,2,3 a řídí přepínač (case structure). Jednotlivé rámce jsou zobrazeny na Obr. 111. Jejich obsah je mírně komplikován tím, že lze zvolit směr pohybu motoru přepínačem. K tomu slouží selektory uvnitř rámců. Cyklus je ukončen, pokud se na vstupu DSR objeví napětí (logická 1). Časovač zavádí do cyklu pětímilisekundové zpoždění, kontrolou tohoto parametru lze měnit rychlost motorku. Po skončení činnosti cyklu je spuštěn VI VISA Close.

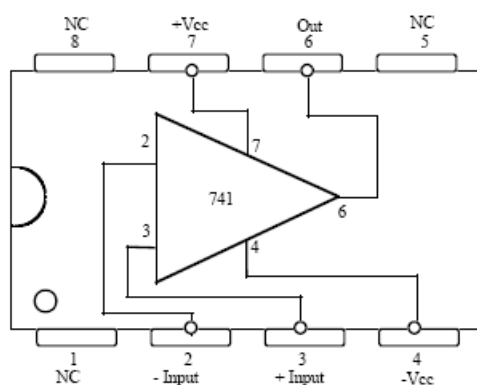


Obr. 111: Case struktura ovládající linky DTR a RTS

8.5 Převod AD a DA – elektrochemické experimenty pomocí LabVIEW

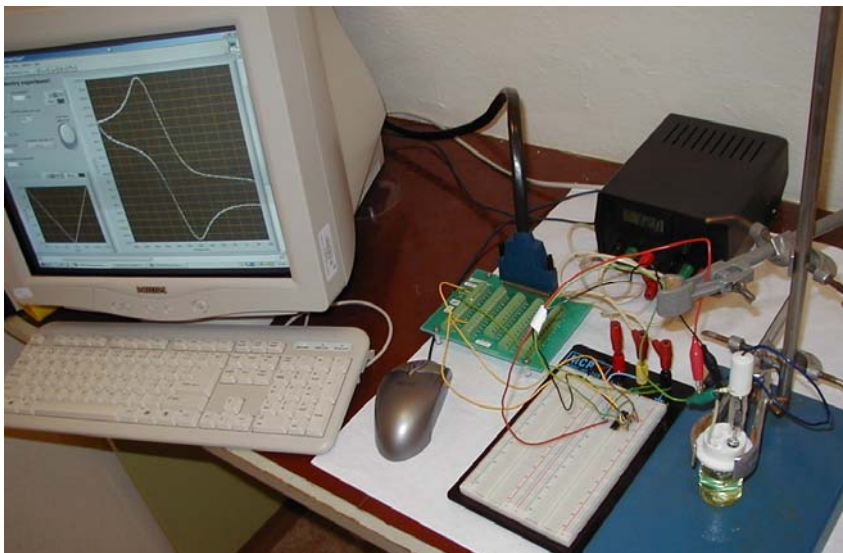
8.5.1 Konstrukce jednoduchého počítačem řízeného potenciostatu a programování základních elektrochemických technik

Jednoduchý potenciostat lze sestavit ze dvou OZ a jednoho odporu, podle schématu na Obr. 33 na str. 38. Zapojení lze realizovat na nepájivém kontaktním poli. Nepájivé kontaktní pole umožňuje snadné a rychlé propojení potřebných součástek bez nutnosti jejich pájení či výroby plošných spojů. Zapojení vývodů OZ (prakticky všechny OZ v pouzdře s osmi vývody jsou zapojeny stejně) je na Obr. 112.



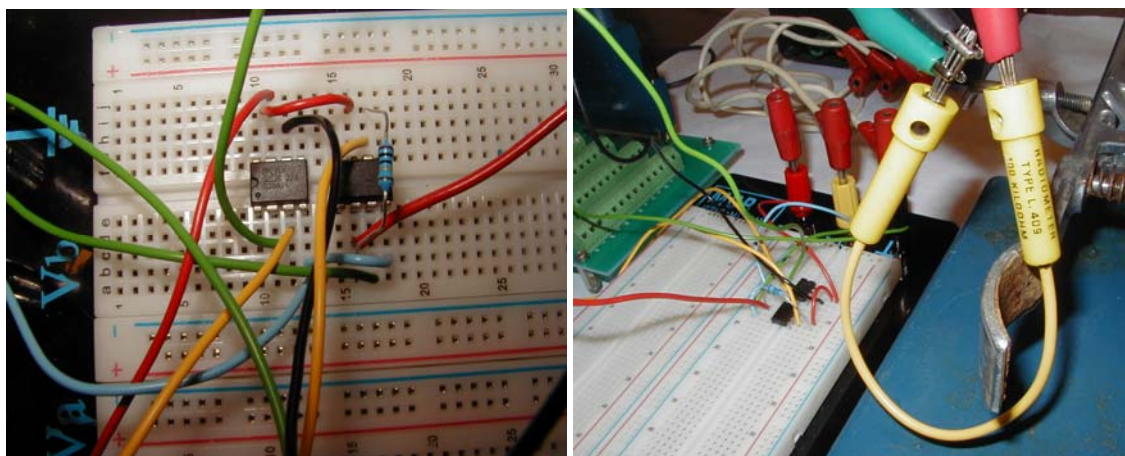
Obr. 112: Zapojení vývodů OZ typu 741 v pouzdře DIL8 (pohled shora)

Celkový pohled na experiment je ukázán na Obr. 113. Zleva je vidět počítač s ovládacím programem, konektorový blok, potenciostat, celu se zkoumaným roztokem a elektrodami, vzadu se nachází napájecí zdroj potenciostatu.

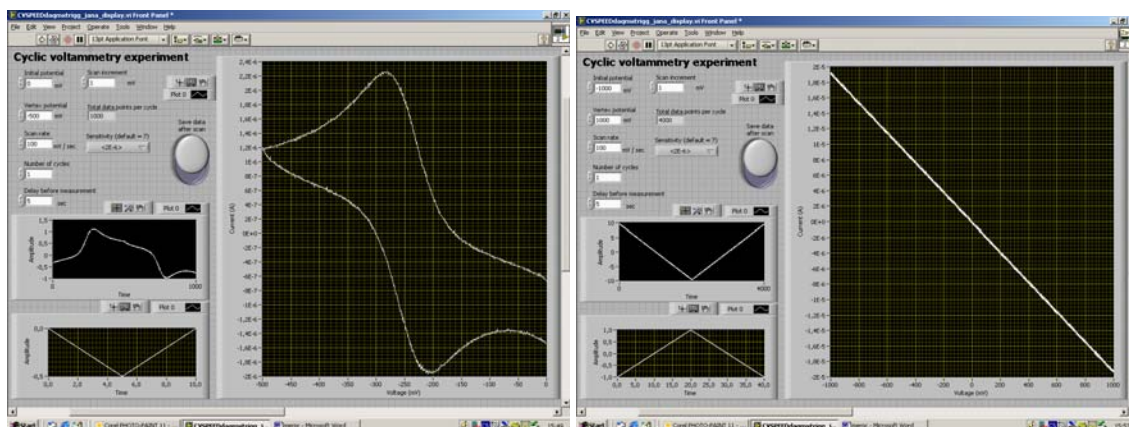


Obr. 113: Měření cyklického voltamogramu ferrikyanidu draselného

Detailní pohled na nepájivé kontaktní pole s potenciostatem se nachází na následujících obrázcích. Dalšího zjednodušení zapojení potenciostatu by bylo možné dosáhnout použitím dvojitého OZ (v jednu pouzdře se nacházejí dva OZ).

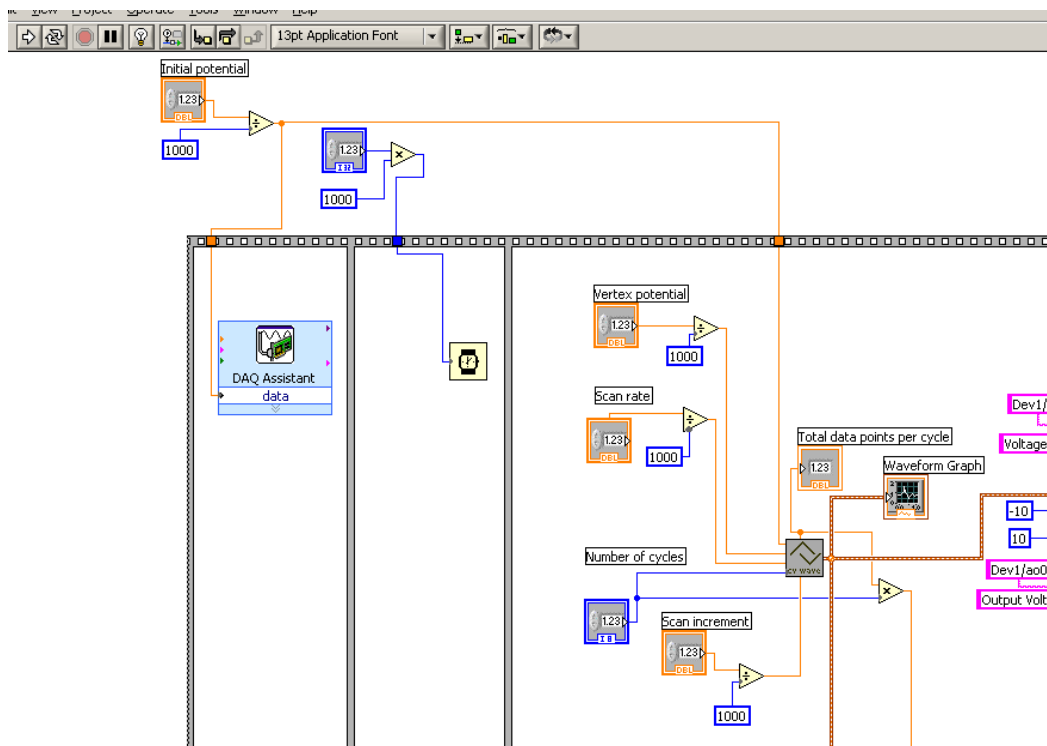


Obr. 114: Detailní pohled na potenciostat, složený ze dvou OZ a zpětnovazebního odporu na nepájitvém kontaktním poli, vpravo zapojení odporu pro jeho kalibraci

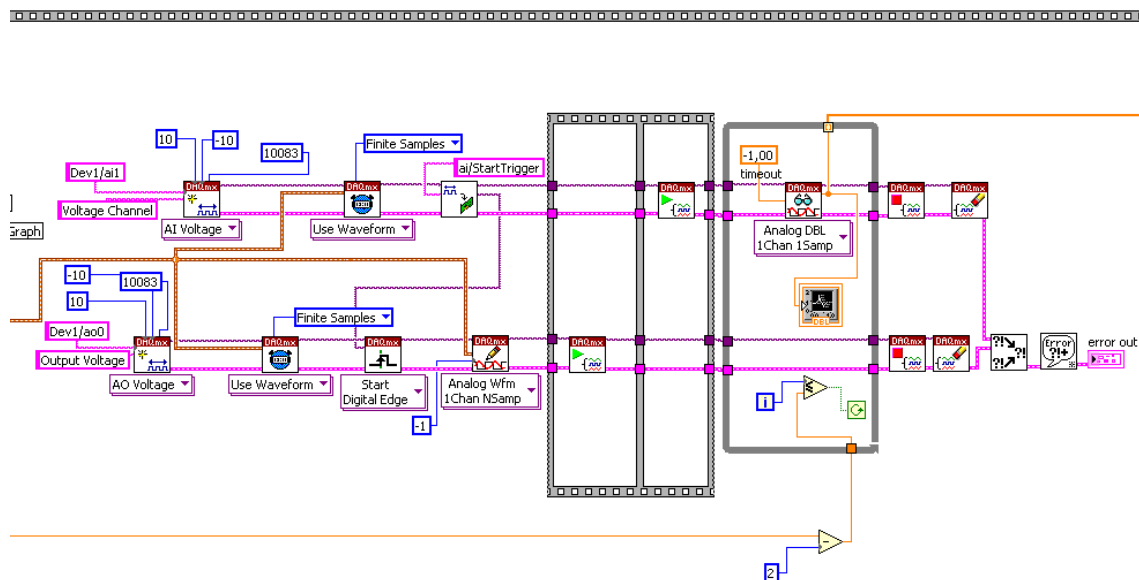


Obr. 115: Čelní panel VI ovládajícího potenciostat, metoda cyklické voltametrie. Vlevo: CV ferrikyanidu draselného, vpravo kalibrace proudové osy 100 kΩ odporem

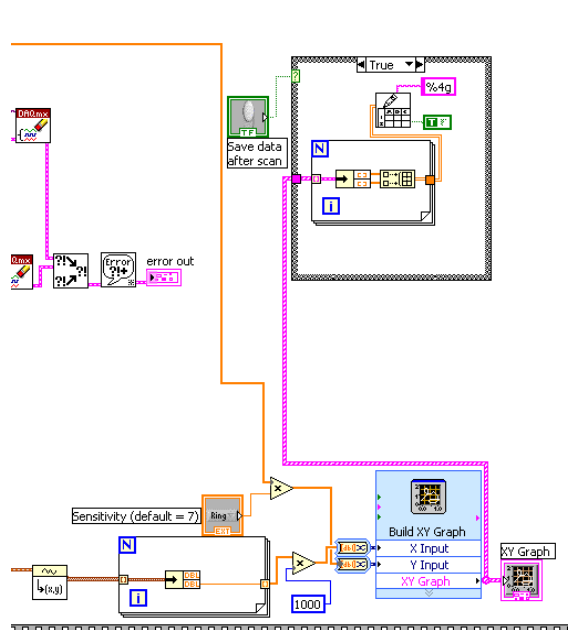
Schéma VI pro měření cyklické voltametrie je ukázáno ve třech částech na Obr. 116-Obr. 118. Před měřením CV může být na elektrodu vložen počáteční potenciál po zadanou dobu (delay before measurement). Elektroda se adaptuje na tento potenciál a na voltamogramu se neobjeví klesající signál, způsobený kapacitním proudem. Následuje generace průběhu napětí pro potenciostat, realizovaná pomocí subVI cvwave, jehož naprogramování a činnost již byla probrána na str. 95. Časový průběh generovaného napětí je zobrazen v malém grafu, který se nachází na čelním panelu vlevo dole. Generované napětí se objeví na výstupu AO0 multifunkční karty a je vkládáno na vstup potenciostatu. Současně je vstupem AI0 snímán signál úměrný proudu tekoucímu mezi pracovní a pomocnou elektrodou. Současná generace průběhu napětí a snímání proudu je realizována pomocí intermediate VIs, schéma bylo převzato z knihovny příkladů. Časový průběh snímaného signálu je zobrazován v průběhu snímání na dalším malém grafu. Poté, co je voltamogram změřen je zobrazen na velkém grafu jako závislost potenciál/proud a je možné jej uložit, pokud byla tato volba předem nastavena. Díky rychlé převodníkové kartě PCI6251 má takto sestrojený potenciostat překvapivě dobré parametry, zejména lze použít relativně vysokých scanovacích rychlostí. Při nastaveném rozlišení 1 mV a rozsahu 4 V (např. od -1 V do +1 V a zpět) lze měřit CV při rychlostech do $1500 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$. Při použití karty PCI 6024E je maximální rychlost $40 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 116: VI pro CV – vložení potenciálu před měřením a generátor trojúhelníkového napětí



Obr. 117: Současné použití AO a AI karty PCI6251 pro realizaci CV experimentu



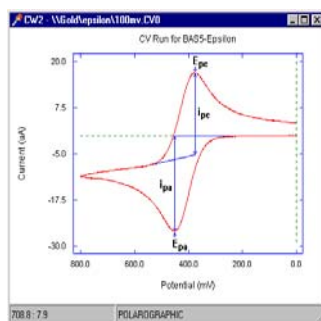
Obr. 118: Sestrojení grafu CV a jeho uložení na disk

Úkol: Určení aktivní plochy platinové elektrody pomocí cyklické voltametrie ferrikyanidu draselného. Ověření platnosti Randles-Ševčíkovy rovnice.

Vlivem mikroskopické nerovnosti povrchu elektrody se může plocha stanovená voltametricky značně odlišovat od geometrické plochy elektrody. Hexakynoželezitan draselný je na elektrodě redukován na hexakynoželeznan, proces probíhá reverzibilně na metalických elektrodách, na elektrodě ze skelného uhlíku je elektrodová reakce kvazireverzibilní. Systém $K_3[Fe(CN)_6] / K_4[Fe(CN)_6]$ je jedním z elektrochemických standardů. Proud v píku (peak current) je u reverzibilního voltamogramu dán Randles-Ševčíkovou rovnicí:

$$I_{pc} = I_{pa} = 2,69 \cdot 10^5 \cdot A \cdot n^{3/2} \cdot D^{1/2} \cdot c \cdot v^{1/2},$$

kde I_{pc} , I_{pa} je proud v ampérech, A je plocha elektrody v cm^2 , n je počet vyměňovaných elektronů, D je difúzní koeficient v $cm^2 \cdot s^{-1}$, c je objemová koncentrace zkoumané látky v $mol \cdot cm^{-3}$ (pozor, netypická jednotka) a v je rychlost scanu ve $V \cdot s^{-1}$. U reverzibilního voltamogramu dále nezáleží poloha E_{pa} a E_{pc} na rychlosti scanu a rozdíl mezi E_{pa} a E_{pc} je 59 mV (v praxi jsou považovány za reverzibilní i voltamogramy, u kterých je separace piků do cca 70 mV). Reverzibilní voltamogram a způsob odečtení parametrů je uveden následujícím obrázkem:



Obr. 119: Odečtení I_{pA} a I_{pC} z cyklického voltamogramu

Poznámka: Z historických důvodů (polarografie pracuje v katodické oblasti, tj. v oblasti záporných potenciálů, polarogramy však byly kresleny zleva doprava) se někdy používá opačná orientace os – zejména americké elektrochemické časopisy trvají na této notaci. Anodický proud je pak záporný a katodický kladný, tj. má stejné znaménko jako v polarografii. Orientaci

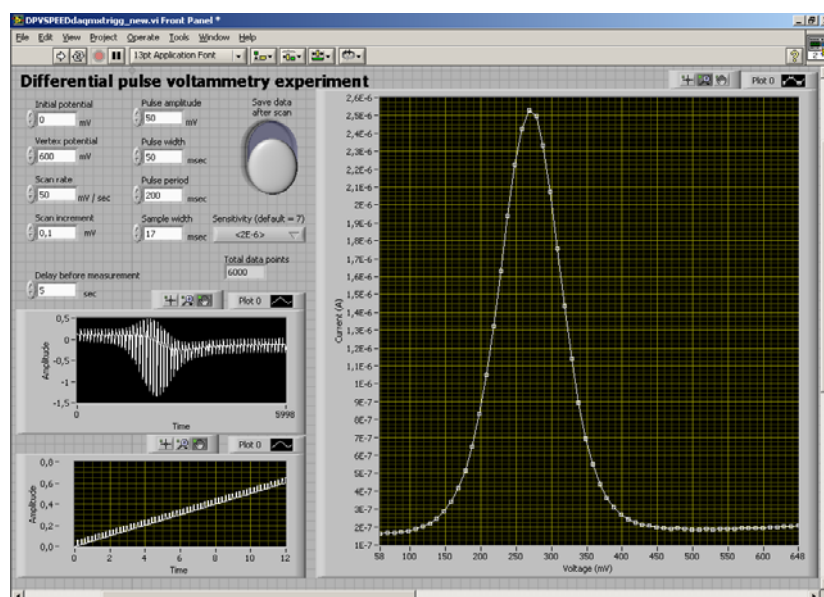
voltamogramu lze zpravidla nastavit v ovládacím programu potenciostatu. Věnujte pozornost způsobu odečtení proudů I_{pa} a I_{pc} . Anodický proud odpovídá oxidaci redukované formy studované látky, katodický proud redukcí oxidované formy. Voltamogram podle IUPAC je orientován tak, že potenciálová osa směřuje zleva doprava (tj. kladný, tj. anodický potenciál je vpravo) a anodický proud směřuje vzhůru. Voltamogram na Obr. 119 tedy není orientován podle IUPAC.

Postup práce:

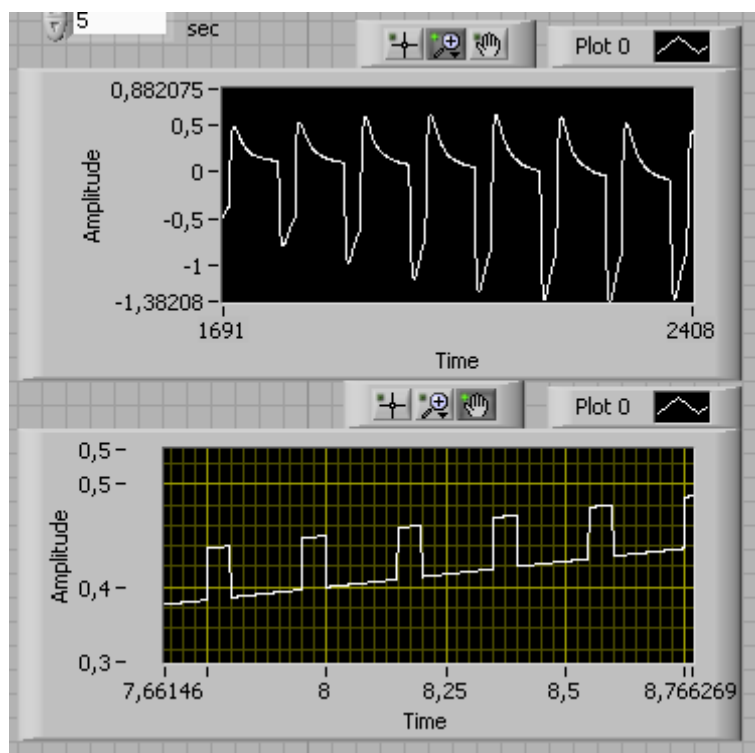
- Sestrojte potenciostat, ovládací program, seznamte se s jeho ovládáním – způsoby čištění elektrod atd.
- Připravte si 1 mM roztok $K_3[Fe(CN)_6]$ v 0,1 M KCl (případně KNO_3). Roztok lze po proměření uschovat do dalšího cvičení, pokud je skladován ve tmě.
- proměřte CV $K_3[Fe(CN)_6]$ v rozsahu potenciálů +700 mV a –300 mV vs. Ag / AgCl při různých rychlostech scanu: 5, 10, 20, 50, 100, 250, 500, 750, 1000, 2500 a 5000 $mV \cdot s^{-1}$.
- Proměřte stejnou sadu CV s 0,1 M KCl (případně KNO_3) – navrhnete VI, který umožní odečtení CV $K_3[Fe(CN)_6]$ od CV pozadí.
- Určete oblast scanovacích rychlostí, při kterých se systém chová reverzibilně, tj. E_p nezávisí na v .
- V oblasti reverzibility ověřte pomocí nelineární regrese odmocninovou závislost I_p na v (tj. ověřte platnost Randles-Ševčíkovy rovnice).
- Zjistěte si (tabulky, internet) hodnotu difúzního koeficientu $K_3[Fe(CN)_6]$ v 0,1 M KCl (KNO_3).
- Z regresní křivky získejte hodnotu součinu $A \cdot n^{3/2}$. Protože pro $K_3[Fe(CN)_6] / K_4[Fe(CN)_6]$ je $n = 1$, je součin přímo roven aktivní ploše elektrody. Uveďte s jakou přesností byla aktivní plocha elektrody stanovena.
- Voltamogramy ukládejte, budou použity jako vstupní soubory pro ukázkou elektrochemického simulačního softwaru.

8.5.2 Diferenční pulsní voltametrie

Diferenční pulsní voltametrie (DPV) je, jak již bylo zmíněno, jednou z nejčastěji používaných elektroanalytických technik. Její výhodou je o dva řády lepší detekční limit ve srovnání s cyklickou voltametrií, odezvy mají tvar píku, což usnadňuje vyhodnocování voltamogramů. Experimentální provedení DPV experimentu využívá potenciostatu, jehož konstrukce byla popsána v předchozí kapitole. Čelní panel VI (Obr. 120) pro ovládání DPV experimentu umožňuje zadání potřebných parametrů pro jeho průběh (potenciálový rozsah, parametry pulsů, vzorkování), průběh experimentu je zobrazen pomocí trojice grafů. Graf vlevo dole zobrazuje průběh napětí vkládaného na vstup potenciostatu, nad ním se v průběhu experimentu postupně zobrazuje proud tekoucí pracovní elektrodou. Velký graf vpravo zobrazuje výsledný DPV voltamogram.

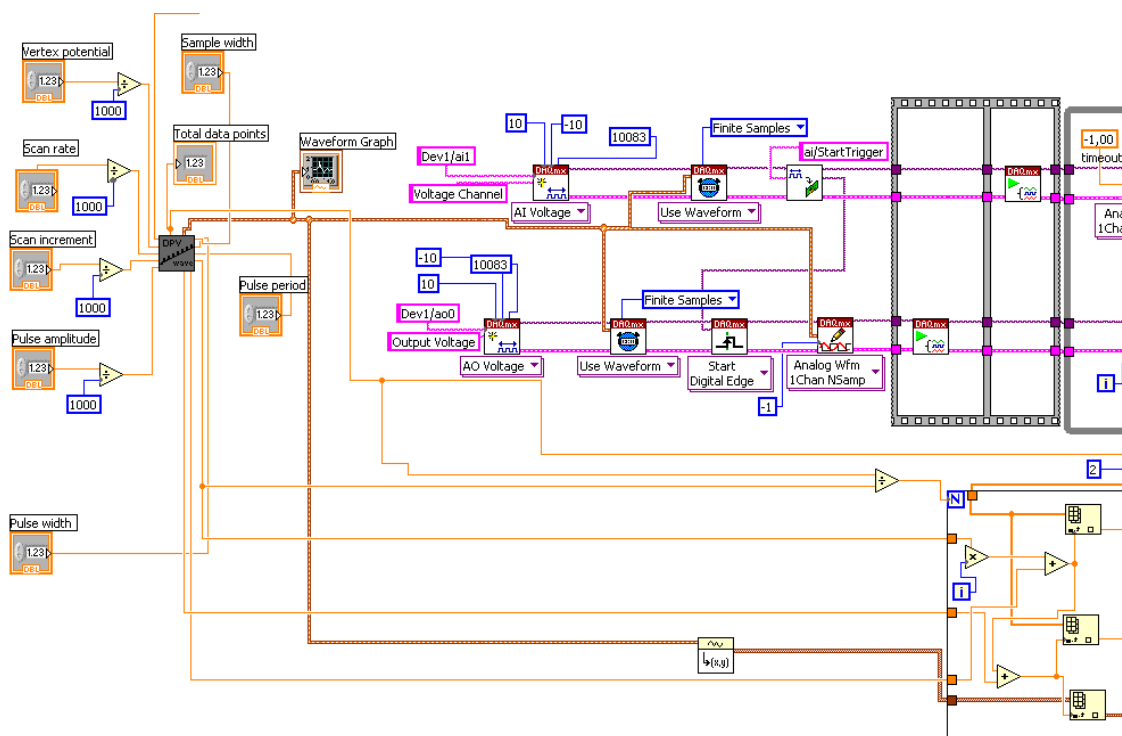


Obr. 120: Čelní panel VI pro ovládání experimentu diferenční pulsní voltametrie



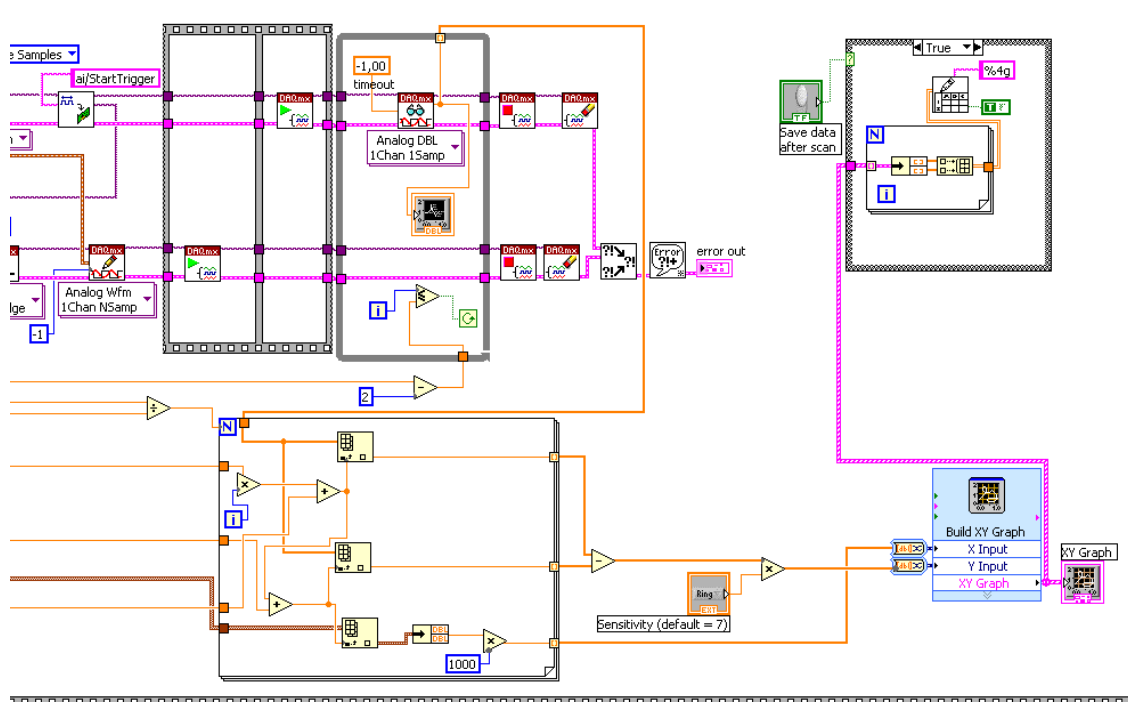
Obr. 121: Vkládané napětí a snímaný průběh proudu u DPV (výřez)

VI pro DPV je využívá subVI DPV wave, sloužící k vygenerování napěťového průběhu, který je vkládán na výstup AO0 multifunkční karty propojený se vstupem potenciostatu. Současně je vstupem AI0 snímán signál úměrný proudu tekoucímu mezi pracovní a pomocnou elektrodou (tato část VI je na Obr. 122). Současná generace průběhu napětí a snímání proudu je realizována pomocí intermediate VIs, stejným způsobem jako u metody cyklické voltametrie.



Obr. 122: Schéma VI pro DPV experiment (zadání parametrů, ovládání AO a AI)

Specifická pro DPV experiment je část VI sloužící k sestrojení DPV voltamogramu (Obr. 123).



Obr. 123: Schéma VI pro DPV experiment (sestrojení, zobrazení a uložení DP voltamogramu)

SubVI DPVwave za tímto účelem obsahuje tři výstupy, po ukončení cyklu jsou k dispozici tři pole – jedno obsahuje vzorky hodnot proudů snímané v příslušném místě pulsu (daném parametrem sample width), druhé pole obsahuje proudy „před pulsem“, tato pole jsou od sebe odečtena a výsledné pole je zobrazeno na y-ose grafu. Třetí pole obsahuje potenciály

odpovídající vzorkům „před pulsem“, tato data tvoří osu x grafu. Potenciály byly získány z waveform pomocí VI Waveform_to_XY pair, na jehož výstupu je waveform transformována na pole clusterů obsahujících časový údaj a potenciál odpovídající tomuto časovému údaji. Pole clusterů je vedeno dovnitř cyklu, vybrány jsou XY páry odpovídající časům a potenciálům těsně před pulsy, poté je cluster rozložen a na výstupu cyklu jsou indexovány Y hodnoty odpovídající požadovanému potenciálu.

Úkol1: Zjistěte detekční limit DPV stanovení ferrikyanidu draselného

Detekční limit je definován jako signál, který je $3\times$ vyšší než signál pozadí (poměr signál/šum = 3).

Postup práce:

- Sestrojte potenciostat, ovládací program, seznamte se s jeho ovládáním – způsoby čištění elektrod atd.
- Připravte si 1 mM roztok $K_3[Fe(CN)_6]$ v 0,1 M KCl (případně KNO_3) a 0,1 M KCl (KNO_3).
- proměřte CV $K_3[Fe(CN)_6]$ v rozsahu potenciálů +600 mV a 0 mV vs. Ag/AgCl, parametry měření nastavte podobné jako na obr.
- Roztok vždy $5\times$ zředěte a proměřte, v oblasti detekčního limitu můžete pokračovat po menších krocích.

Úkol 2: Ověřte koncentraci N-acetylcysteinu v lékovém přípravku ACC.

ACC je lékový přípravek kombinující vitamin C a N-acetylcystein, který je účinným mukolytikem (tj. látkou usnadňující vylučování hlenu). N-acetylcystein lze stanovit DPV voltametří na visící rtuťové kapce. Ovládání rtuťové elektrody bylo již dříve popsáno na str. 108.

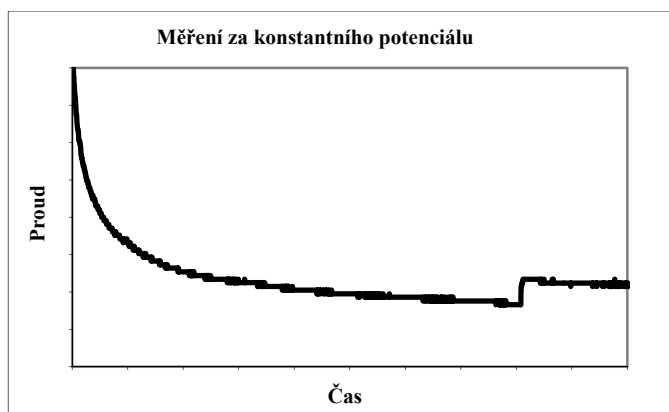
Postup práce:

- Sestrojte potenciostat, ovládací program, seznamte se s jeho ovládáním – způsoby čištění elektrod atd.
- Sestrojte kalibrační křivku N-acetylcysteinu v rozsahu koncentrací 10^{-4} – 10^{-5} M pomocí p.a. chemikálie. Jako podpůrný elektrolyt použijte 0,1 M KCl. Voltamogram změřte v rozsahu potenciálů od –100 do –800 mV vs. Ag/AgCl.
- Rozpusťte tabletu ACC v 0,1 M KCl tak, aby při dodržení deklarovaného obsahu N-acetylcysteinu výrobcem byla odezva přibližně v polovině kalibrační křivky.
- Měření opakujte pro několik různých zředění ACC, případně vyzkoušejte stanovení metodou standardního přídatku.

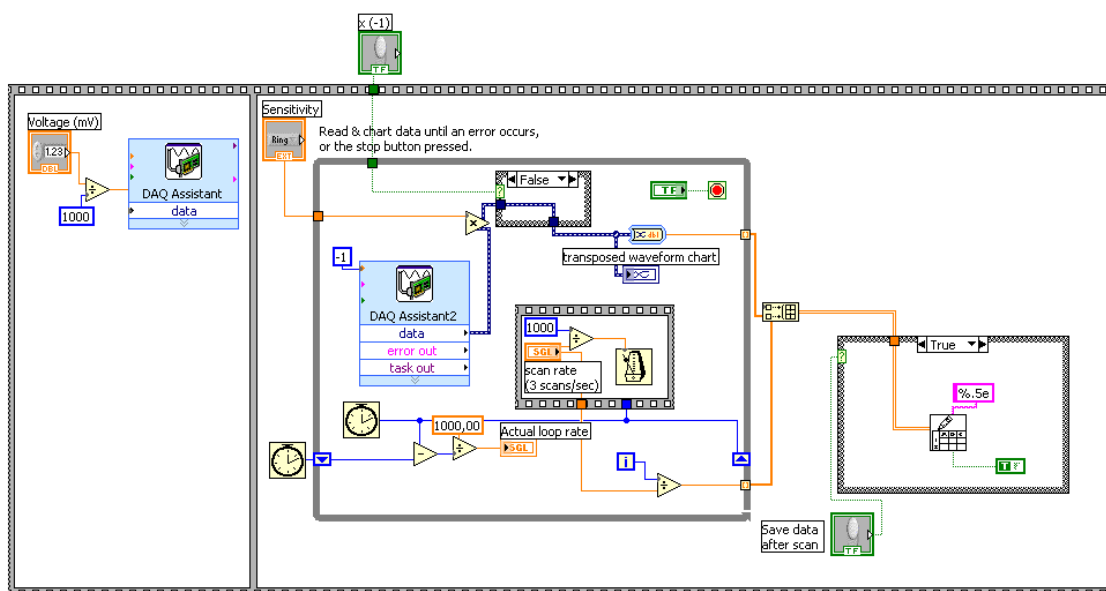
8.5.3 Chronoamperometrie v míchaném roztoku

Měření proudu za konstantního potenciálu je nejjednodušší a velmi běžnou metodou elektrochemické analýzy. Využívá se zejména při měřeních s modifikovanými elektrodami a při provozování elektrochemických detektorů např. u chromatografických a podobných technik (kapilární elektroforéza). Výhodou takového měření je, že výsledky experimentů na tuhých elektrodách neovlivňují přechodové jevy (zejména ustavení difúzní vrstvy), ani kapacitní proud. Důsledkem omezení těchto nepříznivých vlivů je možnost dosažení extrémně nízkého detekčního limitu – až 10^{-14} mol·dm⁻³. Vlastní měření probíhá v míchaném roztoku a v obvyklém tříelektrodeovém zapojení. Na pracovní elektrodu je vložen konstantní potenciál, při kterém dochází k oxidaci (redukci) zkoumané látky a po ustavení stabilní proudové linie

může být proveden nástřik analytu. Následně je analyt oxidován (redukován) na pracovní elektrodě, čímž dojde k nárůstu proudu – velikost odezvy je mírou koncentrace zkoumané látky. Na obrázku je uveden příklad záznamu výše popsaného měření. Na Obr. 124 je zřejmé ustálení základní linie po vložení pracovního potenciálu a odezva na nástřik analytu.



Obr. 124: Chronoamperometrie v míchaném roztoku



Obr. 125: VI pro chronoamperometrii v míchaném roztoku

Úkol: Měření koncentrace peroxidu vodíku pomocí platinové elektrody metodou chronoamperometrie v míchaném roztoku.

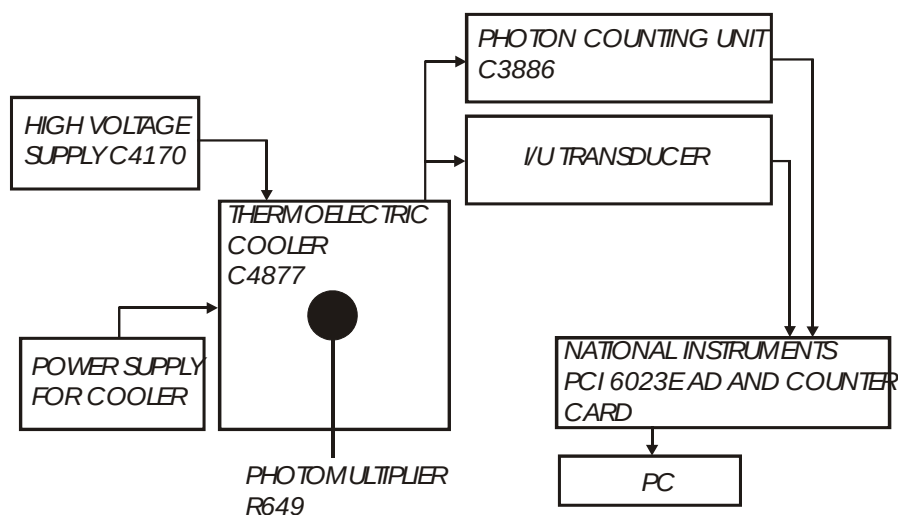
Postup práce:

- Sestrojte potenciostat, ovládací program, seznamte se s jeho ovládáním – způsoby čištění elektrod atd.
- Připravte zásobní roztok peroxidu vodíku (cca 0,5%) a zjistěte jeho přesnou koncentraci manganometrickou titrací.
- Připravte roztok 0,1 M KCl, měrnou kádinku naplňte 20 ml tohoto roztoku, vložte magnetické míchadélko a elektrodový systém, zapojte elektrody – na pracovní elektrodu vložte potenciál 900 mV vs. Ag/AgCl.

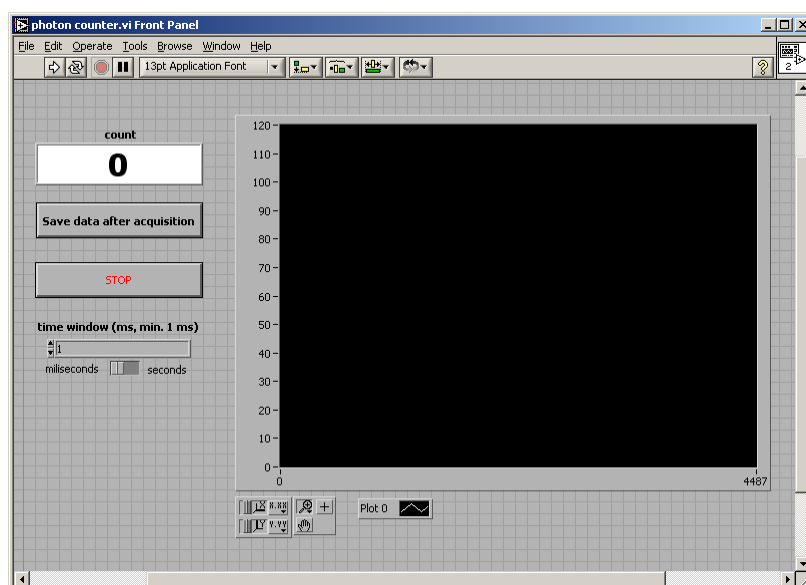
- Za stálého a definovaného míchání nechte ustálit proud pozadí na konstantní hodnotu (obvykle 10–20 minut).
- Poté Hamiltonovou mikrostříkačkou přidejte postupně $2 \times 50 \mu\text{l}$, $4 \times 100 \mu\text{l}$ a $2 \times 250 \mu\text{l}$ zásobního roztoku peroxidu vodíku. Poté proveďte nástřik neznámého vzorku peroxidu.
- Měření objemu vytékající kapaliny pomocí počítání kapek. Zapojení fotonásobiče jako čítače fotonů.

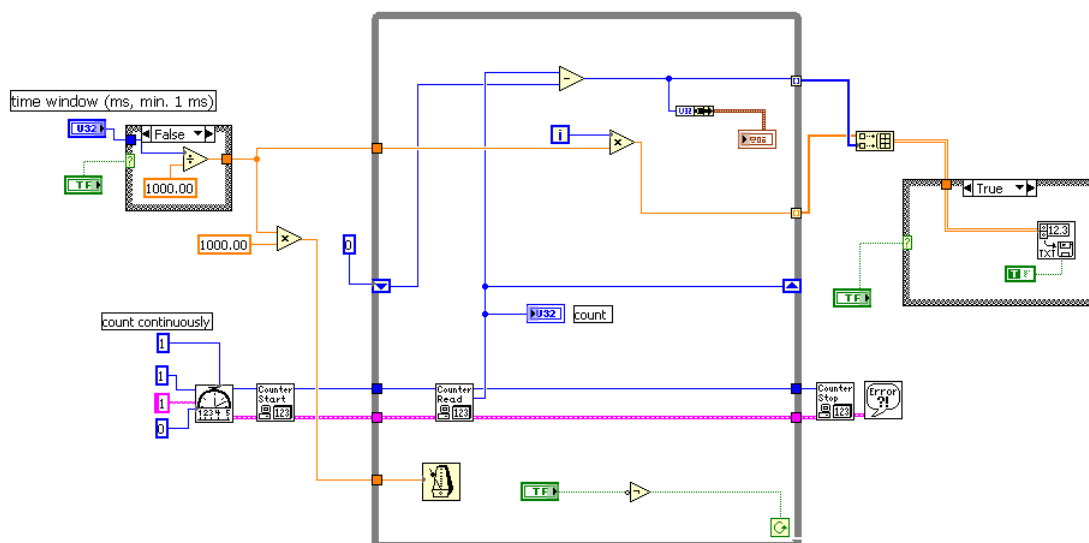
8.5.4 Zapojení fotonásobiče jako čítače fotonů

Sestava pro čítání fotonů firmy Hamamatsu, Japonsko je osazena fotonásobičem R649 s efektivní plochou fotokatody $5 \times 8 \text{ mm}$ a spektrálním rozsahem 300–850 nm, který je umístěn do chladicí jednotky typu E1341 pracující na principu Peltierova jevu. Napájení zajišťuje zdroj vlastní konstrukce využívající jednotku zdroje vysokého napětí C4170-00. K fotonásobiči je připojen zesilovač/diskriminátor C3886. Popis systému a ovládací VI jsou na Obr. 126- Obr. 128.



Obr. 126: Blokové schéma sestavy pro čítání fotonů





Obr. 127: Čelní panel a blokový diagram čítače fotonů



Obr. 128: Sestava pro čítání fotonů. Horní řada zleva: zdroj pro Peltiérovu chlazení, elektronika čítače fotonů, tvarovač pulsů. Dole: zdroj napájecích napětí (vysoké napětí pro fotonásobič, napájení jednotky čítače a tvarovače), jednotka fotonásobiče s měřící celou

Úkol: Kalibrace čítače fotonů

Protože intenzita světelné emise je velmi snadno měřitelná citlivými fotonásobiči, řadí se chemiluminiscenční metody mezi nejcitlivější techniky chemické analýzy. Pomocí chemiluminiscence luciferinu katalyzované enzymem luciferázou a ATP lze např. stanovit obsah ATP v jediné buňce, odpovídající koncentraci ve zlomcích femtomolu·l⁻¹. Důležitou charakteristikou každé CL reakce je její kvantový výtěžek, definovaný jako poměr mezi počtem produkováných fotonů a počtem molekul zreagovaných při CL reakci. Protože počet molekul zreagovaných v čase dt je přímo úměrný reakční rychlosti, je kvantový výtěžek alternativně definován i jako podíl okamžité intenzity světelné emise a reakční rychlosti. Při měření na luminometru je registrována časová závislost intenzity světelné emise, která je (jak již bylo

uvedeno) přímo úměrná reakční rychlosti (konstantou úměrnosti je kvant. výtěžek). U většiny ostatních kinetických metod (spektrofotometrie, titrace, konduktometrie apod.) je sledována závislost koncentrace některé ze složek reakce na čase.

Standardizace chemiluminiscenčních (CL) měření je nutná zejména pro stanovení kvantových výtěžků neznámých CL reakcí a je důležitá i pro srovnávání výsledků měření na různých přístrojích. Pro účely kalibrace luminometru se využívají CL reakce, jejichž kvantový výtěžek je (téměř) nezávislý na reakčních podmínkách. Nejznámější standardizační reakcí je CL oxidace luminolu peroxidem vodíku katalyzovaná heminem (hemoglobinem) podle Lee a Seligera. Reakce je prováděna v K_2CO_3 ($\text{pH} = 11,6$). Kvantový výtěžek reakce je roven 0,0123. Reakce je výhodná pro méně citlivé luminometry, u citlivějších přístrojů je nutné neúměrně snížit koncentraci luminolu (pod $10 \text{ nmol} \cdot \text{l}^{-1}$). Za těchto podmínek se začíná projevovat slabá CL heminu (pozadí). Touto nečistotou netrpí nedávno navržená standardizační reakce podle Kaliničenka a Maystrenka, při níž je iniciační systém hemin – H_2O_2 nahrazen směsí $\text{NiCl}_2 - \text{H}_2\text{O}_2 - \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$. Reakce je prováděna v alkalickém prostředí ($0,1 \text{ M KOH}$). Kvantový výtěžek je sice nižší ($\Phi_{\text{CL}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$) než u reakce podle Lee a Seligera, koncentrace luminolu se však může pohybovat v rozmezí od $0,01 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ do $0,01 \text{ nmol} \cdot \text{l}^{-1}$.

Postup měření a vyhodnocení:

- Seznamte se s obsluhou čítače fotonů, naprogramujte VI pro měření.
- Koncentraci zásobního roztoku luminolu stanovíme spektrofotometricky ($\epsilon_{(\lambda=347 \text{ nm})} = 7640 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$).
- Do kyvety luminometru napipetujeme směs KOH ($0,1 \text{ M}$), H_2O_2 ($0,1 \text{ mM}$), $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (20 mM) a NiCl_2 ($2 \mu\text{M}$) – v závorkách jsou uvedeny výsledné koncentrace v kyvetě (doporučení: promyslete si doma, jak připravit zásobní roztoky). Celkový objem zvolíme tak, aby po přidání luminolu činil jeden mililitr.
- Poté spustíme měření a nastříkneme roztok luminolu. Použijeme takovou koncentraci, aby nebyla překročena maximální intenzita, kterou je luminometr schopen změřit (měříme tedy těsně pod hranicí maximálního dynamického rozsahu luminometru).
- Při dalších měřeních snížíme koncentraci luminolu desetinásobně a stonásobně (kontrola linearit měření světelné intenzity). Každé měření provedeme třikrát, celkem tedy devět měření, po cca dvaceti minutách.
- Získané dílčí počty fotonů v jednotlivých časových oknech sečteme. Opravdový počet fotonů vyprodukovaných při reakci spočítáme tak, že počet molekul luminolu přidanych do reakční směsi vynásobíme kvant. výtěžkem reakce.

9 Použitá a doporučená literatura

1. Häberle a kol. Průmyslová elektronika a informační technologie, Europa-Sobotales, Praha, 2003.
2. Mašláň M., Žák D. Logické obvody. Olomouc, 1994.
3. Mašláň, M. Operační zesilovače. UP Olomouc, 1991.
4. Punčochář, J. Operační zesilovače v elektronice. BEN technická literatura, Praha, 2011.
5. Čejka M. Použití počítačů v měřicí technice. FEKT VUT v Brně, Brno, 2002.
6. Havlíček, J., Vlach, J., Vlach, M., Vlachová V. Začínáme s LabVIEW. BEN technická literatura, Praha, 2008.
7. Larsen, R.W. LabVIEW for Engineers, Prentice Hall, New Jersey, 2011.

Internetové zdroje:

www.ni.com – webový portál firmy National Instruments

<http://bookboon.com/en/electrical-electronic-engineering-ebooks> – řada elektronických knih ke stažení po registraci

www.hw.cz, automatizace.hw.cz – webový portál zaměřený na průmyslovou automatizaci