

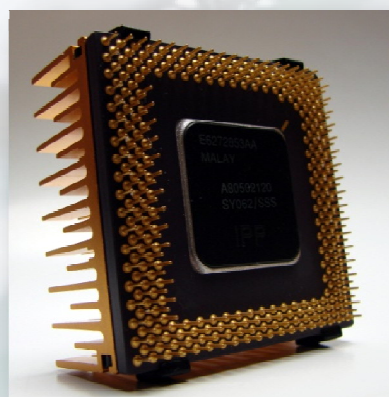
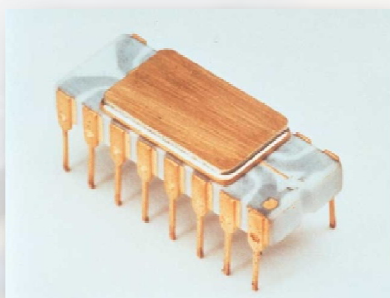


PERSPEKTIVY ELEKTRONIKY 2009

6. CELOSTÁTNÍ SEMINÁŘ UČITELŮ STŘEDNÍCH ŠKOL
„Moderní technologie v elektrotechnice předmětem výuky“

Rožnov pod Radhoštěm
26. březen 2009

sborník přednášek



ISBN 978-80-254-4052-0

Motto: ... a my se můžeme těšit, jak nová přesnější poznání skutečnosti budou s našimi teoriemi souhlasit. A nebo taky ne! Ale i o tom je věda. (Vesmír 1/2009)

Perspektivy elektroniky 2009

„Moderní technologie v elektrotechnice předmětem výuky“
6. celostátní seminář učitelů středních škol ČR

Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel
Rožnov pod Radhoštěm
26. březen 2009

Redakční rada PEL 2009:

Ing. František Kandrnal

Ing. Bohuslav Kuřík

Ing. Jiří Král

Mgr. Miroslav Trefil

Ing. Anna Zejdová

Ing. Evžen Žabčík

Mgr. Petr Fuchs

Grafický návrh obálky:

Mgr. Petr Fuchs

Sazba a tisk:

SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610, 756 61

© 2009

Obsah

Program semináře PEL 2009	6
Slovo úvodem	7
Programátorské využití Super I/O obvodů s HW monitoringem PC ve výuce na SŠ.....	9
Tranzistorový zvuk a počítačové simulace příčin jeho vzniku	19
Inteligentní snímače	27
Řízení motorů HS322 pro polohovou adaptivitu robotického ramene.....	35
Aplikace řídicích systémů s DSC	41
Výuka hradlových polí a jejich programování ve středních školách	49
Asistenční technologie a polohová adaptivita v robotice	51
Trendy vývoje alternativních zdrojů energie a jejich začlenění do energetických systémů	59
Trendy ve světě polovodičových technologií.....	67
Řízení motorů RX64 pro polohovou adaptivitu mobilního robotického systému	75
Moderní metody řízení synchronních strojů s permanentními magnety	83
Moderní metody zpracování obrazu strukturou FPGA	91
ELEKTROMOBILY? Proč ne? A proč ano?.....	99
Digitální televize a digitální rozhlas - současnost a perspektivy	103
Úvod do studia memristoru	115

Program semináře PEL 2009

26. březen 2009

- 8:15 – 9:15 **Prezentace účastníků semináře v kinosále školy**
- 9:15 – 9:25 **Uvítání hostů- zahájení**
Mgr. Miroslav Trefil, ředitel školy.
Mgr. Josef Slovák, člen rady Zlínského kraje pro školství
JUDr. Jaroslav Kubín, starosta města Rožnov pod Radhoštěm
- 9:25 – 9:30 **Organizační servis**
Ing. Bohuslav Kuřík, statutární zástupce ředitele školy
- 9:30 – 9:45 Vystoupení zástupce nakladatelství BEN – technická literatura
Vystoupení zástupců firem dovážejících a vyrábějících elektroniku
- Vystoupení přednášejících – dopolední blok**
- 9:45 – 10:15 Aplikace řídicích systémů s DSC (řízení pohonů)
Ing. Petr Hudeček, Ing. Martin Sobek, VŠB – TU Ostrava
- 10:15 – 10:45 Polohová adaptivita v robotice a praktická ukázka
Doc. Mgr. Ing. Milan Kvasnica, CSc., UTB Zlín
- 10:45 – 11:30 Úvod do studia memristoru – počítačové simulace
Prof. Ing. Dalibor Bielek, CSc., UO Brno
Ing. Zdeněk Bielek, Ph.D., SŠIEŘ Rožnov p. R.
- 11:30 – 11:45 Výuka hradlových polí a jejich programování ve středních školách
Ing. Jiří Král, SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm
- 11:45 – 12:15 Trendy ve světě polovodičových technologií
Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc., VUT Brno
- 12:15 – 12:45 Digitální televize a digitální rozhlas – současnost a perspektivy
Doc. Ing. Václav Žalud, CSc., ČVUT Praha
- 12:45 – 13:15 Elektromobily v praxi + praktická ukázka
Mgr. Jaromír Vegr, Elektromobily o.s., Sedlec – Prčice
- 13:15 – 13:35 **Přestávka na oběd**
- 13:35 – 14:15 Prohlídka expozice firem, nákup knih, konzultace s přednášejícími
předvedení robotů, předvedení elektromobilu, prohlídka nové učebny VYT
- Vystoupení přednášejících – odpolední blok**
- 14:15 – 14:45 Programátorské využití Super I/O obvodů s HW monitoringem PC ve výuce
Ing. Lukáš Hapl, SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm
- 14:45 – 15:15 Inteligentní snímače
Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D., VUT Brno
- 15:15 – 15:45 Moderní metody zpracování obrazu strukturou FPGA
Ing. Soběslav Valach, VUT Brno
- 15:45 – 16:00 **Zakončení semináře**
Ing. Bohuslav Kuřík, statutární zástupce ředitele školy

Slovo úvodem ...

František Kandrnal

**Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610
756 61 Rožnov pod Radhoštěm**

frantisek.kandrnal@roznovskastredni.cz

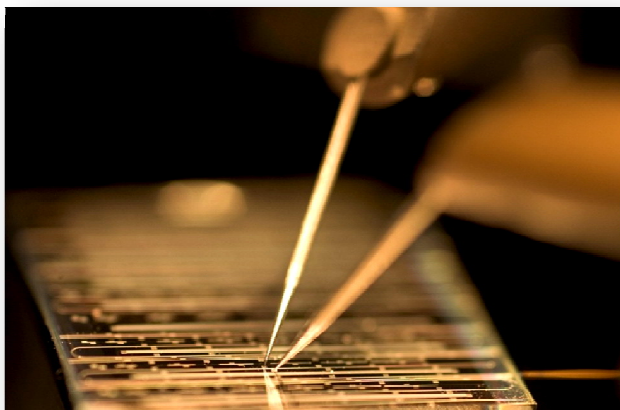
Letošní seminář PERSPEKTIVY ELEKTRONIKY je již 6. setkáním vysokoškolských a středoškolských pedagogů nad novinkami oborů vyučovaných na středních školách. Jsou zaměřeny do nejrůznějších oblastí elektroniky a informatiky.

Obory jako mikroelektronika, automatizace, robotika, netradiční zdroje energie jsou zařazovány do programu pravidelně. Jiné se vynoří aktuálně jako reakce na měnící se společenskou situaci.

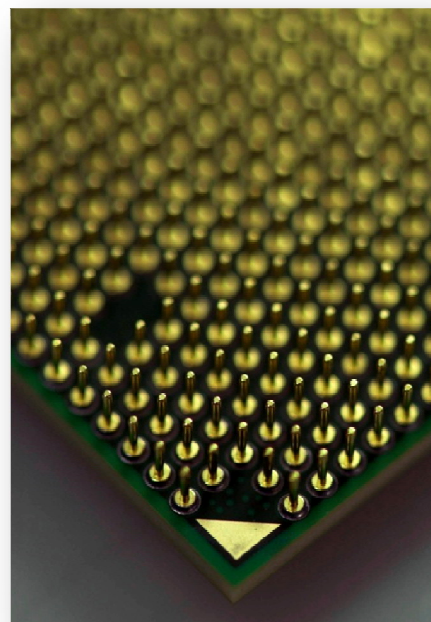
Takovými tématy jsou v letošním ročníku digitální radiokomunikace, elektromobily a hradlová pole. První z nich se stává aktuální s přechodem České republiky na digitální televizní vysílání. Druhé nabízí nový pohled na cestování a dopravu v době, kdy svět začíná šetřit a ženevský autosalón nabízí modely plně poháněné elektrickým motorem. Třetí téma je důležité z hlediska inovace výuky naší školy. Z prostředků Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu ČR je financován projekt, jehož výsledkem bude zavedení výuky programování hradlových polí FPGA v jazyce VHDL.

Rád bych poděkoval vysokoškolským pedagogům i specialistům z praxe, že se s námi dělí o nové poznatky i o své nadšení uvádět je v život.

Potěšující rovněž je, že mezi středoškolskými učiteli z Moravy, Čech i Slovenska se našlo dostatek těch, kteří mají o nové poznatky zájem a jsou ochotni je nabídnout svým žákům, *aby o nich alespoň slyšeli a přemýšleli o nich.*



Moderní technologie ovlivňují náš život ...



Programátorské využití Super I/O obvodů s HW monitoringem PC ve výuce na SŠ

Lukáš Hapl

**Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610
756 61 Rožnov pod Radhoštěm
lukas.hapl@roznovskastredni.cz**

Abstrakt:

Příspěvek se zabývá možností rozšíření či prohloubení středoškolské výuky předmětů zahrnutých do oblasti hardware. Jeho dalším tématem je mezipředmětová provázanost hardware s oblastmi programování a vývoj aplikací, vzdělávání v informačních technologiích a dalšími oblastmi vzdělávání spadajícími do kategorie RVP Informační technologie. K tomu poslouží využití potenciálu podpůrných obvodů Super I/O s funkcí HW monitoring implementovaných na základních deskách PC.

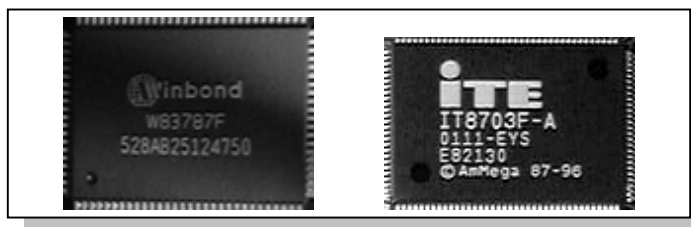
1. Úvod

Při inovaci tematických plánů odborných předmětů z oblasti informačních a komunikačních technologií (ICT) či v současné době při aktuální tvorbě školních vzdělávacích programů se středoškolští učitelé potýkají s požadavky na rozšiřování a prohlubování kompetencí žáků a zároveň na aktualizaci učiva, které si mají žáci osvojit. S tím souvisí následující poznatek. Fenomémem současné konzumní společnosti [1] je stále rostoucí poptávka po novinkách z oblasti ICT. Na to samozřejmě reagují výrobci elektroniky a kruh se tím uzavírá. Žáci tento vývoj bedlivě sledují. Mnohdy ne na odborné úrovni, ale většinou – na rozdíl od učitele – mají s novinkami přímou zkušenost, čímž může mnohdy pozorovatel nabýt falešného pocitu, že jsou žáci odborně na vyšší úrovni než jejich učitelé – žáci mají přehled. Tlakem veřejnosti (vedením školy či vnitřní motivací) se pak učitelé snaží o to, aby „udrželi krok“ se svými žáky (neplatí vždy a u všech). Vyžaduje se, aby sledovali aktuální dění na této scéně, novinky vstřebávali, dostudovávali chybějící informace, problematiku chápali, didakticky a metodicky ji zpracovávali a vhodným způsobem s ní své žáky seznamovali [2,3]. Problémem však je, že již v této chvíli učitelům tzv. „ujíždí vlak“ s dalšími přicházejícími novinkami (pryč jsou časy, kdy měl učitel čas nastudovat problematiku některých inovovaných částí hardware (HW) počítače, na patřičné úrovni s ní žáky seznámit a ti z ní mohli po absolvování studia ještě dalších pár let reálně těžit v praxi). Někteří učitelé v souvislosti s tím tzv. „honí více zajíců najednou“, když se snaží své žáky informovat o nových trendech a zároveň se soustředit na podstatnější prvky učiva. Zpravidla pak ani jedna z uvedených oblastí zájmu nebývá pokryta optimálně. Při současné rychlosti vývoje nových technologií není v silách učitele vše podchytit, zpracovat a žákům předat. Vystává tak otázka, zdali je vůbec vhodné příliš se při výuce ICT zabývat novinkami. Pokud ano, do jaké míry či jakou formou? Otázka by také mohla být položena tak, zdali není vhodnější především naučit žáky zamýšlet se nad odbornými problémy, seznámit je s okruhem poznatků do kategorie dané problematiky spadajících, a některé moderní trendy v rámci aktivizujících metod výuky ponechat žákům samostatně nastudovat a následně jejich nabyté vědomosti ověřit a ohodnotit [4]. Mylné by však bylo domnívat se, že je nutně tento přístup pro učitele vždy schůdnější než první zmiňovaný. Oba přístupy totiž mohou být pokrokové, stejně jako zpátečnické [5]. Zde je zapotřebí vrátit se na začátek a položit si otázku, čím a jak tedy výuku naplnit? Bude záležet na vytýčených cílech výuky, kompetencích učitele a zvolené metodě.

Tento příspěvek si neklade za cíl polemizovat o různých formách, metodách a rozsahu výuky ICT v globálu či vybrat optimální variantu výuky ze dvou výše nastíněných, ale snaží se poukázat na možnost využití velmi malé části obrovského odborného potenciálu již stávajícího HW vybavení většiny osobních počítačů řady IBM-PC kompatibilních pro účely výuky odborných předmětů souvisejících s hardwarem počítačů a programováním. Tvůrcům tematických plánů a školních vzdělávacích programů poskytuje možnost promyslet zakomponování dále navržených oblastí do výuky tak, aby vhodným způsobem rozvíjely kompetence žáků dle RVP Informační technologie: hardware, programování a vývoj aplikací [6]. Pokud má škola ve svém ŠVP v rámci disponibilních hodin programu RVP zakomponován i předmět týkající se výuky elektroniky, pak je možné některé pasáže provázat i s ním. Záleží též na vyučujícím, jestli materiály dále uvedené v tomto pojednání žákům přeloží a zpracuje je pro jazyk mateřský či ponechá v původní jazykové mutaci (většinou v angličtině), čímž může za jistých okolností přispět i k rozvíjení požadované klíčové kompetence vzdělávání a komunikace v cizím jazyce.

Příspěvek tím chce především poukázat na skutečnost, že i přes neustálý nárůst novinek v oblasti HW počítačů je zde mnoho současných technologií pro středoškolské účely neprobádaných a didakticky nezpracovaných. Právě na takové technologie a prvky hardware, jejichž funkčnost je léty prověřena a jejichž služeb se bude využívat i v budoucnosti, by se mohli pedagogové vyučující IT na SŠ zaměřit a pro svou výuku je efektivně zužitkovat. Tím je z pohledu didaktiky naplněna podmínka praktičnosti, odbornosti a z dalšího pojednání vyplyne, že i logického a tvůrčího přístupu.

Jedním z výše zmiňovaných HW prvků skýtajících takový potenciál je například v obecné rovině integrovaný obvod Super I/O s funkcí HW monitoringu [7,8] umístěný na základních deskách počítačů třídy IBM-PC s form faktorem ATX.



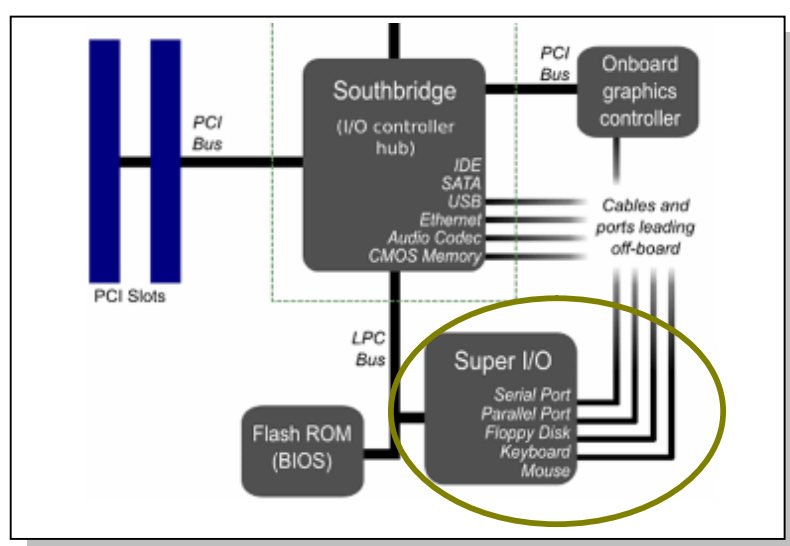
Obr. 1 Příklady Super I/O výrobců Winbond a iTE [9]

Jeho funkce je možno ve výuce HW na patřičné úrovni nastudovat a následně programátorským způsobem využít v jiném předmětu (nabízí se mnoho programátorských realizací v různých programovacích jazycích, a to nejen pro operační systémy Linux [10], ale také pro systémy Microsoft: DOSem počínaje a Windows Vista konče, které zde budou uvedeny) a žáky tím motivovat k výuce programování pomocí něčeho, co již znají - na vědomostní úrovni si osvojili v průběhu výuky HW. Lákavá pro ně též může být představa naučit se získávat informace o stavu počítače a umět je využít.

2. Obvody Super I/O s HW monitoringem

Jak již bylo zmíněno, integrované obvody označované jako Super I/O se nacházejí na základních deskách – a to již více než 8 let [11]. V hierarchii zapojení řídicích komponent počítače je takový integrovaný obvod připojen na nejnižší úroveň (z hlediska výkonnosti, propustnosti sběrnice, poskytovaných služeb) k obvodu South Bridge, potažmo ICH či IOH. Přestože je jeho dávným úkolem sdružovat dříve samostatné a dnes již téměř archaické obvody pro řízení komponent, jako jsou disketové mechaniky, sériové porty COM, paralelní porty LPT, herní GAME port, MIDI port, klávesnice/myš, dříve též rozhraní ATA, je možné nalez-

nout i takové obvody (cca již od roku 2002), které v sobě integrují funkce pro HW monitoring osobního počítače. Ty buďto dříve (cca kolem roku 1997) vůbec nebyly na základních deskách přítomny, nebo byly na základní desku implementovány v podobě samostatného integrovaného obvodu vně Super I/O (např. se jednalo o Winbond W83781D [12]). Pokud se vyloučí z okruhu osobních počítačů notebooky, které mají tuto problematiku mnohdy řešenou odlišně, pak je dnes v rámci stolních počítačů převážná většina základních desek osazena čipy Super I/O i s HW monitoringem. Nepředpokládá se, že by se tyto obvody v brzké budoucnosti ze základních desek osobních počítačů vytratil [11]. Jediným zásadním problémem při pronikání do problematiky HW monitoringu byl však ještě nedávno poměrně značný počet výrobců, kteří čipy vyrábějí v různých provedeních s různě implementovanými funkcemi. Naštěstí se v současné době na základních deskách objevují čipy jen několika výrobců, přičemž vlastnostmi a funkcemi si je většina z nich velmi podobná. Těmito výrobci jsou Winbond a ITE. Dalšími, na které je možno narazit, mohou být například VIA, SMC, SIS, PC CHIPS [13].

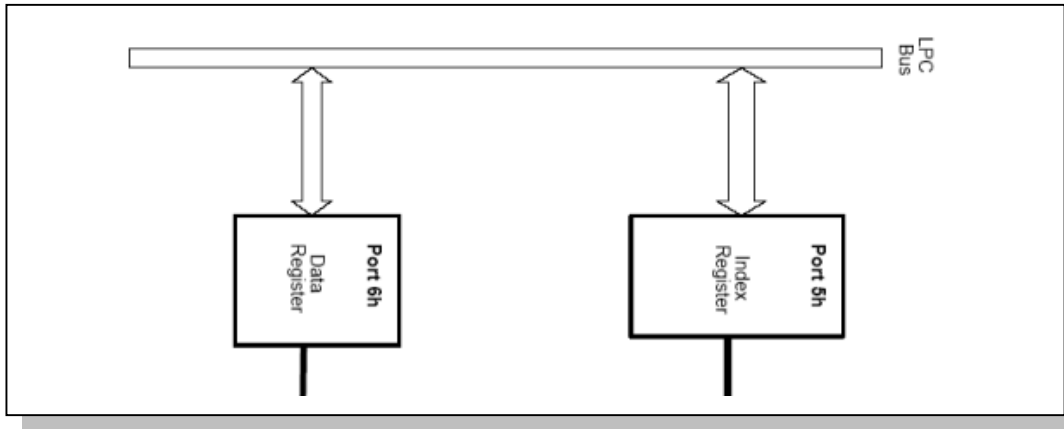


Obr. 2 Část blokového schématu propojení chipsetu PC [8]

Části obvodu zajišťující HW monitoring umožňují získávání údajů o stavu počítače. Tím se konkrétně rozumí informace o velikosti aktuálních napájecích napětí, stavu chladicích ventilátorů (možno přepočítat na počet ot./min, tedy RPM), teplotní stav některých komponent systému či detekce otevření skříně počítače. U některých čipů osazovaných do notebooků je možno nalézt i údaje o úhlu natočení (gyroskopicky) či zrychlení, které výrobci využívají pro předcházení havárie pevných disků tím, že je při velkých náklonech, prudké změně směru, otřesech či pádu odpojí. To však není problematika, kterou by bylo možno na stolních počítačích technicky podchytit [12,14,15].

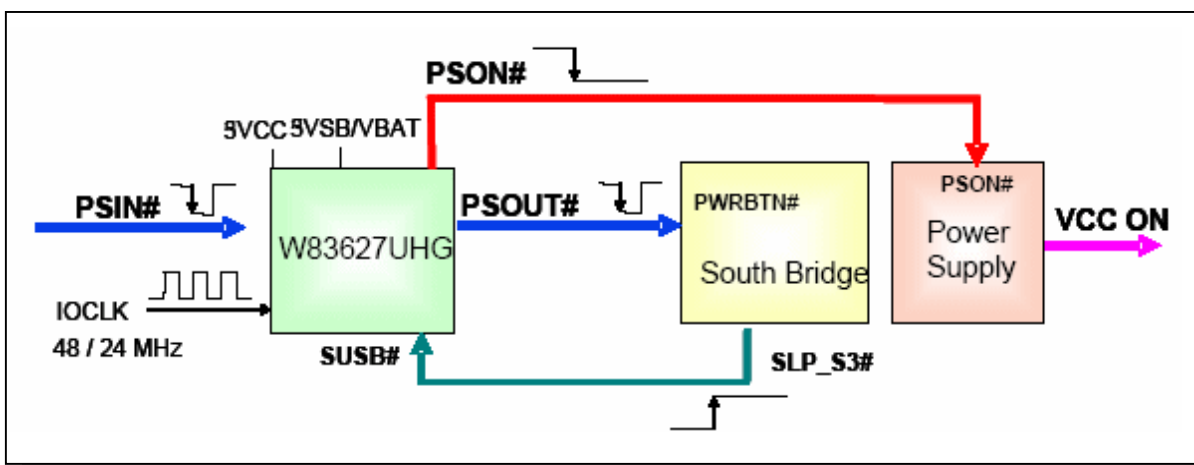
3. Využití obvodů Super I/O ve výuce HW a předmětech blízkých

Obvody Super I/O nabízejí z hlediska výuky HW nadmíru zajímavou problematiku. Žáci se díky nim mohou lépe seznámit s jinak velmi nesnadno uchopitelným obsahem učiva o čipových sadách a vzájemném propojování obvodů čipových sad s podpůrnými obvody. Sice na elementární, přeci jen však hmatatelné a odborné úrovni. S tím úzce souvisí problematika sběrnicevého systému ISA, který je u starších Super I/O využíván pro spojení s obvodem South Bridge či s hlavním BIOSem, a také jeho náhrady za modernizované řešení LPC nebo zcela nově SPI.



Obr. 3 Vstup/výstup připojení HW monitoringu v Super I/O ke sběrnici LPC [14]

Žáci díky obvodu lépe porozumí komunikaci zařízení na sběrnici, využití I/O adres a inicializačnímu procesu PnP. Mimo to také zjistí, že i uvnitř na první pohled nezajímavých obvodů se nacházejí paměťové registry vytvořené různými technologiemi, jejichž účel by pro ně nemusel zůstat pouze abstraktním pojmem. Pochopí principy zapnutí a vypnutí počítače s form faktorem ATX. To vše je možné nastudovat z volně dostupných datasheetů obvodů Super I/O z internetu a ve formě didakticky a metodicky vhodně připravených bloků žákům předkládat.



Obr. 4 Řídicí mechanismus napájení základní desky ATX prostřednictvím W83627UHG [15]

Tím však výčet nekončí. Mezi vnitřní elektronikou, zabývající se HW monitoringem, je možné nalézt různé D/A, A/D převodníky, operační zesilovače, účelové napěťové měniče, obvodové zapojení pro resetování paměti NV-RAM, zapojení spínače pro detekci narušení přístupu do skříně počítače, realizaci připojení termistorů a jiných prvků snímajících teplotu [14]. Tím se celá problematika také lehce dotýká i výuky elektroniky, která „jako sůl“ chybí v nových RVP Informační technologie a školy si ji buďto mezi předměty neumísťují, popřípadě ji umísťují do disponibilních hodin. Z tohoto pohledu se jedná o závažný nedostatek, na který byl NÚOV upozorňován v průběhu připomínkového řízení k RVP Informační technologie v roce 2008, ale reakce NÚOV byla zamítavá. Hořko-kysele pak může chutnat učitelovo poznání skutečnosti, že některé, byť velice primitivní záležitosti, nemusí být žáky v této oblasti vůbec pochopeny.

S posledním zmiňovaným využitím tepelných senzorů přichází i oblast manipulace s binárními kódy, která sice s problematikou HW úzce souvisí, ale dle RVP didakticky více

spadá do kategorie „vzdělávání v informačních a komunikačních technologiích“. Nicméně, žáci by díky prostředkům obvodu měli možnost reálně poznat možnosti využití 8b či 9b binárních kódů a dvojkového doplňku při měření teploty různých částí počítače.

Tab. 1 Část tabulky s 8b a 9b dvojkovým doplňkem pro převod snímaných teplot [14]

TEMPERATURE	8-BIT DIGITAL OUTPUT		9-BIT DIGITAL OUTPUT	
	8-Bit Binary	8-Bit Hex	9-Bit Binary	9-Bit Hex
+125°C	0111,1101	7Dh	0,1111,1010	0FAh
+25°C	0001,1001	19h	0,0011,0010	032h
+1°C	0000,0001	01h	0,0000,0010	002h
+0.5°C	-	-	0,0000,0001	001h
+0°C	0000,0000	00h	0,0000,0000	000h
-0.5°C	-	-	1,1111,1111	1FFh

Nejzajímavější věc byla ponechána na závěr výčtu o využitelnosti těchto skutečností při výuce HW. Většina obvodů nabízí nejen monitoring jako takový, ale i změnu počtu otáček/min. vybraného ventilátoru, založenou buď na metodě s tepelnými ztrátami (změnou napětí), nebo bez tepelných ztrát (s použitím PWM), a to dle preference každého výrobce [16]. Taková změna může být navíc u většiny obvodů vyvolána buď přímo uživatelem (programátorem) nebo přes vnitřní automatizační logiku, která sleduje teplotu a přizpůsobuje otáčky podle nastavených pravidel. Zde by se mohla pro změnu uplatnit mezipředmětová provázanost s oblastí automatizace, pakliže pro ni ještě zůstal prostor v disponibilních hodinách ŠVP, neboť v uvedených RVP tato oblast nefiguruje.

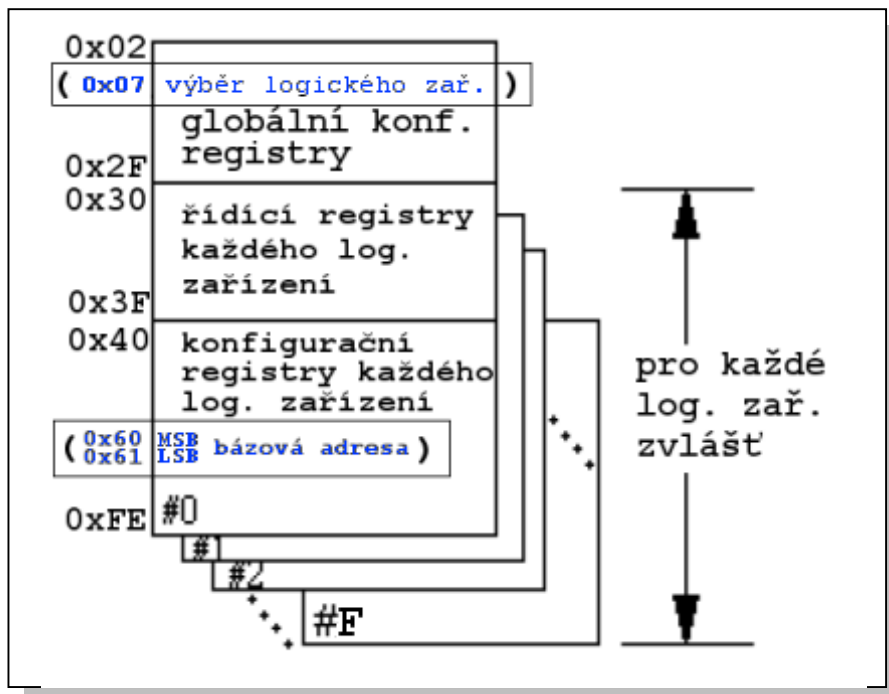
4. Programátorské využití obvodů Super I/O s HW monitoringem

Zapojení programovacích jazyků do výuky hardware osobních počítačů na Střední škole informatiky, elektrotechniky a řemesel v Rožnově pod Radhoštěm vždy představovalo a stále představuje povýšení vědomostí žáků na určitou úroveň dovednostní. Žáci mají možnost si vyučovanou teorii prakticky „osahat“ a přitom si prohloubit či upevnit dosavadní poznatky z oblasti programování. Z didaktického hlediska se jedná o mezipředmětovou provázanost (hardware ↔ programování). Tímto způsobem se například v jazyku Pascal již dlouhá léta procvičuje manipulace s oblastmi UMA prostoru operační paměti, manipulace s vektory přerušení, čtení údajů RTC paměti NV-RAM (CMOS) apod. Čas však nezadržitelně plyne a je zapotřebí vnést do výuky hardware nové prvky a didakticky je připravit pro poznávání a procvičování. Vhodným kandidátem pro technický základ činnosti se může stát obvod Super I/O se svými možnostmi. Zajímavostí je, že se dá využít i při zachování provázanosti s výukou Pascalu či jazykem ASM x86 [14]. Ani pokrokoví pedagogové zaměřující se na jazyk C nebo C++ na systémech Windows nemusí zoufat, neboť i v jejich rámci je možno s obvodem pracovat. To může být inspirací pro všechny školy, které se potýkají se stejnou výzvou – hledání náplně pro odborné vzdělávací oblasti. Z pohledu učitele programovacích jazyků práce s obvodem Super I/O k procvičení nabídne:

- vítanou nutnost zabývat se algoritmizací postupů pro přístup k obvodu na sběrnici,
- využití základních řídicích struktur (cyklus, podmínka, funkce) a datových typů,
- přístup k zařízení na sběrnici (pro indexaci registrů, čtení/zápis dat),
- manipulaci s aritmetickými a logickými operátory při práci s registry.

Z hlediska výuky oblasti hardware programátorský přístup umožní pochopit:

- principy adresace zařízení na sběrnici (včetně inicializace PnP),
- členění obvodu Super I/O na logická zařízení a způsoby přístupu k nim (viz obr. 5),
- reálný přístup k logickým zařízením (viz obr. 6),
- využití funkcí logických zařízení (především HW monitoringu – viz obr. 7),
- využití matematických vzorců pro výpočet napětí, otáček, teplot HW monitoringu,
- využití možností automatické korekce teploty v obvodu HW monitoringu,
- nastavení parametrů různých logických zařízení (nejen HW monitoringu),
- chování logických zařízení či celého obvodu při změně hodnot některých registrů.



Obr. 5 Logika systémového přístupu k logickým zařízením v obvodu Super I/O po proběhlé inicializaci PnP [14 - upraveno]

```

C:\ D:\Dev-Cpp\swinio.exe
Hledání base I/O adres logických zařízení v obvodu SuperI/O
vyrobce WinBond; <c> 2009 Lukas Hapl

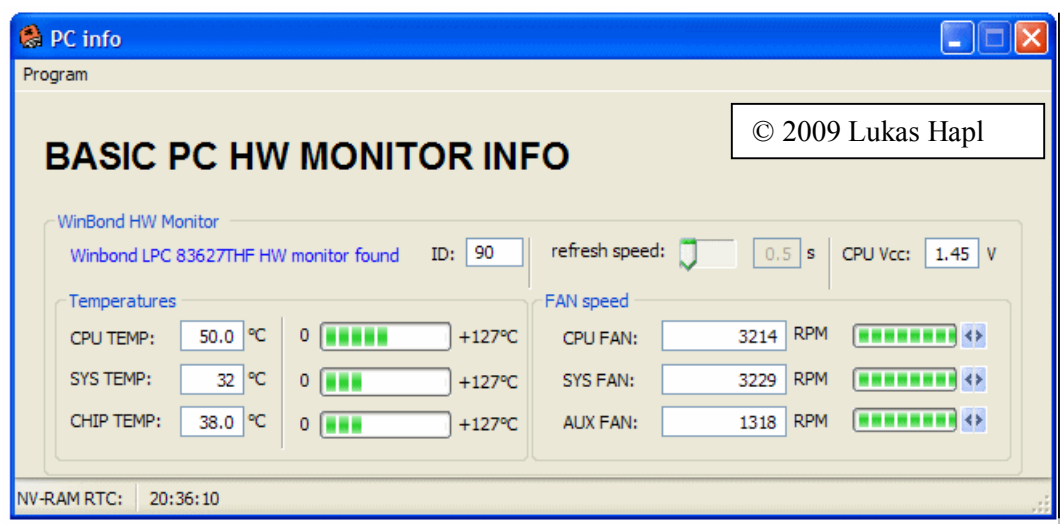
FDD      se nachází na adrese: 0x3F0
LPT      se nachází na adrese: 0x00
UART A   se nachází na adrese: 0x3F8
UART B   se nachází na adrese: 0x00
KBC      se nachází na adrese: 0x060
CIR      se nachází na adrese: 0xFFFF
GPIO1    se nachází na adrese: 0x00
GPIO2    se nachází na adrese: 0xFFFF
GPIO3    se nachází na adrese: 0xFFFF
ACPI     se nachází na adrese: 0xFFFF
HWMON    se nachází na adrese: 0x290
PECI     se nachází na adrese: 0xFFFF
UART C   se nachází na adrese: 0xFFFF
UART D   se nachází na adrese: 0xFFFF
UART E   se nachází na adrese: 0xFFFF

Legenda: zařízení s adresami
0xFFFF nejsou implementovány; 0x00 nejsou aktivovány_

```

Obr. 6 Výpis nalezených adres logických zařízení v jednom z obvodů Super I/O*

Zatímco potenciál obvodu Super I/O s HW monitoringem dokáže samotnou výuku HW obohatit spíše v teoretické rovině s tím, že je díky němu možno využít dříve nabytých vědomostí žáků z oblasti informatiky a dále je vhodně rozvinout klasickými výukovými metodami (slovní a názorně-demonstrační), pak při spojení s programovacími jazyky celá problematika zjevně nabývá dovednostně-praktického či aktivizujícího (problémově orientovaného) rozměru.



Obr. 7 Příklad aplikace v C++ s wxWidgets využívající data obvodu HW monitoringu*

Dlužno podotknout, že čistě programátorské využití bez teoretické přípravy v oblasti HW by však bylo krátkozrakým počinem; mělo by vhodně doplňovat poznávání obvodu na technické úrovni. Pro pedagogy musí nutně vyvstat otázka, kde se programátorským využitím obvodů Super I/O zabývat? Má to být dílčí cíl předmětu programování z hlediska praktického mezi-předmětového provázání s oblastí hardware (cílem by bylo procvičit si vědomosti z oblasti programování na úloze z oblasti hardware počítačů, stejně jako se běžně programovací jazyky používají pro řešení matematických úloh), nebo by se mělo spíše jednat o využití programátorských dovedností při výuce hardware, kde by znalost programovacího jazyka žákům posloužila jako odrazový můstek pro řešení problémově orientovaných úloh předmětu hardware? Zodpovězení této otázky nechť zůstane na laskavém uvážení každého pedagoga. Důležitou roli při rozhodování bude hrát i skutečnost, zdali se vyučující hardware orientuje i v problematice programování et vice versa. Pro skutečné využití potenciálu obvodu se však jedna oblast (HW) bez druhé (SW) za žádných okolností neobejde.

```

outp(EFIR_PORT, PnP);
outp(EFIR_PORT, PnP);
do { if (LogZarizeni == 4) LogZarizeni ++;
    outp(EFIR_PORT, LogDevCR7);
    outp(EFDR_PORT, LogZarizeni);
    printf("%s \t adresa: 0x", devices[LogZarizeni]);
    CR = BASE;
    do { outp(EFIR_PORT, CR);
        printf("%X", inp(EFDR_PORT));
        CR++;
    }
    while(CR <= BASE+1);
    printf("\n");
    LogZarizeni++;
}
while(LogZarizeni < 16);
outp(EFIR_PORT, EndSess);
// 0x2E <- 0x87 inicializace S I/O
// 0x2E <- 0x87 inicializace S I/O
// dle vyrobce zar. 4 neexistuje
// 0x2E <- 0x07
// 0x2F <- 0x07
// vypis nazvu zarizeni
// CR <- 0x60
// 0x2E <- CR
// vypis adresy zarizeni: MSB, LSB
// CR = 0x61
// podminka pro vypis MSB i LSB
// posun o dalsi zarizeni
// 0x2E <- 0xAA konec sezeni S I/O

```

Obr. 8 Výňatek ze zdrojového kódu jazyka C realizující detekci logických zařízení dle obr. 6*

5. Prerekvizity pro výuku

Prerekvizity jsou prostředky materiální, ale i nemateriální povahy potřebné pro zahrnutí obvodů Super I/O do výuky a jsou nutné pro dosahování vytýčených výukových cílů. V oblasti materiálních (technických - didaktických) prostředků je nutno zajistit:

- datasheety k obvodům Super I/O (doporučeno ITE nebo Winbond),
- počítače se základními deskami osazenými obvody Super I/O s HW monitoringem, ke kterým jsou k dispozici využitelné a srozumitelné datasheety,
- programovací jazyk a k němu didakticky vhodné vývojové prostředí.

Nemateriální (v tomto pojetí vědomostní) prostředky se týkají základních vědomostí žáků z oblasti informačních technologií, se kterými budou do výuky vstupovat. Jedná se zejména o:

- pochopení manipulace s hodnotami v binární a hexadecimální soustavě,
- povědomí o polovodičových pamětech či logických obvodech pro realizaci registrů, převodních signálů, operačních zesilovačích, tranzistorech,
- orientaci v činnosti obvodů čipové sady na základní desce IBM PC kompatibilní,
- porozumění principům programování v některém jazyce umožňujícím přístup k HW.

6. Zhodnocení

Príspevek upozornil na možnost didaktického využití problematiky obvodů Super I/O ve výuce odborných předmětů na středních školách, zvláště pak na eventuální mezipředmětovou provázanost v oblastech hardware a programování dle RVP Informační technologie. Poskytl výčet implementovaných logických celků i dílčích funkcí obvodu vhodných k prostudování vyučujícími hardware/programování a následnému „předání“ žákům. V grafické podobě uvedl možné příklady řešení některých nastíněných oblastí jako motivaci pro zájemce o problematiku. Dovolil si předložit seznam potřebných prerekvizit pro zahrnutí problematiky do výuky na SŠ dle ŠVP spadajících do RVP Informační technologie.

Literatura

- [1] FORMÁNEK, David. Konzumní strategie masírují společnost tak, aby samostatně uvažovala co nejméně. *Britské listy* [online]. 2005 [cit. 2009-02-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.blisty.cz/art/24865.html>>. ISSN 1213-1792.
- [2] Učitelé se obávají, že žáci ovládají počítače lépe než oni. *Novinky.cz*. [online]. 2008 [cit. 2009-02-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.novinky.cz/kariera/133530-ucitele-se-obavaji-ze-zaci-ovladaji-pocitace-lepe-nez-oni.html>>.
- [3] NEUMAJER, Ondřej. *Starosti učitele informatiky*. [online]. 2003 [cit. 2009-02-06]. Dostupný z WWW: <<http://ondrej.neumajer.cz/?item=starosti-ucitele-informatiky>>.
- [4] GURBIEL, Ewa, KRUPICKA, Helena. Od základů informatiky k informačním technologiím. *Metodický portál RVP* [online]. 2008 [cit. 2009-02-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.rvp.cz/clanek/2681>>. ISSN 1802-4785.
- [5] ZOUNEK, Jiří, ŠEĎOVÁ, Klára. Jak pracují dnešní učitelé s ICT? *Učitelské listy* [online]. 2008 [cit. 2009-02-07]. Dostupný z WWW: <<http://ucitelske-listy.ceskaskola.cz/Ucitelskelisty/AR.asp?ARI=103437&CAI=2151>>. ISSN 1210-6313.

- [6] MŠMT. *Rámcový vzdělávací program : Informační technologie* [online]. 2008. [cit. 2009-02-07]. Dostupný z WWW: <<http://zpd.nuov.cz/RVP/ML/RVP%201820M01%20Informacni%20technologie.pdf>>.
- [7] MESSMER, Hans-Peter, DEMBOWSKI, Klaus. *Velká kniha hardware*. Computer press, 1. vyd. 2005. 1224 s. ISBN 80-251-0416-8.
- [8] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie : Super I/O* [online]. c2009. [cit. 2009-02-08]. En. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Super_I/O>.
- [9] *Plasma online* [online]. 2003 [cit. 2009-02-08]. En. Dostupný z WWW: <<http://www.plasma-online.de>>.
- [10] MAREK, Rudolf. *Hardware monitoring našeho PC* [online]. 2005. [cit. 2009-02-09]. Dostupný z WWW: <<http://assembler.cz/conference/ow2k5/ow2005slajdy.pdf>>
- [11] MAREŠ, Petr. Super IO čipy - něco málo z teorie. *Svět hardware* [online]. 2006 [cit. 2009-02-10]. Dostupný z WWW: <http://www.svethardware.cz/art_docB9F2C0E23681BC0EC12571B1004FF8F5.html>. ISSN 1213-0818.
- [12] *Datasheet W83781D : Winbond H/W Monitoring IC* [online]. Firma Winbond, 1997. [cit. 2009-02-10]. En. Dostupný z WWW: <<ftp://ftp.botik.ru/pub/hardware/winbond/w83781d.pdf>>
- [13] *BIOS upgrades : Super I/O Chip Examples* [online]. [cit. 2009-02-12]. En. Dostupný z WWW: <<http://www.esupport.com/techsupport/award/superio.php>>.
- [14] *Datasheet W83627THF : WINBOND LPC I/O* [online]. Firma Winbond, 2003. [cit. 2009-02-13]. En. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/d/0jzdekookhph1oila7iza9249fy.pdf>>.
- [15] *Datasheet W83627UHG : WINBOND LPC I/O* [online]. Firma Winbond, 2007. [cit. 2009-02-13]. En. Dostupný z WWW: <<http://www.nuvoton.com/NR/rdonlyres/DAFCC54E-FB8B-4B3F-A8F6-D3F1919B265/0/W83627UHG.pdf>>.
- [16] ZEMAN, Martin. Teplotní čidlo pro základní desku. *PCtuning.cz* [online]. 2003 [cit. 2009-02-13]. Dostupný z WWW: <http://pctuning.tyden.cz/index.php?option=com_content&task=view&id=3652&Itemid=0&limit=1&limitstart=1>. ISSN 1214-0201.

* - Obsah obrázků č. 6, 7, 8 byl vytvořen s použitím vývojového prostředí wxDEV-C++.

Tranzistorový zvuk a počítačové simulace příčin jeho vzniku

Bohumil Federmann

Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610
756 61 Rožnov pod Radhoštěm

bohumil.federmann@roznovskastredni.cz, federmann@seznam.cz

Abstrakt:

Účelem příspěvku je poukázat na mnohé, doposud nevyřešené, či často přehlížené problémy v oblasti zpracování zvuku a možnosti jejich řešení za pomoci moderních výpočetních prostředků a počítačové simulace. Příspěvek vychází z vědecké studie vlastností vnímání zvuku, které byly zadokumentovány v souvislosti s vývojem digitálních standardů „super audio compact disk“ (SACD) a „digital versatile disk audio“ (DVD-audio). Dále je v příspěvku zúročena autorova mnohaletá osobní praxe, popsána dynamická saturace diferenciálního stupně s odpovědí na příčiny vzniku „Tranzistorového zvuku“, které nebyly doposud nikým publikovány.

1. Úvod

Odborníci i veřejnost si často kladou otázku, jak je to s infrazvukem a ultrazvukem. Panuje převážně názor, že obě oblasti nás nemusejí zajímat, neboť slyšíme pouze zvuk, který je v akustickém pásmu. Mnozí se pak podivují, že živý koncert skýtá naprosto jedinečný zážitek, kdežto jeho záznam je poněkud ochuzen.

Celá problematika sahá do samotných počátků přenosu, reprodukce a záznamu zvuku. První přístroje byly postaveny na bázi elektronek, později se přidaly první tranzistory, které vedly k integraci a vznikly první integrované části přístrojů. Dlouhou dobu se jednalo o přístroje analogové, které postupně začaly doplňovat a později vytlačet přístroje digitální. Dnes máme signál i přístroje analogové i digitální.

Na problematiku šířky pásma mají jednoznačný názor převážně výrobci zesilovačů, kteří se omezili na akustické pásmo a vše ostatní popírají, stejně jak "Tranzistorový zvuk", který vzniká převážně v oblasti nad akustickým pásmem. Jakékoliv rozšíření přenášeného pásma by výrobcům zesilovačů nabouralo zažitě zvyklosti a mohlo přivodit mnohé komplikace, proto je často fakta nezajímají. Výrobci elektronických zesilovačů naopak zastávají názor, že právě ty jejich zesilovače jsou ty lepší, s tvrzením, že měření zkreslení není tím pravým obrazem kvality zesilovačů.

Jinak je tomu u Hi-Fistů, hudebníků a odborníků z oblasti věd lékařských, kteří nejenom slyší a vnímají odlišnosti akustického vjemu při přítomnosti infrazvuku a ultrazvuku, ale jsou schopni jeho vliv změřit a zadokumentovat. Zde byly při vývoji SACD a DVD-audia provedeny rozsáhlé studie pod vedením T. Ooahashiho.

V německém Deutsches Institut für Normung (DIN) v roce 1973 vytvořili celosvětový standard, normu DIN 45500 pro Hi-Fi, která nikterak nepostihovala "Tranzistorový zvuk", nebyly metody, jak jej měřit, byli jen zarytí Hi-Fisti, kterým tento zvuk vadil a dodnes vadí. Vznikla řada měřících metod s možností měřit zkreslení, ale žádná metoda nedokázala sjednotit poslechové hodnocení s měřením elektronickými přístroji. Někdy při poslechu nevadí zkreslení jednotky procent a jindy je lidské ucho citlivé k setinám procent. Obecně lze říci, že

ucho bývá citlivější na zkreslení vzniklé v polovodičových zesilovačích se silnou zápornou zpětnou vazbou.

Abych objasnil samotné příčiny vzniku zkreslení, zabývám se v příspěvku chováním diferenciálního stupně v zesilovači se silnou zápornou zpětnou vazbou, jehož vlastnosti lze názorně simulovat pomocí moderních simulačních programů. Pochopení samotné podstaty vzniku nežádoucího zkreslení může pomoci lépe posoudit vlastnosti zesilovače stejně jako vhodně řešit jeho topologii.

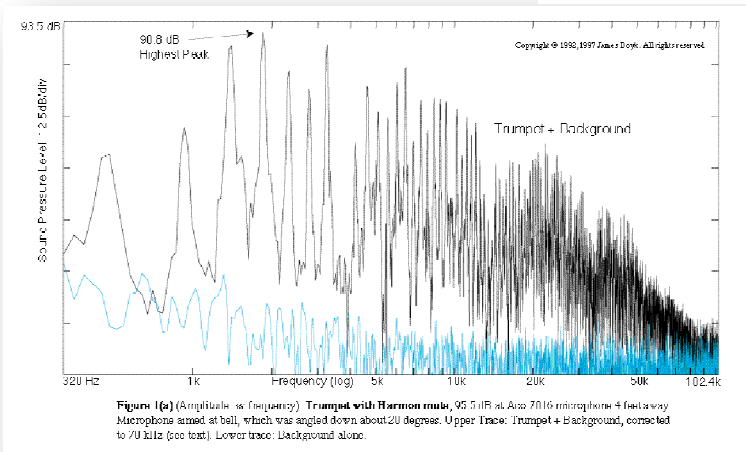
Hudební profesor James Boyk

Hudební profesor James Boyk se dlouhodobě zabýval vyššími harmonickými. Přes omezení na 102,4kHz,

Instruments With Harmonics				
Fig.	Instrument	SPL (dB)	Harmonics Visible To What Freq.?	Percentage of Power Above 20 kHz
1.	Trumpet (Harmon mute)	96.	>50 kHz	0.5
2.	Trumpet (Harmon mute)	76.	>80 "	2.
3.	Trumpet (straight mute)	83.	>85 "	0.7
4.	French horn (bell up)	113.	>90 "	0.03
5.	French horn (mute)	99.	>65 "	0.05
6.	French horn	105.	>55 "	0.1
7.	Violin (double-stop)	87.	>50 "	0.04
8.	Violin (sul ponticello)	77.	>35 "	0.02
9.	Oboe	84.	>40 "	0.01

Instruments Without Harmonics				
Fig.	Instrument	SPL (dB)	10 dB Above Bkgnd. to What Freq.?	Percentage of Power Above 20 kHz
10.	Speech Sibilant	72.	>40 kHz	1.7
11.	Clavos	104.	>102 "	3.8
12.	Rimshot	73.	>90 "	6.
13.	Crash Cymbal	100.	>102 "	40.
14.	Triangle	96.	>90 "	1.
15.	Keys jangling	71.	>60 "	68.
16.	Piano	111.	>70 "	0.02

Obr. 1 Naměřené hodnoty frekvenčního rozsahu některých hudebních nástrojů



Obr 2 Naměřené frekvenční spektrum u trumpety při základním tónu 465,4Hz

kteřé bylo zapříčiněno sahem použitých přístrojů, jeho měření dokladují, že v každé skupině hudebních nástrojů je alespoň jeden, který svým frekvenčním rozsahem přesahuje hranici 102,4kHz.

U některých nástrojů je výkon nad akustickým pásmem až neskutečný. Největší podíl měly činily se svými 40% či Key jangling (cinkání klíči) se svými 68%.

Akustický signál a jeho záznam

Analogový záznam

Analogový signál se v počátcích nikterak výrazně při záznamu neupravoval. Na vinylové desky se zaznamenávalo, kolik dovolil záznamový materiál a záznamové zařízení. Pro magnetický záznam byl rozhodujícím faktorem vysokofrekvenční předmagnetizační kmitočet, v obou

případech se zaznamenávaly kmitočty daleko nad 20kHz. Některé prameny uvádí, že záznam mohl sahat daleko přes 100kHz.

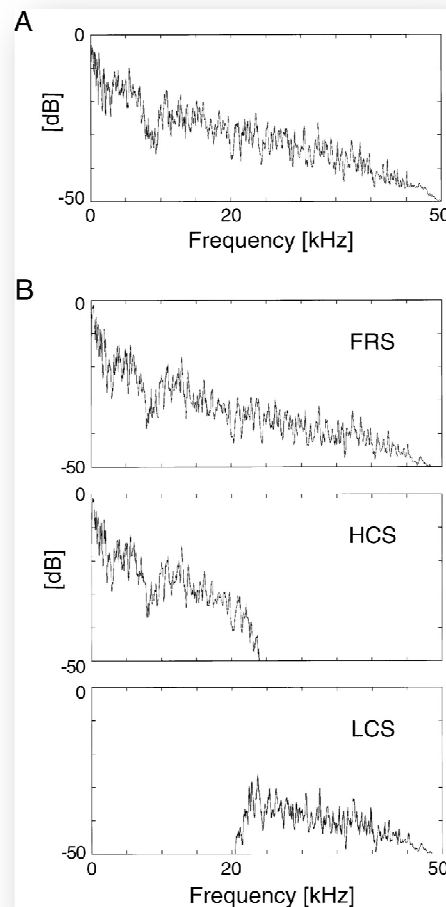
Digitální záznam

Digitální záznam byl prováděn nejčastěji 44kHz a 16bit převodníkem. 16bit záznam umožnil zaznamenat větší dynamiku signálu řádově 90dB oproti cca 60dB, jak tomu bylo u analogových záznamů, ale frekvenční rozsah byl striktně omezen do cca 20kHz!

Omezením frekvenčního pásma na 20kHz byla dočasně vyřešena problematika zpracování signálu nad 20kHz.

T. Ooahashiho, vývoj SACD a DVD-audio

Japonský tým T. Ooahashiho, složený z deseti japonských univerzit a výzkumných ústavů (Oohashi, Tsutomu, Emi Nishina, Manabu Honda, Yoshiharu Yonekura, Yoshitaka Fuwamoto, Norie Kawai, Tadao Maekawa, Satoshi Nakamura, Hidenao Fukuyama a Hiroshi Shibasaki), pracoval na vývoji nových digitálních standardů "super audio compact disk" (SACD) a "digital versatile disk audio (DVD-audio), přičemž zkoumal vliv vyšších harmonických na lidské smysly,

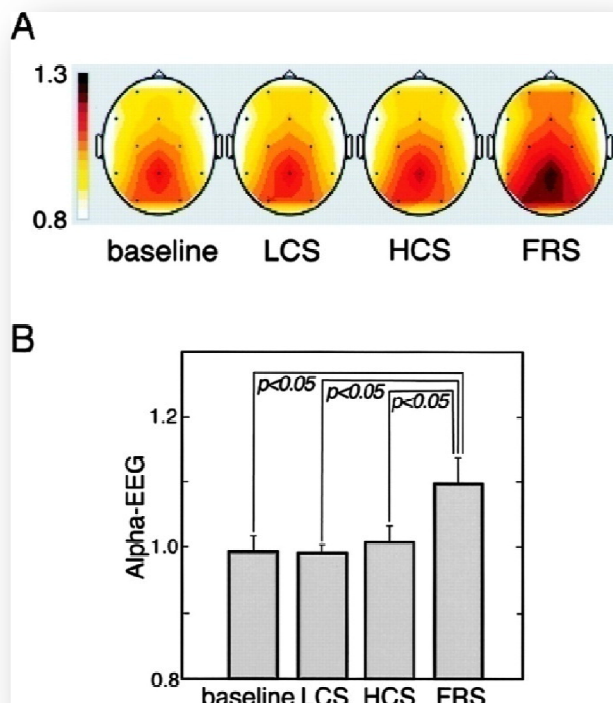


Obr. 3 Rozdělení frekvenčního pásma

následně neurologové publikovali výsledky v Journal of Neurophysiology a na konferenci AES v roce 2000.

Zpráva říká, že hudební signál (FRS), kterým byla hudba z ostrova Bali, neboť právě ta má značný podíl vyšších harmonických, byl rozdělen na dvě pásma, do 20kHz (LFC) a nad 20kHz (HFC). Nikdo z posluchačů nebyl schopen samostatně rozpoznat signály nad 20kHz.

Byla zkoumána mozková aktivita na takto rozdělený signál. Výsledek jednoznačně prokázal, že pokud působí na lidské smysly samostatně pásmo nad 20kHz, mozek jej nechává bez povšimnutí, pokud působí samostatně pásmo do 20kHz EEG, vykazuje jisté elektrické aktivity, které se velmi výrazně zvýší při působení obou frekvenčních pásem.



Obr. 4 EEG, měření mozkové aktivity na jednotlivá pásma

Psychologická měření zcela jednoznačně prokázala, že zvuk obsahující obě pásma vyvolává u posluchačů příjemnější pocity než stejný zvuk bez horního pásma.

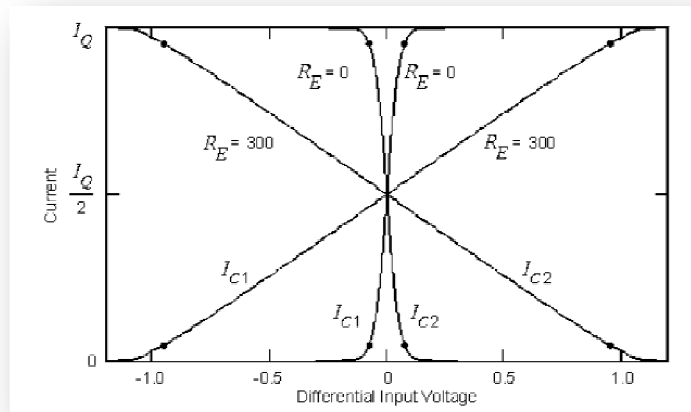
Vlastnosti SACD a DVD-audio

Výzkum provedený Japonským týmem T. Ooahashiho vedl k novému standardu SACD a DVD-audio, jejichž frekvenční rozsah sahá do 100kHz. Převod je prováděn 24bit převodníkem. Dynamický rozsah se tak zvýšil na cca 140dB. Frekvenční rozsah však vrátil část problémů se zpracováním signálu nad 20kHz a audio zesilovače by měly běžně, bez zdatelného zkreslení přenést pásmo sahající nad 100kHz.

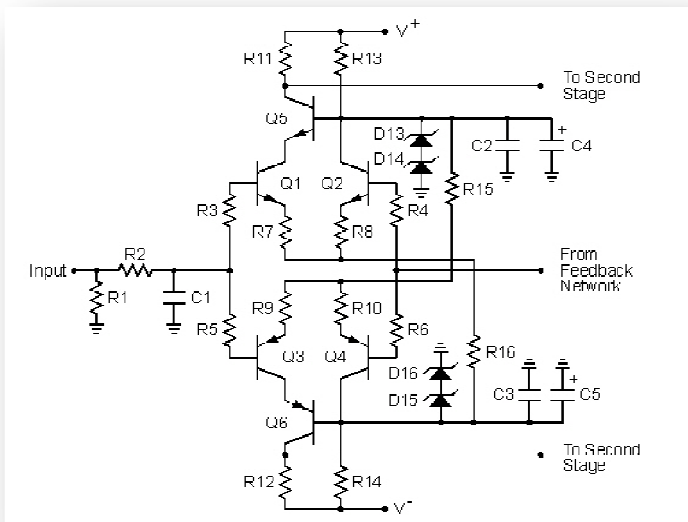
Walter Jung: OP Amp Audio

Již Walter Jung a mnozí další se zabývali řešením problematiky zesilovačů se silnou zpětnou vazbou. Jejich pozornost byla soustředěna na vstupní diferenciální zesilovač a na jeho dynamickou saturaci.

Odvodili velikost vstupního diferenciálního napětí, kdy dochází k dynamické saturaci vstupní diferenciální dvojice tranzistorů.



Obr. 5 Hodnoty vstupního diferenciálního napětí, při proudu 1mA $U_{dir}=57mV$ stanoveno jako limitace



Obr. 6 Topologie W. Marshalla Leacha s emitorovými degeneračními odpory

Topologie W. Marshalla Leacha

W. Marshall Leach se věnoval zesilovačům s nízkým zkreslením TIM (transient intermodulation distortion).

K dosažení šířky pásma alespoň 400kHz používal tranzistory s $F_T=8,5MHz$, vstupním R-C filtrem upravoval rychlost přeběhu na cca 60V/s a celková šířka pásma byla větší jak 220kHz.

W. Marshall Leach však nikdy nikomu nedoporučoval, aby měřil zesilovač při frekvencích nad 20kHz při plném výkonu.

Koncové tranzistory jsou tepelně velmi namáhané a mohlo by dojít k jejich zničení.

Vymezení rozsahu simulací

Pro účely příspěvku jsem simulaci omezil na pásmo od řádu jednotek Hz až do řádů stovek kHz. Nezabýval jsem se jednotlivými druhy zkreslení, jako jsou TIM (transient intermodulation distortion), SID (slew induced distortion) ani DIM (dynamic intermodulation distortion), stejně tak limitací, přechodovým zkreslením a pro koncové tranzistory nebezpečnými příčnými proudy.

Omezil jsem se pouze na zkoumání poměrů vstupního diferenciálního zesilovače, které dostatečně popíší následující simulace:

1. frekvenční závislosti zesílení A_u dané topologie.
2. závislost kolektorových proudů na U_{dif} .
3. závislost proudového zesílení na U_{dif} .
4. linearita v závislosti na velikosti U_{dif} .

Frekvenční závislosti zesílení A_u

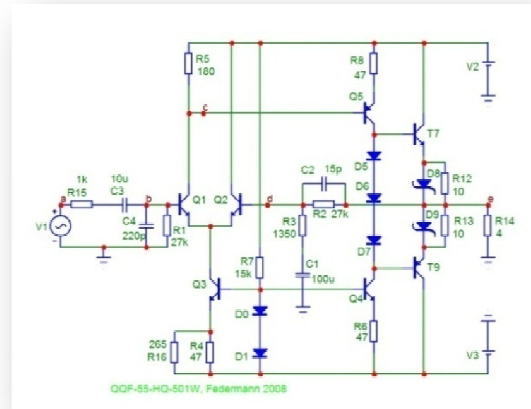
Různé topologie tranzistorových zesilovačů včetně integrovaných mají různé charakteristiky závislosti A_u na frekvenci, pro všechny však nad jistou mez platí pokles zesílení s rostoucí frekvencí.

Budeme vycházet z maximálního výstupního napětí, například $U_{ef}=20V$, pak $U_{\xi}=28V$, dle obr. 8

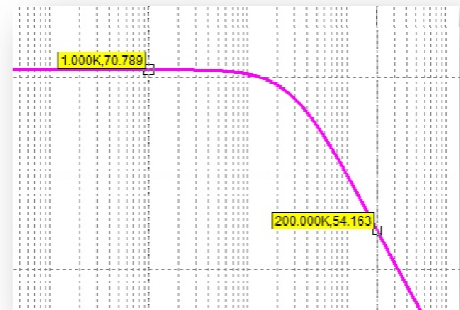
při zesílení cca 70dB na 1kHz. Tomuto odpovídá $U_{dif}=10mV$. Při frekvenci 200kHz však zesílení pokleslo na 54dB a pro dosažení stejného výstupního napětí $U_{\xi}=28V$ je již zapotřebí $U_{dif}=56mV$. Samozřejmě pro odlišné zapojení platí odlišné hodnoty.

Závislost kolektorových proudů na U_{dif}

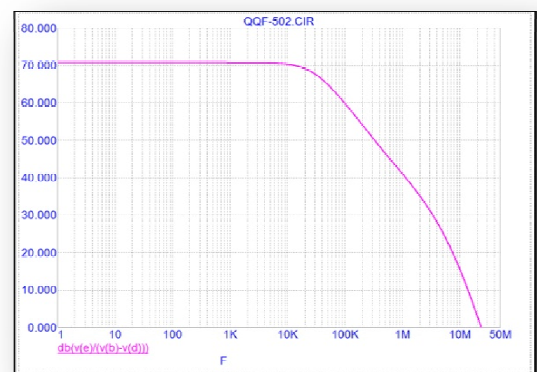
Chování vstupního diferenciálního zesilovače znázorněného na obr. 10 popisuje dostatečně obr. 11, kde je znázorněna závislost kolektorových proudů na U_{dif} a jejich první derivace, jež vyjadřují závislost proudového zesílení na U_{dif} .



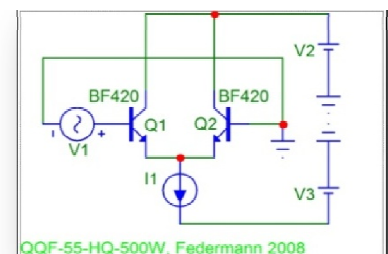
Obr. 7 Příklad zapojení zesilovače



Obr. 8 Detail poklesu zesílení



Obr. 9 Závislost zesílení A_u na frekvenci



Obr. 10 Zapojení

Závislost proudového zesílení vstupních tranzistorů na U_{dif}

Na obr. 11 stejně jako na obr. 5 je patrná závislost kolektorových proudů na U_{dif} .

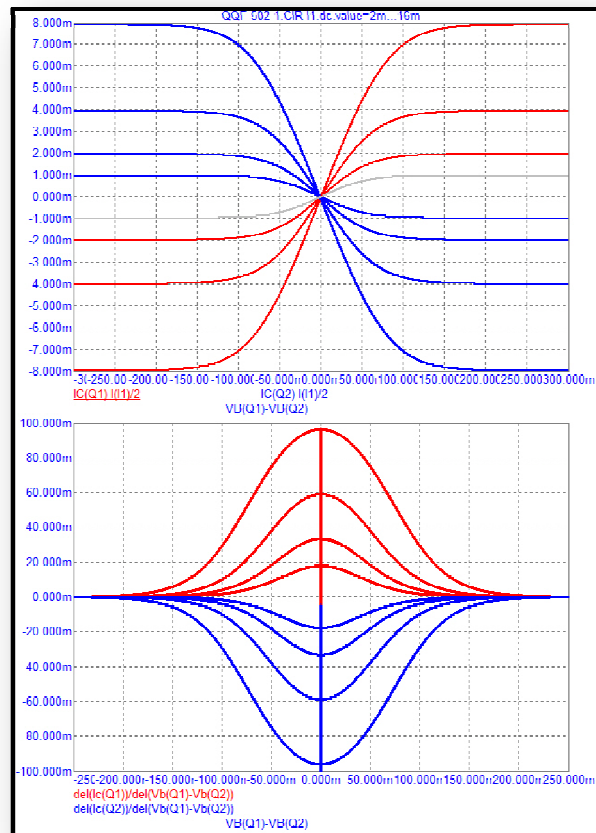
Walter Jung a W. Marshall Leach považovali za saturaci vstupních tranzistorů, jimiž teče proud 1mA, napětí $U_{dif}=57mV$.

Na grafech je patrné, že s rostoucím proudem se hranice pro saturaci zvyšuje. První derivace prozrazuje závislost proudového zesílení i jeho pokles v závislosti na velikosti U_{dif} .

Dynamická saturace

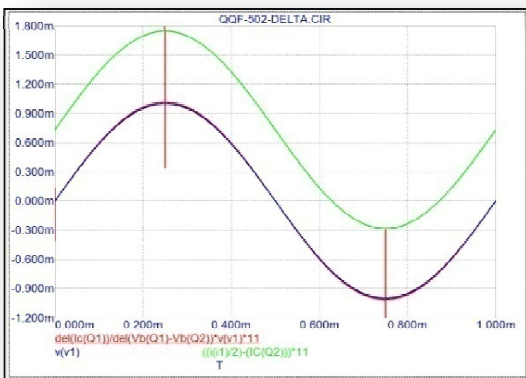
Vycházíme z akustického signálu, jehož amplituda i frekvence jsou trvale proměnné, obě hodnoty mohou nezávisle na sobě dosahovat maxima.

V případě nejvyšších frekvencí s velkou amplitudou nastane stav, že zesilovač má při dané frekvenci bez zpětné vazby malé zesílení a pro dosažení požadovaného napětí na výstupu potřebuje velké U_{dif} . V našem případě vyšlo při frekvenci 200kHz a výstupním napětí $U_s=28V$ $U_{dif}=56mV$.



Obr. 11 Závislost proudového zesílení na U_{dif}

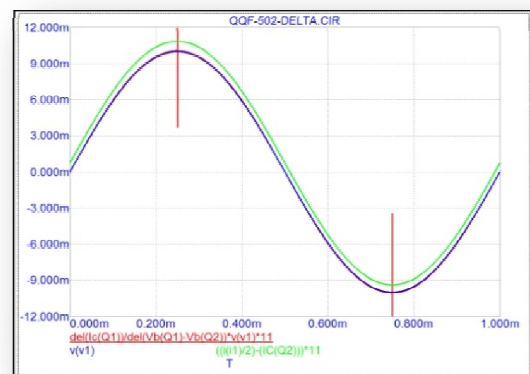
Jak vyplývá z následujících grafů, můžeme v tomto případě již mluvit o zkreslení, způsobeném saturací obou vstupních tranzistorů.



Obr. 12 Závislost výstupního proudu na $U_{dif}=1mV$

Saturaci můžeme nazvat "Dynamickou saturací", neboť trvá pouze po čas rychlé napěťové změny akustického signálu, která obsahuje vysoké harmonické.

V praxi jsou většinou vyšší harmonické s menší amplitudou, kterou můžeme při výpočtu a simulaci přiměřeně zohlednit.



Obr. 13 Závislost výstupního proudu na $U_{dif}=10mV$

Stanovení počátku dynamické saturace

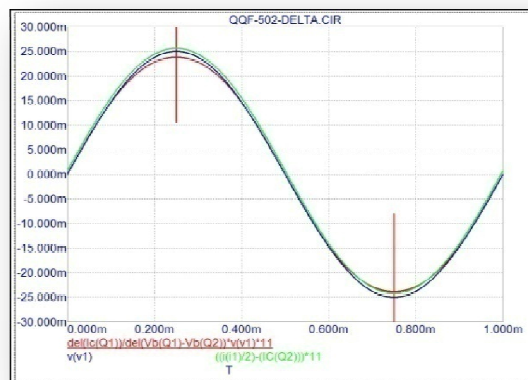
Jak je patrné z obr. 12 a 13, do $U_{dif}=10\text{mV}$ nedochází k viditelné změně tvaru signálu. Na obr. 14 můžeme vidět $U_{dif}=25\text{mV}$ a již počátek dynamické saturace. Pro náš případ je zesílení při 100kHz rovno cca 60dB a tomu odpovídá $U_{dif}=28\text{mV}$.

Se zvyšováním U_{dif} nad hodnotu 20mV až 30mV při proudu obou tranzistoru po cca 7,5mA již dochází ke změně tvaru výstupního signálu. Při použití menších kolektorových proudů se tato hranice úměrně sníží a naopak.

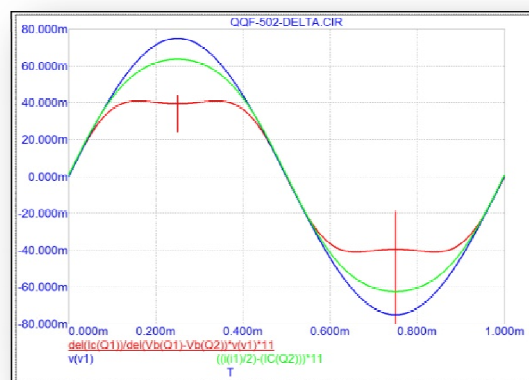
Pro názornost a lepší vyjádření poměrů na vstupní diferenciální dvojici tranzistorů jsem v grafech použil:

- Modře - vstupní napětí: Hodnota= U_{dif}
- Zeleně - vyjádření kolektorového proudu tranzistoru: Hodnota= I_1-I_{C2} , hodnota je dále upravena vynásobením *11 tak, aby byla vyjádřitelná ve společném grafu. Je zatížena chybou I_B , která je největší v obr. 12. Na obr. 13 je ještě patrná, ale pro demonstrativní účely poměrů diferenciálního stupně nehraje roli.
- Červeně - zvýraznění tvarového zkreslení, které vzniká při dynamické saturaci. Obdobně, jako se ve statistice počítá kvadratická či střední kvadratická odchylka, jsem použil pro účely přesnějšího stanovení počátku a průběhu Dynamické saturace výraz:

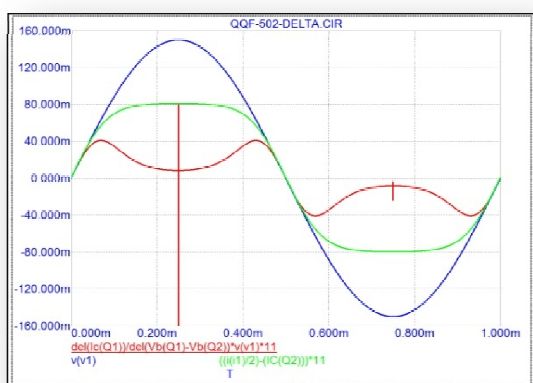
Hodnota= $\frac{\int (v(t)-\bar{v})^2 dt}{\int v(t)^2 dt}$, hodnota je rovněž upravena tak, aby byla vyjádřitelná ve společném grafu, vynásobením *11.



Obr. 14 Závislost výstupního proudu na $U_{dif}=25\text{mV}$



Obr. 15 Závislost výstupního proudu na $U_{dif}=75\text{mV}$



Obr. 16 Závislost výstupního proudu na $U_{dif}=150\text{mV}$

Nárůst zkreslení a počtu lichých harmonických

Zvyšováním U_{dif} nad hranici cca 40mV, velmi rychle dochází ke ztrátě zesílení, u $U_{dif}=75\text{mV}$ již můžeme pozorovat rychlý nárůst třetí harmonické, čímž získáváme jasnou odpověď na hodnocení tranzistorových zesilovačů hudebníky, že kvinta - třetí harmonická - je u těchto zesilovačů dominantní!

Závěr

Závěrem bych provedl stručné shrnutí.

- ✚ Bez simulačních programů se dnes v elektrotechnice neobejdeme, napomáhají nám nejenom simulovat chování elektrických obvodů, ale i lépe porozumět jejich funkci. Je vhodné pracovat s programy, které jsou "SPICEcompatible", aby byly výsledky vzájemně srovnatelné.
- ✚ Věda a lidské poznání jde dnes za pomoci výpočetní techniky mílovými kroky kupředu, stále však zůstává a vždy bude zůstávat řada zdánlivě jednoduchých nevyřešených problémů.
- ✚ Jeden z nevyřešených či nezodpovězených problémů byl i "Tranzistorový zvuk". Sice jsem se omezil pouze na chování diferenciálního stupně, který nejčastěji stojí na vstupu ať již klasického zesilovače, či operačního zesilovače. Právě diferenciální stupeň je pro chování zesilovače se silnou zpětnou vazbou ten rozhodující.
- ✚ Účelem příspěvku nebylo dát definitivní odpověď na danou problematiku, ale ukázat jednu z možných cest, jak zkoumat dané děje, jak se co nejvíce přiblížit dané problematice, porozumět více konkrétnímu zapojení a následně zúročit takto získané poznatky při své další práci.
- ✚ Tímto příspěvkem jsem odpověděl rovněž sám sobě po velmi dlouhé době na otázku chování tranzistorových zesilovačů, na vznik zkreslení, které není jednoduše měřitelné. Tento druh zkreslení se dá považovat za neperiodický a náhodný, na takové rušení je lidský sluch mnohem citlivější, než na zkreslení, které má trvalý a periodický charakter.

Literatura

- [1] James Boyk: *There's Life Above 20 Kilohertz! A Survey of Musical Instrument Spectra to 102.4 KHz* <http://www.cco.caltech.edu/~boyk/spectra/spectra.htm>
- [2] The Journal of Neurophysiology Vol. 83 No. 6 June 2000, pp. 3548-3558 <http://jn.physiology.org/cgi/content/full/83/6/3548>
- [3] *Inaudible High-Frequency Sounds Affect Brain Activity: Hypersonic Effect* <http://www.arraytherapeutic.com/library/articles/JN83-6-3548.pdf>
- [4] Walter Jung: OP Amp Audio, Realizing High Performance: Bandwidth Limitations http://waltjung.org/PDFs/WTnT_Op_Amp_Audio_3.pdf
- [5] W. Marshall Leach: The Cascode Diff-Amp Input Stage <http://users.ece.gatech.edu/~mleach/lowtim/instage.html>
- [6] CVIČENÍ V MICRO-CAPU http://www.roznovskastredni.cz/biolek/dwnl/Pracovni_sesit_MC9demo.pdf
- [7] Micro-Cap <http://www.spectrum-soft.com/demo.shtm>
- [8] Bohumil Federmann: Hi-Fi svět - ISSN 1803-733X <http://www.federmann.cz>

Inteligentní snímače

Petr Beneš

Vysoké učení technické v Brně, FEKT, Ústav automatizace a měřicí techniky,
Kolejní 4, 612 00 Brno,
benesp@feec.vutbr.cz

Abstrakt:

Příspěvek se věnuje problematice inteligentních snímačů. Uvádí používanou terminologii a vysvětluje pojem inteligentní snímač. Podrobněji se věnuje požadavkům kladeným na inteligentní snímače a rozebírá možnosti, jak daným požadavkům vyhovět. Jsou uvedeny typické příklady metod linearizace, kalibrace, autodiagnostiky, metody zvyšování spolehlivosti měřených dat, způsoby komunikace s nadřazeným systémem a pozornost je rovněž věnována aktuálnímu stavu standardizace v oblasti inteligentních snímačů.

1. Úvod

V dnešní době je možné se setkat s termínem „inteligentní“ v mnoha různých souvislostech. V prodeji jsou „inteligentní“ pračky, ledničky, telefony, auta, materiály a samozřejmě i snímače. Jedná se však spíše o obchodní trik než o skutečnou „inteligenci“ jak jí rozumí lidé pracující v oblasti vývoje zařízení s umělou inteligencí. Obávám se, že klasickým Turingovým testem (zařízení reaguje na podněty lidského partnera takovým způsobem, že člověk není schopen rozeznat, že se jedná o stroj) by žádné z uvedených zařízení neprošlo. Je proto na místě definovat, co se obvykle pod pojmy inteligentní snímač či Smart sensor rozumí.

Vzájemný vztah a význam pojmů jako čidlo, snímač, sensor, převodník, detektor, inteligentní snímač či jejich originálních anglických verzí je zejména ve firemní literatuře a na internetu značně nejednotný. V recenzovaných a knižních publikacích se ale v poslední době ustálilo následující názvosloví:

- Čidlo (*Transducer*) – citlivá část snímače, převádí sledovanou fyzikální veličinu na jinou, nejčastěji elektrickou fyzikální veličinu
- Snímač (*Sensor*), v české literatuře též označován jako sensor, převodník, detektor – nejobecnější pojem, funkční prvek tvořící vstupní část měřicího řetězce, obvykle v kompaktním provedení, výstupem je obvykle unifikovaný elektrický signál
- Polovodičový snímač (*Semiconductor Sensor*) – snímač využívající k převodu sledované veličiny fyzikální jevy v polovodiči
- MEMS – mikroelektromechanický systém, nejčastěji vyrobený povrchovým nebo objemovým mikroobráběním, snímače i akční členy
- Smart sensor – obvykle polovodičové nebo MEMS snímače, které mají současně na stejném substrátu integrovány základní elektronické obvody pro zpracování signálu
- Inteligentní snímač (*Intelligent sensor*) – snímač doplněný o základní prvky „inteligence“, viz. dále uvedená definice a požadavky

Pojem inteligentní snímač definovali jako první v roce 1978 Beckenbridge a Husson následujícím způsobem:

Inteligentní snímač obsahuje funkce pro zpracování měřených dat, automatickou korekci měřených dat, dokáže automaticky detekovat a eliminovat abnormální a nesprávné hodnoty. Obsahuje také sadu algoritmů, které umožňují reagovat na změnu vnějších podmínek.

Dnes patří mezi základní požadavky kladené na inteligentní snímače zejména programovatelné zesílení, linearizace, filtrace a normalizace měřeného signálu, možnost automatické korekce vlivu parazitních veličin, pokročilé metody potlačení šumu a verifikace platnosti naměřených dat, autokalibrace a autodiagnostika, statistické funkce, hlídání mezí a v neposlední řadě možnost přímého zapojení snímače do distribuovaných systémů pomocí vhodné digitální komunikační sběrnice.

V následujících kapitolách budou uvedeny základní způsoby, jak obyčejné snímače doplnit o prvky „inteligence“ ve smyslu předchozí kapitoly. V praxi se obvykle jedná o polovodičové snímače, ale samozřejmě existují i „klasické“ velké snímače, které lze v duchu předchozích definic považovat za inteligentní. V dalším textu se proto podíváme podrobněji na jednotlivé požadavky kladené na inteligentní snímače a možnosti, jak daným požadavkům vyhovět.

2. Úprava signálu, linearizace a kalibrace

Základní úprava signálu je spojena se vstupní částí snímače, kde dochází ke konverzi měřené fyzikální, chemické nebo biologické veličiny na elektrickou. Už z principu funkce samotného čidla tak dochází hned na vstupu k obecně nelineární filtraci vstupního signálu. Navazující elektronika má pak za úkol především signál normalizovat, tj. vhodně zesílit, korigovat případnou nelinearitu čidla a omezit měřený frekvenční rozsah s ohledem na parametry zdroje signálu.

Potlačení chyb měřicího kanálu vznikajících při výrobě snímačů v důsledku rozptylu výrobních tolerancí se dosahuje kalibrací snímače. U inteligentních snímačů se se upouští od klasických metod kalibrace přímo ve výrobním procesu (např. laserové dostavování rezistorů u snímače tlaku) a využívá se některé z dále uvedených digitálních metod. Mezi hlavní chyby měřicího kanálu, které se kalibrací potlačují, patří offset, chyba zesílení, nelinearita, příčná citlivost, hystereze a drift.

K nejobtížnějším patří kompenzace driftu, tzn. kompenzace dlouhodobých pomalých změn základní převodní charakteristiky snímače. Využívá se především metod autokalibrace, příp. numerické korekce na základě predikce pomocí matematického modelu snímače, ale i tak se nevyhneme (jednou za několik let) rekalibraci snímače v akreditované laboratoři.

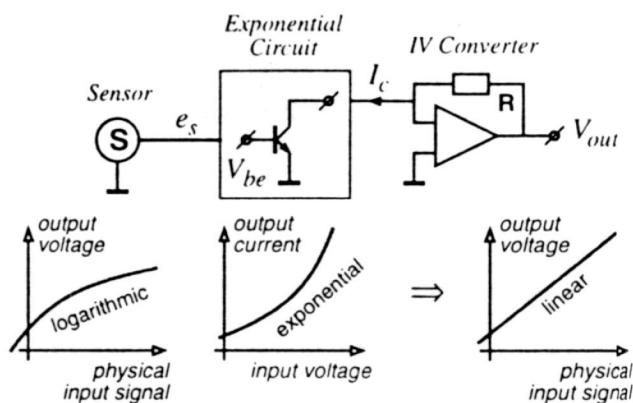
3. Základní metody linearizace

Některé typy snímačů vykazují nelineární charakteristiku, která přímo plyne z principu jejich funkce. Převodní charakteristika je velmi dobře definovaná a opakovatelná, jsou to např. termočlánky, odporové snímače teploty, průtokoměry založené na škrtících členech apod. Chybu linearity těchto snímačů je možné považovat za systematickou a lze poměrně snadno odstranit, obvykle současně s provedením kalibrace snímače.

Nelinearity mající náhodný charakter a projevující se u každého konkrétního snímače odlišně již je nutné linearizovat některou z obecnějších metod interpolačních nebo aproximačních.

3.1 Analogová linearizace

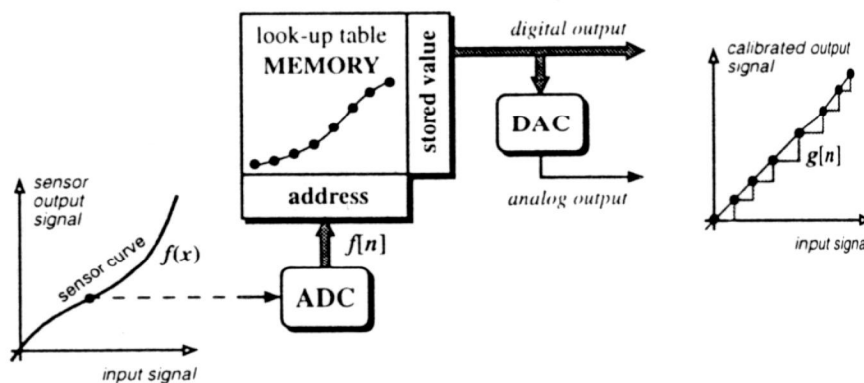
Jedná se o jednu z nejstarších metod, která je vhodná pouze k odstranění systematických chyb. Základní princip je zřejmý z obr. 1, kdy nelineární výstup ze snímače je přiveden na vstup jednotky s přesně inverzní charakteristikou. Nevýhodou je problematická dlouhodobá stabilita parametrů korekčního obvodu a jeho teplotní závislost, naopak výhodou jsou dobré dynamické parametry (mezní kmitočet, zpoždění).



Obr. 1 Příklad analogové linearizace snímače

3.2 Linearizace založená na korekční tabulce

Princip linearizace je velmi jednoduchý, kompletní inverzní charakteristika snímače je uložena v paměti mikroprocesoru. Digitální výstup AD převodníku představuje přímo adresu paměťového místa s korigovanou digitální hodnotou (viz. obr. 2).



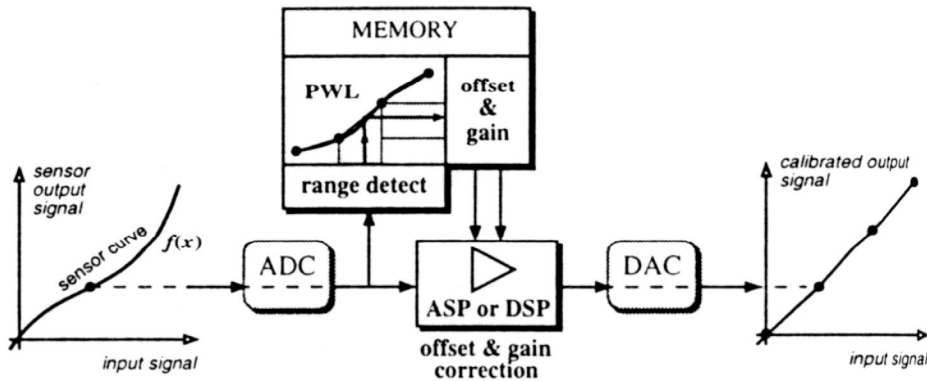
Obr. 2. Linearizace pomocí tabulky

K hlavním nevýhodám patří vysoké nároky na paměť a problémy při vytváření korekční tabulky vyplývající z nutnosti realizace pomalé a přesné změny vstupního neelektrického signálu. Výhodou je vysoká rychlost, jednoduchá implementace a možnost linearizace současně s kalibrací snímače.

3.3 Linearizace založená na úsekové lineární interpolaci a interpolaci polynomem nebo splinem

Základem je rozdělení charakteristiky na úseky, kde krajní body úseků odpovídají kalibrovaným bodům. Jednotlivé úseky jsou pak interpolovány přímkou, příp. kalibrované body proloženy po částech polynomem nebo splinem a příslušné koeficienty jsou uloženy v paměti. Pro každou měřenou hodnotu je pak vypočítán odpovídající korigovaný výstup. Výhodou jsou ve srovnání s tabulkovou metodou menší nároky na paměť pro uchování potřebných konstant,

omezený počet kalibračních bodů a relativně jednoduchý algoritmus korekčního mechanismu. Nevýhodou lineární interpolace je omezená přesnost linearizace, pro velmi nelineární průběhy je potřebný velký počet úseků a derivace výstupního signálu obsahuje diskontinuity. Interpolace polynomem většinu nevýhod odstraňuje za cenu významného zvýšení výpočetních nároků.



Obr. 3. Linearizace pomocí lineární interpolace

3.4 Linearizace založená na aproximaci křivky

Tento typ je digitální verzí analogového principu, je obzvláště vhodný pro potlačení systematických chyb. Výhodou je malý potřebný počet kalibračních bodů přenosové charakteristiky, nízké paměťové nároky na uchování koeficientů a jeden výpočetní vztah pro celý rozsah snímače. Nevýhodou jsou vysoké nároky na výpočetní výkon, kdy se již prakticky neobejdeme bez výpočtů v plovoucí řádové čárce.

3.5 Linearizace založená na minimalizaci chyb

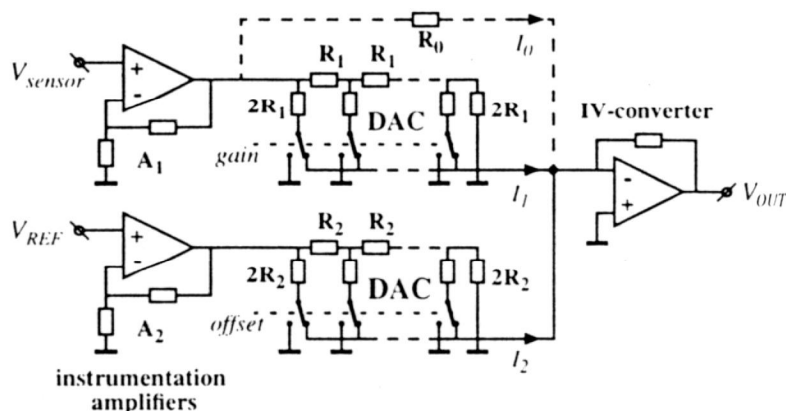
Tento způsob linearizace je využíván, pokud máme předběžnou představu o tvaru přenosové charakteristiky a současně máme k dispozici i dostatečný počet kalibračních bodů. Obvykle je používána metoda nejmenších čtverců a je minimalizována chybová funkce.

4. Základní metody kalibrace

Základní metody kalibrace je možno rozdělit podle místa implementace na kalibraci v analogové části, kalibraci při převodu na digitální signál a kalibraci v digitální části měřícího řetězce.

4.1 Kalibrace využívající úpravu analogového signálu

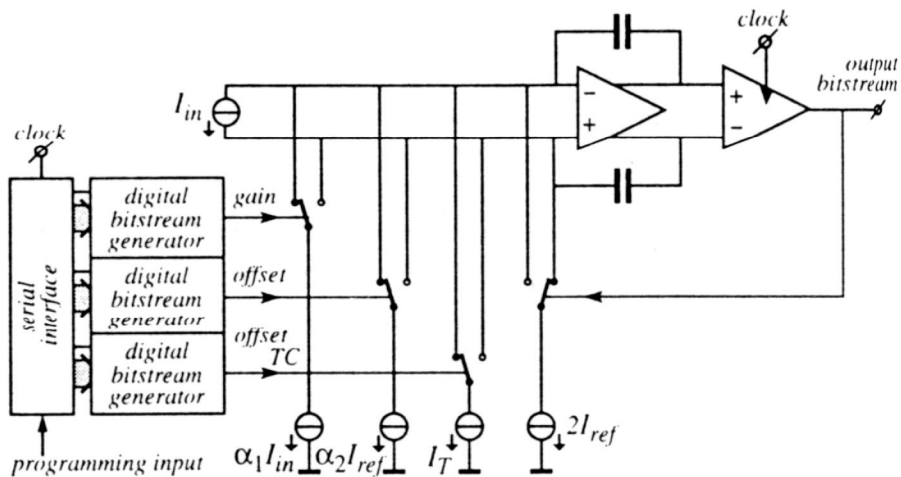
Prakticky všechny snímače obsahují analogové obvody sloužící k úpravě signálu z čidla. Obvykle zde najdeme zesilovače, filtry, kompenzační obvody apod. Nejjednodušším způsobem kalibrace je potom změna zesílení a offsetu pomocí proměnných elementů (laserem trimované rezistory, digitálně řízené rezistory, spínané kapacity...). V inteligentních snímačích jsou pak nejčastěji používány zesilovače s programovatelným zesílením a digitálně analogové převodníky pro korekci offsetu, zesílení a jejich teplotních závislostí. Konkrétní řešení využívá kalibraci s DA převodníkem řízeným pomocí signálu PWM, nebo s násobícím DA převodníkem (viz. Obr. 4). Další možností je využití proudových digitálně řízených děličů nebo programovatelných analogových polí. Hlavní výhodou analogových kalibračních metod je velká dosažitelná šířka pásma, nevýhodou pak dosažitelná přesnost odpovídající max. osmi až deseti bitům.



Obr. 4. Kalibrace využívající násobící DA převodník

4.2 Kalibrace využívající vlastností sigma-delta AD převodníků

Základní princip je velmi podobný principu, kdy je DA převodník buzen PWM signálem. I v případě kalibrace využívající vlastností sigma-delta AD převodníků je k měřenému signálu „přidáván“ pomocný signál se střední hodnotou rovnou požadované korekci. Ukázka typického systému s programovatelným ofsetem, zesilením a korekcí teplotních koeficientů je na obr. 5.



Obr. 5. Obvod kalibrace využívající vlastnosti sigma-delta převodníku

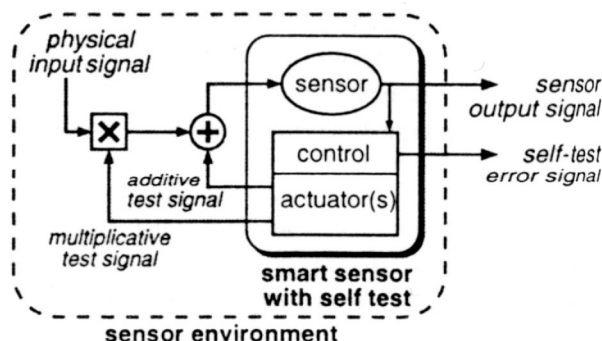
4.3 Kalibrace využívající digitální zpracování signálu

Tento nejmodernější způsob kalibrace je založen na kalibraci polynomem s postupně narůstajícím řádem. Hlavní výhodou je vysoká univerzálnost a snadná implementace i pro multidimenzionální závislosti zachycující např. vliv příčné citlivosti snímače nebo vliv parazitních veličin, nevýhodou pak vysoká výpočetní náročnost.

5. Autodiagnostika

Vnitřní blokové schéma možného řešení obvodu autokalibrace snímače je na obr. 6. Instalace jednoho nebo i několika akčních členů v bezprostřední blízkosti snímače umožňuje ovlivňovat vstupní neelektrický signál měřený čidlem testovaného snímače. Vnitřní řídicí elektronika pak ovládá aktuátor a současně sleduje, zda dochází k ovlivňování výstupního

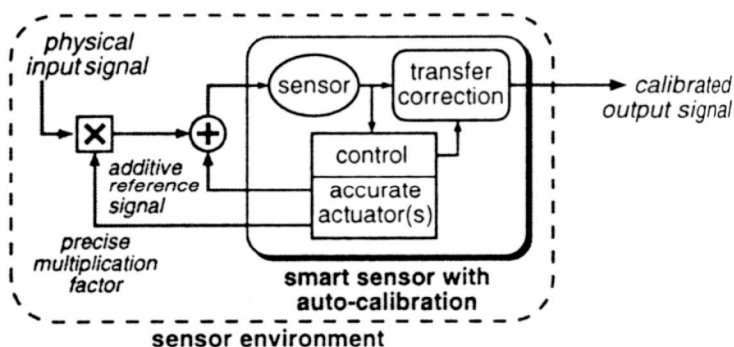
signálu z čidla. V případě, že není detekován chybový signál vyvolaný aktuátorem, řídicí elektronika situaci vyhodnotí jako chybový stav. Hlavním rozdílem proti kalibraci je, že k autodiagnostice dochází během běžného provozu a nikoli v definovaných laboratorních podmínkách.



Obr. 6. Blokové schéma obvodu autodiagnostiky

6. Autokalibrace

Obvodové řešení autokalibrace (viz. obr.7) je velmi podobné jako v případě autodiagnostiky, základním rozdílem je využití přesného aktuátoru a dále bloku umožňujícího provádět korekci převodní charakteristiky snímače. Pro autokalibraci je nezbytné, aby použitý akční člen měl minimálně o řád lepší parametry než kalibrovaný snímač. To je obecně vzato poměrně obtížně splnitelný požadavek. Jednodušší a samozřejmě i méně dokonalé řešení spočívá v kalibraci pouze elektronické části měřícího kanálu známým elektrickým signálem simulujícím výstup z čidla snímače.



Obr. 7. Blokové schéma obvodu autokalibrace

Příkladem plnohodnotného obvodu s autokalibrací jsou např. snímače magnetického pole, kde je čidlo snímače (Hallova sonda, magnetorezistor) obklopeno budící cívku napájenou ze zdroje referenčního proudu. Díky pevně dané vzájemné poloze čidla a cívky lze dosáhnout vysoké přesnosti a stability generovaného referenčního magnetického pole.

Autokalibrace ale obvykle není schopna nahradit základní kalibraci snímače s vazbou na příslušný metrologický normál, je využívána spíše pro monitorování parametrů snímače a automatickou korekci ofsetu a zesílení.

7. Spolehlivost měřených dat, matematické a statistické funkce

Zvýšení věrohodnosti a spolehlivosti měřených dat může být dosaženo paralelním zapojením více totožných snímačů nebo ještě lépe více funkčně rozdílných snímačů měřících stej-

nou vstupní fyzikální veličinu. Případné rozdíly měřených hodnot pak indikují chybnou funkci snímače. Většina inteligentních snímačů průběžně monitoruje měřenou veličinu a počítá základní statistické parametry, sleduje trendy a indikuje neočekávané změny trendu, které mohou souviset s poškozením snímače nebo poruchou v technologii. Objevují se i pokusy využít pro analýzu chybových stavů metod umělé inteligence.

8. Komunikace

Jednou z nejdůležitějších vlastností inteligentních snímačů je schopnost oboustranné komunikace s nadřazeným systémem. Současně to ale představuje i jeden z největších problémů při reálném nasazení inteligentních snímačů, protože v praxi se používá velké množství nejrozličnějších průmyslových sběrnic. Pro výrobce inteligentních snímačů je tak obtížné pokrýt kompletní portfolio sběrnic a zaměřují se tak především na nejrozšířenější a nepoužívanější standardy. V automobilovém průmyslu jsou to zejména J-1850, J-1939 (CAN) a FlexRay, v oblasti orientované na výrobní technologie a technologické linky pak především Foundation Fieldbus, Profibus PA, CAN, DeviceNet, SDS a pro oblast automatizace budov protokoly BACnet, LonTalk, Modbus případně některý z moderních bezdrátových protokolů řady IEEE 802.15. x (např. ZigBee). Některé z uvedených protokolů jsou již dostupné „v křemíku“, tzn., jsou implementovány do specializovaných mikroprocesorů a tím významně usnadňují a urychlují vývoj nových zařízení. Tato situace je typická pro automobilový průmysl, kde je kritická spolehlivost a nízká cena.

9. Standardizace inteligentních snímačů

Standardy skupiny IEEE 1451 zahrnují popis modelu inteligentního snímače schopného pracovat v síti, a to od popisu hardwarového rozhraní, až po koncepci snímače jako takového a jeho napojení na vyšší úroveň řízení. Dále je podrobně uveden objektový model zařízení, popisující jeho chování, atributy a typy datové komunikace. Základní myšlenkou je umožnit snadnou integraci do nadřazené sítě libovolnému typu snímače s rozhraním odpovídajícím některému dílčímu standardu prostřednictvím vhodného univerzálního hardware. Cílem je vytvořit obecně přijatelný a podporovaný standard, který z hlediska výrobců snímačů a akčních členů přinese zjednodušení vývoje nových typů sjednocením používaných rozhraní a z hlediska uživatele výhody spojené s integrovaným katalogovým listem, kompatibilitou typů, možnostmi „Plug’n’Play“ apod. Podrobněji viz. [5], [6].

10. Závěr

Inteligentní snímače představují významnou skupinu snímačů, se kterými se v průmyslové praxi můžeme setkat. Mezi typické představitele patří například optické snímače pro kontrolu kvality obrábění využívající ke své činnosti světlo odražené od sledovaného povrchu, snímače lokalizující polohu aktivní vady v zatěžované konstrukci metodou akustické emise, komplexní snímače umístěné v ruce manipulátorů, snímače chemických látek, tzv. laboratoře na čipu, snímače magnetického pole pro lokalizaci defektů, monitory kvality vzduchu, atd. Největší nárůst produkce lze v budoucnu očekávat v oblasti chemických a biochemických snímačů.

Literatura

- [1] ĎAĎO, S.; KREIDL, M. Senzory a měřicí obvody. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996, 316 str., ISBN 80-01-01500-9
- [2] HORN, G.; HUIJSING, J. Integrated Smart Sensors – Design and Calibration. Kluwer Academic Publishers, 1998, 202 str., ISBN 0-7923-8004-5
- [3] FRANK, R. Understanding Smart Sensors. Artech House Publishers, 2000, 390 str., ISBN 0-89006-311-7
- [4] HUIJSING, J.; MEIJER, G. Smart Sensor Interfaces. Kluwer Academic Publishers, 1997, 135 str., ISBN 0-7923-8024-X
- [5] BENEŠ, P., BEYER, T. Standard IEEE 1451 – budoucnost inteligentních snímačů? Automa . 2004. 10(7). p. 7 - 10. ISSN 1210-9592.
- [6] IEEE 1451 Homepage, <http://ieee1451.nist.gov>

Řízení motorů HS322 pro polohovou adaptivitu robotického ramene

Martin Horák

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně Fakulta aplikované informatiky

m2.horak@centrum.cz

Abstrakt:

Článek popisuje lokomoční systém robotického manipulátoru se třemi stupni volnosti jako názorná pomůcka pro studenty při laboratorních pracích z robotiky. Pohyb ramene je realizován třemi modelářskými servomechanismy. Řídící jednotka na bázi mikrokontroleru vytváří rozhraní sériový port - servomechanismus. Ovládání lokomočního systému je prováděno pomocí programového vybavení implementovaného v osobním počítači. Při návrhu robotického manipulátoru byl kladen důraz na nízké pořizovací náklady s tím, aby byl dostupný studentům středních škol.

Úvod

Konstrukční díly robotického ramene (Obr.1) jsou vyřezány z novodurové desky (tvrzeného polyvinylchloridu) o tloušťce 3mm lupénkovou pilkou. Každá hrana je pečlivě opravena pilníkem a smirkovým papírem. Poté byly vyvrtány díry podle předlohy pro šroubky se zápustnou hlavičkou s metrickým závitem M3, za pomoci kterých byla provedena montáž ramene.



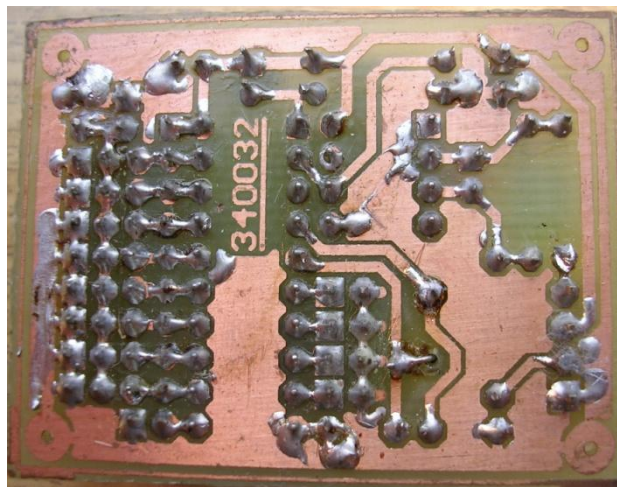
Obr. 1 Robotické rameno

Řídicí jednotka

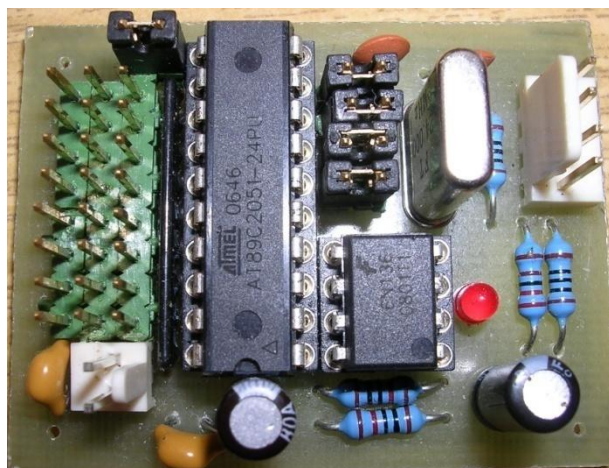
Pro řízení servomechanismů byl zvolen mikrokontroler firmy Atmel 89C2051. Úkolem mikrokontroleru Atmel je generovat impulsně-šířkovou modulaci (PWM) a tím ovládat polohu natáčení hřídele servomechanismu.

Jednotka (*Obr. 2,3*) je připojena k počítači přes sériové rozhraní. Oddělení sériového portu od vstupního pinu mikrořadiče je realizováno pomocí optočlenu, tím je zabráněno poškození COM portu počítače případným zkratem. Klade se důraz na použití dostatečně rychlého optočlenu. LED dioda, paralelně připojena k sériovému portu, indikuje nepravidelným blikáním aktivitu na komunikačním kanálu. Mikrokontroler je schopný ovládat najednou až 8 servomechanismů. Modul komunikuje s nadřazeným počítačem rychlostí 9600 Bd/s.

Pro napájení ovládací desky je doporučeno použít samostatný zdroj. Při použití společného zdroje s napájením servomechanismů by mohlo docházet k nespolehlivému chodu mikrořadiče, z důvodu napěťových špiček vznikajících v servomechanizmech.



Obr. 2 Deska plošného spoje



Obr. 3 Osazený modul s mikrořadičem

Servomechanismus

Pro polohování robotického ramene jsou použity servomechanismy firmy Hitec, typ HS-322. Jsou to levné a snadno dostupné servomechanismy, které lze zakoupit v prodejnách s modelářským zbožím.

Servomechanismy jsou jednoduché a spolehlivé jednotky, které jsou často využívány u malých robotů, vytvářených v rámci školních činností. Standardní typy malých servomechanizmů mají obvykle krouticí moment 30 - 40 Ncm při 4,8 - 6 V. Servomechanismus se skládá ze tří základních částí (Obr. 4). Stejnoseměrného motorku, převodovky, snímače polohy natočení a řídicí elektroniky. Výstupní hřídel je spřažen s miniaturním potenciometrem, který slouží jako senzor úhlu natočení výstupní hřídele.

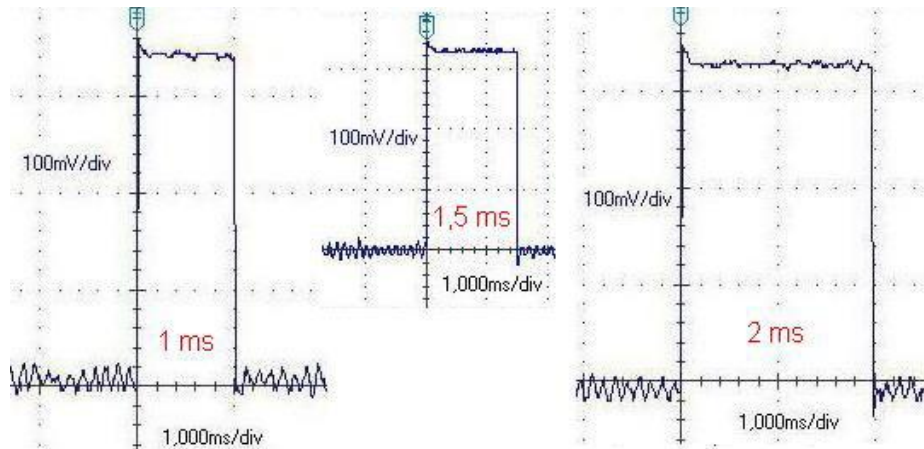


Obr. 4 Servomechanismus

Princip řízení servomotoru

Požadovaná poloha natočení výstupního hřídele se uskutečňuje přivedením impulsně šířkového modulovaného signálu (PWM) s periodou 20 ms a opakovací frekvencí přibližně 50 Hz. Šířka impulsu je v rozmezí 1 - 2 ms (Obr. 5). Šířka impulsu 1 ms odpovídá maximálnímu levému natočení. 1,5 ms odpovídá střední poloze natočení. Při šířce impulsu 2 ms je hřídel natočen maximálně vpravo. Úhel natočení hřídele je obvykle $\pm 90^\circ$. Poloha výstupního hřídele je mimo tento rozsah mechanicky aretována na převodovce. Některé servomechanismy ovšem umožňují i zvětšení rozsahu otáčení výstupního hřídele až na 180 stupňů tím, že se rozsah kladného impulsu řídicího PWM signálu změní na 0,5 až 2,5 ms.

Servomechanismus lze upravit i pro kontinuální otáčení odpilováním aretačních dorazů a úpravou řídicí elektroniky. Zpětnovazební potenciometr se nahradí napěťovým děličem, složeným ze dvou rezistorů. Bude-li přivedeno na řídicí elektroniku servomechanismu PWM signál s šířkou impulsu 1 ms, bude se hřídel motoru otáčet plnou rychlostí vpravo. Po přivedení PWM signálu s šířkou impulsu 2 ms se bude otáčet hřídel plnou rychlostí vlevo. Při šířce impulsu 1,5 ms, se servo zastaví. Toho lze využít pro řízení různých mobilních podvozků.

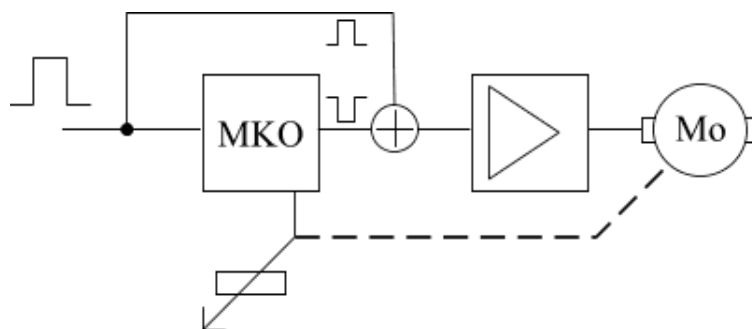


Obr. 5 Průběh PWM na výstupu modulu

Nevýhodou modelářských servomechanizmů je absence inkrementálního snímače polohy natočení hřídele, proto je modelářský servomechanismus nevhodný pro odometrii. Tento nedostatek lze překonat zabudováním jednoduchého inkrementálního snímače polohy natočení hřídele.

Funkce MKO

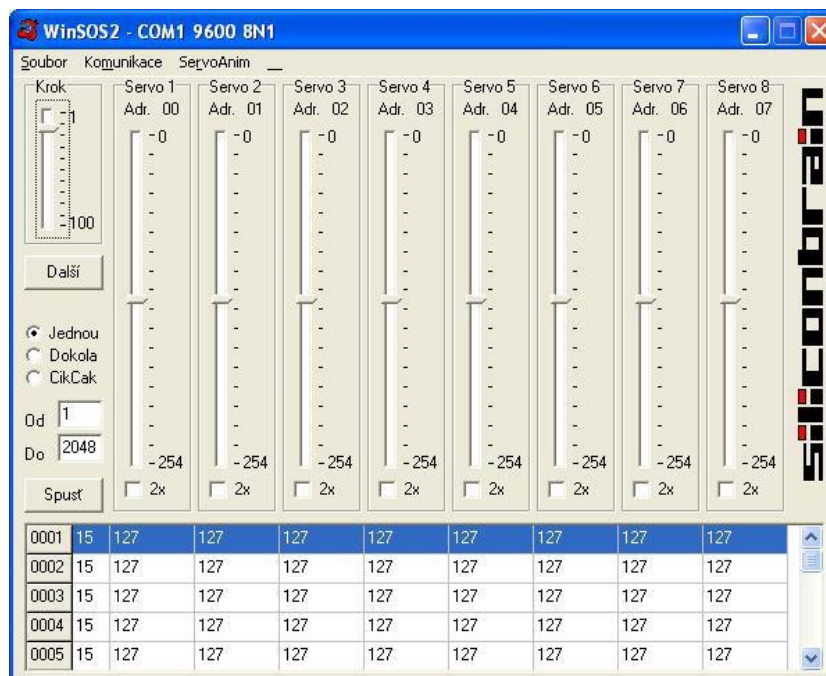
Základní částí řídicí elektroniky servomechanismu je monostabilní klopný obvod (MKO). Na vstup servomechanismu periodicky přichází řídicí impuls PWM, který spustí monostabilní klopný obvod (Obr. 6). MKO vygeneruje impuls o délce odpovídající okamžité poloze servomechanismu, ale opačné polaritě než je vstupní řídicí impuls. Tyto dva impulsy se porovnají a výsledkem je rozdílový impuls, který po zesílení přes můstkový spínač způsobí natočení motorku. Elektromotor přes převodovku otáčí hřídeli a současně i potenciometrem, který působí jako zpětná vazba polohy do MKO.



Obr. 6 Blokové schéma řídicí elektroniky servomotoru

Programové vybavení

Pro ovládání robotického ramene je použit volně šiřitelný program WINSOS (Obr. 7). Ten ovládá robota dvěma způsoby. První způsob umožňuje pohyb ramene v reálném čase. Druhá možnost se nazývá playback programování, spočívající v předdefinování a následném uložení jednotlivých kroků do celých sekvencí. Tyto sekvence po spuštění aktivují samostatnou činnost robota.



Obr. 7 Ovládací a programovací software WINSOS

Struktura datového rámce posílaného z PC do řídicího modulu

Poloha výstupní osy servomechanismu se řídí sledem příkazů, posílaných z osobního počítače sériovou linkou RS-232 do modulu. Formát příkazu se skládá z 3 bajtového slova – <1byte><2byte><3byte>. První byte je synchronizační a jeho hodnota je vždy 255 (FFh). Druhý byte odpovídá číslu ovládaného servomechanismu a je v rozmezí 0-7. Poslední, třetí bajt udává pozici výstupního hřídele a je v rozmezí 0-254.

Ovládací program musí posílat povely vždy v číselném formátu, nikdy ne v textovém, a pouze tehdy, požadujeme-li změnu polohy výstupní hřídele některého z ovládaných servomechanizmů. Periodické opakování potřebného řídicího signálu PWM zajišťuje řídicí modul automaticky sám. Rychlost otáčení hřídele servomechanizmu je dána pouze konstrukcí převodovky a nelze ji nijak ovlivňovat.

Literatura

- [1] Rotta, J. Bezstarosti, J. 2001. Robot manipulátor. *Praha: Amatérské rádio 2001*, 7s - 11s, ISSN 1211-328x.
- [2] Novák, Petr. MOBILNÍ ROBOTY - pohony, senzory, řízení. 1. vyd. *Praha: BEN*, 2005. 248 s. ISBN 807300111-1.

Aplikace řídicích systémů s DSC

Petr Hudeček, Jan Michalík, Jan Pumr, Martin Sobek, Jan Vaněk

VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra elektrotechniky, 17. listopadu 15/2172, Ostrava-Poruba

petr.hudecek.st@vsb.cz, jan.michalik@vsb.cz, jan.pumr.fe1@vsb.cz, martin.sobek.st1@vsb.cz,
jan.vanek@vsb.cz

Abstrakt:

Tento příspěvek se zabývá popisem digitálních signálových mikrokontrolérů firem Freescale MC56F8023 a Texas Instruments TMS320F28335 s plovoucí řádovou čárkou, které jsou stále aktuálními novinkami v oblasti této problematiky. Součástí mikrokontrolérů jsou také vývojové starter kity se softwarovým vybavením, které umožňují maximální flexibilní využití všech jejich možností. Na katedře elektroniky VŠB-TUO byly k těmto deskám vyvinuty podpůrné standy pro vědecko-výzkumné a pedagogické účely. Závěrem článku jsou uvedeny oblasti využití a praktické zkušenosti s těmito digitálními systémy v příslušných aplikacích.

1. Úvod

V dnešních dnech se v moderních mikropočítačových systémech standardně již aplikují systémy založené výhradně na signálových procesorech a především v poslední době se pak výrobci zaměřují na systémy s hybridními mikrokontroléry. Hybridní mikrokontroléry jsou monolitické mikropočítače, obsahující výpočetní jádro signálového procesoru, které je doplněno množstvím periférií. Výhodou hybridního řešení je, že signálové jádro nabízí značný výpočetní výkon, především ve výpočetních operacích typu MAC, a periférie dodávají výkonné prostředí pro styk z danou aplikací. Toto řešení taktéž odstraňuje případné problémy s rychlostí přístupu k perifériím a usnadňuje obvodový návrh zařízení. Jistým omezením je pak horší pozdější modifikovatelnost oproti jiným systémům jako například systémům se zásuvnými kartami.

Je zřejmé, že v praxi najdeme široké uplatnění pro aplikaci s digitálními signálovými procesory od zpracování zvuku, obrazu až po řídicí systémy složitých sofistikovaných aplikací, kde jsou kladeny vysoké nároky na výpočetní výkon soustavy jako celku. Náročnost výpočtu je specifikována především složitostí aplikovaných algoritmů, komunikací řídicí jednotky s perifériemi a také systémem přerušení, který se uplatní například v aplikacích zpracování dat v reálném čase. Signálové procesory TMS320F28335 od firmy Texas Instruments i MC56F8023 od firmy Motorola mají výkonové předpoklady nejen pro řízení pohonů a aplikací digitálních číslicových filtrů, ale i zpracování zvukových a obrazových signálů. Možnosti těchto signálových procesorů, se bude snažit tento článek nastínit.

2. Charakteristika MC56F8023 a kitu

Použitý vývojový kit firmy Freescale obsahuje signálový mikrokontrolér typu 56F8023. Periferie tohoto mikrokontroléru jsou navrženy pro nasazení v elektrických pohonech, především v segmentu pohonů se střídavými stroji. Základní parametry 56F8023 dle literatury [1] jsou:

- 32 MIPSu při frekvenci jádra 32 MHz
- DSP má implementováno prostředí uzpůsobené pro snadnou práci v jazyce C
- 32 KB (16K x 16) programové paměti typu Flash
- 4 KB (2K x 16) sjednocenou datovou a programovou RAM
- Jeden 6-kanálový PWM modul
- Dva 3-kanálové 12-bitové A/D převodníky
- Dva vnitřní 12-bitové D/A převodníky
- Dva analogové komparátory
- Jeden programovatelný PIT
- Jedno rozhraní QSCI s funkcí LIN
- Jedno rozhraní QSPI
- Jeden 16-bitový čtyřnásobný časovač
- Jedno rozhraní I²C
- COP a Watchdog
- Integrovaný oscilátor, který je aktivní v režimu watchdog a snížené spotřeby
- Integrovaný mód Power-On Reset (POR) a Low-Voltage
- Přerušovací LVI modul
- JTAG rozhraní
- Více než 26 GPIO linek
- 32-pinové pouzdro LQFP

Samotný vývojový kit firmy Freescale obsahuje kromě signálového mikrokontroléru MC56F8023 ještě:

- zdroj zajišťující napájecí napětí pro analogovou část
- zdroj zajišťující napájecí napětí pro digitální část mikrokontroléru
- rozhraní pro připojení inkrementálního čidla otáček
- rozhraní pro připojení tachogenerátoru
- galvanicky oddělené RS232 rozhraní
- konektor rozhraní JTAG/OnCETM a konektory, na které jsou vyvedeny piny DSC
- konektor pro připojení rozšiřující desky s rozhraním UNI-3.

Podrobnější informace o tomto kitu lze nalézt v dokumentaci výrobce [2].

3. Rozšiřující deska kitu

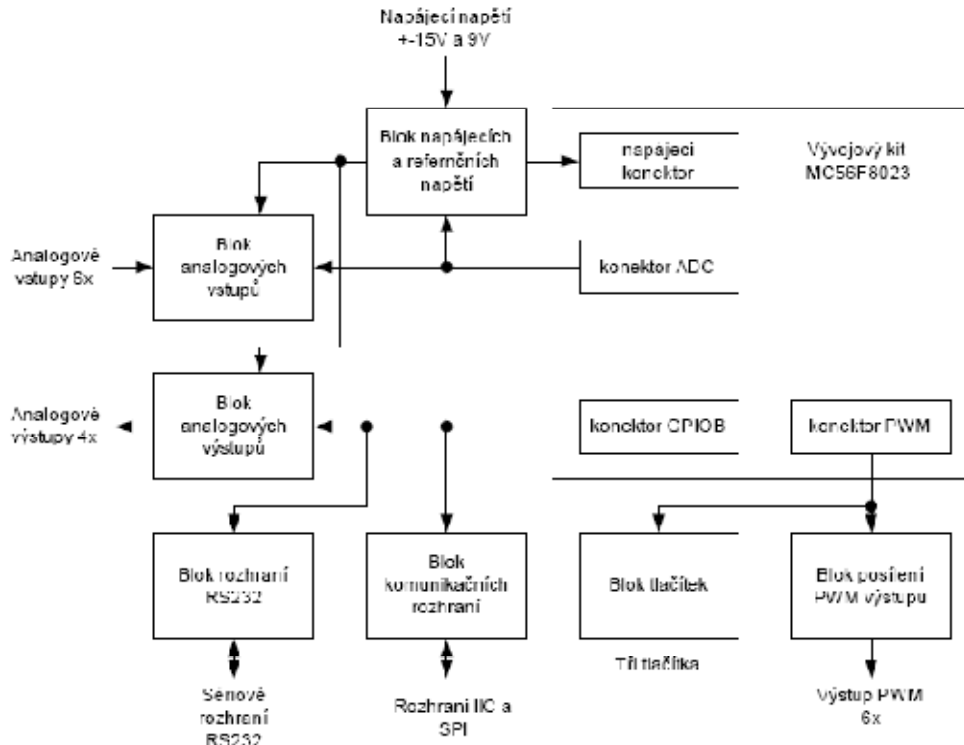
Vývojový kit je sice určen pro vývoj aplikací zaměřených na elektrické pohony, ovšem pro využití kitu na naší katedře bylo potřeba doplnit tento kit ještě o přídavnou desku (obr.1).



Obr.1 Rozšiřující deska s kitem firmy Freescale

Tato rozšiřující deska obsahuje bloky (obr.2) analogových vstupů, analogových výstupů, napájecích a referenčních napětí, rozhraní RS232, posílení PWM výstupů, tlačítek a komunikačních rozhraní. Jednotlivé bloky mají následující funkci:

- Blok analogových vstupů má na své vstupní části obvody pro změnu napětového rozsahu $\pm 10V$ na rozsah 0 až 3,3V, za touto úpravou úrovní následuje ochrana vstupů mikrokontrolérů proti napětovému přetížení.
- Blok analogových výstupů obsahuje 4-kanálový D/A převodník, který komunikuje s mikrokontrolérem pomocí rozhraní SPI. Za D/A převodníkem následuje obvod změny rozsahu napětových úrovní.
- Blok napájecích a referenčních napětí obsahuje ochrany proti přepólování napájecích napětí, filtraci napájecích napětí, zdroj referenčního napětí, zdroje omezovacích napětí a výstupní konektor, na který je vyvedeno napájecí napětí, kterým je napájen vývojový kit. Z kitu je rovněž přivedeno na rozšiřující desku již stabilizované napájecí napětí analogové části kitu 3,3V, od něho je odvozeno omezovací napětí, také napájecí napětí digitální části kitu a napětí 5V pro napájení externích digitálních obvodů.
- Blok rozhraní RS232 přizpůsobuje sériové rozhraní mikrokontroléru standardnímu sériovému rozhraní RS232. Tento obvod přenáší pouze signály RxD a TxD.
- Blok komunikačních rozhraní zajišťuje správné propojení mezi mikrokontrolérem a externími zařízeními, především je pomocí něho připojena deska s obvody, které komunikují po sběrnici I²C. Je možno pomocí propojek zvolit na které vývody mikrokontroléru bude sběrnice připojena. Tento blok vznikl z požadavků v předmětu číslicová a mikropočítačová technika.
- Blok tlačítek představuje jednoduché zapojení tří mikrospínačů, které je možné pomocí propojek připojit k portu A mikrokontroléru.
- Blok posílení PWM výstupů obsahuje šestinásobný budič s otevřeným kolektorem, s maximálním spínaným napětím 30V.



Obr.2 Blokové schéma funkce rozšiřující desky a její propojení s kitem

4. SW vybava

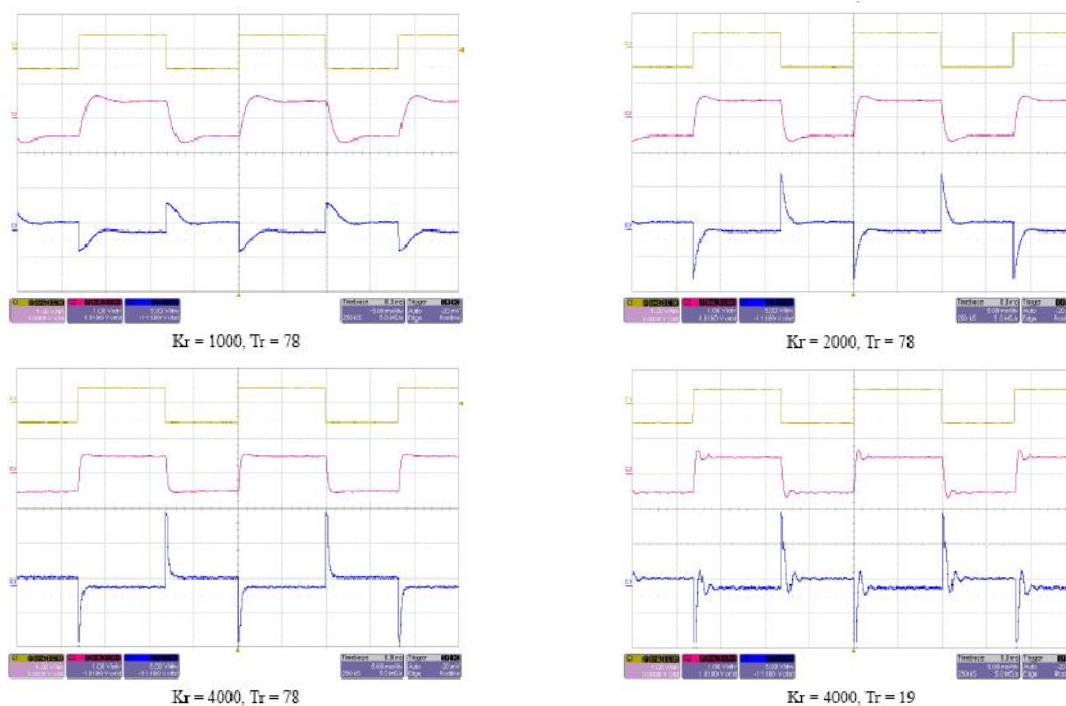
Každá periférie obsahuje značné množství registrů, které kontrolují jejich činnost nebo obsahují výsledky jejich činností. Potom je pro vývojáře programu značně zdouhavé hledat jednotlivá nastavení, především v jaké kombinaci je dané řešení správné. Proto byl vyvinut firmou Freescale programový nástroj jako přídavek k programu CodeWarrior se jménem QuickStart. Tento nástroj vloží do nového projektu sadu funkcí a maker, které provedou základní inicializaci mikrokontroléru. Celé nastavení se provádí v grafickém prostředí a je dokonce obsažena kontrola správnosti nastavení tak, aby nedocházelo k chybnému nastavení.

Samotný vývoj programového vybavení pro mikrokontrolér MC56F8023 se nejlépe provádí v dodávaném vývojovém prostředí Metrowerks CodeWarrior. Toto prostředí umožňuje návrh programu v jazyce symbolických adres nebo ve vyšším programovacím jazyce C. Také je možná kombinace obojího, kdy na časově náročné algoritmy a tam, kde chceme zajistit vyšší efektivitu výpočtu, použijeme jazyk symbolických adres (assembler) a na podpůrné části, inicializaci a zadní program vyšší programovací jazyk.

V předešlých řádcích tohoto příspěvku jsme popisovali HW celého kytu a rozšiřující desky, ovšem aby celý systém k něčemu byl, musely vzniknout i knihovny ovládající rozšiřující desku. Knihovny vznikly dvě `spi_dac` a `regfun`. Prvá obsahuje příkazy, které ovládají sériovou linku (tedy přídavný display, D/A převodník, komunikaci s PC atd.) a druhá obsahuje funkce pro regulaci a řízení (vektorový analyzátor, funkce pro určení hodnot \sin a \cos z tabulky, transformace 2/3 a 3/2, vektorové natočení, funkce pro I a PI regulátor).

5. Závěr a zhodnocení dosažených výsledků na platformě MC56F8023

Myslíme si, že vzniklý systém obsahující kit firmy Freescale s mikrokontrolérem MC56F8023 připojeným na naši rozšiřující desku je nejen výbornou učební pomůckou, ale i vynikajícím vývojovým nástrojem pro tuto platformu pro výzkum, který probíhá na naší katedře. V současné době na systému probíhá kromě výuky předmětu Mikroprocesorová a řídicí technika II i výzkum v oblasti řízení a diagnostiky střídavých strojů. Dále pak jsme na kitech firmy Freescale realizovali úlohy, jako jsou například řízení výstupního napětí třífázového střídače pomocí vektorové PWM, řízení pulzního měniče, regulace rychlosti stejnosměrného motoru s permanentními magnety napájeného z pulzního měniče, detekce průchodu nulou proudu atd. Ukázky funkčnosti systému je možné ověřit na následujících obrázcích, kde je realizována regulace napětí na RC členu pro různé konstanty K_R a T_R .



Obr.3 Regulace napětí na RC členu pro různé konstanty K_R a T_R

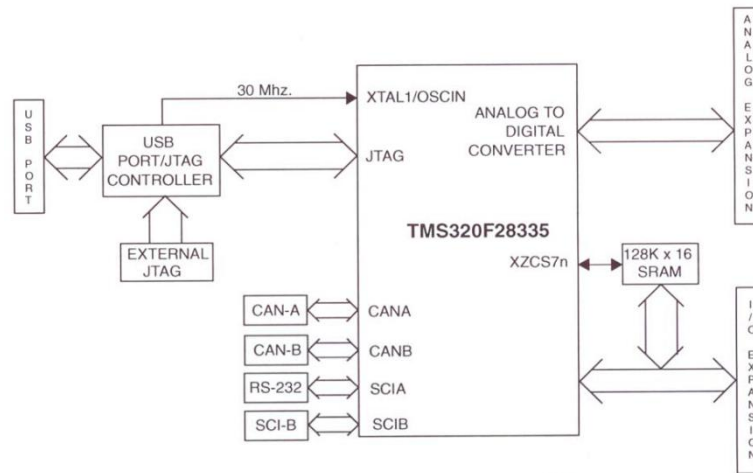
6. Základní informace o kitu obsahující procesor TMS320F28335

Specifikace hardware kitu eZdsp™ F28335:

- Frekvence jádra je 150 MHz
- Procesor obsahující 32-bitovou plovoucí čárku
- Integrovaná 68 KB RAM
- Integrovaná 512 KB paměť Flash
- Externí 256 KB paměť SRAM na kitu
- Integrovaný 12-bitový A/D převodník s 16-kanálovým vstupem
- Obsahuje rozhraní RS-232, JTAG a CAN 2.0
- Rozšiřující analogový vstup/výstup
- Napájecí napětí 5V
- Připojení pomocí mini-USB rozhraní

Softwarové vybavení:

- TI F28xx Code Composer Studio™ verze 3.3
- Texas Instruments F28335 hlavičkové soubory a vzorové příklady kódu

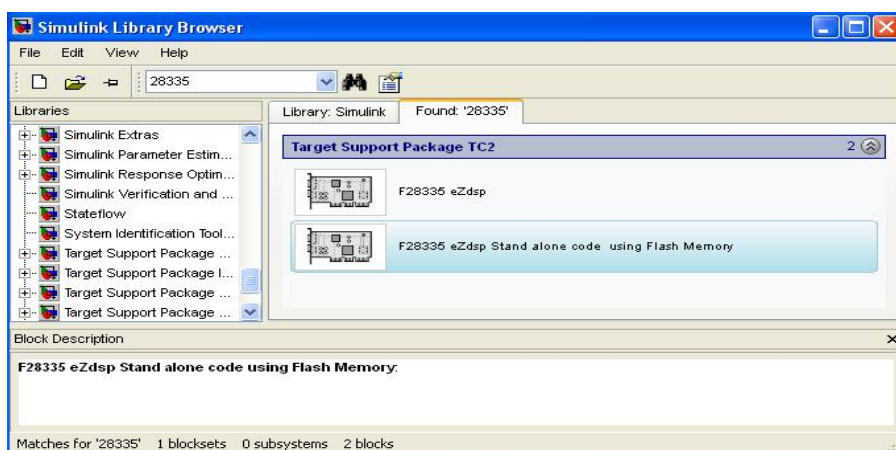


Obr.4 Blokové schéma vývojového kitu

7. Softwarové prostředky pro vývoj aplikací

Po zakoupení vývojového kitu TMS320F28335 obdržíme CD se softwarovou aplikací Code Composer Studio. Code Composer studio umožňuje zápis instrukcí buď v assembleru nebo v jazyce C nebo kombinovaný zápis kódu. Code Composer Studio umožňuje také komunikaci vývojového prostředí a vývojového kitu TMS320F28335 a reálnomové odladění aplikací v praxi. Výhodné je i použití knihoven, které výrobce k danému vývojovému kitu dodává.

V mnoha dalších aplikacích lze využít i dalších programových prostředků k realizaci konkrétních aplikací. Představitelem může být programové prostředí Matlab. To obsahuje prostředí Simulink, kde lze nalézt blokovou strukturu pro vývojový kit s TMS320F28335 (obr.5), kde lze nastavit příslušné periferie, paměť a mnoho dalších nastavení pro snadnější vývoj aplikací.

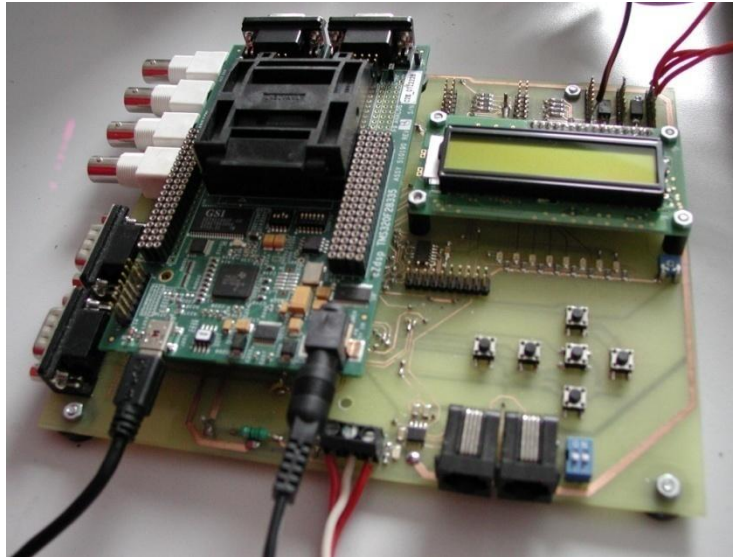


Obr.5 Knihovna Simulinku podporující kit s TMS320F28335

V Simulinku lze najít podporu i pro starší verze procesorových kitů. Výběr kitu je proveden přetažením příslušné ikony pomocí myši na pracovní plochu Simulink. Po tomto kroku je možné provádět nastavení vlastností kitů.

8. Rozšiřující deska kitu

Na obr. 6 je vyfotografován kit doplněný o rozšiřující interface. Interface je napájen dvěma stabilizovanými zdroji 5V a 3,3V. Analogová a digitální část obou zdrojů (+5V a +3,3V) je rovněž oddělena pomocí tlumivek. Pro A/D převodník je na interface vytvořen referenční zdroj 3ppm tvořený obvodem Burr-Brown REF5020, který je rozdělen pomocí přesných operačních zesilovačů na dvě napěťové úrovně 1,024V a 2,048V. Na čipu obvodu referenčního zdroje je dále výstup nesoucí informaci o teplotě. Ten je zesílen sledovačem a přes volitelnou propojku přiveden na vstup ADC. K A/D převodníku byly navrženy externí vstupy s pasivními ochranami.



Obr.6 Rozšiřující deska kitu

Velmi často je potřeba zobrazit si vnitřní proměnné pomocí osciloskopu. Interface proto obsahuje 12-bitové D/A převodníky řízené po sériové lince SPI. K dispozici jsou celkem 4 kanály s napěťovým rozsahem 0 - 5V. Pro realizaci byl použit obvod Texas Instruments TLV5614. SPI řízení je dostatečně rychlé pro zobrazování veličin např. při řízení asynchronního motoru, kde bývá perioda regulační smyčky v řádu jednotek kHz. Nevhodné je pro zobrazování velmi rychlých dějů, kdy již sériový přenos není dostatečně rychlý.

Připraveno je uživatelské rozhraní ve formě 6-ti tlačítkové klávesnice, displeje 2 x 16 znaků a 8-mi LED. Displej je řízen standardním řadičem HD44780. Napájen je 3,3V, protože brány procesoru s touto napěťovou úrovní pracují taktéž, komunikace je obousměrná a není tedy nutné použití převodníku napěťových úrovní. Aby však bylo možné na displeji něco vidět, bylo potřeba přes trimr přivést na svorky V0, kterými se ovládá kontrast zobrazení záporné napětí získané z převodníku sériové linky MAX3232.

Výstupy PWM pro budiče jsou od procesoru odděleny hradly s otevřenými kolektory. Zde je to nutné zejména z hlediska převodu napěťových úrovní. Brány procesoru operují s napěťovými hladinami 3,3V, zatímco většina budičů výkonových tranzistorů pracuje

s úrovněmi napětí 5V. Procesor má pro generování PWM možnost doplnění i mrtvých dob nastavením dead-band jednotky.

Dvě sériové linky RS232 jsou vhodné pro přenos dat oběma směry a jsou velmi výhodné při ladění i řízení aplikace mikroprocesoru. Obě sériové linky jsou připojeny na SCIA/SCIB piny procesoru přes převodník napět'ových úrovní MAX3232. Mezi periferie procesoru patří i CAN 2.0B sběrnice.

9. Zhodnocení výsledků dosažených na TMS320F28335

Cílem části zabývající se procesorem firmy Texas Instruments TMS320F28335 bylo stručně seznámit veřejnost s novým vývojovým kitem eZdspTM F28335 na platformě procesoru s plovoucí řádovou čárkou. Byly shrnuty základní rysy jak procesoru, tak i samotného vývojového kitu s důrazem na použité periferie a také podpůrné softwarové prostředky. Pro programování mikroprocesoru není nutné znát programovací jazyky, ale je možné využít pro jednoduché aplikace Matlab-Simulink. Tento kit je mocným nástrojem pro vývoj aplikací nejen pro průmyslovou a řídicí elektroniku, ale i další oblasti elektroniky.

Literatura

- [1] 56F8023 Data Sheet, Preliminary Technical Data, Rev 2, www.freescale.com, 12/2006
- [2] MC56F8013 Controller Board, Hardware User's Manual, Rev 1.0, www.freescale.com, 9/2005
- [3] TMS320F28335 eZdsp Starter Kit [online]. 1995-2008 [cit. 2008-07-09]. Dostupný z WWW: <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/tmdxez28335.html>

Výuka hradlových polí a jejich programování ve středních školách

Jiří Král

**Střední škola informatiky, elektrotechniky a řemesel Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610
756 61 Rožnov pod Radhoštěm**

Abstrakt:

Příspěvek pojednává o realizaci projektu s názvem „Zavedení výuky programování hradlových polí FPGA ve VHDL“. Tento projekt byl podán v rámci 1. výzvy Zlínského kraje k Operačnímu programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost.

Od minulé konference již uplynuly dva roky a tak by mohlo připadat zbytečné se k ní vracet. Přesto si dovolím připomenout můj příspěvek. Hovořil jsem zde o výsledcích, kterých dosahujeme ve výuce programování hradlových polí. A dvě věty z příspěvku si dovolím citovat: „Naším cílem je vybudovat pro výuku novou učebnu, ve které by každý student měl vlastní pracoviště, včetně vývojového kitu. V tomto smyslu již byl zpracován a našemu zřizovateli předán projektový záměr.“

A právě tyto dvě věty nás přivádí k dnešku a já mohu plynule navázat. Zmíněný projektový záměr byl zpracován do formy projektu s názvem „Zavedení výuky programování hradlových polí FPGA ve VHDL“. Tento projekt pak byl podán v rámci 1. výzvy Zlínského kraje k Operačnímu programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost. Protože jsme s tímto projektem uspěli, podařilo se vyřešit to hlavní, co obvykle omezuje iniciativu. Ano, jde o peníze. Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

Jak je tento fakt podstatný, dokladuje rozpočet projektu:

2.475.757,- Kč

Tento rozpočet je jistě dost velký na to, aby bylo možné za vložené peníze požadovat také náležité výsledky. Přínos projektu lze spatřovat ve dvou oblastech, pro školu a pro žáky.

Škola realizací projektu získá:

- Vyškolení odborných pedagogů
- Vybudování materiálního zázemí výuky
- Vytvoření učebních plánů pro ŠVP
- Přípravu učebních textů
- Vytvoření e-learningové podpory výuky

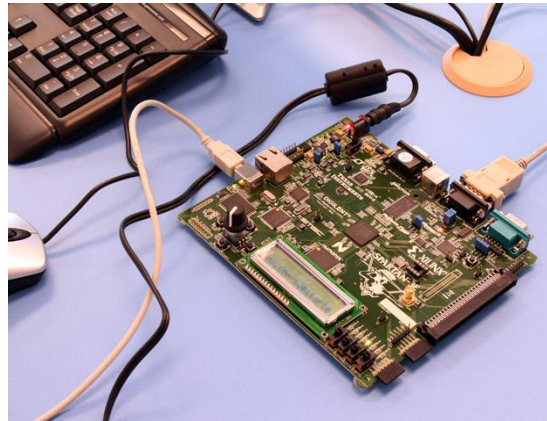
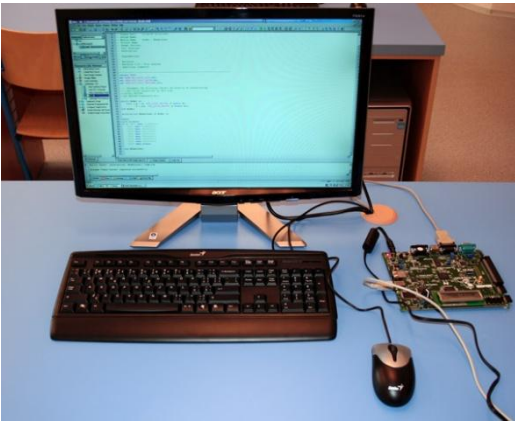
A přínos projektu pro žáky:

- Seznámí žáky s použitím moderních elektronických součástek a trendů
- Přispěje k odstranění jednostrannosti zaměření žáků, budoucích studentů VŠ, na hardware či software
- Vytvoří předpoklady pro budoucí profesní kariéru

A kdy to všechno bude? Plánované termíny realizace projektu jsou:

- Termín zahájení - listopad 2008
- Termín ukončení - říjen 2011

V této chvíli je z projektu splněn první podstatný úkol, vybudování materiálního zázemí výuky. Jaká je nová učebna, uvidíte při její návštěvě, nebo ji alespoň můžete posoudit z několika fotografií. V této chvíli probíhá další důležitá etapa realizace projektu, vytvoření učebních plánů pro ŠVP. Další etapy budou postupně následovat a já věřím, že při příští konferenci se budeme moci pochlubit dosaženými výsledky.



Učebna je vybavena moderními výukovými kity SPARTAN 3E



Pohled do učebny z pozice učitele a žáka



Asistenční technologie a polohová adaptivita v robotice

Milan Kvasnica

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky,
Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín
kvasnica@fai.utb.cz

Abstrakt:

Článek je zaměřen na současný stav v robotických asistenčních technologiích a rozhraní člověk-stroj se zřetelem na použití ve státní správě, bezpečnostních technologiích, protipožární, protiteroristické, vojenské a průzkumné činnosti, záchranářských a policejních robotických systémech. Výroba, provoz a údržba robotických systémů vyžaduje nové směry ve výuce jak na středních, tak i na vysokých školách.

Úvod

Zaměření pohybu cíle patří k nejstarším úlohám polohové adaptivity, jejichž řešení je spojeno s otázkou přežití jak u zvířat, tak také u lidí. S rozvojem vědy a techniky se tato úloha přenesla na manipulační techniku operující ve dvou stupních volnosti, odměr a náměr. Údaje o odměru a náměru jsou postačující pro přímé zasažení cíle při použití jednoduchého projektilu. V případě potřeby zasažení cíle střelou s časovanou náloží, která po explozi zvyšuje pravděpodobnost zásahu, je zapotřebí vyhodnotit vzdálenost jako třetí stupeň volnosti. S rozvojem vědy a techniky se zvyšovala rychlost pohybujících se cílů, zejména letadel, takže přímá palba na vzdušné cíle byla postačující ještě koncem I. světové války. Později vzhledem na zvýšenou rychlost vzdušných cílů byly vyvinuty elektromechanické analogové počítačové systémy, například československý UZ vzor 41. Tyto zaměřovací systémy se skládaly z dálkoměru ovládaného speciálně vycvičenou obsluhou, přičemž spojitě údaje o dráze letu byly přenášeny pomocí elektrických signálů do elektro-mechanického analogového počítačového systému, ze kterého pomocí selsynových vysílačů byly přenášeny parametry odměru, náměru a časování na protiletadlovou dělostřeleckou baterii, umístěnou i několik set metrů od zaměřovacího stanoviště.

Zaměřovací systémy omezené rychlostí reakce lidského operátora a časovým zpožděním elektromechanických analogových výpočetních systémů se stávaly koncem II. světové války neúčinné vzhledem k narůstajícím rychlostem letadel, které přesahovaly hodnotu 800 km/h (například Mescherschmit 107). Možnost použití vakuových obrazových snímačů dávala perspektivu on-line sledování vzdušných cílů pohybujících se i nadzvukovou rychlostí. To vedlo k vývoji prvního elektronického počítače ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), jehož základní rysy architektury jsou shodné se současnými PC. Tento první elektronický počítač na světě byl sestaven z 18000 elektronek (dvojitě triody) jako podstata binárních klopných obvodů, 10000 kondenzátorů, 7000 odporů a 1300 relé. Byl chlazen dvěma leteckými motory, zabral plochu asi 150 m² a vážil asi 40 tun. Spotřeba elektrického proudu byla 200 kW a zvládl 5000 operací/sek. Programovalo se na něm pomocí prepínačů. Tento historický počítač je dodnes vystavován ve svém vlastním muzeu na Walnut Street ve Philadelphii na Pensylvánské univerzitě. Tím byl zaznamenán historický krok ve vývoji výpočetní techniky, která primárně sloužila na podporu polohové adaptivity moderních palebných prostředků.

Současné směry v asistenčních technologiích a polohové adaptivitě robotických systémů

Současný pokrok v oblasti robotických technologií dospěl do takové úrovně, že umožňuje průnik adaptivních robotických systémů dosud používaných převážně v průmyslu do zcela nových oblastí, jakými jsou asistenční robotické technologie.

Zvyšující se nároky jak na osobní bezpečnost, tak i na rychlou dostupnost informací o prostředí, ve kterém se člověk pohybuje, vedl k rozvoji inteligentních robotických systémů, zabezpečujících bezprostřední interakci s okolním prostředím. Inteligentní robotické systémy vyžadují pro své začlenění do prostředí účinné sensorické systémy nejen pro vnitřní zpětnou vazbu umožňující jejich mobilitu, ale též sensoriku vnější zpětné vazby, umožňující jejich polohovou adaptivitu orientovanou na styk s prostředím. Zvláštní skupinu sensorické systémy, umožňující polohovou adaptivitu robotů v rizikovém prostředí, manipulaci s nástražnými systémy a v kontaktu s lidmi umožňují tvořící strukturu různých druhů asistenčních technologií, jež se navzájem prolínají a jsou zaměřeny především na

- bezpečnostní služby
- informační služby ve státních orgánech, v soukromých firmách a ve výrobních prostorách
- zdravotnictví
- péče o invalidy
- péče o přestárlé lidi.
- vojsko
- protiteroristickou techniku
- záchranářství
- policii

Uvedené asistenční technologie jsou již nyní v zemích EU standardně používány a v současných projektech je připraveno hromadné nasazení asistenčních robotických systémů již v krátkém časovém horizontu a to zejména swarm robotic systems – skupinově spolupracující roboty, nazývané též robotické roje.

Nasazení těchto adaptivních robotických systémů v uvedených oblastech představuje značné finanční úspory a snížení rizika ohrožení osob v kritických situacích.

Česká republika v této oblasti značně zaostává, jak v oblasti bezpečnostních technologií, tak i v oblasti péče o invalidy a péče o přestárlé lidi pomocí asistenční robotické technologie. Nasazení asistenčních robotických technologií představuje nejen zvýšení efektivnosti zdravotní péče, ale též vysoké úspory pro zdravotní pojišťovny v podobě substituce celodenní pečovatelské služby.

Použití těchto adaptivních robotických systémů v uvedených oblastech vyžaduje spolupráci sensorických systémů a použití špičkových informačních technologií, což je jednou z náplní studijního programu Fakulty informačních technologií UTB.

V adaptivních robotických systémech typu swarm robots jsou používány inteligentní sensorické systémy, které pracují v součinnosti, jako například ultrazvukové a optoelektronické snímače vzdálenosti, šesti-složkové silově-momentové snímače a kamerové systémy s následným zpracováním obrazové informace. Součinnost uvedených sensorických systémů umožňuje pomocí skupinovou spolupráci při plnění speciálních úkolů například vojenských, bezpečnostních, informačních a protiteroristických. Při vojenských operacích „swarm roboty“ vyhodnotí situaci, který robot je v nejnepříhodnější pozici, aby střelbou zasáhl cíl, další roboty vytvářejí seskupení, které zamezí úniku zaměřeného objektu. V případě bezpečnostních robotických systémů se předpokládá nasazení především v obchodních a dopravních centrech, budovách státní správy, nemocnicích, muzeích, galeriích, kde budou sloužit jako informační jednotky pro zákazníky a cestující a též k identifikaci a sledování podezřelých osob, jejichž snímky mají uloženy v paměti. „Swarm roboty“ si navzájem předávají informaci o pohybu

podezřelé osoby, kterou sledují kamerovými systémy například s cílem zachycení obrazové informace o zloději při krádeži zboží, popřípadě peněženky. V nočním provozu jsou tyto kooperující robotické systémy přeprogramovány na součinnost s ostrahou a elektronickými zabezpečovacími systémy obvodové, prostorové a požární ochrany. Snižují zejména riziko přímého napadení ostrahy.

Robotické systémy založené na skupinové spolupráci „swarm roboty“ jsou testovány například v Jižní Korei, která jimi hodlá v brzké době nahradit vojenské oddíly hlídající hranici se Severní Koreou, přičemž náklady na pokrytí asi 225 kilometrů dlouhé demilitarizované zóny, si vyžádají investici přes 1,9 miliardy dolarů (kolem 47,5 miliardy korun). „Swarm roboty“ budou hranici zatím pouze sledovat, představitelé Jižní Korey však nevyklučují jejich pozdější vybavení střelnými zbraněmi, což zatím je v rozporu s mezinárodními konvencemi. Nejen Jižní Korea připravuje nasazení automatických bojovníků. Americká armáda vyvíjí systém FCS (Future Combat System), který zahrnuje pozemní i vzdušné robotické jednotky, jež spolu navzájem komunikují. První stroje FCS se mají objevit již v roce 2008, o dvě léta později by měly být schopny samočinně operovat. Americké armádě by nasazení FCS technologie mohlo ušetřit významnou část finančních prostředků, protože bude možné razantně snížit počty živých vojáků.

Vybrané druhy mobilních robotických systémů vyráběné v Ruské Federaci

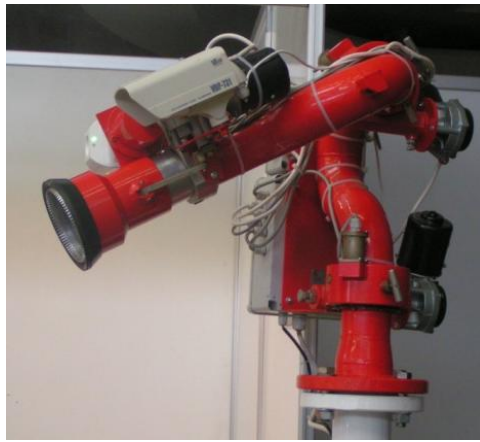
Uvedené mobilní robotické systémy byly představeny veřejnosti na výstavě LENEXPO 2007 pořádané paralelně s mezinárodním kongresem Mechatronics and Robotics 2007 a vzpomínkou oslavou k 50. výročí vypuštění prvního sputniku 4. října 1957. Některé z uvedených mobilních robotických systémů byly zařazeny do výzbroje průzkumných jednotek vojsk Ruské Federace již v roce 2006.

Mobilní robotický systém požárního průzkumu FGU BNIIPO MČS Ruské Federace se čtyřmi stupni volnosti na obr. 1. Tento mobilní robot může být ovládán jak v ručním režimu otevřené zpětnovazební smyčky s operátorem, který může ovládat jednotlivé stupně volnosti na základě obrazové informace z kamerového systému CCTV, tak i v automatickém režimu s adaptivním polohováním na základě informace z termovizní kamery a senzorického systému. Do vybavení náleží snímač teploty, navigační kamerový systém, analyzátor plynů, infračervená kamera, termovizní kamera umožňující zacílení hasící směsi do místa požáru s nejvyšší teplotou, systém záštity robota před nadměrnou teplotou pomocí rozstřiku chladící směsi a záchranářské nástroje. Robot umožňuje hašení požáru ve větší operační vzdálenosti do 500m pomocí hasící směsi umístěné v cisternách na platformě robota, pro menší operační vzdálenosti do 50m používá vlastní navíjecí buben s hadicí pro přívod hasícího media.



Obr. 1: Mobilní robotický systém požárního průzkumu FGU BNIIPO.

Robotické protipožární rameno se třemi stupni volnosti na obr. 2 má standardní výbavu sestávající z navigačního kamerového systému, analyzátoru plynů, termovizní kamery umožňující zacílení mohutného proudu hasící směsi do místa požáru s nejvyšší teplotou a systém záštity robotického ramene před nadměrnou teplotou pomocí rozstříku chladící směsi. Robotické rameno je určeno jak pro montáž na pojízdné požární cisternové vozidlo, zpravidla na dálkově řízený tankový podvozek s cisternou, tak i pro stacionární montáž v blízkosti chemických reaktorů a nádrží na pohonné látky. Robotické protipožární rameno se třemi stupni volnosti může pracovat autonomně pomocí termovizní kamery, která automaticky zacílí hasící směs do míst s nejvyšší teplotou, popřípadě v režimu otevřené regulační smyčky s operátorem, který může ovládat jednotlivé stupně volnosti na základě obrazové informace z kamerového systému CCTV.



Obr. 2: Robotické protipožární rameno se třemi stupni volnosti

Vícefunkční mobilní robotický systém třídy VARAN na obr. 3 je určen na vizuální rozvědku a prvotní identifikaci podezřelých předmětů a nástražných systémů pomocí televizních kamer a přídatných závěsných systémů. Do příslušenství robotu patří roentgenové snímací zařízení a speciální kontejnery na přepravu podezřelých předmětů. Řídicí systém umožňuje autonomní i ruční dálkově řízenou navigaci robotu.



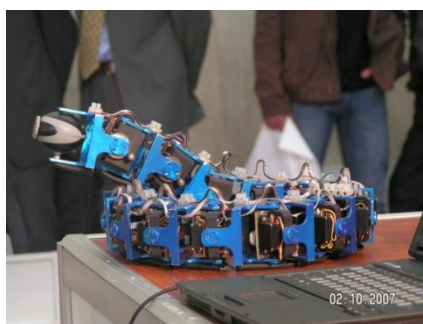
Obr. 3: Vícefunkční mobilní robotický systém třídy VARAN.



Obr. 4: Vícefunkční průzkumný robotický systém GNCR CNII RTK Razvědčik 3



Obr. 5: Vícefunkční mobilní robotický systém určený pro manipulaci s nástražnými systémy.

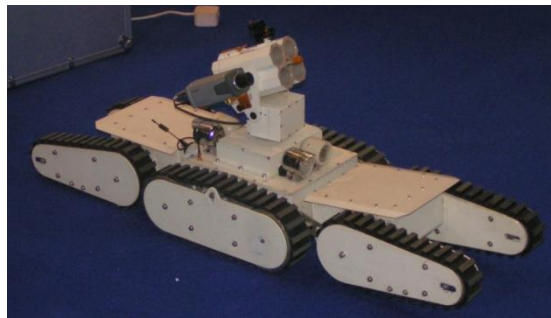


Obr. 6: Průzkumný kamerový plazivý mobilní robotický systém určený na inspekci dutin a potrubí.

Vybrané druhy mobilních robotických systémů vyráběné v Číně

Na výstavě LENEXPO 2008 pořádané paralelně s mezinárodním kongresem Mechatronics and Robotics 2008 byly představeny veřejnosti za účasti čínských výrobců též vybrané druhy vojenských a protiteroristických mobilních robotických systémů vyrobených v Číně.

Jako první je uveden výrobek Strojně-elektrotechnického kombinátu LTD v Chu-Bej Chan-Dan, který je určen pro vizuální průzkum pomocí kamerového systému a mikrofonním systémem pro akustický průzkum, dále odpalovací rampou na střelbu obranných slzotvorných a kartáčových granátů. Při hašení požárů lze použít granát vytvářející tlakovou vlnu, která je účinná například při likvidaci požáru automobilů, zejména na hašení těkavých látek, například benzin. Na likvidaci teroristů lze použít dvousložkové aerosolové granáty s dvojitým ničivým účinkem, jak pomocí exploze a i následné dekomprese, efektivní zejména v uzavřených prostorech.



Obr. 7: Vícefunkční mobilní robotický systém Strojně-elektrotechnického kombinátu LTD v Číně.



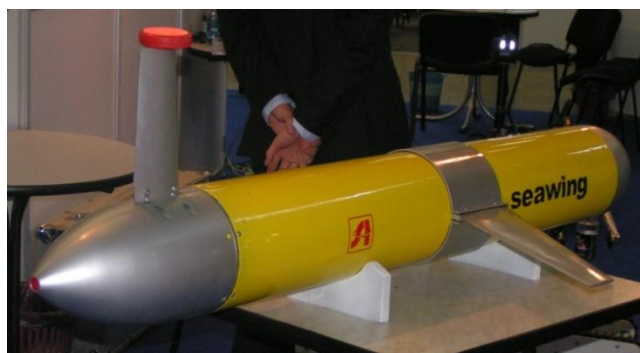
Obr. 8: Vícefunkční průzkumný mobilní robotický systém se strukturovaným pohybovým ústrojím HW LIZARD, Čína.



Obr. 9: Vícefunkční mobilní robotický systém určený pro manipulaci s nástražnými systémy, čínské výroby.



Obr. 10: Průzkumný vrtulníkový robotický systém čínské výroby.



Obr. 11: Vícefunkční podmořský průzkumný mobilní robotický systém čínské výroby.

Literatura

- [1] KVASNICA M.: Six-Component Force-Torque Sensing by Means of One Quadrate CCD or PSD Element, Proceedings of the 2nd International Symposium on Measurement and Control in Robotics, 1992, AIST Tsukuba Science City, Japan.
- [2] KVASNICA M.: Intelligent Sensors for the Control of Autonomous Vehicles, Proceedings of the 6th International Conference and Exposition on Engineering, Construction and Operation in Space and on Robotics for Challenging Environments - Space and Robotics 98, Albuquerque, New Mexico, April 1998, USA.
- [3] KVASNICA M.: Measurement in Engineering Construction and Control Operations in Space, ASCE Multi-Conference on Engineering, Construction, Operations, and Business in Space and on Robotics for Challenging Situations and Environment, Space and Robotics'2000, Albuquerque, New Mexico, USA.
- [4] KVASNICA M.: Improvement of Positioning Accuracy in Multi-Pod Parallel Structures, ASCE Multi-Conference on Engineering, Construction, Operations, and Business in Space and on Robotics for Challenging Situations and Environment Space and Robotics 2002, Albuquerque, New Mexico, February-March 2002, USA.
- [5] KVASNICA M.: Force-Torque Sensing in Authentization and Human Factor Failure Prediction Mezinárodní konference Bezpečnostní technologie, systémy a management BTSM 2007, Zlín, 12.-13.9.2007, Czech Republic. ISBN 978-80-7318-606-7.
- [6] Kvasnica M.: Algorithmic Approach for the Sampling of Six Degrees of Freedom Information Using Floating 2-D Coordinate Frame. Proceedings of the International Workshop on Robotics and Mathematics ROBOMAT 2007, Coimbra, Portugal, 17.-19. 9. 2007. ISBN: 978-989-95011-3-3.
- [7] Kvasnica M.: The Design of the Calibration Equipment for the Six Component Force-Torque Sensor. Proceedings of the International Congress Mechatronics and Robotics MiR 2007, Saint Petersburg, Russia, 02.-05. 10. 2007, Izdatělstvo Poligrafičeskij Komplex Lenexpo 2007.
- [8] Kvasnica M.: Six DoF Sensing in Identification and Authentication for Robotics. Proceedings of the 19th All-Russian Scientific-and-Technological Conference with International Participation EXTREME ROBOTICS 2008, April 8-9, 2008, Saint-Petersburg, Russia, Izdatělstvo LNII RTC 2008.
- [9] <http://www.lenexpo.ru>
- [10] <http://www.rtc.ru>

Trendy vývoje alternativních zdrojů energie a jejich začlenění do energetických systémů

Petr Mastný¹⁾, Lukáš Radil²⁾

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, Technická 2848/8, 616 00 Brno,

¹⁾ tel: +420 541149230, ²⁾ tel: +420 541149285

xradil01@stud.feec.vutbr.cz, mastny@feec.vutbr.cz

Abstrakt:

Článek popisuje využívané technologie v oblasti alternativních zdrojů energie, a to především v oblasti slunečních systémů (fotovoltaické a solární kolektory), větrné energetiky a palivových článků. Uvedené technologie jsou popsány z pohledu jejich vývoje a začlenění do energetických systémů. Dále jsou definovány možnosti využití alternativních zdrojů v energetické koncepci ČR a EU.

1. Úvod

Vítr, voda, Slunce, biomasa a zemské teplo – obnovitelné zdroje energie skrývající velký potenciál. V České republice se obnovitelné zdroje energie stávají jednou z hlavních priorit energetické politiky státu. Rostoucí energetická závislost členských států Evropské unie na třetích zemích a závazky ke snižování emisí skleníkových plynů směřují evropskou energetickou politiku k podpoře výroby elektřiny z OZE. Do roku 2010 se má z obnovitelných zdrojů krýt 21 % hrubé spotřeby elektřiny v EU.

Česká republika se podpisem Přílohy II Smlouvy o přistoupení ČR k EU zavázala vytvořit prostředí, které umožní, aby podíl elektřiny z obnovitelných zdrojů elektřiny na hrubé domácí spotřebě elektřiny byl do roku 2010 8% (v roce 2004 byl tento podíl 3,3%).

Hrubá výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů se v roce 2007 podílela na tuzemské hrubé spotřebě elektřiny 4,7%. Na celkové tuzemské hrubé výrobě elektřiny se hrubá výroba elektřiny z obnovitelných zdrojů podílela 3,9%.

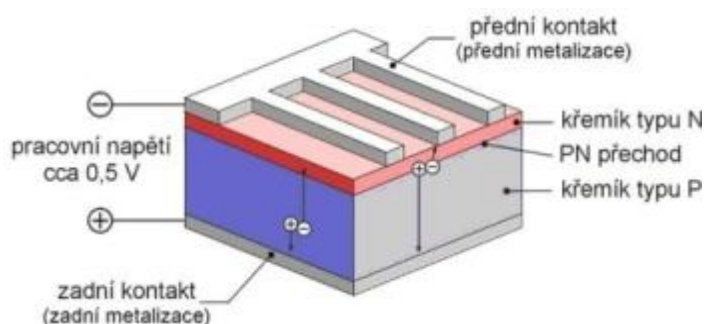
2. Využití sluneční energie

Největší vývoj, z výše uvedených energetických zdrojů, zaznamenalo v průběhu minulých tří let v ČR využívání solárních a fotovoltaických systémů. A především fotovoltaické systémy se stávají doménou v oblasti dynamiky rozvoje ve střední Evropě. V České republice se instalovaný výkon ve fotovoltaických aplikacích napojených přímo do rozvodné sítě zvýšil během posledních let několikanásobně. Vývoj fotovoltaických článků se dá rozdělit do tří období: [2]

- *První generaci* se nazývají fotovoltaické články využívající jako základ křemíkové desky. Dosahují poměrně vysoké účinnosti přeměny (16 až 19 %). Jejich výroba je relativně drahá (a to zejména z důvodu drahého vstupního materiálu – krystalického křemíku), ale přesto lze předpokládat, že budou ještě v několika dalších letech na trhu dominovat.
- Články *druhé generace* se vyznačují 100 krát až 1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou a jejími představiteli jsou např. články z amorfního a mikrokrystalického křemíku. S úsporou materiálu došlo v porovnání s články první generace k poklesu výrobních nákladů, avšak dosahovaná účinnost je obvykle nižší (pod

10%). Komerčně se články druhé generace objevily na trhu v polovině osmdesátých let.

- U článků *třetí generace* je hlavním cílem snaha o maximalizaci počtu absorbovaných fotonů a následně generovaných párů elektron – díra (viz. Obr. 1 – PN přechod), ale i maximalizace využití energie dopadajících fotonů. Existuje řada směrů, kterým je ve výzkumu věnována pozornost:
 - vícevrstvé solární články
 - termofotovoltaická přeměna, kde absorber je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
 - články využívají kvantových jevů v kvantových tečkách nebo kvantových jámách
 - prostorově strukturované články vznikající samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
 - organické články



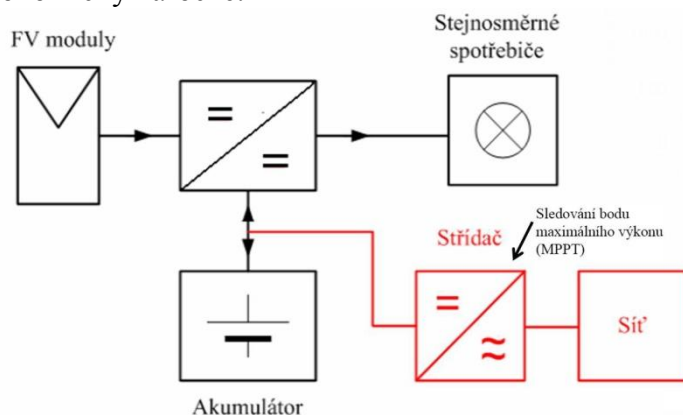
Obr. 1 Řez fotovoltaickým článkem – PN přechod

2.1 Fotovoltaické aplikace

Fotovoltaické systémy můžeme z hlediska aplikace rozdělit na:

- autonomní
- hybridní
- přímo připojené k síti

Fotovoltaické systémy mohou být nezávislé na rozvodné síti (grid-off) nebo připojené k veřejné rozvodné síti (grid-on). *Grid-off* systémy nejsou s rozvodnou sítí propojené a vyrobená elektrická energie se ukládá zpravidla do akumulátorů (baterií) pro pozdější využití (Obr. 2). Tyto systémy se využívají v místech, kde není elektrická energie k dispozici a její přivedení by bylo ekonomicky náročné.

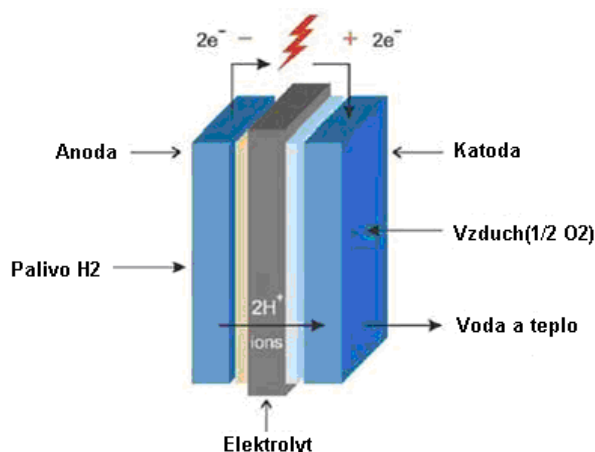


Obr. 8 Fotovoltaický systém grid-off

Z energetického hlediska mají největší význam systémy přímo připojené k síti (systémy grid-on). Fotovoltaický systém *grid-on* se skládá ze dvou základních částí, FV panelů a invertoru. V našich podmínkách je solární systém o výkonu 1 kW schopen vyprodukovat 900–1000 kWh elektrické energie za rok. V souladu s cíli EU by celkový instalovaný výkon solárních systémů v ČR měl do roku 2010 dosáhnout 84 MW a do roku 2020 541 MW. [3]

3. Palivové články

Palivový článek je elektrochemické zařízení vytvářející elektrickou energii. Jde o galvanický, k jehož elektrodám je přiváděno palivo (k anodě) a okysličovadlo (ke katodě). Princip výroby elektřiny v palivovém článku spočívá v dodávání paliva k anodě a okysličovadla ke katodě, taktak je vidět na Obr. 3. Mezi těmito dvěma neprodyšně oddělenými elektrodovými prostory se nachází elektrolyt. Na katodě se oxidační činidlo redukuje na anionty (O^{2-}), a ty pak reagují s H^+ ionty na vodu. Palivové články mohou operovat nepřetržitě, pokud se nepřerušuje přívod paliva a okysličovadla k elektrodám.



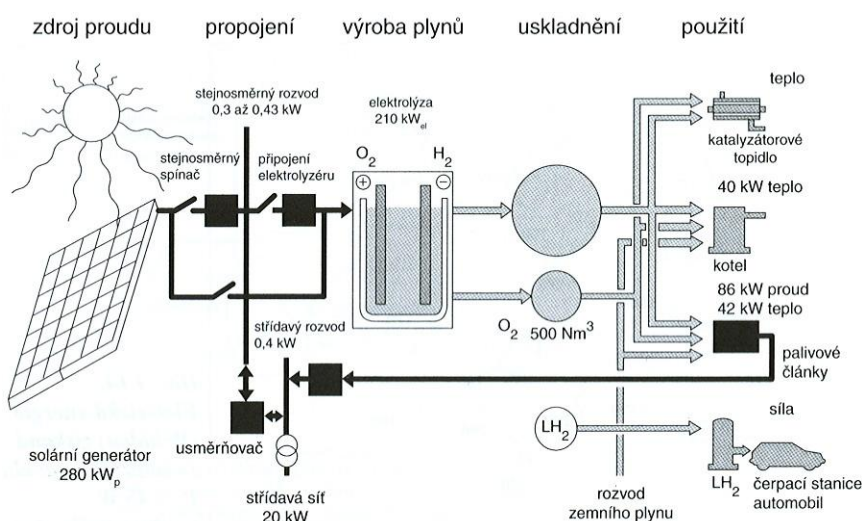
Obr.2 Princip funkce palivového článku

3.1 Rozdělení palivových článků

Palivové články lze rozdělit z několika hledisek, ale základní rozdělení je podle typu palivového článku: [4]

- alkalické články
 - poprvé byly použity jako energetické zdroje v kosmických lodích Apollo
 - mají nejrychlejší kinetiku katodové kyslíkové reakce
 - mají vysokou účinnost a energetickou kapacitu
 - mohou využívat jen čistý vodík
 - dodávaný kyslík musí být zbaven kysličníku uhličitého
- kyselinové články
 - jsou vyráběny v širokém výkonovém pásmu (1 kW až 5 MW)
 - kapalný elektrolyt má korozivní účinky
 - pomalá kinetika katodové reakce
 - použití především ve formě statických generátorů elektrické a tepelné energie
- články s tavenými karbonáty
 - nepotřebují pro reakce při vysokých teplotách katalyzátory elektrodových reakcí
 - mohou používat reformovaná paliva

- dosahují malé účinnosti a energetické kapacity
- statické elektrické a tepelné zdroje (10 kW až 10 MW)
- membránové (keramické) články
 - jejich vývoj začal nejpozději
 - mají nekorozivní elektrolyt – iontovýměnnou membránu
 - jednoduchá konstrukce
 - nejrychlejší kinetika anodové oxidace vodíku
 - vysoká účinnost a energetická kapacita
 - nejsou citlivé na kysličník uhličitý
- regenerativní membránové články
 - při dodávce paliva vyrábějí elektrickou energii nebo při dodávce energie mohou vyrábět vodík a kyslík
 - pro dodávku energie se využívá např. energie solární a větrná (Obr. 4)
 - dočasnou nevýhodou je vysoká cena těchto článků



Obr. 3 Kombinovaný systém pro využití vodíku ve fotovoltaickém systému

V současnosti se pozornost upíná na kyslíkovo-vodíkový palivový článek v rámci vodíkového pohonu automobilů. Vodík může být vyroben např. pomocí elektrolýzy vody a kyslík je obsažen v atmosféře. Skladování vodíku v automobilových nádržích je v neustálém vývoji díky tomu, že vodík je ve směsi se vzduchem vysoce výbušný. Moderní výzkumy ukazují na použití směsi železa a titanu jako stabilizátoru. Navíc účinnost celého cyklu (elektřina → vodík → elektřina) dosahuje asi 30-40 % (benzínové motory – 18 %).

4. Větrná energie

Větrná energetika ve světě i v České republice prošla za poslední období dynamickým rozvojem. Ještě v nedávné době bylo výjimkou instalování jednotky s výkonem 1 MW a nyní se běžně instalují jednotky s výkonem 2 – 3 MW. V souvislosti se zvýšením jednotkového výkonu klesly ceny řídicích systémů a zároveň se zvýšila jejich spolehlivost. Nové regulační systémy (např. „active-stall“) umožňují větrným elektrárnám pracovat s konstantním výkonem při proměnlivých rychlostech větru. [4]

V současné době se větrné elektrárny nacházejí na více než padesáti lokalitách v ČR, jejich nominální výkon se pohybuje od 0,004 až po 2 MW. Mezi výrobce technologie patří několik českých firem, u velkých výkonů to jsou především dodavatelé z Německa. V roce 2006 vyrobily větrné elektrárny na území ČR téměř 50 GWh elektrické energie, nejvíce na severo-

západě ČR a na střední Moravě. Na celkové výrobě elektřiny v ČR se větrné elektrárny podílely pouze 0,4 %, což je přibližně třetina průměrného podílu v zemích EU.

Země EU přijaly program rozvoje větrné energetiky již v roce 1980. Na základě úspěšných projektů, v Dánsku, Nizozemsku, Německu a Velké Británii, rozhodla Evropská unie v roce 2030 dosáhnout 100 000 MW instalovaných ve větrných elektrárnách. To je výkon, který má pokrývat 20 % celkové západoevropské spotřeby elektrické energie.

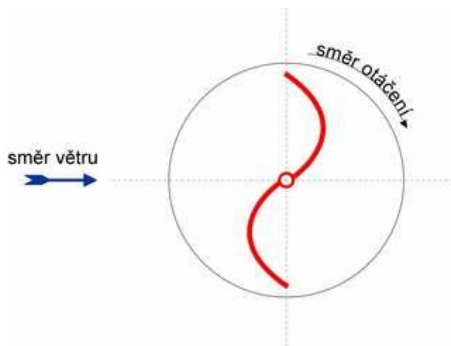
4.1 Větrné motory

Rozlišujeme dva základní typy větrných motorů:

- odporové
- vztlakové

U odporových rotorů (Obr. 5) klade plocha nastavená proti větru aerodynamický odpor a na plochu je vyvozována síla, která je mechanicky přeměňována na rotační pohyb. Jde o rotory, které se používaly především v minulosti, ale je nutno říci, že jeden z typů odporových rotorů nachází uplatnění i v současnosti – jde o Savoniův rotor.

Savoniův rotor je vhodný i pro málo větrná území. Rotor lze využít pro čerpání vody, zásobování pastvin, k cirkulaci vody v bazénech, zavlažování, odvodňování apod. Zvláště zajímavé je využití pro pohon tepelných čerpadel, pokud se podaří vyvinout přístroje pro variabilní počet otáček.



Obr. 4 Odporový rotor větrné elektrárny – Savonius

Také výroba stlačeného vzduchu může získat na významu, neboť stlačený vzduch má mnohostranné uplatnění a lze ho skladovat beze ztrát. Za příznivých povětrnostních podmínek s použitím generátoru je možné spolu se slunečními kolektory nabíjet akumulátory (Obr. 6), které slouží k napájení nízkonapěťové sítě. Tato varianta se používá k napájení nejnужnějších spotřebičů v loveckých, horských chatách, zahradních a lesních domcích.



Obr. 9 Kombinace Savoniův rotoru se solárním systémem

Vztlakové motory se nejčastěji vyskytují ve dvoulistém nebo třílistém provedení. Tento typ motoru využívá vztlakovou sílu na lopatce, tzn., že lopatka pracuje jako rotující křídlo. Složka vztlakové síly ve směru pohybu lopatky je hnací silou a vytváří kroučící moment.

Podle větrného atlasu ČR, vytvořeného Ústavem fyziky atmosféry Akademie věd ČR na základě podkladů Českého hydrometeorologického ústavu, je celoroční průměrná rychlost větru na našem území přes 4 m.s⁻¹ (ve výšce 10 m) a přes 5,3 m.s⁻¹ (ve výšce 30 m). Jako nejvhodnější lokality pro stavbu farem větrných elektráren lze považovat plochy 3 x 3 nebo 4 x 6 km v nadmořských výškách zpravidla nad 700 m (většinou však leží v chráněných krajinných oblastech, kde je zakázáno stavět). Až na řídké výjimky se energeticky příhodné lokality pro stavbu větrné elektrárny nacházejí v horských pohraničních pásmech a v oblasti Českomoravské vrchoviny. Podle předběžných odhadů by bylo možné v Krušných horách postavit 320 až 340 větrných elektráren o jednotkovém výkonu 300 až 500 kW, tj. celkem až 170 MW (výkon 1 bloku starší uhelné elektrárny). [1]

5. Závěr

Obnovitelné zdroje energie se postupně stávají nedílnou součástí energetické koncepce států EU. Jejich podíl na výrobě elektrické energie pozvolna roste. Je však nutné si uvědomit, že obnovitelné zdroje v současné podobě nevyřeší energetické potřeby, jsou však velmi vhodným doplňkem k energetickým zdrojům využívaných v současné době. Ať už se podíváme na fotovoltaiku, větrnou energetiku nebo palivové články, musíme bohužel konstatovat, že jsme stále někde na počátku vývoje těchto technologií. Samotné začleňování OZE do rozvodné soustavy je problematické. Vesměs se jedná o zdroje závislé na klimatických podmínkách a z toho vyplývá i jejich nepříznivý vliv na elektrizační soustavu – např. velmi těžce se predikuje dodávka energie z větrných elektráren. Důsledky výkonových výkyvů v síti jsou pak, vzhledem k propojenosti přenosových soustav, viditelné v celé Evropě.

V České republice nejsou ideální podmínky pro velký rozvoj větrných elektráren a fotovoltaických aplikací velkých výkonů, ale je možné budovat výkonově menší aplikace, které tak budou mít menší vliv na elektrizační soustavu. Je pravdou, že v současné době je v ČR poskytována OZE velká podpora i ze strany státu a to především ve formě dotačních programů, a to jak na realizaci projektů, tak ve formě dotované výkupní ceny elektřiny z těchto zdrojů.

Je nutné si uvědomit, že jen na obnovitelných zdrojích energie nelze postavit energetickou koncepci. Vývoj v této oblasti jasně ukazuje, že OZE nejsou nezanedbatelné, ale jejich nasazování se musí řídit zdravým rozumem. Budoucnost se jeví ve využití menších aplikací a ve spolupráci alternativní zdrojů – např. větrná elektrárny spolu se sluneční.

Samotný výzkum v oblasti OZE je v dnes zaměřen především na rozvoj technologií, což je úzce spojeno především se snahou o zvyšování účinnosti a snížení výrobních nákladů těchto energetických zdrojů.

Poděkování

Tento příspěvek prezentuje výsledky výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci projektu č. MSM0021630516.

Literatura

- [1] Mastný, P.: *Ekonomika provozu obnovitelných zdrojů energie*. EnergySpectrum, Issue 4, Vol. 2., 2007, s. 27-32, ISSN: 1214-7044, www.energyspectrum.net
- [2] Cenka, M.: *Obnovitelné zdroje energie*. FCC Public, Praha 2001, s. 208, ISBN: 80-901985-8-9
- [3] Mastný, P.; Macháček, J.; Matoušek, A. *Renewable Energy Sources in Combined Systems Online System for Measuring and Collecting Data*. International Journal of Energy. 2008. 1(3). p.5964. ISSN 19984316
- [4] Mastný, P.: *Malé zdroje elektrické energie*. Interní skripta UEEN VUT FEKT v Brně

Trendy ve světě polovodičových technologií

Vladislav Musil

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,

Ústav mikroelektroniky, Údolní 53, Brno

musil@feec.vutbr.cz

1. Úvod

Polovodičová technika (mikroelektronika) je již po pět desetiletí vedoucí oblastí elektroniky. Je spojena s vytvářením elektronických zařízení malých rozměrů (integrovaných obvodů) s velkou funkční schopností, vysokou spolehlivostí, malou spotřebou energie a nízkou cenou. Na jejím vzniku a vývoji se výrazně projevilo a projevuje úsilí po zmenšování rozměrů, hmotnosti a spotřebovaného výkonu (ruku v ruce s digitalizací elektronických systémů) a sám rychlý rozvoj mikroelektroniky je výsledkem rovnováhy mezi rozhodujícími faktory technologického a materiálového výzkumu, vývoje elektronických systémů, vývoje jejich aplikací a souvisejícími aktuálními ekonomickými aspekty.

Rostoucí integrace systémů v mikroelektronice je klíčem k realizaci moderních výrobků a současně zdrojem potřebných inovací. Trvalý tlak na další miniaturizaci mikroelektronických součástek umožňuje vznik nových technologických postupů, zejména v oblasti výroby a montáže.

2. Trendy současných polovodičových technologií

Bez moderních technologií výroby, řady nových materiálů a pokročilé litografie by byl další pokrok v oblasti integrovaných obvodů zcela nemyslitelný, integrované obvody svými rozměry dostávají do oblasti nanostruktur a technologie do oblasti nanotechnologií. Aktuální trendy současných polovodičových technologií se týkají

- a) vlastních integrovaných struktur a jejich zmenšování (nanostruktury)
- b) technologických procesů a příslušných technologických zařízení
- c) návrhu integrovaných obvodů a jejich testování
- d) ekonomie a spolehlivosti výroby

V oblasti technologií a materiálů nastupují následující trendy:

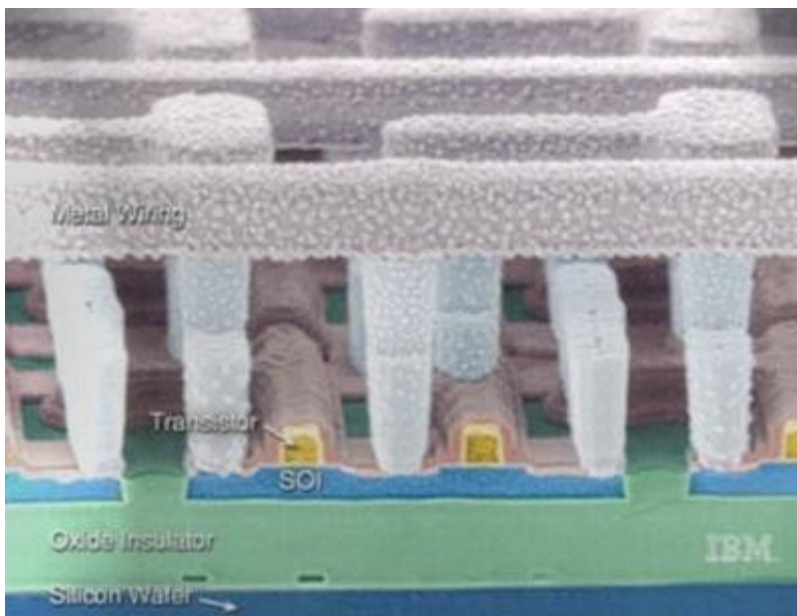
a) Měděné spoje. Již několik let se u nejsložitějších obvodů přechází od hliníkových spojů k měděným (např. Intel nahradil hliník mědí při přechodu na 130 nm výrobní technologii). Měď má kromě lepší vodivosti také schopnost tvořit užší spoje, a tím pádem fakticky umožňuje další miniaturizaci struktur. Mezi další výhody měděných spojů patří nižší ztrátové teplo, vyšší kmitočet přenášeného signálu a menší zpoždění signálů na spojích. Nevýhodou je komplikovaná technologie s několika mezivrstvami, aby se atomy mědi nedostaly do aktivních oblastí křemíku.

b) Nová dielektrika s větší (high-k) a menší (low-k) dielektrickou konstantou (než běžně používaný používaný oxid křemičitý SiO_2 , který má dielektrickou konstantu $k = 3,9$).

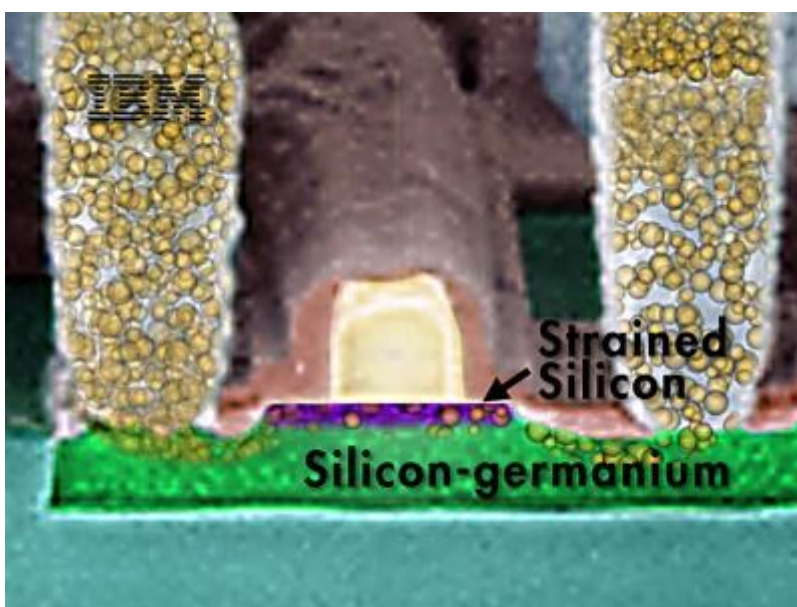
Low-k materiálů je celá řada, vybrat bylo nutné zejména s ohledem na prodloužení životnosti v současnosti používané technologie depozice z plynné fáze (CVD, Chemical Vapor Deposition). Např. u procesoru AMD64 (kanál 130 nm) bylo oxid křemičitý (dotovaný fluorem, FTEOS s $k = 3,6$) nahrazen vrstvou SiCOH s $k = 2,8$. Kombinace Low-k dielektrika a měděných spojů zmenšuje časovou konstantu RC a následně redukuje zpoždění (u zmíněného AMD64 se uvádí redukci zpoždění o 15-20%).

Materiál high-k nahrazuje hradlový oxid, poprvé použil Intel v technologii 45 nm, kde šlo o oxidy hafnia. Důvodem je jednak větší homogenita nových materiálů a jednak větší dielektrická konstanta má za následek lepší vlastnosti (větší transkonduktanci).

c) **Technologie SOI** (Silicon On Insulator), tj. „křemík na izolantu“. Používá hlavně firma IBM (např. pro IBM PC od 1999) a AMD. Princip SOI je poměrně jednoduchý – aktivní struktury (tranzistory) se od samotného substrátu (zbytku waferu) oddělí vrstvou izolantu, například oxidem křemičitým SiO_2 , na které je opět superčistá vrstvička křemíku. Sníží se tak parazitní jevy, svody proudu a čas nabíjení. Tranzistor je schopen dosáhnout rychlejšího přepínání, což se také pozitivně promítne na samotném dosažitelném kmitočtu procesoru. Nižší energie nutná ke spínání tranzistorů v technologii SOI zároveň snižuje spotřebu čipu - pro 90 nm výrobní proces se uvádí snížení až o 46% v případě statické spotřeby a snížení až o 38% v případě dynamické spotřeby (údaje firmy AMD). Užívá se na procesory i paměti. Nevýhodou SOI waferů je jejich vyšší cena, a to kvůli jejich náročnější výrobě (více operací).



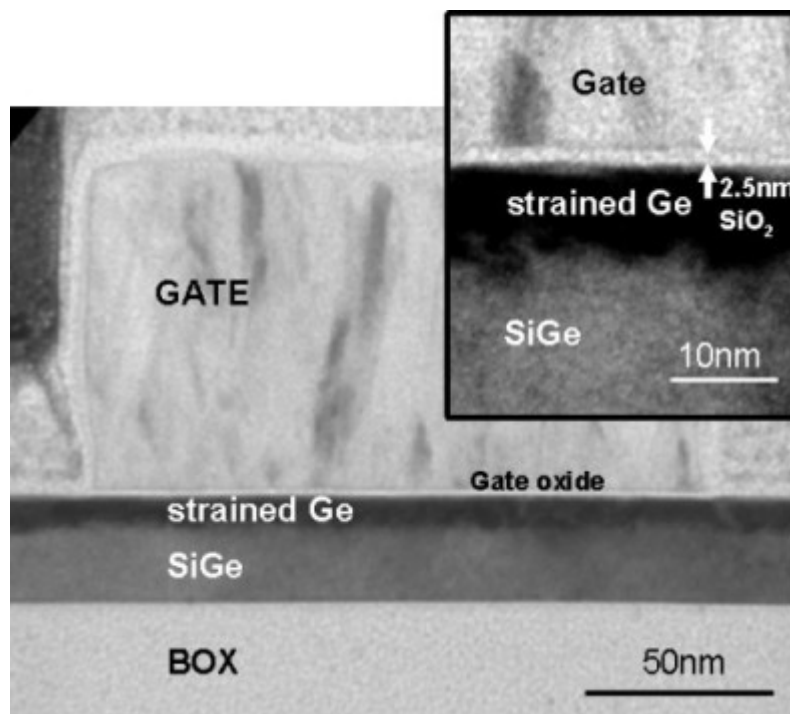
Obr. 1. Animace technologie SOI (podle www.ibm.com)



Obr. 2. Technologie předpjatého křemíku (podle www.ibm.com)

d) Technologie předpjetého křemíku (Strained Silicon, napnutý křemík) se používá běžně pro procesory (Intel i AMD), kde umožňuje významné zvýšení pracovních kmitočtů (pro paměti se používá méně). Technologie předpjetého křemíku je založena na napnutí vrstvičky křemíku v oblasti kanálu dotací substrátu germaniem (SiGe). Díky větším mezerám mezi atomy takto navázaného křemíku mají elektrony větší pohyblivost ve směru kanálu (až o 70-80%). Rychlost se zvýší až o 35% a v případě tzv. Dual Stress Lines až o 40% (u 65 nm výrobní technologie).

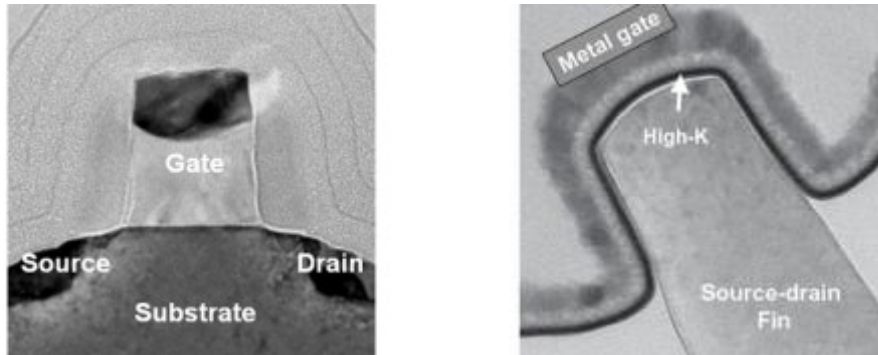
e) Technologie předpjetého germania (Strained Germanium) je obdobná předchozí technologii. V případě podkladu křemík-germanium a naneseného germania je mřížka naopak mírně stlačená. Pohyblivost elektronů a děr je ovšem u germania zhruba 3x vyšší než v případě křemíku. Problémem je podstatně horší rozsah pracovních teplot germania a také samotné zpracování, které nutně musí vycházet z používaných technologií výroby. S nasazením se počítá až od 32 nm výrobní technologie a IBM předpokládá řádové zvýšení rychlosti procesoru.



Obr. 3. Technologie předpjetého germania (podle www.ibm.com)

f) Kovové hradlo (Metal gate) nahrazuje současné používané z polykrystalického křemíku (poly-Si). Jsou zvládnuty silicid niklu NiSi nebo titanid niklu NiTi. Rychlost tranzistoru díky technologii kovových hradel má být podle AMD vyšší o 20-25%.

g) Tranzistory s více hradly (Multi-Gate transistors) se očekávají s nástupem technologie 32 nm. Díky širšímu kanálu (v porovnání s typickým tranzistorem) dosahuje tento tranzistor lepších vlastností (rychlost, transkonduktance a svody). Podle údajů firmy Intel tranzistor podle obr. 4 v technologii 65 nm vykazoval zvýšení výkonu (agregovaný ukazatel) až o 45% a proud tranzistoru ve vypnutém stavu se snížil 50x oproti typickému tranzistoru (také díky high-k dielektriku).

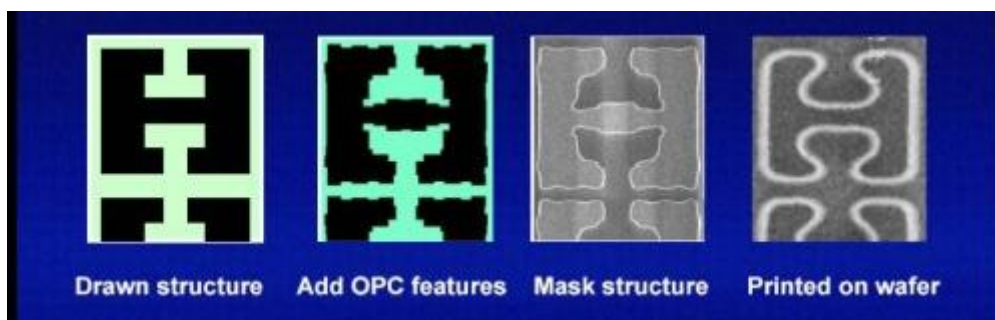


Obr. 4. Tranzistorové struktury firmy Intel: klasický (jednohradlový) a tříhradlový tranzistor (podle www.intel.com)

h) Změny v oblasti fotolitografie

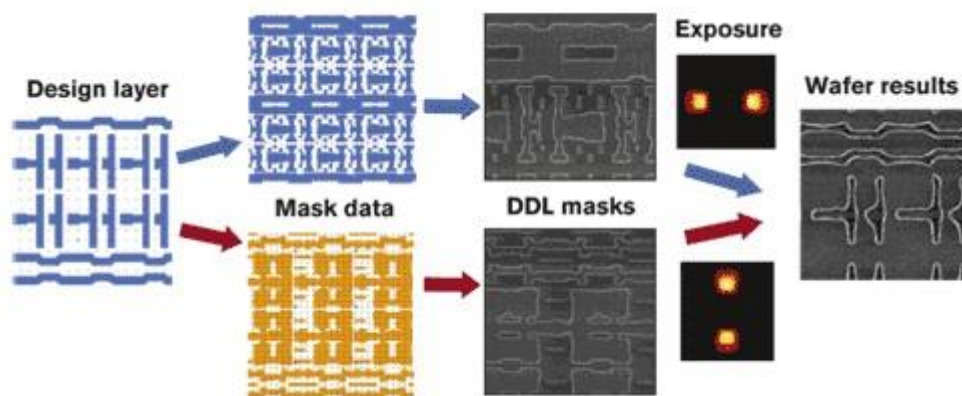
Se zmenšující se výrobní technologií se řada změn odehrála i na poli fotolitografie. V současnosti se při výrobě procesorů běžně používá vlnové délky 193 nm z excimerových laserů – DUV (Deep UltraViolet) fotolitografie. Dříve očekávaný přechod na záření 157 nm se asi nebude konat a výrobci přejdou přímo na EUV (**EUV litografie** - (Extreme UltraViolet - používání ultrafialového světla s extrémně krátkou vlnovou délkou, předpokládá se 13,5 nm, v dlouhodobějším horizontu).

Protože vlnová délka již dávno „podkročila“ hranice velikosti výrobní technologie a „velikost“ vzorů, které se pomocí této vlnové délky tvoří, je následkem řada deformací oproti (vzorům a rozměrům) na fotolitografické masce. Proto je dnes nutné používat řadu korekčních technik, především **Optical Proximity Correction** (korekce jevů blízkosti – laterální expoziční), která je založená na (obvykle programové) úpravě fotolitografické masky takovým způsobem, aby část, která bude námi cíleně ozářena, měla přesně požadovaný tvar. Díky řadě optimalizací masky se minimalizuje zkreslení a potlačují nedostatky současné DUV fotolitografie (viz obr. 5).



Obr. 5. Optical Proximity Correction (podle www.intel.com)

Technika fázového kontrastu (Phase Shift Mask) Využívá interference a změny fáze k zlepšení kontrastu a umožňuje zvýšit rozlišovací schopnost fotolitografie DUV. **Metoda dvojí** (dvojitá) **expoziční** (Double Exposure) je založena na efektu dvojitého osvětlení waferu (bohužel vyžaduje dodatečné masky).



Obr. 6. Metoda dvojité expozice (podle www.intel.com)

Dalším z kroků k prodloužení života DUV fotolitografie s vlnovou délkou 193 nm je **imerzní fotolitografie**, která je založena na optických vlastnostech waferu pokrytého tenkou vrstvou vody nebo jiné vhodné kapaliny s požadovanými vlastnostmi.

Klíčovou oblastí jsou v současné době **fotorezisty**, které fundamentálně limitují možnost dalšího zmenšování struktur, a do této oblasti jsou dávány velké prostředky.

i) Přejít na wafer 450 mm. Ke změně velikosti waferů dochází v polovodičovém průmyslu zhruba každých 12 až 15 let. Tento trend ovšem není nadále udržitelný (z finančních a technologických důvodů), předpokládá se zpomalení. Podíl čipů na 300 mm waferech je dnes celosvětově přibližně 25%. Počátek přechodu k 450 mm waferům Intel plánuje k výrobní technologii 22 nm, pro kterou se také předpokládá nasazení EUV litografie.

j) Ekonomické hledisko. Na nově zaváděné technologie a materiály je kromě potřebných parametrů (stálost při procesních teplotách a potřebné materiálové vlastnosti, kladen zejména požadavek nízké ceny a možnost nasazení se současnými výrobními technologiemi. Už jen z finančních důvodů není možné pro nový „vhodný“ materiál měnit stávající výrobní postupy (technologický konzervativismus) a takové technologie zatím nemají velkou šanci se komerčně prosadit, zejména pokud bude existovat jiná varianta/alternativa udržující potřebný pokrok ve výrobě a dostatečnou konkurenceschopnost.

k) Použití memristorů jako paměťových prvků pamětí SRAM.

l) Tranzistory s křemíkovými nanotrubicemi - technologie, která by v horizontu 20 let mohla být komerčně nasazena (podle optimistických předpokladů).

3. Některé společenské souvislosti technického pokroku

Měřítkem technologické úrovně jsou **paměti DRAM** a **paměti FLASH**. Dosahuje se u nich největší hustoty integrace. Často jsou označovány jako „hnací motor mikroelektroniky“. V posledních letech se zvyšovala kapacita pamětí RAM čtyřnásobně přibližně každé tři roky (v literatuře se hovoří o tzv. **Moorově zákoně**, Moore's Law):

Složitost čipů	- index růstu 4 x za 3 roky
Minimální rozměr struktury	- index růstu 0,5 x za 3 roky
Plocha čipu	- index růstu 2 x za 6 roků

Význam Moorova zákona je velký, často je vnímán jako barometr polovodičového průmyslu, měřítko pro hodnocení inovace a pokroku. Především jde o výrok, který je srozumitelný i lidem, kteří nejsou odborníci v mikroelektronice. Moorův zákon podnítil vznik několika doplňků, z nichž velmi názorný je tzv. **Rockův zákon** (někdy označován jako druhý Moorův

zákon): **Investice do nových zařízení na výrobu čipů se zdvojnásobuje každé 4 roky.** Tento zákon překvapivě dobře platí a má zásadní význam pro ekonomiku polovodičového průmyslu.

Metcalfův zákon (Metcalf's Law) odpovídá na otázku vztahu technologií a jejich uživatelů. Zakladatel firmy 3Com Robert Metcalfe si všiml, že nové technologie získávají na hodnotě pouze, pokud je používá mnoho spotřebitelů. Definoval to takto: „**Míra užitečnosti dané technologie se rovná čtverci počtu uživatelů.**“

Čím více uživatelů získá určitý software, síť, standard nebo třeba kniha, tím větší hodnotu získává. Tím více nových uživatelů bude mít zájem, tím více hodnoty bude technologie přinášet a tím rychlejší bude její adaptace. Kdyby byl telefon majetkem pouze dvou lidí na světě, mohli by volat pouze jeden druhému, a hodnota této technologie by tak nebyla velká. V současnosti je však telefon přístupný naprosté většině populace v naší společnosti a jeho užitečnost je tedy nekonečně větší.

Příkladem může být Internet, který existoval po mnoho let, ale kritické masy dosáhl až v roce 1993. Od té doby je jeho růst vskutku exponenciální. Teprve od té doby se datuje jeho popularita a příliv podnikatelských investic (Mirovský).

Zákon rozvratu (Law of Disruption). Pokrokem vědy a techniky dochází ke vzniku a zvětšování mezery mezi technologickým vývojem a vývojem společnosti, ekonomiky a politického systému. Tento proces lze jednoduše definovat jako zákon rozvratu: „**Zatímco společenský, politický a ekonomický systém se mění lineárně, technologie se mění exponenciální rychlostí**“ (Mirovský).

4. Závěr.

Návrh a výroba integrovaných obvodů bude stále složitější. Současné a připravované technologie představují řadu alternativ a řešení ještě na řadu let. Díky stálému růstu trhu informačních technologií a růstu trhu s polovodičovými součástkami se máme v příštích letech na co těšit. Sledovat řešení stále složitějších problémů v oblasti technologie výroby bude jistě stále zajímavější.

V současnosti je reálná vyhlídka na zhruba 15 let pokračování dosavadního trendu polovodičových technologií. Velmi zajímavá je používaná fyzika a chemie. Objevují se mimořádné aplikace. Potvrzuje se vize Richarda Feynmana: „Tam dole je hodně místa“.

Literatura

Waser, R. (editor): Nanoelectronics and information technology. Wiley-VCH (2003), ISBN 3-527-40363-9.

Luryi, S. - Xu, J. - Zaslavsky, A.: Future trends in microelectronics. The road ahead. Wiley (1999), ISBN 0-471-32183-4.

Luryi, S. - Xu, J. - Zaslavsky, A.: Future trends in microelectronics. The nano millenium. Wiley (2002), ISBN 0-471-21247-4.

<http://public.itrs.net>, The International Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association (SIA), San Jose.

<http://www.intel.com>

<http://www.ibm.com>

<http://www.isi.edu/mosis/>

<http://www.semtech.org/public/about.htm/>

<http://www.te.ri.ac.uk/europractice/>

<http://tima-cmp.imag.fr/>

<http://www.pcmp.caltech.edu/>

<http://nano.xerox.com/nano/>

<http://www.icsi.berkeley.edu/>

Série článků Lukáše Petříčka:

http://www.svethardware.cz/art_doc-0153C5141A320803C12571EF003F6BAF.html

http://www.svethardware.cz/art_doc-5B411DA7F9D60629C12571EF00432466.html

http://www.svethardware.cz/art_doc-78830B7B72554177C12571EF00445C38.html

http://www.svethardware.cz/art_doc-D04B232296C20BA2C12571EF00461BB9.html

MIROVSKÝ, J.: Zákonitosti vývoje informačních a komunikačních technologií.

http://mirovsky.com/text%5CSbornik_VSE_F3_ZS2001.doc

KULHÁNEK, P.: Memristor – čtvrtá pasivní elektronická součástka.

http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_02_mem.php

OSTER, G.F.: The Memristor: A New Bond Graph Element; Transactions of the ASME (1972) 1–4. Je na http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_02/Oster.pdf

TOUR, J.M. - HE, T.: The fourth element; Nature 453 (2008) 42–43. Dostupné na http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_02/Tour.pdf

<http://www.roznovskastredni.cz/biolek/index.php>. Zdařilý web se základními informacemi o memristorech

<http://www.nanotechnologie.cz> nebo <http://www.nanoklastr.cz>: dobré poučení o nanotechnologiích.

Řízení motorů RX64 pro polohovou adaptivitu mobilního robotického systému

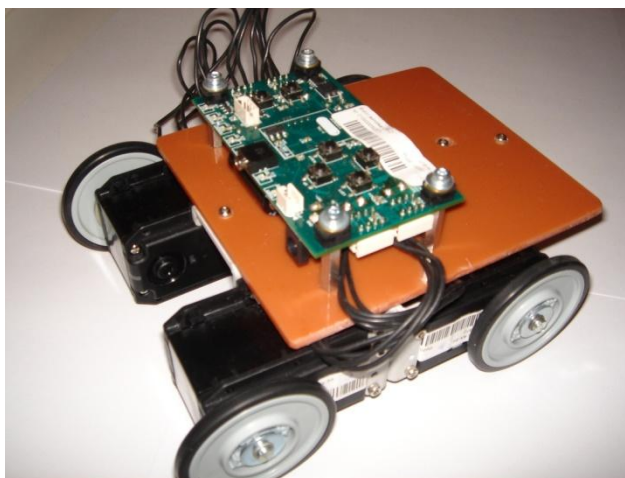
Pavel Neckář

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky

P.Neckar@email.cz

Abstrakt:

Článek popisuje lokomoční část mobilního robotu složeného z motorů typu RX 64. Nadefinování příkazů pro dálkové ovládání je řešeno ve vývojovém prostředí Sharp-Develop s využitím jazyka C#, který je volně šiřitelný. Řízení motorů RX 64 včetně jejich propojení se sériovým rozhraním počítače je realizováno pomocí jednotky CM2+, která umožňuje jednoduché uživatelské ovládání.



Obr 1. Mobilní robot s motory RX 64

Úvod

Mobilní roboty tvoří oblast robotiky zabývající se roboty schopnými se v daném okolním prostředí a čase přemísťovat.

Z pohledu použitých subsystémů robotu – mechanického, elektronického, systémů vnitřní a vnější zpětné vazby, lokomočního a dalších mluvíme o robotu jako o mechatronickém systému.

Mobilní roboty je možno dělit podle řady kritérií. Mezi základní patří rozdělení na dva typy:

- Autonomní
- Dálkově řízené

Popis motorů RX 64 – základní parametry

Citlivost 0,29°

Podpora kontinuálního otáčení či otáčení v rozmezích 0°- 300°

Napájení 12 – 21V

Maximální odebíraný proud 1,2 A

Rozsah pracovních teplot -5 – 85°C

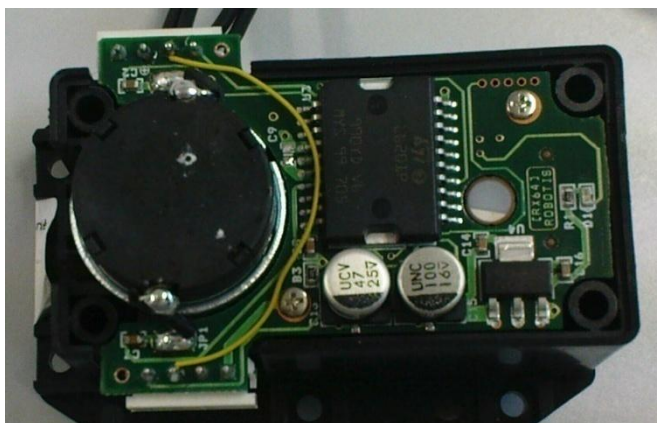
Rozhraní mezi motory–asynchronní sériová komunikace RS 485 (8bitů, 1 stop bit, žádná parita)

Maximální počet připojených motorů je 254

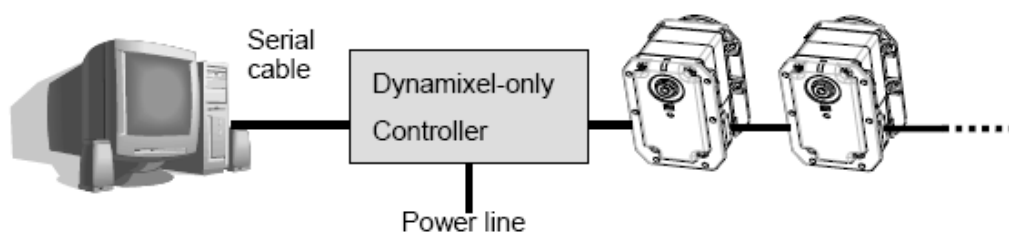
Komunikační rychlost 7343 bps – 1 Mbps

Složení motoru RX 64

- řídicí elektronika
- snímač polohy otáčení
- stejnosměrný motor
- ocelový ozubený převod



Obr. 2 Řídicí elektronika motoru RX 64



Obr. 3 Zapojení motorů RX 64 s řídicí jednotkou a PC

Komunikace mezi řídicí jednotkou a motory

Komunikace probíhá pomocí paketů, tyto pakety se rozlišují na instrukční paket a stavový paket. Instrukční paket je odeslán z řídicí jednotky pro nastavení parametrů motoru. Stavovým paketem odpovídají motory na přijetí paketu a potvrzují nastavení.

Definování instrukčního paketu

FF-FF-ID-DÉLKA-INSTRUKCE-PARAMETR 1 ... PARAMETR N-KONTROLNÍ SUMA
FF FF – je definováno jako hlavička paketu, oznamuje začátek nového paketu řídicí elektronice motoru

ID – číslo motoru, pro které je paket určen

DÉLKA – je délka paketu, počítána z parametrů + 2

INSTRUKCE – definování povelu pro motor

PARAMETR – je definováno jako zpřesnění instrukce („jak použít paket“)

KONTROLNÍ SUMA – součet ID, délky, instrukce a parametrů. Slouží jako kontrola správnosti odeslání paketu, jestli nedošlo k chybě.

Definování stavového paketu

FF-FF-ID-DÉLKA-CHYBA-PARAMETR 1 ... PARAMETR N-KONTROLNÍ SUMA

CHYBA – Pokud dojde k chybě při zpracování nebo odeslání můžeme ze stavového paketu přesně určit typ chyby.

Ostatní části paketu jsou odpovídající instrukčnímu paketu.

Adresová tabulka paměti v motoru RX 64

Kontrolní tabulka obsahuje informace o stavu a operacích RX-64. RX-64 je ovládaný zápisem hodnot do kontrolní tabulky a status je kontrolován čtením hodnot z kontrolní tabulky.

Data v tabulce ukazují nastavení továrních hodnot motorů RX 64 při připojení ke zdroji elektrické energie.

Popis jednotlivých hodnot v kontrolní tabulce:

Address 0x00,0x01 – modelové číslo 0X0040

Address 0x02 – verze firmware

Address 0x03 – unikátní ID číslo motoru, které jej identifikuje

Address 0x04 – přenosová rychlost tzn. komunikační rychlost Speed (BPS) = $2000000 / (\text{Address}4 + 1)$

Address 0x05 – vrácení zpoždovacího času, je to čas mezi odesláním a přijmutím paketu

Address 0x06,0x07,0x08,0x09 – úhlový operační limit, cíl musí být v limitu

Address 0x0B – nejvyšší teplotní pracovní limit RX-64

Address 0x0C,0x0D – nejvyšší a nejnižší napětí

Address 0x0E,0x0F, 0x22,0x23 – maximální kroutící síla, pracuje v tzv. volném módu. Pokud připojíme RX-64 ke zdroji je z paměti EEPROM zkopírována hodnota nastavení kroutivého momentu do paměti RAM.

Address 0X10 – navrácení paketu. RX motor navrátí stavový paket po příjmu instrukčního paketu

Address 0x14~0x17 – kalibrace- nelze měnit, je nastavena přímo pro daný potenciometr

	Address (hexadecimal)	Name	Description	Access	Initial Value (Hexadecimal)
EEPROM Area	0 (0X00)	Model Number(L)	Lowest byte of model number	R	64 (0X40)
	1 (0X01)	Model Number(H)	Highest byte of model number	R	0 (0X00)
	2 (0X02)	Version of Firmware	Information on the version of firmware	R	-
	3 (0X03)	ID	ID of Dynamixel	RW	1 (0X01)
	4 (0X04)	Baud Rate	Baud Rate of Dynamixel	RW	34 (0X22)
	5 (0X05)	Return Delay Time	Return Delay Time	RW	250 (0XFA)
	6 (0X06)	CW Angle Limit(L)	Lowest byte of clockwise Angle Limit	RW	0 (0X00)
	7 (0X07)	CW Angle Limit(H)	Highest byte of clockwise Angle Limit	RW	0 (0X00)
	8 (0X08)	CCW Angle Limit(L)	Lowest byte of counterclockwise Angle Limit	RW	255 (0XFF)
	9 (0X09)	CCW Angle Limit(H)	Highest byte of counterclockwise Angle Limit	RW	3 (0X03)
	11 (0X0B)	the Highest Limit Temperature	Internal Limit Temperature	RW	80 (0X50)
	12 (0X0C)	the Lowest Limit Voltage	Lowest Limit Voltage	RW	60 (0X3C)
	13 (0X0D)	the Highest Limit Voltage	Highest Limit Voltage	RW	240 (0XF0)
	14 (0X0E)	Max Torque(L)	Lowest byte of Max. Torque	RW	255 (0XFF)
	15 (0X0F)	Max Torque(H)	Highest byte of Max. Torque	RW	3 (0X03)
	16 (0X10)	Status Return Level	Status Return Level	RW	2 (0X02)
	17 (0X11)	Alarm LED	LED for Alarm	RW	38 (0X24)
	18 (0X12)	Alarm Shutdown	Shutdown for Alarm	RW	38 (0X24)
RAM Area	24 (0X18)	Torque Enable	Torque On/Off	RW	0 (0X00)
	25 (0X19)	LED	LED On/Off	RW	0 (0X00)
	26 (0X1A)	CW Compliance Margin	CW Compliance margin	RW	0 (0X00)
	27 (0X1B)	CCW Compliance Margin	CCW Compliance margin	RW	0 (0X00)
	28 (0X1C)	CW Compliance Slope	CW Compliance slope	RW	32 (0X20)
	29 (0X1D)	CCW Compliance Slope	CCW Compliance slope	RW	32 (0X20)
	30 (0X1E)	Goal Position(L)	Lowest byte of Goal Position	RW	-
	31 (0X1F)	Goal Position(H)	Highest byte of Goal Position	RW	-
	32 (0X20)	Moving Speed(L)	Lowest byte of Moving Speed	RW	-
	33 (0X21)	Moving Speed(H)	Highest byte of Moving Speed	RW	-
	34 (0X22)	Torque Limit(L)	Lowest byte of Torque Limit	RW	ADD14
	35 (0X23)	Torque Limit(H)	Highest byte of Torque Limit	RW	ADD15
	36 (0X24)	Present Position(L)	Lowest byte of Current Position	R	-
	37 (0X25)	Present Position(H)	Highest byte of Current Position	R	-
	38 (0X26)	Present Speed(L)	Lowest byte of Current Speed	R	-
	39 (0X27)	Present Speed(H)	Highest byte of Current Speed	R	-
	40 (0X28)	Present Load(L)	Lowest byte of Current Load	R	-
	41 (0X29)	Present Load(H)	Highest byte of Current Load	R	-
	42 (0X2A)	Present Voltage	Current Voltage	R	-
	43 (0X2B)	Present Temperature	Current Temperature	R	-
	44 (0X2C)	Registered Instruction	Means if Instruction is registered	RW	0 (0X00)
	46 (0X2E)	Moving	Means if there is any movement	R	0 (0X00)
47 (0X2F)	Lock	Locking EEPROM	RW	0 (0X00)	
48 (0X30)	Punch(L)	Lowest byte of Punch	RW	32 (0X20)	
49 (0X31)	Punch(H)	Highest byte of Punch	RW	0 (0X00)	

Tabulka 1. Složení paměti motoru a jednotlivých adres

Address 0x18 – dosažitelná kroutící síla

Address 0x19 – Nastavení LED

Address 0X1E,0x1F – požadovaná úhlová pozice pro motor – počáteční poloha

Address 0x20,0x21 – pohybová rychlost – nastavení úhlové rychlosti výstupního pohybu k cílové pozici. Nastavení této hodnoty je maximálně 0x3ff s výstupní úhlovou rychlostí 114RPM, toho je docíleno jen s dostatečným napájením.

Address 0x24,0x25 – „stávající pozice“ – aktuální úhlová pozice výstupu motoru

Address 0x26,0x27 - „stávající rychlost“ – aktuální úhlová rychlost výstupu motoru

Address 0x28,0x29 – „stávající zavádění dat do paměti“ – veličina je nahrána do motoru

Address 0x2A – Stávající napájení – elektrické napájení aplikované na motoru. Hodnota napětí je 10x za vteřinu aktualizována. Příklad 10V je reprezentováno jako 100 (0x64).

Address 0x2B – Stávající teplota – vnitřní teplota je udávána ve stupních Celsia

Address 0x2C – registrační instrukce – nastavení hodnoty 1, kdy instrukce je připsána do REG_WRITE. Nastavení 0 po tomto dokončení připiše instrukci akčního příkazu.

Address 0x2E – pohyb – nastaví jedničku, pokud se motor pohybuje vlastní silou

Address 0x2F – zamknutí – když nastavím 1 tak pouze adresy 0x18 až 0x23 mohou být zapáány. Toto uzamknutí může odemknout pouze vypnutí napájení.

Address 0x30,0x31 – tyto adresy upravují nejnižší možnou dodávku energie do motoru. Počáteční hodnota je nastavena 0x20 a maximální hodnota je nastavena 0x3ff.

Řídící jednotka CM 2+

CM 2+ je vyhodnocovací zařízení, používané k řízení motorů RX-64
Procesorové vybavení:

ATmega-128

Manufacturer : Atmel

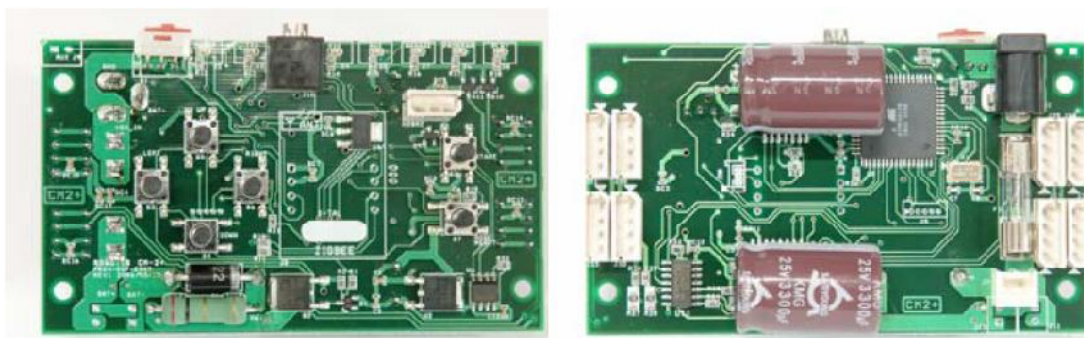
Flash memory : 128KByte

SRAM : 4KByte

EEPROM : 4KByte

UARTs : 2

CLOCK : 16MHz



Obr. 4 Řídící jednotka CM 2+

PC interface – Propojení s PC je umožněno pomocí RS232 sériového portu. Uživatel může upravit či stáhnout program a datové soubory pro používání tohoto propojení.

Napájení – Požadované napájení je v rozmezí 12 – 16V. Energie dodávaná do CM2+ je dodávaná i do motorů z jednoho zdroje elektrické energie. Požadovaný proud pro CM2+ je 50mA. Ale příjem této energie musí být upraven i pro ostatní motory.

CM2+ struktura má RS 485 komunikační port užívaný ke komunikaci s motory a RS 232 používá ke komunikaci s PC,

Ovládání

Nastavování a ovládání motorů je prováděno za pomoci programového vybavení dodávaného výrobcem a to pod názvem RobotTerminal. Program je specifickým příkazovým řádkem, ve kterém definujeme příkazy pro jednotlivé motory, příklady příkazů můžeme vidět na obr.4.

```

DUMP(D) : Dump control table.
ID [ID_NUM] : Set ID of dynamixel.
CID [ID_NUM] : Change Control ID.
READ [ADDR][LEN] : Read data. ex)Read 10 2 (Read from 0x10, length 2)
WRITE [ADDR][DATA].. : Write data. ex)Write 14,1 (Write 1 at 0x14)
REG_WR [ADDR][DATA].. : Register write instruction
ACTION : Action REG_WR instruction
Go [POSITION][SPEED] : Goto the position with the speed.
HEX [NUM][NUM]... : Transmite raw data. ex)Hex FF FF 01 03
RESET : Dynamixel Reset.
PING [NUM] : ex) Ping NUM ID dynamixel.
SWR [ADDR][LEN][ID][DATA]...[ID][DATA]... : Sync Write.
SCAN [NUM] : SCAN linked dynamixel in 0*NUM in current baud rate.
LED [NUM] : Blink LED of NUM ID. 'B','N' for ID change. 'Q' for Quit.
BAUD [NUM] : Set baud rate ex) BAUD 22(57600BPS), BAUD 1(1MBPS)
SEARCH : Search ID and baudrate of all linked dynamixels.
Update [START_ID] [END_ID] : Dynamixel firmware update.(system user only)

Copyright ROBOTIS CO.,LTD.

[CID:001(0X01)] _

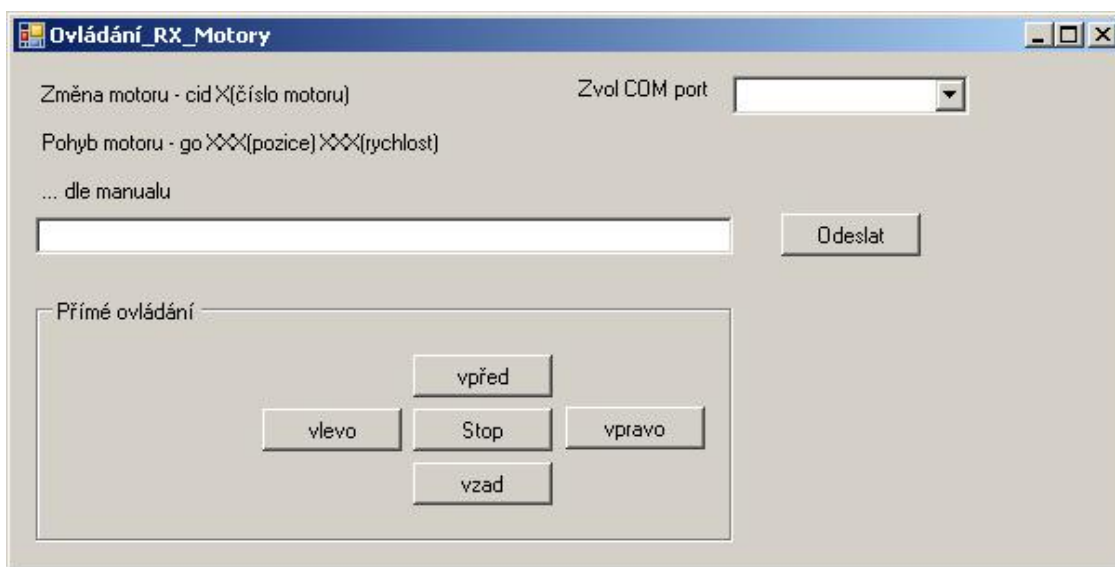
```

Obr. 5 Použité funkce pro ovládání motorů přes RobotTerminal

DUMP – vytiskne kontrolní tabulku námi zvoleného motoru
ID – pomocí tohoto příkazu nastavujeme ID motoru
CID – přepnutí na jiný motor
READ – při vypsání adresy a velikosti se zobrazí nastavení dané adresy
WRITE – zápis resp. změna nastavení adresy
REG_WR – zápis instrukce pomocí adresy a dat (využívá tzv. safe módu) zvolená adresa a data se do této adresy zapíšou, ale provedou se až po volání funkce ACTION
Go – instrukce pro otáčení motoru ve smyslu nastavení pozice a rychlosti
HEX – funkce využívaná pro převod hodnot z desítkové do hexadecimální a naopak
RESET – provede reset motoru a nastavení všech jeho parametrů do továrního nastavení
PING – instrukce pro ověřování správné komunikace mezi motorem a řídicí jednotkou
SWR – funkce využívající nastavování více motorů najednou
SCAN – zjišťuje počet zapojených motorů k řídicí jednotce
LED – pomocí této funkce může nastavovat LED diody na motoru, tovární nastavení je definováno na reakci při vzniku chyby
BAUD – měníme rychlost přenosu dat
SEARCH – vyhledá připojené motory
Update - slouží pro přehrání firmwaru motorů

Programové vybavení pro podvozek složený z motorů RX 64

Příkazový řádek, jehož struktura je specifikována výrobcem byl použitý i v programovém vybavení pro podvozek mobilního robotu, kde byl zvolen jednoduchý systém tlačítek pro ovládání pohybu vpřed, vzad, vlevo a vpravo. Na základě funkce jednotlivých tlačítek si mohou studenti ověřit snadné ovládání pohybu motorů, porovnat strukturu příkazového řádku a tím porozumět ovládání motorů RX 64.



Obr. 6 Software pro mobilní podvozek s využitím motorů RX 64

Popis programového vybavení:

Zvol COM port – funkce detekuje porty připojené k počítači a student si zvolí ten port, ke kterému je připojena řídicí jednotka.

Příkazový řádek – je obdobný s RobotTerminalem a využívá stejné příkazy.

Přímé ovládání – slouží k ovládání robotického podvozku, stiskem tlačítka se vykoná pohyb dle specifik tlačítka.

Literatura:

[1] ROBOTIS: CM-2+ MANUAL (ENGLISH) [online]. [cit.:neuveдено] dostupný z WWW <http://www.robotis.com/zbxe/?mid=software_en&category=7471&document_srl=5442>

[2] ROBOTIS: RX-64 MANUAL(ENGLISH) [online]. [cit.:neuveдено] dostupný z WWW <http://www.robotis.com/zbxe/?mid=software_en&category=7471&document_srl=5438>

Moderní metody řízení synchronních strojů s permanentními magnety

Pavel Rech

Katedra elektroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB-TU Ostrava,

17. listopadu 15, Ostrava-Poruba

pavel.rech@vsb.cz

Abstrakt:

Příspěvek seznamuje posluchače se základními vlastnostmi, principy a problematikou řízení synchronních strojů s permanentními magnety. Vysvětluje funkci těchto moderních strojů včetně jejich vlastností, příkladů užití, výhod i nevýhod. Popsány jsou rovněž základní principy a možnosti regulace synchronních motorů s permanentními magnety. Stručně jsou zmíněny možnosti bezsenzorové regulace. Pohon bez snímače otáček může být postaven na některé z metod využívající, nebo nevyužívající matematického modelu stroje, popřípadě na metodách založených na bázi umělé inteligence.

1. Úvod

Elektrické regulované pohony tvoří velmi důležitou složku dnešního moderního průmyslu a mnoha jiných zařízení, s nimiž se každý z nás setkává v běžném životě. Například pohony výtahů, ventilátorů, hybridních automobilů, automatických bran či garážových dveří, ale i různých jiných hnaných zařízení. Běžný uživatel nemusí ani tušit, z čeho se zmíněné zařízení skládají a jak fungují. Jedním z moderních elektrických střídavých strojů je také synchronní motor s permanentními magnety. Tento stroj má mnoho výhod, ale bez vhodné metody řízení se není schopen ani rozběhnout.

V dnešní době dochází k bouřlivému rozvoji digitálních mikroprocesorových prostředků. Poskytují dostatečný výpočetní výkon pro mnohem složitější metody řízení. Zejména jsou vyvíjeny metody regulace bez snímače otáček. Otáčky jsou v těchto metodách odhadovány prostřednictvím nějakého systému (estimátor, pozorovatel) z měřených či rekonstruovaných veličin statorových proudů a napětí.

Velmi zajímavá je oblast odhadu parametru stroje, případně veličin jako jsou okamžité otáčky nebo poloha, s využitím metod patřících do oblasti umělé inteligence. Do této oblasti patří zejména fuzzy logika a umělé neuronové sítě. Fuzzy logika je založena na logickém rozhodování podobně, jako když pracovník obsluhy lingvisticky rozhoduje, které operace provede, v jakém pořadí, jakou mírou atd. Základem umělých neuronových sítí je hrubý model lidského mozku, čili skupina vzájemně propojených umělých neuronů. Takto vzniklá a vytrénovaná síť je schopna měnit své výstupy v závislosti na aktuálních a případně i minulých hodnotách vstupů. Výhodou umělých neuronových sítí je možnost reakce i na vzory na něž nebyla natrénována. Síť společně s fuzzy logikou dovedou řídit i nelineární systémy s nimiž si klasické regulátory poradí jen velmi obtížně.

Současné vývojové trendy v oblasti pohonů jsou dány silnými prostředky digitální techniky i hardwarovými částmi. Prostředky digitální techniky umožňující vznik nových metod řízení a hardwarové části, tedy kvalitnější snímače, spínací prvky, nové stroje naproti tomu modernizují hardwarové prvky pohonů. Nezapomínejme, že celkové parametry systému jsou dány všemi bloky a omezení záleží zejména na nejslabším prvku.

2. Synchronní motory s permanentními magnety

Vlastnosti a výhody synchronních motorů s permanentními magnety

Klasické synchronní stroje jsou stroje, u nichž se otáčí rotor stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru a rotor obsahuje budící vinutí stroje napájené přes kroužky stejnosměrným proudem. Naproti tomu synchronní motory s permanentními magnety (SMPM) mají sice stejný stator, ale rotor je tvořen permanentními magnety (PM) na bázi vzácných zemin. Speciální slitiny pro PM jsou nejčastěji SmCo (samarium-kobalt) nebo NdFeB (neodym-železo-bor). Materiály dosahují magnetická indukce od 0,8 do 1,2 T (běžný ferit asi 0,3 až 0,4 T). Vznik a rozvoj SMPM je dán právě vývojem materiálů pro PM.

Koncepce SMPM má oproti klasickým synchronním motorům mnoho výhod. Hlavní spočívá v tom, že motory nepotřebují budící výkon a mají tedy vyšší účinnost. To je však současně i menší nevýhoda, protože pro provozování těchto strojů nad jmenovitou rychlostí potřebujeme snížit magnetický tok z PM, to učiníme přidáním složkou statorového proudu tvořící magnetickou indukci opačného směru. Důležitější pro životnost stroje je nepřítomnost sběracích kroužků, s nimi současně mizí i jiskření a brzdící moment z těchto kroužků. Odstraněním budícího vinutí se rovněž odstraní ztráty vznikající průchodem proudu tímto vinutím. Veškeré ztráty způsobené elektrickým proudem tedy vznikají ve statorovém vinutí a to je možné daleko lépe chladit. Tím jsou dány důvody, proč jsou SMPM lehčí a menší, srovnáme-li je se synchronními motory stejného výkonu.



Obr. 1 Příklady SMPM

Druhy SMPM

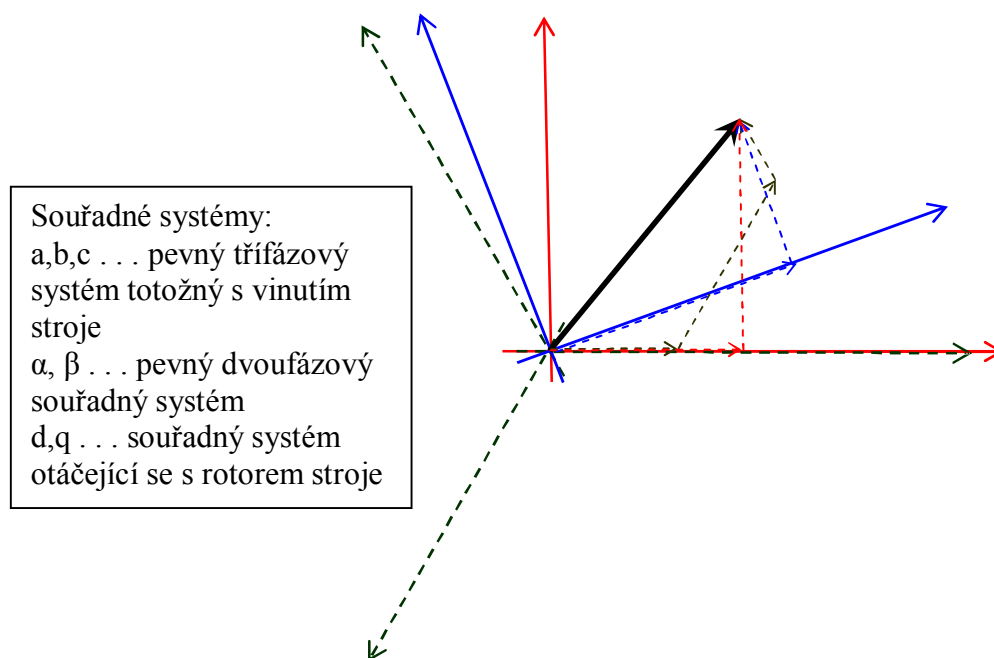
PM lze umístit ve stroji těmito způsoby:

- na povrchu rotoru
- v jádře rotoru

První způsob umístění lze přirovnat k hladkému rotoru synchronního stroje. To znamená, že rozdíl mezi příčnou a podélnou reaktancí je takřka zanedbatelný a moment motoru je tvořen synchronním momentem. Umístěním PM do jádra rotoru vytvoříme SMPM, jenž se chová jako synchronní motor s vyjádřenými póly a celkový moment stroje je dán kromě synchronního i reluktančním momentem.

Matematický model SMPM

Pro potřeby regulace je nezbytné znát matematické vyjádření popisující chování SMPM. Jak už bylo řečeno stator těchto strojů se skládá z tří-fázového vinutí a každá fáze je posunuta o 120° v prostoru roviny kolmé na osu stroje. Vektor statorového magnetického toku je tedy generován třemi průběhy proudů posunutými o 120° elektrických v čase. Ovšem naprosto stejný vektor můžou vytvořit i dvě složky virtuálního proudu. Právě této možnosti se využívá, protože to výpočetním prostředkům ušetří jednu rovnici. Obě složky reprezentující statorový magnetický tok jsou poté vektorově natočeny do souřadného systému, který rotuje stejně jako rotor stroje. Výhoda zmíněného natočení spočívá v tom, že se pak střídavé veličiny chovají jako stejnosměrné, a tedy i chování celého střídavého stroje je podobné stejnosměrnému. Transformace lze provést i pro jiné veličiny – napětí, proudy, toky. Rozložení vektoru ukazuje obr. č. 2.

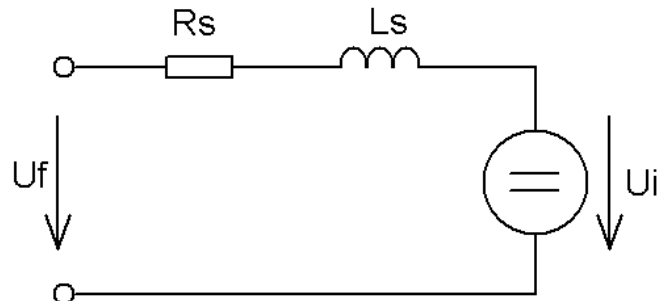


Obr. 2 Znáznornění vektoru v různých souřadných systémech

Rovnice popisují stroj v systému souřadnic dq předpokládají následující zjednodušení:

- trojfázové napájení je harmonické a souměrné
- statorové vinutí je prostorově symetricky rozložené a má stejné elektrické parametry
- magnetizační charakteristika je lineární
- není brán zřetel na skin efekt ani ztráty v železe

Rovnice SMPM vzniknou z náhradního schématu pro jednu fázi vinutí a z pohybové rovnice stroje.



Obr. 3 Náhradní schéma jedné fáze statoru

Rovnice popisující SMPM:

$$u_d = i_d R_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r p L_q i_q \quad (1)$$

$$u_q = i_q R_s + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r p (L_d i_d + \Psi_{PM}) \quad (2)$$

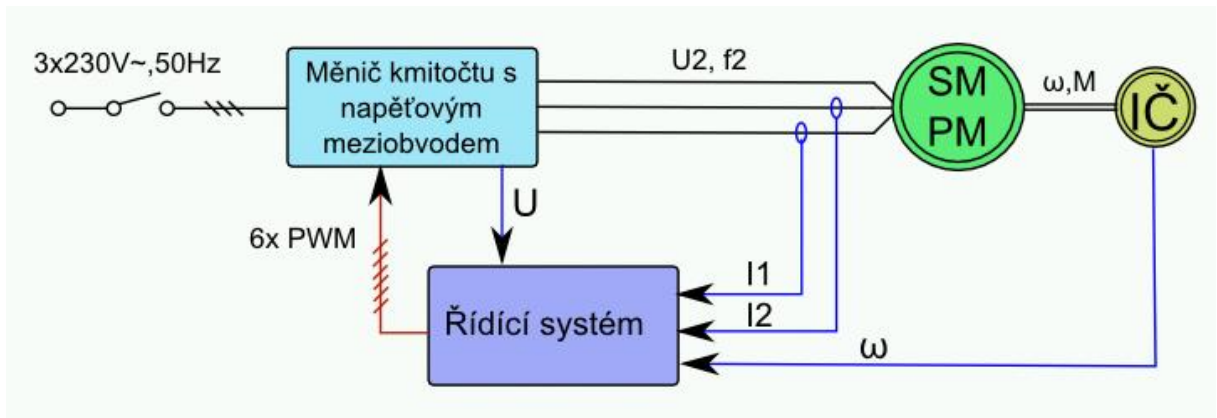
$$M_e = \frac{3p}{2} [\Psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_z) \quad (4)$$

Kromě odporu a indukčnosti jedné fáze obsahuje první i druhá rovnice členy popisující vliv mezi d a q složkou. Druhý vztah zahrnuje i člen zohledňující PM. Poslední rovnice ukazuje, že elektromagnetický moment stroje vzniká součinem magnetických toků a proudů, které jsou na sebe kolmé.

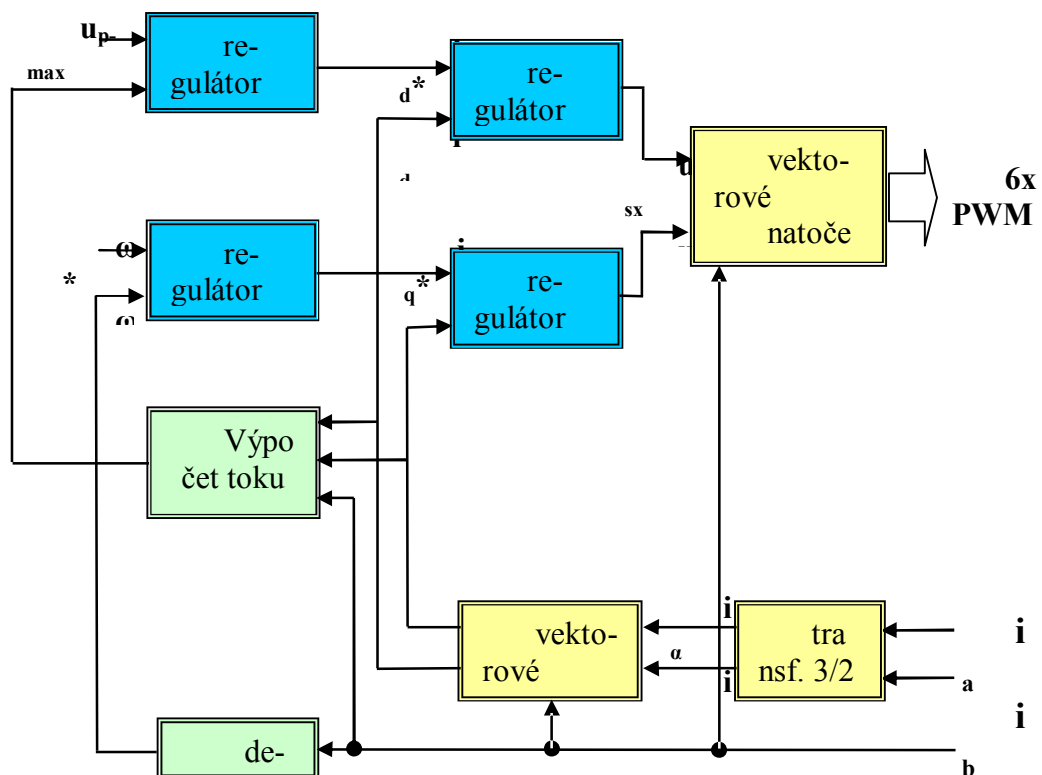
3. Řízení SMPM

Regulace SMPM je založena na znalosti matematického modelu stroje, vektorových transformacích a podmínkou je znalost okamžité hodnoty polohy, otáček, magnetických toků, statorových proudů a napětí stroje. Proudů stačí měřit ve dvou fázích. Proud třetí fáze lze vypočítat, pokud není vyveden střed vinutí. Statorové napětí můžeme určit z měřeného napětí v meziobvodu a ze spínací kombinace střídače. Otáčky stroje mohou být vypočítány ze změny polohy rotoru, kterou měří inkrementální snímač.



Obr. 4 Schéma pohonu s SPM

Po nastavení parametrů regulační struktury zadává uživatel pouze žádanou rychlost. Parametry regulační struktury jsou následující: proporční a integrační konstanty regulátorů, horní a dolní omezení regulátorů a velikost napětí u_{pmax} při němž začíná regulační schéma stroj odbuzovat. Celá regulační struktura se skládá z podřazených proudových smyček. Na jejichž vstupech jsou žádané hodnoty z nadřazených regulátorů otáček i toku a skutečné hodnoty změřeny proudovými čidly a převedeny do rotorového souřadného systému. Nadřazený regulátor otáček získává první vstupní informaci z inkrementálního čidla otáček po derivaci úhlu ε a druhá je uživatelem stanovená žádaná hodnota. Podobně regulátor toku dostává skutečnou hodnotu toku z výpočtového bloku a žádaná je nastavena parametry stroje.



Obr. 5 Schéma pohonu s SPM

4. Bezsenzorová regulace SMPM

Bezsenzorová regulace je jednou z nejmodernějších variant, kterou lze řídit SMPM. Výhody bezsenzorové regulace jsou zejména ve větší odolnosti pohonu, v nezměněném momentu setrvačnosti a samozřejmě v tom, že odpadá cena snímače, jež může být zejména v případě malých strojů srovnatelná s cenou motoru.

Existuje mnoho způsobů, jak určit z měřených veličin statorových proudů a napětí polohu, případně otáčky rotoru. Některé využívají matematický model motoru a bloky pro určení magnetického toku, jiné jsou založeny na některé z metod umělé inteligence. Existuje také skupina metod, které určují polohu rotoru z měřeného injektovaného signálu, tedy využívají nesymetrii stroje. Všechny metody mají své kladné i záporné stránky.

Umělé neuronové sítě

Umělé neuronové sítě jsou založeny na základních principech zpracování informací lidským mozkem. Ovšem zatímco mozek se skládá řádově ze stovek miliard neuronů, které jsou mezi sebou propojeny i tisíci spoji, tak umělé neuronové sítě obsahují pouze desítky až stovky neuronů. Je tedy zřejmé, že se umělá obdoba neuronových sítí se ani zdaleka neblíží té přirozené. Koneckonců na vytvoření tak složitého systému jako je lidský mozek by nám nestačily ani nejvýkonnější počítače světa. I přes jednoduchost umělých sítí oproti biologickým jsou základní schopnosti podobné. Patří sem schopnost natrénovat chování neznámého systému z určitého množství vstupních a výstupních vzorů. Při trénování si tedy síť vytváří souvislosti mezi vstupními a výstupními vzorky dat, a čím je těchto vzorků více, tím je reakce sítě přesnější. Natrénovaná síť se může chovat dynamicky, v tom případě její vstupy či výstupy závisí nejenom na okamžité kombinaci vstupních veličin, ale i na předchozích vstupních vzorcích. Zajímavou vlastností neuronových sítí je, že mají schopnost si něco pamatovat, ale nemají paměť jako například počítače. Tato schopnost je implementována uvnitř vysoce paralelní struktury, jejíž prvky spolupracují. Mezi další výhody neuronových sítí patří i to, že jsou téměř nezávislé na výpadku malého množství neuronů, nebo na změně parametrů. Dalšími vlastnostmi je zevšeobecnění informace a eliminace šumu. Existuje mnoho typů umělých neuronových sítí, mnoho aktivačních funkcí a značné množství trénovacích algoritmů. Z toho plyne, že variant je opravdu hodně.

Fuzzy logika

Fuzzy logika je systém pravidel, který přiřazuje logickým výrokům určitý stupeň příslušnosti k tzv. fuzzy množině. Logická proměnná tedy může nabývat plynule hodnot z určitého intervalu, nejčastěji 0 až 1. Hlavní rozdíl od klasické výrokové a predikátové logiky, v níž je striktně dáno, zda je výrok splněn či nikoliv. Princip fuzzy logiky souvisí s vyjádřením pojmů, jako např.: trochu, přibližně, málo. Přesněji řečeno, fuzzy logika umožňuje vyjádřit částečnou příslušnost k fuzzy množině. Výhody fuzzy logiky jsou: jednoduchá implementace a manipulace s pojmy, se kterým člověk běžně pracuje a pomocí nichž se v reálném světě vyjadřuje.

Postup vyhodnocování fuzzy logikou je následující. Nejprve se provede fuzzifikace to znamená, že se určí příslušnost vstupních dat k fuzzy množinám (jak moc do nich vstupní vzorky patří nebo nepatří). Dále následuje tzv. fuzzy inherence, neboli postup umožňující automatické rozhodování na základě vyjádřených pravidel typu – při splnění této podmínky následuje rozhodnutí. Zmíněným postupem vzniknou jiné fuzzy množiny, s nimiž se v závěru provede proces defuzzifikace. Termín označuje převedení výstupních fuzzy množin na hodnotu.

Injekční metody

Skupina injekčních metod je založena na naprosto jiném principu získání polohy rotoru. Využívá se různých vlastností elektrických strojů, které jsou většinou v jeho matematickém modelu zanedbávány. Jedním z možných způsobů provedení je superponování napět'ového signálu k napájecímu napětí stroje. Tento signál vytvoří ve stroji složku proudů stejného kmitočtu. Po změření fázových proudů je nutné pomocí filtrů získat tento superponovaný signál a poté lze z něho určit polohu stroje patřičným algoritmem. Signál může být injektován do stroje v souřadnicích $\alpha\beta$ či dq a může mít spojitý i impulsní charakter. Nevýhodou této metody je zvlnění momentu stroje injektovaným signálem a zvyšování ztrát stroje.

Závěr

V laboratořích katedry pohonů VŠB-TUO jsou neustále vytvářeny nové práce, které se zabývají detaily z doposud popsané problematiky. Jakým směrem se budou v budoucnosti vyvíjet metody popsané v předchozím textu, lze nyní jen těžko odhadovat. Pravděpodobně se využijí stále zlepšující se možnosti mikroprocesorové techniky a trendem budou velice složité, ale univerzální a adaptabilní metody řízení.

Literatura

- [1] Štulrajter, M.: *Bezsímačový polohový servomechanizmus so synchronným motorom s permanentnými magnetmi*, Žilina, září 2006
- [2] Brandštetter P.: *Střídavé regulační pohony – Moderní způsoby řízení*, Ostrava, 1999

Moderní metody zpracování obrazu strukturou FPGA

Soběslav Valach

Ústav automatizace a měřicí techniky, FEKT VUT v Brně, Kolejní 2906/4, 612 00, Brno
valach@feec.vutbr.cz

Abstrakt:

Článek popisuje možnosti a metody návrhu systémů pro zpracování obrazových dat využívající struktury FPGA a zaměřuje se na rychlou a jednoduchou implementaci softwarového a firmwarového řešení doplněného o praktické výsledky.

1. Úvod

Moderní metody strojového vnímání mají specifické požadavky na získávání a zpracování dat. Současné metody jsou dobře propracované jak z hlediska snímací techniky (kamerové čipy, objektivy, přenos a ukládání dat), tak i vlastní algoritmizace. Obecnou nevýhodou je nutnost zpracovat velký objem dat a to co možná za nejkratší časový úsek.

Klasické přístupy využívají struktury, nebo systémy založené na kombinaci kamera a vyhodnocovací systém - obvykle v podobě platformy PC AT nebo signálových procesorů, kde se provádí algoritmus předepsaný programátorem. Výhodou takto koncipovaných řešení je bezesporu snadná dostupnost a velká míra flexibility řešení. Na druhé straně je nutné zmínit některé nevýhody výše uvedené koncepce, které znemožňují praktické nasazení v některých aplikacích, kde je třeba zpracovávat velké množství obrazových dat v reálném čase, při velmi nízké spotřebě energie a omezeném prostoru celého řešení.

2. Metody řešení

Zpracování výpočetně a datově náročných úloh se obvykle provádí na výkonných multi-processorových počítačích, systémech řazených do clusterů, obvodech typu ASIC, DSP, systolických sítích nebo programovatelných strukturách typu FPGA a FPOA.

V článku se dále pouze zaměříme na systémy využívající programovatelné struktury typu FPGA. V první řadě si řekněme, co nám nabízí programovatelné struktury hradlových polí a jaké jejich vlastností můžeme použít v systémech vyhodnocujících obrazovou informaci.

Tabulka 1: Porovnání výhod a nevýhod řešení založených na FPGA

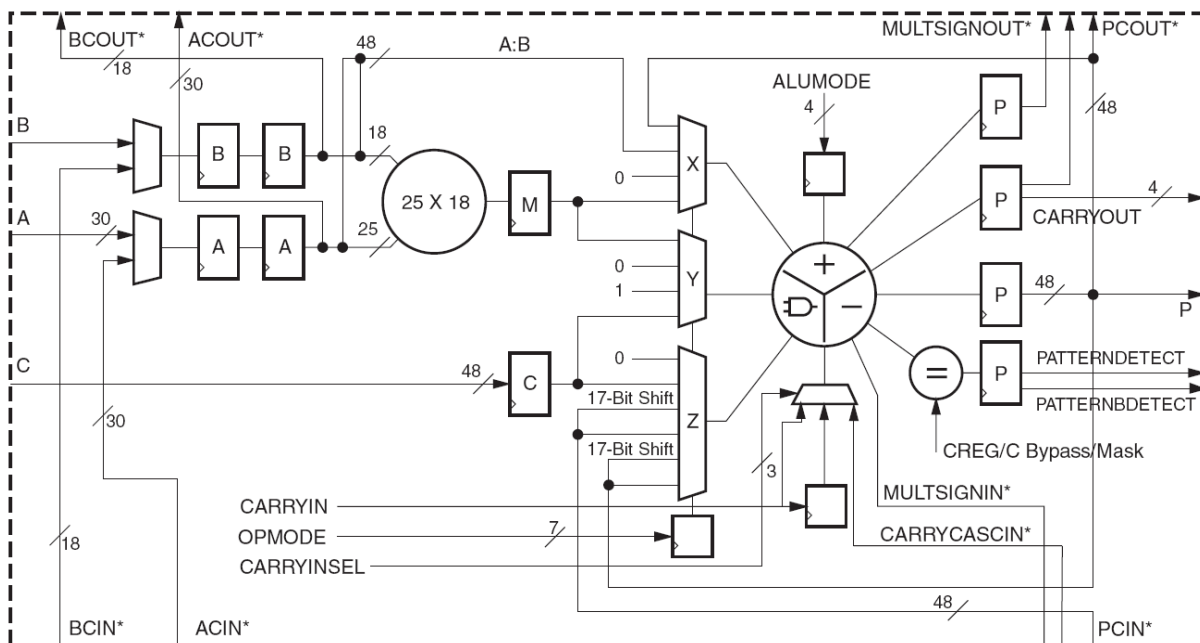
Výhody	Nevýhody
100% uživatelský návrh řešení	Znalost speciálních nástrojů
Vysoký výpočetní výkon	Časová náročnost návrhu řešení
Paralelní zpracování úlohy	Zdlouhavá verifikace, existují úlohy, které není možno paralelizovat
Obvykle nižší spotřeba energie	
Obvykle nižší cena řešení	Drahé vývojové nástroje
Kompaktní řešení	Vyšší cena vývoje
Množství vstupů a výstupů	
Rychlé interní paměti	Omezená velikost interních paměťových bloků
Podpora DSP operací	Absence floatových jednotek
Clock management	
SoftCore procesory	Nižší výkon soft jader
Integrovaná hard jádra procesorů	Nižší výkon hard jader než u klasických řešení

Z tabulky 1. vyplývá, že návrh systému založený na strukturách FPGA poskytuje prakticky neomezené možnosti ale za cenu využití nástrojů a znalostí, které běžně programátor ve

své praxi nepoužívá. V případě, kdy nelze zvolený algoritmus paralelizovat je implementace architekturou FPGA nevhodná.

Ve své podstatě se jedná o návrh paralelní struktury, využívající jednotek integrovaných v FPGA rozšířených o další funkcionalitu pomocí propojovacích sítí, logických bloků a klopných obvodů.

Jednou z hlavních jednotek, používaných v oblastech zpracování signálu a tedy i zpracování obrazu jsou DSP bloky. Příklad DSP bloku integrovaného v hradlovém poli řady Virtex 5 je uveden na obrázku 1.



Obr. 1: DSP48E blok hradlového pole Virtex 5

DSP blok s označením DSP48E nabízí tyto základní funkce:

- násobičku 25 x 18 bitů
- MACC operace
- dynamický výběr operací v ALU jednotce (součet, rozdíl, logické operace)
- kaskádní řazení DSP bloků s podporou přenosu výsledků až 96bitů
- SIMD operace 4 x 12 bitů nebo 2 x 24 bitů v jednom DSP48E bloku
- 48-bitovou logickou jednotku
- barrel shifter
- rychlý 48-bitový čítač
- detekce vzorů
- zaokrouhlování výsledků, saturace, přetečení a podtečení
- podpora multiplexování dat v čase

V hradlovém poli Virtex 5 může DSP blok pracovat do frekvence 550MHz, přičemž počet jednotek v jednom pouzdru se pohybuje od desítek až po 1056 bloků.

Z výše uvedeného stručného popisu vyplývá, že FPGA je schopno řešit výpočetně náročné úlohy rychleji než klasické procesorové systémy. Na druhé straně je jasné, že výhody použití těchto struktur jsou omezeny vývojovými nástroji a schopnostmi návrháře cílové platformy.

Návrhy a vývoj komponent, které budou zpracovávat obrazová data musí zohlednit fakt, že hradlové pole díky masivnímu paralelismu, nebude mít možnost přistupovat do paměti v neomezeném rozsahu jako klasické procesory. Zpracování dat bude probíhat proudově v pipeline jednotkách, obvykle bez možnosti vrátit se zpět a vidět mezivýsledky nebo výsledky algoritmu.

Návrh vlastních komponent vychází z možností architektury FPGA. Jedná se především o využití vnitřních zdrojů (blokové paměti, DSP bloky, logické bloky), stanovení vhodného časování a pochopitelně z omezení prostorových nároků uvnitř čipu na požadovanou funkci.

Pro tvorbu vlastního designu se obvykle používají programovací jazyky typu HDL (VHDL, Verilog). Jazyky HDL neposkytují návrháři dostatečnou formu abstrakce pro takto složité algoritmy, což značně komplikuje práci a snižuje flexibilitu řešení, kdy i jednoduché změny a jejich ověření zaberou nemálo času. Výstupem HDL jazyka je zápis v RTL formě, který je výborný pro verifikaci jednoduchých struktur typu čítač, multiplexer, stavový automat ale zcela nevhodný pro verifikace algoritmů zpracovávajících obrazovou informaci.

Oblast verifikace výsledků se řeší pomocí simulací na testovacích obrazcích a dále pomocí testovacích vektorů předkládaných komponentám zpracovávající obrazový tok. Jak již bylo popsáno výše, jazyky VHDL a Verilog prakticky neumějí pracovat se složitými soubory typu bitová mapa, JPEG. Načítání obrazových dat do simulací je proto komplikované a testovací obrazce se musejí předpřipravit v jiném vhodném formátu. Další velkou nevýhodou je, že simulace probíhá na úrovni RTL, tedy se provádí funkce na logické úrovni mezi kombinační a sekvenční logikou. Jako příklad uveďme prostý součet dvou 32-bitových čísel A a B s 33-bitovým výsledkem C. V jazyku VHDL bude zkrácený zápis vypadat následovně:

```
Port (
  A, B : in  STD_LOGIC_VECTOR (31 downto 0);
  C   : out STD_LOGIC_VECTOR (32 downto 0));
end adder;
architecture Behavioral of adder is
begin
  C <= ('0'&A) + ('0'&B);
end Behavioral;
```

Vstupem pro simulaci nebude funkce „+“ ale systém stovek devíti-stavových logických funkcí, které simulátor bude postupně vyhodnocovat a zpracovávat. V tomto případě funkční simulace zabere významně více času, než prosté vyhodnocení výrazu s operátorem „+“, jak je tomu např. v jazyku C. Demonstrujeme výsledky práce simulátoru na jednoduchém obrazovém filtru s konvoluční maticí 5x5 pracujícím s obrazem o rozměrech 1024 x 1024 obrazových bodů. Výpočet filtru vyžaduje 25 násobení a 24 součtů pro jeden obrazový bod, dohromady 49 operací. Celkem pro celý obraz asi 50 milionů aritmetických operací. Na běžném PC v jazyku C by výpočet trval několik milisekund. Ovšem simulace v RTL bude trvat již několik desítek minut pro jeden předložený vzor. Z výše popsaného vyplývá, že funkční simulace v RTL je nevhodná a zbytečně zdlouhavá.

Rychlejších výsledků lze dosáhnout pomocí speciálních nástrojů tzv. jazyků typu C2H – tedy převodníky jazyka C do HDL jazyků.

V současné době existuje několik jazyků typu C2H. Jedná se například o Handle C, System C a Impulse C. V dalším textu se budeme zabývat pouze jazykem Impulse C, který je velmi podobný jazyku C známého z programování mikroprocesoru.

Základním rozhraním je vstupní a výstupní proud dat definovaného typu (integer, UINT_TYPE(XX)...). Dále je datový tok zpracováván pomocí funkcí zapsaných samotným uživatelem v jazyku C, který může být doplněn řídicími slovy modifikujícími překlad.

Hlavní výhodou řešení je velmi dobrá čitelnost napsaného kódu, krátký čas simulace za použití standardních překladačů (GCC, MSV) umožňující využívat veškeré funkce a knihovny obsažené ve standardním překladači (výpis na obrazovku, breakpointy, čtení z disku). Další výhodou je i rychlé generování HDL kódu pro FPGA. Příklad těla filtru s konvoluční maticí 5x5 je uveden níže. Na první pohled je patrné, jak algoritmus pracuje a je jednoduché ho modifikovat. Využívá vstupního streamu dat (`co_stream_read(r0, r1, ...)`), který načítá nové obrazové body. Do proměnné `sop` je uložena nově vypočtená hodnota obrazového bodu, která je následně zapsána do výstupního datového streamu. Z programu je vidět, že programátor nemusí primárně řešit paralelizování zpracovávané úlohy. O tom se rozhoduje v překladači pomocí řídicích slov a parametrů nastavení překladače.

```
do {
#pragma CO PIPELINE
#pragma CO set stageDelay 100
    err = co_stream_read(r0, &data0, sizeof(co_uint16));
    err &= co_stream_read(r1, &data1, sizeof(co_uint16));
    err &= co_stream_read(r2, &data2, sizeof(co_uint16));
    err &= co_stream_read(r3, &data3, sizeof(co_uint16));
    err &= co_stream_read(r4, &data4, sizeof(co_uint16));
    if (err != co_err_none) break;

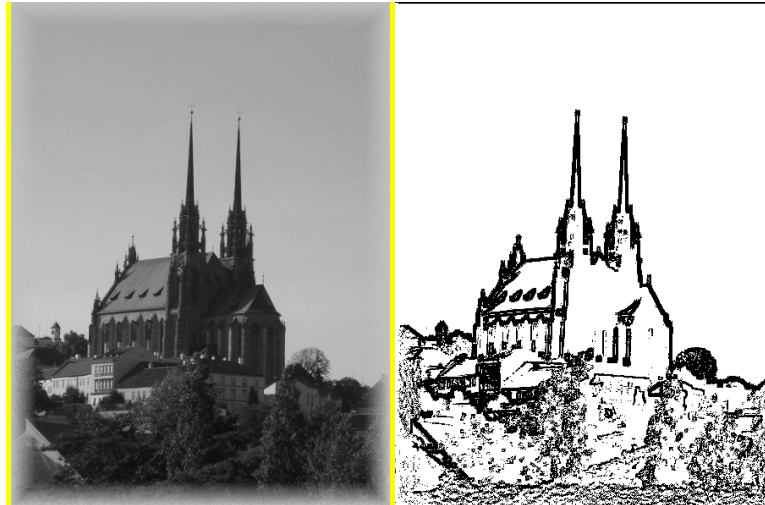
    p00 = p01; p01 = p02; p02 = p03; p03 = p04;
    p10 = p11; p11 = p12; p12 = p13; p13 = p14;
    p20 = p21; p21 = p22; p22 = p23; p23 = p24;
    p30 = p31; p31 = p32; p32 = p33; p33 = p34;
    p40 = p41; p41 = p42; p42 = p43; p43 = p44;

    p04 = data0;
    p14 = data1;
    p24 = data2;
    p34 = data3;
    p44 = data4;

    sop = p00*F00 + p01*F01 + p02*F02 + p03*F03 + p04*F04
        + p10*F10 + p11*F11 + p12*F12 + p13*F13 + p14*F14
        + p20*F20 + p21*F21 + p22*F22 + p23*F23 + p24*F24
        + p30*F30 + p31*F31 + p32*F32 + p33*F33 + p34*F34
        + p40*F40 + p41*F41 + p42*F42 + p43*F43 + p44*F44;
    if (sop > 255*FDIV)
        result = 255;
    else
        result = (co_uint16) (sop >> 7); // Divide by 128
    co_stream_write(output_stream, &result, sizeof(co_uint16));
} while (1);
co_stream_close(r0);
co_stream_close(r1);
co_stream_close(r2);
co_stream_close(r3);
co_stream_close(r4);
co_stream_close(output_stream);
}
```

Vstupní a výstupní obraz získaný výpočtem funkce filtru je na obr. 3.

Dále je výsledný HDL kód připojen jako předgenerovaná komponenta do standardního řetězce FPGA nástrojů, kde může být propojena s ostatními systémovými komponentami. Jednou ze systémových komponent může být soft-core procesor Microblaze nebo hard-core procesor PowerPC sloužící pro další zpracování informací.



Obr. 2 Vstupní a výstupní obrázek filtru

3. Příklad praktické aplikace

Aplikace, která vyžadovala netradiční přístup k řešení, byl návrh rychloběžné kamery s vyhodnocením těžiště stopy laserového paprsku na projekční stěně zbraňového simulátoru.

Primárním cílem projektu bylo navrhnout a realizovat kamerový systém schopný detekovat a vyhodnotit pozici na kterou míří až 10 střelců se vzorkovací frekvencí 50Hz na jednu zbraň s přesností 1mm při uvažované velikosti snímání scény 1,2 m x 1 m. Každá zbraň je vybavena spínanou IR laserovou diodou, která po průchodu optickou soustavou vytváří stopu na projekční ploše.

Jednotlivé zbraně jsou rozděleny do časových multiplexů a to v poměru 1 : 10 na každou zbraň. Aby bylo dosaženo vyšší přesnosti, je ještě každý časový úsek rozdělen na dalších 50 časových úseků. Tedy každých 20 ms jsou vyhodnoceny pozice všech zbraní a dále se tento cyklus periodicky opakuje 50 krát za 1s. Celková vzorkovací frekvence a tím i snímková frekvence kamery musí být 500 snímků za 1s.

Druhým požadavkem je minimální velikost (1mm) obrazového bodu, který má být detekován. Vezmeme-li do úvahy velikost snímání scény, je nezbytně nutné, aby snímací element měl rozlišení minimálně 1200 x 1000 obrazových bodů.

Výše zmíněný popis jasně definuje technické požadavky na kameru i vyhodnocovací systém.

Následně bylo třeba vybrat systém, který zpracuje a vyhodnotí datový tok pořízený vybraným CMOS čipem. Rychlým výpočtem dojdeme k závěru, že vyhodnocovací systém musí být schopen zpracovat asi 780 Mbytu dat za 1s a to ještě v nezarovnaném 10bitovém formátu. Doba potřebná pro vyhodnocení jednoho obrazového bodu je asi **1,5 ns**.

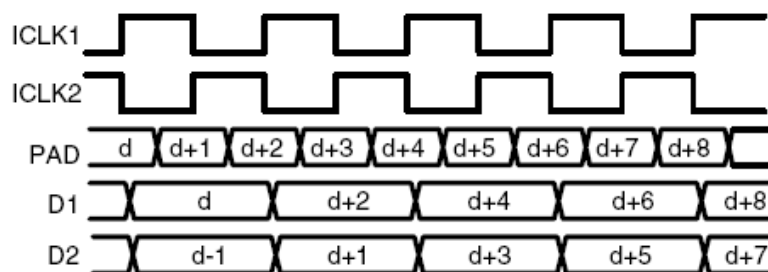
Výše zmíněné požadavky lze řešit využitím architektury založené na hradlových polích typu FPGA, které disponují vhodným rozhraním a dostatečnou mohutností logiky uvnitř čipu.

V první části příspěvku bylo již řečeno, že data jsou z čipu získávána rychlostí 780MB za 1s. Je logické, že datový tok z čipu bude rozdělen do více pracovních kanálů. Tak je tomu i v případě CMOS čipu firmy Cypress. Datový interface je rozdělen na hodinový signál, který určuje rychlost vyčítání obrazových dat na ostatních kanálech, řídicí kanál, který generuje informace o stavu CMOS čipu (začátek, konec snímku, začátek konec řádku, platná data, testovací vzor a kontrolní součet) a dvanáct datových kanálů. Každý kanál je tvořen fyzickou vrstvou diferenciálního rozhraní LVDS pracující na dvojnásobné frekvenci než základní hodinový signál (na každou hranu hodinového signálu přichází jeden datový bit).

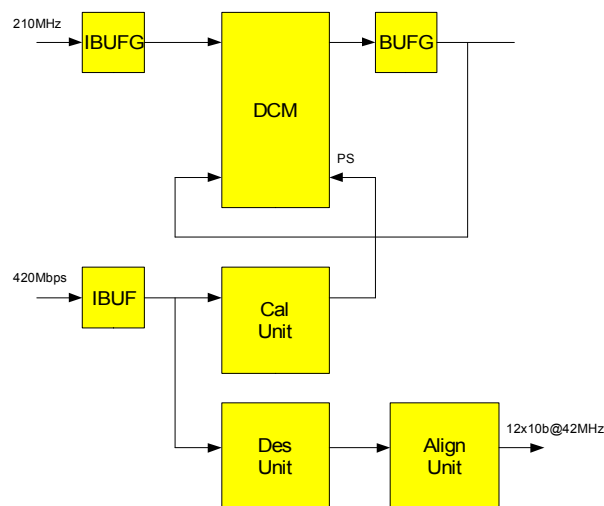
Výběr hradlového pole předurčuje definice interfacu a požadavků na zpracování získaných dat z kamery. V průběhu návrhu kamery bylo vybíráno ze tří typů hradlových polí firmy Xilinx. Jednalo se o řady Spartan3E, Virtex 4 a Virtex 5. Vlastnosti jednotlivých rodin nebudou dále v článku diskutovány, protože by překročili rozsah příspěvku viz. [1], ale ve stručnosti lze zmínit, že rodiny Virtex poskytují větší výkon a komfort při vlastním návrhu ale na druhé straně zvyšují výslednou cenu zapojení. Rodiny Spartan3E jsou levnější s omezenou funkcionalitou, která ještě na samotné hranici technických možností vyhovuje požadavkům cílové aplikace.

Rozhraní pro získávání dat musí být navrženo s ohledem na vysokou přenosovou rychlost komunikačního kanálu – v našem případě 620Mbps a to ve 12 datových kanálech a jednom kanále synchronizačním.

Dalším problémem byl neznámý vztah mezi fází hodinového signálu a datových signálů v ostatních kanálech. Optimálních poměrů při vzorkování bylo dosaženo pomocí automatické kalibrační jednotky, která byla za tímto účelem vytvořena a využívala k fázovým posunům jednotku DCM integrovanou v FPGA Spartan3E. Automatické kalibrace probíhala pomocí nastavení definovaného vzoru o nejvyšší možné generované frekvenci (vzor typu 01010101), kdy stavový automat měnil fázový posun tak, aby našel konstantní vzdálenost mezi náběžnou a sestupnou hranou.



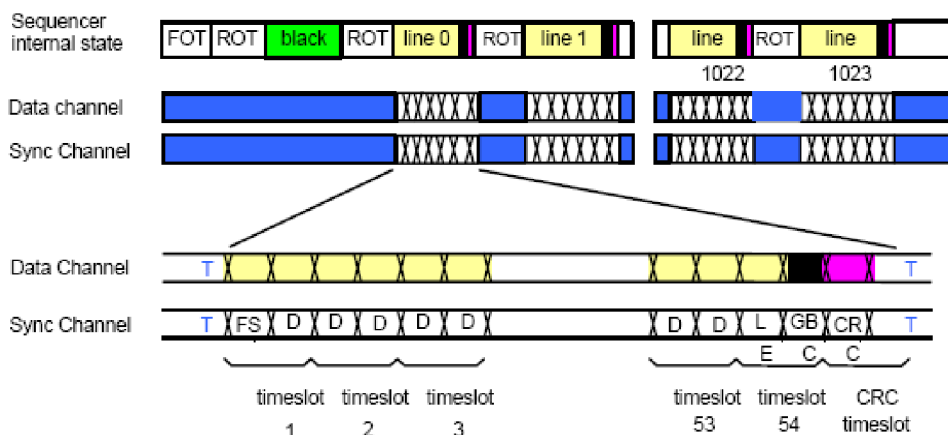
Obr. 10 Vzorkování DDR signálů z CMOS snímače



Obr. 3 Vnitřní uspořádání kalibrační a zarovnávací jednotky

Druhá synchronizace probíhala již na úrovni sestavení celého 10-ti bitového slova a to ve formě jiného testovacího vzoru, který se nemůže vyskytnout v synchronizačním kanále za bezporuchového provozu. Jakmile byl předpokládaný synchronizační vzor zachycen, došlo k ověření synchronizace i v ostatních kanálech. V případě, že všechny kanály byly synchronizovány je možno považovat data za platná ve všech dvanácti datových kanálech

a i v synchronizačním kanálu. Výsledným produktem jsou deserializovaná data a řídicí informace na jedné pětině základní frekvence ve 12 + 1 datových proudech (základní frekvence hodin 310MHz, DDR = 620Mbit, tedy 62MHz slov za 1s v každém kanálu).



Obr. 4 Časové posloupnosti dat v synchronizačním a datovém kanálu

Získaný datový tok je třeba dále upravit a přeuspořádat do pořadí vhodného k vyhodnocení, protože data z komunikačních kanálů vystupují dle algoritmu udaného výrobcem čipu (12 x sudé pixely, 12 x liché, 12 liché v reverzním pořadí a 12 sudé v reverzním pořadí).

Po finálním přeuspořádání je možné přistoupit k vlastnímu procesu vyhodnocení obrazových dat a získání těžiště stopy laserového paprsku. Řešení systému využívá masivního paralelismu architektury založené na struktuře FPGA, kdy každý datový proud je zpracováván samostatně stejným algoritmem a výsledky zpracování postupují pipeline jednotkou k dalším jednotkám zajišťujícím požadované výsledky.

V první části je vhodné odprahovat pozadí z projekční stěny od aktivní stopy laserového paprsku. To probíhá ve dvou fázích. První fáze je oddělení IR spektra laserového paprsku pomocí IR filtru, který je před objektivem kamery. Tím je zajištěno, že do kamery a tedy i do vyhodnocovacího systému se dostane převážně účinný signál IR laseru.

Ve druhé fázi se hledá vhodný práh, který oddělí zbytkové pozadí od IR stopy laseru a v okně o rozměrech 8 x 8 obrazových bodů se provádí výpočet těžiště bodu dle vztahů (1). Pro jednoduchost jsou souřadnice počítány v relativních souřadnicích a tak postačuje k získání validních dat 18bitová aritmetika.

$$x_T = \sum_i \frac{m_i x_i}{m} \quad y_T = \sum_i \frac{m_i y_i}{m} \quad m = \sum_i m_i \quad (1)$$

V průběhu řešení projektu se nepředpokládalo, že by stopa paprsku přesáhla velikost 4 x 4 obrazové body. Systém je schopen vyhodnotit až 10 nepřekrývajících se oblastí i když při správném nastavení a podmínkách provozu by se na projekční stěně měla vyskytovat pouze jedna platná stopa.

Systém byl dále doplněn o video výstup na VGA monitor v rozlišení 1280 x 1024 obrazových bodů pro kalibraci a ověřování funkce vyhodnocovací jednotky. Zde je třeba poznamenat, že bylo nezbytně nutné snížit snímkovou frekvenci na 60Hz z důvodu přímého zobrazení na monitoru, protože systém není vybaven žádnou vyrovnávací pamětí, do které by bylo možno ukládat získanou obrazovou informaci a následně ji zobrazovat nebo předávat do jiného zařízení.

Předávání výsledků získaných z kamery je realizováno pomocí sériového portu nebo rozhraní 100Mbit Ethernet. Doplňkové ovládání funkcí čipu je zajištěno pomocí SPI linky, které je rovněž vytvořena jako IP funkce v hradlovém poli. Přehled dosažených parametrů je v tabulce 2.

Tabulka 2: Dosazené parametry systému

Parametr	Hodnota	Jednotky
Frekvence hodin čipu	40 – 320	MHz
Bitový tok na kanál	80 – 640	Mbit/s
Počet zpracovaných slov	96 – 768	Mslov/s
Snímková frekvence	50 – 500	Hz
Počet vyhodnocených pozic při 10 zbraních	5 – 50	1/s
Příkon systému @ 500Hz	6	W



Obr. 5 Pohled na scénu a použité zbraně

Závěr

Cílem článku bylo přiblížit zpracování obrazových dat architekturou FPGA a obeznámit čtenáře s úskalími, na které může v průběhu řešení projektu narazit. Ve druhé části byla uvedena aplikace reálného systému rychloběžné kamery využívající popsaná řešení pro vyhodnocení těžiště stopy laserového paprsku na projekční stěně zbraňového simulátoru. Lze se oprávněně domnívat, že technologie automatického a poloautomatického převodu softwarových řešení do hardwarových struktur se bude nadále vyvíjet, a proto by jí měla být věnována nemalá pozornost.

Poděkování

Článek vznikl za podpory projektu 1M0567 (Výzkumné centrum aplikované kybernetiky).

Literatura

- [1] Stránky společnosti Xilinx, internetový odkaz: <http://www.xilinx.com/>
- [2] Stránky společnosti Cypress, internetový odkaz: <http://www.cypress.com/>
- [3] Stránky společnosti Impulse, internetový odkaz: <http://www.impulsec.com/>

ELEKTROMOBILY? Proč ne? A proč ano?

Jaromír Vegr

Elektromobily o.s., Sedlčanská 79, 257 91 Sedlec- Prčice

vegr@elektromobily.org, predseda@elektromobily.org

Abstrakt:

Článek nabízí srovnání pohonu klasického auta a elektromobilu, jejich účinnosti, dopadu na životní prostředí. Uvádí nové trendy v konstrukci akumulátorů, podmiňující dojezd vozidla na jedno nabití zdrojů. Nabízí nový pohled na způsob cestování a přepravy.

1. Úvod

Klasický spalovací motor s přímočarým pohybem pístu má v praxi účinnost cca 15-20%, tzn., že ze 100 litrů paliva se využije jen max. 20 litrů (píst se musí začít pohybovat a na to je potřeba energie. Sotva se rozpohybuje, musí se zastavit a na to je opět potřeba další energie. Poté se musí začít pohybovat opačným směrem a celé se opakuje několikrát za minutu). Dovedeme si představit, kolik ropy se za posledních sto let vyplývalo zbytečně? Možná, že ji budeme v budoucnu potřebovat, ale už žádná nebude. Je to škoda, účinnost přeměny ropy, plynu či uhlí v elektrárně je vyšší a emise podstatně nižší. Účinnost elektromotorů je 90% a více.

2. Povědomí o elektromobilech

Vlastnosti předváděných elektrických vozidel mění obličej lidí, kteří si vyzkouší jízdu a pak tvrdí např.: „no to jsem netušil“, „jako bych si nařídil hodinky o deset let dopředu...“ atd., atp.

Povědomí o elektromobilech je pokřivené neinformovaností, žádnou podporou ze strany státních institucí a sdělováním zastaralých informací lidmi, kteří by měli mít relevantní vědomosti, nemají však snahu se vzdělávat, informovat i přijmout podanou ruku.

Emise elektromobilů nejsou místní, mnohdy žádné-nabíjet lze i z vodních, fotovoltaických či větrných elektráren. Pokud se využívá energii od ČEZu, jsou i v tomto případě emise pod úroveň Toyoty Prius (nejznámější a hodně propagované vozidlo s hybridním pohonem a s velmi nízkou spotřebou).

Mohly by být ještě podstatně menší, kdyby se výpočtem úředníků nezatažovala emisemi pouze vyrobená elektřina, ale i vyrobené teplo, o které není takový zájem.

Biopaliva lze používat, ale je to nevhodné ve vozidlech vzhledem k výše vysvětlené malé účinnosti motorů. Topit jimi lze s vyšší účinností. Spalovat potraviny jako řepkový olej, obilí přeměněné na líh apod. se zdá jako nevhodné řešení v době, kdy polovina obyvatel planety trpí hladem. Řepka se také musí zasít, ošetřovat, hnojit, sklízet, podobně jako ropa se musí vytěžit, rafinovat, skladovat, dopravovat a prodávat.

Během poslední doby jsou jisté zprávy, že Evropská unie přehodnocuje používání biopaliv v dopravě, naši politici to však ještě nezaregistrovali.

3. Nové zdroje pohonu

Chemické zdroje energie byly dlouho překážkou v dalším rozvoji elektromobilů, i přesto, že jejich akční rádius elektromobilů zcela vyhovoval. Díky nasazení paliv ropného původu si lidé zvykli na obrovský a v praxi jen málokdy využitelný akční rádius (z výzkumů je zřejmé, že naprostá většina jízd obnáší rádius do 100 km denně. Lidé si rádi koupí velkoprostorový vůz, protože "co kdyby se někdy stěhovali" (reklama na Fabii) a jezdí pak každý den do práce 20 km sami a vozí s sebou až 2 tuny železa. Menší počet delších jízd v roce lze vykonat jiným vozidlem (k babičce vlakem, na dovolenou letadlem, nebo také pěšky či na kole).

Během posledního desetiletí, a to pouze díky telekomunikační technice, se vlastnosti akumulátorů dostaly na takovou úroveň, že elektromobily osazené akumulátory z notebooku (Tesla roadster) dosahují parametrů lepších než nejlepší sportovní vozy (Ferrari, Porsche) a dojezd je až 500 km na jedno nabití. Jenže, kdo má zájem na vývoji a provozování takovýchto jednoduchých, bezúdržbových a ekonomických vozidel? Sobecké a finanční zájmy mocných kruhů, které právě díky drancování přírodního bohatství přišly k obrovitým finančním prostředkům, potlačují větší rozšíření elektromobilů. Provozování složitých automobilů s komplikovanými a drahými spalovacími motory je další část velkého byznysu. Spalovací motor se skládá ze stovek precizních součástí, které se musí obměňovat podobně jako výfuky, katalyzátory, ale i olej a filtry a brzdová soustava. Elektromotor má jen několik součástí s prakticky neomezenou životností a ostatní, výše jmenovaná zařízení nepotřebuje vůbec nebo je potřebuje mnohem méně (např. brzdové destičky díky brzdění rekuperací). Údržba takového vozidla je pak opravdu velice jednoduchá a zvládne ji každý zručný člověk sám.

4. Provoz elektromobilu

Elektromobil pro své vlastnosti jako okamžitá schopnost poskytovat plný výkon, neuvěřitelná akcelerace, možnost rekuperace (nabíjení akumulátorů při brzdění), žádné místní emise plní ideální požadavky na městský a příměstský provoz. Na větší vzdálenosti jsou zde vlaky, jejichž účinnost je vynikající už vzhledem k nízkému valivému odporu a pohonu již zmíněnou elektřinou. Elektrická síť u nás je velice silná a 100 000 elektromobilů ji zatíží pouze 1%. Zatížení však není to správné slovo, protože elektromobily dokonce stabilizují síť a nabíjejí se v době, kdy je elektřiny přebytek. Teoreticky mohou i dodávat elektřinu do sítě v případě nedostatku při vhodné symbióze s výrobcem elektřiny (zkouší se v USA).

Před 100 lety jezdilo více elektromobilů než dnes. Dnes však nejde o otázku, kdy dosáhne cena ropy 1000 Euro za litr, ale dokdy si budeme moci koupit benzín vůbec. Jistě si armáda uvědomí, že bez ropy se válčit nedá a pouze válka rozděljuje ta správná teritoria, určuje kdo má pravdu a právo, kde se vystřelí staré zbraně a kdy se vyzkoušejí nové.

5. Výhledy do budoucna

Jako potomci Křížika a dalších českých hlav máme předpoklady změnit současnou situaci v pohledu na elektromobily. Není nemožné vyvinout malé, lehké a optimalizované vozidlo, které by uspokojilo potřebu nutné individuální dopravy a začlenit je do běžného života. Je rozumné vyvážit tu nejušlechtlejší energii, kterou lze téměř bezzbytku využít, a dovážet ropu, za kterou zaplatíme sousedním zemím i transport přes jejich území a následně jí tu využijeme pouze pětinu? Je rozumné jezdit po našich městech s dvěma tunami oceli obsazenými jednou osobou se studeným motorem, kdy ještě nefunguje katalyzátor, s motorem v nevhodných režimech, kdy jejich účinnost je zlomek účinnosti na silnici a dálnici? Je však potřeba všestranné podpory všech složek, které by této podpory měly být schopné, některé to mají přímo ve stanovách, bohužel podporují vzhledem k tlaku lobbystických skupin zcela jiné druhy pohonů.

Lze jistě spočítat, kolik energie by se ušetřilo i jaké další pozitivní přínosy by mělo nasazení elektromobilů v globálním či národním měřítku (na zajištění el. energie z fotovoltaických systémů na provoz půl milionu elektromobilů, které denně najezdí 100 km, je potřeba plocha 13 km². Nemusí to však být plocha někde v Mostecké pánvi, ale přímo v místě spotřeby na střeších našich domů).

Věřím, že brzy zvítězí zdravý rozum, podaří se změnit zakořeněné názory lidí, přehodnotit jejich skutečné potřeby a brát ohled na všechny obyvatele naší planety. Již dnes existují elektromobily, které ve všech ohledech překonávají největší legendy mezi sportovními vozy, jen o tom ví málokdo a chybí podpora, osvěta a chuť ze strany těch, kteří by to měli podporovat.

Odkazy na weby, kde je možno se dozvědět více:

www.klub.elektromobily.org

www.electroauto.cz

www.elektromobil.wz.cz

<http://www.cleanvehicle.com/petition.php?lang=cz>

Digitální televize a digitální rozhlas současnost a perspektivy

Václav Žalud

Katedra radioelektroniky, FEL ČVUT, Technická 2, 160 00 Praha 6

Abstrakt:

V tomto příspěvku jsou popisovány základní varianty digitální televize, určené pro pozemní vysílání (DVB-T), družicové vysílání (DVB-S) a pro kabelové přenosy (DVB-C). Pozornost je zaměřena na systémové řešení těchto televizních soustav a také na hlavní problémy spojené s jejich realizací. Stručně jsou probírány i perspektivní standardy digitální televize, přinášející kromě zvýšené kvality přenosu také možnost mobilního příjmu a interaktivního režimu. V závěru je zmínka o systémech digitálního rozhlasu DAB a DRM.

Úvod

Od počátku sedmdesátých let min. st. bylo zřejmé, že přednosti digitální techniky jsou tak výrazné, že v televizi i v rozhlasu digitální systémy postupně nahradí dosavadní systémy analogové. **Digitální systémy** přinášejí celou řadu závažných funkčních výhod:

- Digitální rádiový přenos má především podstatně **větší energetickou účinnost**, kterou může ještě zvýšit kanálové kódování a další formy ochrany přenosu. Energetickou bilanci dále zlepšují pozemní monofrekvenční televizní sítě. To vše podporuje současné aktuální tendence vytváření energeticky co nejméně náročných „zelených rádiových systémů“.
- Digitální modulace, ve spojení s účinným zdrojovým kódováním (redukci bitové rychlosti), zajišťujícím potlačení redundancí a irelevantní složky v přenášeném signálu, potom mají i znatelně **vyšší spektrální účinnost**, projevující se ve výrazné úspoře nedostatkových rádiových pásem. Tato uvolněná pásma („digitální dividenda“) lze potom využít nejen pro další tv. programy, ale také pro prudce rostoucí pozemní mobilní komunikaci ap.
- Digitální rádiová komunikace umožňuje pomocí nových metod digitálního zpracování signálů výrazně zlepšit také všechny další kvalitativní parametry rádiového přenosu a zajistit tak zvýšenou **kvalitu služeb QoS**. Mezi tyto metody patří nové koncepce účinných zdrojových kodeků, turbo kódy, LDPC kódy, diversita MIMO aj. Uvedené techniky zvyšují kvalitu fixních tv. přenosů, kterou pak spolehlivě zajišťují v celém obsluhovaném území - včetně jeho okrajů, potlačují vliv vícenásobných příjmů („duchy“), odstraňují zrnění ap. Otevírají také cestu k plně mobilní televizi s dokonalou interaktivitou, ať již budované na bázi „klasické“ digitální televize, nebo využívající sítě mobilní komunikace třetí generace.

Implementace digitálních systémů je však podstatně komplikovanější, než systémů analogových. Digitální komunikace proto začíná nastupovat do praxe až v osmdesátých letech min. st. Tehdy se totiž dostaly monolitické integrované obvody již na úroveň, umožňující levnou realizaci i složitých digitálních radiokomunikačních systémů. Základem digitalizace obrazových signálů je celosvětový standard ITU R 601 z roku 1982. *Evropský institut ETSI (European Telecommunications Standards Institute)* a *Evropský komitét CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization)*, začaly v r. 1991 potom koncipovat projekt *digitálního video vysílání DVB (Digital Video Broadcasting)*.

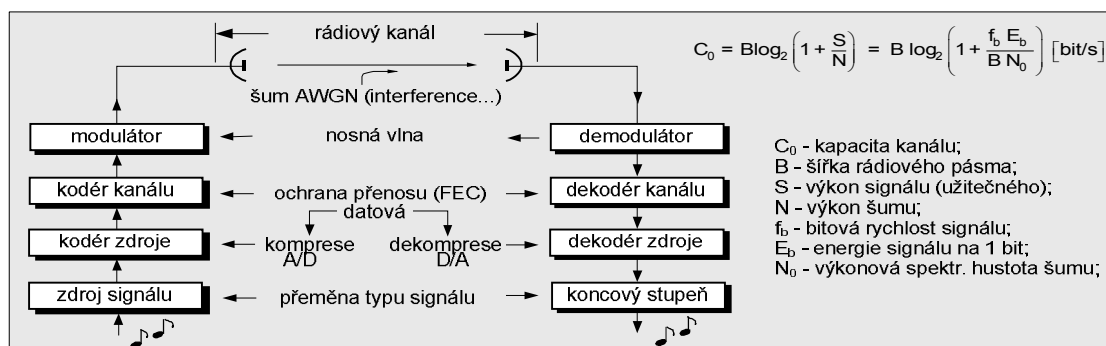
Projekt DVB uvažoval digitální televizi jako jediný systém, aplikující zdrojové kódování video a audio signálů ve standardech MPEG-2. Dále se zde předpokládala aplikace ochranného kanálového kódování s dopřednou korekcí chyb FEC (*Forward Error Correction*), využívající blokové kódy RS (Reed - Solomon) a punktuované konvoluční kódy, adaptující se svou rychlostí na parametry aktuálního rádiového kanálu.

Při rádiovém přenosu se rozlišují v systému DVB tři verze, lišící se přenosovým médiem. Díky jednodušší legislativě i technologii se již v r. 1994 objevují standardy pro *družicové systémy DVB-S (DVB-Satellite)* a *kabelové systémy DVB-C (DVB-Cable)*. Až za nimi následoval v r. 1995 *pozemní systém DVB-T (DVB-Terrestrial)*. Tyto systémy se ovšem během vývoje různě modifikují. Vznikají jednak jejich pokročilé verze *DVB-S2 (2005)*, *DVB-C2* a *DVB-T2 (2006)*, i nové standardy DVB-H ap. Významnou roli hraje ve vývoji digitální televize její konvergence s Internetem (IPTV) a s veřejnými mobilními sítěmi 3G (TVo3G). Standardy DVB-S a DVB-C mají k dispozici kanály zajišťující téměř bezchybný přenos QEF (*Quasi Error Free*), a proto mohou používat klasické modulace QAM s jedinou nosnou vlnou SC (*Single Carrier*). Naproti tomu DVB-T užívá pozemní kanály s vícecestným šířením a intenzívními interferencemi, kdy je k přenosu vhodnější vývojově mladší ortogonální frekvenční multiplex OFDM, aplikující přenos na více nosných MC (*Multi Carrier*).

1. Nové technologie v digitální televizi DVB

Obecné Shannonovo schéma digitálních komunikačních systémů

Všechny digitální radiokomunikační systémy a tedy i digitální televize a rozhlas jsou založeny na obecném Shannonově schématu podle obr. 1 [1]. To se skládá z vysílací a přijímací části, spojených rádiovým kanálem. Na vstupu vysílací části je zdroj signálu, přeměňující přenášenou informaci na analogový elektrický signál. Ten se v kodéru zdroje nejprve v převodníku A/D digitalizuje a poté se podrobuje vlastnímu zdrojovému kódování. Jeho účelem je zmenšení rychlosti vstupního bitového toku, dosahované potlačením redundantní a irelevantní složky doprovázející vstupní data, proto se označuje jako redukce bitové rychlosti resp. komprese dat. V kodéru kanálu se k takto upraveným datům naopak určitá redundantní, avšak přesně kontrolovaná složka přidává. Ta je potom v přijímači využívána k odhalení a potlačení chyb. Tento typ ochrany se nazývá dopředná korekce chyb FEC (*Forward Error Correction*). K dalším způsobům ochrany rádiového přenosu patří ekvalizace (korekce frekvenčního zkreslení kanálu), diversita (vytvoření více nekorelovaných přenosových kanálů, odlišných ve frekvenci, čase, prostoru ap), prokládání (přeskupení bitů při přenosu v kanálu) a opakování přenosu ARQ (opakované vysílání chybně přenesených kódových skupin). Digitální signál, získaný tímto dvojitým kódováním, dále vchází do modulátoru. Zde se moduluje vhodným typem digitální modulace na vf nosnou vlnu a po frekvenční konverzi a výkonovém zesílení již vysílá. V přijímači probíhají procesy inverzní.



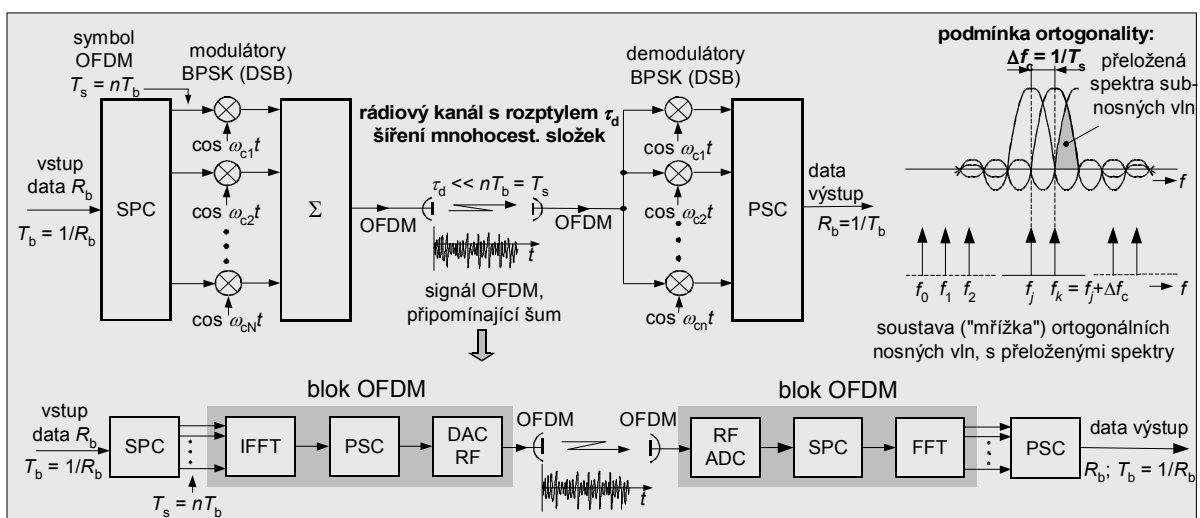
Obr. 1 Obecné Shannonovo schéma rádiového digitálního komunikačního systému

Přenosový formát OFDM a mnohonásobný přístup OFDMA

U moderních rádiových systémů s jedinou nosnou vlnou SC, určených pro velmi rychlou pozemní komunikaci v prostředí s mnohocestným šířením, je bitová perioda T_b již kratší, než rozptyl dob šíření τ_d dílčích mnohocestných složek. Vlivem toho zde vznikají výrazné intersymbolové interference mezi přijímanými symboly ISI, zvyšující chybovost přenosu. Radikálním řešením problému vzniku ISI je *ortogonální frekvenční multiplex* OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) resp. mnohonásobný přístup OFDMA (*OFDM Access*). Ten má navíc velkou spektrální účinnost a značnou provozní flexibilitu, výhodnou při dynamickém přidělu nosných vln, při adaptivních modulacích a kódování ap.

Podstata multiplexu OFDM je znázorněna na obr. 2. Ve vysílači je rychlý sériový vstupní datový bitový tok o vysoké rychlosti R_b resp. krátké periodě $T_b = 1/R_b$ převáděn v sériově paralelním konvertoru SPC na větší počet N (desítky až tisíce) pomalých paralelních toků o podstatně delších periodách $T_s = NT_b \gg T_b$. Ty jsou modulovány na své individuální subnosné vlny $f_{c1}, f_{c2}, \dots, f_{cn}$ s odstupy Δf_c , ve slučovači sdružovány a ve formě kompozitního signálu OFDM vysílány. V přijímači se ze signálu OFDM synchronními demodulátory selektivně vyčlení jeho dílčí složky, z nichž se v konvertoru PSC skládá původní rychlý sériový datový signál. Subnosné vlny jsou voleny tak, aby vytvářely ortogonální soustavu ($\Delta f_c = 1/T_s$). Díky tomu může být jejich rozstup Δf_c mnohem menší, než u klasického multiplexu FDM, neboť vzájemné překrývání jejich postranních modulačních pásem zde nevádí. To zvyšuje u multiplexu OFDM jeho spektrální účinnost. Prodloužená perioda paralelních symbolů T_s (u videosignálů nejméně několik milisekund) je mnohem větší, než rozptyl zpoždění τ_d typických mnohocestných rádiových kanálů (nejvýše několik mikrosekund). Jednotlivé složky mnohocestného šíření se potom vzájemně časově téměř ztotožňují, takže zde dochází jen k malým intersymbolovým interferencím ISI. Ještě dalšího potlačení ISI až téměř na nulu, se zajistí doplněním každého symbolu OFDM o cyklický prefix CP, což je replika symbolu, vzata z jeho konce a vkládaná na jeho začátek.

Realizace multiplexu OFDM v základní podobě s mnoha modulátory a demodulátory, by byla neúnosně komplikovaná. Moderní monolitické technologie však již nabízejí dostatečně rychlé a levné procesory IFFT/FFT (*Inverse Fast Fourier Transform/Fast Fourier Transform*), kterými lze v systému OFDM nahradit banku modulátorů OFDM a demodulátorů OFDM. Tím se této technologii naplno otevírá cesta do spotřební elektroniky.

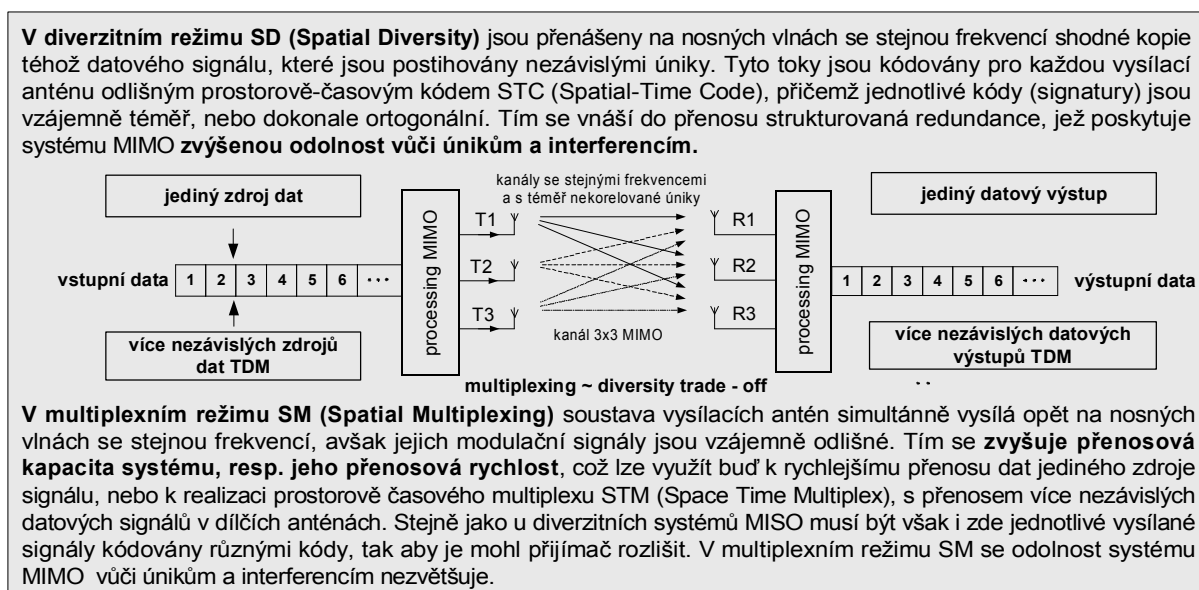


Obr. 2 Základní koncepce ortogonálního frekvenčního multiplexu OFDM

Prostorově-časová diverzita MIMO

Dvě či více vysílacích antén s jedinou přijímací vytváří systém s prostorovou diversitou MISO (*Multiple Input Single Output*), analogicky více přijímacích antén s jedinou vysílací vytváří systém s diversitou SIMO (*Single Output Multiple Input*). Při dostatečné vzájemné vzdálenosti vysílacích, nebo přijímacích antén, větší než je polovina délky vlny $\lambda/2$, zde vzniká více dílčích rádiových kanálů s nekorelovanými úniky. Toho se pak využívá k potlačení úniků přijímaného signálu a tím i ke zvýšení spolehlivosti spojení. Oba systémy se proto již dlouho využívají u krátkovlnných spojů, ale i u systémů mobilní komunikace ap.

Vývojově poslední, mimořádně účinnou variantou prostorové diverzity jsou systémy MIMO (*Multiple Input - Multiple Output*), s více vysílacími a současně i přijímacími anténami (obr. 3). Systémy MIMO mohou pracovat při přenosu jediného signálu v obvyklém režimu prostorové diverzity SD (*Spatial Diversity*), kdy zvětšují imunitu proti únikům. Lze je však nově využít, na rozdíl od MISO a SIMO, také v režimu prostorového multiplexu SM (*Spatial Multiplexing*); ten zvyšuje rychlost jediného přenášeného signálu, nebo umožňuje efektivní techniku multiplexního přenosu více nezávislých signálů, a to v původním nerozšířeném frekvenčním pásmu. Technika MIMO ve spojení s multiplexem OFDM se začíná intenzivně využívat kromě mobilní komunikace i v digitální televizi a rozhlasu.

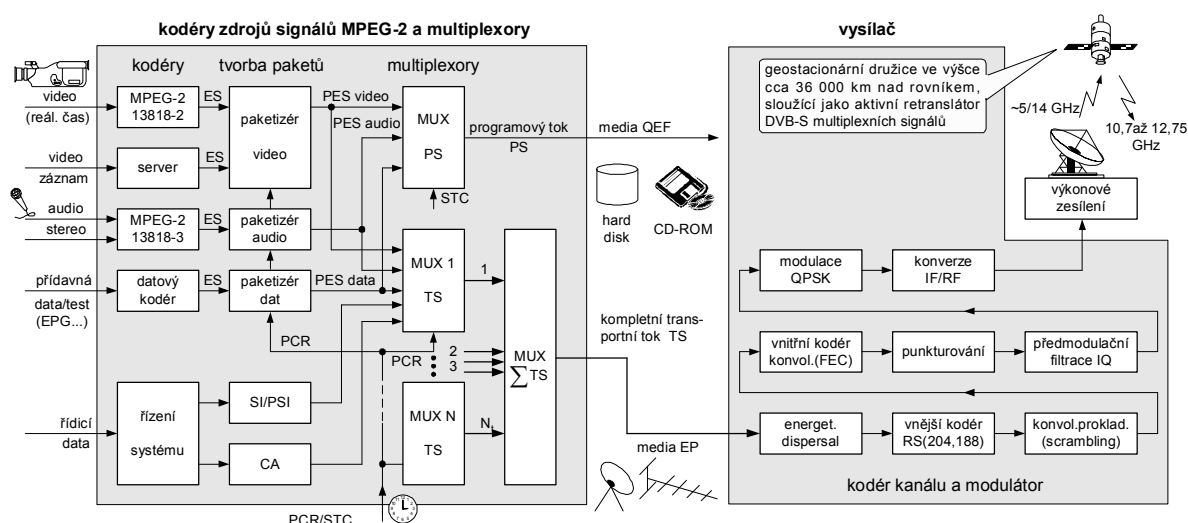


Obr. 3 Systém MIMO s možností pracovat buď v prostorovém diverzitivním módu (SD) s přenosem jediného modulačního signálu - avšak se zvýšenou robustností přenosu, nebo v módu prostorového multiplexu (SM) - s možností multiplexního přenosu více signálů

2. Digitální televize DVB-S

Vysílač DVB-S

Na obr. 4 je uvedeno zjednodušené schéma zapojení kompletního vysílacího řetězce digitální družicové televize DVB-S. Jeho první částí je kodér zdrojů signálu, obsahující vlastní kodéry pro zdrojové kódování obrazových, zvukových a datových signálů a dále multiplexory pro jejich sdružování. Druhou částí je vlastní vysílač, složený z ochranných kodérů kanálu, prokladače, modulátoru a koncového výkonového stupně.



SI = servisní informace; PSI = programové spec. informace; CA = podmíněný přístup; ES = elementární datový tok; PES = paketový el. datový tok; 1,2,3,...,N_t = dílčí transportní toky; PCR = program. hodinová reference; STC = systémové časování; QEF = téměř bezchybný; EP = náchylný k chybám; TS = transportní tok; PS = paketový tok; EPG = Electronic Program Guide

Obr. 4 Zjednodušené blokové schéma zapojení kompletního vysílacího systému digitální družicové televize DVB-S

Na vstup zdrojového kodéru vysílače DVB-S přicházejí digitalizované obrazové (video) a zvukové (audio) televizní signály a dále datové signály. Z obrazových signálů to mohou být signály "živého" televizního vysílání ze studia ("live" video), které se dále ve zdrojovém obrazovém kodéru kódují do formátu MPEG-2. Ten umožňuje vytvářet obrazové signály se čtyřmi stupni kvality, označovanými jako *úrovně*, které korespondují nízké, střední (hlavní), zdokonalené a vysoké rozlišovací schopnosti. Kromě toho je zde definováno ještě pět *profilů*, které specifikují technické prostředky, jimiž je dosahováno požadované komprese obrazového toku. Je to profil jednoduchý, profil hlavní, dále dva profily odstupňované a profil vysoký. Celkem tedy vzniká dvacet možných kombinací "úroveň - profil".

Na vstup zdrojového kodéru vysílače DVB-S mohou také přicházet obrazové signály z různých záznamových zařízení, dále sem vstupují stereofonní nebo vícekanálové zvukové signály, které se podrobují ve *zvukovém kodéru* zdrojovému kódování, rovněž do formátu MPEG-2 (audio). Konečně ke vstupu vysílače přicházejí i datové signály, přenášející přídatná data (např. informace o programech EPG ap.), která se případně mohou kódovat v *kodeřu dat*. Všechny tyto zakódované signály mají podobu spojených dlouhých sekvencí, označovaných jako *elementární toky ES (Elementary Stream)*. Pro další zpracování je však výhodné je v blocích *vytváření paketů* rozdělit do kratších dílčích bloků. Ty vytvářejí *paketizované elementární datové toky PES (Packetized Elementary Stream)*, o typické délce např. 2048 bytů. Paketizací se získá značná flexibilita ve vytváření různých variant výsledného přenášeného televizního signálu. Pakety PES jsou dále multiplexovány, a to dvojnásobem. Jednak přicházejí do *programového multiplexeru MUX PS*, který je sdružuje do výsledného *programového toku PS (Program Stream)*. Ten je určen buď pro přímý záznam na vhodné záznamové médium (CD-ROM, hard disk), nebo postupuje k dalšímu režijnímu zpracování. Uvedená záznamová media vykazují velmi malou chybovost $BER < 10^{-10}$, a proto se označují jako *téměř bezchybná QEF (Quasi Error-Free)*. Při družicovém nebo i jiném přenosu, při němž je signál postihován nejrůznějšími typy interferencí a šumem, je však nutné počítat s mnohem větší chybovostí $BER \geq 10^{-4}$, odpovídající mediím *náchylným k chybám EP (Error Prone)*. Pro ně by potom nebyl programový tok PS vhodný. Proto je zde k dispozici ještě *transportní multiplexer MUX TS*, který formuje relativně krátké pakety o základní fixní délce 188 bytů, vytvářející *transportní paketový tok TS (Transport Stream)*, který je vhodný pro družicový, kabelový i pozemský rádiový přenos. Přenosová kapacita systému družicové televize DVB-S

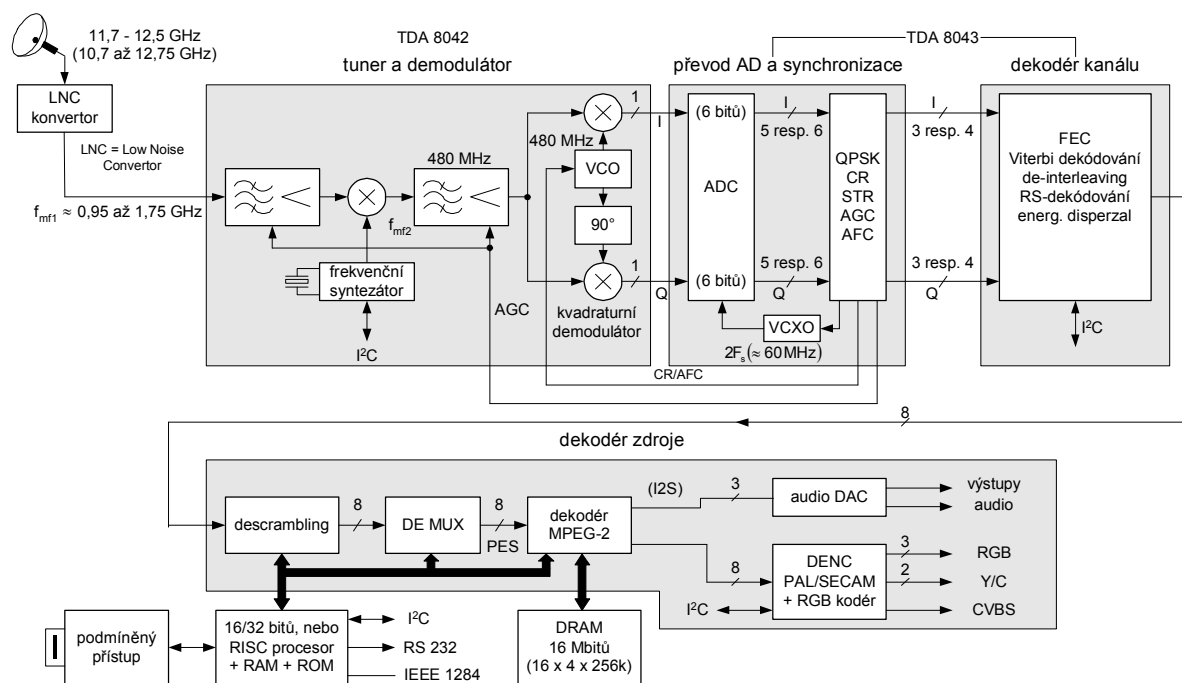
je velká, a proto může být v hlavním transportním multiplexu $MUX \sum TS$ také prováděno sdružování více dílčích programů popsaného typu; v jediném družicovém kanálu se potom může přenášet např. 4 až 6 tv programů, v závislosti na parametrech kódování ap. Ke správné funkci tohoto složitěho systému k němu musí být přiváděna ještě nejrůznější kontrolní a řídicí data, poskytující přijímačům systému *DVB-S servisní informace SI*, označované také jako *programově specifikované informace PSI*. Pomocí nich se přenášejí k přijímačům například uživatelské informace o vysílaných programech EPG, ale také technické informace o konfiguraci použitého kódování MPEG-2, o způsobech multiplexování ap. Souhrnný datový tok, obsahující všechny šířené informace (tv programy, data ...), se nazývá multiplex.

Druhou část vysílacího řetězce DVB-S tvoří vlastní vysílač, tj. bloky pro kanálové kódování a pro modulaci. Transportní paketový tok TS je zde nejprve podrobován energetickému dispersalu, který rovnoměrně rozprostírá spektrum modulovaného signálu po celém radiovém kanálu. Takto upravený transportní tok vchází na RS vnější kodér. Dále následuje konvoluční prokladač (typu Forney), pomocí něhož jsou shluky (bursty) chyb vznikající na trase signálu převáděny na chyby osamocené, které vnější dekodér přijímače již může snadno korigovat. Za prokladačem je zařazen vnitřní kodér, uskutečňující důkladné konvoluční kódování s nízkou základní rychlostí $r_c = 1/2$. Je-li však poměr signál/šum na vstupu přijímače příznivější, je možné výstup konvolučního kodéru punkturovat (tečkovat), tj. vypouštět z něho část zakódovaných bitů. Tak lze vytvářet zvýšené kódové rychlosti $r_c = 2/3, 3/4, 5/6$ a $7/8$, vedoucí sice ke slabší ochraně, avšak poskytující vyšší přenosové rychlosti. Punkturovaný signál se frekvenčně filtruje, přivádí k modulátoru QPSK a po frekvenční translaci a výkonovém zesílení vysílá.

Pro přenos modulovaného signálu se zde využívalo původně pásmo 11,7 až 12,5 GHz (později rozšiřované), s transponderem umístěným na geostacionární družici ve výšce cca 40 000 km. Příslušný družicový kanál má sice velký útlum, avšak vytváří téměř jen přímou vlnu LOS (*Line of Sight*) bez mnohocestného šíření, zajišťující stabilní příjem. K modulaci jediné nosné vlny se používá čtyřstavová modulace QPSK, která je odolná vůči šumu, interferencím ap. Má sice malou spektrální účinnost a tedy vyžaduje velké šířky pásma, avšak ty jsou v používaných mikrovlnných rozsazích snadno dosažitelná. Přenos se může uskutečňovat v široké škále šířek pásma rádiového kanálu od 26 až po 54 MHz (přednostně 27 až 36 MHz, což jsou pásma starší družicové televize s analogovou modulací FM). Při nejširším pásmu 54 MHz a nejslabším kódování $7/8$ se dosáhne nejvyšší přenosové rychlosti 68 Mbit/s, naopak při pásmu 26 MHz a nejdůkladnějším kódování $1/2$ je rychlost jen 19,7 Mbit/s. Tyto velké rychlosti poskytují systémům DVB-S možnost přenosu signálů televize s vysokou rozlišovací schopností HDTV (*High Definition Television*).

Přijímač DVB-S

Přijímač DVB-S je znázorněn ve zjednodušeném blokovém schématu na obr. 5. Ve vnější anténní jednotce přijímače je nízkošumový konvertor LNC, převádějící přijímaný signál z pásma 12 GHz do pásma první širokopásmové mezifrekvence 950 až 1 950 MHz. Na vstupu vnitřní jednotky přijímače je tuner, kde po nízkošumovém zesílení dochází ve směšovači k další přeměně na druhou, úzkopásmovou mezifrekvenci 480 MHz. Přeladitelný heterodynní signál a úzkopásmový filtr za směšovačem (obvykle SAW) zde už realizují selekci zvoleného rádiového kanálu, o různé šířce pásma 26 až 54 MHz. Tento kanál přenáší multiplexní signál s více tv a rozhlasovými programy, daty ap. Jeho demodulaci v kvadraturním demodulátoru se získají demodulované složky I, Q v základním pásmu.

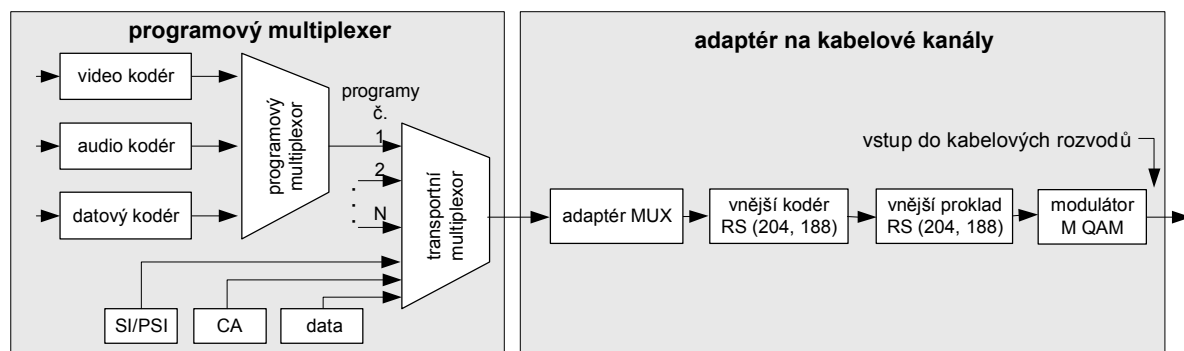


Obr. 5 Zjednodušená koncepce přijímače digitální družicové televize DVB-S; mikrovlnné pásmo přijímaných signálů může být modifikováno lokálními (národními) standardy

Tyto složky se v převodníku ADC (vzorkování ≈ 60 MHz a rozlišení 6 bit) převádějí do digitální podoby. Po frekvenční filtraci se podrobují kanálovému dekódování a tím se z nich získávají transportní pakety o délce 188 bytů. Ty se dále v případě podmíněného přístupu CA descramblují a demultiplexer z nich vybírá podle uživatelem zvoleného programu příslušné paketové toky PES. Dekodér MPEG-2 z nich rekonstruuje video a audio signály (digitální video signály Y, U, V ve formátu CCIR 656). Ty jsou přiváděny k *digitálnímu kodéru DENC (Digital Video Encoder)*, který potom umožňuje jejich konverzi na analogové složky RGB určené pro jakostní reprodukci v tv přijímači. Pro nenáročné aplikace (videomagnetofon) se hodí analogové výstupy ve formátech PAL, NTSC a SECAM.

3. Digitální televize DVB-C

Standard DVB-C je určen pro přenos televizních signálů kabelovou sítí. Užívá prakticky stejné principy digitalizace a zpracování signálů v základním pásmu jako standard DVB-S. Odchyluje se pouze v tom, že neaplikuje vnitřní konvoluční ochranné kódování, které zde totiž není nutné, neboť přenos signálů po kabelech má relativně malý útlum a není zatížen šumem a interferencemi, jako je tomu naopak při rádiových přenosech v sítích DVB-T. Kvalitní přenosový kanál také dovoluje použití vícecestavových modulací 16QAM, 32QAM, 64QAM, 128QAM a 256QAM. Pro všechny tyto modulace jsou k dispozici šířky pásma 2 MHz, 4 MHz, 6 MHz, 8 MHz a 10 MHz. Takže např. při použití spektrálně nejefektivnější modulace 256QAM je možné ve standardním kanálu kabelové televize s šířkou pásma 8 MHz přenášet digitální datový tok rychlostí okolo 60 Mbit/s. To by umožňovalo např. přenos multiplexu obsahujícího 12 televizních programů se standardní jakostí určenou kódováním MPEG-2, včetně stereofonních zvukových doprovodů ve zvýšené kvalitě HiFi (*High Fidelity*).



Obr. 6 Programový multiplexer a vysílač – adaptér ke kabelovým kanálům systému DVB-C

V televizi DVB-C se používají pro přenos po kabelu frekvenční pásma zhruba od 50 MHz do 450 (860) MHz, nejčastější jsou však jen pásma od 200 MHz do 300 MHz. Vyšší pásma jsou již nevhodná pro zvětšující se útlum komerčně dostupných koaxiálních kabelů.

Na obr. 6 je znázorněn kompletní vysílací řetězec standardu DVB-C. Koncepte přijímače je v podstatě inverzní ke koncepci vysílače.

4. Digitální televize DVB-T

V systémech pozemní digitální televize DVB-T by při použití konvenčních modulací s jedinou nosnou vlnou (SC) mohlo docházet k intersymbolovým interferencím ISI. Tomu lze zabránit přechodem k modulacím s více nosnými vlnami MC, z nichž byl pro televizi DVB-T vybrán kódovaný ortogonální frekvenční multiplex COFDM. Ten navíc umožňuje realizovat pokrytí určitých území monofrekvenčními televizními sítěmi SFN (*Single Frequency Network*). U konvenčních tv sítí je celé obsluhované území pokrýváno menším počtem vysílačů s velkými výkony, které pracují na různých kanálech. U sítí SFN je toto území pokrýváno velkým počtem vysílačů s malými výkony, které vysílají tytéž signály (soubory kanálů) na těchže frekvencích, avšak díky aplikaci formátu COFDM se vzájemně neruší. Tato koncepce potom vede ke značným úsporám frekvenčních pásem, i k úsporám energetickým.

Parametr	mód 2k	mód 8k
efektivní počet nosných N	2048 (aktiv. 1706)	8 192 (aktiv. 6818)
užitečná symbolová perioda T_s	224 ms	896 ms
ochranný interval T_g	$T_s/4$, resp $T_s/8$, resp $T_s/32$	$T_s/4$, resp $T_s/8$, resp $T_s/32$
odstup nosných $\Delta f = 1/T_s$	4464 Hz	1116 Hz
varianty modulace nosných	QPSK/16-QAM/64-QAM	QPSK/16-QAM/64-QAM
použité šířky pásma B_{RF}	4 MHz, 5 MHz, 6 MHz, 7 MHz, 8 MHz	

Tab. 1 Základní parametry standardu pozemní digitální televize DVB-T, pro přenosový formát OFDM a módy 2k / 8k

Volba hlavních systémových parametrů je u multiplexu OFDM, určeného pro televizní standard DVB-T, výsledkem celé řady kompromisů. Závisí například na dosažitelných pracovních rychlostech procesorů FFT použitých ve vysílačích i přijímačích OFDM ap. Kritická je zejména volba počtu N subnosných vln OFDM, symbolové periody T_s a délky cyklického prefixu T_g a také modulačního způsobu dílčích nosných vln. Tyto parametry jsou shrnuty v tab. 1, a to jednak pro mód OFDM 2k (2048 individuálních nosných vln v rádiovém kanálu o šířce 8 MHz) a dále pro mód OFDM 8k (8192 individuálních nosných vln v téměř kanálu)

(ETSI/EBU 300 744). Mód 2k je vhodný pro jediný vysílač, anebo pro monofrekvenční síť SFN na relativně malých lokalitách. Mód 8k může být využit buď ve spojení s jediným vysílačem, nebo u sítí SFN pokrývajících velké lokality.

Individuální nosné vlny mohou být ve standardu DVB-T modulovány ve formátu QPSK, nebo 16-QAM anebo 64 QAM. Zvolený typ modulace potom určuje přenosovou kapacitu systému, potřebnou šířku rádiového pásma B_{RF} i jeho odolnost vůči šumu a interferencím. Uvedené parametry je však možné ovlivňovat také volbou rychlosti ochranného kódování. Obecně platí zásada:

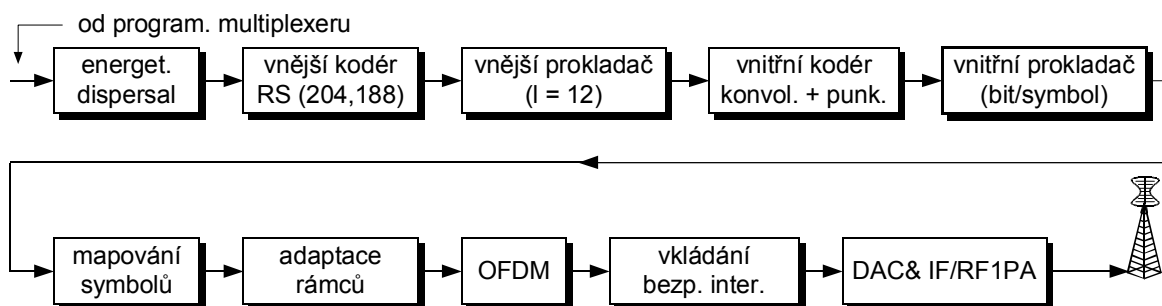
Čím důkladnější je ochrana přenosu, ať již dosažená použitím modulace nižšího řádu, nebo důkladnějším kódováním, tím nižší je dosažitelná přenosová bitová rychlost.

Vedle uvedených konvenčních modulací se u DVB-T uplatňuje ještě *hierarchická modulace*. V tomto případě je modulační datový tok rozdělen na tok přenášející data s vysokou prioritou a na tok s nízkou prioritou. Tok s vysokou prioritou je chráněn efektivním konvolučním kódem, např. s rychlostí $r_c = 1/2$, takže na přijímací straně jednoznačně určuje v konstelačním diagramu individuální symboly (stavy modulované nosné vlny), resp. jejich složky I,Q. Tok s daty s nízkou prioritou je chráněn méně efektivním konvolučním kódem, např. s rychlostí $r_c = 5/6$. K modulaci individuálních nosných je využíván takovým způsobem, aby definoval "mrak" konstelačních bodů, seskupených kolem jednoznačných pozic v konstelačním diagramu, jež jsou určeny datovým tokem s vysokou prioritou. Při dobrém poměru nosná/šum C/N , mohou být identifikovány všechny body konstelačního diagramu a oba datové toky mohou být detekovány. Při horším poměru C/N sice přesná identifikace a tedy i detekce všech bodů v konstelačním diagramu není možná, avšak je ještě alespoň možné pro libovolný z těchto bodů určit alespoň kvadrant, v němž se nachází. Za této situace je ještě možné vyhodnotit data s vysokou prioritou. Je-li tedy v systému například použita základní modulace 16-QAM, jsou 4 body konstelačního diagramu, ležící v jeho určitém kvadrantu demodulovány jako jediný bod v témže kvadrantu modulace QPSK. Demodulovaný signál je tedy degradován, avšak není ztracen.

Vysílač a přijímač standardu DVB-T

Na obr. 7 je znázorněno skupinové schéma kodéru a vlastního vysílače digitální pozemní televize standardu DVB-T. Jeho hlavní specifickou zvláštností oproti DVB-S je použití multiplexu OFDM. Kódování kanálu je zde téměř shodné s vysílačem DVB-S, navíc je zde jen vnitřní prokladač. Modulátor OFDM je řešen aplikací monolitického procesoru IFFT (viz obr. 2). Za modulátorem následují obvody pro vkládání cyklického prefixu a konečně měnič frekvence nahoru (*up-converter*) a výkonový koncový zesilovač PA (*Power Amplifier*).

V přijímači se v podstatě realizují inverzní operace vůči vysílači. Přijímaný signál je po nízkošumovém zesílení podroben první a druhé frekvenční konverzi, a to až na nulový mř kmitočet. Tím se jeho spektrum převede do základního pásma (směšování na nulovou mezifrekvenci). Zde je potom vzorkován frekvencí N/T_s , odpovídající dvojnásobku frekvence nejvyšší nosné vlny v uvedeném základním pásmu. V praxi je užitečná šířka pásma poněkud nižší, než je polovina vzorkovací frekvence, čímž se usnadní filtrace potřebná k potlačení zkreslení typu *aliasing* při vzorkování; toto omezení se realizuje odstraněním několika dílčích nosných vln na okraji vř. pásma. Dále je takto upravený signál zpracováván v procesoru FFT s N vzorky (body), a to vždy v čase kratším, než je celková symbolová perioda T_s . Poté následuje dekódování a další operace, obdobné podetekčnímu zpracování signálu v systémech DVB-S.



Obr. 7 Zjednodušená koncepce kompletního vysílače digitální pozemní televize DVB-T; vypuštění vnitřního prokladače se získá schema odpovídající družicovému standardu DVB-S

5. Vývoj systémů DVB (DVB-H, IP TV, DVB-SH, DVB-S/C/T a TVo3G)

Základní standardy DVB se nepřetržitě vyvíjejí. Již v roce 2004 bylo standardizováno digitální televizní vysílání pro mobilní příjem DVB-H (*DVB-Handheld*) a v roce 2005 digitální televizní vysílání na bázi protokolu Internet IPTV (*DVB-Internet Protocol Television*). Rozšířením standardu DVB-H do satelitního pásma S (frekvence okolo 2,2 GHz) vzniká standard DVB-SH (*DVB-Satellite Handheld*). Dále se vyvíjejí rovněž tři základní standardy, a to směrem k jejich vylepšeným modifikacím DVB-S2 (2006), DVB-C2 (2010) a DVB-T2 (2009), umožňujícím mj. jakostní přenos HDTV. Pracuje se také na zcela nových aplikacích pro datové přenosy IPDC (*Internet Protocol Datacast*). Tyto nové generace směřují ke zvýšení kvality samotného televizního přenosu, rozšiřování sortimentu poskytovaných služeb a k podstatnému zdokonalení mobility a interaktivity přenosu. A právě v posledních dvou parametrech nepochybně do vývoje televize zasáhne její konvergence s pozemní mobilní komunikací třetí a vyšších generací. V současné době je již v pokročilém stadiu vývoje např. systém mobilní interaktivní televize TVo3G (*Television over 3G*).

6. Digitální rozhlas DAB

Počátkem devadesátých let *Evropský komitét Eureka 147* a *Evropský telekomunikační standardizační institut ETSI* začaly pracovat na vývoji nového systému *digitálního rozhlasového vysílání DAB (Digital Audio Broadcasting)*. Ten je určen k šíření rozhlasových programů a dalších přidružených informací v pásmech nad 300 MHz. Pro přenos zde byl zvolen kódovaný ortogonální frekvenční multiplex COFDM, to jak ve spojení se stacionárními tak i s mobilními přijímači. Může být využíván nejen při pozemním vysílání, ale též při vysílání z družic, případně i při přenosu metalickými nebo optickými spoji. Přitom se ve všech těchto režimech zaručuje velmi vysoká kvalita příjmu, srovnatelná se systémy CD (Compact Disk). Standard DAB má tři charakteristické rysy:

- Pro zdrojové kódování aplikuje metodu *MUSICAM*. Ta např. umožňuje redukovat bitovou rychlost lineárně kódovaného stereofonního signálu, se vzorkováním 48 kHz a se 16 bitovou reprezentací vzorků, z hodnoty $48.16.2 = 1536$ kbit/s na pouhých 192 kbit/s. Přitom dosažitelná kvalita přenosu je plně porovnatelná s kvalitou reprodukce pomocí disku CD.
- Problém mnohocestného šíření signálu v pozemských kanálech řeší pomocí kódovaného ortogonálního frekvenčního multiplexu COFDMA.
- Jsou-li signály COFDM vysílané větším počtem vysílačů DAB synchronizovány tak, aby v libovolném okamžiku vysílaly prakticky stejné bity, mohou pracovat na stejných frekvencích. Tyto vysílače potom vytvářejí monofrekvenční síť SFN, podobně jako

u standardů DVB-T, která zajišťuje celému systému velmi vysokou spektrální i energetickou účinnost.

Specifikace projektu *Eureka 147 DAB* pro digitální rozhlas DAB definují tři rozdílné *přenosové módy*. Ty se liší přidělenými rádiovými pásmy, dále předpokládanými oblastmi využití a také dalšími systémovými parametry. Základní charakteristiky těchto módů jsou shrnuty v tab. 2. Mód I a mód II je zde určen pro systémy pozemských vysílačů DAB, mód III se potom uplatní v systémech družicových nebo pozemských. Vzhledem ke stejnému přenosovému formátu COFDM je implementace digitálního rozhlasu DAB dosti podobná implementaci digitální televize DVB-T

Parametr DAB	mód I	mód II	mód III
aplikace	SFN	pozemský lok. pokrytí	pozemský + družic.
odstup vysílačů	cca 60 km	cca 15 km	cca 8 km
rádiové frekvence	< 375 MHz	< 1,5 GHz	< 3 GHz
užit. symb. perioda T_s	1,0 ms	250 μ s	125 μ s
ochranný interval T_g	250 μ s	62,5 μ s	31,25 μ s
šířka pásma B_{OFDM}	1 536 kHz	1 536 kHz	1 536 kHz
počet nosných N_{OFDM}	1 536	384	192
odstup nosných	1 kHz	4 kHz	8 kHz
celková bitová rychlost	2,4 Mbit/s	2,4 Mbit/s	2,4 Mbit/s

Tabulka 2 Základní parametry systému *Eureka 147 DAB*, pro tři různé přenosové módy

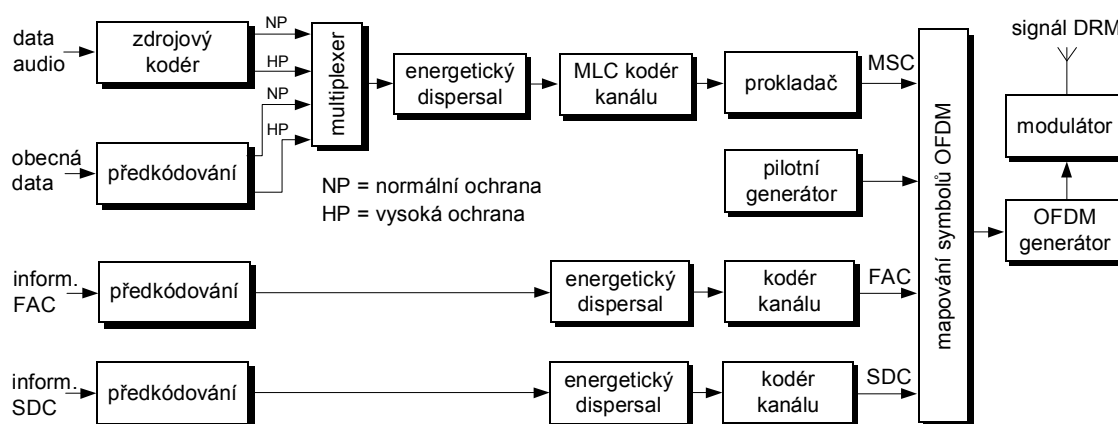
7. Digitální rozhlas DRM

Pro rozhlasové vysílání se tradičně využívá přenos s analogovou modulací AM, realizovaný hlavně v pásmech dlouhých vln (DV), středních vln (SV) a částečně i krátkých vln (KV), rozkládajících se zhruba od 150 kHz do 30 MHz. V těchto pásmech je přenos z hlediska intenzity přijímaného signálu velmi stabilní, je však postihován vysokou úrovní různých interferencí. Kvalitativní parametry rozhlasového vysílání lze zlepšit jedině přechodem na digitální systémy. Digitalizace se v této oblasti začala prosazovat nejdříve ve vyšších frekvenčních pásmech řádu stovek MHz a vyšších, a to ve formě rozhlasu DAB. Mají-li však být využity zmíněné specifické příznivé vlastnosti šíření vln také v tradičních nižších rozhlasových pásmech a přitom se má dosáhnout vysoké kvality přenosu, je nutné přejít i zde od analogových rozhlasových soustav na digitální. Z těchto důvodů mezinárodní telekomunikační unie ITU vydala v roce 2002 doporučení pro zavádění nového standardu DRM (*Digital Radio Mondiale*) pro digitální rozhlasové vysílání v pásmech DV, SV a KV. Tento standard díky progresivním digitálním technikám, v porovnání s dosavadním konvenčním rozhlasovým vysíláním s modulací AM, výrazně zlepšuje jakost reprodukováného signálu, a to na úroveň analogového rádia VKV/FM. Kromě toho umožňuje přenášet kromě jakostních audio signálů ještě texty, statické obrazy a počítačové programy (*datacasting*), je zde možný i přenos doplňkových dat RDS (*Radio Data System*), již aplikovaný v konvenčním vysílání VKV/FM. Standard DRM také nabízí podstatně vyšší komfort obsluhy přijímačů. Po technologické stránce je řešen tak, že může využívat klasické rozhlasové vysílače AM. Potřebné kódování lze potom realizovat v první fázi vývoje pomocí běžného osobního počítače, podobně lze řešit i dekódování v přijímačích DRM. Univerzální počítače je v této aplikaci ovšem výhodné nahradit levnými jednoúčelovými monolitickými moduly. Nástup systémů DRM do praxe

tedy nevyžaduje ve vysílačích žádné podstatnější investice, individuální přijímače však musí být zcela nové.

V systému rozhlasu DRM se důsledně uplatňují metody adaptivních modulací a kódování. Jako základní modulační formát se využívá kombinace kódovaného multiplexu COFDM, s kvadraturními modulacemi QAM subnosných vln. Ten doplňuje vhodné víceúrovňové kanálové konvoluční kódování MLC (*Multi-Level Coding*), prokládání a vysílání pilotních symbolů pro odhad stavu kanálu. Tato opatření v souhrnu účinně potlačují vliv selektivních i plochých krátkodobých úniků. Multiplex COFDM přenáší zakódovaný signál na větším počtu modulovaných ortogonálních subnosných vln. Primární modulační konstelace jsou 64-QAM a 16-QAM, v nepříznivých kanálech se využívá modulace QPSK. Základní koncepce vysílače DRM je znázorněna na obr. 8.

Principiální výhody digitální technologie rozhlasu DRM jsou tak závažné, že se zavádí do VKV pásma dosavadního analogového rozhlasu FM. Zde může díky větším dostupným šířkám pásma přinést zvýšenou kvalitu reprodukce, a to zhruba na úrovni kompaktních disků CD.



Obr. 8 Základní koncepce vysílače DRM

Závěr

Technika televizního a rozhlasového přenosu směřuje zcela jednoznačně k digitálním systémům, které přinesou uživatelům zvýšení kvality a rozšíření sortimentu poskytovaných služeb. Z celospolečenského hlediska pak digitalizace nabízí podstatné úspory drahocenných - a v současnosti už značně přeplněných rádiových pásem. Významné jsou v době energetických krizí také výrazné energetické úspory, a to jak na straně vysílačů tak individuálních přijímačů, které mají mj. příznivý dopad na naše životní prostředí.

Literatura:

- [1] Žalud, V.: Moderní radioelektronika. 1. vydání. BEN - vydavatelství technické literatury, Praha 2000.
- [2] Hrstka, J: Druhá generace standardu pro zemské digitální televizní vysílání. Sdělovací technika č. 1, 2009.
- [3] Kratochvíl, T.: Standardy DVB pro zemské digitální... . Sděl. technika č. 3, 2009.

Úvod do studia memristoru

Zdeněk BIOLEK¹, Dalibor BIOLEK²

¹ SŠIEŘ Rožnov pod Radhoštěm, Školní 1610, 756 61 Rožnov p.R.

² Katedra elektrotechniky, Univerzita obrany Brno, Kounicova 65, 612 00 Brno

zdenek.biolek@roznovskastredni.cz, dalibor.biolek@unob.cz

Abstrakt:

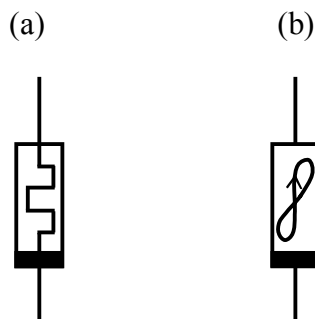
Článek je primárně určen pedagogům středních odborných škol, kteří chtějí zařadit do výuky informace o memristoru - součástce, která v blízké budoucnosti pravděpodobně změní svět informačních technologií. Cílem příspěvku je podat srozumitelné vysvětlení toho, co je to memristor, jak funguje, k čemu se dá použít a jaká je jeho budoucnost. Článek uvádí informační zdroje pro další studium a odkazy na SPICE model, který umožní experimentovat s touto součástkou v prostředí simulačního programu na počítači.

1. Úvod

Historie memristoru (**Memory Resistor**) oficiálně začíná dnem 5. září 1971, kdy Leon O. Chua publikuje článek [1] s názvem „Memristor – The Missing Circuit Element“. Autor v něm vyvozuje, že v zájmu zachování symetrie vztahů mezi čtveřicí základních elektrických veličin, jimiž jsou napětí u , proud i , náboj q a magnetický tok ψ , by měl kromě rezistoru (R), kapacitoru (C) a induktoru (L) existovat ještě čtvrtý základní pasivní prvek, který dosud unikl pozornosti – memristor (M).

Původní článek [1] obsahuje detailní odvození charakteristických vlastností této nové součástky, mezi nimiž vyniká její schopnost „pamatovat si“ celkové množství elektrického náboje, který jí prošel. V praktické rovině by to znamenalo, že odpor memristoru lze jednoduše měnit „nahoru“ i „dolů“ proudem, který do něj teče po určitou dobu jedním nebo druhým směrem. Pokud dodávku proudu přerušíme např. vypnutím napájecího napětí, memristor si poslední hodnotu svého odporu bude pamatovat.

Takový elektrický prvek by se choval jako perfektní analogová paměť s neskutečně širokým aplikačním potenciálem. Dal by se samozřejmě využít také ve výpočetní technice jako 1-bitová energeticky nezávislá přepisovatelná paměť. Pátrání po fyzikálním principu, který by umožnil realizaci memristoru jako pasivní elektrické součástky, však bylo neúspěšné. Již v roce 1972 však Oster a Auslander popisují v článku [2] mechanické, hydraulické a chemické systémy, jejichž pohybové rovnice se formálně shodují s rovnicemi odvozenými pro elektrický memristor. Počátkem 70. let minulého století si někteří badatelé začali uvědomovat, že mnohé jevy, s nimiž se v rámci svých specializací běžně setkávají, vykazují znaky memristoru. Tento proces završil opět Leon Chua, když v roce 1976 publikoval s Sung Mo Kangem článek [3] s názvem „Memristive Devices and Systems“. V něm definuje třídu tzv. memristivních systémů jako dynamických systémů s paměťovým chováním, které zahrnují memristor jako speciální případ. Práce [3] umožnila identifikovat a jednotným způsobem popsat systémy nejrůznější fyzikální povahy, u nichž byla pozorována obtížně vysvětlitelná hystereze. Přišlo se na to, že z matematického hlediska není principiální rozdíl např. mezi žárovkou, automobilovým tlumičem a nervovou synapsí, protože jejich paměťové chování se dá popsat stejnými rovnicemi.



Obr. 1 Schématické značky memristoru (a) a memristivního systému (b)

Ačkoli se dlouho vědělo o tom, že mnohé běžné jevy vykazují znaky memristoru, nemělo to na další směr vědeckého bádání prakticky žádný vliv. Situace se dramaticky změnila v květnu 2008, kdy v časopise Nature vyšel článek [4] „The Missing Memristor found“. Tým z laboratoří Hewlett Packard v kalifornském Palo Alto vedený S. Williamsem tím oficiálně oznámil, že memristor předpověděný v r. 1971 se podařilo vyrobit jako polovodičovou součástku (příběh o tom, jak k objevu došlo, vypráví S. Williams v [7]).

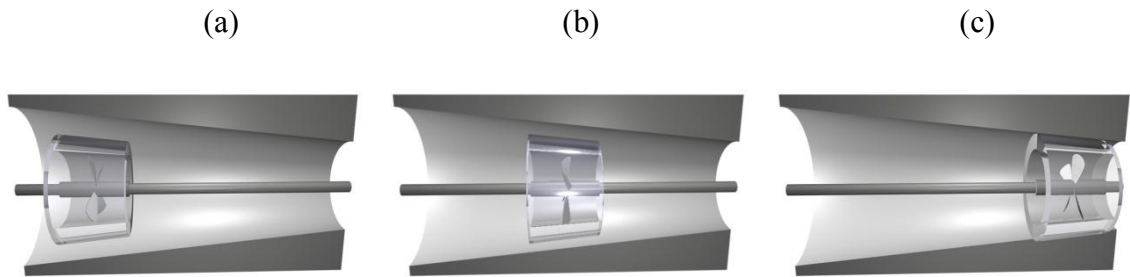
Během pouhého půlroku po oznámení objevu bylo dosaženo ve výzkumu memristoru značného pokroku. Hlavní výsledky byly prezentovány na sympoziu Memristor and Memristive Systems, které bylo svoláno na 21. listopad 2008 do Berkeley [5]. Z průběhu sympozia vyplynulo, že se intenzivně pracuje na konstrukci nevolatilní paměti RRAM (**R**esistive **R**andom **A**ccess **M**emory) využívající matice memristorů adresovaných příčkovou strukturou [6]. Tato energeticky nezávislá paměť by znamenala skutečnou revoluci ve světě informačních technologií. Jelikož memristor je v principu *analogová* paměť, fungující podle stejných zákonitostí jako nervová synapse, otevírají se dokonce cesty k vytvoření systémů, napodobujících procesy učení, charakteristické pro mozkovou činnost. Pozornost se však obrací také k základnímu výzkumu memristivních systémů [8], [9] a sám Leon Chua se vyjadřuje o tom, že se budou přepisovat učebnice základů elektrotechniky.

Tento příspěvek byl psán s cílem podat srozumitelný a přímočarý úvod do studia memristoru. Matematické pasáže, obsažené v článku, nejsou nezbytně nutné pro pochopení podstaty této součástky a čtenář je může v prvním čtení vypustit. V článku je ukázán způsob, jak si odzkoušet chování memristoru v prostředí simulačního programu, který je k dispozici zdarma.

2. Co je memristor?

Memristor je rezistor, jehož odpor lze zvyšovat nebo snižovat pomocí proudu, který jím necháme protékat po určitou dobu jedním nebo druhým směrem. Přerušíme-li průtok proudu, memristor si nastavenou velikost odporu zapamatuje.

To, jak memristor funguje, je patrné z hydromechanické analogie podle obr. 2 (autor obrázku P. Mich). Trubička, kterou protéká tekutina, odpovídá memristoru, kterým protéká elektrický proud. Proud tekutiny točí vrtulkou, která pohybuje zátkou podle směru proudu na jednu nebo druhou stranu. Pohybem zátky se mění aktivní průřez a tím také odpor, který trubička klade protékající tekutině. Přestane-li tekutina proudit, pohyb se zastaví a trubička si pamatuje svůj stav (a tím také odpor) tak dlouho, dokud tekutina opět nezačne proudit a pohybovat zátkou.

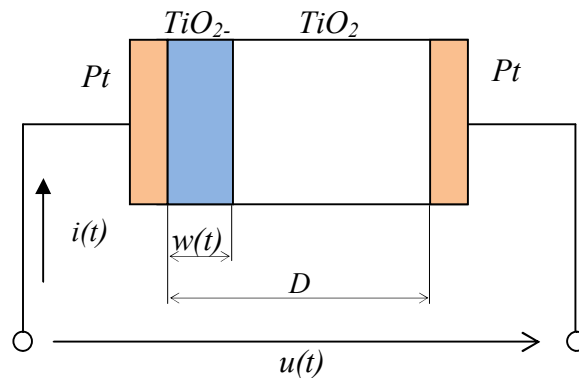


Obr. 2 Hydromechanický memristor. Vrtulka je vedena tyčí s vyřezaným závitem.

Vrtulka si tedy svou okamžitou polohou x pamatuje celkový objem q tekutiny, který skrze ni v minulosti prošel, a podle toho spojitě řídí odpor R celé soustavy, tj. $R = R(q)$. Ve stavu (a) proud prochází nejen přes vrtulku, ale i kolem zátky a odpor soustavy má minimální velikost R_{ON} . Největší odpor R_{OFF} má trubička v opačném stavu (c), kdy je zátkou uzavřena a proud prochází pouze otvorem pro vrtulku. Pohybuje-li se zátkka vlivem pohybu tekutiny střídavě na obě strany tak, že se stále udržuje uvnitř trubičky (b), chová se celá soustava jako ideální memristor, tj. jako rezistor spojitě měnící hodnotu odporu podle množství proteklého proudu.

3. Objev v Palo Alto

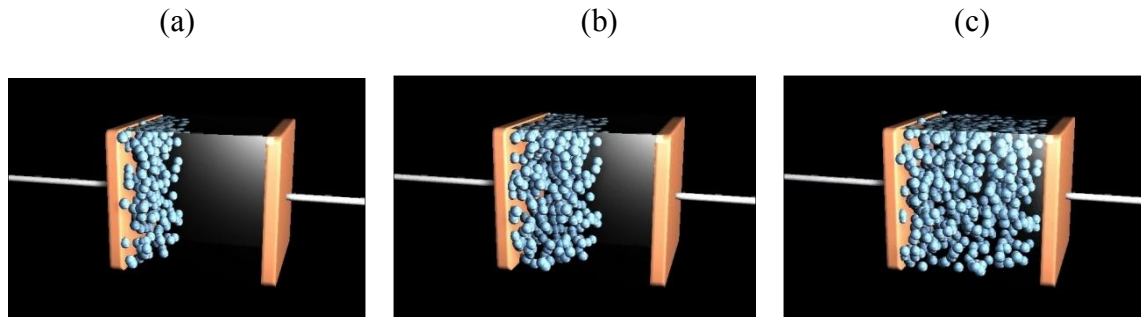
Memristor, vyvinutý v laboratořích Hewlett Packard, je tvořen tenkou vrstvou kysličníku titaničitého TiO_2 tloušťky $D \approx 10\text{-}30\text{nm}$, uzavřenou mezi dvě platínové elektrody. Samotný TiO_2 je dobrým izolantem, u jedné z elektrod je však ochuzen o atomy kyslíku, čímž vzniká vrstvička dopantů - kladně nabitých děr (na obr. 3 znázorněna modře), která se chová jako polovodič s poměrně dobrou vodivostí. Celkový odpor mezi platínovými elektrodami je dán součtem odporů polovodičové a izolační vrstvičky.



Obr. 3 Polovodičový memristor z laboratoří v Palo Alto

Vlivem protékajícího proudu se hranice mezi vodivou a nevodivou vrstvou pohybuje ve směru proudu, šířka vodivé vrstvy w se mění a celý memristor mění svůj odpor (viz obr. 4). Ve stavu (a) je odpor maximální R_{OFF} , ve stavu (c) je minimální R_{ON} . Rozhraním mezi vodivou a nevodivou oblastí lze pohybovat na jednu nebo druhou stranu proudem, protékajícím jedním nebo druhým směrem. Odpojí-li se memristor od vnějšího napětí, proud přestane pro-

tékat, rozhraní se zastaví a už svoji polohu nezmění, tj. součástka si pamatuje svůj odpor teoreticky libovolně dlouho.



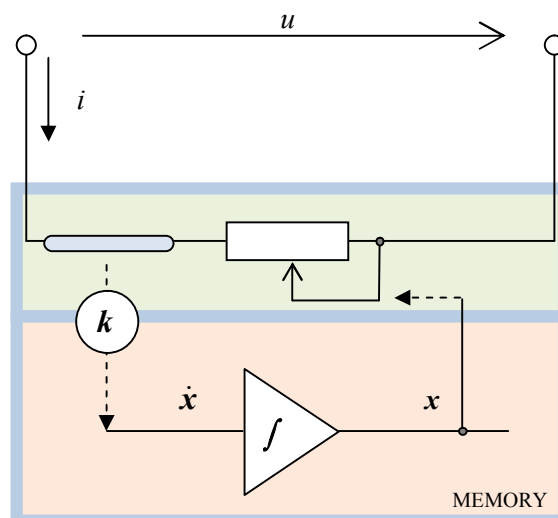
Obr. 4 Pohyb dopantů uvnitř memristoru HP

Porovnáním hydromechanického a polovodičového memristoru na obr. 2 a 4 zjišťujeme tyto analogie:

Hydromechanický memristor	Polovodičový memristor
Tlakový spád na trubičce p [Pa]	Napětí mezi vývody memristoru u [V]
Rychlost průtoku tekutiny v [$\frac{m^3}{s}$]	El. proud i [A]
Rychlost zátky V [$\frac{m}{s}$]	Rychlost rozhraní V [$\frac{m}{s}$]
Objem tekutiny q , která prošla trubičkou [m^3]	El. náboj q , který prošel memristorem [C]
Poloha zátky x [m]	Poloha rozhraní w [m]
Odpor trubičky R [$Pa \frac{s}{m^3}$]	Odpor memristoru R [Ω]

Posloupnost jednotlivých řádků tabulky ukazuje na řetězec událostí, jejichž konečným výsledkem je paměťový efekt. Tlaková nebo napěťová příčina uvede do pohybu tekutinu nebo elektrický náboj. Vrtulka v zátce nebo polovodičové rozhraní provádí integraci těchto pohybových změn v čase, přičemž výsledkem je poloha. Paměťový efekt tedy spočívá v zapamatování poslední polohy – ať už jde o polohu zátky nebo rozhraní mezi vrstvami. Od této polohy je odvozena aktuální velikost odporu memristoru.

Na obr. 5 je tento paměťový princip znázorněn ve formě strukturního schématu. Memristor se chová vůči okolí jako rezistivní port, řízený stavem x (poloha rozhraní, zátky) a doplněný pamětí pro zapamatování tohoto stavu. Paměť je tvořena mechanismem (např. vrtulka na závitu), který provádí integraci rychlosti dx/dt (rychlost proudu tekutiny, rychlost rozhraní) v čase. Tato rychlost je přímo úměrná protékajícímu proudu, konstantou úměrnosti je k (stoupání závitu, migrační rychlost nosičů náboje). Podle směru neboli znaménka protékajícího proudu se souřadnice x zvětšuje nebo zmenšuje a mění hodnotu odporu tam a zpět. Po odpojení memristoru od vnějšího buzení se zapamatuje poslední stav a tím i poslední hodnota odporu.



Obr. 5 Princip paměťového efektu memristoru

Schéma na obr. 5 dává přímý návod k sestavení rovnic, popisujících paměť memristoru i jeho rezistivní port. Pro jednoduchost zvolme za stav x poměr $x = \frac{w}{D}$ (viz obr. 3); vzhledem k výše popsané funkci se bude bezrozměrné číslo x pohybovat v pásmu mezi 0 a 1. Pak

$$\frac{dx}{dt} = ki(t) \quad (1)$$

je stavová rovnice pro popis memristorové paměti a

$$u(t) = R_{MEM}(x)i(t) \quad (2)$$

je rovnice, popisující rezistivní port,

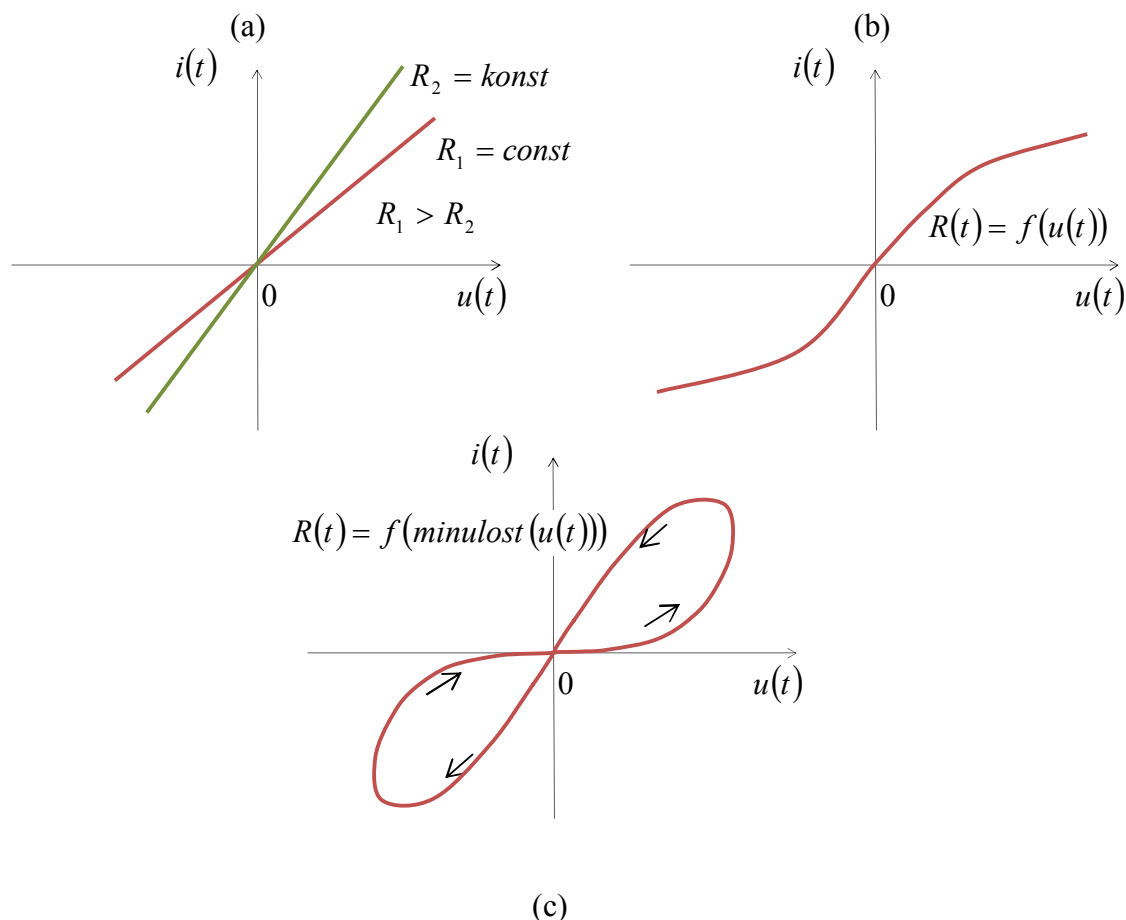
$$R_{MEM}(x) = xR_{ON} + (1-x)R_{OFF}$$

je odpor memristoru, nastavitelný v mezích $R_{MEM}(0) = R_{OFF}$ až $R_{MEM}(1) = R_{ON}$.

4. Charakteristiky memristoru

To, že memristor není obyčejná součástka, poznáme již v okamžiku, kdy se pokusíme proměřit jeho statickou ampérvoltovou charakteristiku. Z výše uvedeného totiž vyplývá, že po připojení memristoru k jakémukoliv nenulovému napětí uvedeme do pohybu rozhraní mezi vodivou a nevodivou vrstvou, což povede k tomu, že se memristor po nějaké době dostane (podle polaritý přiloženého napětí) do jednoho ze svých krajních stavů. Statickou ampérvoltovou charakteristiku tedy nezměříme vůbec, smysl však mají charakteristiky, získané buzením memristoru definovaným periodickým signálem, který by pohyboval vnitřním rozhraním tam a zpět na obě strany. Situaci při buzení lineárního rezistoru, nelineárního rezistoru a memristoru harmonickým napětím s nulovou střední hodnotou představuje obr. 6.

Memristor je stejně jako obyčejný rezistor pasivní součástka, proto musí jeho ampérvoltová charakteristika procházet počátkem souřadnic a celá leží v 1. a 3. kvadrantu.

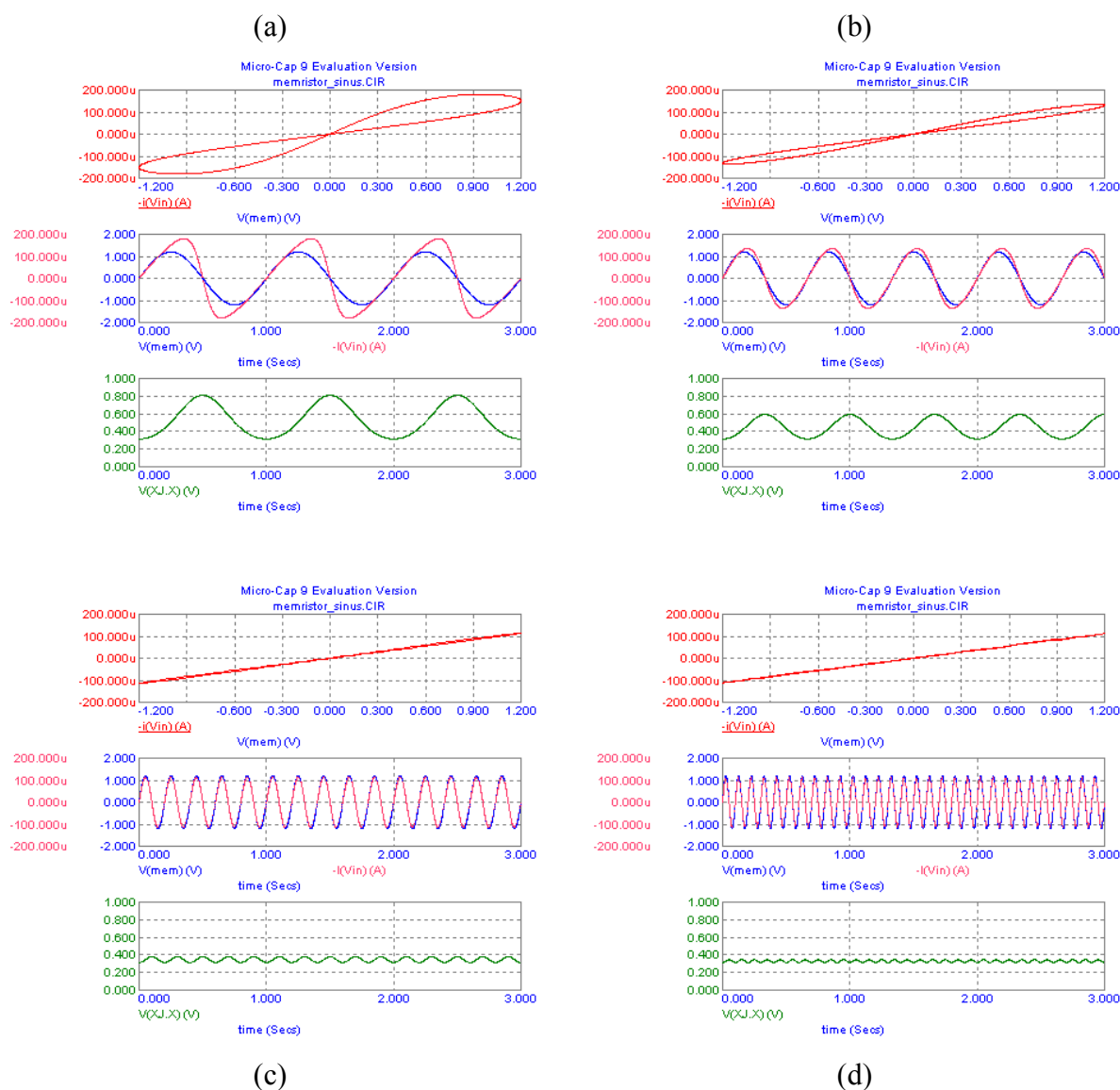


Obr. 6 Ampérvoltové charakteristiky (a) lineárního rezistoru, (b) nelineárního rezistoru a (c) memristoru

Ampérvoltové charakteristiky lineárního rezistoru jsou na obr. 6 (a). Směrnice charakteristiky udává okamžitou vodivost, která zůstává konstantní, jedná se proto o přímky. Obr. 6 (b) ukazuje, že okamžitý odpor nelineárního rezistoru závisí na okamžité hodnotě napětí (proudu), proto je strmost charakteristiky závislá na poloze pracovního bodu. U memristoru podle obr. 6 (c) je okamžitý odpor závislý nejen na okamžitém stavu systému, ale i na celé historii, která k tomuto stavu vedla. Protože stav memristoru se dán celkovým množstvím náboje, který jím prošel, má v rámci jedné periody každý stav unikátní historii a tím i unikátní směrnici pro další směr pohybu. Proto se také musí memristor vracet do počátku souřadné soustavy jinou cestou, než jakou z něho vyšel. Z toho důvodu má ampérvoltová charakteristika memristoru obecně tvar smyčky.

Takováto hysterezní smyčka je typickým znakem memristivního chování, které popsal ve své originální práci [1] Leon Chua. Díky tomuto poznávacímu znamení pochopili v laboratořích Hewlett Packard, že to, co se podařilo vyrobit, je skutečně memristor [7].

Při zvýšení kmitočtu sinusového budícího napětí urazí vnitřní rozhraní memristoru za kratší periodu kratší časový úsek. Rozdíl mezi maximální a minimální velikostí odporu memristoru proto klesá, klesá i rozkmit proudu, tekoucího memristorem. Hysterezní smyčka proto mění svůj tvar tak, že pro vysoké kmitočty přechází v úsečku. Směrnice této úsečky je dána vodivostí, která odpovídá střední hodnotě polohy x , kolem které rozhraní kmitá. Na vysokých kmitočtech se tedy memristor chová jako obyčejný rezistor.

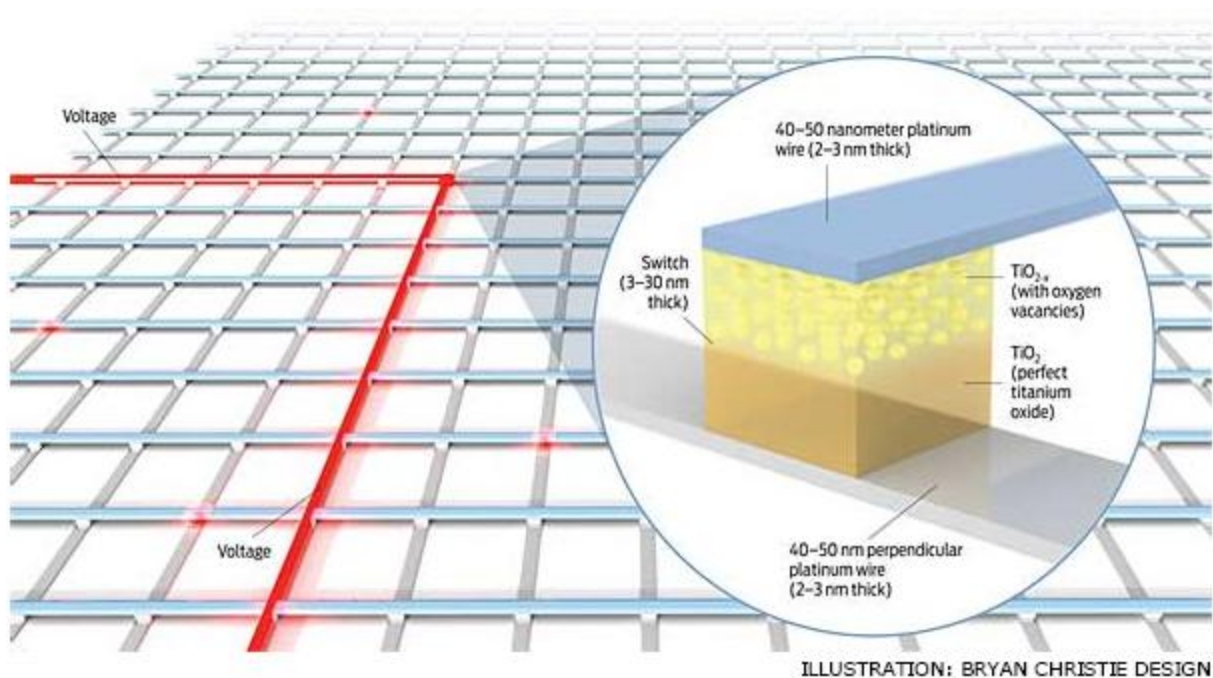


Obr. 7 Charakteristiky memristoru pro kmitočty (a) 1Hz, (b) 1.5Hz, (c) 5Hz a (d) 10Hz

Tyto obecné závěry jsou potvrzovány výsledky simulace na obr. 7. Memristor je buzen sinusovým napětím o amplitudě 1V při postupně rostoucí frekvenci od 1Hz do 10Hz. Tři sekce v každém grafu obsahují v pořadí zdola nahoru tyto časové průběhy: poloha rozhraní x , napětí a proud memristorem, hysterezní smyčka ampérvoltové charakteristiky. Z daných průběhů je jasně patrná ztráta memristivních vlastností při růstu frekvence.

5. Memristor jako paměť

Podle obsahu příspěvků na semináři [5] a zdroje [7] je budoucnost memristoru spojována s tzv. příčkovou strukturou (crossbar structure), ve které jsou jednotlivé paměťové elementy zapojeny do matice podle obr. 8.



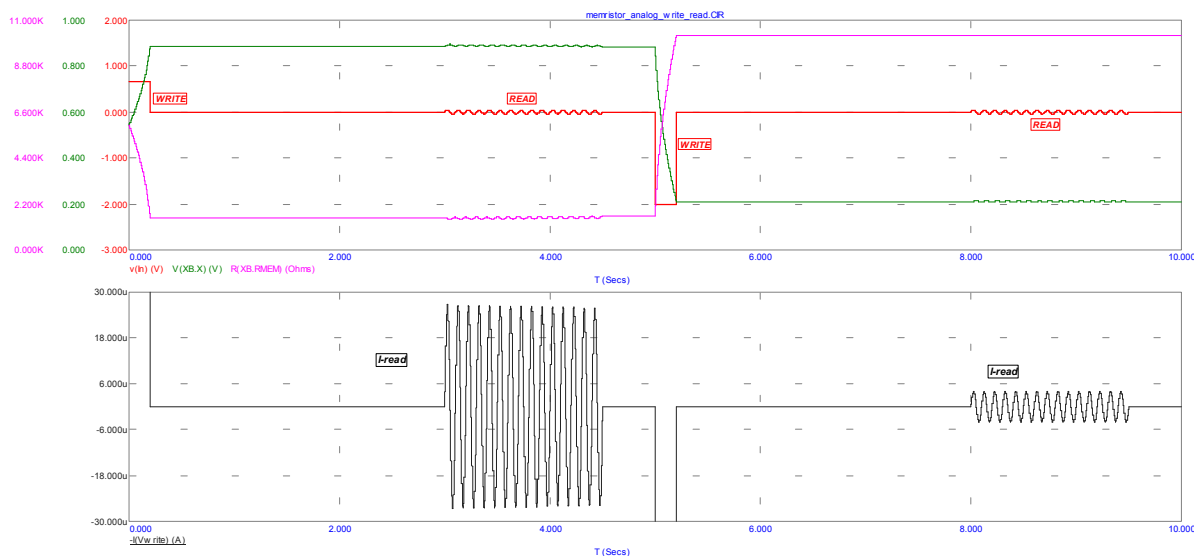
Obr. 8 Memristorová matice zapojená do příčkové struktury (zdroj obrázku - [7])

Příčková struktura je tvořena rastrem vzájemně se křížících vodičů podle obr. 8. V místě každého křížení jsou vodorovné a svislé vodiče od sebe vzájemně odděleny memristorem. Jelikož memristor je energeticky nezávislá paměť, v klidovém stavu nespotřebává paměťová matice žádný proud.

Adresování paměťové buňky pro čtení nebo zápis se provede velmi snadno aktivací příslušné dvojice vodičů x a y .

Zápisem do analogové memristorové buňky rozumíme změnu odporu memristoru na jakoukoliv hodnotu v rozmezí od R_{ON} do R_{OFF} . Odpor memristoru lze spojitě měnit množstvím dodaného náboje, což lze v praxi uskutečnit působením zdroje napětí nebo proudu po určitý čas.

Čtením analogové memristorové buňky rozumíme zjištění aktuální hodnoty odporu memristoru. Technicky se to dá zajistit změřením proudu (nebo napětí) při aplikaci definovaného napětí (nebo proudu). Problém je, že každé takové měření má zpětně za následek změnu odporu, neboť průchodem sebemenšího proudu se uvádí do pohybu vnitřní rozhraní mezi vodičovou a nevodivou vrstvou memristoru. Východiskem z tohoto dilematu by mohlo být čtení buňky pomocí dokonale symetrického sinusového signálu malé amplitudy, jak je naznačeno na obr. 9.



Obr. 9 Zápis do memristoru (*WRITE*) a čtení stavu (*READ*)

Zápis do buňky se provádí napěťovým impulzem, který dodá náboj potřebný pro změnu odporu memristoru. V naší ukázce je šířka impulzu konstantní, podle potřeby se mění amplituda a polarita impulzu. Z obr. 9 je patrné, že první zápisový impuls (červená křivka) zvětší šířku dotované vrstvičky (nastavení stavu x na vyšší hodnotu, zelená křivka) a tím sníží odpor memristoru (fialová křivka), druhý zápisový impuls opačné polaritavy zvýší hodnotu odporu na jinou hodnotu. Po ukončení každého zápisového impulzu si memristor hodnotu odporu zapamatuje, ta se přečte v následujícím čtecím cyklu. Čtení se realizuje aplikací harmonického napětí malé amplitudy, snímá se velikost amplitudy proudu (černá křivka). Z výsledků simulace je patrné, že malé čtecí napětí pouze rozkmitá vnitřní rozhraní mezi vodivou a nevodivou vrstvou kolem její aktuální hodnoty. Pokud se zajistí nulová střední hodnota celého čtecího signálu, nedojde vlivem čtecího cyklu k ovlivnění měřeného stavu.

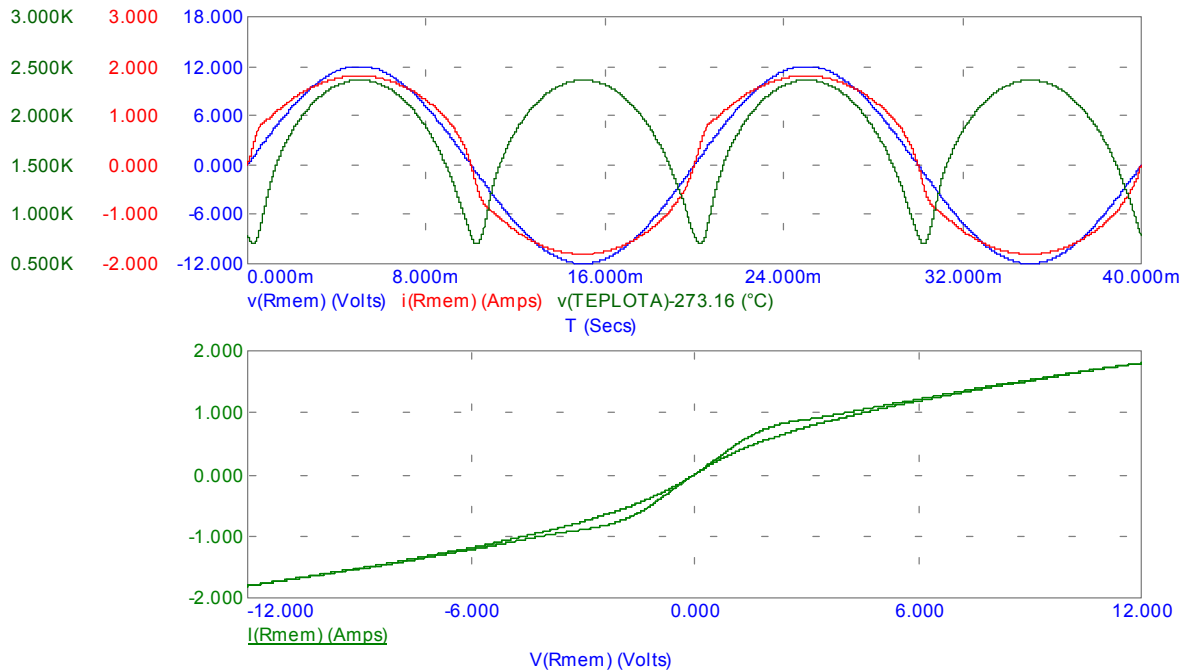
Z této ukázky je patrné, že nasazení memristoru do technických aplikací si vyžádá vývoj nových metod *analogové* techniky, i když půjde o aplikace v technice *číslicové*.

6. Memristor jako speciální případ memristivního systému

Memristor z laboratoří HP se ve skutečnosti nechová jako ideální memristor, protože jeho odpor nemůže vybočit z intervalu (R_{ON}, R_{OFF}) . Jakmile rozhraní mezi vodivou a nevodivou vrstvou dorazí vlivem protékajícího proudu k jednomu z okrajů memristoru, stav x se již dále nemůže měnit, i kdyby proud protékal dál. Na okrajích memristoru tak přestává platit, že jeho odpor je přímo úměrný množství náboje, který jím prošel. Jinak řečeno, memristor na svých okrajích „ztrácí paměť“, neboť veškerý náboj, který jím protekl a přesto nijak nezměnil jeho stav, je vlastně zapomenut.

Pasivních systémů, které si pamatují množství proteklé substance pouze v omezené míře, je kolem nás celá řada. Všechny se poznají podle hysterezního chování, které ukazuje na nějaký druh paměti. Lehce pochopitelným příkladem může být chování žárovky.

Odpor žárovky je dán teplotou vlákna, která do jisté míry závisí na celkovém množství proudu, který jím protekl. K aktuální teplotě vlákna totiž nepřispívá pouze aktuální velikost proudu, ale s určitou vahou přispívá i všechen proud, který tekl vláknem v minulosti. Právě tato skutečnost činí z žárovky paměťový prvek s hysterezní ampérovoltovou charakteristikou.



Obr. 10 Simulace hysteretzního chování žárovky 12V/21W

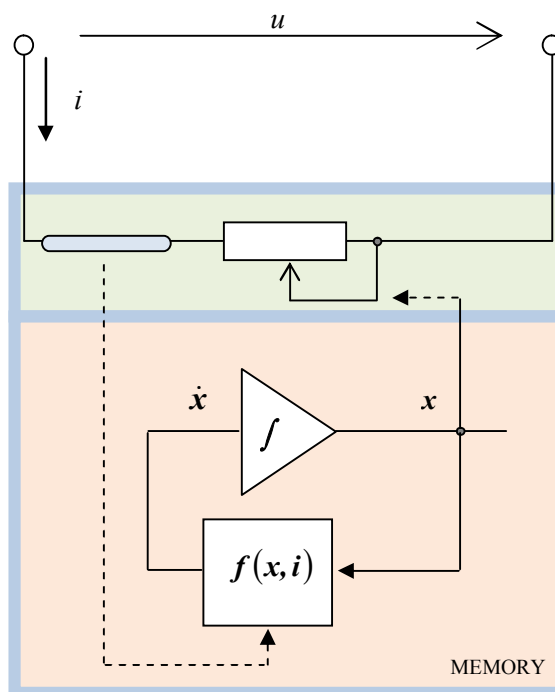
Obr. 10 představuje výsledky počítačové simulace chování žárovky 12V/21W, napájené ze zdroje sinusového napětí 12V/50Hz. Stavovou veličinou x , od které se vše odvíjí, je teplota vlákna. Počítačový model vychází z toho, že rychlost růstu teploty vlákna (dx/dt) je přímo úměrná dodávanému příkonu, sníženému o ztráty, vzniklé vyzařováním do okolí. Tyto ztráty způsobují ochlazování žárovky a jsou úměrné čtvrté mocnině teploty vlákna. Stavová rovnice žárovky a rovnice jejího rezistivního portu pak budou mít tvar

$$\frac{dx}{dt} = f(x, i) \quad (3)$$

$$u(t) = R(x, i)i(t) \quad (4)$$

kde $f(x, i) = (a + bx)i^2 - cx^4$, a , b a c jsou materiálové konstanty a $R(x, i)$ je funkce, popisující teplotní závislost obecně nelineárního odporu vlákna žárovky.

Rovnice (3) a (4) jsou zobecněním rovnic (1) a (2) a popisují obecný memristivní systém, který byl poprvé pojmenován a popsán v [3]. Jeho struktura přímo vyplývá z výše uvedených rovnic a je představena na obr. 11.



Obr. 11 Obecný memristivní systém

Ze schématu na obr. 11 je patrné, že memristivní systém je opět rezistor doplněný pamětí. Na rozdíl od memristoru však paměť může mít mnohem variabilnější podobu. Stavová rovnice (3), popisující tuto paměť, je totiž rovnicí zcela obecného nelineárního dynamického systému, kde stavem x může být celý vektor vnitřních proměnných.

Takto pojatý memristivní systém nemusí být ani elektrické povahy, neboť stavovým vektorem i portovými proměnnými u , i mohou být jakékoli fyzikální veličiny. Díky tomu jsme schopni rozpoznat známky jakéhokoliv paměťového chování v široké škále systémů nejrůznější fyzikální povahy, a to dokonce bez ohledu na to, zda se jedná o živé organizmy nebo stroje (viz např. popis memristivního chování améby v [10]).

Memristivní systémy je možno nalézt doslova na každém kroku. Z výše uvedeného příkladu žárovky plyne, že dokonce každý vodič, kterým protéká proud, je memristivním systémem. V práci [3] jsou jako zástupci těchto systémů jmenovány termistor, výbojkové trubice a iontový systém nervové buňky.

Z porovnání strukturních schémat na obr. 5 a obr. 11 vyplývá, že memristor je pouze speciálním případem memristivního systému. Absence zpětné vazby u paměťového integrátoru způsobuje, že memristor má „dokonalou paměť“. Právě takový pasivní a navíc energeticky nezávislý prvek se velmi dobře hodí k trvalému uchování informace v technických zařízeních.

7. Je memristor skutečně čtvrtým základním prvkem?

Použitím polovodičového memristoru v technických zařízeních dojde zřejmě ke změnám, které snesou srovnání se změnami, vyvolanými kdysi objevem tranzistoru. Ještě významnější je však to, že memristor nás přinutí změnit i náš pohled na základní principy, podle kterých se řídí procesy v živé i neživé přírodě. Zdá se totiž, že memristor je pouze jedním z více „podivných“ prvků, o jejichž existenci jsme dosud neměli ani tušení.

Prozatím se nám memristor může jevit jen jako pouhý rezistor se specifickou závislostí na prošlém náboji. Uvidíme však, že „podivné“ chování, zastoupené hysterezními závislostmi, je způsobeno výběrem veličin, prostřednictvím kterých jsme navyklí zkoumat jevy

v elektrických obvodech. Přejdem od napětí u a proudu i k jiné dvojici veličin přejdeme do jiné souřadné soustavy, která nám umožní spatřit skutečně fundamentální principy memristoru.

Souřadnice každého bodu hysterezní křivky (c) na obr. 6 jsou mezi sebou vázány vztahem Ohmova zákona $u(t)=R(q)i(t)$. Pokusme se zjednodušit tuto rovnici tím, že ji vyjádříme co možná nejmenším počtem fyzikálních veličin. Uvážíme-li, že proud vyjadřuje rychlost změny náboje $i=dq/dt$, vyjde nám po elementární úpravě $u(t)dt=R(q)dq$. Výraz na levé straně je diferenciálem veličiny

$$\psi(t) = \int u(t)dt . \quad (5)$$

Po další elementární úpravě vyjde diferenciální podoba Ohmova zákona pro memristor

$$R(q) = \frac{d\psi}{dq} . \quad (6)$$

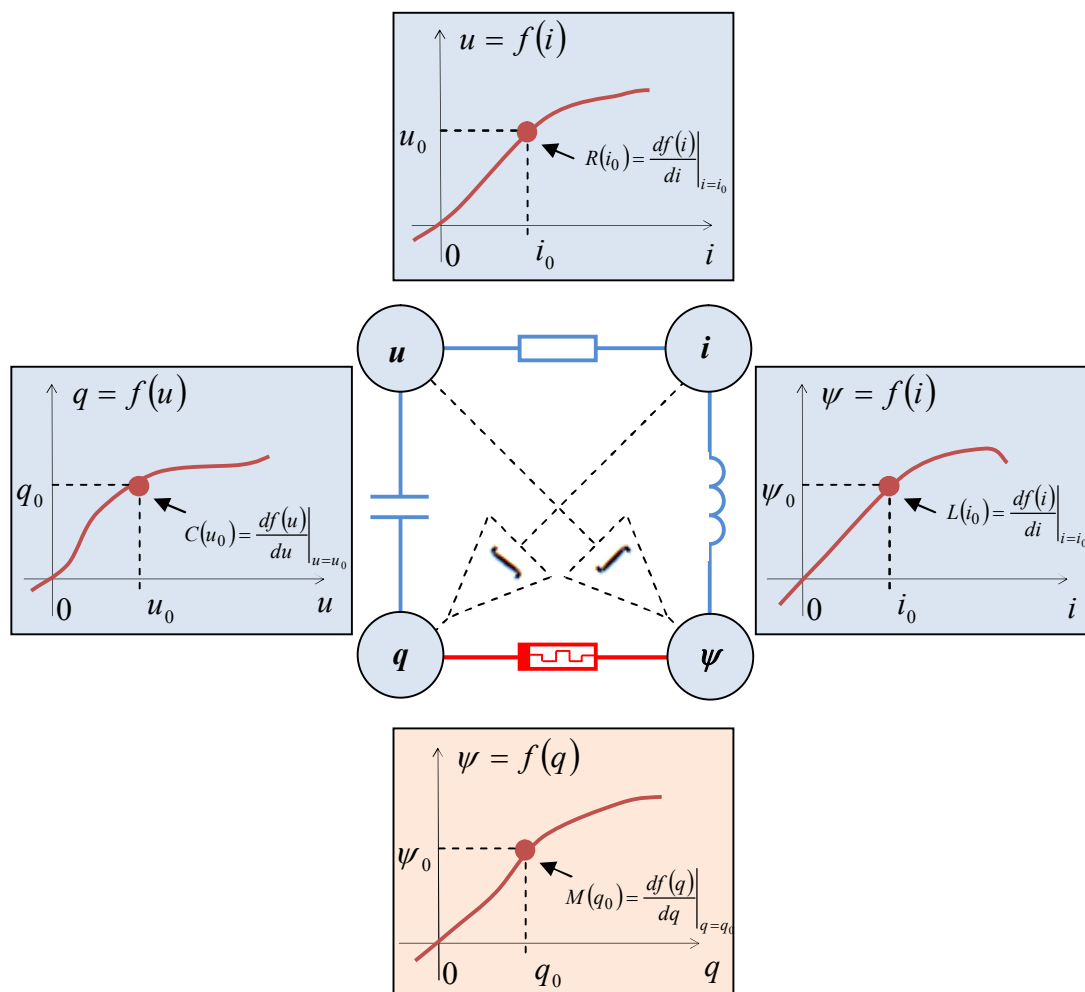
Veličina ψ daná výrazem (5) je časovým integrálem napětí a v elektrotechnice má rozměr magnetického toku. Její jednotkou je 1 Weber. V kontextu konkrétní aplikace nemusí vyjadřovat tok skutečného magnetického pole a tehdy se označuje pouze jako *tok (flux)*. Magnetický tok je elektrickou obdobou mechanické hybnosti (nebo také impulzu síly), což je jedna ze stěžejních veličin teoretické mechaniky.

Rovnice (6) tedy říká, že okamžitý (dynamický) odpor memristoru zkoumaného pomocí toku ψ a náboje q je roven strmosti křivky, vyjadřující závislost

$$\psi = f(q) . \quad (7)$$

Memristor je tedy součástí, která vytváří přímou vazbu mezi tokem a nábojem. Zásadní význam, který má tato skutečnost pro teoretickou elektrotechniku, je patrný z obr. 12.

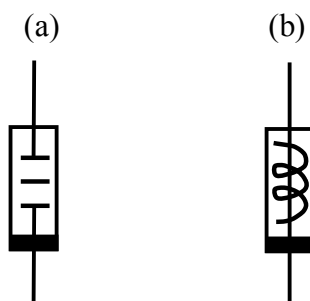
Uprostřed obr. 12 jsou ve čtyřech kruzích znázorněny čtyři základní elektrické veličiny: elektrické napětí u , elektrický proud i , magnetický tok ψ a elektrický náboj q . Mezi těmito veličinami existuje šest relací, z nichž dvě jsou integrace podle času ($q = \int idt$ a $\psi = \int udt$) a tři další zajišťují prvky rezistor ($u= Ri$), kapacitor ($q=Cu$) a induktor ($\psi=Li$). Prvek, který by realizoval vazbu mezi magnetickým tokem ψ a elektrickým nábojem q , nebyl dosud objeven, pouze se předpokládalo, že v zájmu zachování symetrie by měl existovat. Od předpovězení existence hypotetického memristoru do jeho nalezení uplynulo 37 let. Teprve v květnu 2008 bylo potvrzeno, že memristivní jevy se hojně vyskytují ve světě nanometrických rozměrů.



Obr. 12 Memristor jako čtvrtý chybějící element

Koncem r. 2008 oznámil duchovní otec memristoru Leon Chua, že by měly existovat další dva dosud neobjevené prvky, které pojmenoval memkapacitor (**Memory Capacitor**) a meminduktor (**Memory Inductor**) [5]. Podaří-li se tyto prvky vyrobit, pro dnešní techniku budou znamenat ještě větší revoluci než memristor: pokud by se totiž použily jako paměťové buňky, jejich programování i čtení by se teoreticky obešlo bez energetických ztrát [5].

Základní teoretická východiska a detailní rozbor očekávaných vlastností těchto nových součástek byly zveřejněny v práci [11]. Toto pojednání však prohloubilo již existující pochybnosti o tom, zda je memristor skutečně čtvrtým fundamentálním prvkem. Blaise Mouttet dokazuje v [12], že původní představa o memristoru jako o čtvrtém chybějícím elementu byla mylná a vysvětluje, že existují pouze tři fundamentální prvky (R, L a C); memristor, memkapacitor a meminduktor mají být pouze jejich paměťovými variantami. Na scénu také přicházejí elementy zvané memimpedance a memadmitance, které skvěle doplňují vše, co prozatím víme o paměťových prvcích a o jejich vztahu ke klasické R-L-C trojici. Tyto nové revoluční poznatky snad pomohou objasnit některé jevy, pozorované ve světě nanotechnologií, na jejichž vysvětlení se dosud marně čeká.



Obr. 13 Schématické značky memkapacitoru (a) a meminduktoru (b)

Pokud jsou závěry práce [12] správné, nastává zajímavá situace: cestu k novým převratným objevům otevírá prvek, objevený na základě zcela mylného předpokladu.

8. Závěr

Od r. 1971 figuroval memristor ve vědecké literatuře pouze jako hypotetický prvek. Přestože byly dopředu známy jeho vlastnosti, nikomu se nepodařilo jej vyrobit jako pasivní součástku. Vědělo se, že je jedním z mnoha memristivních systémů, které se kolem nás zcela běžně vyskytují. Dnes víme, že memristor se hledal „na špatném místě“ – příliš se lpělo na představě, že tato součástka musí mít co do činění s *magnetickým* tokem, jak to kdysi předpověděl Leon Chua. Teprve v květnu 2008 bylo objeveno, že memristivní chování je přirozeným jevem ve světě nanometrických rozměrů.

Memristor nebyl původním cílem výzkumu, proto byl objev v laboratořích Hewlett Packard nečekaným, ale o to příjemnějším překvapením. Podle [7] nemuselo k objevu vůbec dojít, kdyby si Greg Snider nepovšiml, že hysterezní křivky, zjišťované dennodenně na měřných vzorcích, se nápadně podobají grafům ze zapomenuté práce [1] z r. 1971 o memristoru.

Příběh o memristoru nám dává vynikající poučení o ceně vzdělanosti. Přestože teorie memristivních systémů je velmi dobře propracována už přes 30 let a umožňuje pochopit obecné principy paměťového chování dynamických systémů, do dnešní doby o ní vědělo jen velmi málo lidí. Naštěstí mezi ně patřil i pracovník Hewlett Packard G. Snider, který stál u zrodu memristoru.

Od objevu v květnu 2008 se do výzkumu, spojeného s memristorem, investuje čím dál více prostředků a úměrně tomu se o této součástce píše stále častěji. Kromě zpráv o konkrétních technických řešeních ([6], [13], [14] aj.) vychází mnoho prací, zaměřených na základní výzkum. Dosud nikdo systematicky nezkoumal, jak se bude memristor chovat ve spojení s trojicí základních prvků $R - L - C$. Jediná práce, která se zabývá touto otázkou, je [6] a ta vyšla v lednu 2009. Vývoj je tak rychlý, že mnozí autoři nemíní čekat, až jejich práce projde zdoluhavou procedurou, spojenou s oponenturou v impaktovaných časopisech, a publikují přímo na internetu buď formou e-printů ([8], [9], [10], [11]) nebo blogů ([12]). Velkorysým počinem Univerzity Berkeley bylo zveřejnění kompletního videozáznamu konference [5] na internetu.

Je zcela zřejmé, že mnohé ze zásadních teoretických prací, které vznikly bezprostředně po objevu HP memristoru, mohly být napsány kdykoliv během předešlých 37 let. Memristor nám zde nastavuje zrcadlo: poznání fundamentálních principů světa, ve kterém žijeme, je často vyhodnoceno jako bezcenné, pokud nevede k bezprostřednímu zisku. Mediálně přitažlivější jsou témata typu „instant turn-on computers“, která fungují i jako lákadla pro návštěvníky mezinárodních vědeckých konferencí ([15]).

Objevují se první pokusy zavést problematiku memristoru do výuky. Tomuto tématu je věnována práce [9], která popisuje praktické zkušenosti z vysokoškolské výuky na LaGuardia Community College v New Yorku.

Memristor bude zřejmě ještě dlouho nedostupný jako součástka, se kterou by bylo možno experimentovat. V práci [16] je však popsán SPICE model, který umožňuje provádět realistické pokusy s memristorem přímo na počítači. Na základě tohoto modelu byl vyvinut příslušný software pro simulátor Micro-Cap, jehož evaluační verze je dostupná zdarma. Zájemci o počítačové experimenty s memristorem si budou moci v brzké době stáhnout příslušný software z adresy [17]. Grafické výstupy některých počítačových experimentů v prostředí simulátoru Micro-Cap je možno v tomto příspěvku nalézt na obr. 7, 9 a 10.

Poděkování

Výzkum, jehož výsledky jsou popsány v této práci, byl zčásti podporován projektem MŠMT „Výzkum metod a postupů pro seznámení veřejnosti s prací výzkumného pracovníka prostřednictvím informačních technologií“, řešeném na UMEL FEKT VUT v Brně.

Literatura

- [1] CHUA, L.O. Memristor – The Missing Circuit Element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. CT-18, No. 5, September 1971, p. 507 – 519.
- [2] OSTER, G.F., AUSLANDER, D.M. The Memristor: A New Bond Graph Element. *Trans. ASME on Dynamical Systems, Measurement and Control*, vol. 94, No. 3, 1972, p. 249 – 252.
- [3] CHUA, L.O., KANG, S.M. Memristive Devices and Systems. *Proceedings of the IEEE*, vol. 64, No. 2, February 1976, p. 209 – 223
- [4] STRUKOV, D.B., SNIDER, G.S., STEWART, D.R., WILLIAMS, R.S. The missing memristor found. *Nature (London)*, vol. 453, May 2008, p. 80 – 83.
- [5] <http://webcast.berkeley.edu/events.php> - kompletní videozáznam symposia Memristor and Memristive Systems, Berkeley, November 2008.
- [6] JOHNSON, R.C. Memristors ready for prime time. *EETimes*, 2008, August 7, <http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=208803176>
- [7] WILLIAMS, R.S. How we found the missing memristor. *IEEE Spectrum*, 2009, December 1, p. 1-11, www.spectrum.ieee.org/print/7024
- [8] JOGLEKAR, Y.N., WOLF, S.J. The elusive memristor: properties of basic electrical circuits. *arXiv:0807.3994 v2 [cond-mat.mes-hall]* 13 January 2009, p.1-24.
- [9] WANG, F.Y. Memristor for introductory physics. *arXiv:0808.0286 v1 [physics.class-ph]*, 4 August 2008, p.1-4.
- [10] PERSHIN, J.V., FONTAINE, S.L., VENTRA, M.D. Memristive model of amoeba's learning. *arXiv: 0810.4179 v2 [q-bio.CB]* 24 October 2008, p.1-18.
- [11] VENTRA, M., PERSHIN, J.V., CHUA, L.O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors and meminductors. *arXiv:0901.3682 v1 [cond-mat.mes-hall]* 23 January 2009, p.1-6.
- [12] MOUTTED, B. An Introduction to Memimpedance and Memadmittance Systems Analysis. <http://knol.google.com/k/blaise-mouttet/an-introduction-to-memimpedance-and/23zgknsxn1chu/5#view>
- [13] JOHNSON, R.C. 3-D memristor chip debuts. *EETimes*, 2008, November 26, <http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=212200673>

- [14] JOHNSON, R.C. Will memristors prove irresistible? EETimes, 2008, September 1, <http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=210004310>
- [15] ECCTD 2009, European Conference on Circuit Theory and Design 2009. Antalaya, Turkey, August 2 to 27. <http://ecctd09.dogus.edu.tr/index.htm>
- [16] BIOLEK, Z., BIOLEK, D., BIOLKOVÁ, V. SPICE Model of memristor with nonlinear dopand drift. Radioengineering, vol. 18, No. 1, April 2009.
- [17] Micro-Cap 9, simulátor elektrických obvodů. Výrobce Spectrum Software, USA. Domovská stránka <http://www.spectrum-soft.com>

Poznámky:

A series of 22 horizontal light blue lines for taking notes, arranged vertically below the header.

