

Od Antikytherského stroje k číslicovému počítači

Pavel Pokorný

Ústav matematiky, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

<http://www.vscht.cz/mat/Pavel.Pokorny>

29. 10. 2008

O vývoji počítačů od starověkých mechanismů přes analogové až k dnešním digitálním.

1 Jaký je nejstarší dnes známý počítač?

Za nejstarší dnes známý počítač je považován Antikytherský stroj. Je to pravěký mechanický kalkulátor pro určování poloh Slunce, Měsíce a některých planet (Merkuru, Venuše, Marsu a Jupiteru) na obloze. Tedy předchůdce Staroměstského orloje z roku 1410 (obr. 3).



Obr. 1: Originál Antikytherského stroje – nejstaršího dnes známého počítače – se nachází v Národním archeologickém muzeu v Athénách.

Byl objeven v Antikytherském vraku u řeckého ostrova Antikythera mezi Kytherou a Krétou v roce 1901. Nedávné výzkumy, zejména z roku 2006, ukazují, že pochází z období cca 100 př. n. l. a má se za to, že byl na palubě lodi, která se potopila na cestě z řeckého ostrova Rhodos do Říma mezi 80-60 př. n. l.

Přístroje srovnatelné složitosti se objevily až o tisíc let později. Použití moderních metod, jako rentgenová tomografie s vysokým rozlišením, dovoluje rozluštit řecké nápisy na jeho cifernících a návod k použití na jeho stěnách. Poslední výzkumy naznačují, že umožňoval také stanovit fáze Měsíce a začátky starověkých olympijských her. Stroj má 3 číselníky a 37 ozubených kol, z nichž se dochovalo 30. Dnes je vystavený v Národním archeologickém muzeu v Athénách (obr. 1) spolu s replikou (obr. 2). Přístroj do dnešní doby přitahuje pozornost odborníků [1], [2].



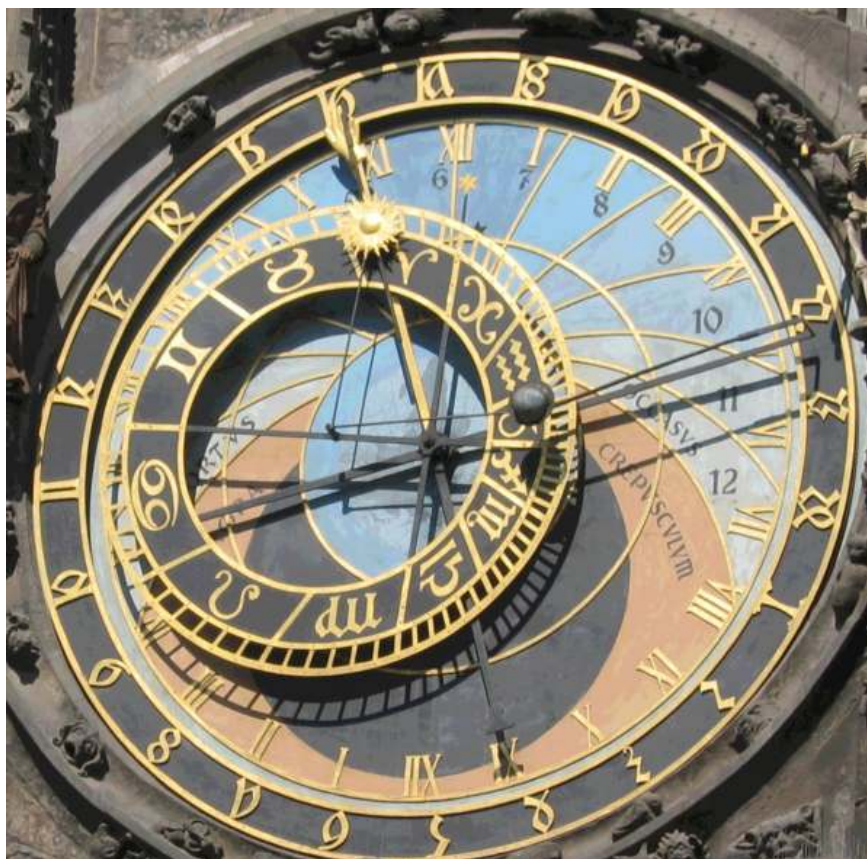
Obr. 2: Replika Antikytherského stroje.

2 Jaký je rozdíl mezi analogovým a digitálním počítačem?

Analogový počítač pracuje se spojitě proměnnými veličinami, které mohou nabývat všech hodnot z jistého intervalu. První analogové počítače využívaly mechanické součásti. Jiné byly hydraulické konstrukce. Velkého rozmachu v druhé polovině dvacátého století dosáhly elektronické analogové počítače postavené z operačních zesilovačů, odporů, kondenzátorů a polovodičových diod. Vhodným propojením těchto stavebních prvků je možné sestavit obvod, který lze popsat diferenciální rovnicí. Potom sledováním časového průběhu napětí na výstupu tohoto obvodu dostaneme řešení dané diferenciální rovnice. To je zejména užitečné v případě, kdy daná diferenciální rovnice nemá analytické řešení. Změnou parametrů elektrického obvodu či změnou jeho konfigurace lze řešit jinou diferenciální rovnici z jisté třídy rovnic.

3 Jaké jsou nevýhody analogových počítačů?

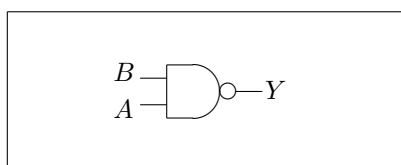
Při práci s analogovými veličinami se nezbavíme šumu, který postupně degraduje zpracovávanou analogovou informaci v každém kroku (získání, přenos, zpracování, uchování). Další nevýhodou je to, že nelze dobře uchovat výsledek jednoho výpočtu a použít jej jako vstup pro další výpočty. V neposlední řadě rychlost analogových počítačů je menší než rychlost digitálních počítačů. Tyto nevýhody analogového zpracování informace se projevují v tom, že digitální



Obr. 3: Astronomická část Staroměstského orloje je obdobou Antikytherského stroje.

technika dnes převažuje nad analogovou nejen v oblasti vědecko technických výpočtů, ale při zpracování jakékoliv informace. Jako příklad lze uvést digitální fotoaparát či kameru, CD přehrávač, který vytlačil gramofon, MP3 přehrávač nahradil magnetofon, mobilní telefon, který dnes používají i děti předškolního věku, již ani opravdového analogového předchůdce nemá.

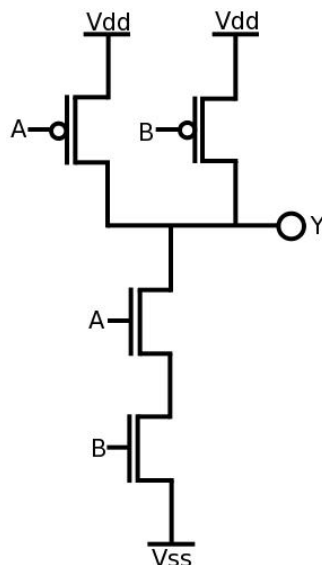
4 Jak pracuje elektronický digitální počítač?



A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Obr. 4: Schématická značka a pravdivostní tabulka pro hradlo NAND, které plní funkci negovaného logického součinu $Y = \text{NOT}(A \text{ AND } B)$. Je netriviálním faktem, že z těchto hradel lze postavit počítač, který vás porazí ve hře šachy.

Základem je hradlo, jednoduchý elektronický obvod sestavený dnes z tranzistorů, dříve z elektronek nebo relé, který plní jednu logickou funkci, např. negovaný logický součin. Má např. dva vstupy a jeden výstup. Na každý vstup je přivedeno určité napětí. Je-li napětí menší než jistá hodnota, např. 2V, je považováno za logickou hodnotu 0, je-li větší než jiná hodnota, např. 3V, je považováno za logickou hodnotu 1. Rozsah mezi těmito dvěma hodnotami, např. 2V až 3V je tzv. zakázaná oblast, ta se nepoužívá a slouží pro omezení vlivu šumu. Plní-li hradlo funkci negovaného logického součinu, je na jeho výstupu logická hodnota 0 pouze v případě, že na obou jeho vstupech je

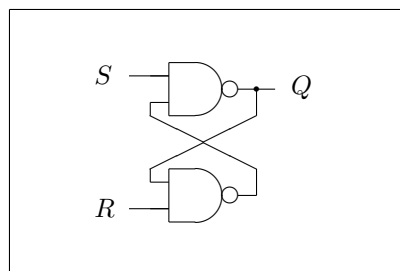


Obr. 5: Hradlo NAND realizované technologií CMOS – schéma.

logická hodnota 1, jinak je na výstupu 1 (viz obr. 4).

Důležité je, že výstup má jisté malé zpoždění vůči změnám na vstupech. V praxi je sice žádoucí, aby toto zpoždění bylo co nejmenší, ale díky tomu, že je vždy nenulové, lze takováto hradla pospojovat do klopných obvodů, které již mohou sloužit jako paměť.

5 Jak pracuje klopný obvod?



Obr. 6: Klopný obvod S-R lze složit ze dvou hradel NAND.

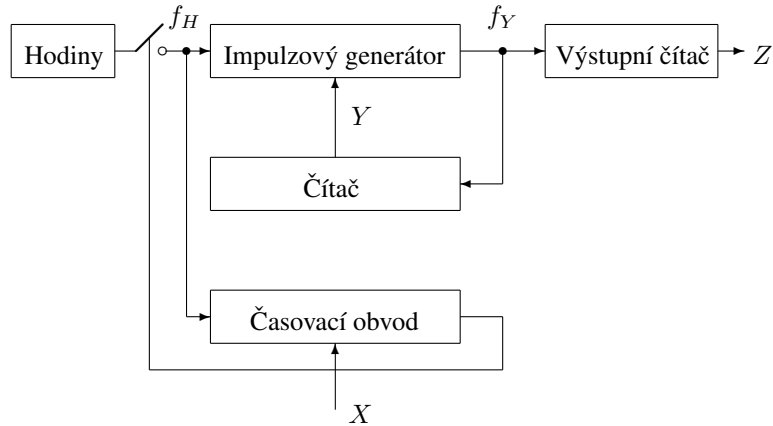
Ze dvou hradel NAND lze složit klopný obvod S - R (obr. 6). Ten slouží díky kladné zpětné vazbě jako paměťová buňka o kapacitě jeden bit. Přivedeme-li na jeho vstupy hodnoty $S = 0$ a $R = 1$, bude na výstupu horního hradla úroveň $Q = 1$ (protože na jednom jeho vstupu je hodnota 0) a na výstupu dolního hradla úroveň 0 (protože na obou jeho vstupech je hodnota 1). Tento výstup zůstane zachován (zapamatován) i po změně vstupu S na hodnotu 1. Jsou-li na obou vstupech hodnoty 1, obvod si pamatuje stav. Přivedeme-li na určitou dobu na jeden ze vstupů hodnotu 0, pak vstup S (set) nastaví výstup Q na hodnotu 1, vstup R (reset) nastaví výstup Q na hodnotu 0. Kombinace vstupů $S = 0$ $R = 0$ se nepoužívá.

Z klopných obvodů lze sestavit registry, které slouží pro uchování posloupnosti příkazů, vstupních a výstupních dat a z hradel lze sestavit obvod, který plní základní logické a aritmetické funkce. Tím dostaneme základní funkční celky číslicového počítače.

6 Je nějaký mezistupeň mezi analogovým a digitálním počítačem?

Analogový počítač pracuje se signály, které nabývají nekonečně mnoha hodnot z jistého intervalu a které se v průběhu výpočtu spojitě mění. Digitální počítač naproti tomu pracuje se signály, u kterých se uvažují pouze dvě hodnoty (např. logická hodnota 0 a logická hodnota 1) a aritmetické operace se provádějí po bytech (nebo po malých skupinách bytů) – podobně, jako když člověk např. při písemném násobení počítá po číslicích.

Existuje však jeden zajímavý mezistupeň: tzv. elektronické číslicové logaritmické pravítko [6], které se dočkalo i realizace z československých součástek [4].



Obr. 7: Propojení hlavních funkčních částí elektronického logaritmického pravítka při výpočtu exponenciální funkce $Z = \exp(kX)$.

Elektronické logaritmické pravítko je číslicový obvod, pracující se signály logická nula a logická jednička, podobně jako digitální počítač, ale výsledek se nezískává po bytech, ale postupným integrováním impulsů v čítači. Stav čítače se postupně zvyšuje, čímž se obvod podobá analogovému počítači. Přístroj se skládá z pěti hlavních částí:

1. Hodinový obvod, který generuje posloupnost impulsů o kmitočtu f_H .
2. Časovací obvod, který čítá vstupní impulsy a při dosažení zvolené hodnoty X odpojí hodinový obvod.
3. Impulzní generátor dostává na vstupu hodinové impulsy o kmitočtu f_H a vytváří na výstupu impulsy o kmitočtu $f_Y = kY f_H$, kde k je konstanta a Y je hodnota, kterou dodává k tomu určený čítač.
4. Čítač impulzového generátoru čítá vstupní impulsy a výsledek Y v podobě číselné hodnoty poskytuje impulzovému generátoru.
5. Výstupní čítač čítá impulsy na svém vstupu a jeho stav Z představuje výsledek aritmetické operace.

Propojení těchto hlavních částí při výpočtu exponenciální funkce ukazuje obr. 7. Výsledek činnosti lze snadno odvodit takto: impulzový generátor vytváří signál o kmitočtu

$$f_Y(t) = k f_H Y(t).$$

Nastavíme-li na počátku čítač impulzového generátoru do stavu $Y(0) = 1$, bude jeho stav v čase t roven

$$Y(t) = 1 + \int_0^t f_Y(\tau) d\tau$$

tedy

$$Y(t) = 1 + k f_H \int_0^t Y(\tau) d\tau.$$

hardware	čas
Opteron 254 2,8 GHz	0,032
Itanium2 1,5 GHz	0,037
Turion 64x2 TL50 1,6 GHz	0,053
Pentium3 1GHz	0,14
SGI Origin 2000	0,15
IBM SP2	0,55
IBM RS6000/375	0,63
HP 9000/735	0,74
DEC 2100/500	0,80
SGI Power Challenge	0,90
SGI Challenge S	1,0
SGI MIPS R4600	1,0
SGI MIPS R4000	1,5
HP 9000/712	1,8
HP 9000/720	2,3
SGI MIPS R2000A/R3000	3,0
MIPS RC6280	3,1
Pentium/100MHz	6,2
486/99MHz	6,8
386	17,0

Tabulka 1: Porovnání rychlosti některých počítačů – doba v mikrosekundách potřebná pro výpočet funkce cos.

Po zderivování dostaneme diferenciální rovnici

$$Y'(t) = k f_H Y(t)$$

s počáteční podmínkou $Y(0) = 1$, která má řešení

$$Y(t) = \exp(k f_H t).$$

Nastavíme-li časovací obvod tak, aby odpojl hodinové impulzy po době T , kdy načítá $X = f_H T$ impulzů, bude výsledek

$$Z = \exp(kX).$$

Jinou volbou propojení hlavních částí elektronického logaritmického pravítka lze provádět aritmetické operace sčítání, násobení, dělení, umocňování dvěma, odmocňování dvěma, přirozený logaritmus.

Ač je tento obvod sestaven z číslicových obvodů, výsledek se získává postupným narůstáním veličin. Tento nárůst není spojitý jako u analogových počítačů, ale je ve skocích, protože stav čítače je popsán celým číslem.

Zmínku o elektronickém číslicovém pravítku jsme zde uvedli jako ukázkou důvtipného technického řešení. Hlavní nevýhodou je však malá rychlost výpočtu, která navíc roste exponenciálně s počtem platných míst výsledku. Další vývoj šel jiným směrem: dnešní číslicové počítače provádějí aritmetické operace v aritmeticko-logické jednotce (ALU), což je kombinační obvod, který zpracovává např. dva 64-bitové operandy najednou.

7 Jak se vyvíjí rychlost počítačů?

Univerzální objektivní měřítko pro porovnání výkonnosti různých počítačů neexistuje. Existuje sice řada testovacích programů, ty ale vyžadují jistou minimální hardwarovou konfiguraci. Uživatel, který potřebuje vyčíslovat matematické funkce si snadno zjistí, že operace sčítání, odčítání, násobení a dělení jsou rychlejší než vyčíslování matematických funkcí jako logaritmus nebo goniometrické funkce. Tabulka 1 uvádí čas potřebný pro výpočet funkce cos na různých hardwarových konfiguracích.

Podrobný a zajímavý přehled vývoje mikropočítačů včetně popisu situace v Čechách lze nalézt v [3].

8 Jaký je celkový počet aritmetických operací, které všechny počítače světa provedly?

Na tuto otázku nelze dát přesnou odpověď, lze ji jen velice zhruba odhadnout. Pokud bude počet počítačů $n \approx 10^{10}$, doba činnosti $t \approx 10^8$ s a kmitočet procesoru $f \approx 10^8$ Hz, bude počet operací $N = ntf \approx 10^{26}$, což je více než Avogadrova konstanta $N_A \approx 6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, která je někdy považována za hraniční počet jedinců, nad kterým se chování systému jako celek kvalitativně odlišuje od chování jeho stavebních prvků.

9 Jaký je český přínos počítačovému světu?

Zakončeme toto ohlédnutí za vývojem výpočetní techniky jednou českou kuriozitou. Nejlepším současným programem pro hru šachy je program Rybka a jeho autorem je Vasik Rajlich [5], syn českých rodičů narozený v USA.

Tato práce je podporována projektem MSM 6046137306 a vznikla díky přístupu k výpočetním zdrojům META-Centrum v rámci MSM 6383917201.

Literatura

- [1] T. Freeth et al.: Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism. Nature 444, 587-591, 2006.
- [2] T. Freeth et al.: Calendars with Olympiad display and eclipse prediction on the Antikythera Mechanism. Nature 454, 614-617, 2008.
- [3] K. Frejlich: Pětatřicáté výročí mikropočítačů. Konstrukční elektronika a radio 4 2008.
- [4] P. Perutík: Elektronické logaritmické pravítko. Závěrečná práce postgraduálního studia, ČVUT FEL 1972.
- [5] www.rajlich.com
- [6] H. Schmidt, D. S. Busch: An Electronic Digital Slide Rule. The Electronic Engineer Vol. 27, 1968.