

Od Antikytherského stroje k číslicovému počítači

Pavel Pokorný

Ústav matematiky, VŠCHT Praha, Technická 5, 166 28 Praha 6

V příspěvku se seznámíme s vývojem počítačů od starověkých mechanismů přes analogové až po dnešní digitální. Přiblížíme si nejstarší dnes známý počítač – Antikytherský stroj. Popíšeme rozdíl mezi analogovým a číslicovým počítačem a uvedeme příklad jejich mezistupně. Budeme ilustrovat vývoj rychlosti počítačů, odhadneme počet všech provedených aritmetických operací a zmíníme světový úspěch českých programátorů.

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. 2).

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 asi 100 let 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 lety 80–60 př. n. l.



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



Obr. 2 Astronomická část Staroměstského orloje je obdobou Antikytherského stroje.

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 vystaven v Národním archeologickém muzeu v Athénách (obr. 1) spolu s replikou (obr. 3). Přístroj do dnešní doby přitahuje pozornost odborníků [1, 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



Obr. 3 Replika Antikytherského stroje

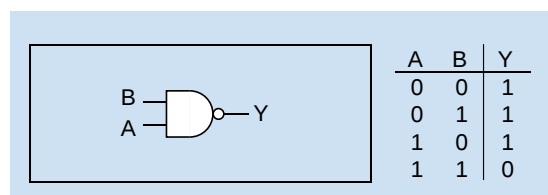
elektronické analogové počítače postavené z operačních zesilovačů, odporů, kondenzátorů a polovodičových diod. Vhodným propojením těchto stavebních prvků je možné sestavit obvod, který lze popsat diferenciální rovnicí. Potom sledováním časového průběhu napětí na výstupu tohoto obvodu dostaneme řešení 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.

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

Jak pracuje elektronický digitální počítač?

Základem je hradlo, jednoduchý elektronický obvod sestavený dnes z tranzistorů, dříve z elektronek nebo relé,

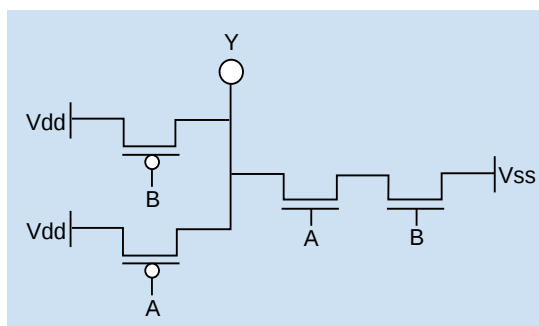


Obr. 4 Schematická značka a pravdivostní tabulka pro hradlo NAND, které plní funkci negovaného logického součinu $Y = \text{NOT}(A \text{ AND } B)$. Je netriviálním faktem, že z těchto hradel lze postavit počítač, který vás porazí ve hře šachy.



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. 2 V, je považováno za logickou hodnotu 0, je-li větší než jiná hodnota, např. 3 V, je považováno za logickou hodnotu 1. Rozsah mezi těmito dvěma hodnotami, např. 2 V až 3 V, je tzv. zakázaná oblast, která 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 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.

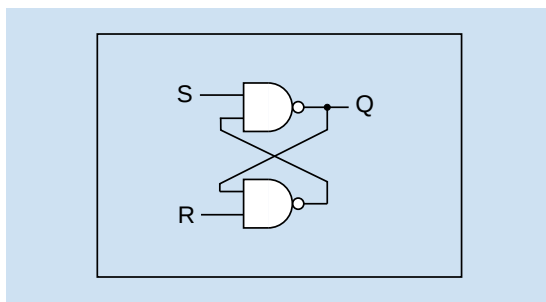


Obr. 5 Hradlo NAND realizované technologií CMOS – schéma

Jak pracuje klopný obvod?

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

» Zajímavým
mezistupněm
mezi
analogovým
a digitálním
počítačem je
tzv. elektronické
číslicové
pravítko. <<



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

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 $S = 0$ a $R = 0$ se nepoužívá.

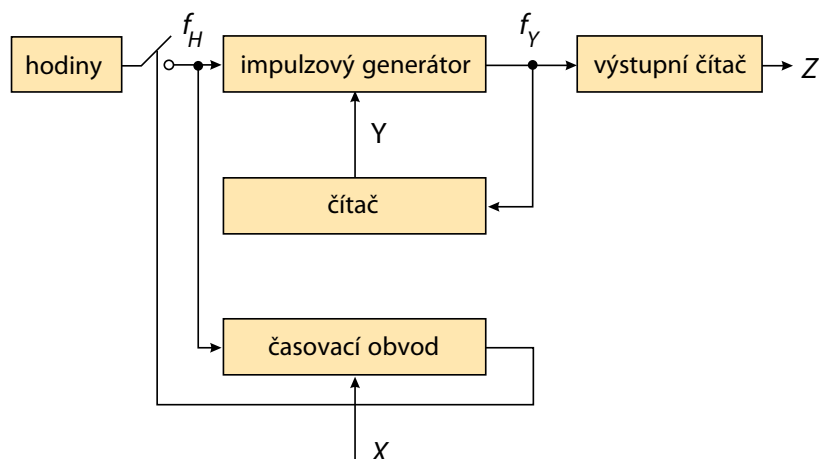
Z klopných obvodů lze sestavit registry, které slouží pro uchování posloupnosti příkazů, vstupních a výstupních dat a z hradel lze sestavit obvod, který plní základní logické a aritmetické funkce. Tím dostaneme základní funkční celky číslicového počítače.

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 bajtech (nebo po malých skupinách bajtů) – 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].

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



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

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

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

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 odpojí 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 64bitové operandy najednou.

Jak se vyvíjí rychlost počítačů?

Univerzální objektivní měřítko pro porovnání výkonosti různých počítačů neexistuje. Existuje sice řada testovacích programů, ty však vyžadují jistou minimální hardwarovou konfiguraci. Uživatel, který potřebuje vyčíslit 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.

Hardware	Čas
Opteron 254 2,8 GHz	0,032
Itanium2 1,5 GHz	0,037
Turion 64x2 TL50 1,6 GHz	0,053
Pentium3 1 GHz	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/100 MHz	6,2
486/99 MHz	6,8
386	17,0

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

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

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.

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 a kol.: „Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera mechanism“, *Nature* **444**, 587 (2006).
- [2] T. Freeth a kol.: „Calendars with Olympiad display and eclipse prediction on the Antikythera mechanism“, *Nature* **454**, 614 (2008).
- [3] K. Frejlich: „Pětatřicáté výročí mikropočítačů“, *A Radio. Konstrukční elektronika* (4), 3 (2008).
- [4] P. Perutík: *Elektronické logaritmické pravítko*. Závěrečná práce postgraduálního studia, ČVUT FEL 1972.
- [5] *Osobní stránky rodiny Rajlichů*; <http://www.rajlich.com/>.
- [6] H. Schmid, D. S. Busch: „An Electronic Digital Slide Rule“, *Electr. Eng.* **27**(7), 54 (1968).

GLOSÁŘ 1

A

AGP – *Accelerated Graphics Port*, rozhraní z roku 1997, přes které se připojovala grafická karta k počítači. Od roku 2004 se používá i rozhraní PCI Express, k jehož výraznému rozšíření došlo od roku 2006.

analogový signál – jakýkoli spojitý signál získaný zpravidla měřením nebo záznamem na stará média. Typickým příkladem analogového záznamu je dnes již nepoužívaná gramofonová deska. Pro využití v počítači musí být signál digitalizován, tj. převeden na posloupnost nul a jedniček.

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*, nejrozšířenější znaková sada. Jde o tabulku, která přiřazuje každému znaku abecedy číselné označení neboli ASCII kód. Původně byla tabulka sedmibitová a obsahovala pouze 128 znaků. Dnes se využívají osmibitové tabulky obsahující řadu národních znaků.

Assembler – programovací jazyk nízké úrovně, jehož příkazy přímo odpovídají strojovému kódu. Na vyšší úrovni jsou jazyky s různými strukturovanými příkazy, například výukové jazyky BASIC a PASCAL nebo vyšší jazyky C a FORTRAN.

AT – *Advanced Technology*. Standard počítačů řady IBM PC. V roce 1995 byl nahrazen standardem ATX (*Advanced Technology eXtended*). Změny se projeví především na struktuře základní desky, počítačové skříně a zdroje.

B

BASIC – jednoduchý programovací jazyk, který byl určen pro výukové účely. Navrhl ho T. E. Kurtz a J. G. Kemeny v 70. letech 20. století. Jeho název je zkratkou z anglického *Beginners All purpose Symbolic Instruction Code*.

baud – Bd, jednotka přenosové rychlosti, jeden bit za sekundu.

binární kód – reprezentace dat za pomoci posloupnosti nul a jedniček, někdy také dvojkový kód.

BIOS – *Basic Input/Output System*, základní vstupně-výstupní systém. Obsahuje nastavitelné informace o základní desce a připojeném hardwaru, které se využijí při startu počítače a zavádění operačního systému.

bit – základní jednotka informace složená ze dvou hodnot (ano/ne, 0/1, nahoru/dolů, ...). Větší jednotkou je jeden byte (bajt), který tvoří nejmenší adresovatelnou jednotku v počítači a je složen z osmi bitů.

bitmapa – reprezentace obrázku za pomoci obrazových pixelů, u nichž je zadána poloha a barva. Bitmapa je vhodná například pro ukládání fotografií. Typickými bitmapovými soubory jsou BMP, GIF, TIFF, JPG, PNG, PCX.

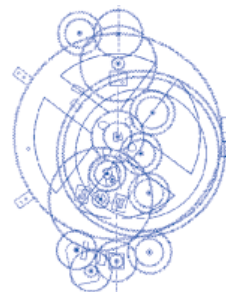
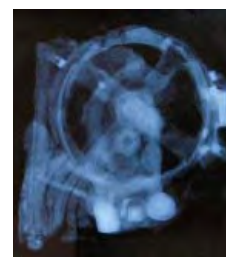
bitrate – datový tok, jednotkou je kbps (kilobit za sekundu) nebo Mbps (megabit za sekundu).

bootování – proces zavádění operačního systému při startu počítače, zpravidla z nějakého média, například pevného disku nebo CD.

buffer – zásobník neboli vyrovnávací paměť. Slouží k ukládání dat, jejichž následné zpracování nesmí být ovlivněno výkyvy rychlosti čtení z pevného disku, například při vypalování na CD. Rychlost čtení dat ze zásobníku je podstatně rychlejší než z disku.

Bunemanovo schéma – diferenční schéma pro řešení obyčejných diferenciálních rovnic, které je výhodné pro pohyby nabitých částic v přítomnosti magnetických polí. Je pojmenováno podle Oscara Bunemana (1914–1993). Někdy se nazývá Borisovo-Bunemanovo schéma.

pokračování na str. 349



Rentgenová tomografie Antikytherského stroje a jeho schéma