

Návrh počítačových systémů

Princip činnosti procesoru

INP 2021

FIT VUT v Brně



Čím se budeme zabývat v INP

- Budou nás zejména zajímat **číslicové počítače s jedním (jednojádrovým) procesorem**:
 - funkce počítače
 - struktura – propojení funkčních bloků,
 - organizace – součinnost, chápána dynamicky, časové řízení bloků,
 - realizace – návrh a struktura bloků (např. ALU, řadič, cache, apod.)
 - měření výkonnosti.
- Reprezentace dat, kódy
- Principy a algoritmy základních i složitějších aritmetických operací
- Paměti – typy, paměťová hierarchie, řízení, ...
- Sběrnice a periferní zařízení
- Spolehlivost
- Úvod do paralelních architektur
- Cvičení:
 - obvodová realizace procesoru a jeho bloků
 - Jazyk VHDL

Počítač (podle Wikipedie)

- **Počítač** je v informatice elektronické zařízení, které zpracovává data pomocí předem vytvořeného programu. Současný počítač se skládá z hardware, které představuje fyzické části počítače (procesor, klávesnice, monitor atd.) a ze software (operační systém a programy). Počítač je ovládán uživatelem, který poskytuje počítači data ke zpracování prostřednictvím jeho vstupních zařízení a počítač výsledky prezentuje pomocí výstupních zařízení. V současnosti jsou počítače využívány téměř ve všech oborech lidské činnosti.
- Analogový počítač vs číslicový počítač
- Historie – viz např. Wikipedie

První elektronické počítače

- **ENIAC** (Electronic Numerical Integrator and Calculator)
 - první elektronický (elektronkový) počítač na světě
 - postaven na University of Pennsylvania
 - postaven během druhé světové války, ale informace o něm byla zveřejněna až v roce 1946
 - programoval se drátovými propojkami a přepínači, data se zadávala pomocí děrných štítků
 - Příkon: 150 kW; 5000 sčítání/s; plocha 167 m²; hmotnost 27 t
- **EDVAC** (Electronic Discrete Variable Automatic Computer)
 - dokončený na téže univerzitě v roce 1951
 - řízen programem uloženým v paměti (5,5 kB)
 - Jeho koncepce se stala nejrozšířenější a nejznámější počítačovou architekturou. Poněkud neprávem se připisuje americkému matematikovi maďarského původu John von Neumannovi, přestože hlavními osobami projektu byli J. Presper Eckert a John Mauchly.
 - Příkon: 56 kW; 1160 sčítání/s; plocha 45 m²; hmotnost 7,8 t
 - Pracoval 20 hodin denně a průměrně 8 hodin bez poruchy.

Současné počítače - příklady

- **Notebook**

- Procesor: Intel Core i7, 10870H Comet Lake, 8 jader, 2,2 GHz, 14 nm, TDP 45 W
- Displej 15.6", 1920 × 1080 144Hz
- RAM 16 GB DDR4
- NVIDIA GeForce RTX 3060 6 GB
- SSD 512 GB
- Hmotnost 2,46 kg



- **Paralelní počítač na jednom čipu: Intel Xeon Phi**

- 61 jader (Pentium)
- 244 vláken
- 16 GB (GDDR5)
- 1,2 TFLOP/s max. výkonnost
- příkon 225 W



- **iPhone 13 Pro**

- procesor Apple A15 Bionic (založený na 64-bit ARM), 6-jádrový, Neural Engine, 5 nm TSMC
- 8 GB RAM a 1000 GB storage
- OLED displej 6,7"
- iOS 15
- Baterie 4352 mAh



- **První superpočítač v Ostravě (Salomon)**

- 2 PFLOP/s teoretický výpočetní výkon
- 24192 jader CPU Intel Xeon E5v3 (Haswell-EP) v 1008 uzlech
- 129 TB RAM
- 52704 jader v Intel Xeon Phi s 13,8 TB RAM
- 2 PB diskové kapacity a 3 PB zálohovací páskové kapacity
- 700 kW
- 40./68./88./214./375./460. nejvýkonnější na světě (2015/16/17/18/19/20)
- www.it4i.cz



Algoritmus

(viz kurz Základy programování)

- **Algoritmus** je přesně definovaná konečná posloupnost příkazů (které jsou vybírány z předem definované konečné množiny elementárních příkazů), jejichž prováděním pro každé přípustné vstupní hodnoty získáme po konečném počtu kroků odpovídající hodnoty výstupní. Intuitivně algoritmem rozumíme postup, který nás dovede k řešení úlohy.

Dvě základní implementace algoritmu

- **program** (SW) pro procesor
 - výhody: univerzalita/flexibilita, cena
 - nevýhody: výkonnost nemusí být dostatečná
- **aplikačně-specifický číslicový obvod** (HW)
 - výhody: umožňuje optimální využití technických prostředků (optimalizace rychlosti, plochy, spotřeby apod.)
 - nevýhody: obvykle vysoká cena, dlouhá doba návrhu

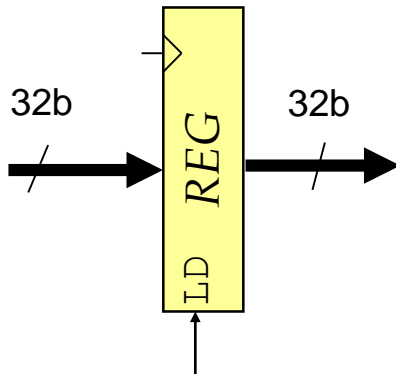
Jak se implementují datové a řídicí struktury?

Datové struktury: SW vs HW

- SW - příklad

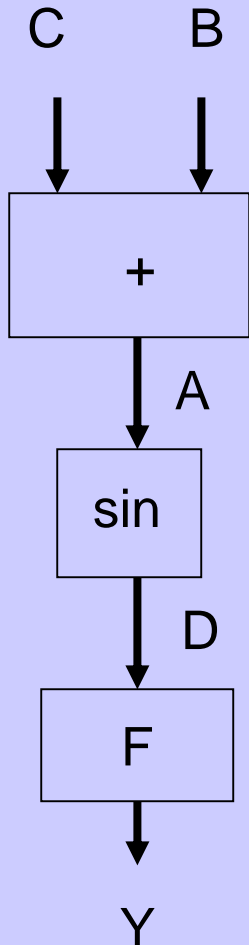
```
int x; // datový typ int je v daném procesoru např. 32b  
x = 34; // přiřazení do proměnné  
y = x;   // čtení proměnné
```

- HW - příklad



Sekvence:

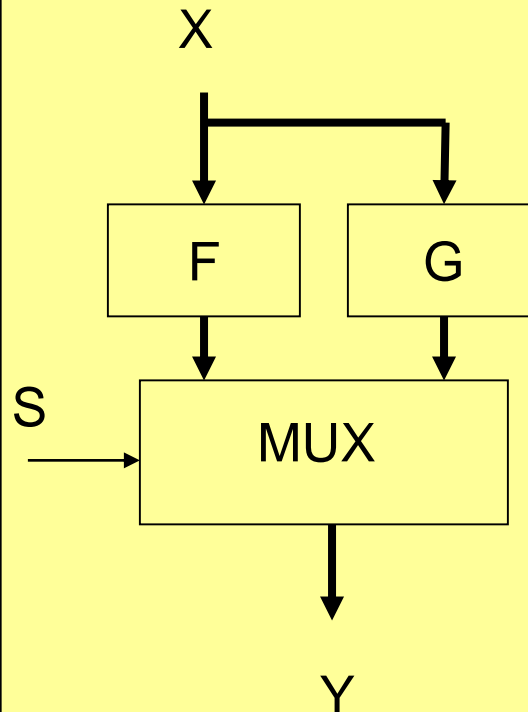
```
A = B + C;  
D = sin(A);  
Y = F(D);
```



Řídicí struktury: SW vs HW

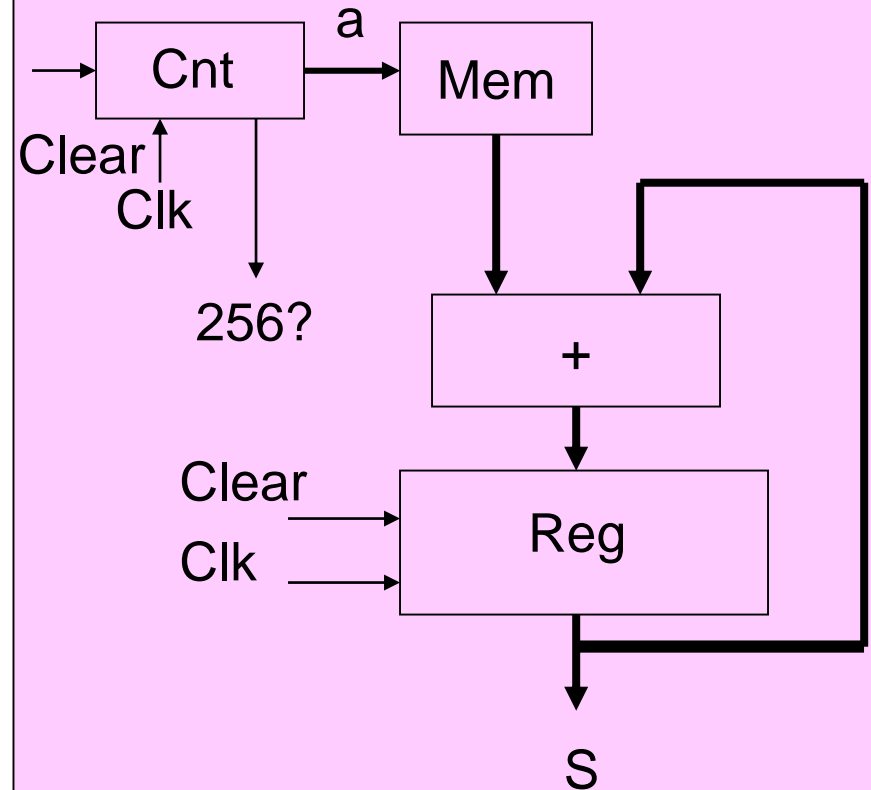
Selekce:

```
If (S == 0)  
then Y = F(X)  
else Y = G(X);
```



Iterace:

```
a = 0;  
S = 0;  
while (a < 256) do  
{  
    S = S + Mem[a];  
    a++;  
}
```



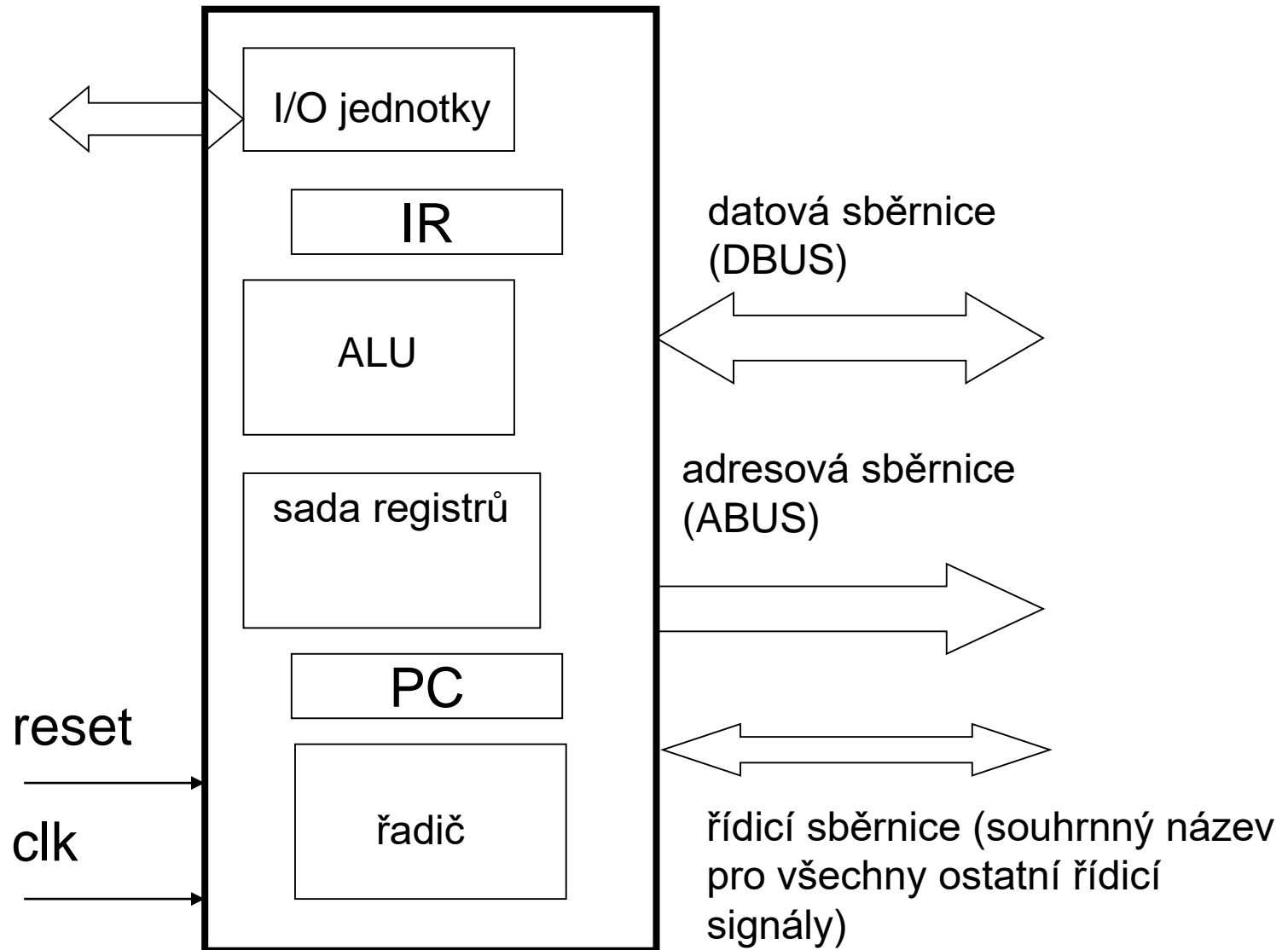
Procesor

- **Procesor:**
 - obvodová realizace algoritmu, který dokáže vykonávat libovolné **programy** (algoritmy), sestavené z předem definovaných elementárních operací (**instrukcí**). Je to tzv. **univerzální výpočetní stroj**.
 - (obvykle) sekvenční a (obvykle) synchronní číslicový obvod
- **Typická činnost:**
 - Procesor vykoná **program**, který je uložen od zadané **adresy** v **paměti**. Program transformuje **data**, uložená na zadané adrese v paměti, na jiná data, jejichž nové umístění musí být rovněž specifikováno.
 - Pokud má procesor **I/O jednotku**, může rovněž při zpracování využívat informace ze svých vstupních portů a produkovat data na výstupní porty.
- **Hlavní komponenty**
 - **Programový čítač** (PC) určuje adresu, kde se nachází následující instrukce. Po resetu dochází k inicializaci procesoru a mj. je definován obsah PC (např. PC = 0003h).
 - IR – **instrukční registr** – uchovává právě zpracovávanou instrukci
 - **Řadič řídí** činnost procesoru (konečný automat - FSM).
 - **ALU** – aritmeticko-logická jednotka slouží k provádění matematických operací.
 - **I/O jednotka** – umožňuje vstup a výstup dat do/z procesoru (obvykle do jeho registrů) i jinak než pouze skrz paměť.
 - Sada registrů

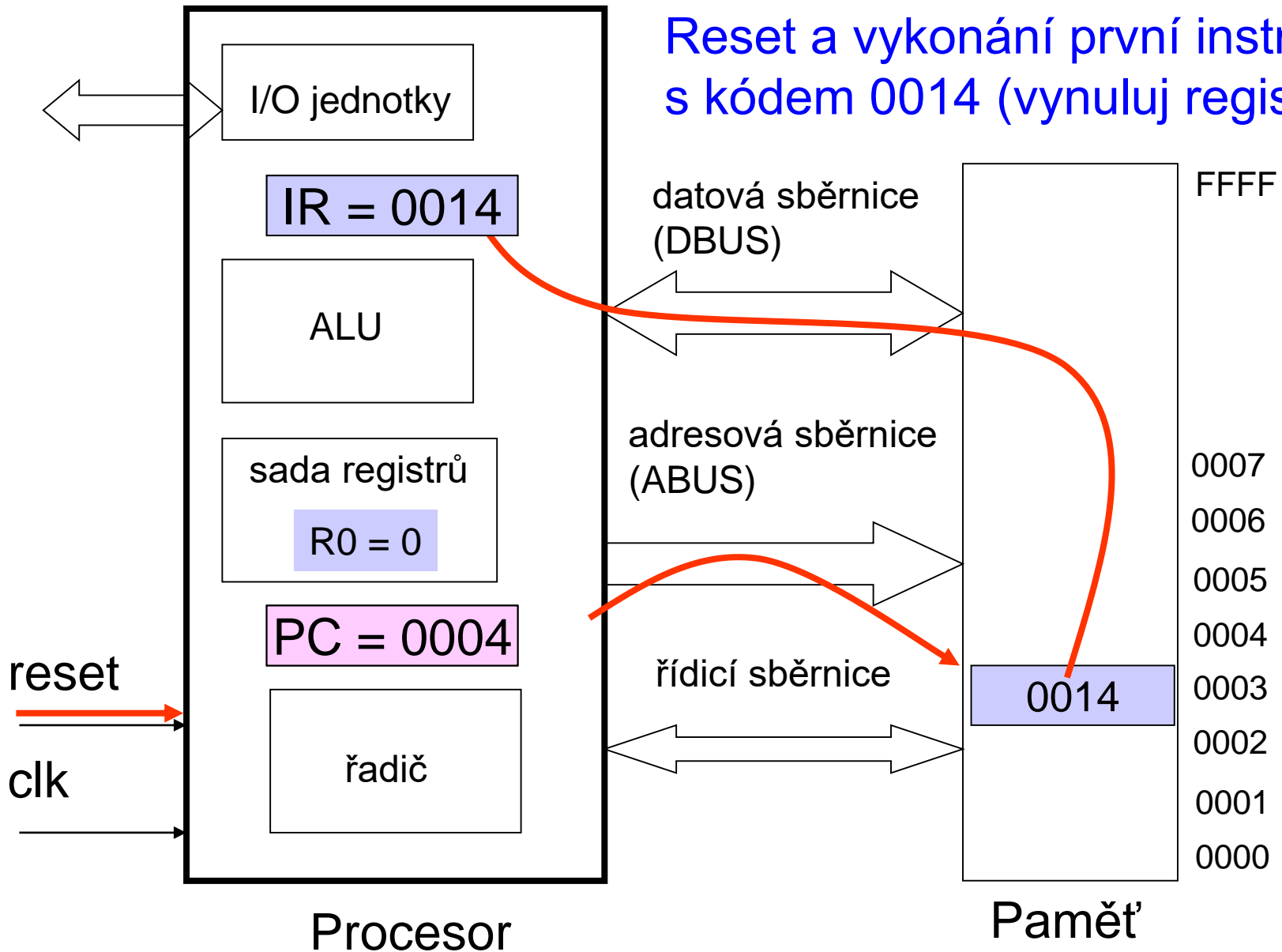
Programy a data

- **Programy** jsou uloženy v paměti jako posloupnosti instrukcí.
- Program se vykonává sekvenčně (až na výjimky, např. skokové instrukce)
- **Data** jsou uložena rovněž v paměti.
- **Harvardská** koncepce procesoru
 - Paměť dat a paměť programu jsou odděleny, tj. je možné současně např. načíst instrukci a zapisovat data.
- **Von Neumannova** (princetonská) koncepce procesoru
 - Společná paměť pro data a programy, nelze např. současně načítat instrukci a načítat data.

Procesor a jeho rozhraní



Reset a vykonání první instrukce s kódem 0014 (vynuluj registr R0)



Po resetu se nastaví PC=0003. Adresa určená obsahem PC se vystaví na ABUS. Z této adresy se přečte kód instrukce (0014) a po DBUS se pošle do instrukčního registru IR. Instrukce se dekoduje a vykoná (vynuluje se registr R0) a zvýší se PC o 1.

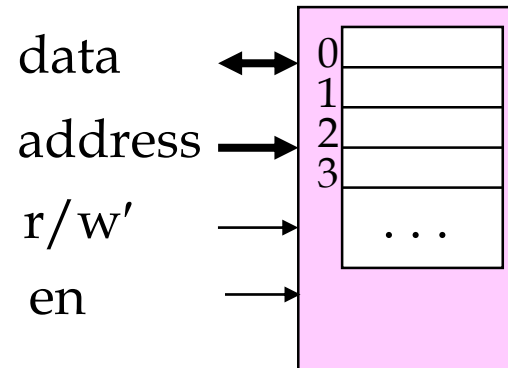
Vykonání instrukce

- Adresa instrukce, která se má vykonat, je uložena v PC.
- Instrukce se vykonává obvykle v několika hodinových taktech.
- Procesor musí zajistit následující:
 - Adresa určená obsahem PC je vystavena na adresovou sběrnici a je iniciováno čtení z paměti.
 - Paměť dodá na datovou sběrnici kód instrukce, která se má vykonat.
 - Instrukce je uložena do IR (instrukčního registru). Tyto tři body se označují jako načtení instrukce – **fetch (F)**.
 - Instrukce je dekodována (tzn., že jsou nastaveny řídicí signály pro komponenty procesoru, které se podílí na vykonání instrukce – je např. vybrána operace sčítání a operandy ALU). Tato fáze se nazývá **instruction decode (ID)**
 - Pokud instrukce vyžaduje pro své vykonání operand z paměti, musí být z příslušné adresy načten tento operand.
 - Instrukce je vykonána (např. provede se sčítání), jsou nastaveny příznaky (např. přetečení). Tato fáze se nazývá **Execute (E)**.
 - Uloží se výsledek do registru, popř. se iniciuje zapsání výsledku do paměti.
 - Určí se nový obsah PC.

Obvodová realizace procesoru

- Při návrhu procesoru se vychází ze **specifikace**, která obsahuje požadavky na instrukční soubor, architekturu, šířku dat a adres, výkonnost, plochu na čipu, spotřebu atd.
- Ukážeme si obvodovou realizaci nejjednoduššího procesoru, cílem bude demonstrovat princip činnosti procesoru.
- Použijeme tzv. **střádačovou architekturu** (tj. všechny instrukce ALU budou pracovat se speciálním registrem – střádačem (akumulátorem))
- Procesor bude připojen k paměti, která bude obsahovat program i data.
- Procesor bude navržen tak, že vytvoříme
 - datovou cestu (reprezentuje tok dat v procesoru) a
 - řadič (který bude implementován jako FSM).
- Než se dostaneme k realizaci procesoru, připomeneme si základní logické obvody – stavební bloky procesoru.

RAM

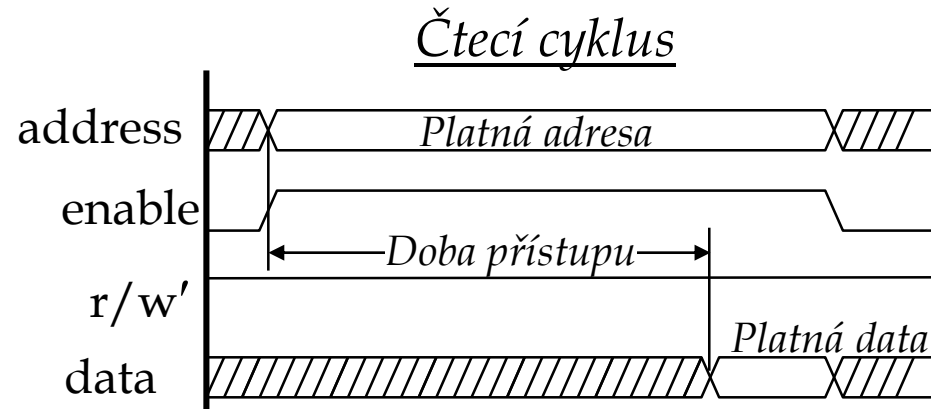


- RAM = *random access memory*
 - když *en* = 1 a *read/write* = 1, na datovou sběrnici *data* bude přivedena hodnota z paměti uložená na pozici, kterou definuje adresa vystavená na adresové sběrnici *address*
 - když *en* = 1 a *read/write* = 0, hodnota *data* přepíše data uložená v paměti na pozici, kterou definuje *address*
 - *en* značí signál *enable*, pokud *en* = 0, je paměť ve stavu vysoké impedance
 - nejjednodušší RAM jsou asynchronní
- SRAM vs DRAM
 - organizace, rychlost, cena, obnova (viz přednáška o pamětech)

Časování asynchronní RAM

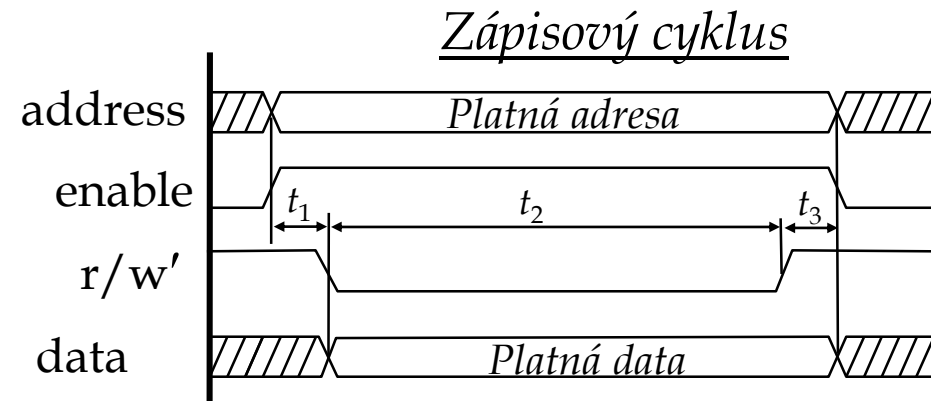
- *Čtecí cyklus*

- *Doba přístupu*: doba, za kterou získáme platná data od požádání (nastavení signálů a adresy)



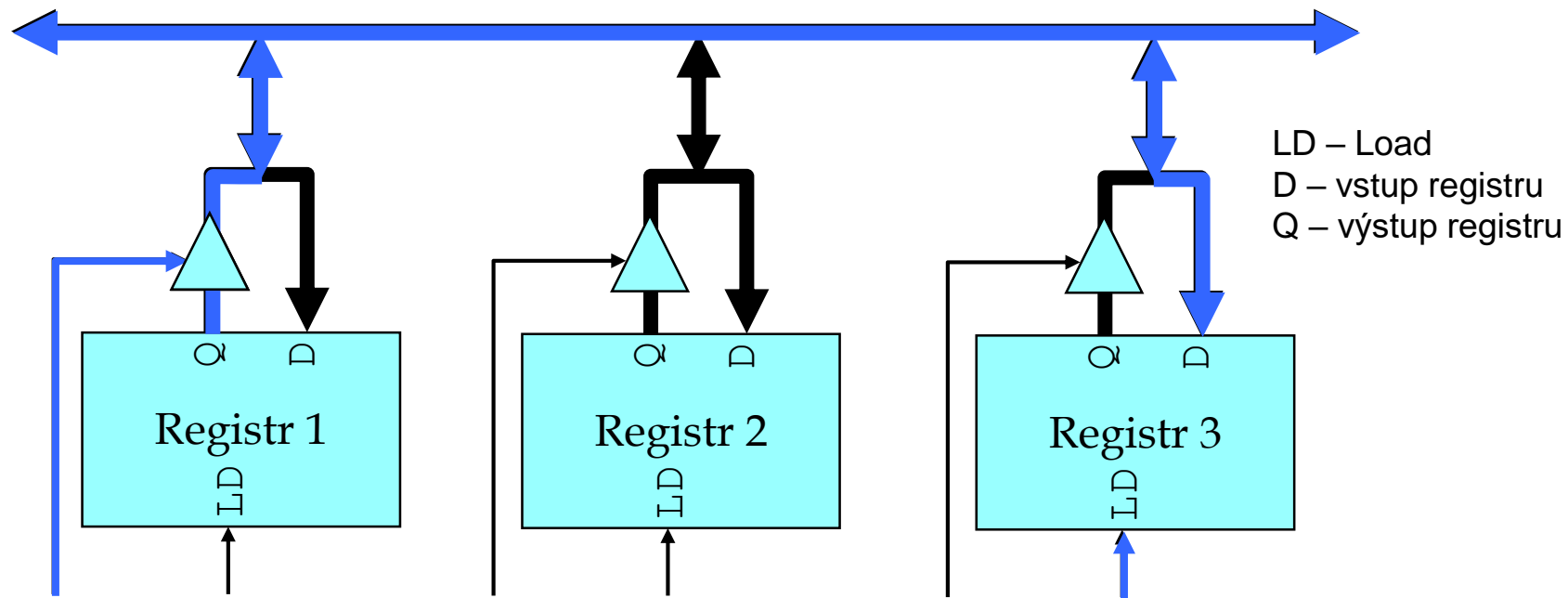
- *Zápisový cyklus*

- t_1 je min doba pro stabilizaci adresy před aktivací r/w
- t_2 je min doba, po kterou musí být vstupní data stabilní před deaktivací r/w
- t_3 je min doba, po kterou musí být adresa platná po deaktivaci r/w
- *Zápisový cyklus*: $t_1 + t_2 + t_3$

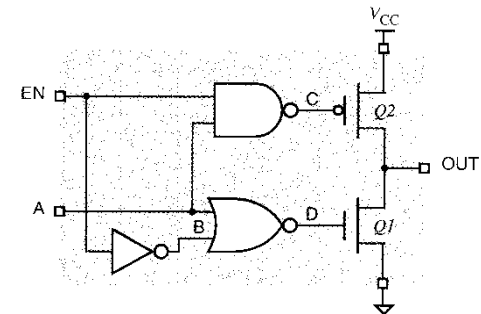


- Obvody, které používají RAM (tj. i náš procesor), musí správné časování zajistit!

Přenos dat s využitím sběrnice

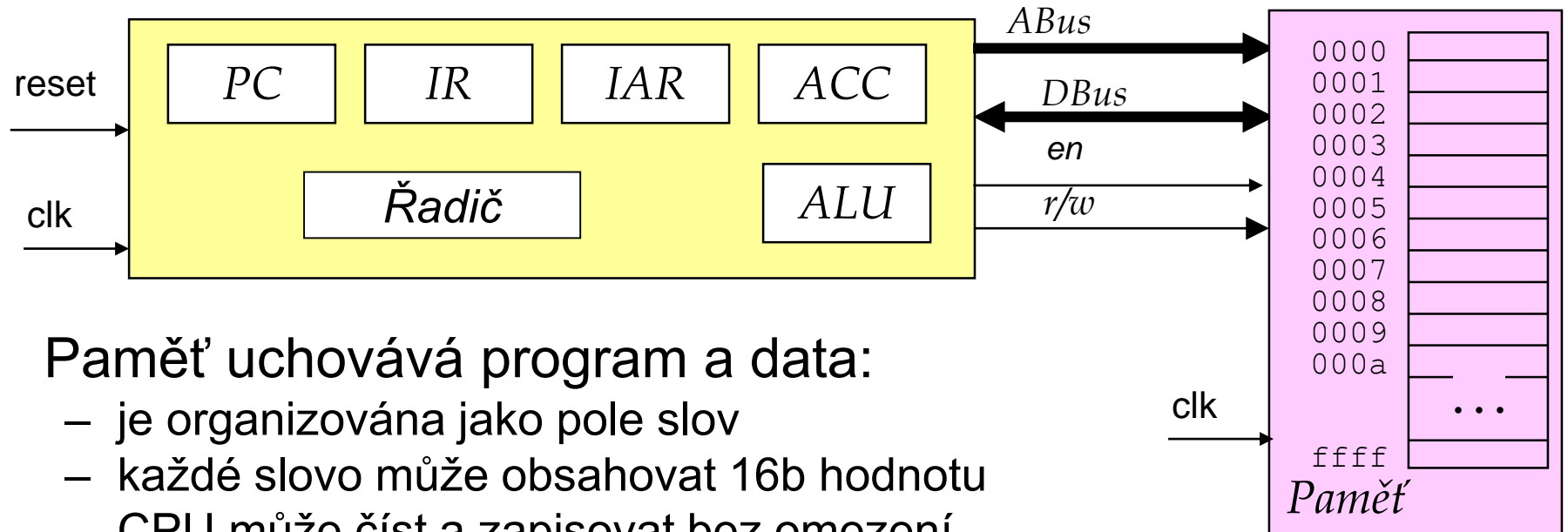


- **Sběrnice** je sdílená skupina vodičů sloužící pro přenos dat mezi několika zdroji/cíli
- Přenos dat zahrnuje:
 - umožnění jednomu zdroji dát data na sběrnici
 - nahrání dat do jednoho nebo několika cílových míst



Realizace 1b třístavového budiče

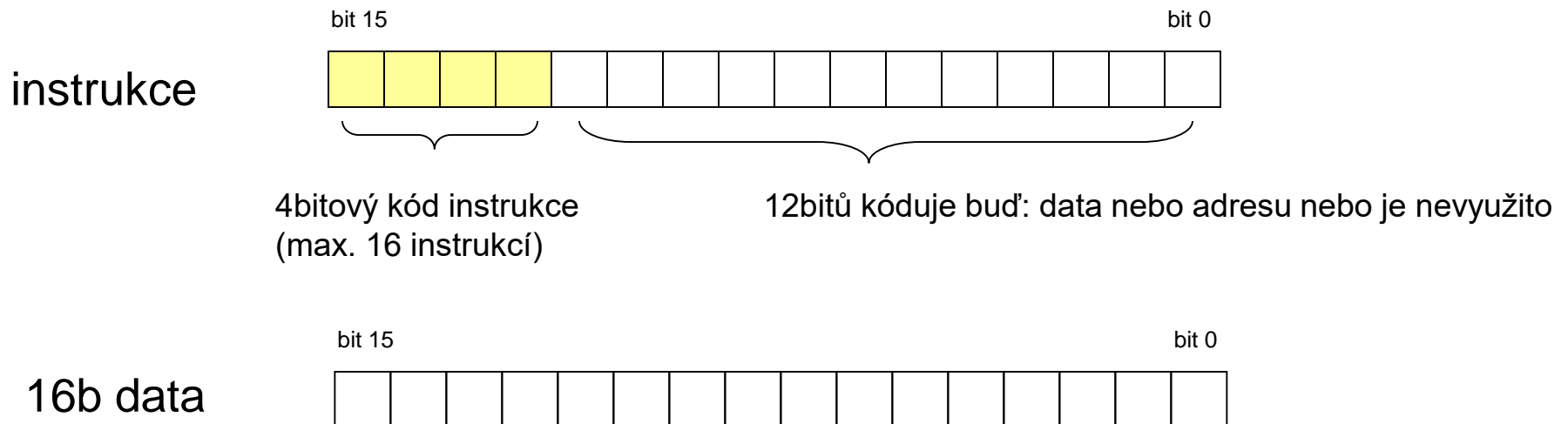
Nejjednodušší počítač



- Paměť uchovává program a data:
 - je organizována jako pole slov
 - každé slovo může obsahovat 16b hodnotu
 - CPU může číst a zapisovat bez omezení
- Zpracování instrukce
 - přečti slovo, jehož adresa je v *PC* (*Program Counter*) a inkrementuj *PC*
 - interpretuj tuto hodnotu jako instrukci (dekódování)
 - vykonej instrukci s využitím akumulátoru (*ACC*) a *ALU*
 - *IAR* (Indirect Address Register) – registr využívaný při nepřímém adresování

Instrukce procesoru

- Existuje řada způsobů, jak zvolit instrukce, zakódovat instrukce a zakódovat data.
- Abychom si v našem případě situaci co nejvíce ulehčili, bude procesor pracovat s **16bitovými slovy**, které mohou obsahovat současně jak kód instrukce, tak i data.



Sada instrukcí (1)

Hexa kód:

- 0000** zastav provádění programu (**halt**)
- 0001** vytvoř dvojkový doplněk z ACC (**negate**)
 $ACC := -ACC$
- 1xxx** nahrej do ACC hodnotu **xxx** (**mload**)
pokud je znaménkový bit xxx nulový, potom
 $ACC := 0xxx$ jinak $ACC := fxxx$
- 2xxx** nahrej do ACC hodnotu z adresy **xxx** (**dload**)
 $ACC := M[0xxx]$
- 3xxx** nahrej do ACC hodnotu, která je uložena na adrese, kterou definuje obsah buňky **xxx** (**iload**)
 $ACC := M[M[0xxx]]$
- 4xxx** ulož hodnotu z ACC na adresu **xxx** (**dstore**)
 $M[0xxx] := ACC$

Sada instrukcí (2)

Hexa kód:

- 5xxx** ulož hodnotu z ACC na adresu, která je určena hodnotou paměťové buňky s adresou **xxx** (**istore**)
 $M[M[0xxx]] := ACC$
- 6xxx** změň PC na **xxx** (**Branch**)
 $PC := 0xxx$
- 7xxx** změň PC na **xxx** jestliže $ACC = 0$ (**BrZero**)
if $ACC = 0$ then $PC := 0xxx$
- 8xxx** změň PC na **xxx** jestliže $ACC > 0$ (**BrPos**)
if $ACC > 0$ then $PC := 0xxx$
- 9xxx** změň PC na **xxx** jestliže $ACC < 0$ (**BrNeg**)
if $ACC < 0$ then $PC := 0xxx$
- axxx** přičti k ACC obsah paměťové buňky na adrese **xxx** (**Add**)
 $ACC := ACC + M[0xxx]$

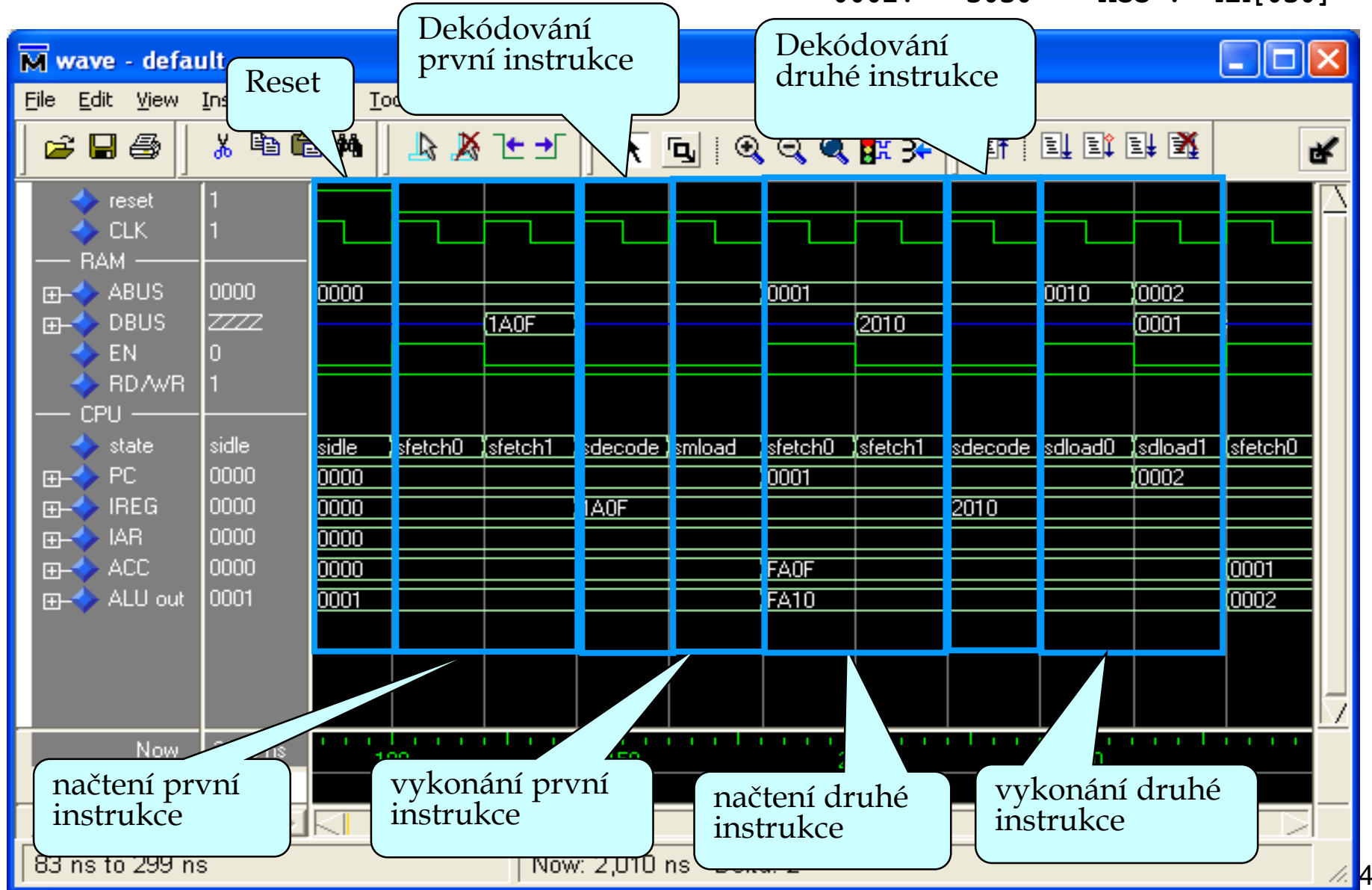
Příklad programu

Sečti hodnoty uložené na adresách 20-2f a zapiš výsledek na adresu 10.

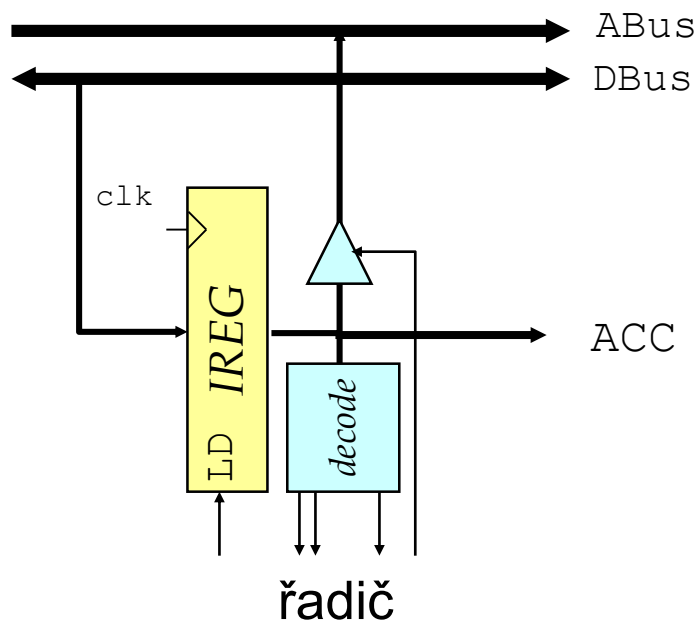
<i>Adresa</i>	<i>Instrukce</i>	<i>Komentář</i>
0000 (start)	1000 (ACC := 0000)	vynuluj součet S
0001	4010 (M[0010] := ACC)	
0002	1020 (ACC := 0020)	inicializuj pointer P
0003	4011 (M[0011] := ACC)	
0004 (loop)	1030 (ACC := 0030)	konec, pokud je P=030
0005	0001 (ACC := -ACC)	
0006	a011 (ACC := ACC + M[0011])	
0007	700f (if 0 goto 000f)	
0008	3011 (ACC := M[M[0011]])	S = S + *P
0009	a010 (ACC := ACC + M[0010])	
000a	4010 (M[0010] := ACC)	
000b	1001 (ACC := 0001)	P = P + 1
000c	a011 (ACC := ACC + M[0011])	
000d	4011 (M[0011] := ACC)	
000e	6004 (goto 0004)	goto loop
000f (end)	0000 (halt)	halt
0010		suma S
0011		pointer P

Př. časování instrukcí

Adresa	Hodnota	Význam
0000:	1A0F	ACC := FA0F
0001:	2010	ACC := M[010]
0002:	3030	ACC := MM[030]

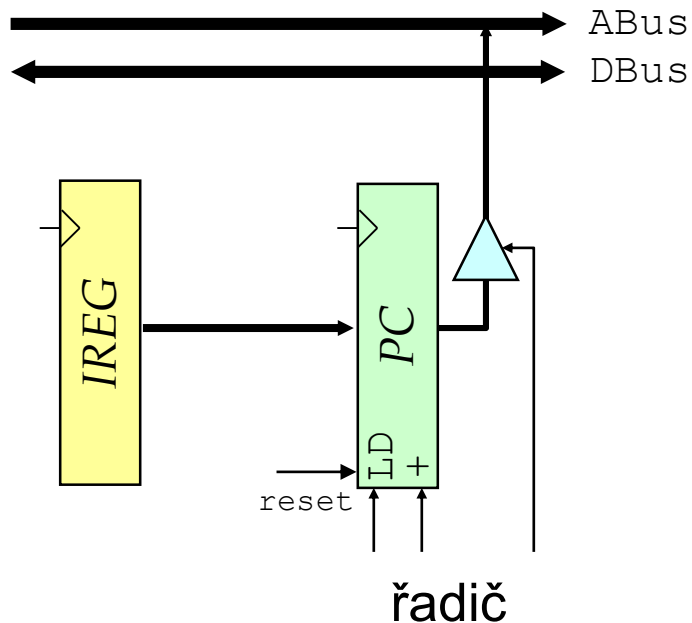


IREG a dekódování instrukce



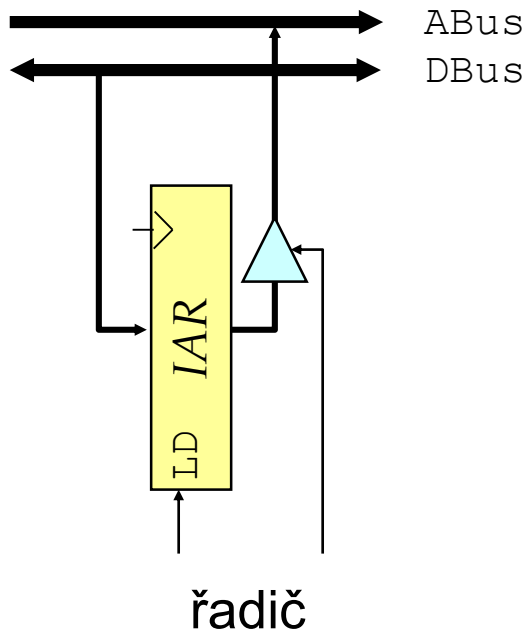
- Řadič vygeneruje signál LD a instrukce, která je na datové sběrnici, bude uložena do IREG.
- Pokud je instrukce v IREG, pak kombinační obvod *decode* nastaví na svém výstupu ty signály pro řadič, které budou v následujících taktech potřeba k vykonání dané instrukce. Např. pokud se jedná o instrukci ADD, potom se nastaví správná operace ALU, nastaví se datová cesta pro operandy apod.
- Vzhledem k tomu, že 16bitová slova přečtená z paměti obsahují jak instrukční kód tak i data, je třeba tato data přivést do střeďáče ACC.
- Při nepřímém adresování je součástí 16bitového slova, které je uloženo v IREG, i adresa paměti. Tuto adresu je třeba rovněž zpřístupnit na ABus. Za tímto účelem je vložen do schématu třístavový budič, který je ovládán řadičem. Budič je aktivován jen v tom případě, kdy je třeba dát adresu na ABus, jinak je jeho výstup ve stavu vysoké impedance.

Programový čítač

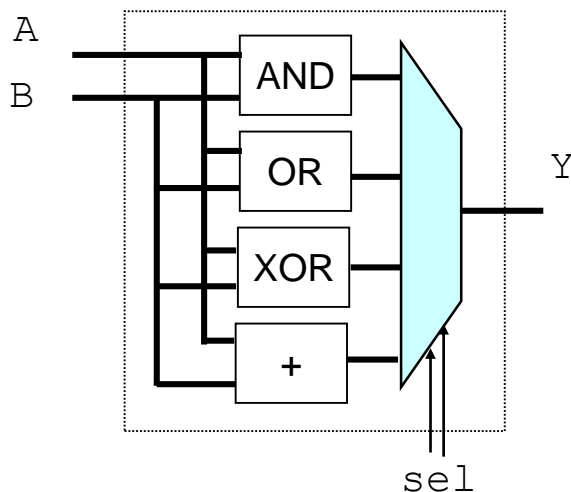
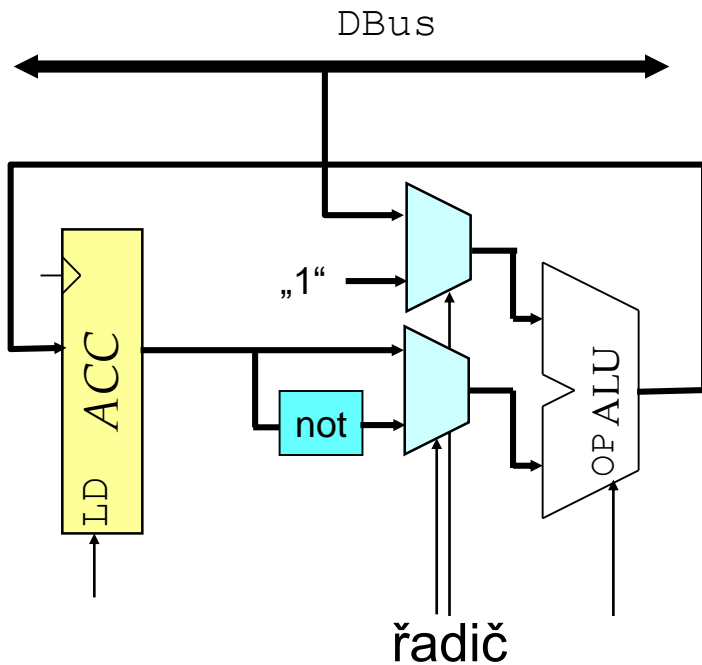


- Při resetu je nastavena počáteční hodnota PC = 0.
- Pokud se nejedná o skok, řadič generuje signál (+), který zvýší hodnotu PC o 1.
- Pokud se jedná o skok, je nová adresa uložena v IREG. Řadič generuje signál LD a načte tuto adresu do PC.
- Řadič zajistí vystavení hodnoty PC na ABUS tak, že aktivuje řízení třístavového budiče.

Nepřímé adresování



- Při využití nepřímé adresace je na datovou sběrnici načtena adresa A, se kterou se bude následně pracovat.
- Adresa A je uložena do registru IAR tak, že řadič aktivuje signál LD.
- Pokud je následně třeba adresovat paměťovou buňku s adresou A, aktivuje řadič třístavový budič a tím je adresa A k dispozici na adresové sběrnici.

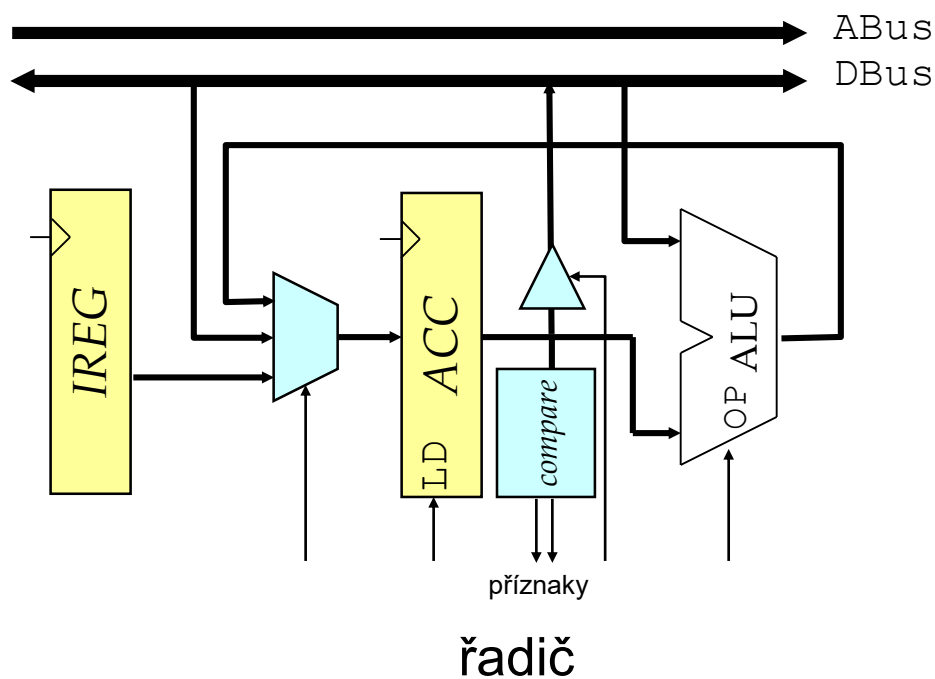


Princip realizace ALU

ALU

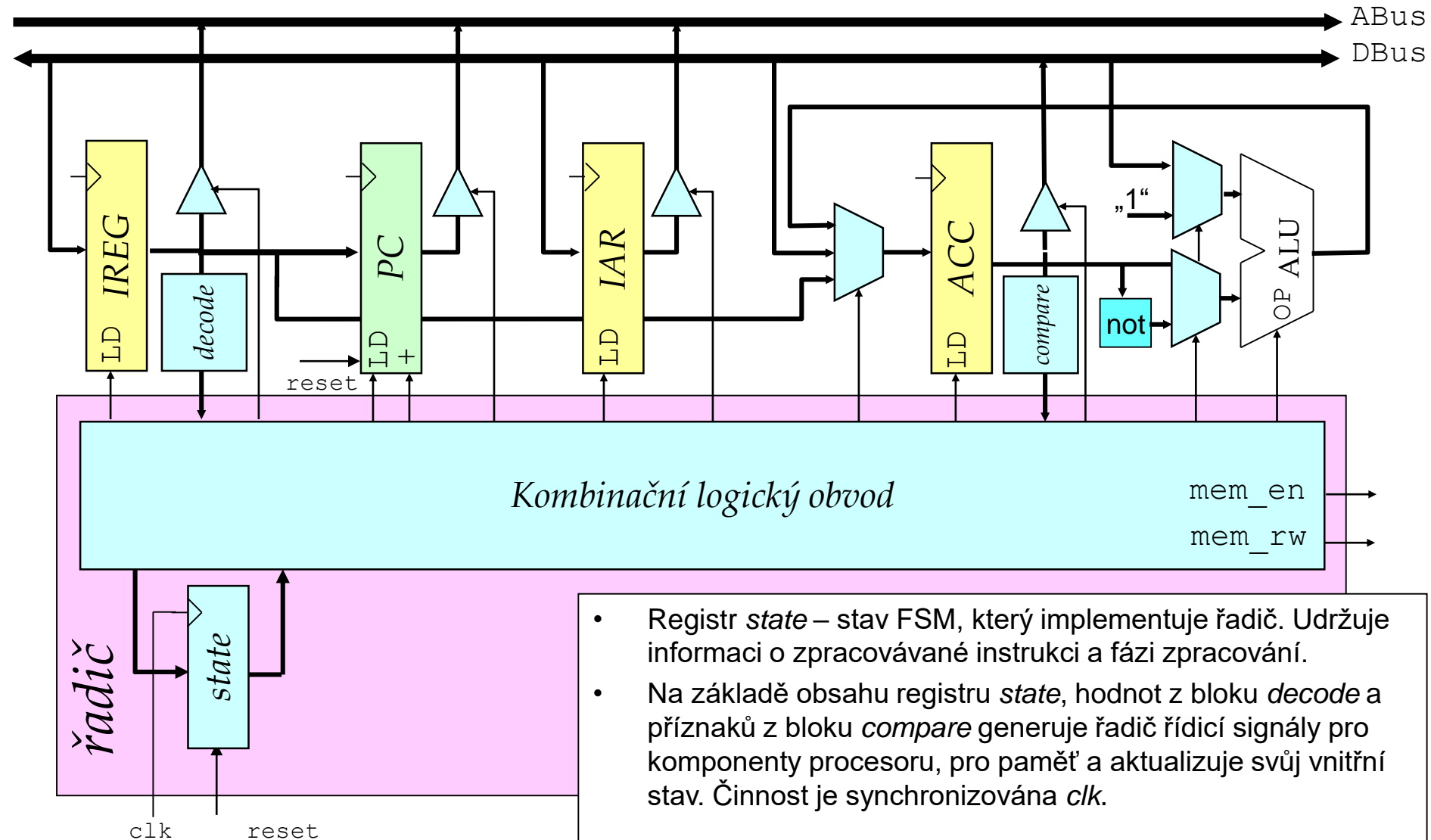
- ALU má dva operandy – střádač a hodnotu přečtenou z datové sběrnice.
- Výstup ALU je uložen do střádače, pokud řadič vygeneruje signál LD.
- Volba funkce ALU se děje pomocí signálu OP, který generuje řadič. Procesor zatím podporuje pouze instrukce sčítání a negace, ale není obtížné repertoár funkcí rozšířit.
- Pokud pracujeme v doplňkovém kódu a potřebujeme vytvořit zápornou hodnotu k obsahu střádače x , potom řadič vygeneruje signál pro multiplexory tak, aby došlo k sečtení negace x a „1“.

Střádač ACC



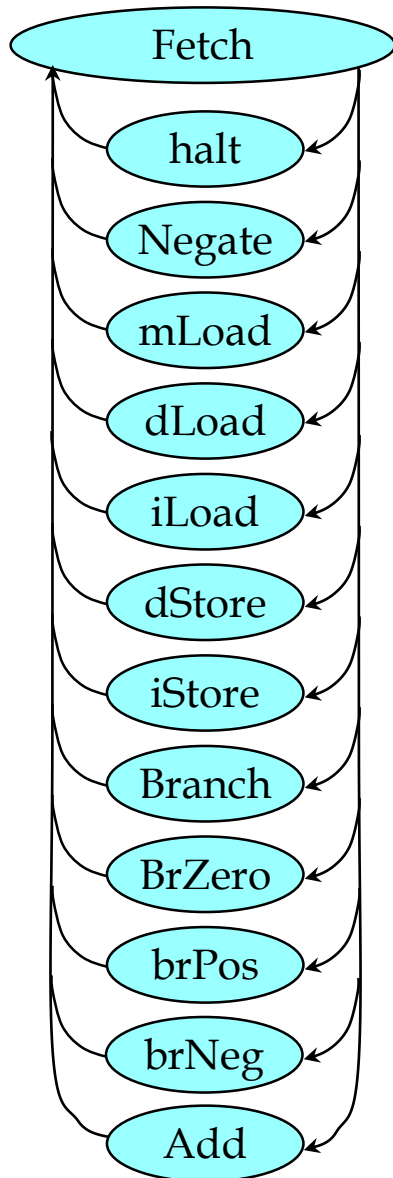
- Do střádače může být uložen buď výsledek operace ALU, hodnota dostupná na datové sběrnici nebo data uložená v IREG. Výběr provádí řadič pomocí řízení multiplexoru.
- Blok *compare* je kombinační obvod, který detekuje speciální stavy ACC – např. uloženou nulu, kladnou nebo zápornou hodnotu. Vytváří tak příznaky, na jejichž základě se rozhoduje řadič.
- Výstup ACC je možné zpřístupnit na datovou sběrnici (např. při instrukci store). Řadič musí aktivovat příslušný třístavový budič.
- Na obrázku nejsou nakresleny multiplexory na vstupu ALU, viz předchozí slide.

Celkové schéma procesoru



- Registr *state* – stav FSM, který implementuje řadič. Udržuje informaci o zpracovávané instrukci a fázi zpracování.
- Na základě obsahu registru *state*, hodnot z bloku *decode* a příznaků z bloku *compare* generuje řadič řídicí signály pro komponenty procesoru, pro paměť a aktualizuje svůj vnitřní stav. Činnost je synchronizována *clk*.

Instrukční cyklus

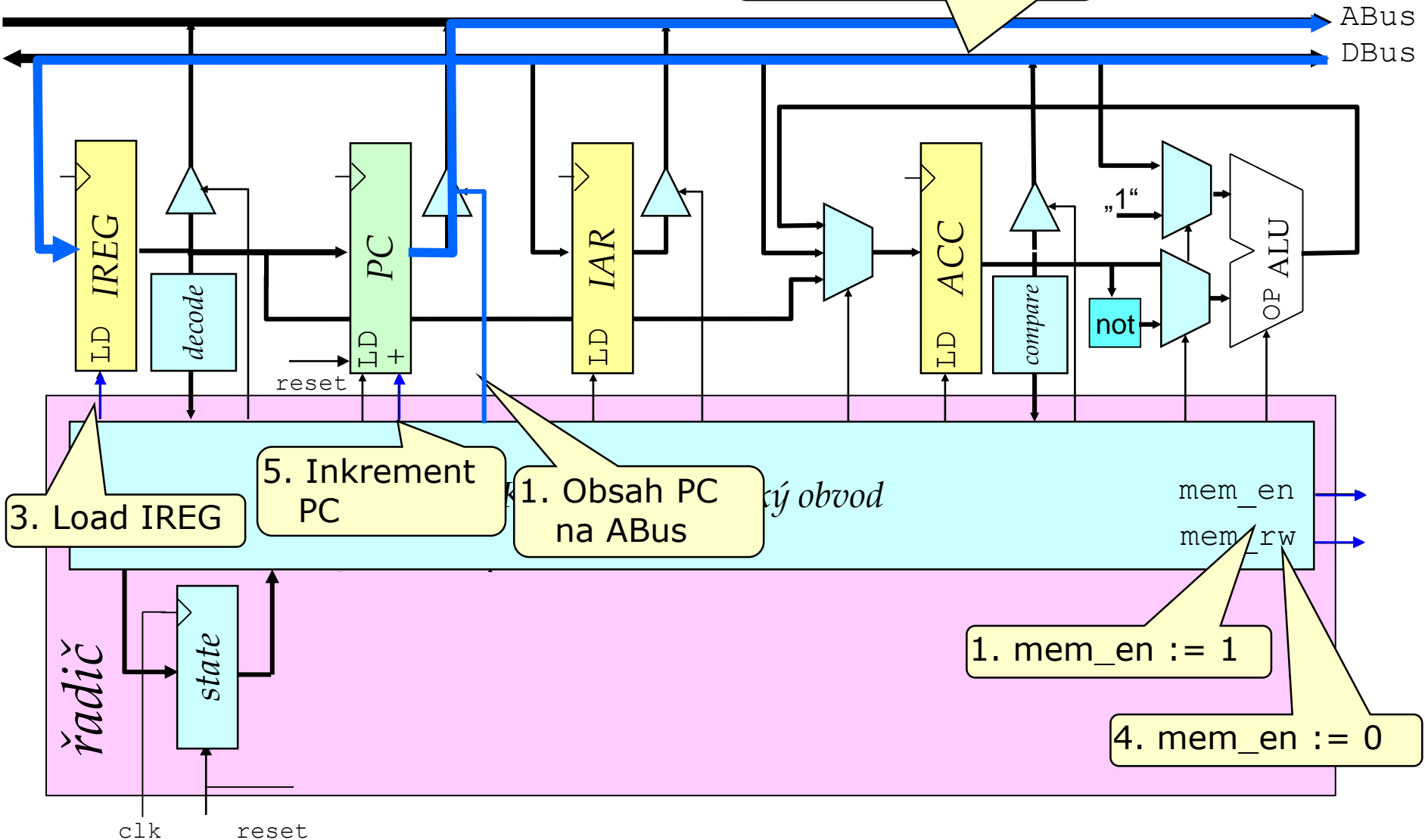


- Načtení instrukce (Instruction fetch)
 - Dle obsahu *PC* je přečtena instrukce z paměti
 - *PC* je inkrementován
- Dekódování instrukce (Instruction decode)
 - podle nejvyšších 4 bitů se určí, co se bude dělat
 - aktivují se příslušné obvody
- Provedení instrukce (Instruction execution)
 - načtení dalších potřebných dat
 - vykonání instrukce
 - zápis do paměti
 - modifikace *PC*, *ACC* atd.
 - může trvat pro různé instrukce různě dlouho

Vykonání instrukce - příklady

- Přímé čtení
 - přenes data z paměti do ACC, využij 12 nižších bitů jako adresu
 - vyžaduje generování signálů pro paměť a ACC
- Podmíněný skok
 - otestuj zda $ACC=0$ (nebo >0 nebo <0)
 - pokud ano, přenes nižších 12 bitů instrukčního slova do PC
- Nepřímý zápis
 - přenes data z paměti do IAR (Indirect Address Register) s využitím nižších 12 bitů instrukčního slova jako adresy
 - přenes data z ACC do paměti s využitím obsahu *IAR* jako adresy
 - vyžaduje zaslání hodnoty z *IAR* na adresovou sběrnici a nastavení signálů pro zápis do paměti

Fetch – načtení instrukce

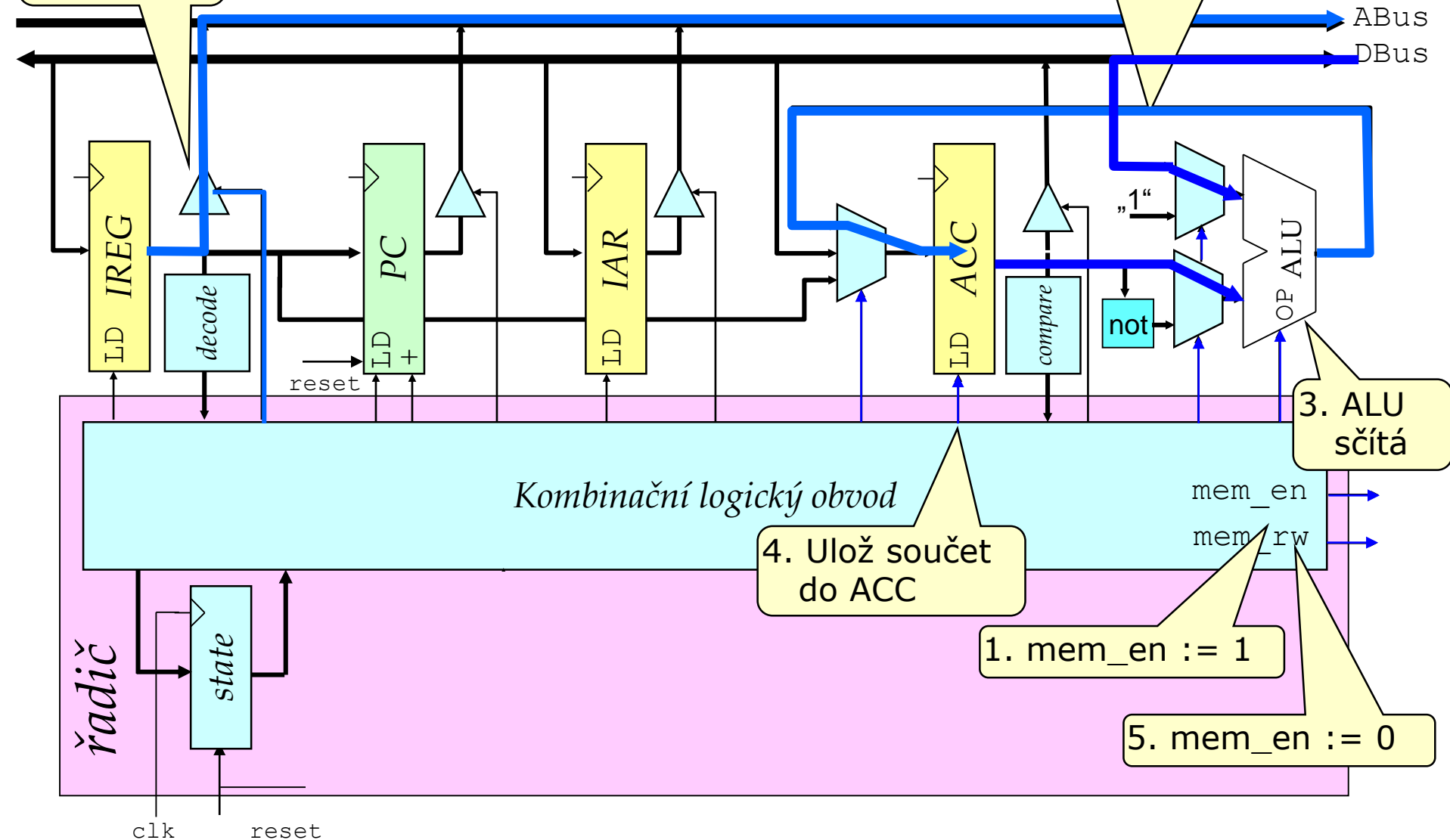


Provedení instrukce ADD

1. IREG na ABus

$$ACC := ACC + M[0xxx]$$

2. Obsah paměti na DBUS, data z ACC



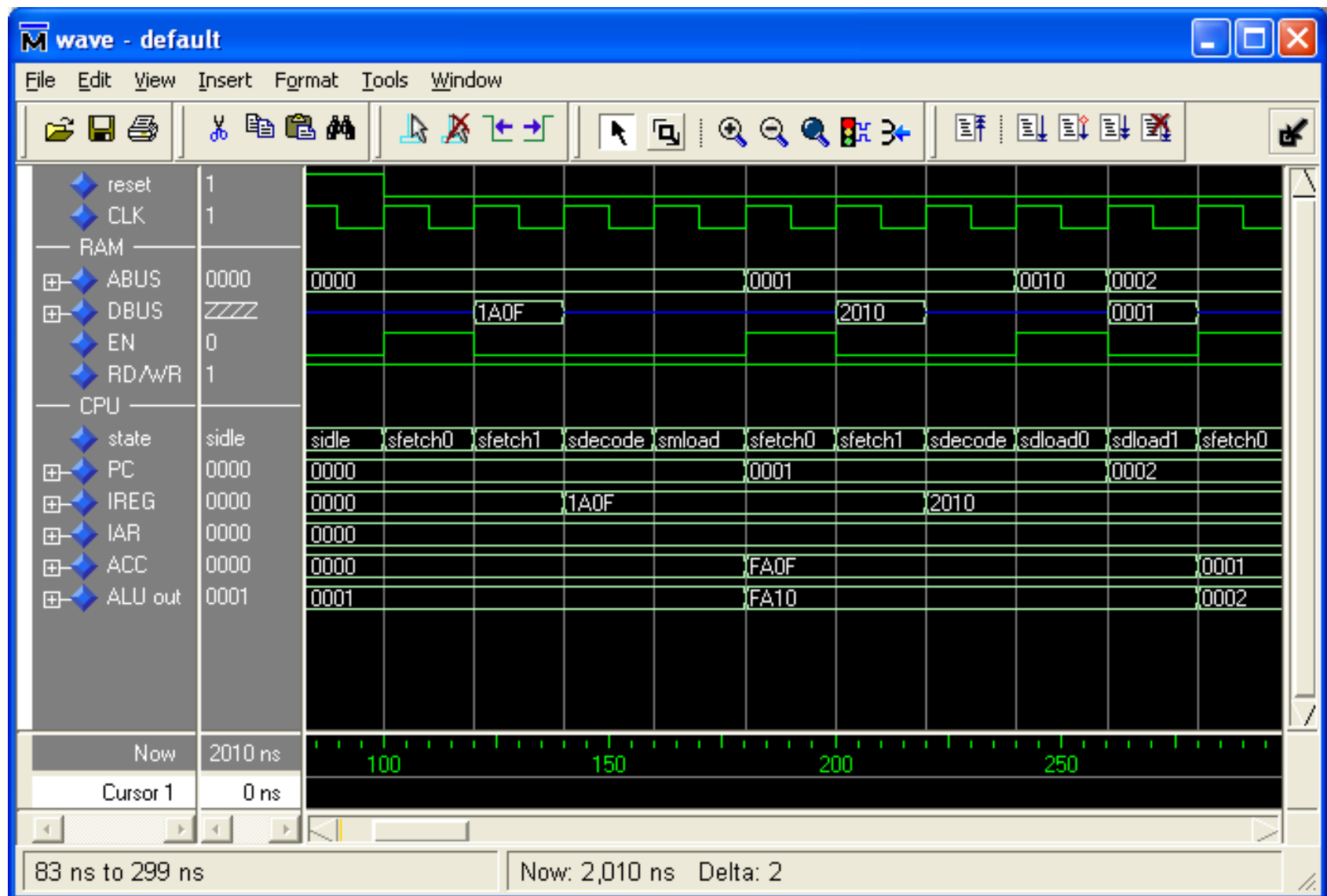
Testovací program

```
ram(0)  <= x"1a0f"; -- immediate load
ram(1)  <= x"2010"; -- direct load
ram(2)  <= x"3030"; -- indirect load
ram(3)  <= x"4034"; -- direct store
ram(4)  <= x"0001"; -- negate
ram(5)  <= x"2034"; -- direct load
ram(6)  <= x"0001"; -- negate
ram(7)  <= x"5032"; -- indirect store
ram(8)  <= x"0001"; -- negate
ram(9)  <= x"1fff"; -- immediate load
ram(10) <= x"a008"; -- add
ram(11) <= x"700d"; -- brZero
ram(12) <= x"0000"; -- halt
ram(13) <= x"1400"; -- immediate load
ram(14) <= x"8010"; -- brPos
ram(15) <= x"0000"; -- halt
ram(16) <= x"0001"; -- negate
ram(17) <= x"9013"; -- brNeg
ram(18) <= x"0000"; -- halt
ram(19) <= x"6015"; -- branch

ram(20) <= x"0000"; -- halt
ram(21) <= x"8014"; -- brPos
ram(22) <= x"7014"; -- brZero
ram(23) <= x"0001"; -- negate
ram(24) <= x"9014"; -- brNeg
ram(25) <= x"0000"; -- halt
ram(48) <= x"0031"; -- pointer for iload
ram(49) <= x"5af0"; -- target of iload
ram(50) <= x"0033"; -- pointer for istore
ram(51) <= x"0000"; -- target of istore
ram(52) <= x"f5af"; -- target of dstore
```

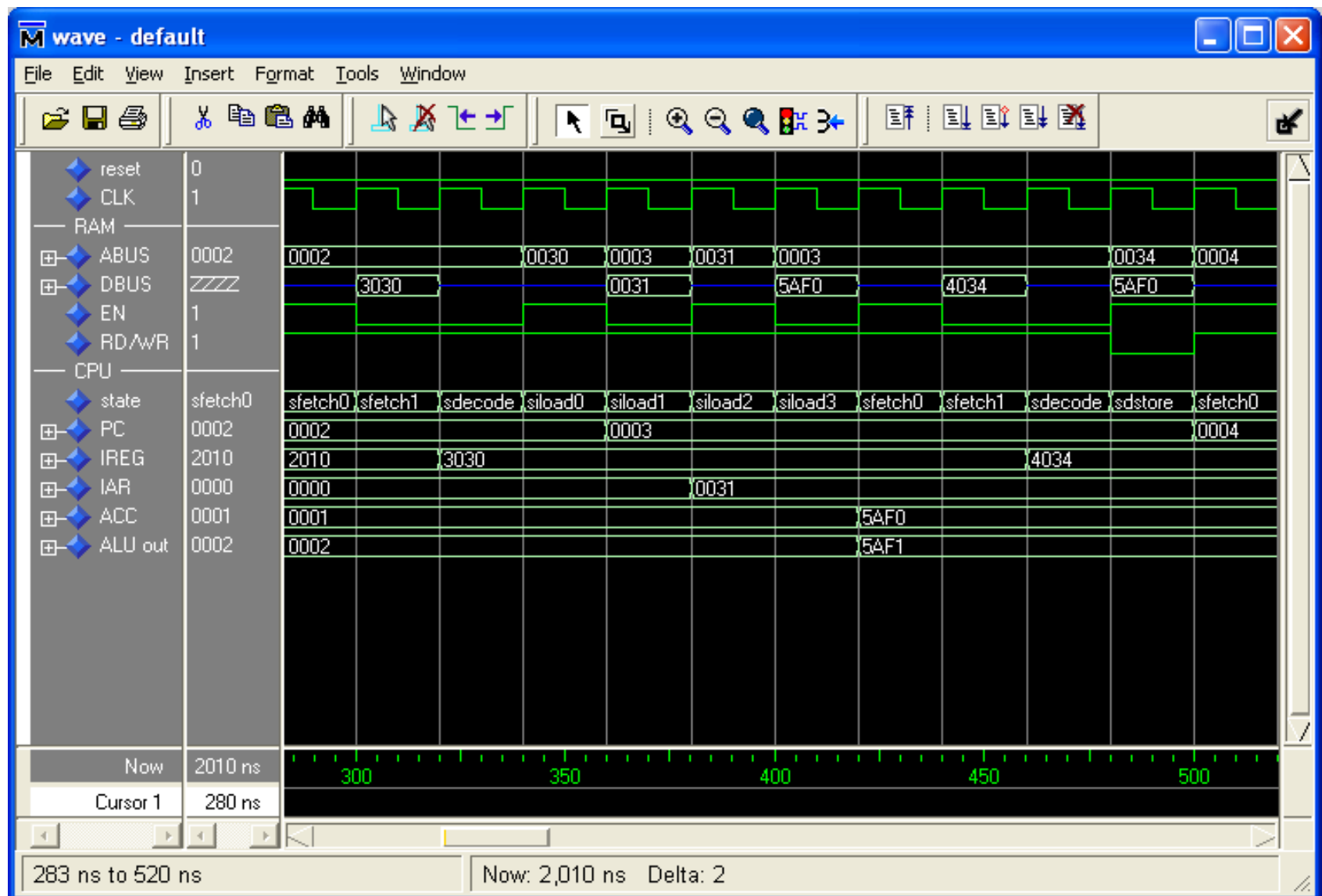
Simulace procesoru (1)

1a0f -- immediate load, 2010 -- direct load



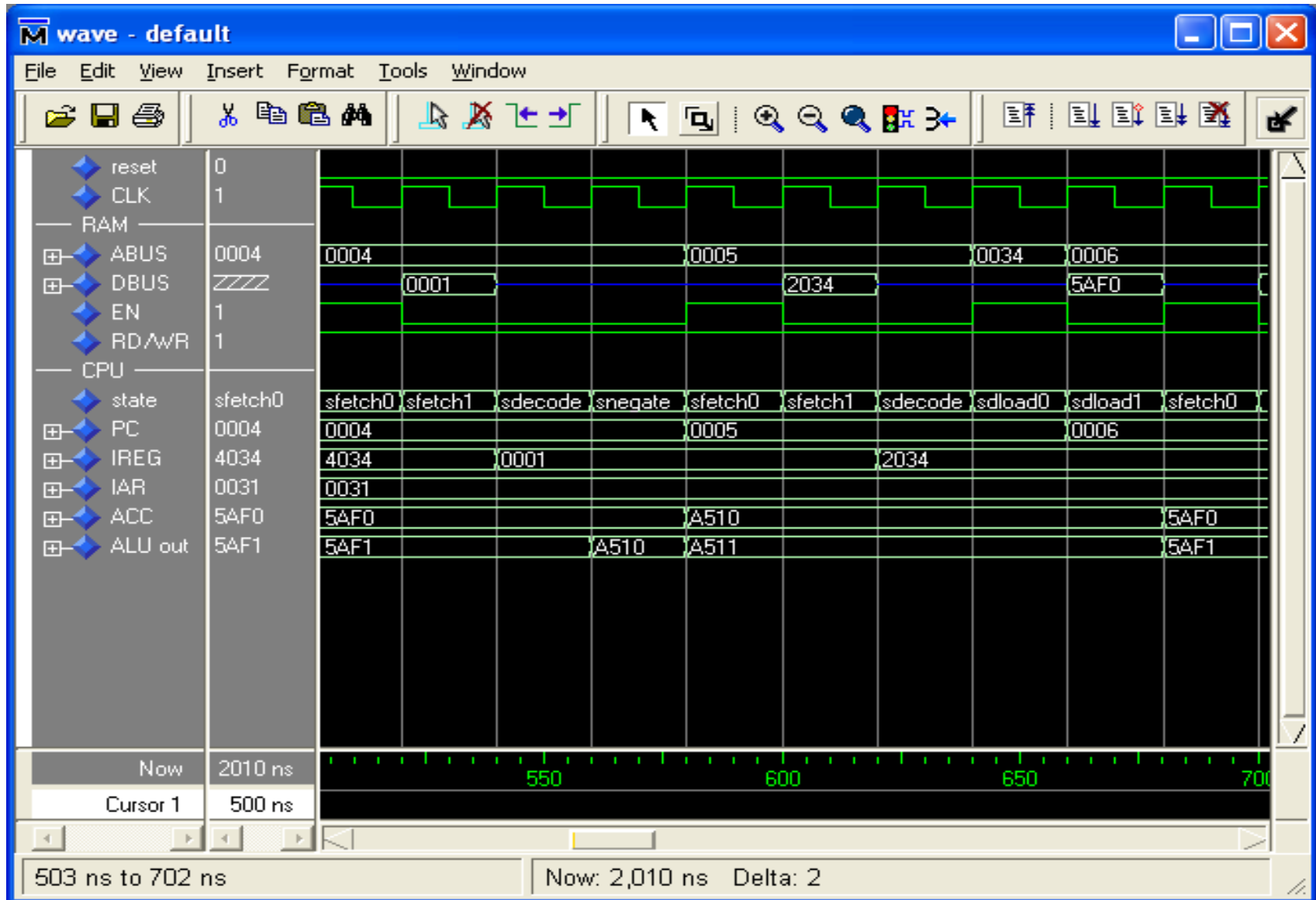
Simulace procesoru (2)

3030 -- indirect load, 4034 -- direct store



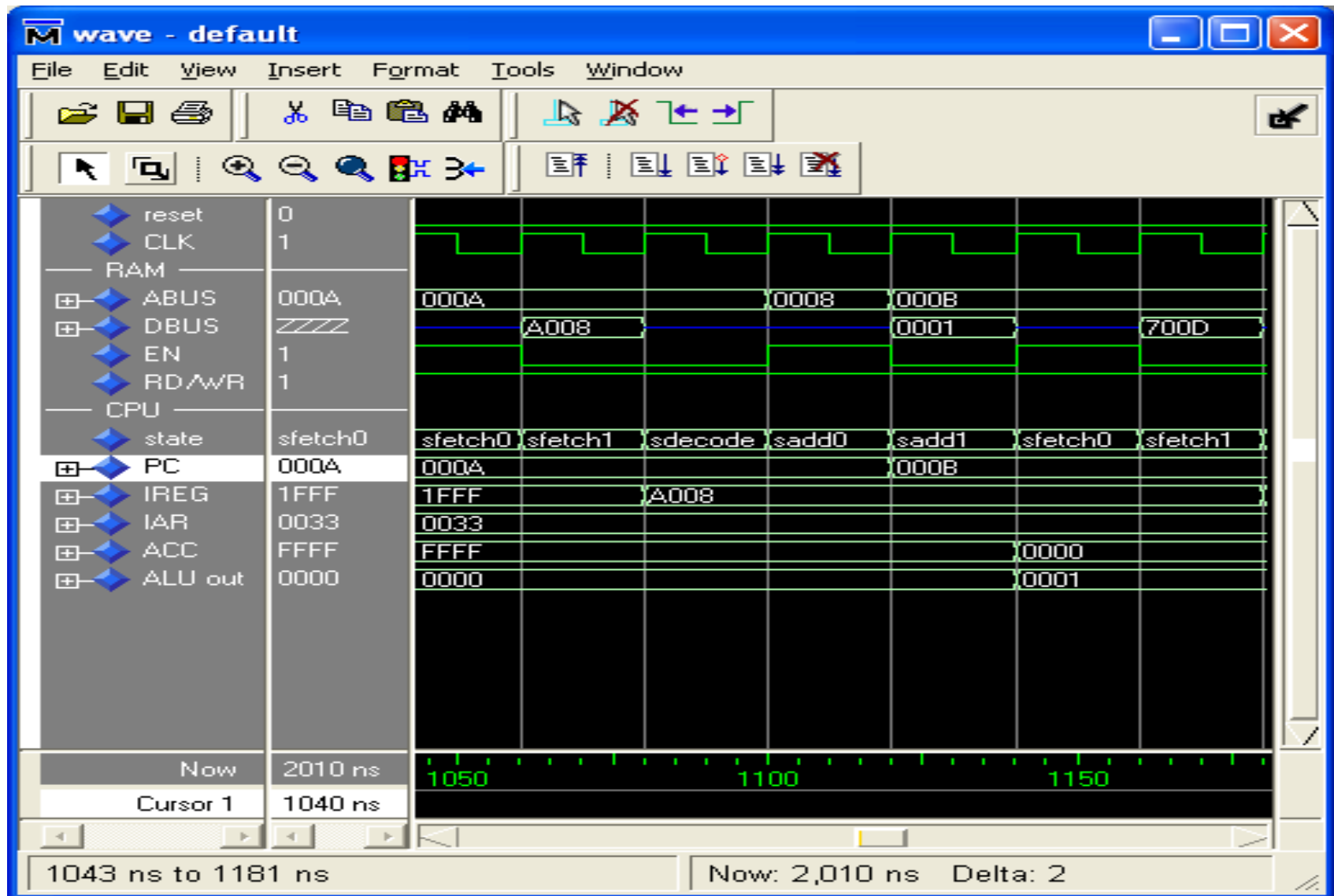
Simulace procesoru (3)

0001 – negate, 2034 -- direct load

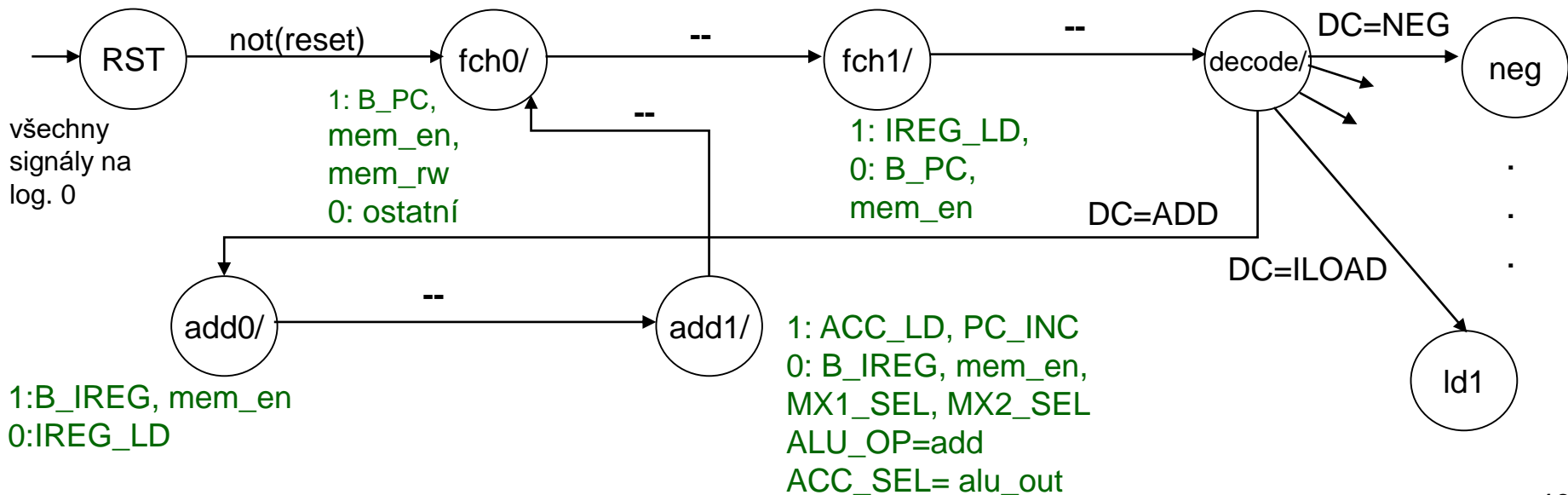
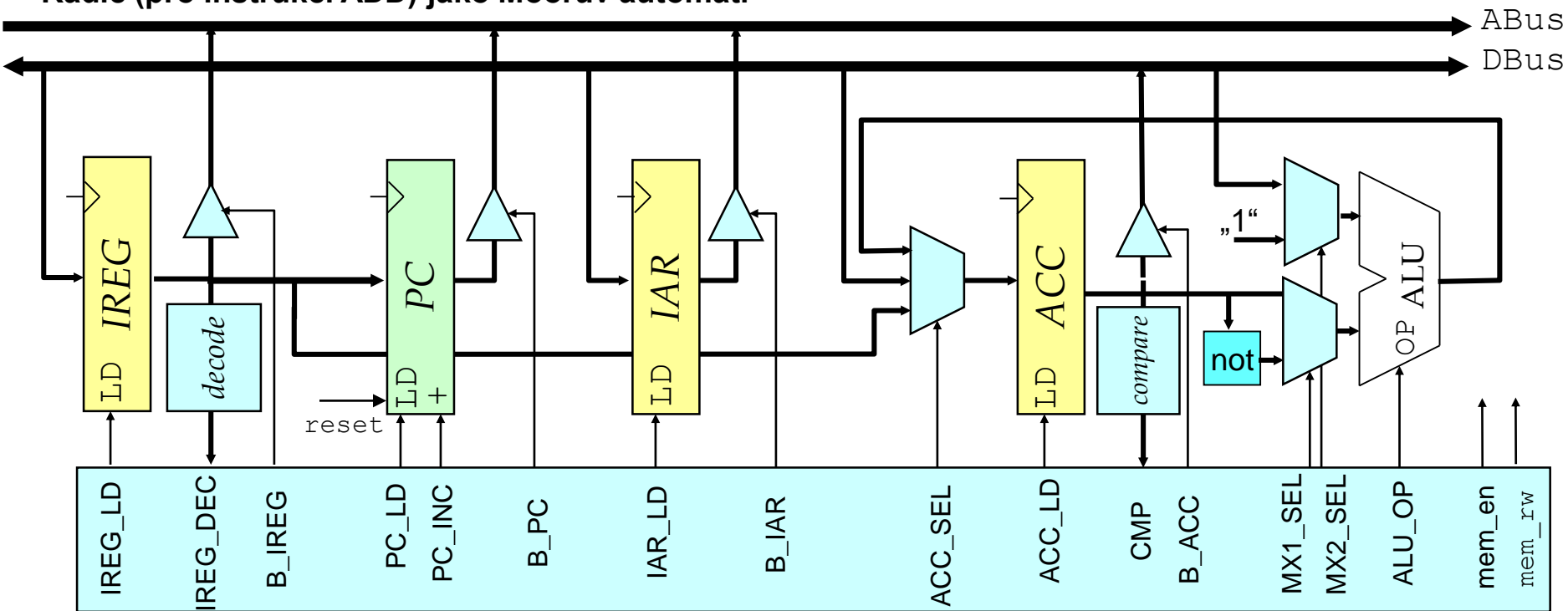


Simulace procesoru (4)

a008 – add ... atd.



Řadič (pro instrukci ADD) jako Moorův automat.



Řadič – poznámky k obrázku

- Implementován jako Moorův automat (signály, které se (de)aktivují v příslušném stavu, jsou uvedeny vedle každého stavu).
 - Fetch – 2 stavy
 - Decode – 1stav
 - ADD – 2 stavy
 - Další instrukce: 1-4 cykly (graf příslušných automatů neuveden, k přechodu dojde na základě hodnoty signálu DC)
- Pokud je aktivován signál reset, přejde se z libovolného stavu do stavu RST (příslušné hrany nejsou uvedeny).
- Značka „--“ označuje přechod, který se vždy vykoná.

Zdokonalování von Neumannovy koncepce

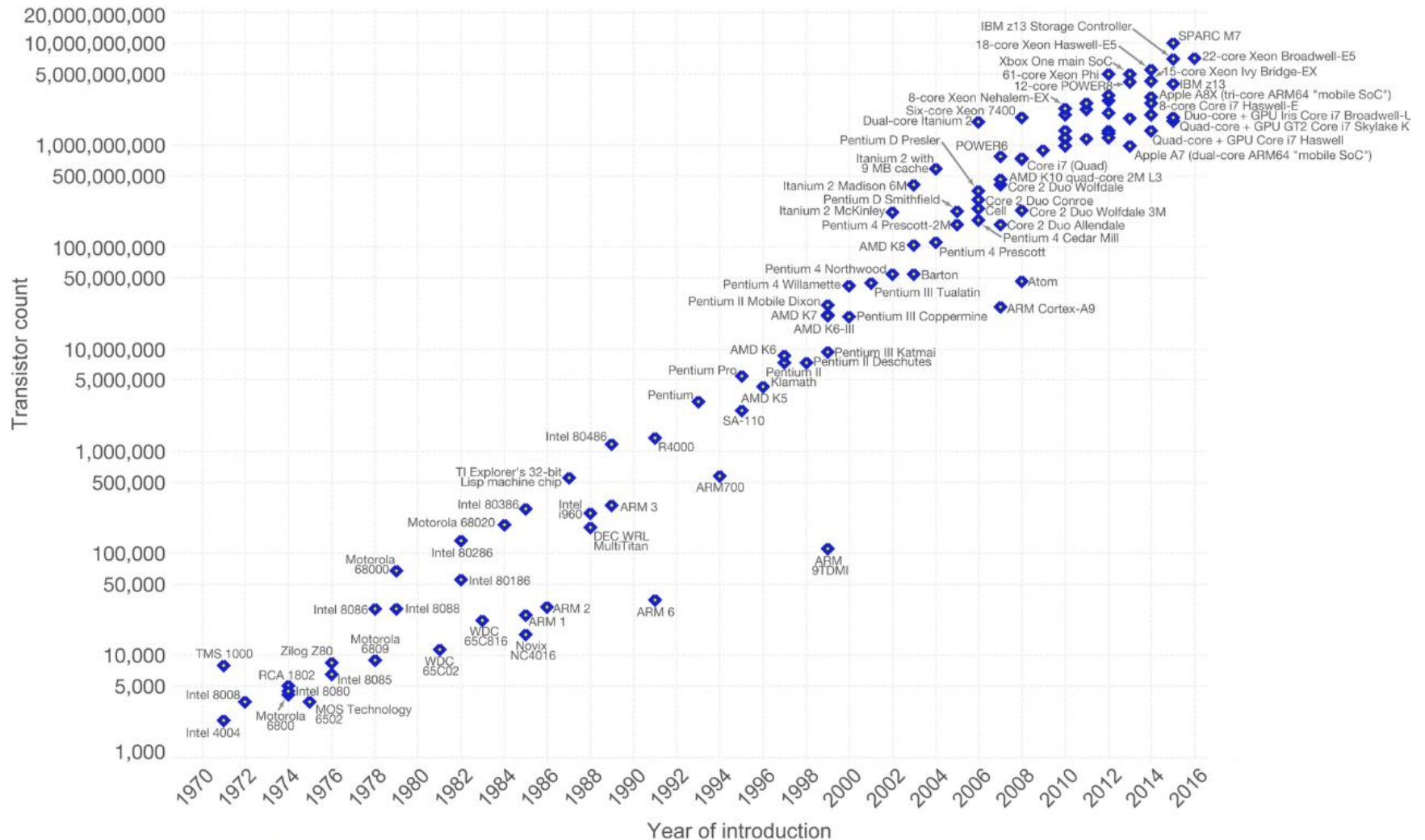
- Indexregistry (1949), EDSAC, Universita Cambridge
- Jednotka pro operace s pohyblivou řádovou čárkou FPU (Floating Point Unit, 1954), IBM 704, NORC
- Přerušování programu (1956), UNIVAC 1103, Remington Rand
- Univerzální registry (1956), PEGASUS, Ferranti
- Asynchronní činnost vstup-výstupních periferních zařízení (1956), UNIVAC LARC, Remington Rand
- Nepřímé adresování (1958), IBM 709
- Virtuální paměť (1959), ATLAS, Univ. Manchester
- V 60. letech již k zásadním zdokonalením architektury nedocházelo tak často, rozvoj se ubíral cestou zdokonalování technologie (následující slide), která vedla k zvětšování výkonnosti i kapacit pamětí.
- Za významné jevy 70. let považujeme integrovaný procesor (mikroprocesor) a použití rychlé vyrovnávací paměti cache, viz dále.
- V dalším období docházelo ke zvyšování úrovně paralelismu na různých úrovních: řetězené zpracování instrukcí, současné vydávání instrukcí, vícejádrové systémy ...
- S těmito a dalšími koncepty se v INP ještě setkáme.

Zdokonalování technologie: Moorův zákon (1965)

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2016)

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years.

This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are strongly linked to Moore's law.

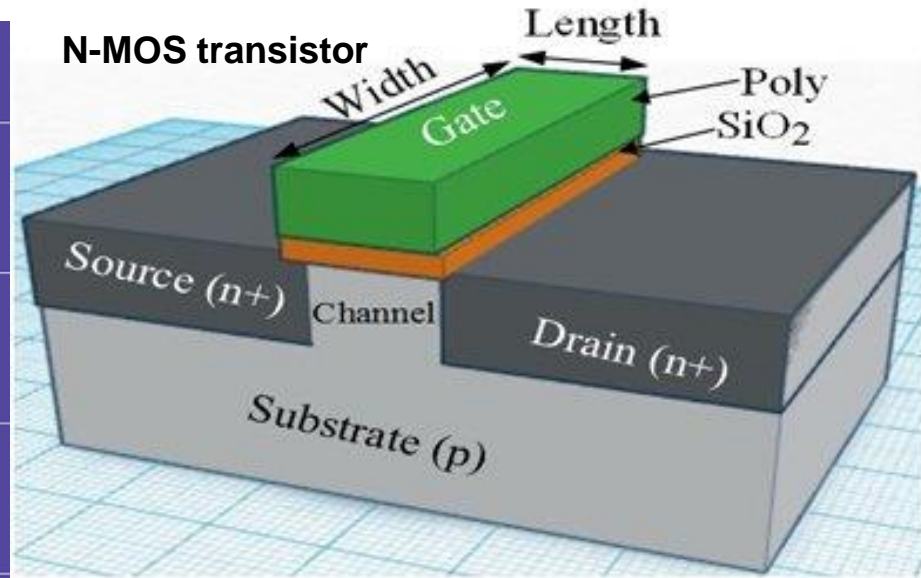
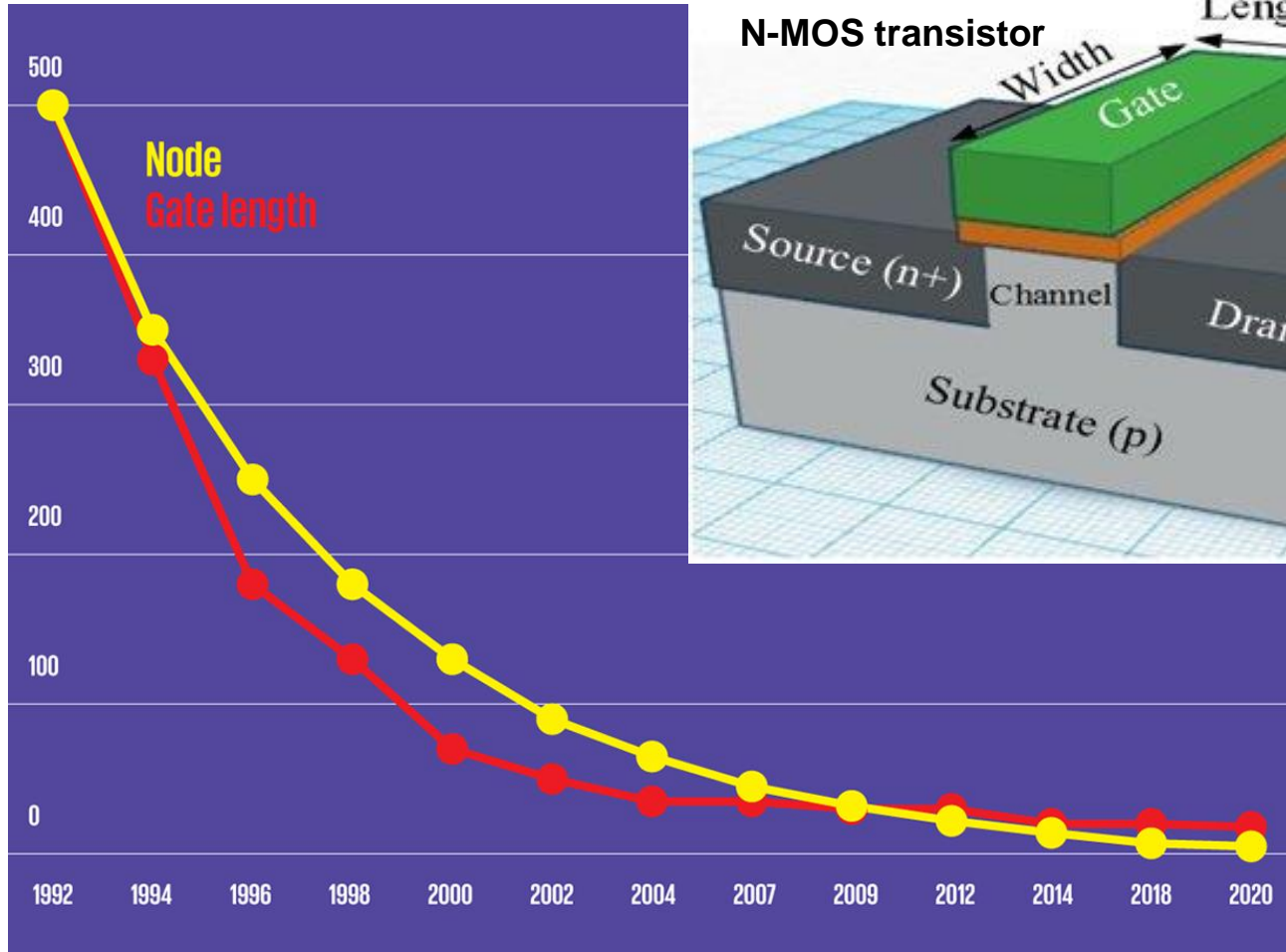
Our World
in Data

Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)

The data visualization is available at [OurWorldinData.org](https://ourworldindata.org). There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under [CC-BY-SA](#) by the author Max Roser.

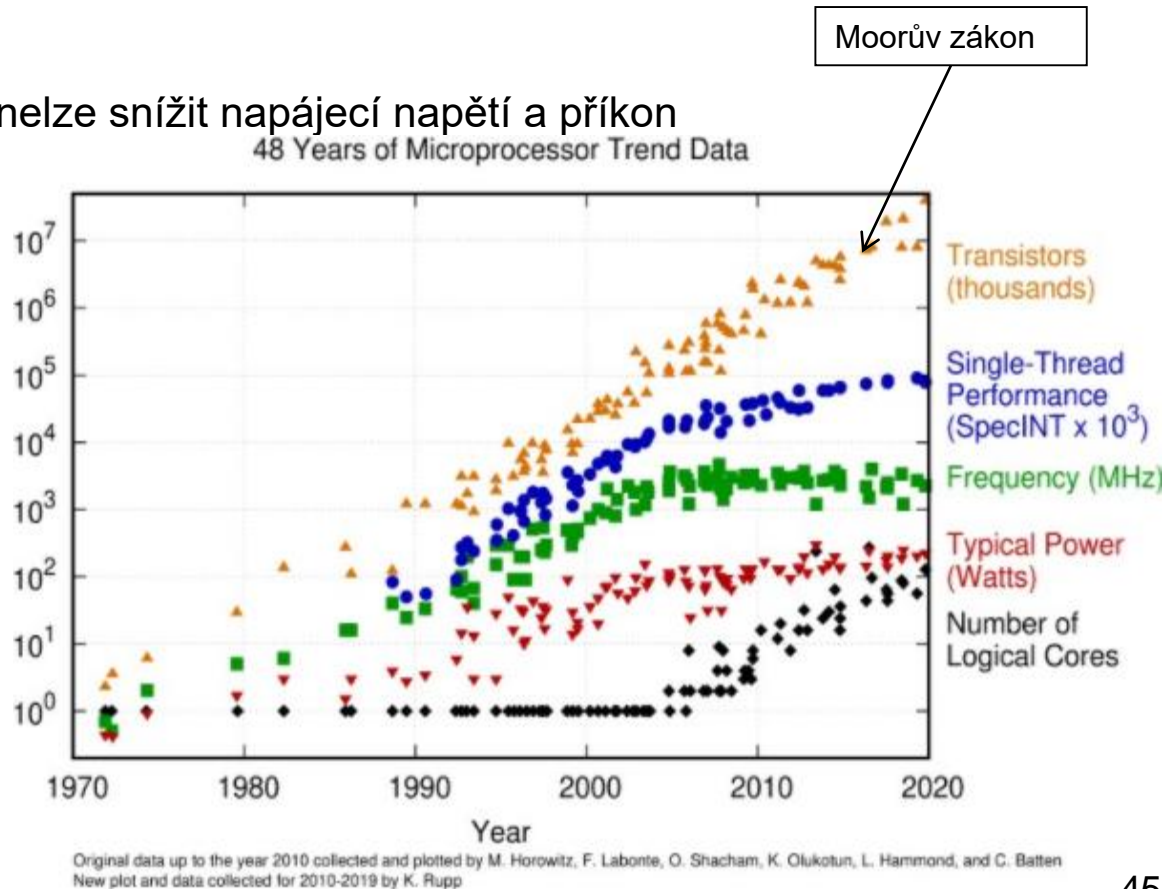
“Technology node” vs. “Gate Length”



S. K. Moore: A Better Way to Measure Progress in Semiconductors, IEEE Spectrum 7/2020
P. H. Vora, R. Lad: A Review Paper on CMOS, SOI and FinFET Technology
<https://www.design-reuse.com/articles/41330/cmos-soi-finfet-technology-review-paper.html>

Vývoj technologie

- *Dennard scaling*: Po desetiletí bylo možné **zvyšovat** hustotu integrace (zmenšovat tranzistory) a **zvyšovat** frekvenci. **Snížením** napájecího **napětí** byl zajištěn akceptovatelný příkon.
- Současnost:
 - frekvenci nelze zvyšovat, nelze snížit napájecí napětí a příkon
 - vícejádrové procesory běžící na nižším kmitočtu
 - inteligentní řízení příkonu
- Fenomén: **Dark silicon**
 - na čipu je mnoho tranzistorů, ale jen část může být současně využita, jinak čip shoří



Literatura

- Odkazy na slidech
- Drábek, V. Výstavba počítačů. Skriptum VUT, 1995
- Turner, J.: Simple processor, kurz CS/EE 260, Washington University in St. Louis, 2003