

*„Znalosť nie je to isté, čo múdrosť.
Znalosť je vedieť ako, múdrosť je
urobiť to.“*

ARCHITEKTÚRY POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMOV

Ing. Norbert Ádám, PhD.
Norbert.Adam@tuke.sk

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

2

- Návrh PS a jeho komponentov
 - ▣ Systémová úroveň (SÚ)
 - ▣ Úroveň prenosov informácií medzi registrami (PÚ)
 - ▣ Úroveň logických obvodov (LÚ)
 - ▣ Úroveň technologickej realizácie (TÚ)
- Proces návrhu PS sa z hľadiska svojej komplexnosti uskutočňuje v troch oblastiach jeho opisu (špecifikácie) a návrhu, ktorými sú
 - ▣ Správanie sa (funkcia) – inštrukčno orientovaná architektúra
 - ▣ Štruktúra – implementačno orientovaná architektúra
 - ▣ Realizácia (technológia)

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

3

- Špecifikácia inštrukčno orientovanej architektúry (oblasť správania sa)
 - ▣ **SÚ**: inštrukcie, údaje, programy, algoritmy, operačný systém, jazyky HLL,
 - ▣ **PÚ**: operácie, údajové typy, aplikačné programy, používateľské programy,
 - ▣ **LÚ**: boolovské výrazy, konečné automaty,
 - ▣ **TÚ**: funkcie spojitých obvodov, prenosové funkcie.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

4

- Špecifikácia implementačne orientovanej architektúry (oblasť štruktúry)
 - ▣ **SÚ**: procesory, pamäte, V/V jednotky, zbernice,
 - ▣ **PÚ**: operačné, komunikačné a riadiace funkčné jednotky, zbernice, funkčné moduly,
 - ▣ **LÚ**: sekvenčné a kombinačné logické obvody (členy),
 - ▣ **TÚ**: tranzistory, rezistory, prepojenia, kontakty.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

5

- Špecifikácia fyzickej realizácie (oblasť realizácie, konštrukcie, výroby)
 - ▣ **SÚ**: fyzické rozčlenenie systému na makromoduly, plánovanie technologicky odlišných modulov,
 - ▣ **PÚ**: plánovanie rozdelenia plochy čipu pre jednotlivé moduly,
 - ▣ **LÚ**: bunky a plány ich umiestnenia v moduloch,
 - ▣ **TÚ**: rozmiestnenie a prepojenie prvkov v čipe, návrh masiek (geometria čipu, technológia výroby čipu),
 - ▣ konštrukčná úroveň: zdroje, mechanické časti, kabeláž, dizajn

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

6

- Číslicový (digitálny) systém na abstraktnej úrovni je definovaný sedmicou

$$\check{S} = (U, V, P, F, G, f, g)$$

kde

U, V, F, G sú premenné definované vo vonkajších kanáloch $\check{S}$, určených na jeho styk s okolím, ktoré môžu byť:

- **údajové** (zobrazujú spracúvané informácie),
- **komunikačné** (zobrazujú informácie o spracúvaných údajoch), prezentované ako **riadiace, informačné** a **stavové** premenné,

P – premenná, vyjadrujúca stav $\check{S}$,

f, g – funkčné vzťahy, ktoré vyjadrujú reakciu $\check{S}$ na podnety definované hodnotami nasledujúcich premenných, pôsobiacich v príslušných kanáloch:

$$V = f(U, F), \quad G = g(P)$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

7

- V ČS, ktorého veličiny sú definované v tvare číslicových premenných a nadobúdajú konečný počet hodnôt zobrazených prostredníctvom logických hodnôt, každá **premenná X** definovaná v intervale $0 \leq X < 2^n - 1$ sa vo všeobecnosti zobrazuje v tvare **vektora** logických premenných

$$\tilde{x}_{n-1} \tilde{x}_{n-2} \dots \tilde{x}_0$$

ako

$$\vec{X} = (\tilde{x}_{n-1} \tilde{x}_{n-2} \dots \tilde{x}_0), \quad \tilde{x}_i \in \{0,1\}$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

8

- Premenná X môže mať význam slova rôzneho významu (údajového, riadiaceho, stavového, adresového a pod.), ktoré sa v tomto prípade označuje v tvare

$$X = x_{n-1}x_{n-2} \dots x_0$$

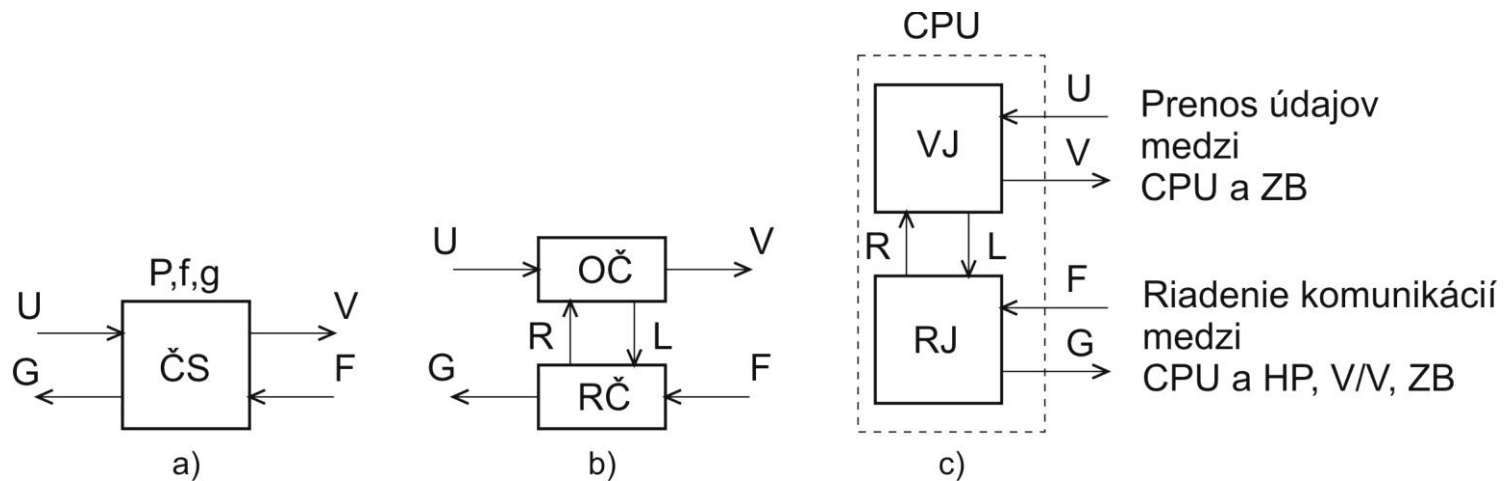
- Nositeľom logických hodnôt premennej (slov) X je rovnako pomenovaný **kanál** X , v ktorom ich i . vektor je:

$$\vec{X}_i = (\tilde{x}_{i_{n-1}} \tilde{x}_{i_{n-2}} \dots \tilde{x}_{i_0}) \in \{\vec{X}_0, \vec{X}_1, \dots, \vec{X}_{2^n-1}\}$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

9

- Každý ČS chápaný chápeme, ako **formálny model** definovaný nad reálnym číslicovým zariadením, ktorý je možné z hľadiska jeho funkcie dekomponovať na **operačnú časť (OČ)** a **riadiacu časť (RČ)**.



Obr. 2.1 Číslicový systém (a) a jeho dekompozícia na operačnú a riadiacu časť (b) a príklad (c) dekompozície procesora (CPU) na vykonávaciu (VJ) a riadiacu (RJ) jednotku

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

10

- Štruktúrna organizácia komponentov ČP na úrovni číslicového systému (ČS) predstavujú východiskovú metódu jeho architektonického návrhu na systémovej úrovni a úrovni medziregistrových prenosov.
- Analýza a syntéza štruktúrnej organizácie ČP vychádza z vytvorenia **modelu správania** sa jeho **operačnej** a **riadiacej časti**, na ktoré je príslušný ČS dekomponovaný.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

11

- Funkcia (správanie sa) operačnej časti OČ je vo všeobecnosti definovaná **konečným nedeterministickým automatom Mooreovho** typu v tvare päťice:

$$A = (\vec{R}, \vec{Q}, \vec{L}, \delta, \lambda)$$

Kde

$\vec{R}$ – množina vstupov (riadiacich vektorov) automatu,

$$\vec{R}_j = \widetilde{R}_1 \widetilde{R}_2 \dots \widetilde{R}_u ; \widetilde{R}_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, \dots, u, j = 1, 2, \dots, 2^u$$

$\vec{Q}$ – množina vnútorných stavov automatu,

$$\vec{Q}_j = \widetilde{Q}_1 \widetilde{Q}_2 \dots \widetilde{Q}_r ; \widetilde{Q}_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, \dots, r, j = 1, 2, \dots, 2^r$$

$\vec{L}$ – množina výstupov (stavovo-informačných vektorov) automatu,

$$\vec{L}_j = \widetilde{L}_1 \widetilde{L}_2 \dots \widetilde{L}_v ; \widetilde{L}_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, \dots, v, j = 1, 2, \dots, 2^v$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

12

- Funkcia (správanie sa) operačnej časti OČ je vo všeobecnosti definovaná **konečným nedeterministickým automatom Mooreovho** typu v tvare päťice:

$$A = (\vec{R}, \vec{Q}, \vec{L}, \delta, \lambda)$$

Kde

δ – prechodová funkcia automatu, vyjadrujúca zobrazenie

$$\delta : \vec{Q}(t) \rightarrow \vec{Q}(t + 1)$$

λ – výstupná funkcia automatu, vyjadrujúca zobrazenie $\lambda : \vec{Q} \rightarrow \vec{L}$

- Nedeterminovanosť automatu spôsobuje náhodný charakter pôsobenia vstupného toku informácií, ktorý nie je zahrnutý do jeho vstupov.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

13

- Matematický model riadiacej časti RČ číslicového systému je definovaný **konečným deterministickým automatom**:

$$A = (\vec{L} \times \vec{F}, \vec{P}, \vec{R}, \delta, \lambda)$$

Kde

$\vec{L} \times \vec{F}$ – množina dvojíc stavovo-informačných vektorov a vonkajších riadiacich povelov, zobrazených v kanále L a F

$\vec{P}$ – množina vnútorných stavov RČ,

$\vec{R}$ – množina vektorov vnútorných riadiacich povelov

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

14

- Matematický model riadiacej časti RČ číslicového systému je definovaný **konečným deterministickým automatom**:

$$A = (\vec{L} \times \vec{F}, \vec{P}, \vec{R}, \delta, \lambda)$$

Kde

δ – prechodová funkcia automatu, vyjadrujúca zobrazenie

$$\delta : \vec{P} \times (\vec{L} \times \vec{F}) \rightarrow \vec{P}$$

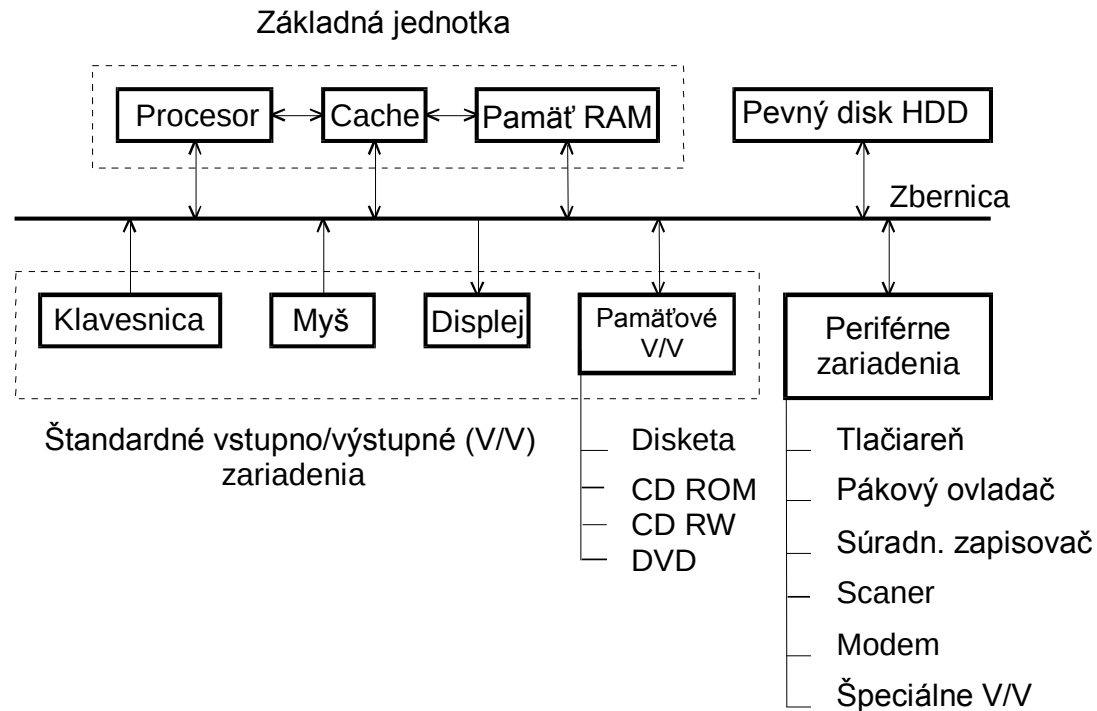
λ – výstupná funkcia automatu, vyjadrujúca zobrazenie

$$\lambda : \vec{P} \rightarrow \vec{R} \text{ (Mooreov automat)}$$

$$\lambda : \vec{P} \times (\vec{L} \times \vec{F}) \rightarrow \vec{R} \text{ (Mealyho automat)}$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

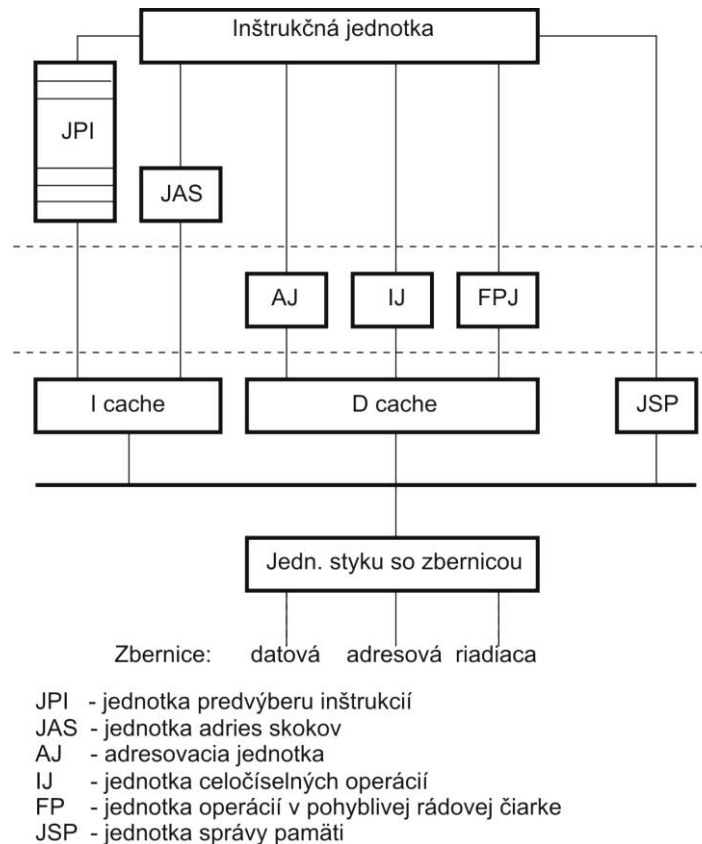
15



Obr. 2.2 Príklad zobrazenia implementačno orientovanej architektúry na systémovej úrovni

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

16



Obr. 2.3 Príklad zobrazenia implementačno orientovanej architektúry na úrovni prenosov medzi registrami

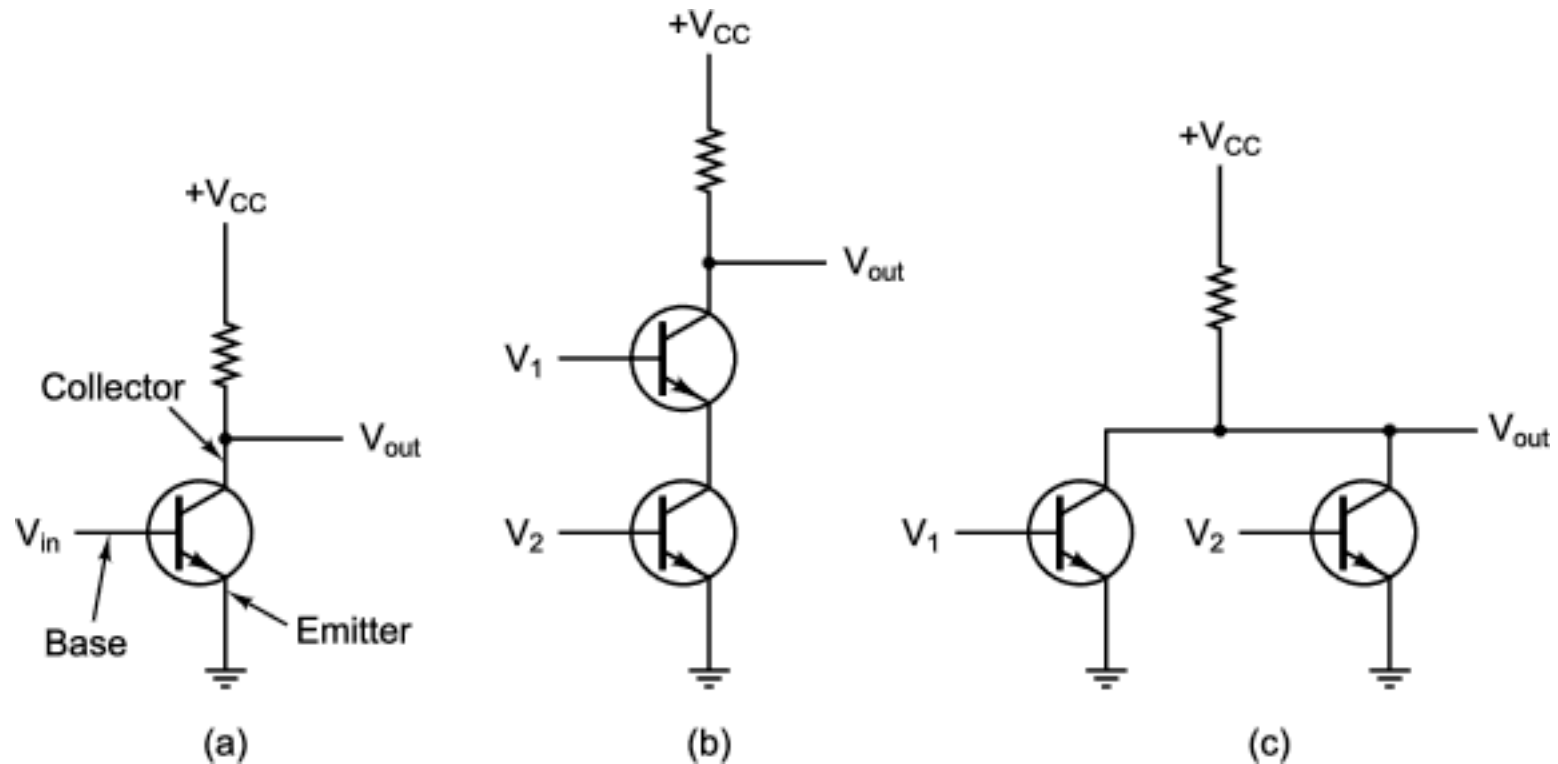
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

17

- George Boole
 - ▣ Boolova algebra – algebrická štruktúra s logickými operáciami
 - ▣ Claude Shannon – implementácia – elektromechanické relé - obvody
- Elementárne logické funkcie
 - ▣ Logický súčin - AND
 - ▣ Logický súčet - OR
 - ▣ Negácia - NOT
- Odvodené (vektorové) logické funkcie
 - ▣ Negácia logického súčinu - NAND
 - ▣ Negácia logického súčtu – NOR
 - ▣ Nerovnosť - XOR
 - ▣ Rovnosť - NXOR

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačů

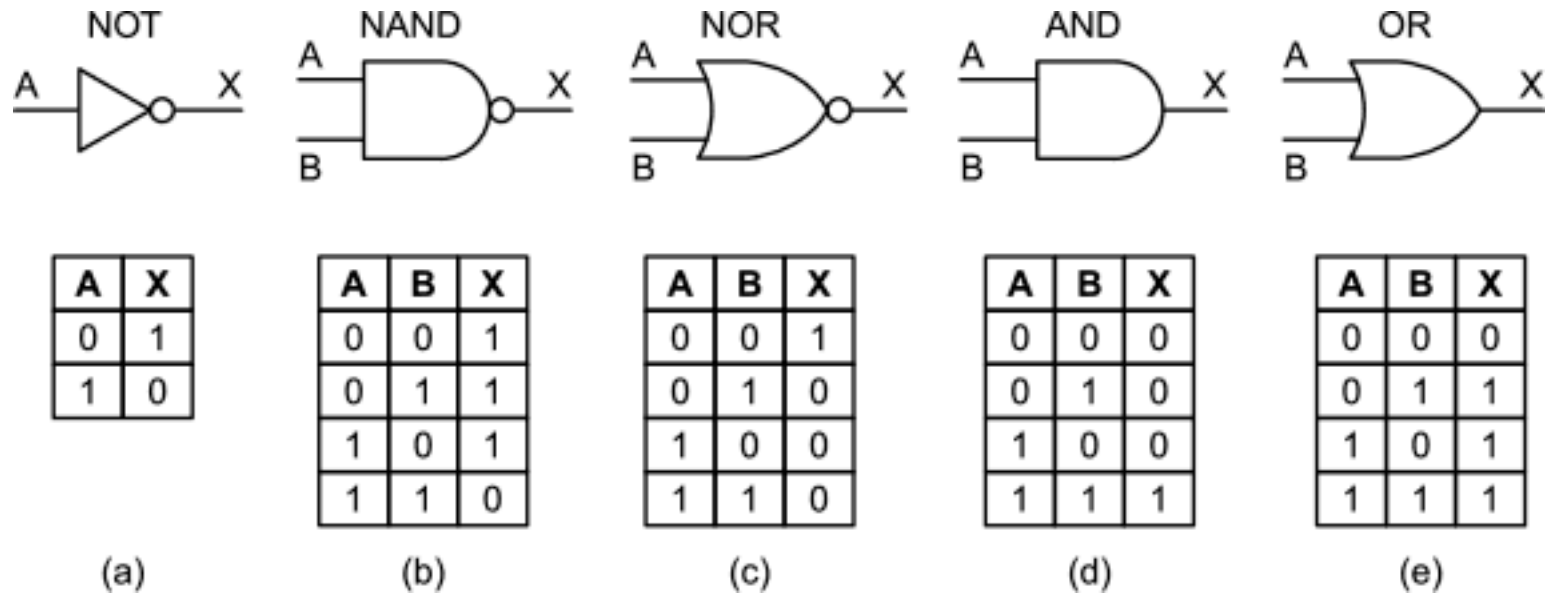
18



Obr. 2.4 (a) invertor, (b) NAND (c) NOR

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

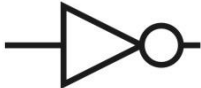
19



Obr. 2.5 Symbolické označenie (ANSI) logických členov a ich pravdivostná tabuľka

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

20

Grafický symbol				
Zápis operátora	NOT x' alebo $\neg x$ alebo $\bar{x}$	AND xy alebo $x \wedge y$	OR $x+y$ alebo $x \vee y$	XOR $x \oplus y$ alebo $x \neq y$
Na výstupe je 1 vtedy a len vtedy, ak:	na vstupe je 0	na vstupoch je 1	aspoň na jednom vstupe je 1	vstupy sa nerovnajú
Aritmetický výraz	$1 - x$	xy	$x + y - xy$	$x + y - 2xy$

Obr. 2.6 Stavebné prvky logických obvodov

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

21

- **Príklad:** Vyhodnoťte podmienku

$$xyz \vee x' \vee y' \vee z' \equiv? 1$$

Riešenie

$$\text{ľavá strana} = [xyz \vee x'] \vee [y' \vee z']$$

$$= [xyz + 1 - x - (1 - x)xyz] \vee [1 - y + 1 - z - (1 - y)(1 - z)]$$

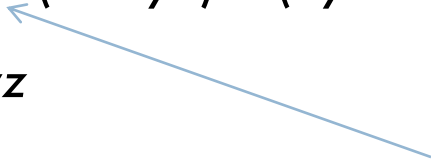
$$= [xyz + 1 - x] \vee [1 - yz]$$

$$= (xyz + 1 - x) + (1 - yz) - (xyz + 1 - x)(1 - yz)$$

$$= 1 + xy^2z^2 - xyz$$

$$= 1 = \text{pravá strana}$$

aritmetický súčet



Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

22

- **Klasifikácia základných prvkov** ([2/kap.2.4])
 - ▣ Obvody na riadenie prenosu údajov a vnútorných komunikácií
 - ▣ Obvody na realizáciu predikátov
 - ▣ Obvody na realizáciu operácií (výpočtov)
 - ▣ Obvody na pamätanie údajov

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

23

- **Obvody na riadenie prenosu údajov a vnútorných komunikácií**
 - ▣ Prenos informácií
 - elektrický,
 - optický,
 - rádiový a pod.
 - ▣ Prenos informácií je riadený proces

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

24

- Obvody na riadenie prenosu údajov a vnútorných komunikácií
 - ▣ Hradlovacie obvody a budiče,
 - ▣ Prevodníky kódov,
 - ▣ Kódery a dekódery,
 - ▣ Multiplexory a demultiplexory.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

25

- Hradlovacie obvody a budiče
 - ▣ Hradlo je základný logický člen mikroarchitektúry ČP, ktorého priechodnosť medzi vstupným (X) a výstupným (Y) kanálom označeným rovnakopomenovanou vstupnou a výstupnou premennou X a Y je definovaná vzťahom:

$$Y = \begin{cases} X \Leftarrow R = f(R_1, R_2, \dots, R_k) = 1 \\ 0 \Leftarrow R = f(R_1, R_2, \dots, R_k) = 0 \end{cases}$$

kde

X – je vstupná premenná v kanále X ,

Y – výstupná premenná v kanále Y ,

R – riadiaci signál definovaný ako funkcia f riadiacich premenných $R_1, R_2, \dots, R_k$, t.j. $Y = X \wedge R$, resp. $Y = X \wedge 1 = X$.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

26

- Hradlovacie obvody a budiče
 - ▣ Významnou aplikáciou hradla pri riadení komunikačných operácií je riadenie prenosu údajov z viacerých zdrojov do jedného cieľového zdroja, ktorým je zbernica.
 - ▣ V súčasnosti sa pri obvODOVOM riešení používajú trojstavové hradlá, ktoré poskytujú úspornejšie riešenie v porovnaní s klasickými hradlami a vyššie spínacie rýchlosti v porovnaní s hradlami s otvoreným kolektorom.
 - ▣ Ak trojstavové hradlá nie sú súčasťou príslušných výstupných zdrojov informácií pripájaných ku zbernici, ale tvoria samostatné prvky, nazývajú sa budiče. Obvody, ktoré sú určené na obojsmernú komunikáciu so zbernicou sa nazývajú budiče/prijímače.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

27

- Hradlovacie obvody a budiče
 - ▣ Funkcia trojstavového hradla je definovaná vzťahom

$$Z = \begin{cases} DI \Leftarrow G = 0 \\ Z \text{ je v 3. stave} \Leftarrow G = 1 \end{cases}$$

kde

DI – je údajový vstup,

Z – výstup (zbernica),

G – riadiaci trojstavový vstup.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

28

- Hradlovacie obvody a budiče
 - ▣ Funkcia budiča/prijímača je definovaná mikrooperáciou v tvare
 - pre režim budiča zbernice

$$\overline{CS}. \overline{DC} B(3 : 0) := I(3 : 0)$$

- pre režim prijímača údajov zo zbernice.

$$\overline{CS}. \overline{DC} B(3 : 0) := I(3 : 0)$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

29

- Prevodníky kódov,
 - ▣ Prevodník (PK) binárnej informácie vo všeobecnosti je funkčný prvok ČP, v ktorom sa uskutočňuje transformácia:

$$f : X \rightarrow Y$$

kde

f - je transformačný vzťah, definujúci typ prevodu binárnej informácie,

X, Y - vstupy (vstupné slová) a výstupy (výstupné slová) prevodníka, ktoré sú definované ako množiny n -tíc hodnôt vstupných premenných $x_1, x_2, \dots, x_n$ a množiny m -tíc hodnôt výstupných premenných $y_1, y_2, \dots, y_m$.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

30

- Prevodníky kódov,
 - ▣ Funkčná schéma prevodníka ľubovoľného typu predstavuje kombinačný obvod, ktorý sa v ČS aktivuje spravidla výberovým signálom CS pôsobiacim na riadiacom vstupe prevodníka.
 - ▣ **Úloha.** Navrhnete PK na realizáciu mikrooperácie prevodu Grayovho kódu na kód BCD.
 - ▣ Všetky nasledujúce obvody na prenos informácií sú zvláštnymi prípadmi všeobecnejšieho obvodu – prevodníka kódov.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

31

□ Kódery a dekódery,

- ▣ Funkčný prvok ČP určený na prevod zložiek kódu „1 z n“ na paralelné m-rádové zložky $n = 2^m$ sa nazýva kodér (KD). Schéma zapojenia kodéra je definovaná booleovskou funkciou v tvare:

$$y_j = \bigvee_{y_j=1} x_i, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m, m \leq \log_2 n$$

kde

y_j - je výstupná premenná, ktorej hodnoty zobrazujú j-ty rád kódovej zložky reprezentovanej binárnou m-ticou Y_k ,
 $k = 1, 2, \dots, n$ na výstupe kodéra,

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

32

□ Kódery a dekódery,

- ▣ Funkčný prvok ČP určený na prevod zložiek kódu „1 z n“ na paralelné m-rádové zložky $n = 2^n$ sa nazýva kodér (KD). Schéma zapojenia kodéra je definovaná booleovskou funkciou v tvare:

$$y_j = \bigvee_{y_j=1} x_i, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m, m \leq \log_2 n$$

kde

x_i - vstupná premenná, ktorej hodnoty zobrazujú i-ty rád kódovej zložky „1 z n“ $X_k, k = 1, 2, \dots, n$ na vstupe kodéra, pre ktoré platí $x_i, y_i \in \{0, 1\}$.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

33

□ Kódery a dekódery,

- ▣ Funkčný prvok ČP určený na prevod zložiek kódu „1 z n “ na paralelné m -rádové zložky $n = 2^n$ sa nazýva kodér (KD). Schéma zapojenia kodéra je definovaná booleovskou funkciou v tvare:

$$y_j = \bigvee_{y_j=1} x_i, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m, m \leq \log_2 n$$

Pretože sa v uvedenom prípade jedná o transformáciu unitárneho kódu „1 z n “, t.j. $x_i = 1$ pre $i = k$ a $x_i = 0$ pre $i = 1, 2, \dots, k - 1, k + 1, \dots, n$ disjunkcia vo vzťahu sa vzťahuje na všetky premenné x_i , ktorým zodpovedá hodnota výstupnej premennej $y_j = 0$.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

34

□ Kódery a dekódery,

- ▣ Úloha. Navrhňte kodér KD ($n \times m$) na prevod n -rádových kódových zložiek ($n = 9$) reprezentovaných vstupným slovom

$$DI = (x_1 x_2 \dots x_9)$$

na m -rádové ($m = 4$) zložky kódu BCD reprezentované výstupným slovom

$$DO = (y_1 y_2 y_3 y_4).$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

35

□ Kódery a dekódery,

- ▣ Funkčný prvok určený na prevod n -rádových kódových zložiek paralelného kódu na kódové zložky unitárneho kódu „1 z 2^n “ sa nazýva dekodér (DK). Kódové zložky sú na vstupe X dekodéra definované n -rádovými slovami:

$$X_i = x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_n} ; i = 0, 1, \dots, 2^n - 1$$

a na výstupe Y dekodéra, 2^n -rádovými slovami:

$$Y_j = y_{j_1} y_{j_2} \dots y_{j_n} ; j = 0, 1, \dots, 2^n - 1$$

medzi ktorými platí transformačný vzťah:

$$Y_j = f_{DK}(X_i)$$

kde f_{DK} je funkcia dekodéra.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

36

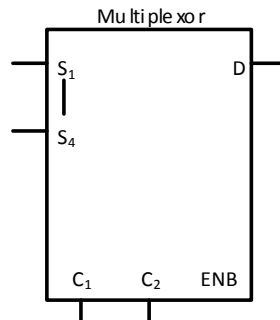
- Kódery a dekodery,
 - ▣ Dekodér s n vstupnými a m výstupnými premennými ($DK (n \times m)$) definovaný vyššie uvedenými vzťahmi sa nazýva **úplný** dekodér.
 - ▣ Dekodér, v ktorom medzi počtom n vstupných a m výstupných premenných platí $m < 2^n - 1$, sa označuje ako dekodér **neúplný**.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

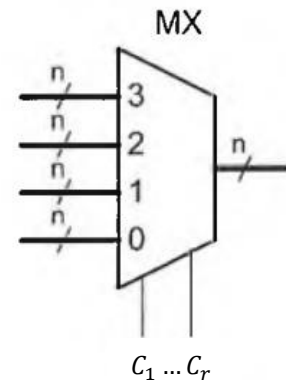
37

□ Multiplexor (MX)

- Je to kombinačný logický obvod, ktorý pracuje ako riadený elektronický prepínač. Podľa kombinácie bitov na adresových vstupoch (na obr. sú to vstupy C_1 a C_2) prepína jeden z N údajových vstupov (na obr. sú to vstupy S_1 až S_4 na jeden údajový výstup (D)).
- Výstupná funkcia obvodu je definovaná zápisom



$$D = S_i$$
$$i = \sum_{j=1}^N C_j 2^{j-1}$$
$$C_j = \{0,1\}$$



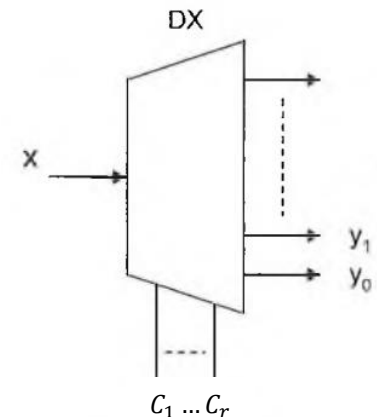
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

38

□ Demultiplexor (DX)

- Je opakom multiplexoru. Má jeden vstupný kanál a niekoľko výstupných kanálov. Podobne, ako v prípade MX, sa distribúcia jednobitového vstupného slova X na jeden z jeho výstupných kanálov uskutočňuje prostredníctvom riadiacich vstupov $C_1, C_2, \dots, C_r$, kde $r = \log_2 n$.
- Výstupná funkcia obvodu je definovaná zápisom

$$y_i = \begin{cases} X & \Leftarrow i = \sum_{j=1}^r C_j 2^{j-1} \\ 0 & \Leftarrow i \neq \sum_{j=1}^r C_j 2^{j-1} \end{cases}$$
$$i = \sum_{j=1}^r C_j 2^{j-1}$$
$$C_j \in \{0,1\}$$



Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

39

□ Obvody na generovanie predikátov

- ▣ Pre riadenie ľubovoľného procesu v ČP je potrebné priebežne získavať rad informácií o stave, priebehu, korektnosti, požiadavkách a výsledkoch kontroly vykonávania tohto procesu.
- ▣ Tieto informácie sú spravidla definované ako predikáty nad obsahmi prvkov a komponentov (funkčné jednotky, registre, zbernice a pod.) ČP.
- ▣ Nosičom informácií je v tomto prípade stavovo-informačná premenná L , ktorá nadobúda jedničkovú hodnotu v prípade, ak predikát (napríklad, výrok nad obsahom registra) je splnený a nulovú hodnotu, ak splnený nie je.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

40

□ Obvody na generovanie predikátov

- ▣ Súvislosť medzi predikátom $\alpha = P(L)$ a stavovo-informačnou premennou L sa interpretuje nasledujúcim vzťahom:

$$P(L) = \begin{cases} 1 \Leftarrow L = 1 \\ 0 \Leftarrow L = 0 \end{cases}$$

Kde

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n): \widetilde{x}_1 \times \widetilde{x}_2 \times \dots \times \widetilde{x}_n \rightarrow \{0,1\}; x_i \in \{0,1\}$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

41

□ Obvody na generovanie predikátov

- Zápis dvojmiestného predikátu:

$$L \mid X * Y$$

- Zápis jednomiestneho predikátu:

$$L \mid f(X)$$

- Napríklad zápis $L \mid X > Y$ definuje podmienky splnenia predikátu:

$$P(L) = \begin{cases} 1 \Leftarrow X > Y \\ 0 \Leftarrow X \leq Y \end{cases}$$

kde $X > Y$ reprezentuje reláciu predikátu „obsah registra X (slova X) je väčší, ako obsah registra Y (slova Y).“

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

42

□ Obvody na generovanie predikátov

- Logické obvody na generovanie predikátov nad obsahmi registrov sa navrhujú ako kombinačné obvody, ktoré realizujú logickú funkciu $f(X)$ pri jednomiestnom predikáte alebo $X * Y$, pri dvojmiestnom predikáte.
- Obvody na generovanie rozličných predikátov nad obsahmi jedných a tých istých registrov sa navrhujú ako funkcie, ktoré sú definované stavovo-informačnými premennými, jednotlivých slov, ktoré majú hodnotu $L = 1$ pre tie n -tice, ktoré vyhovujú príslušnému relačnému znamienku.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

43

- **Obvody na generovanie predikátov**
 - ▣ Komparátor
 - ▣ Generátor parity
 - ▣ Generátor priority

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

44

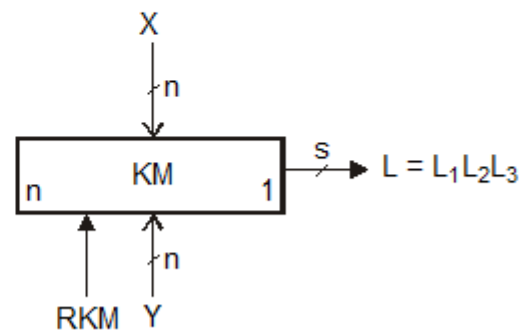
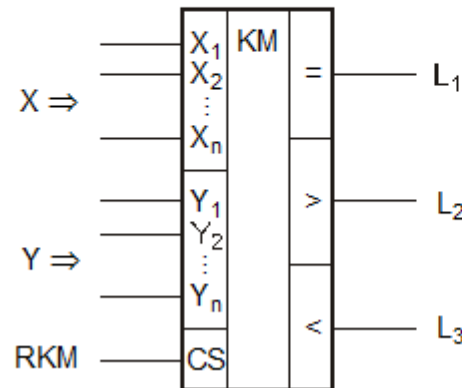
□ Komparátor

- je funkčný prvok ČP určený na vyhodnocovanie relácií „=, ≠, <, >, ≤, ≥“ medzi dvoma hodnotami binárnych slov $X = x_n x_{n-1} \dots x_1 x_0$ a $Y = y_n y_{n-1} \dots y_1 y_0$.

$$L_1 | X = Y$$

$$L_2 | X > Y$$

$$L_3 | X < Y$$



Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

45

□ Generátor parity

- je funkčný prvok komunikačných obvodov ČP určený na zabezpečenie korektného prenosu informácií po prenosovej ceste, resp. na indikáciu nekorektného prenosu.
- Obvodové riešenie GP je založené na kontrole párneho alebo nepárneho počtu jedničiek v binárnom zobrazení slova prenášaného medzi jeho vysielačom a prijímačom.
- Na základe uvedeného generátor parity generuje predikát „dané n-bitové slovo obsahuje párny, resp. nepárny počet jedničiek“.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

46

□ Generátor parity

- ▣ Generátor parity s kontrolou párneho počtu jedničiek

$$L = \begin{cases} 1 & \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n x_i \pmod{2} = 0 \\ 0 & \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n x_i \pmod{2} = 1 \end{cases}$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

47

□ Generátor priority

- Generátor priority je obvod na určenie priority signálov reprezentovaných hodnotami binárnych premenných daného slova podľa vopred zadaných kritérií. Napríklad, umožňuje v danom slove identifikovať rád s najvyššou prioritou.
- V danom prípade gen. priority realizuje predikát „i-ty rád daného slova X obsahuje jedničku s najvyššou váhou“, čo sa formálne vyjadrí v tvare:

$$L_i \mid GPR(X)$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

48

□ Generátor priority

- Obvodové riešenie je odvodené z definovania výstupov L_i príslušného kombinačného obvodu, ktorý analyzuje jednotlivé bity slova $X = x_1x_2 \dots x_{n-1}x_n$ prostredníctvom výrazu:

$$L_i = \begin{cases} x_i & \Leftarrow \bigvee_{j=i+1}^n x_j = 0 \\ 0 & \Leftarrow \bigvee_{j=i+1}^n x_j = 1 \end{cases}$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

49

□ Generátor priority

- Obvodové riešenie je odvodené z definovania výstupov L_i príslušného kombinačného obvodu, ktorý analyzuje jednotlivé bity slova $X = x_1 x_2 \dots x_{n-1} x_n$ prostredníctvom výrazu:

$$L_i = x_i \left(\bigvee_{j=i+1}^n x_j \right) = x_i \bigvee \bigwedge_{j=i+1}^n \bar{x}_j = \bar{x}_i \cdot \bigvee_{j=i+1}^n x_j$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

50

□ Generátor priority

- Analogicky sa navrhuje i generátor priority na vyhl'adanie v danom slove jedničky s najnižšou váhou.

$$L_i = \begin{cases} x_i & \Leftarrow \bigvee_{j=1}^{i-1} x_j = 0 \\ 0 & \Leftarrow \bigvee_{j=1}^{i-1} x_j = 1 \end{cases}$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

51

□ Obvody na realizáciu operácií

- ▣ Sčítačky a akumulátory,
- ▣ Inkrementory a počítadlá,
- ▣ Posúvacie obvody,
- ▣ Obvody logických a špeciálnych operácií (napr. invertor priameho kódu).

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

52

- **Aritmeticko-logická jednotka (ALJ)**
 - ▣ Hlavná funkčná jednotka určená na vykonávanie výpočtových operácií
- **Charakteristické operácie ALJ**
 - ▣ Dvojková (binárna) aritmetika
 - Celočíselná aritmetika – pevná rádová čiarka
 - Aritmetika v pohyblivej rádovej čiarke
 - ▣ Dvojkovo-desiatková aritmetika
 - Desiatkové (BCD) aritmetika
 - Kódy zvyškových tried
 - Pozičné kódy so zápornými váhami
 - ▣ Špeciálna aritmetika
 - Prevody medzi reprezentáciami čísel

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

53

□ Typy sčítačiek

- Polovičná, úplná sčítačka a sčítačka so sériovým prenosom (Ripple carry-adder)
- Sčítačka so zrýchleným prenosom (Carry-look-ahead adder; CLA)
- Sčítačky s blokovým prenosom: Block carry look-ahead adder (BCLA), Ripple block carry look-ahead adder (RCLA)
- Paralelné prefixové sčítačky (Parallel prefix adders: Ladner-Fisher adder, Kogge-Stone adder, Brent-Kung adder, Han-Carlson adder)
- Sčítačka s výberovým prenosom (Carry-select adder; CSA), Sčítačka s tranzitívnym prenosom (Carry-skip adders)
- Sčítačka s podmieneným prenosom (Conditional sum adder), sčítačka s uchovaným prenosom (Carry-save adder),
- Polovičná odčítavačka (Half subtractor), Úplná odčítavačka (Full subtractor) BCD sčítačka, BCD odčítavačka

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

54

□ Sčítačka

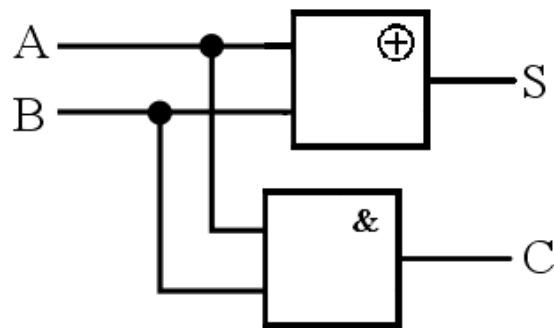
- ▣ kombinačný logický obvod realizujúci sčítanie čísel v dvojkovej binárnej sústave
- ▣ súčasť aritmeticko-logickej jednotky a centrálnej procesorovej jednotky

□ Polovičná sčítačka

- ▣ realizuje sčítanie dvoch jednomiestnych binárnych čísel
 - vstup: dva jednobitové sčítance A, B
 - výstup: jednobitový súčet a jednobitový príznak prenosu do vyššieho rádu (Carry flag)
 - odovzdáva ďalej príznak prenosu, ale sama ho nedokáže spracovať
 - $S = A \oplus B$; $C = AB$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

55

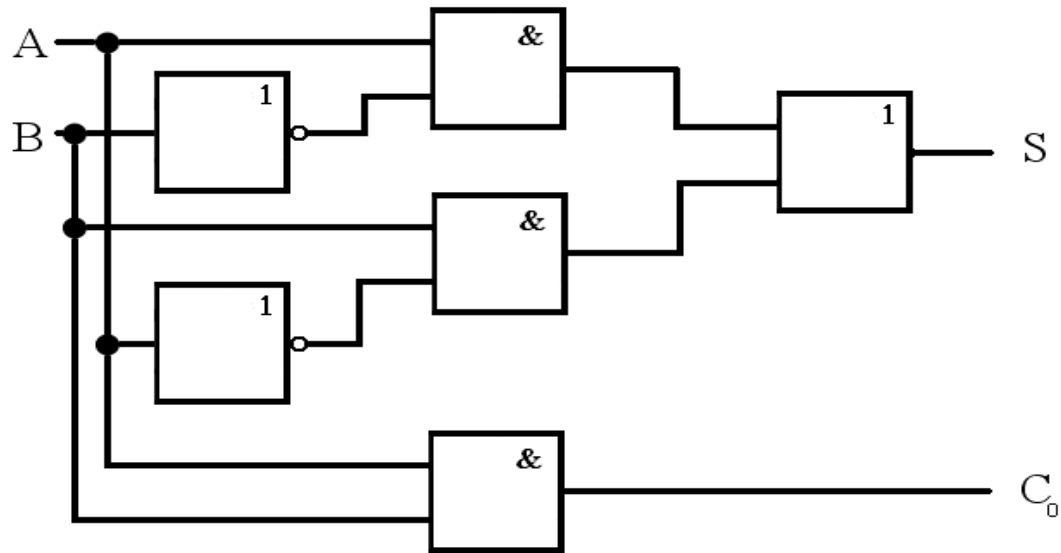


vstup		výstup	
A	B	C	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

Obr. 2.9 Polovičná sčítačka z hradíel XOR a AND a tabuľka pravdivostných hodnôt polovičnej sčítačky

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

56



Obr. 2.10 Polovičná sčítačka z hradiel 2 x NOT, 3 x AND, 1 x OR

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

57

□ Úplná sčítačka

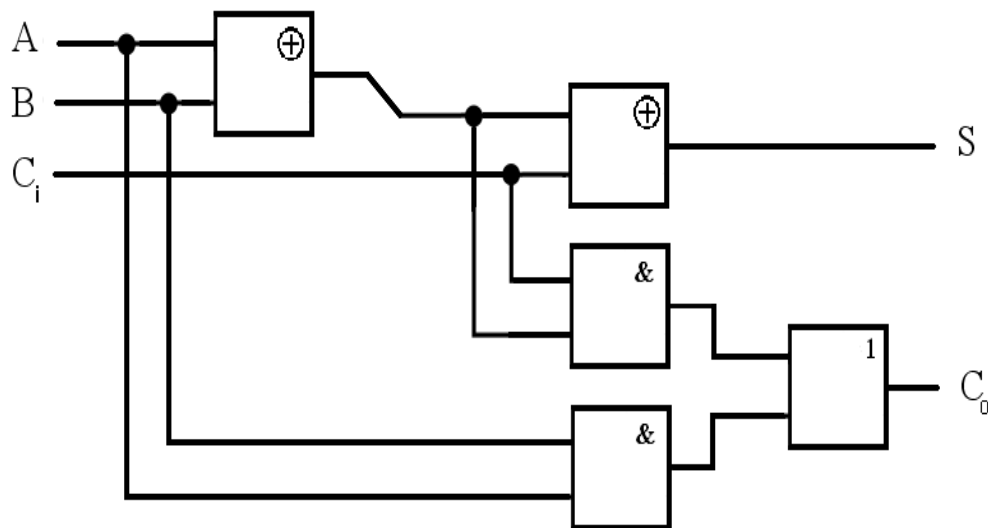
- realizuje sčítanie dvoch jednomiestnych binárnych čísel
- pripočítava prenos z predchádzajúceho rádu
 - vstup: tri jednobitové sčítance A_i, B_i, C_i (Carry-in)
 - výstup: jednobitový súčet a jednobitový príznak prenosu do vyššieho rádu C_{i+1} (Carry-out)

$$Z_i = A_i \oplus B_i \oplus C_i$$

$$C_{i+1} = (A_i \wedge B_i) \vee ((A_i \oplus B_i) \wedge C_i)$$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

58



vstup			výstup	
A	B	C_i	C_o	S
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

Obr. 2.11 Úplná sčítačka z hradiel 2 x XOR, 2 x AND, 1 x OR

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

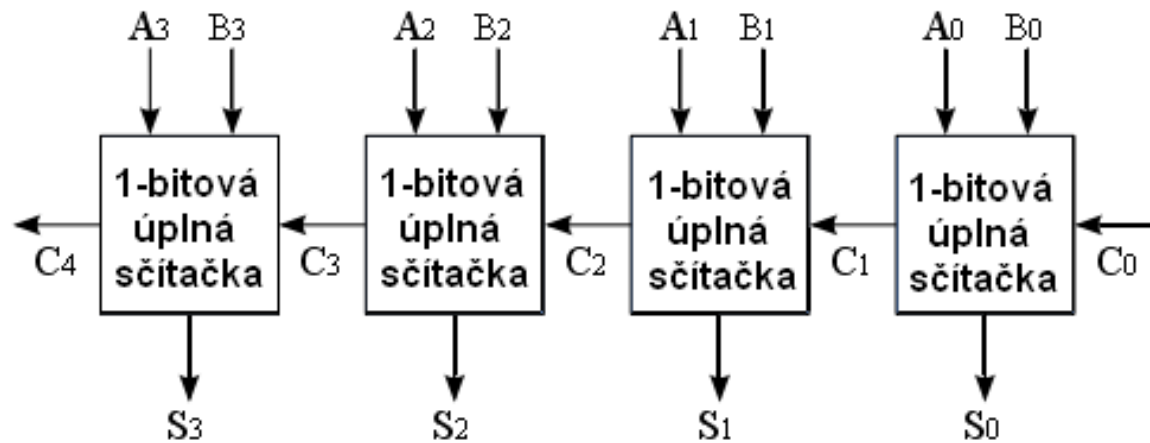
59

□ **Sčítačka so sériovým prenosom (Ripple carry-adder)**

- vznikne zreťazením N úplných jednobitových sčítačiek prepojením výstupu C_i úplnej sčítačky n -tého bitu so vstupom C_{i+1} sčítačky $(n+1)$.
Bitu
 - vstup: dve N -bitové čísla plus prenos z predchádzajúceho rádu
 - výstup: súčet majúci $N+1$ bitov (N bitov + prenos)
 - príznak prenosu sa odovzdáva z jedného bitu do druhého
- teoreticky rozšíriteľná na ľubovoľný počet bitov
- s rastúcou šírkou (počtom zreťazených sčítačiek) narastá celkové oneskorenie obvodu

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačů

60



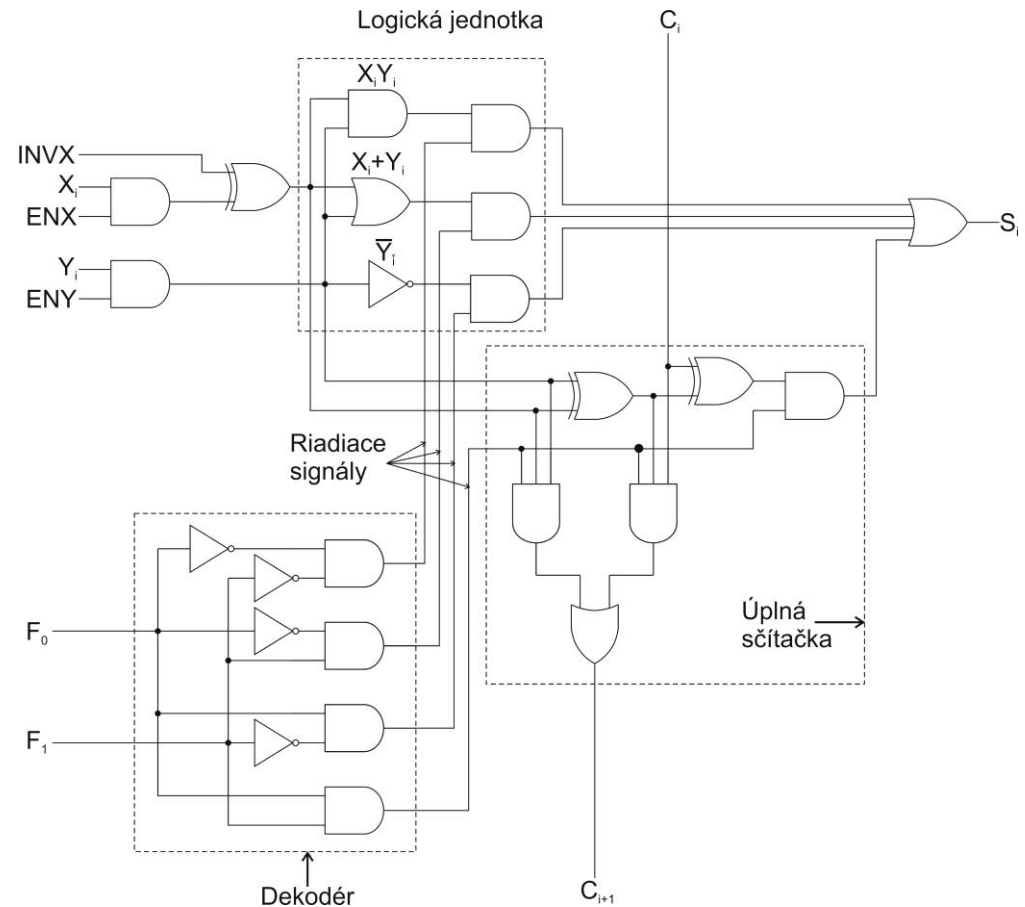
Obr. 2.12 4-bitová sčítačka so sériovým prenosom

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

61

□ 1-bitová ALJ

F_0	F_1	Funkcia
0	0	$S_i = X_i \wedge Y_i$
0	1	$S_i = X_i \vee Y_i$
1	0	$S_i = Y_i$
1	1	$S_i = X_i \oplus Y_i \oplus C_i$ $C_{i+1} = X_i Y_i \vee (X_i \oplus Y_i) C_i$



Obr. 2.13 1-bitová ALJ

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

62

□ Obvody na realizáciu operácií

- ▣ Obvody na vykonávanie operácií nad obsahmi registrov, zberníc a iných funkčných prvkov sú najčastejšie komponentmi operačnej časti procesora ČP
- ▣ Vo všeobecnosti sa tieto operácie rozdeľujú do troch skupín
 - celočíselné aritmetické operácie (sčítanie, odčítanie, násobenie a delenie);
 - logické operácie (logický súčet a súčin, operácie XOR, maskovanie, logické posuvy a pod.);
 - operácie špeciálnej aritmetiky (desiatková aritmetika, aritmetika s pohyblivou rádovou čiarkou, špeciálne funkcie a pod.).

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

63

□ Obvody na pamätanie údajov

- sú určené na ukladanie (pamätanie) údajov v tvare jedno a viacbitových slov
 - preklápacie obvody,
 - registre,
 - pamäte

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

64

- Preklápacie obvody (PO)
 - ▣ sú určené na pamätanie jednobitových slov
 - ▣ jeden alebo viac vstupov $I_1, I_2, \dots, I_n$ (vstupné kanály)
 - ▣ dva navzájom komplementárne výstupy Q a $\overline{Q}$ (výstupné kanály).
 - ▣ pamäťové správanie rôznych typov PO je interpretované spravidla Mooreovým automatom.
 - ▣ astabilné, monostabilné, bistabilné
 - ▣ synchronne vs. asynchronne

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

65

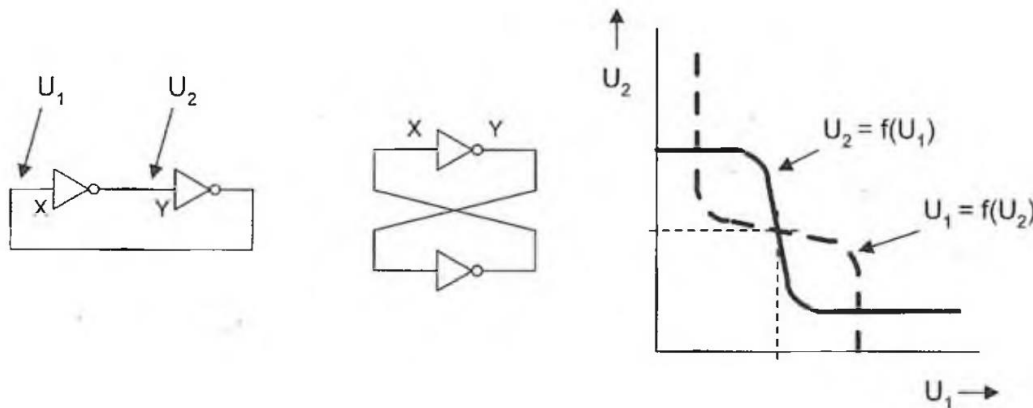
- Podľa typu synchronizácie
 - ▣ Synchronizácia **úrovňou** hodinového signálu (úrovňová alebo hladinová synchronizácia) (Level Triggered Latch)
 - ▣ Synchronizácia **nábežnou hranou** hodinového signálu (Positive edge triggered flip-flop)
 - ▣ Synchronizácia **zostupnou hranou** hodinového signálu (Negative edge triggered flip-flop)

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

66

□ Asynchrónne preklápacie obvody

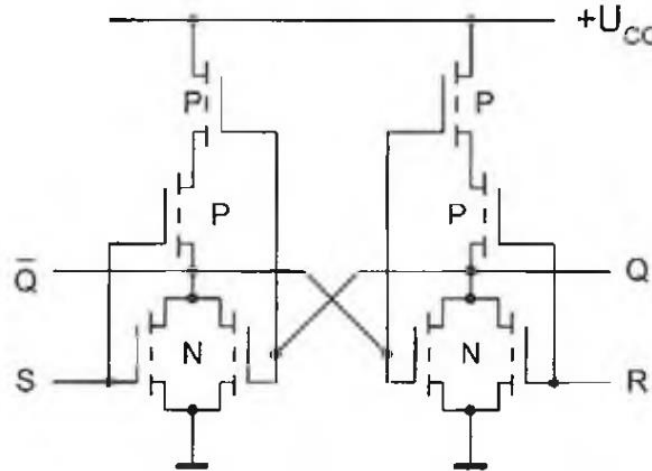
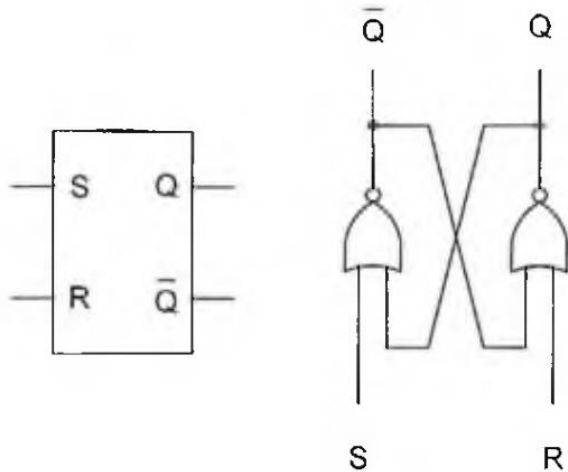
- Najjednoduchšie sekvenčné súčiasty
- Reagujú na zmenu vstupných signálov okamžite
- Preklápací obvod vznikne spojením dvoch negujúcich log. členov do okruhu. Takto je vytvorená spätnoväzobná slučka s celkovým fázovým posunom 360° , t.j. ide o kladnú spätnú väzbu.
 - Obvod sa nazýva bistabilný



Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

67

- Asynchrónne preklápacie obvody
 - ▣ RS preklápací obvod z NOR



S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	Q	$\bar{Q}$
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

68

□ Asynchrónne preklápacie obvody

▣ RS preklápací obvod, IEEE Std. 91-1984

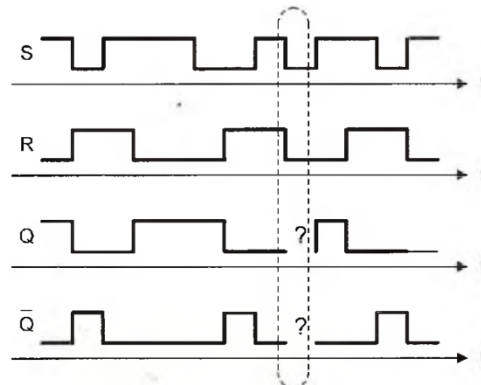
- Prvý riadok : pamäťová vlastnosť PO
- Druhý riadok: nulovanie výstupu Q
- Tretí riadok: nastavenie výstupu Q
- Štvrtý riadok : zakázaná kombinácia / zakázaný stav
- Zakázaný prechod

z $R = S = 1$ do $R = S = 0$

- Tieto prechody sú povolené:

z $R = S = 1$ do $R = 1, S = 0$

z $R = S = 1$ do $R = 0, S = 1$

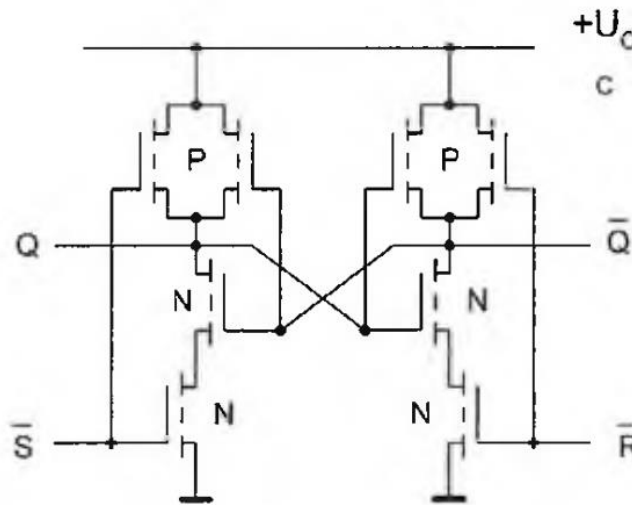
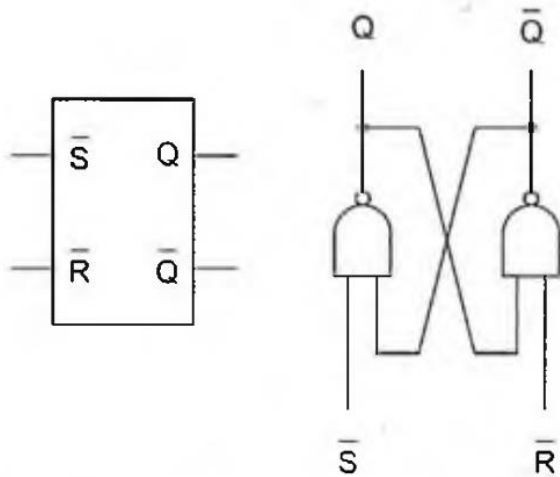


S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	Q	$\bar{Q}$
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

69

- Asynchrónne preklápacie obvody
 - ▣ RS preklápací obvod z NAND

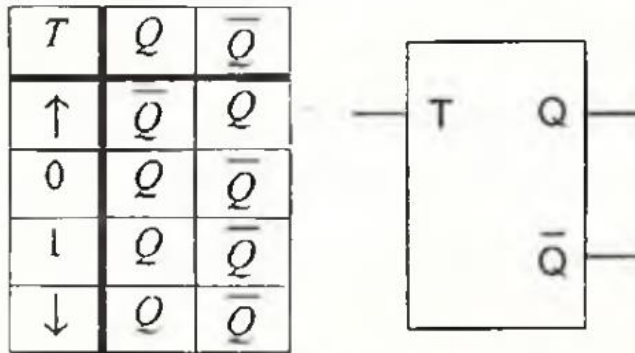


$\bar{S}$	$\bar{R}$	Q	$\bar{Q}$
0	0	1	1
1	0	0	1
0	1	1	0
1	1	Q	$\bar{Q}$

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

70

- Asynchrónne preklápacie obvody
 - ▣ T preklápací obvod



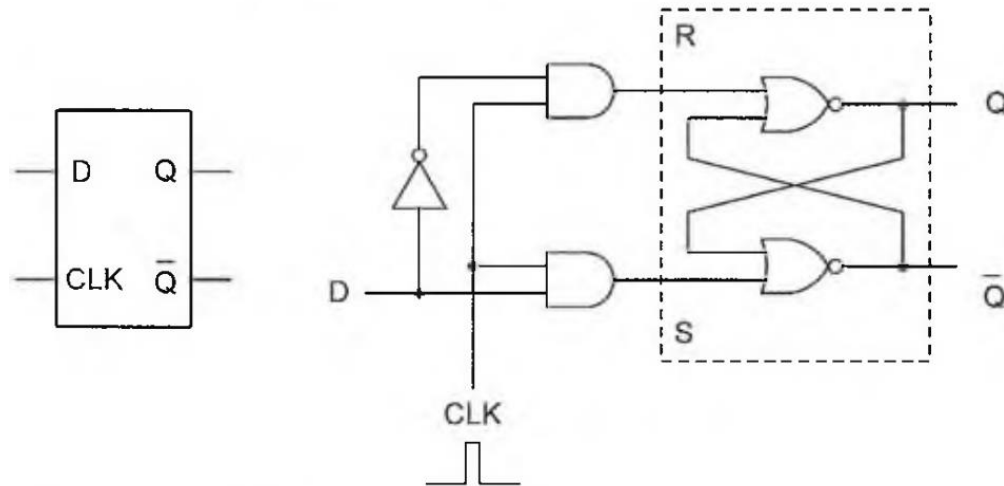
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

71

□ Synchronne preklápacie obvody

▣ Obvod D

- Mení stav na základe zmeny stavu na vstupe (D) a synchronizačného, resp. hodinového impulzu (CLK).
- Úrovňou riadený PO:



D	CLK	Q	$\overline{Q}$
0	1	0	1
1	1	1	0
-	0	Q	$\overline{Q}$

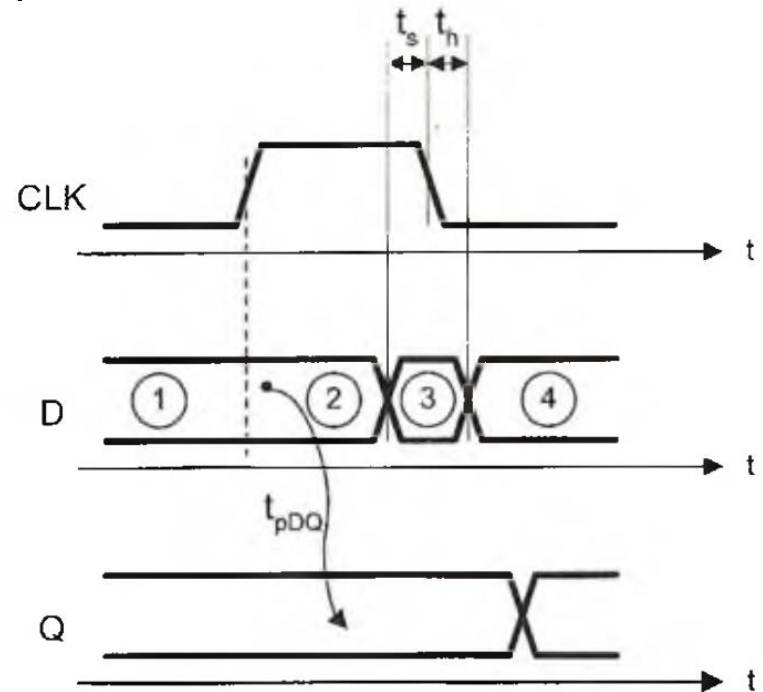
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

72

□ Synchronne preklápacie obvody

▣ Úroveň riadený PO (angl. latch)

- Po dobu trvania hodinového impulzu je obvod voľne priechodný (transparentný) pre vstupný signál
- Po ukončení hodinového impulzu zostáva posledný stav na výstupe zachovaný.
- Vstupný signál sa nesmie meniť v oblasti dobežnej hrany hodinového impulzu.



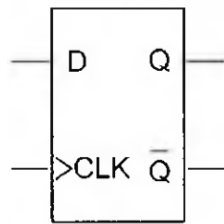
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

73

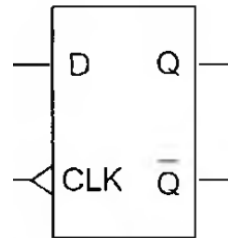
□ Synchronné preklápacie obvody

▣ Obvod D

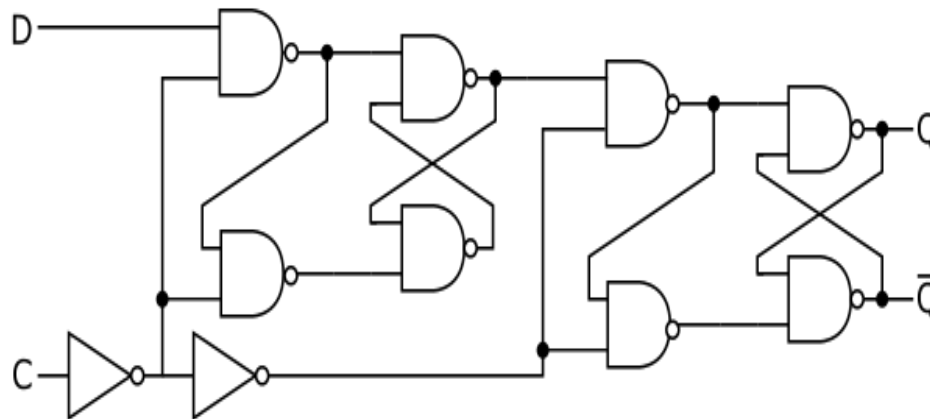
■ Hranou riadený PO D



riadené nábežnou hranou



riadené dobežnou hranou



D	CLK	Q	$\bar{Q}$
0	$\uparrow$	0	1
1	$\uparrow$	1	0
-	0	Q	$\bar{Q}$
-	1	Q	$\bar{Q}$
-	$\downarrow$	Q	$\bar{Q}$

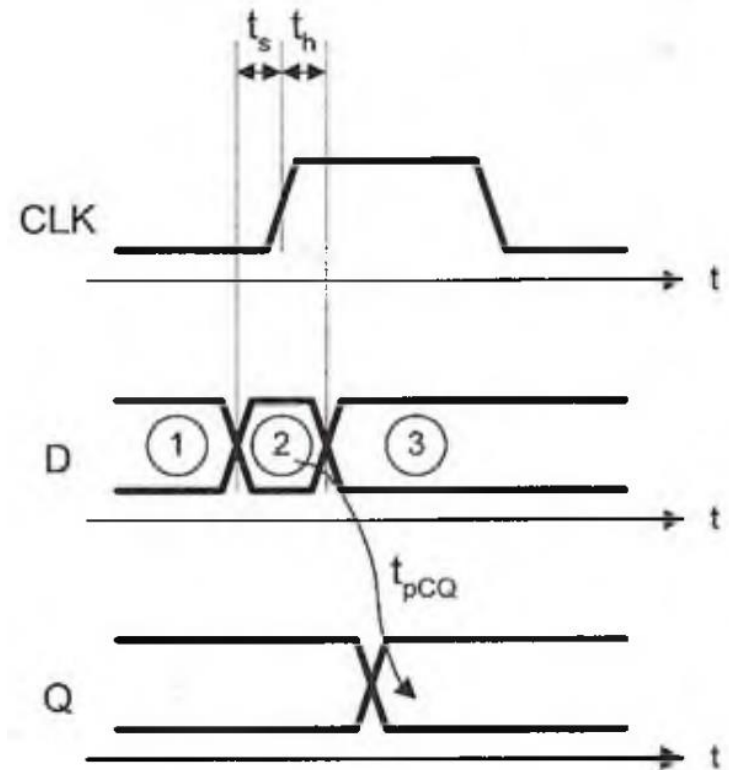
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

74

□ Synchronne preklápacie obvody

▣ Hranou riadený PO D

- Zmeny na vstupe v oblastiach 1 a 3 sa na výstupe neprejavajú.
- Stav na vstupe v oblasti 2 sa preniesie na výstup s oneskorením t_{pCQ} po nábežnej hrane CLK.
- Stav na vstupe sa nesmie meniť po dobu od t_s po t_h od nábežnej hrany CLK, inak môže byť vyvolaný metastabilný stav.



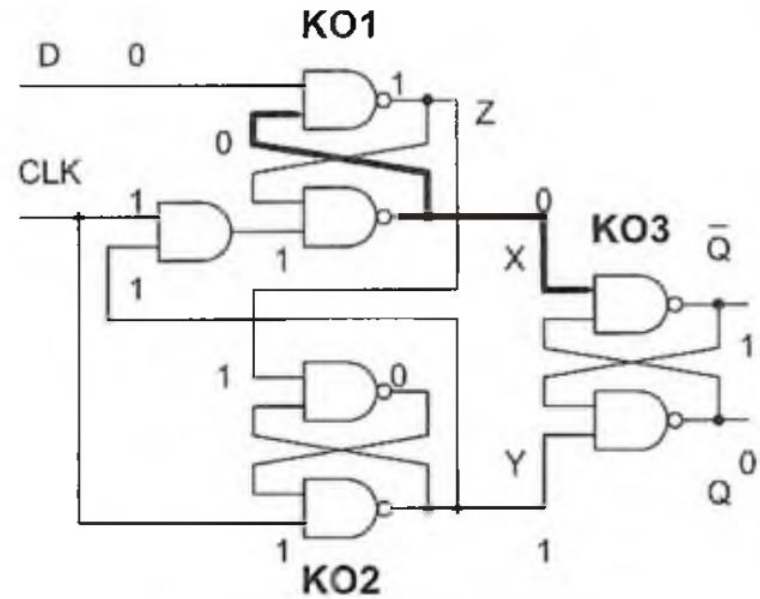
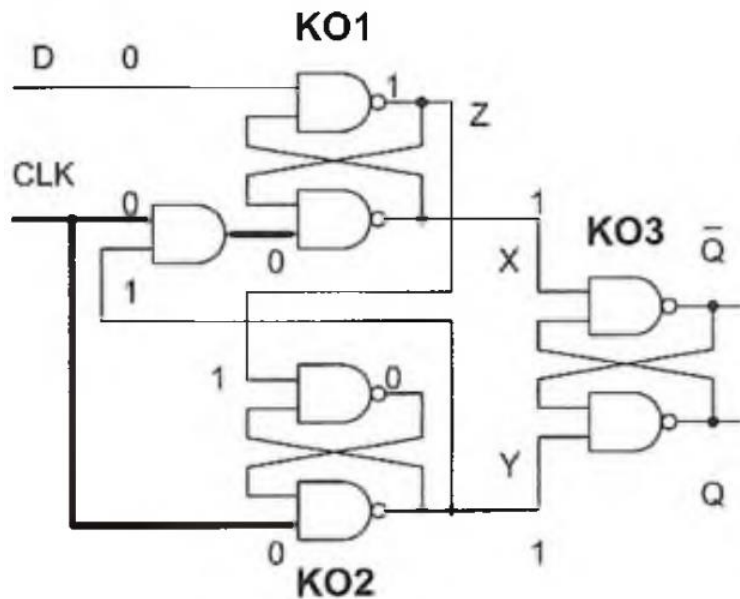
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

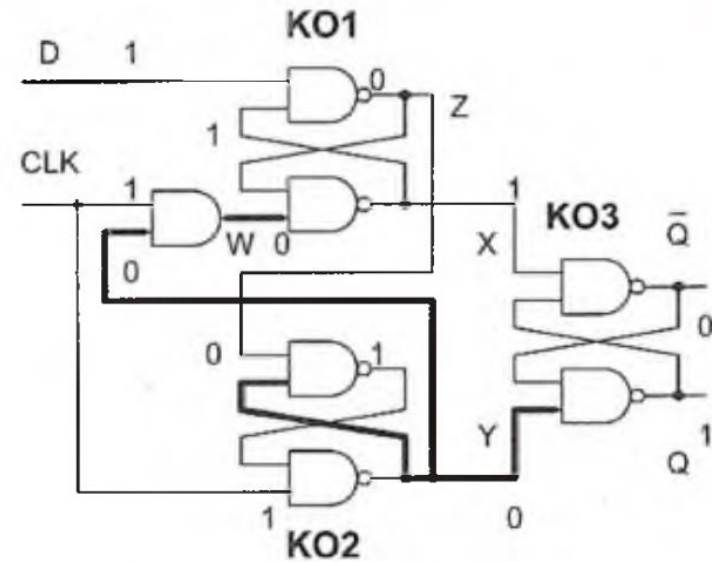
75

□ Synchronne preklápacie obvody

▣ Hranou riadený PO D

- Je podstatne zložitejší než hladinou riadený PO D.
- Hrubé čiary ukazujú signály, ktoré hrajú dominantnú úlohu.





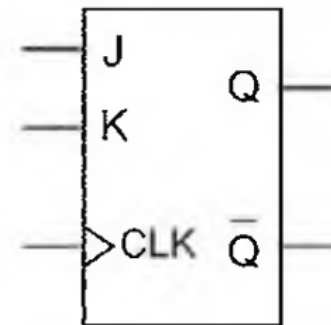
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

77

□ Synchronné preklápacie obvody

▣ Hranou riadený PO JK

J	K	CLK	Q	$\overline{Q}$
0	0	$\uparrow$	Q	$\overline{Q}$
1	0	$\uparrow$	1	0
0	1	$\uparrow$	0	1
1	1	$\uparrow$	$\overline{Q}$	Q
-	-	0	Q	$\overline{Q}$
-	-	$\downarrow$	Q	$\overline{Q}$
-	-	1	Q	$\overline{Q}$



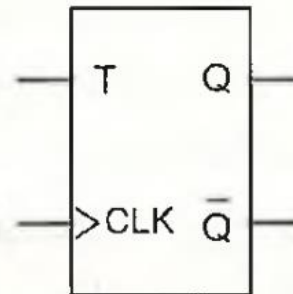
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

78

□ Synchronne preklápacie obvody

▣ Preklápací obvod typu T (PO T)

T	CLK	Q	$\overline{Q}$
0	$\uparrow$	Q	$\overline{Q}$
1	$\uparrow$	$\overline{Q}$	Q
-	0	Q	$\overline{Q}$
-	1	Q	$\overline{Q}$
-	$\downarrow$	Q	$\overline{Q}$



Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

79

□ Synchronne preklápacie obvody

▣ Hranou riadené PO

- Pre správnu činnosť PO je nutné dodržať niektoré dynamické parametre vstupných signálov:
 - doba predstihu,
 - doba presahu,
 - minimálna strmosť hrany hodinového impulzu,
 - minimálna doba jeho trvania
- Nedodržanie niektorých z týchto podmienok môže vyvolať metastabilný stav, kedy výsledné preklopenie je náhodné.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

80

□ Synchronne preklápacie obvody

▣ Základné vlastnosti hranou riadeného PO

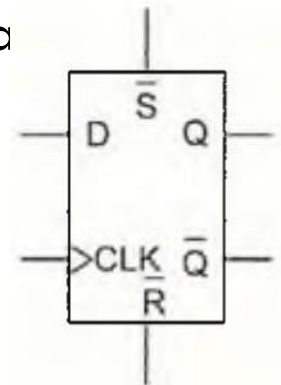
- Rozhodujúci je stav na vstupoch v tesnom okolí nábežnej hrany hodinového impulzu.
- V iných okamžikoch sú zmeny na vstupoch bezvýznamné.
- Nevhodné časovanie hodinových impulzov a vstupných signálov môže vyvolať metastabilný stav.
- Metastabilný stav má za následok nespoľahlivú funkciu preklápacieho obvodu. PO sa môže rozkmitať, alebo sa môže preklopiť do nesprávneho stavu, alebo sa môže preklopiť do správneho stavu s veľkým oneskorením. Dobu oneskorenia nie je možné predvídať.

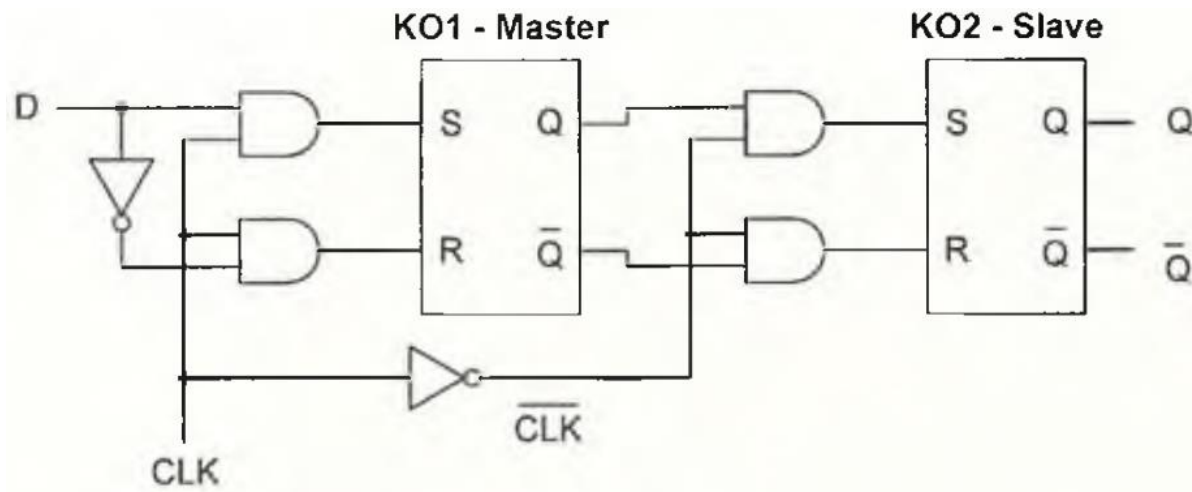
Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

81

□ Nulovanie a nastavenie PO

- Niektoré PO D, T a JK majú okrem vstupov CLK, D, T, J a K aj asynchrónne vstupy **nulovania** a **nastavenia** výstupu.
- Sú účinné vždy bez ohľadu na ostatné vstupy.
- Vstup nulovania, ktorým je vynútený stav $Q = 0$, je označovaný ako $\bar{R}$ (reset) alebo $\overline{CLK}$ (clear) aktívny v stave 0.
- Vstup nastavenia, ktorým je vynútený stav $Q = 1$, je označovaný ako $\bar{S}$ (set) alebo $\overline{PRE}$ (preset) aktívny v stave 0.
- Súčasné vyvolanie nulovania a nastavenia môže viesť na nedefinovaný stav PO.



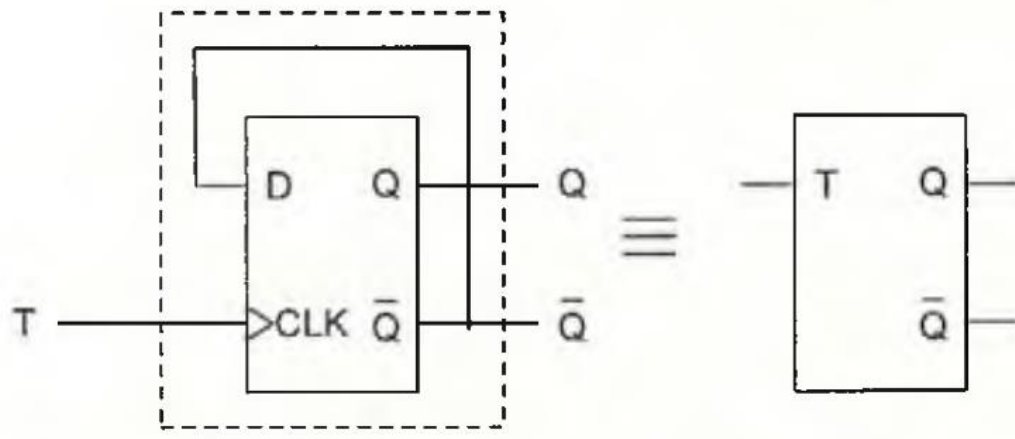


Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

83

□ Transformácia preklápacieho obvodu

- Synchronný PO D riadený hranou na asynchrónny PO T

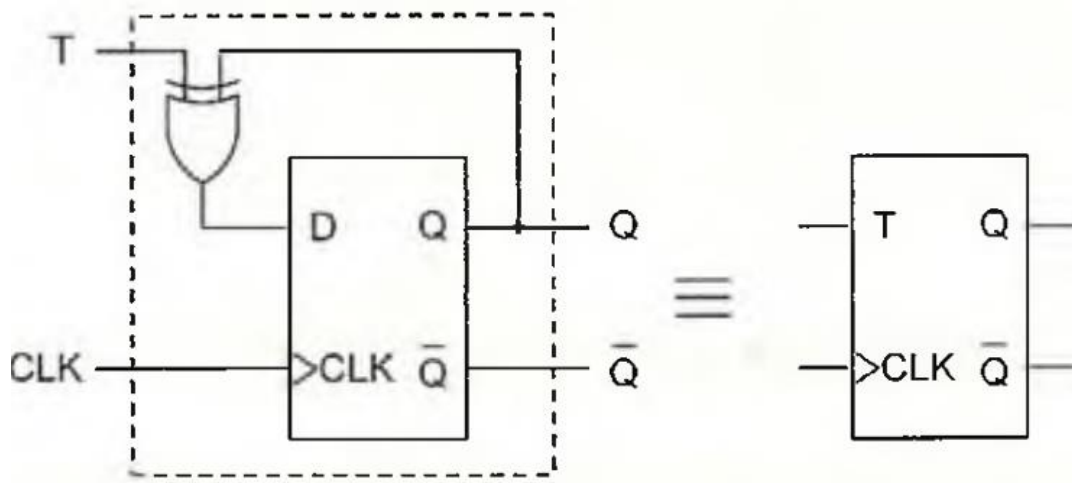


Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

84

□ Transformácia preklápacieho obvodu

- Synchronný PO D riadený hranou na synchronný PO T

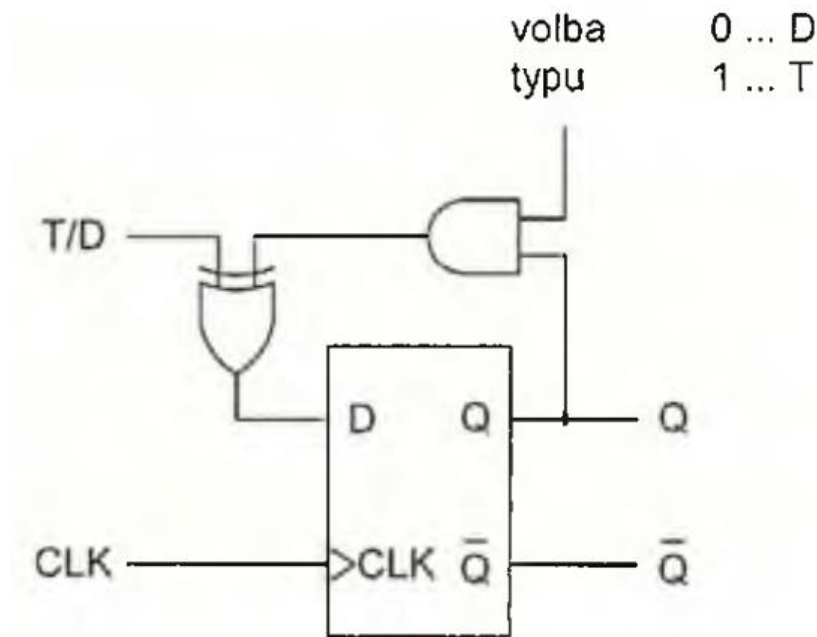


Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

85

□ Transformácia preklápacieho obvodu

▣ Univerzálny D/T PO

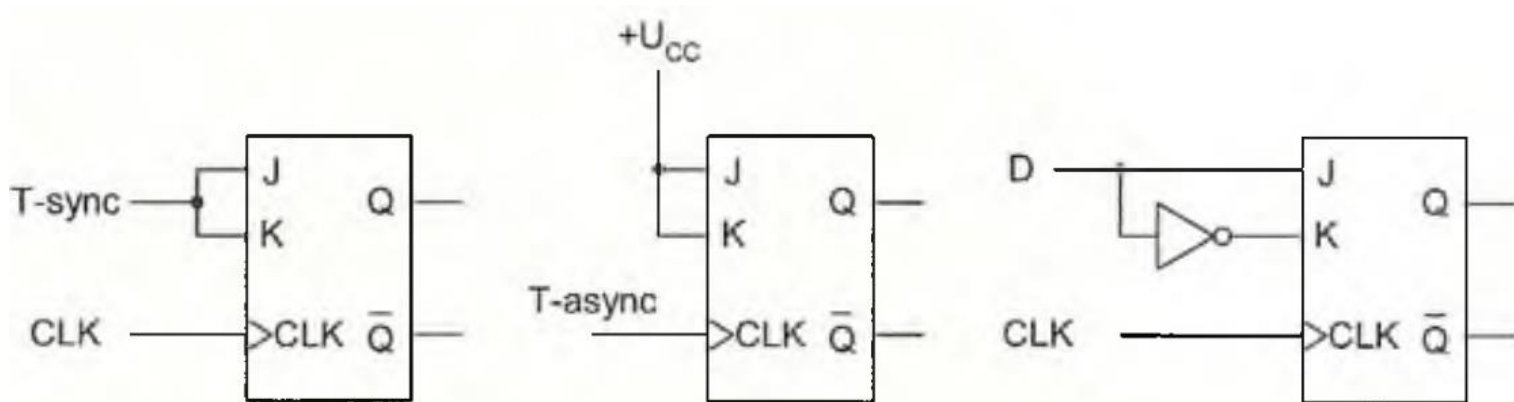


Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

86

Transformácia preklápacieho obvodu

- Transformácia PO JK na synchronný PO T, asynchronný PO T a synchronný PO D.

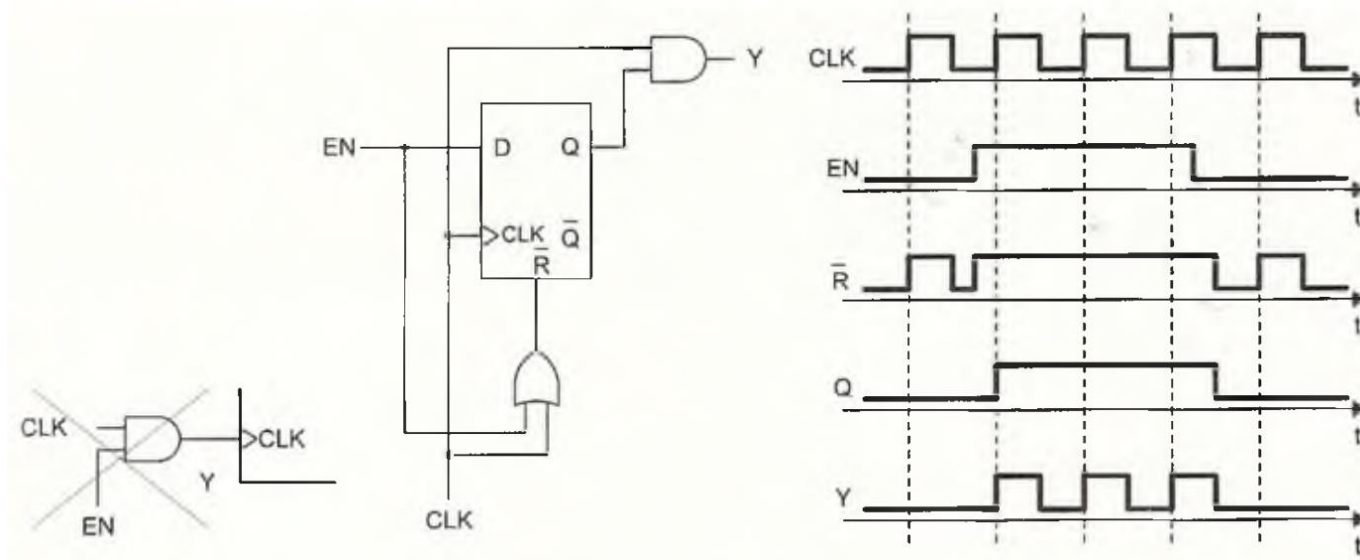


Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

87

□ Blokovanie preklápacieho obvodu

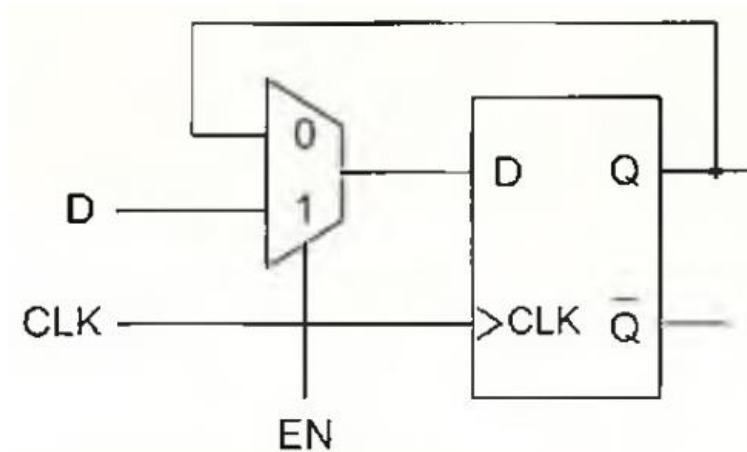
- Pre spoľahlivú činnosť PO je bezpodmienečne nutné dodržať podmienky správneho časovania vstupných signálov vzhľadom na hodinové impulzy.
- Často je potrebné hodinové impulzy prepúšťať alebo blokovať.
- Synchronný spínač impulzov



Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

88

□ Blokovanie preklápacieho obvodu



Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

89

Mikrooperácie:

ZS) $Q := DI$

CT) $DO := Q$

NL) $Q := 0$

kde

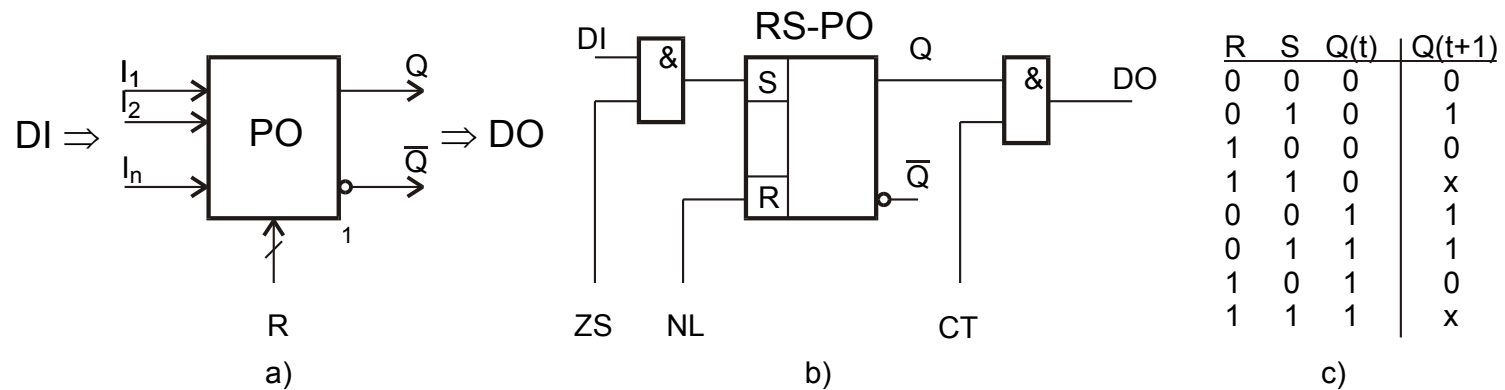
ZS – je zápis do PO, resp. RD – Read,

CT – čítanie z PO, resp. WT – Write,

NL – nulovanie PO, resp. RESET.

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

90



Obr. 2.7 a – všeobecné označenie,
b – riadený zápis v asynchrónnom PO typu RS,
c – tabuľka prechodov v RS-PO

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

91

□ Registre

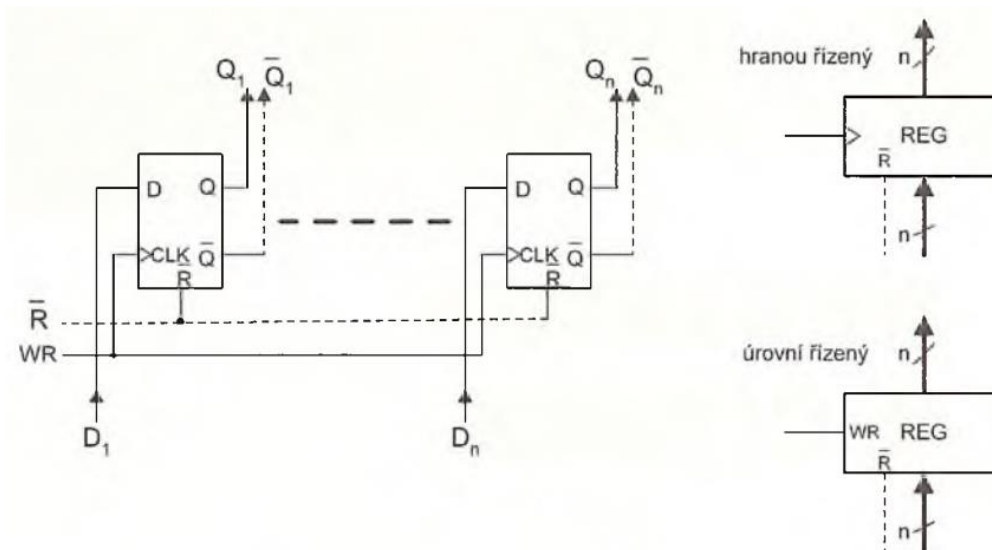
- ▣ je usporiadaný súbor preklápacích obvodov (PO)
- ▣ je určený na zápis a pamätanie slov binárnych informácií
- ▣ **pamäťový** register vs. registrov **všeobecného použitia**
- ▣ označenie registra
 - **ak** $X [n-1 : 0]$, resp. $X [n-1 .. 0]$, **potom** $RGX [n-1 : 0]$, resp. $RGX [n-1 .. 0]$, alebo RGX

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

92

□ Dátový register

- Je usporiadaný súbor PO D
- Spoločný rozvod hodinových impulzov, prípadne aj spoločné nulopvanie a nastavenie.
- Hladinou riadený dátový register = súbor hladinou riadených PO D
- Hranou riadený dátový register = súbor hranou riadených PO D

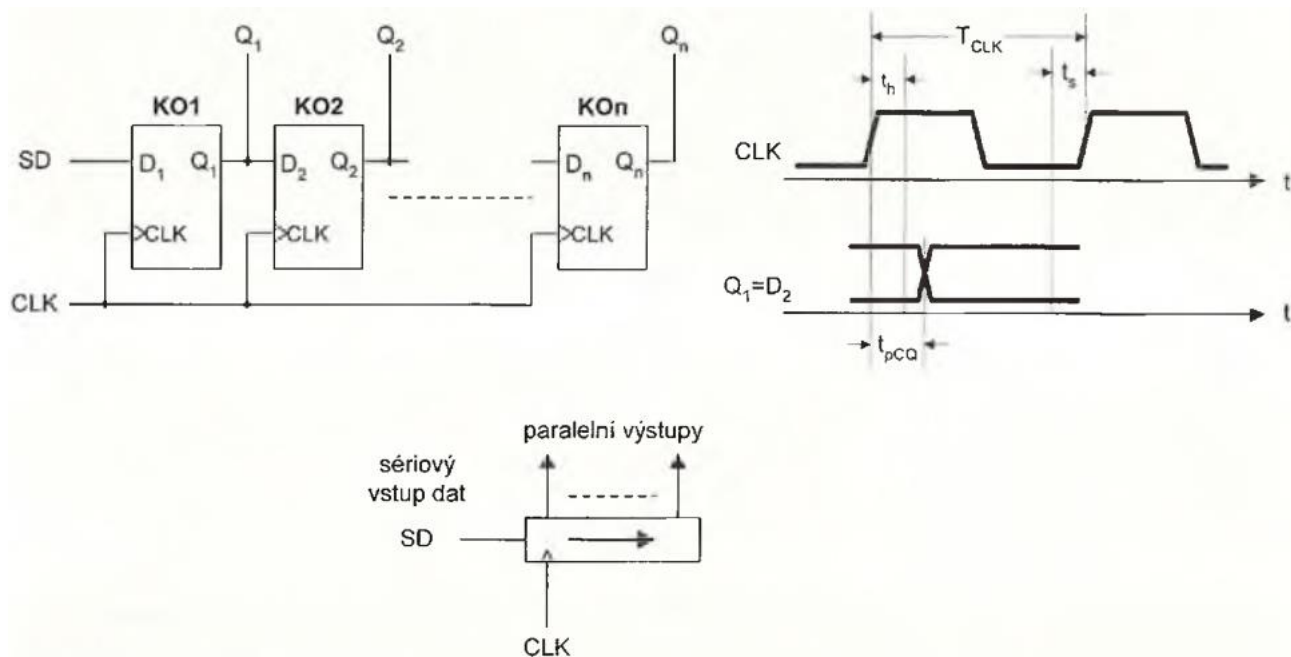


Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

93

□ Posuvný register

- ▣ Kaskádne zapojenie PO D so spoločným rozvodom hodinových impulzov.



Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

94

Mikrooperácie:

ZS) $RGX := X$

zápis slova X

NL) $\overline{RGX} := 0$

nulovanie registra RGX

NS) $\overline{RGX} := 5$

nastavenie registra RGX na dekadickú hodnotu slova $X = (5)_{10} = (101)_2$

CT) $DO := RGX$

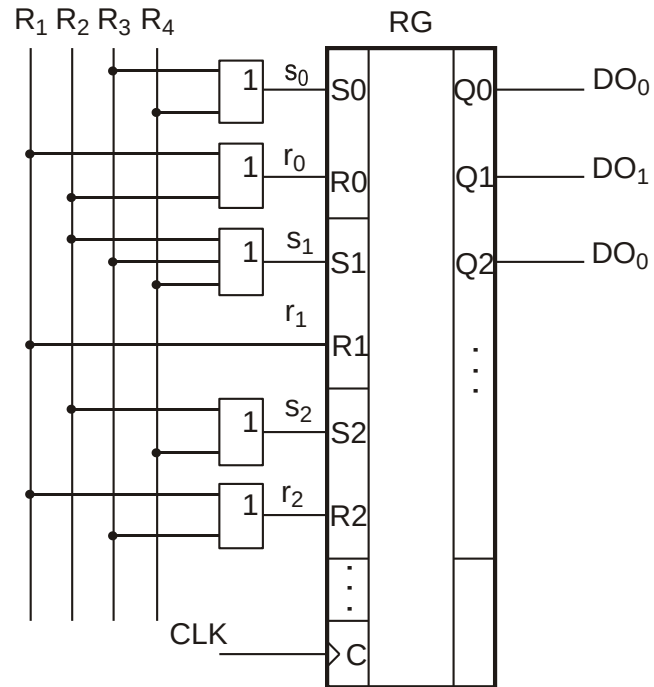
čítanie obsahu RG do výstupného kanálu DO v priamom kóde

NCT) $DO := \overline{RGX}$

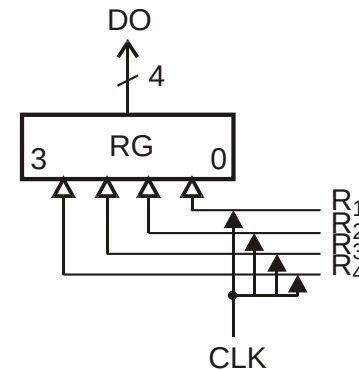
čítanie obsahu RG do výstupného kanálu DO v obrátenom (inverznom) kóde (resp. NCT) $DO := \overline{RGX}$)

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

95



a)



b)

Obr. 2.8 Obvodové riešenie vstupnej logiky registra na vykonanie mikro-operácií zápisu konštánt (a – schéma, b – symbolické označenie).

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

96

□ Pamäte

- ▣ na zapamätanie polí binárnych reťazcov
- ▣ funkcia pamäte v operačnej časti ČS
 - statická pamäť typu RAM (**R**andom **A**ccess **M**emory)
 - dynamická pamäť typu DRAM (**D**ynamic **R**AM)
- ▣ funkcia pamäte v riadiacej časti ČS
 - statická pamäť typu ROM (**R**ead **O**nly **M**emory)
 - jednorázovo programovateľná pamäť typu PROM (**P**rogrammable **R**OM),
 - preprogramovateľná pamäť typu EPROM (**E**rasable **P**ROM),
 - RWM (**R**ead **W**rite **M**emory)

Téma 2. Stavebné prvky číslicových počítačov

97

Mikrooperácie:

CS . ZS) PM [ADR] := DI

CS . CT) DO := PM [ADR]

kde

ADR – je adresa pamäťovej bunky, do ktorej sa slovo zapíše zo vstupného kanála DI, resp. z ktorej sa slovo číta do výstupného kanála DO,

CS – aktivácia (výber) čipu (CS – Chip Select),
v danom prípade pamäťového čipu.