

# Low power design

## Hardware – kde se energie ztrácí?

**Parazitní kapacity** (interní (hradla, spoje) i externí (vodiče))

$$E_{cap} = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad (\text{nabíjení par.kapacit})$$

uvnitř IC par.kapacity navíc mírně rostou s napětím (růst velikosti hradel)

## Short circuit current

Spínání komplementárních tranzistorů

## Leakage (static)

závěrný proud diodami – výrazně se také mění se s teplotou  
(vyšší teplota, vyšší svod)

tranzistor subthreshold leakage - zvyšuje se se snižujícím napájením

nanostructure leakage

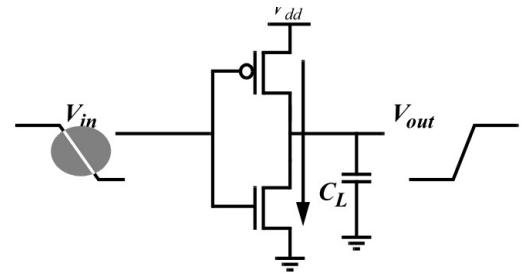
## Makrostruktury (>=IC):

W/MHz

Pull-up/down

neošetřené vstupy

LDO, spínané zdroje



# IC structure – low power design

## Gate size

Různé možnosti velikosti gate uvnitř hradla ovlivňuje kapacitu/spotřebu

## Pin swapping

U multivstupových hradel se do vstupu s nejnižší kapacitou přivede signál s nejčastějšími změnami

## Low-power vs Hi speed

Nižší rychlost obvodu – možnost snížit napájení (nebo ztráty jsou úměrné  $U^2$ )

## Multi-Vdd design

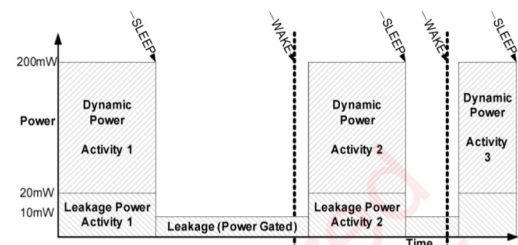
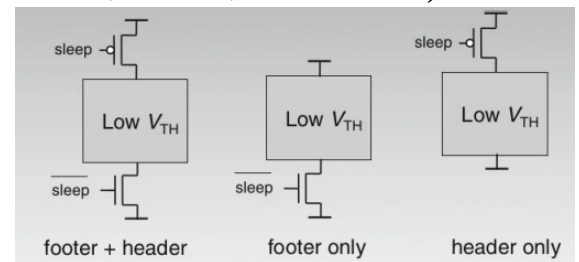
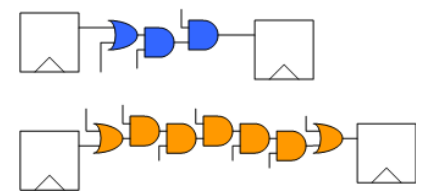
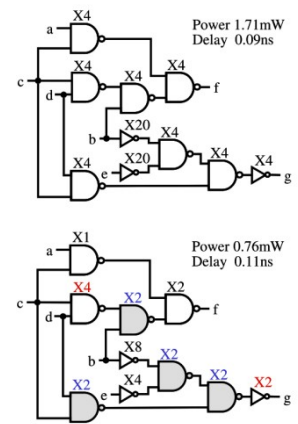
Dvě cesty, do stejného bodu - modrá kratší (a tedy zbytečně rychlejší) a tedy adekvátní na snížení rychlosti (snížení Vdd) - reálně samořejmě problematickejší (routování různých Vdd, Level-shiftery).

Obvykle volí návrháři na úrovni log.funkčních bloků (např. Cache 1.2V, CPU 1V, Periférie 0.9V).

## Power-Gating

Odepínání napájení funkčním blokům které jsou aktuálně nepotřebné.

Je nutno zvážit že obvykle je během sleepu nutno uchovat nějaké informace + uchování a obnovení informací nějakou dobu trvá.

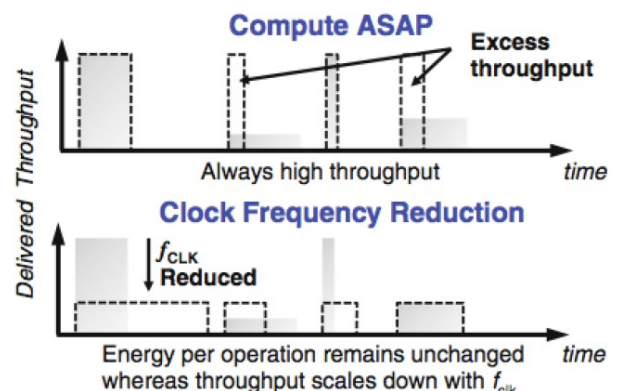


## Dynamická změna napájení a frekvence

Zátěž nemusí být v čase konstantní (např. typický graf.karty – rozptýl až několika řádů)

snížení frekvence – redukce okamžité spotřeby ale celková energie se nemění (jen redukce peak power)

snížení frekvence a napájení – redukce celkové energie

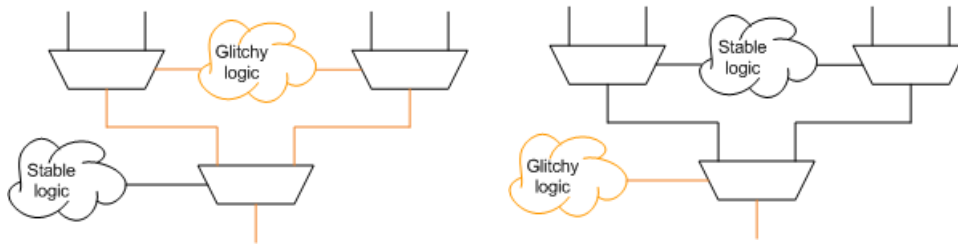


# Architektura, Algoritmy – low power design

## Optimalizace na spotřebu

- užití jiného algoritmu(!) - např. sériová sčítačka vs RCA
- strukturální změny, změny v kódování, oddělení jednotlivých částí
- vycházíme ze statistické analýzy obvodu (statická, dynamická), simulace

**Strukturální změny** - pomalé (méně, pomalu se překlápějící) první, rychlé (či více či rychleji překlápějící) nakonec.



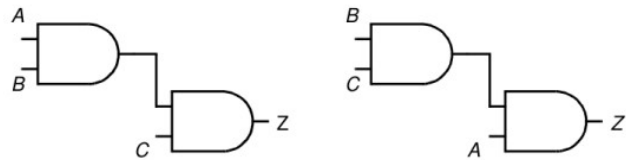
Příklad:  $((A \& B) \& C)$  vs  $(B \& C) \& A$  - pokud bude např. často překlápějící se A změna se šíří 2 úrovněmi, je lépe signál A dát až do druhé úrovně.

Pro  $P(A=1)=0.5$ ,  $P(B=1)=0.2$ ,  $P(C=1)=0.1$  pak

(aktivita pinu za 1.hradlem):

$$P1 = (1-0.5*0.2) (0.5*0.2) = 0.09$$

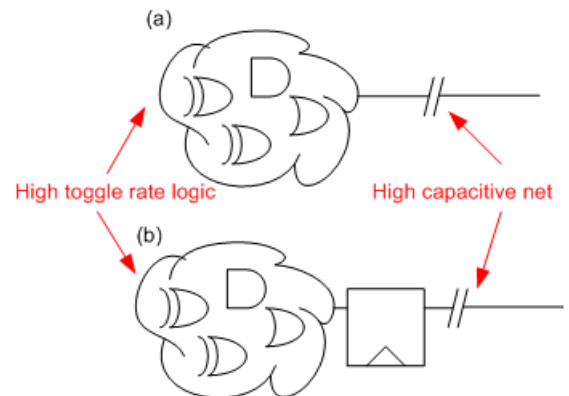
$$P2 = (1-0.2*0.1) (0.2*0.1) = 0.0196$$



## Oddělení „kapacitních“ spojů

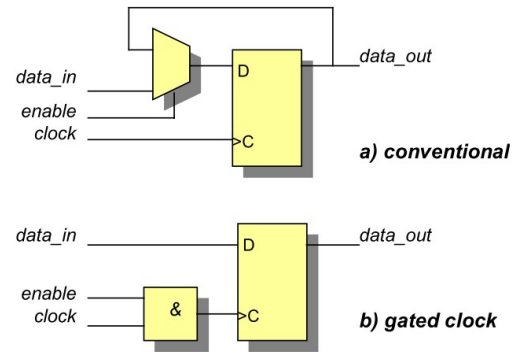
Hazardy v logice typicky způsobí více než jednu změnu než se výstup ustálí → oddělení výstupu komb.logiky do ustálení

**Pipeline** – oddělení čistí, výpočet změny provádá jen část, zbytek šetří energii



## Clock gating

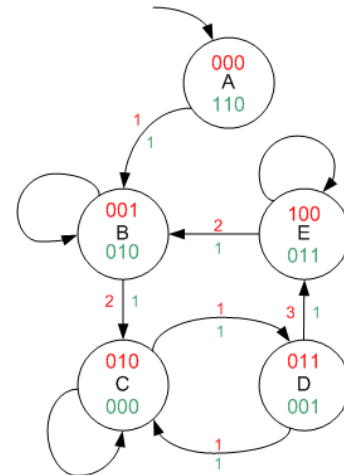
odepínání hodin z nepotřebných klopných obvodů.



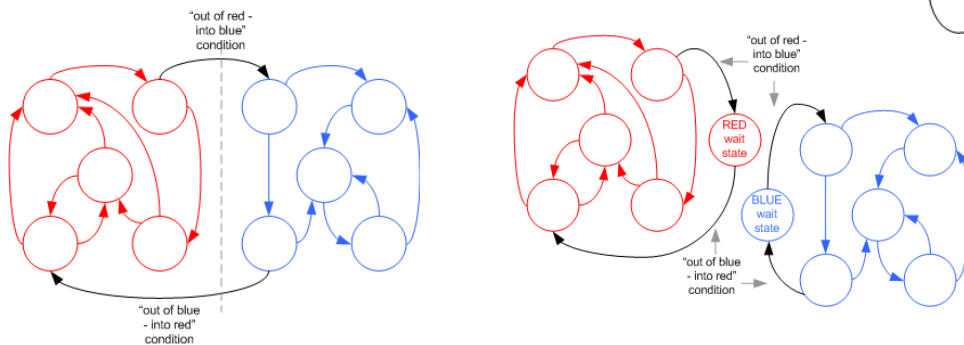
## Stavové automaty - kódování stavů

červeně je původní (náhodně zvolené) kódování, zeleně pak optimální – jen změna jednoho bitu (jednak se méně překlápí KO ale hlavně komb.logika před).

Do úvah je také vhodné zahrnout p-podobnosti přechodů.



## Stavové automaty - oddělení



## **Software/Hardware (mikrokontrolery, procesory)**

**Sleep režimy** (terminologie je různá)

- HALT – odpojení hodin
- SNOOZE – odpojení hodin a napájení funkčních bloků, paměťové členy zapnuty
- SHUTDOWN – odpojení hodin, napájení funkčním i paměťovým členům, cache napájeny
- HIBERNATE - odpojení hodin i napájení.

**Zdroje hodin (procesoru, mikrokontroleru)**

- krystal/interní osc., HS/LS/PLL, spotřeba, náběh

**Low power SW**

- interrupt driven, DMA
- rychle a s velkým odběrem vs pomalu s malým odběrem

**Operating systems**

- Power management
- Energy shedulling

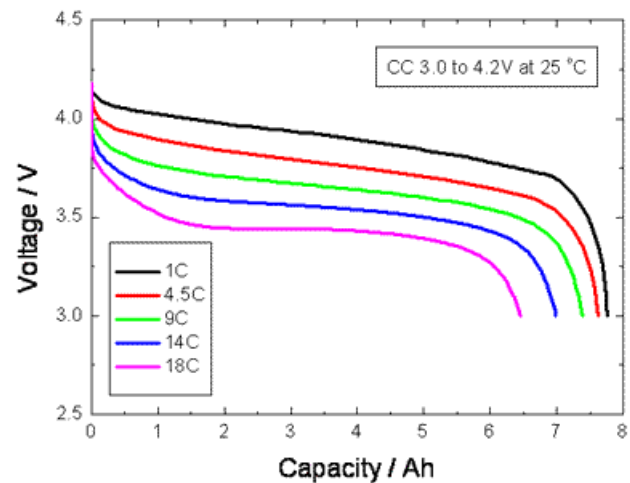
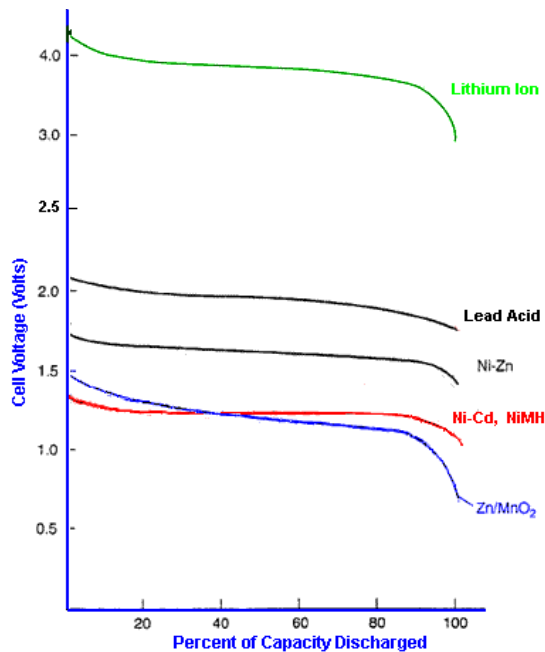
# Zdroje energie

Statické parametry – Kapacita, Napětí, proud, kapacita/kg

- Primární články, akumulátory, kondenzátory

Dynamické parametry – počet cyklů, rteplota, spičky ve spotřebě

	Napětí	Nabíjení	Vybíjení	Životnost	Hustota energie [Wh/kg]	Op. parametry	Pozn.
Kondezátor	[V]-[100V]	[ps]-[ms]	[ps]-[ms] lin./exp. vybíjení	>100k cyklů	<0.05	-20-100°C	
SuperCap	[V]	[ms]-[s]	[ms]-[s]	>100k cyklů	<5	-40-80°C	
Lead-Acid (olověné)	2V	2.4 / 2.25V pomalé [hr]	1.75V 5C / 0.2C	~250 cyklů	50	-20-50°C	
NiCd	1.2	<0°C velmi opatrně	1C / 20C plochá křivka	~1000 cyklů	80	-20-65°C	
NiMh	1.2	< 0°C velmi opatrně	0.5C / 10C	~500 cyklů	120	-20-65°C	
Li-ion	3.6,3.7	4.2V < 0°C nelze	10C / 30C	~1000 cyklů	200	-20-60°C	
Lithiové (primární)	3V typ. (ale i 1.5V)	-	-	-	300	-30-60°C	CR2032
Alkaline (primární)	1.5V	-	-	-	100	-20-55°C	



**Table 1: Characteristics of commonly used rechargeable batteries.** The figures are based on average ratings of commercial batteries at time of

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion <sup>1</sup>		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
Specific energy (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
Internal resistance	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
Cycle life <sup>2</sup> (80% DoD)	200–300	1,000 <sup>3</sup>	300–500 <sup>3</sup>	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
Charge time <sup>4</sup>	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
Overcharge tolerance	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
Self-discharge/month (room temp)	5%	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
Cell voltage (nominal)	2V	1.2V <sup>6</sup>	1.2V <sup>6</sup>	3.6V <sup>7</sup>	3.7V <sup>7</sup>	3.2–3.3V
Charge cutoff voltage (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
Discharge cutoff voltage (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
Peak load current Best result	5C <sup>8</sup> 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
Charge temperature	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C <sup>9</sup> (32 to 113°F)		
Discharge temperature	–20 to 50°C (–4 to °F)	–20 to 65°C (–4 to 49°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
Maintenance requirement	3–6 months <sup>10</sup> (topping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
Safety requirements	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory <sup>11</sup>		
In use since	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
Toxicity	Very high	Very high	Low	Low		
Coulombic efficiency <sup>12</sup>	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
Cost	Low	Moderate		High <sup>13</sup>		

publication. Specialty batteries with above-average ratings are excluded.

1. Combining cobalt, nickel, manganese and aluminum raises energy density up to 250Wh/kg.
2. Cycle life is based on the depth of discharge (DoD). Shallow DoD prolongs cycle life.
3. Cycle life is based on battery receiving regular maintenance to prevent [memory](#).
4. Ultra-fast charge batteries are made for a special pupose. (See [BU-401a: Fast and Ultra-fast Chargers](#))
5. [Self-discharge](#) is highest immediately after charge. NiCd loses 10% in the first 24 hours, then declines to 10% every 30 days. High temperature and age increase self-discharge.
6. 1.25V is traditional; 1.20V is more common. (See [BU-303: Confusion with Voltages](#)).
7. Manufacturers may rate voltage higher because of low internal resistance (marketing).
8. Capable of high current pulses; needs time to recuperate.
9. Do not charge Li-ion below freezing. (See [BU-410: Charging at High and Low Temperatures.](#))
10. Maintenance may be in the form of equalizing or topping charge\* to prevent sulfation.
11. Protection circuit cuts off below about 2.20V and above 4.30V on most Li-ion; different voltage settings apply for lithium-iron-phosphate.
12. Coulombic efficiency is higher with quicker charge (in part due to self-discharge error).
13. Li-ion may have lower cost-per-cycle than lead acid.

# Ultra low power design with microcontroller

- Může systém běžet desetiletí s knoflíkové (CR2032) baterie. Výrobci procesorů uvádějí ze ano. Ale ... je tu pár háčků

## Chemie Baterie

Výrobci baterií negarantují životnost >10let (!)

Typická CR2032 má cca >200mAh. Ale

- vybíjecí proud – není příliš velký (20mA). S větším proudem klesá dosažitelná kapacita

- Odpor zdroje – se snižující kapacitou se zvyšuje, tj. Snižuje se max.proud

## Sleep Current procesoru má omezený vliv

spotřeba za 1 rok (běh 20mA):

Sleep ratio \ sleep current	10uA	1uA	0.1uA	0.01uA
99% (600ms/min běh)	1752+86.7	1752+8.67	1752+0.867	1752+0.0867
99.9% (60ms/min run)	175.2+87.5	175.2+8.75	175.2+0.875	175.2+0.0875
99.99% (6ms/min run)	17.52+87.6	17.52+8.76	17.52+0.876	17.52+0.0876
99.999% (0.6ms/min run)	1.752+87.6	1.752+8.76	1.752+0.876	1.752+0.0876

v tab. Je spotřeba běhu+sleepu v mAh za rok.

Zelené jsou případy kdy zvládne běžet cca 10let

→ do cca 2.5uA sleep current nelze dosáhnout desetiletou životnost

→ pod 99.99% spánku nelze dosáhnout desetiletou životnost - důraz na krátký běh

## Sleep current procesoru se mění s teplotou

Teplota	20	60	80	125	
Sleep Current	0.01	0.05	1	10	

## Leaks (ztráty)

Blokovací kondenzátory – tantal napr. 20UF – 20uA

proč je dávat – předepisuje výrobce procesoru – tedy je nutný pečlivý výběr.

Také pozor že leak kondenzátoru je fčí teploty

## Potřeba většího proudu

T.Mainzer, CPA



CR2032 dá desítky mA – ale často je špičkově třeba více (RF obvody (bluetooth), běh procesoru) – Přidat kapacitor pro překlenutí.

Pokud uvažujeme časy 1ms-10ms, proudy 10-30mA potřebujeme kondenzátor stovky a tisíce [uF] -> máme problém ze ztrátami a nebo (použijeme-li extra kvalitní komponenty) s cenou a velikostí.

### **Rychlý běh**

Spotřeba procesorů je typicky  $I = I_0 + dI \cdot f$  (základ + lineární fce s frekvencí)

Tedy je vhodnější je pustit co nejrychleji a pak zase rychle uspat – energeticky je to výhodnější. Ale:

- je-li omezen proud zdroje (CR2032) je lepší běžet pomaleji
- je-li algoritmus dán např. dobou reakce čidla pak je třeba se přizpůsobit – běh/sunutí/běh/ vs pomalý běh může být nevýhodné (start oscilátoru)

### **Watchdog and Brown-out periférie**

Brown-out obvod hlídá podpětí procesoru. Ale:

- obvyklá specifikace je “široká“ (např. 2.05-2.35V) v případě že chceme jít na limit možností procesoru (2V)
- spotřeba brown-out periférie nebývá zanedbatelná (třeba 1uA)

Watch-dog hlídá běh programu jestli se „nezacyklil“ nebo „neztratil“. Ale

- spotřeba watchdog periférie nebývá zanedbatelná (třeba 1uA, často uváděná jen jako typická)
- často je vhodnější použít externí specializované obvody

### **Ochrana proti přepólování napájení**

- Dioda není vhodná ;-)- úbytek na diodě a ten je ještě fci teploty a proudu
- mechanická ochrana (uživatel nemůže vložit opačně) nebo FET-diodou

