

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

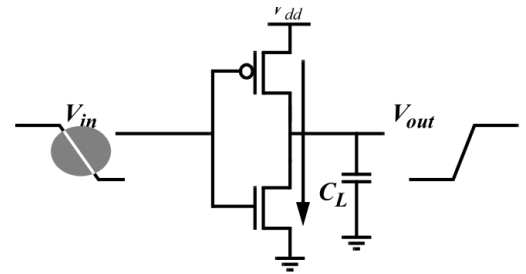
Makrostruktury (\geq IC):

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

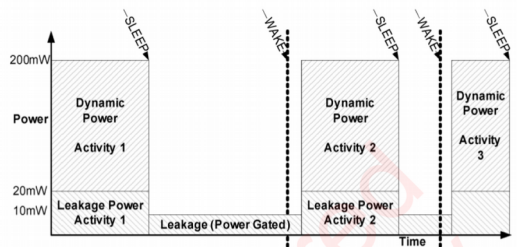
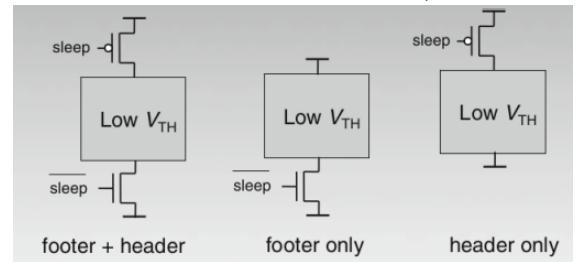
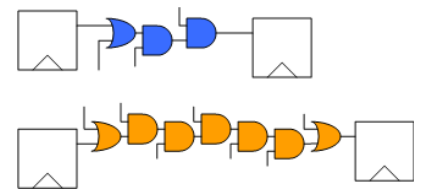
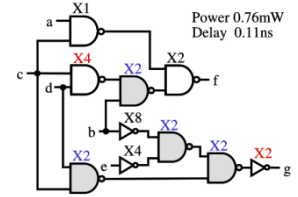
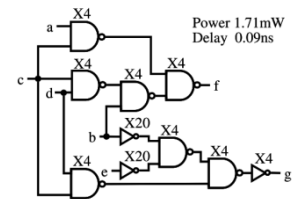
Dvě cesty, do stejného bodu - modrá kratší (a tedy zbytečně rychlejší) a tedy adepta na snížení rychlosti (snížení Vdd) - reálně samořejmě problematickejší (routování různých Vdd, Level-shiftery).

Obvykle volí návrhář 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.

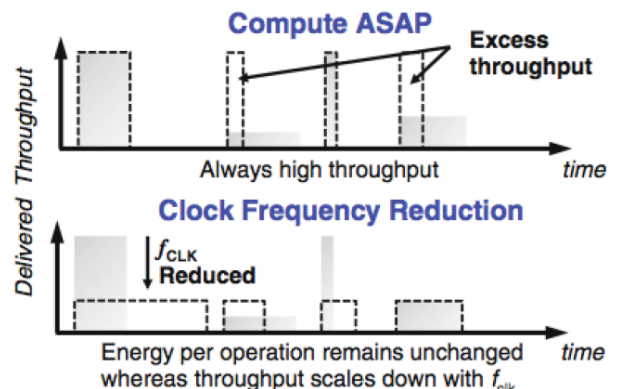


Dynamická změna napájení a frekvence

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

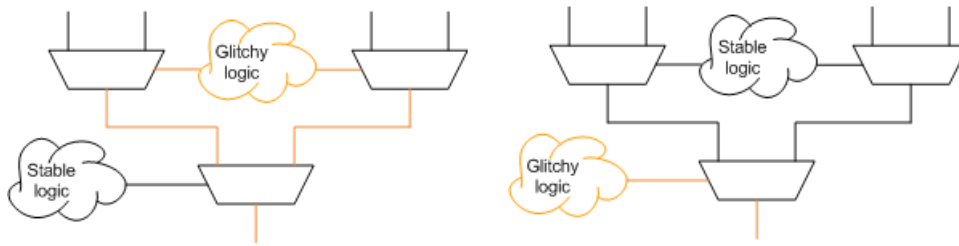


Architektura, Algoritmy – low power design

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.



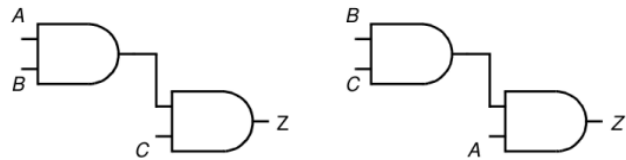
Příklad: $((A \& B) \& C)$ vs $(B \& C) \& A$ - pokud bude např. často překlápějící se A změna se šíří 2 úrovněmi, je lépe signál A dát až do druhé úrovně.

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

(aktivita pinu za 1.hradlem):

$$P1 = (1-0.5 \cdot 0.2) (0.5 \cdot 0.2) = 0.09$$

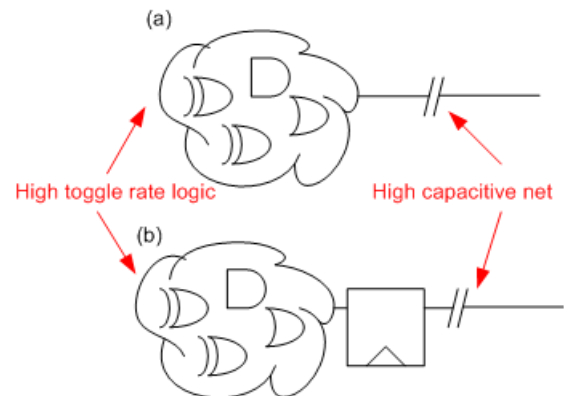
$$P2 = (1-0.2 \cdot 0.1) (0.2 \cdot 0.1) = 0.0196$$



Oddělení „kapacitních“ spojů

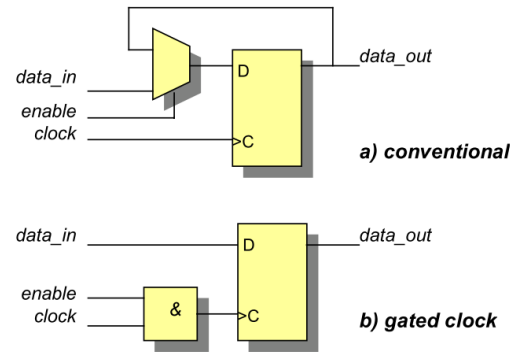
Hazardy v logice typicky způsobí více než jednu změnu než se výstup ustálí → oddělení výstupu komb.logiky do ustálení

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



Clock gating

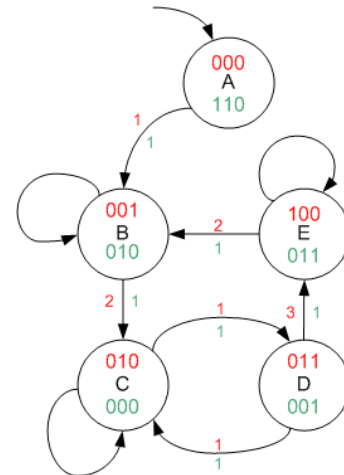
odepínání hodin z nepotřebných klopných obvodů.



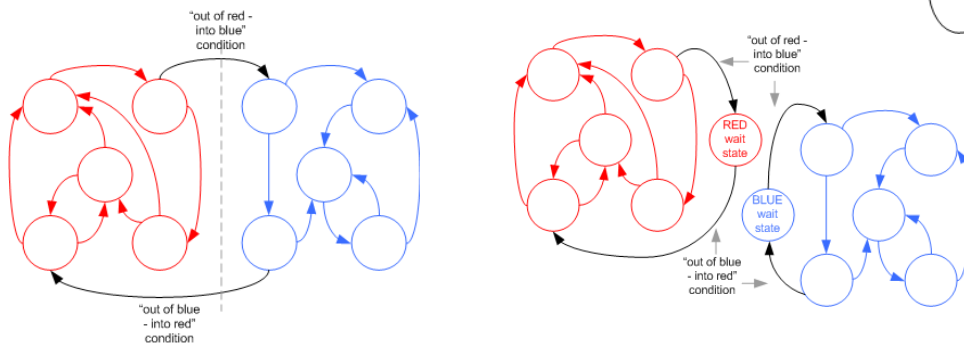
Stavové automaty - kódování stavů

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 | |

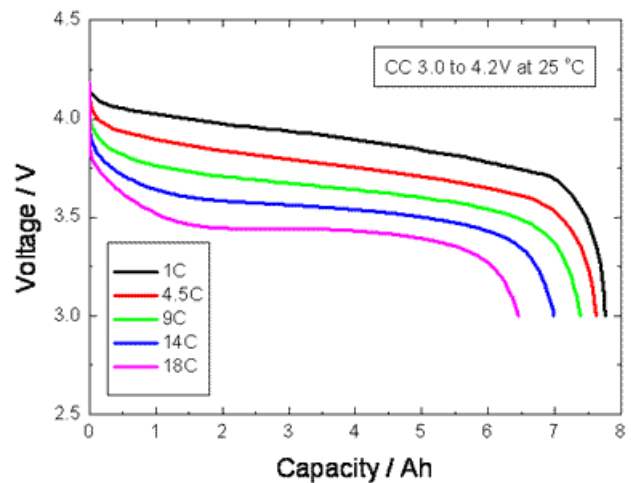
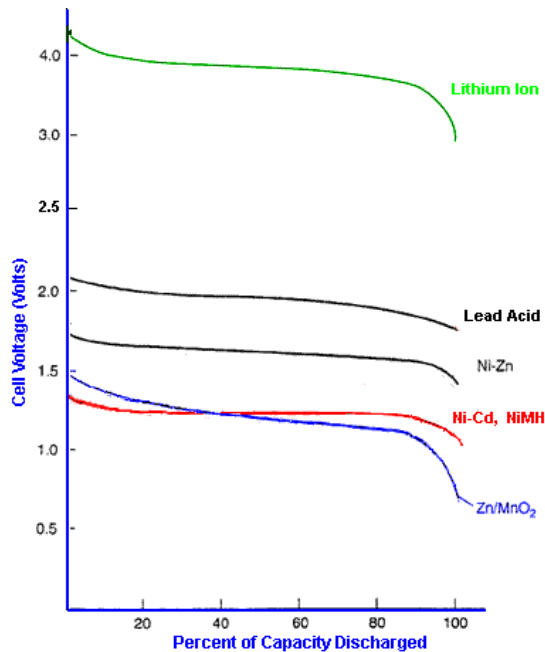


Table 1: Characteristics of commonly used rechargeable batteries. The figures are based on average ratings of commercial batteries at time of

| Specifications | Lead Acid | NiCd | NiMH | Li-ion ¹ | | |
|---------------------------------------|--|---|----------------------|---|-------------------|--------------|
| | | | | 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 ² (80% DoD) | 200–300 | 1,000 ³ | 300–500 ³ | 500–1,000 | 500–1,000 | 1,000–2,000 |
| Charge time ⁴ | 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% ⁵ | 30% ⁵ | <5% Protection circuit consumes 3%/month | | |
| Cell voltage (nominal) | 2V | 1.2V ⁶ | 1.2V ⁶ | 3.6V ⁷ | 3.7V ⁷ | 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 ⁸ 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 ⁹ (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 ¹⁰ (topping chg.) | Full discharge every 90 days when in full use | | Maintenance-free | | |
| Safety requirements | Thermally stable | Thermally stable, fuse protection | | Protection circuit mandatory ¹¹ | | |
| In use since | Late 1800s | 1950 | 1990 | 1991 | 1996 | 1999 |
| Toxicity | Very high | Very high | Low | Low | | |
| Coulombic efficiency ¹² | ~90% | ~70% slow charge ~90% fast charge | | 99% | | |
| Cost | Low | Moderate | | High ¹³ | | |

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, ACS

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

