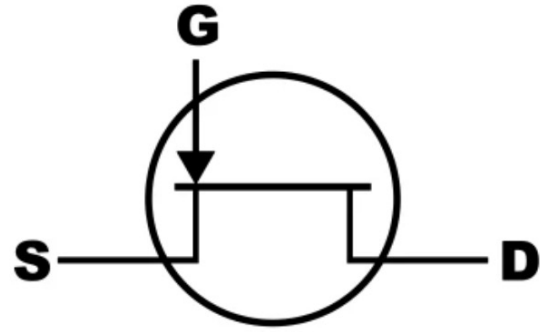


Sisteme Încorporate

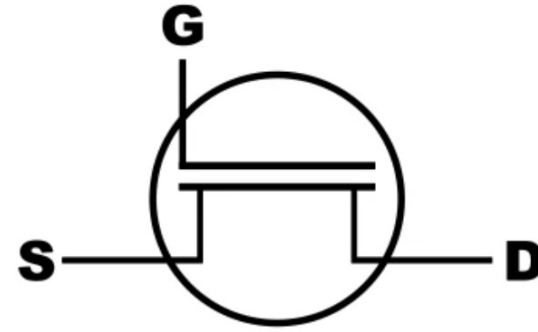
Cursul 4

Consumul de energie în Embedded (2)

Facultatea de Automatică și Calculatoare
Universitatea Politehnica București



JFET



MOSFET



BOBA FETT

Chestiuni generale

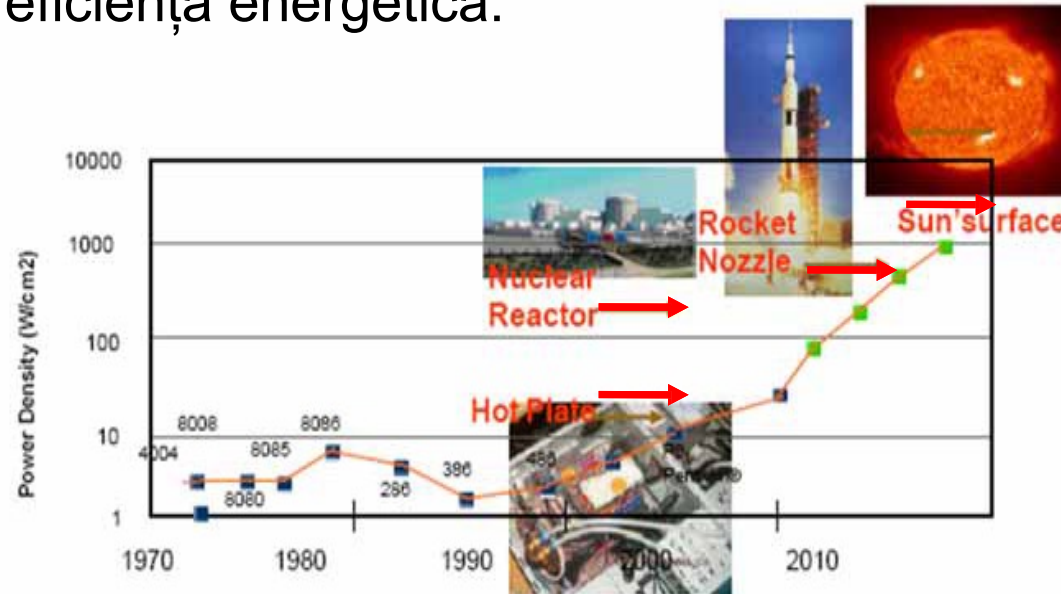
Putere vs. Energie

Tehnici de bază

- Paralelism
- VLIW (paralelism și overhead redus)
- Dynamic Voltage Scaling
- Dynamic Power Management

Consumul de energie și putere

De ce avem nevoie de eficiență energetică:



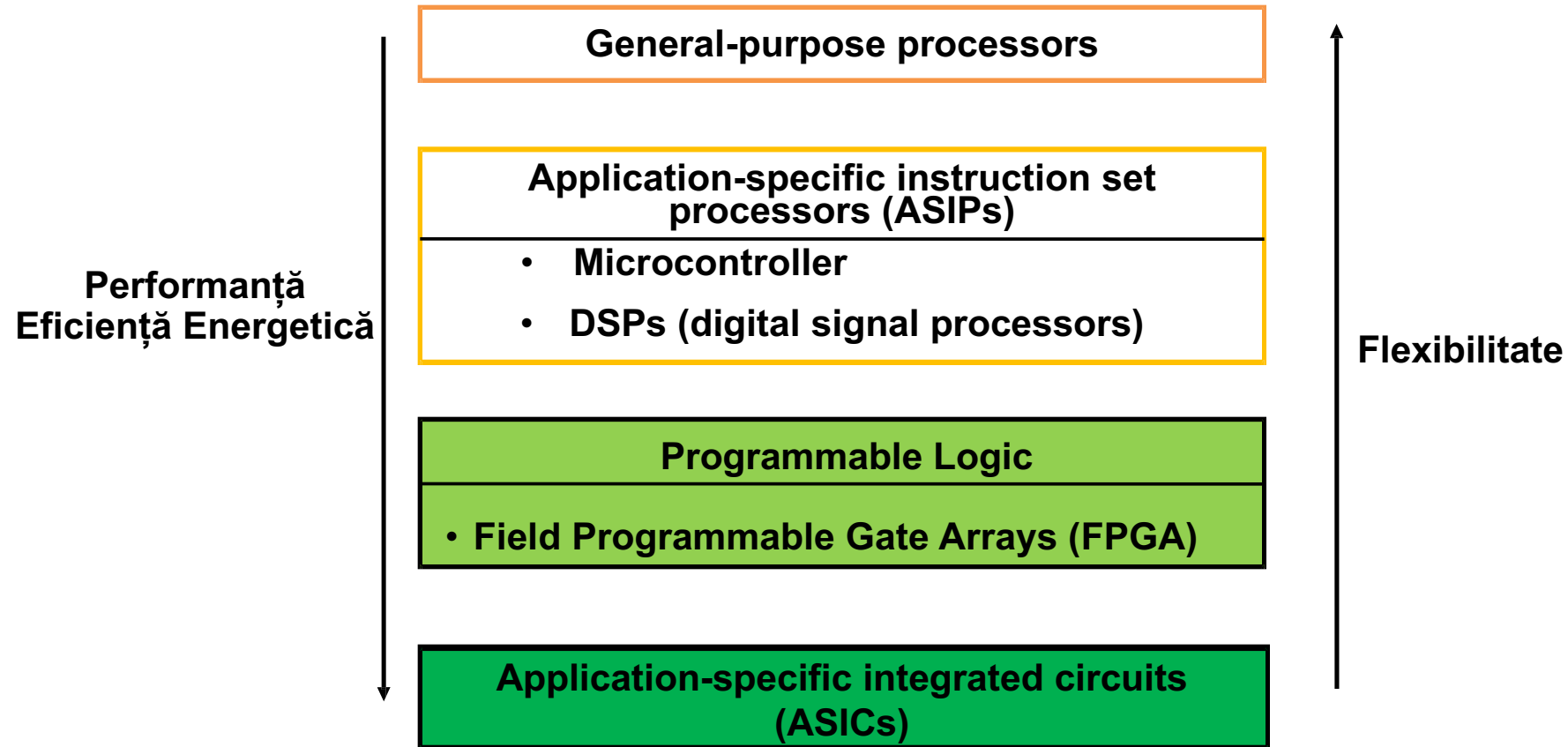
„Power is considered as the most important constraint in embedded systems”

[in: L. Eggermont (ed): Embedded Systems Roadmap 2002, STW]

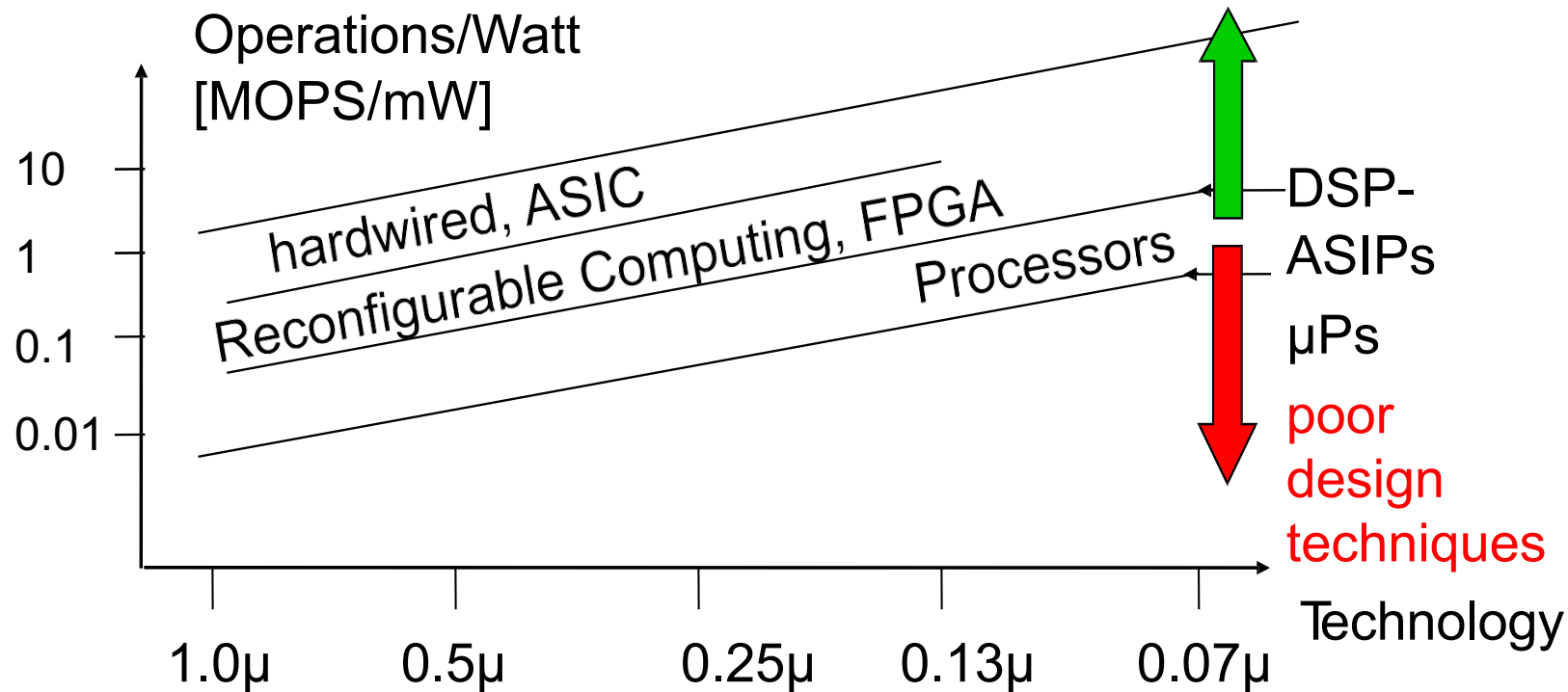
“Power demands are increasing rapidly, yet battery capacity cannot keep up”.

[in Ditzel et al.: Power-Aware Architecting for data-dominated applications, 2007, Springer]

Alternative de implementare



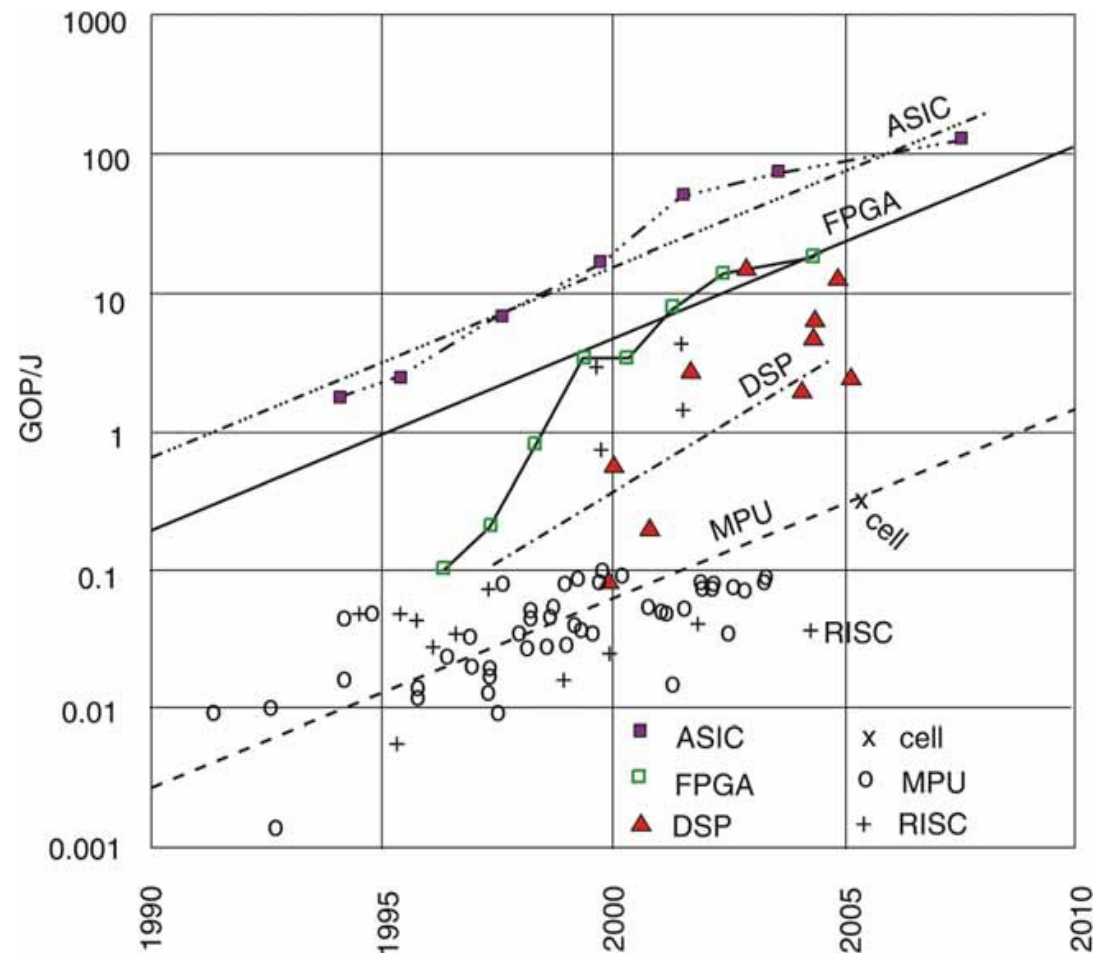
Conflictul putere/flexibilitate



Este necesară **optimizarea HW și SW**,
folosirea **arhitecturilor eterogene** și de **tehnici
specializate de design**.

[H. de Man, Keynote,
DATE'02;
T. Claasen, ISSCC99]

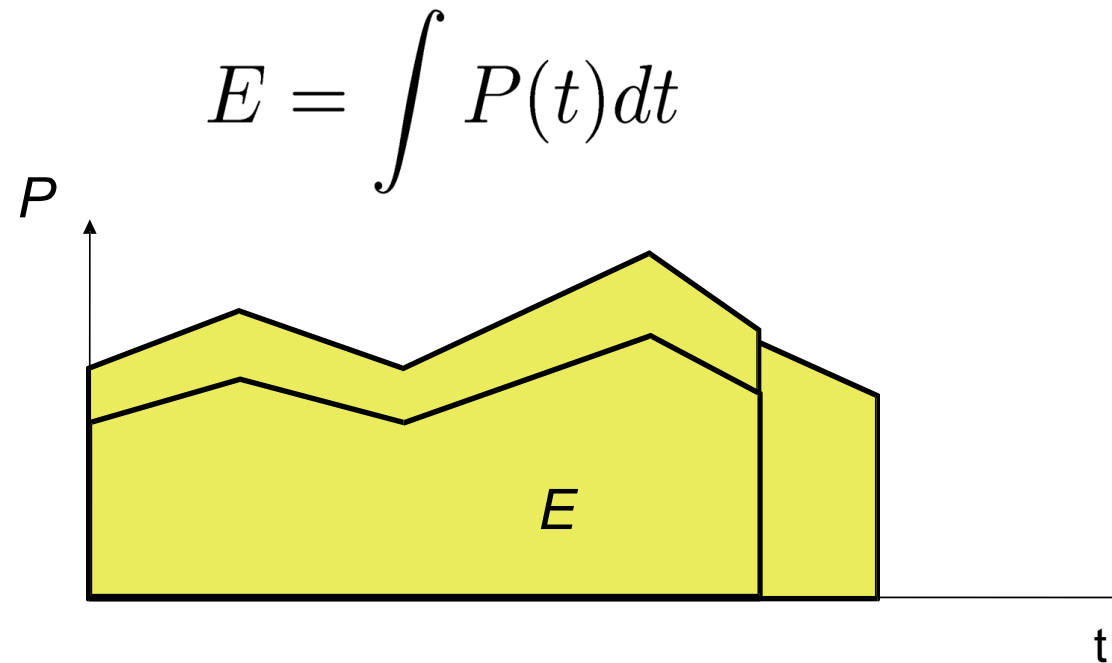
Eficiența Energetică



© Hugo De Man,
IMEC, Philips, 2007

- ▶ Chestiuni generale
- ▶ *Putere vs. Energie*
- ▶ Tehnici de bază
 - Paralelism
 - VLIW (paralelism și overhead redus)
 - Dynamic Voltage Scaling
 - Dynamic Power Management

Puterea și Energia sunt interdependente



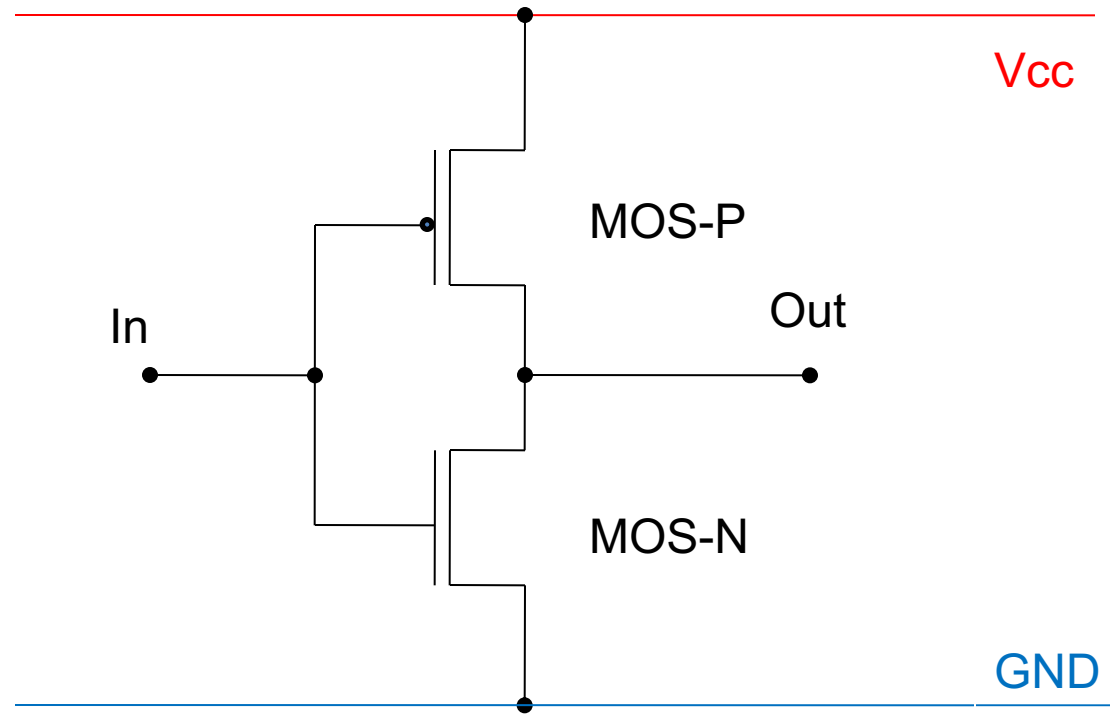
În majoritatea cazurilor, o execuție mai rapidă înseamnă și consum mai mic de energie, dar exact opusul poate să se întâmple în momentul în care puterea trebuie mărită pentru a permite execuția rapidă.

Low Power vs. Low Energy

- ▶ Minimizarea **consumului de putere** este importantă pentru:
 - proiectarea sursei de alimentare
 - proiectarea stabilizatoarelor de tensiune
 - dimensiunile conexiunilor și traseelor de alimentare
 - răcire (disipare eficientă a căldurii)
 - cost ridicat
 - spațiu limitat

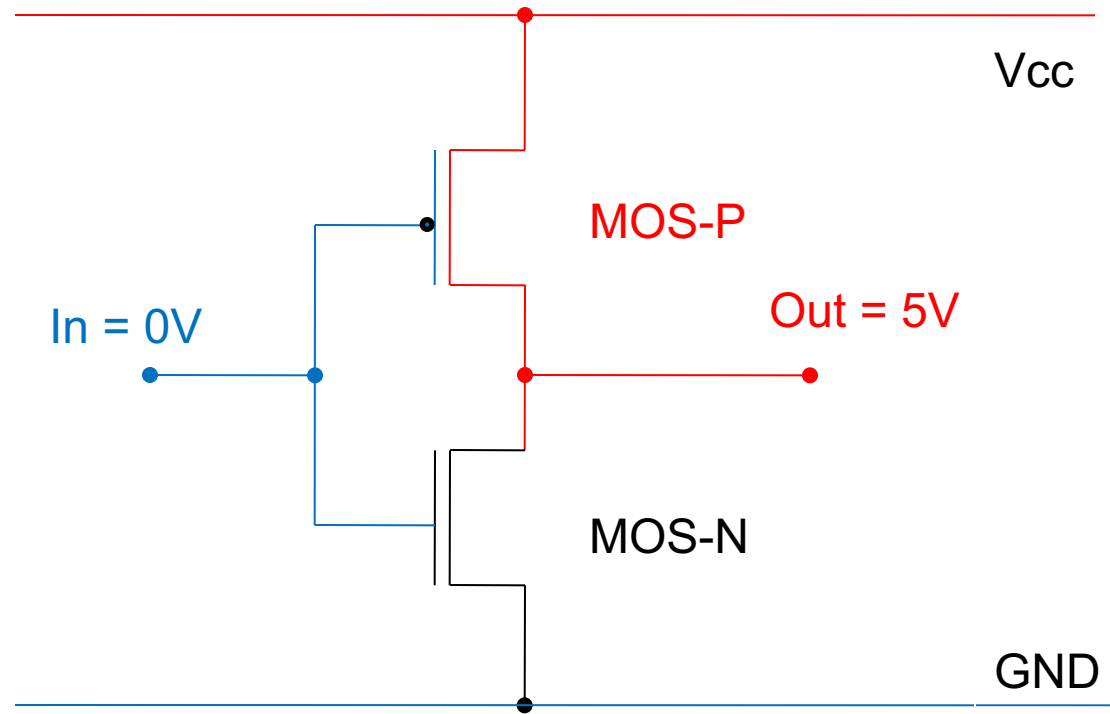
- ▶ Minimizarea **consumului de energie** este importantă pentru:
 - disponibilitate redusă a energiei (sisteme mobile)
 - capacitatea limitată a bateriilor (crește prea lent)
 - costurile mari ale energiei (panouri solare, în spațiu)
 - timp de viață mărit, temperatură de operare scăzută

Exemplu: Inversorul CMOS



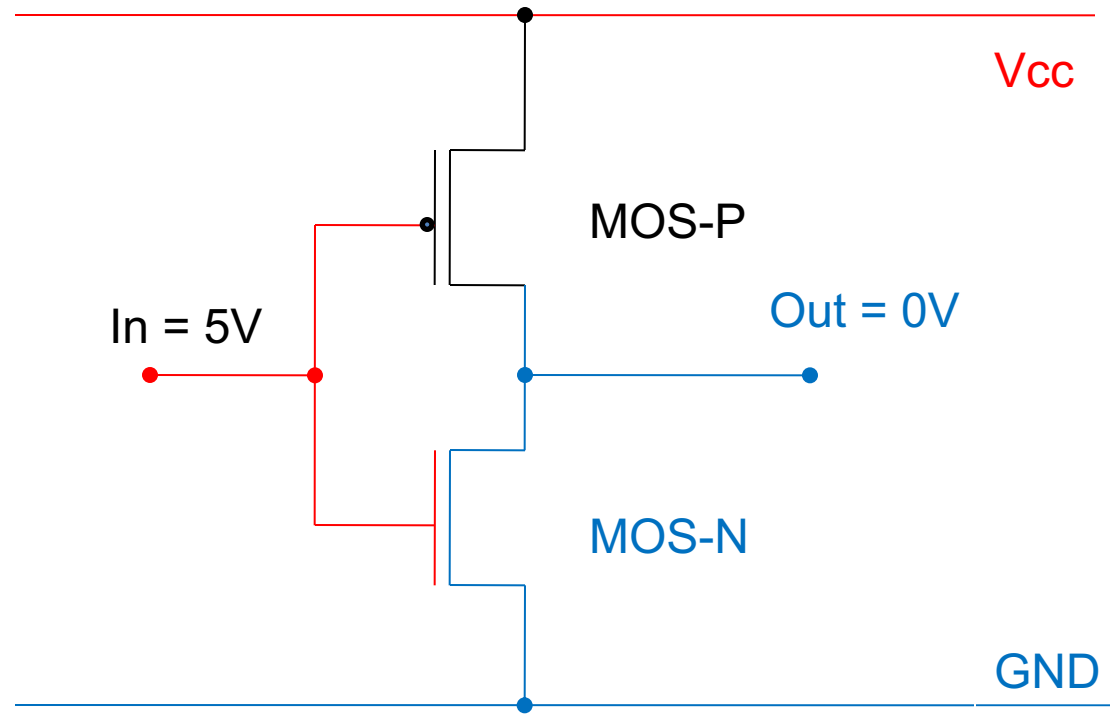
- Cea mai simplă poartă logică – doar două tranzistoare
- Funcționare complementară (MOS-N în conjuncție cu MOS-P)

Exemplu: Inversorul CMOS



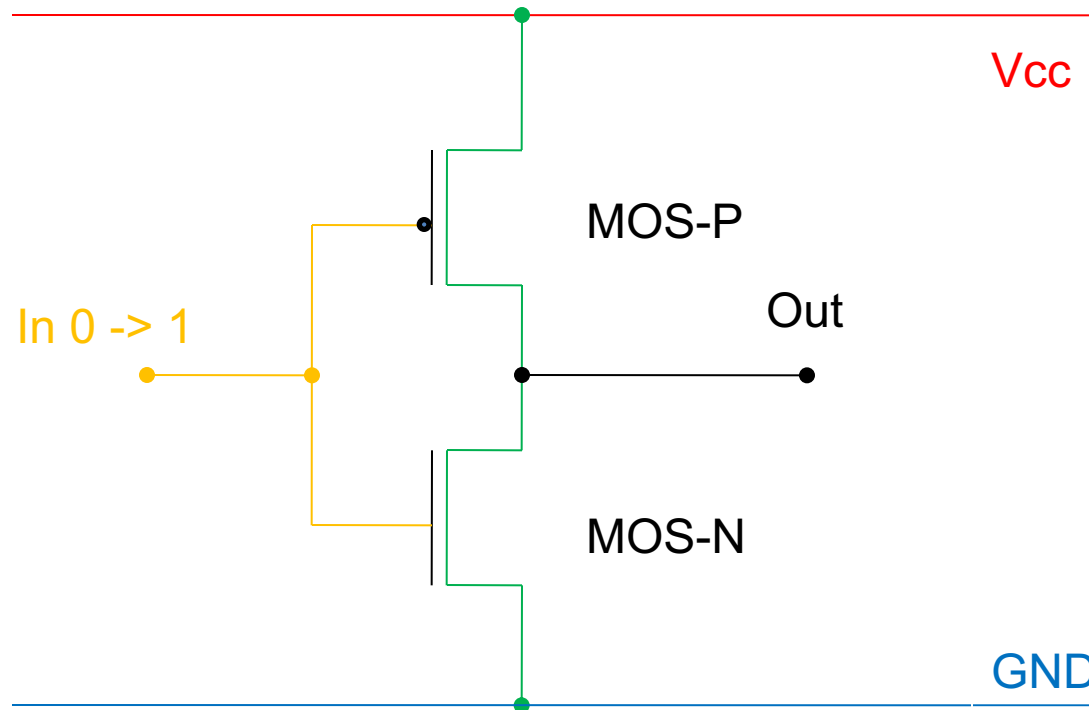
- Input = 0V $\rightarrow$ MOS-P conduce, MOS-N blocat $\rightarrow$ Out = 5V

Exemplu: Inversorul CMOS



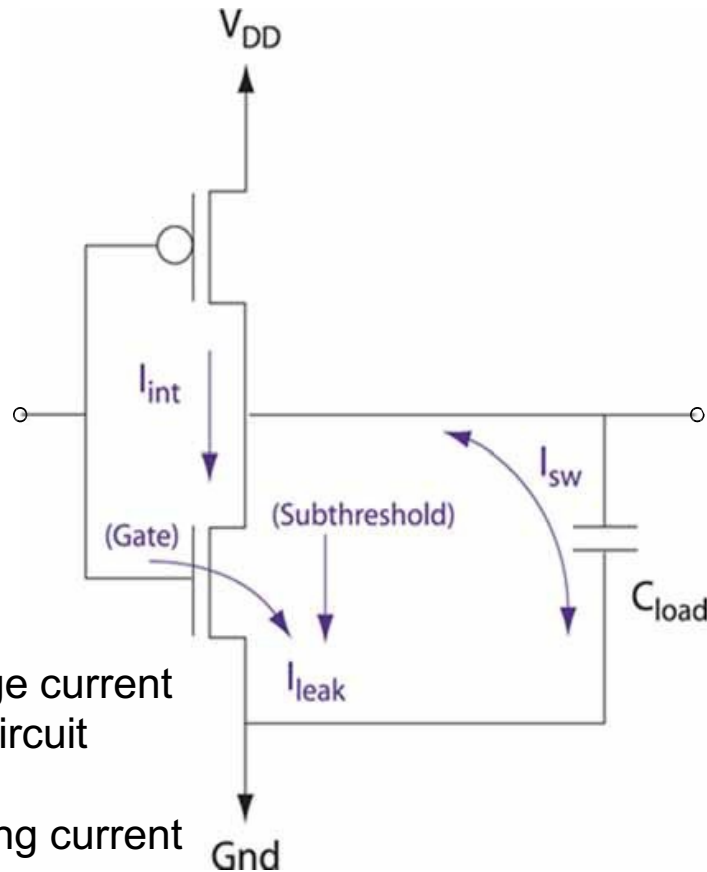
- Input = 5V $\rightarrow$ MOS-N conduce, MOS-P blocat $\rightarrow$ Out = 0V

Exemplu: Inversorul CMOS



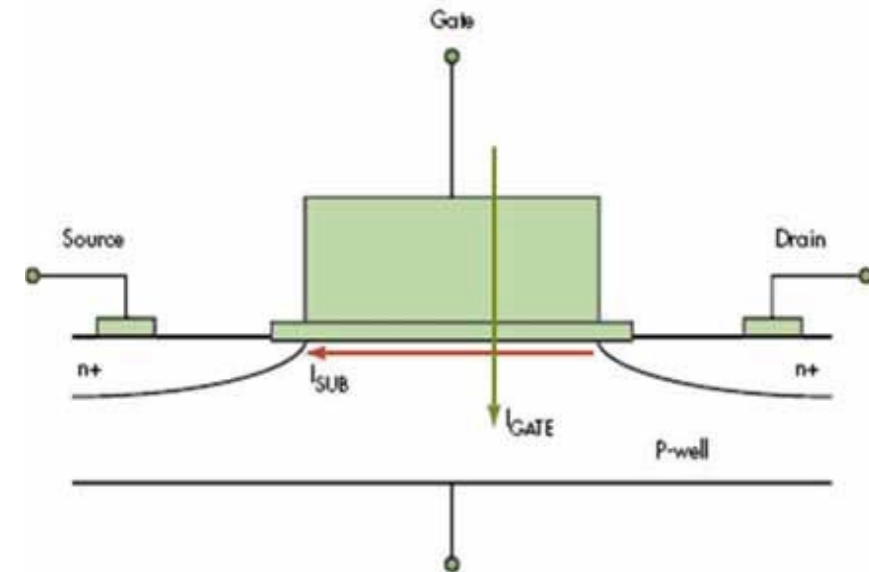
- Ce se întâmplă în regim tranzitoriu? (când intrarea comută)
 - Pentru o scurtă perioadă de timp ($\sim nS$) amândouă tranzistoarele sunt deschise $\rightarrow$ scurt între V_{cc} și GND $\rightarrow$ consum de energie

Consumul de putere al unei porți CMOS



I_{leak} : leakage current
 I_{int} : short circuit
current
 I_{sw} : switching current

Sub-threshold and gate-oxide leakage



Dynamic Voltage Scaling (DVS)

**Consumul de putere CMOS
(fără leakage):**

$$P \sim \alpha C_L V_{dd}^2 f$$

V_{dd} : supply voltage
 α : switching activity
 C_L : load capacity
 f : clock frequency

**Întârzierea unui circuit
CMOS**

$$\tau \sim C_L \frac{V_{dd}}{(V_{dd} - V_T)^2}$$

V_{dd} : supply voltage
 V_T : threshold
voltage
 $V_T \ll V_{dd}$

Scăderea V_{dd} reduce P quadratic (f constant).
Gate delay crește reciproc.
Frecvența maximă $f_{\max}$ scade liniar.

Puterea disipată în CMOS

$$P = \frac{1}{2} ACV^2 f + \tau AVI_{short} f + VI_{leak}$$

P = putere totală

V = tensiunea de alimentare

f = frecvența de ceas

C = capacitatea liniilor de ieșire

A = activitate (tranziții logice pe ciclu de ceas)

I_{leak} = curent de mers în gol I_{short} = curent de scurt-circuit

τ = durata curentului de scurt-circuit

Măsurarea puterii disipate în CMOS

$$P = \underbrace{\frac{1}{2} ACV^2 f}_{\text{Puterea de comutație}} + \underbrace{\tau AVI_{short} f}_{\text{Puterea de scurt-circuit}} + \underbrace{VI_{leak}}_{\text{Puterea de mers în gol}}$$

Puterea de comutație Puterea de scurt-circuit Puterea de mers în gol

Putere dinamică

Putere statică

Puterea dinamică

- Puterea de comutație
 - Puterea dinamică cauzată de încărcarea și descărcarea sarcinilor capacitive de la ieșirea fiecărei porți logice
 - Este “vinovată” pentru majoritatea puterii disipate într-un chip
 - Factori de influență
 - Tensiunea de alimentare (V)
 - Frecvența de ceas (f)
 - Activitatea (A): unele porți logice nu comută la fiecare ciclu
- Puterea de scurt-circuit
 - Putere dinamică datorată existenței curentului de scurt-circuit I_{short} care se stabilește un timp τ între alimentare și masă în momentul în care intrarea comută dintr-o stare în alta și ambele tranzistoare sunt deschise.

- Leakage current. Este predominant când circuitul este inactiv
 - Există un consum deoarece tranzistoarele nu au rezistența infinită atunci când sunt închise
- Diode leakage (neglijabil)
 - Sursa (și drena) formează o diodă cu substratul
 - În anumite condiții dioda poate fi polarizată, determinând apariția unui curent rezidual.

Consumul de putere al procesoarelor CMOS

► *Principalele surse:*

■ Puterea dinamică

- Încărcarea și descărcarea condensatoarelor parazite

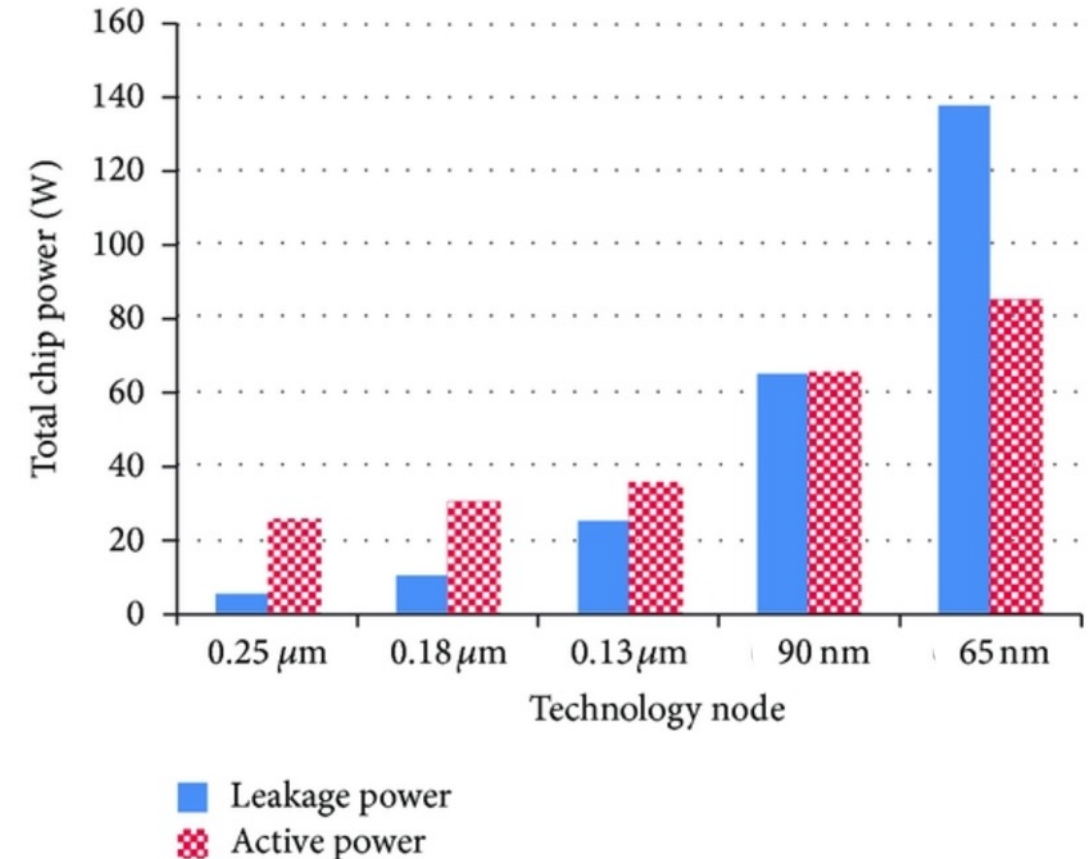
■ Puterea de scurt-circuit

- Scurt-circuit între V_{cc} și GND la comutare

■ Leakage

- Diode și tranzistoare imperfecte
- Devine unul din factorii majori

odată cu micșorarea dimensiunilor tranzistoarelor



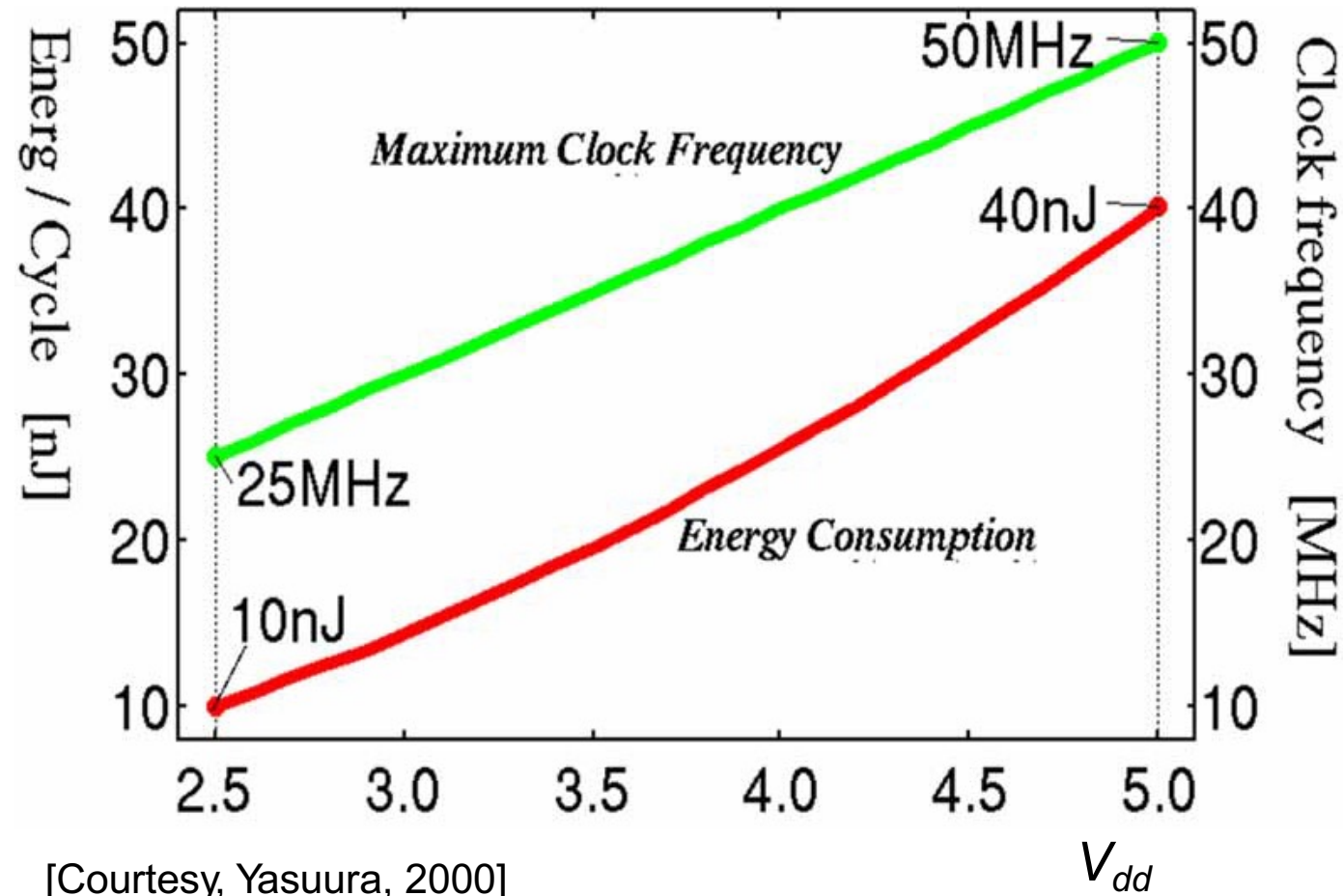
$$P \sim \alpha C_L V_{dd}^2 f$$

$$E \sim \alpha C_L V_{dd}^2 f t = \alpha C_L V_{dd}^2 (\#cycles)$$

Reducerea consumului de energie pentru un task dat:

- Reducerea tensiunii de alimentare V_{dd}
- Reducerea activității α
- Reducerea capacității din sarcină C_L
- Reducerea numărului de cicli $\#cycles$

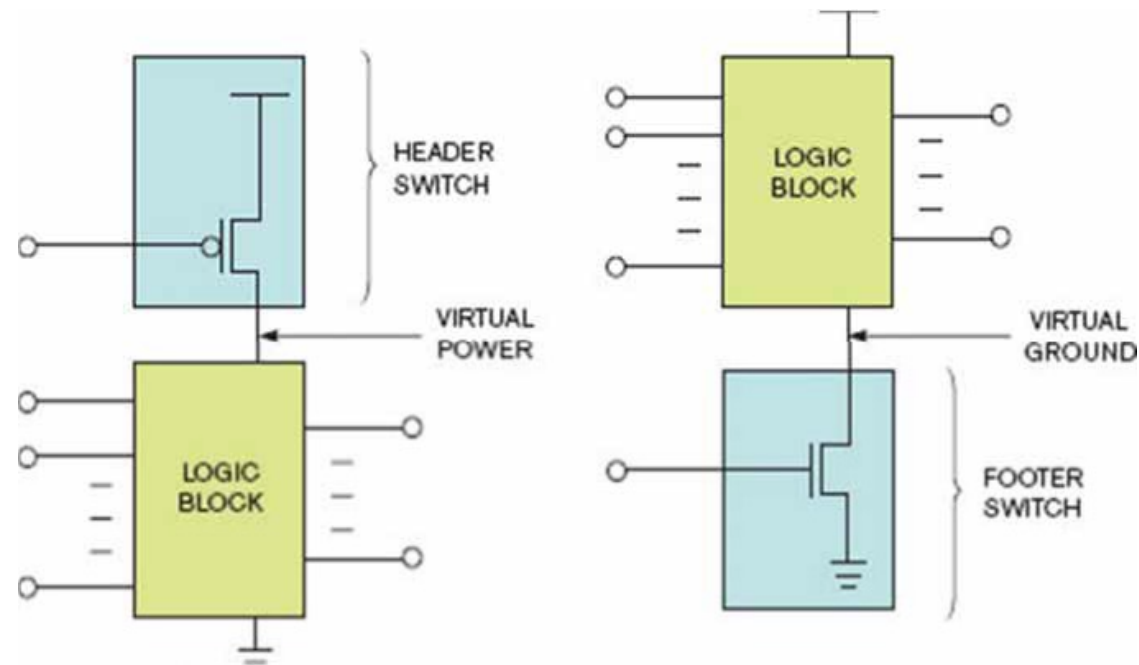
Exemplu: Voltage Scaling



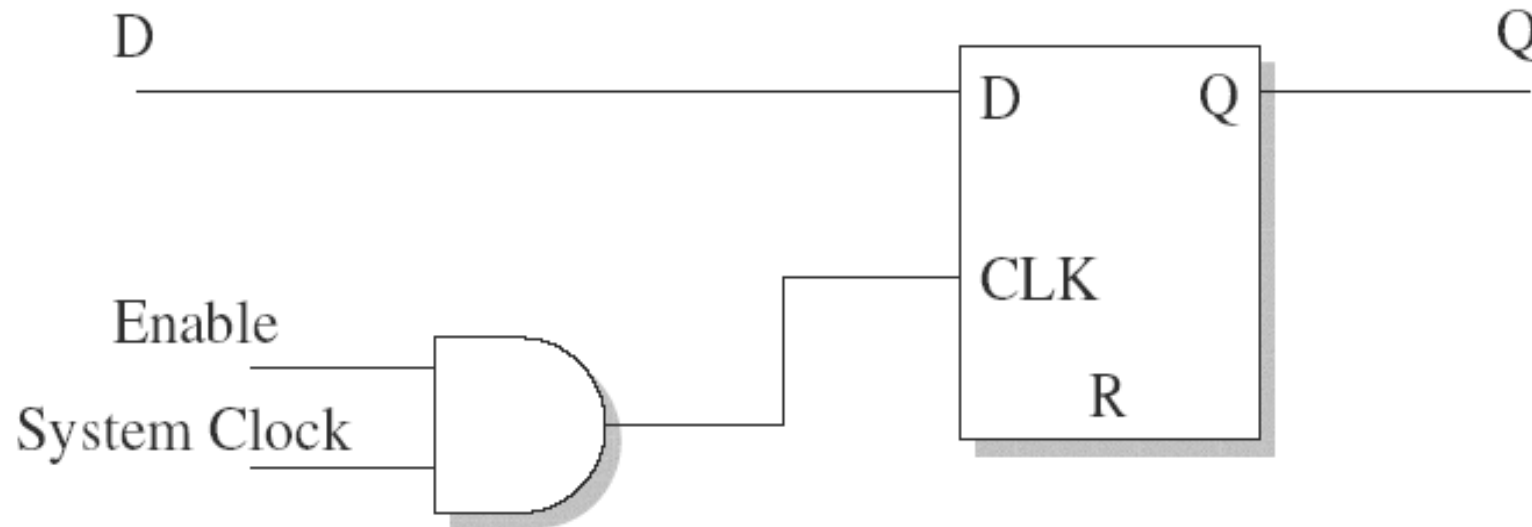
[Courtesy, Yasuura, 2000]

Power Supply Gating

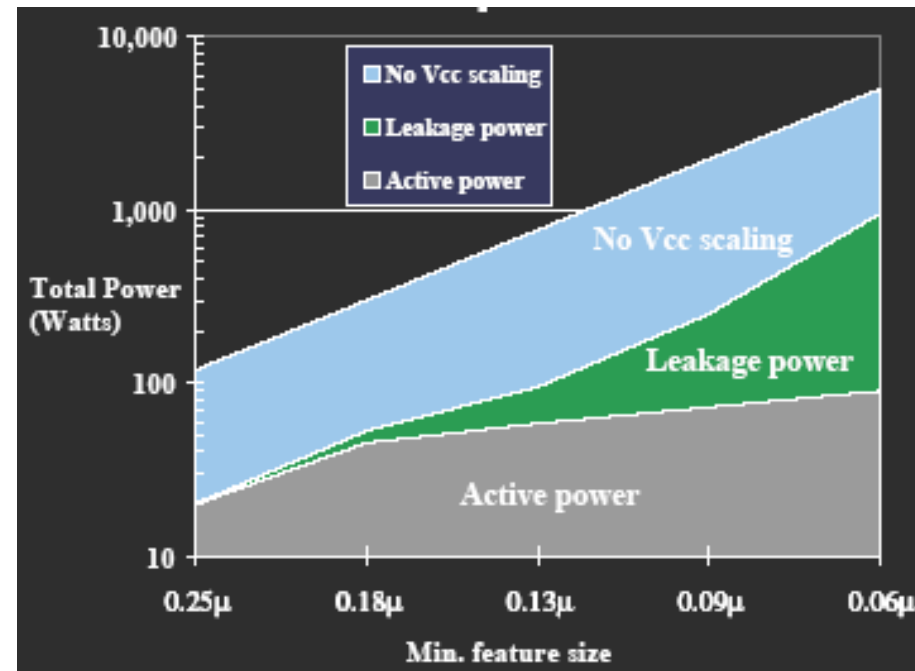
- ▶ Power gating este una dintre cele mai eficiente metode de a minimiza consumul static de putere (leakage)
 - Taie alimentarea unităților/componentelor inactive
 - Reduce leakage-ul



Deselectează unitațile logice atunci când nu sunt folosite de sistem



Care factor din formula puterii este minimizat?



- Puterea activă este factorul cel mai important în ziua de azi
- Puterea de mers în gol va deveni importantă odată cu mărirea integrării
- Puterea de mers în gol crește cu temperatura

- Reducerea frecvenței de ceas (f)
 - Scade puterea medie dar mărește timpul de execuție $\rightarrow$ consumul de energie rămâne constant
 - Metrică mai bună pentru un procesor low-power: MIPS/W $\equiv$ million instructions per sec per watt
- Reducerea tensiunii de alimentare (V)
 - Puterea de comutație este proporțională cu V^2
 - O scădere a lui V la $\frac{1}{2}V \rightarrow$ puterea scade $\frac{1}{4}$ din puterea inițială
 - De ce nu merge la nesfârșit așa?
- Reducerea activității (A)
 - Dezactivarea unor blocuri funcționale atunci când nu sunt active
- Reducerea curenților reziduali
 - Dezactivarea alimentării anumitor zone de circuit

Reducerea lui $V \rightarrow$ Reducerea lui f

$$f_{\max} \sim \frac{(V - V_{\text{threshold}})^2}{V}$$

- Frecvența maximă de ceas este direct proporțională cu V
- Reducerea puterii cu $\frac{1}{4}$ reduce frecvența cu $\frac{1}{2}$ $\rightarrow$ pierderi de performanță $\rightarrow$ consum redus
- Implicație indirectă: Paralelismul în procesare este o strategie eficientă de a reduce puterea fără pierderi de performanță

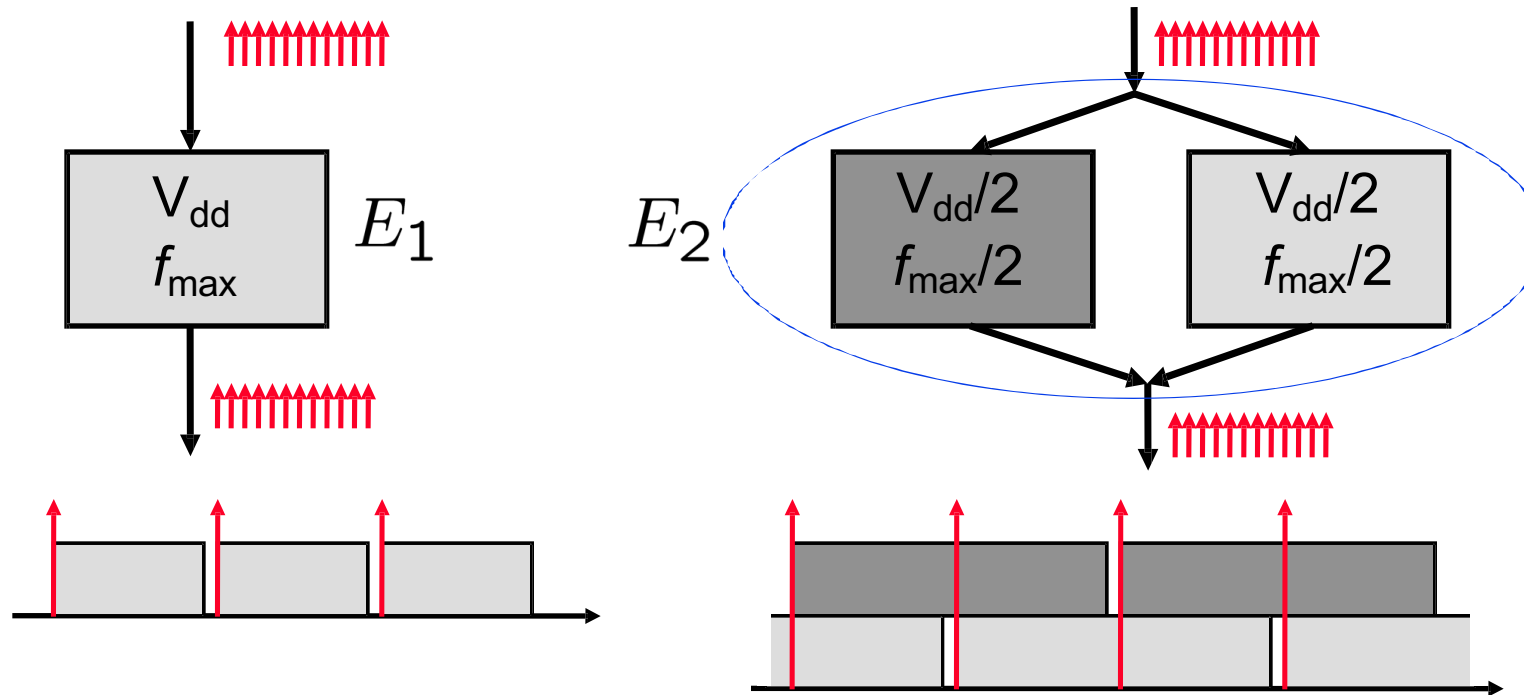
Reducerea lui V -> Reducerea lui $V_{threshold}$

- Altfel, circuitul nu poate funcționa corect
- Reducerea $V_{threshold}$ mărește exponențial curentul rezidual
- Puterea de mers în gol începe să fie o problemă

$$I_{leak} \sim \frac{1}{e^{\left(\frac{qV_{threshold}}{kT}\right)}}$$

- ▶ Chestiuni generale
- ▶ Putere vs. Energie
- ▶ ***Tehnici de bază***
 - **Paralelism**
 - VLIW (paralelism și overhead redus)
 - Dynamic Voltage Scaling
 - Dynamic Power Management

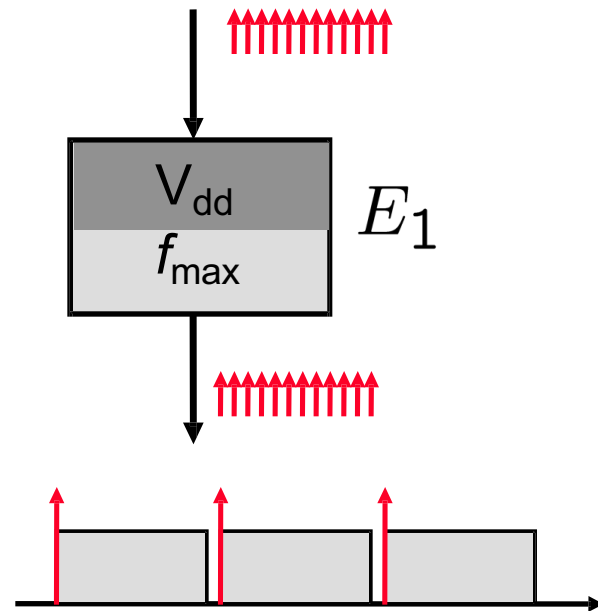
Folosirea paralelismului



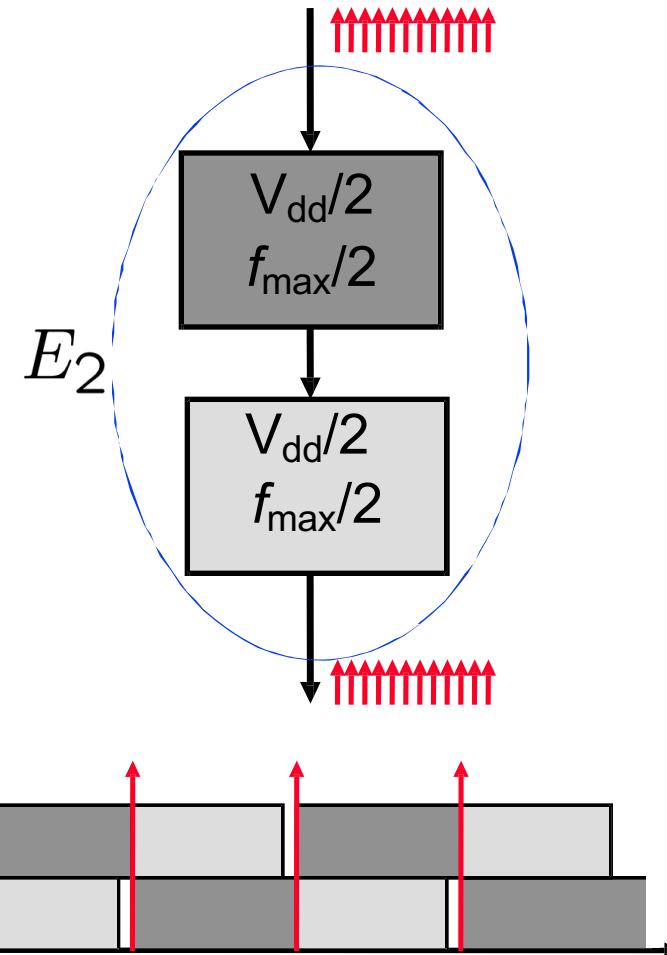
$$E \sim V_{dd}^2 (\#cycles)$$

$$E_2 = \frac{1}{4} E_1$$

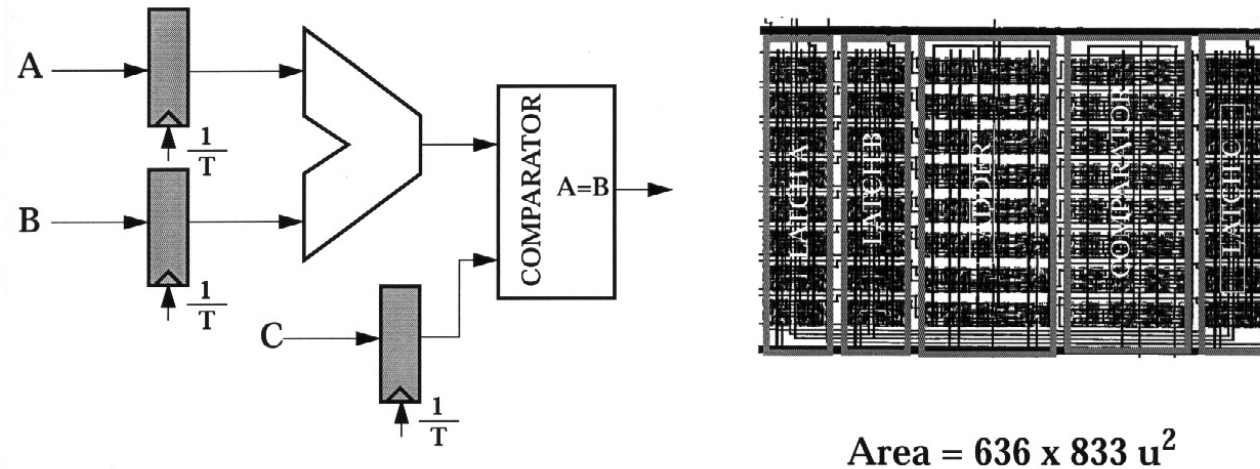
Folosirea benzii de asamblare



$$E \sim V_{dd}^2 (\#cycles)$$
$$E_2 = \frac{1}{4} E_1$$

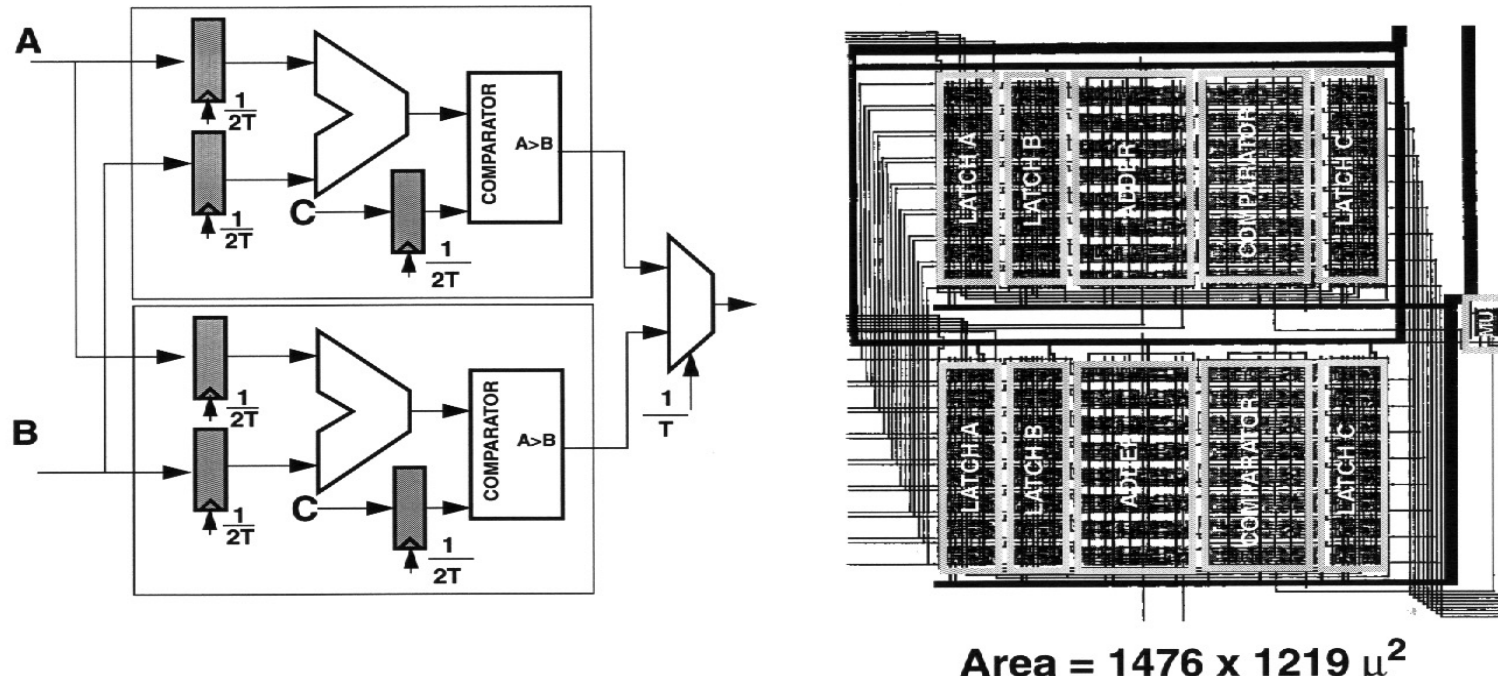


Exemplu de calcul al puterii

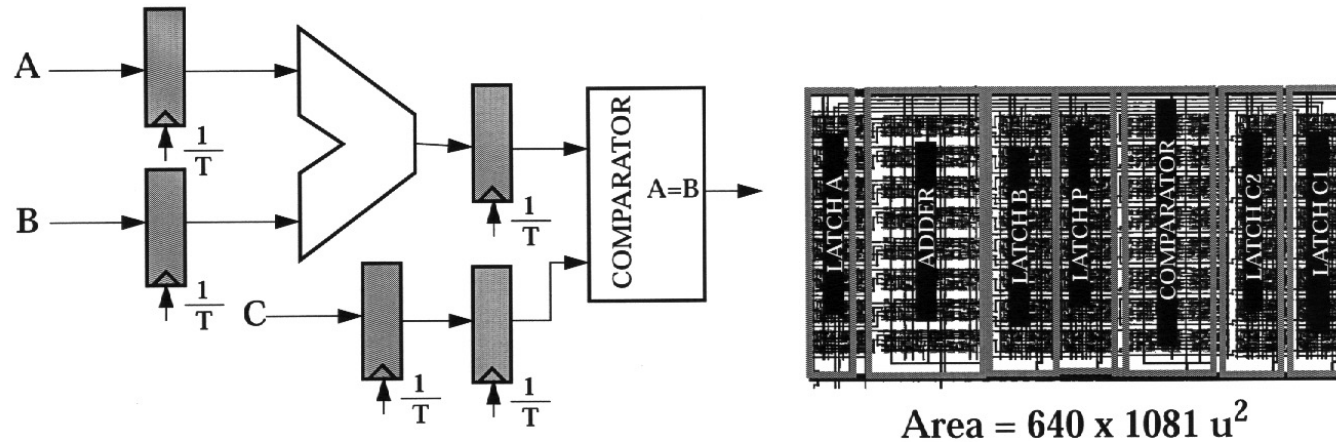


- Întârziere pe calea critică: $T_{\text{adder}} + T_{\text{comparator}} = 25 \text{ ns}$
- Frecvența: $f_{\text{ref}} = 40 \text{ MHz}$
- Capacitatea totală de comutație = C_{ref}
- $V_{\text{dd}} = V_{\text{ref}} = 5\text{V}$
- Puterea de comutație = $P_{\text{ref}} = C_{\text{ref}} V_{\text{ref}}^2 f_{\text{ref}}$

Paralelizarea căii de date



- Frecvența de ceas poate fi înjumătățită fără a pierde din productivitate: $f_{\text{par}} = f_{\text{ref}}/2 = 20 \text{ MHz}$
- Capacitate totală de comutație = $C_{\text{par}} = 2.15C_{\text{ref}}$
- $V_{\text{par}} = V_{\text{ref}}/1.7 (=3\text{V})$
- $P_{\text{par}} = (2.15C_{\text{ref}})(V_{\text{ref}}/1.7)^2(f_{\text{ref}}/2) = 0.37P_{\text{ref}}$



- $f_{\text{pipe}} = f_{\text{ref}}$
 $C_{\text{pipe}} = 1.1C_{\text{ref}}$
 $V_{\text{pipe}} = V_{\text{ref}}/1.7$
- Tensiunea poate fi scăzută păstrându-se aceleași performanțe
- $\text{Pipe} = C_{\text{pipe}} V_{\text{pipe}}^2 f_{\text{pipe}} = (1.1C_{\text{ref}})(V_{\text{ref}}/1.7)^2 f_{\text{ref}} = 0.38P_{\text{ref}}$

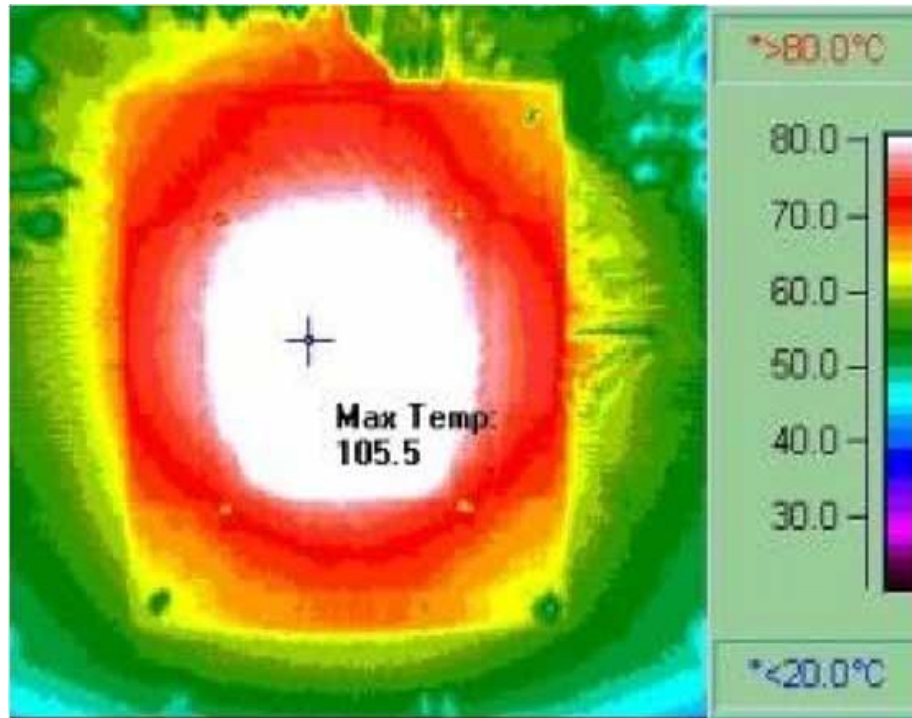
Arhitectura	Tensiune	Arie	Putere
Originala	5V	1	1
Pipeline	3V	1.3	0.38
Paralel	3V	3.4	0.37
Pipeline-Paralel	2.0V	3.7	0.18

- + Prin paralelizare s-a redus puterea dinamică disipată de 5.5 ori.
- Suprafața circuitului a crescut de 4 ori.
- Mărirea numărului de unități logice duce la creșterea puterii disipate în regimul de mers în gol și scurt-circuit.

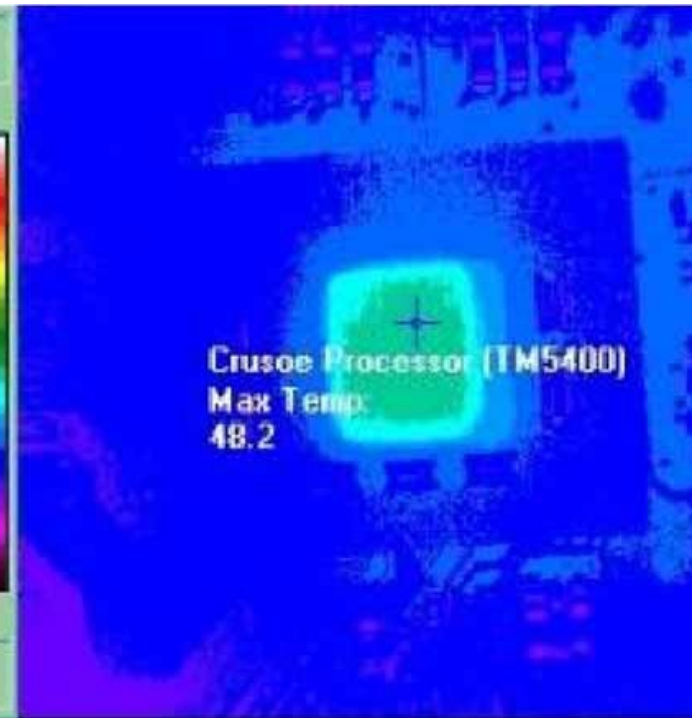
- ▶ Chestiuni generale
- ▶ Putere vs. Energie
- ▶ *Tehnici de bază*
 - Paralelism
 - **VLIW (paralelism și overhead redus)**
 - Dynamic Voltage Scaling
 - Dynamic Power Management

Ajută foarte mult (vechile) idei noi...

Pentium



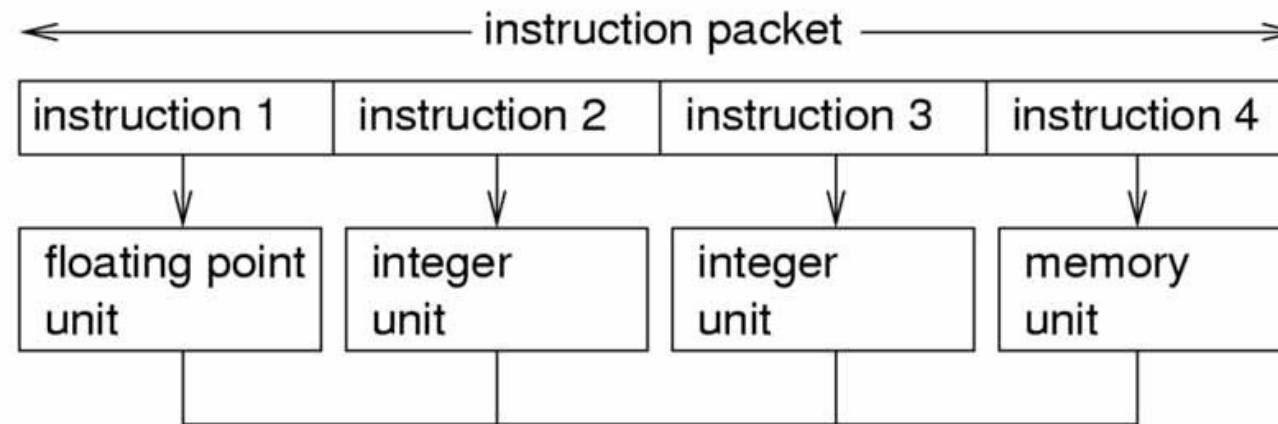
Crusoe



Rulează aceeași aplicație multimedia.

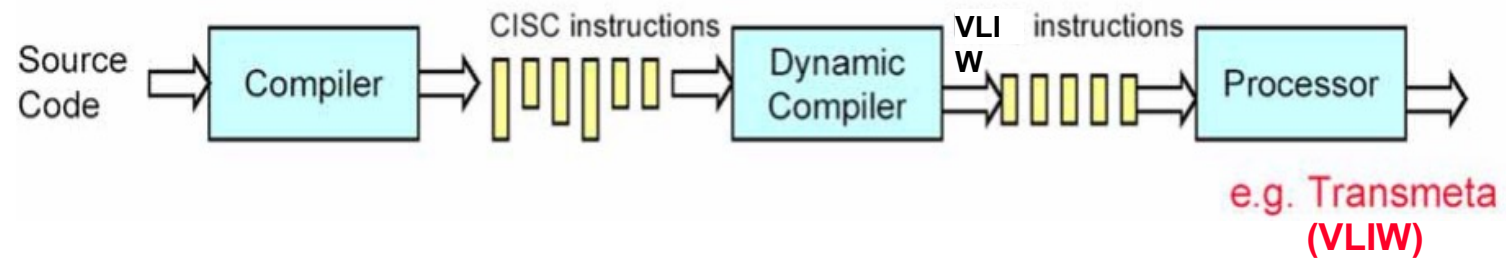
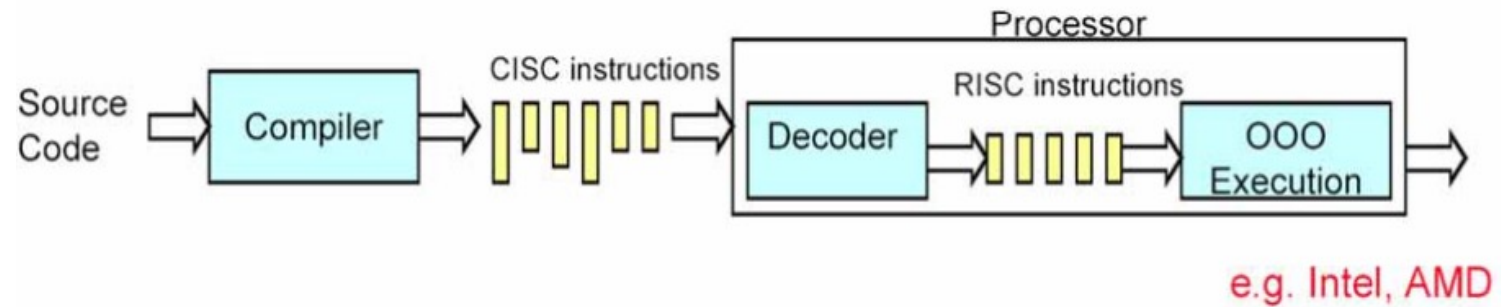
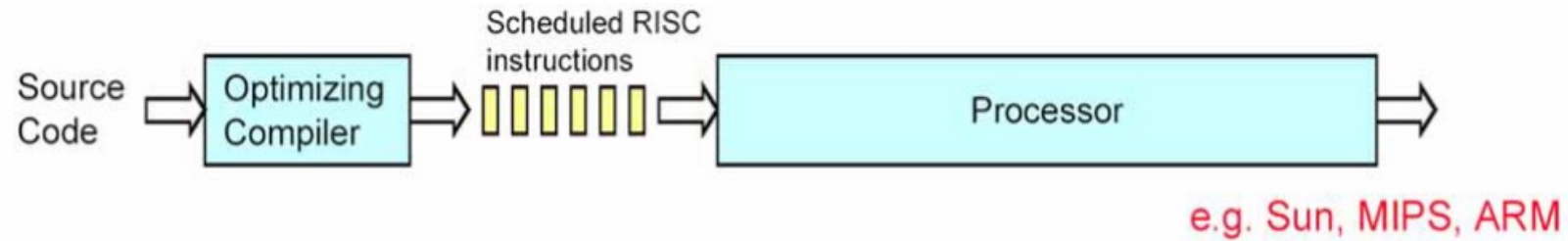
Publicat de Transmeta [\[www.transmeta.com\]](http://www.transmeta.com)

- ▶ ***Un grad foarte mare de paralelism***
 - Multe unități computaționale, (deeply) pipelined
- ▶ ***Arhitectură hardware simplă***
 - Paralelism explicit (parallel instruction set)
 - Paralelizarea este făcută offline (compiler)



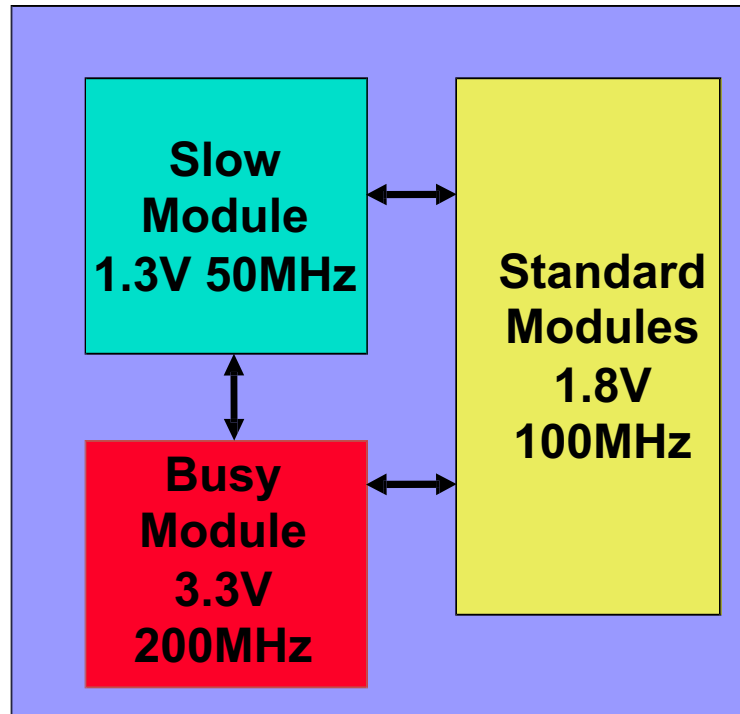
Transmeta este o arhitectură VLIW tipică

- 128-bit instructions (bundles):
 - 4 operations per instruction
 - 2 combinations of instructions allowed
- Register files
 - 64 integer, 32 floating point
- Some interesting features
 - 6 stage pipeline (2x fetch, decode, register read, execute, write)
 - x86 ISA execution using software techniques
 - Skip the binary compatibility problem!!
 - Interpretation and just-in-time binary translation
 - Speculation support

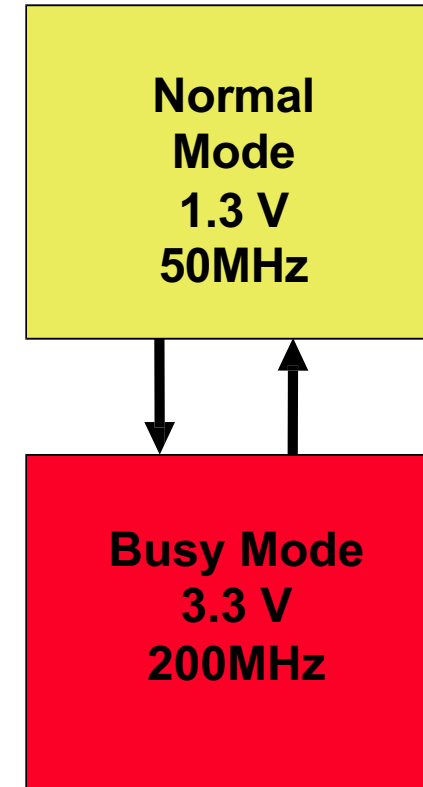


- ▶ Chestiuni generale
- ▶ Putere vs. Energie
- ▶ *Tehnici de bază*
 - Paralelism
 - VLIW (paralelism și overhead redus)
 - **Dynamic Voltage Scaling**
 - Dynamic Power Management

Management spațial vs. dinamic



Nu toate componentele
necesită aceeași performanță.



Performanța cerută poate
să varieze în timp

Optimizare potențială: DVS

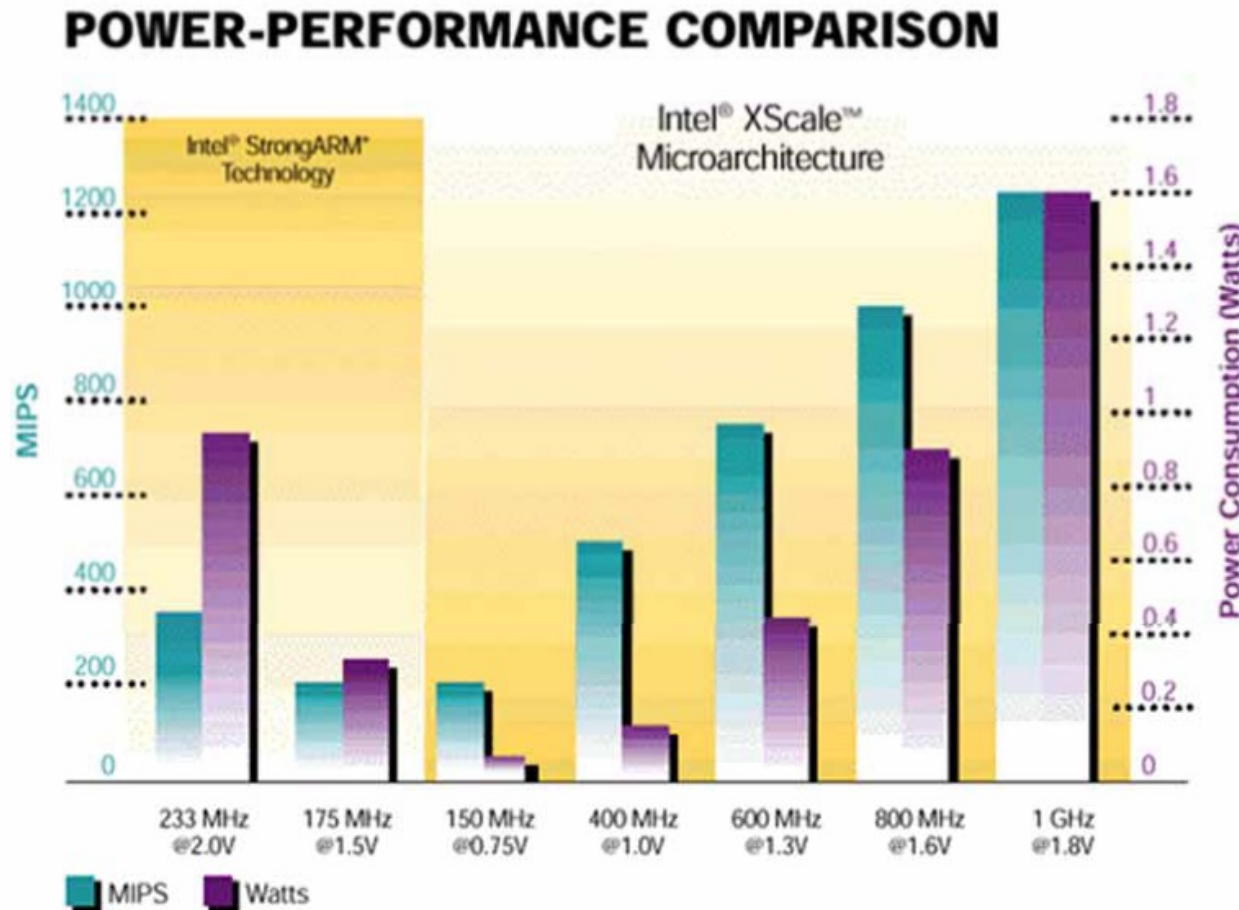
$$P \sim \alpha C_L V_{dd}^2 f$$

$$E \sim \alpha C_L V_{dd}^2 f t = \alpha C_L V_{dd}^2 (\#cycles)$$

Reducerea consumului de energie pentru un task dat:

- Reducerea tensiunii de alimentare V_{dd}
- Reducerea activității α
- Reducerea capacității din sarcină C_L
- Reducerea numărului de cicli $\#cycles$

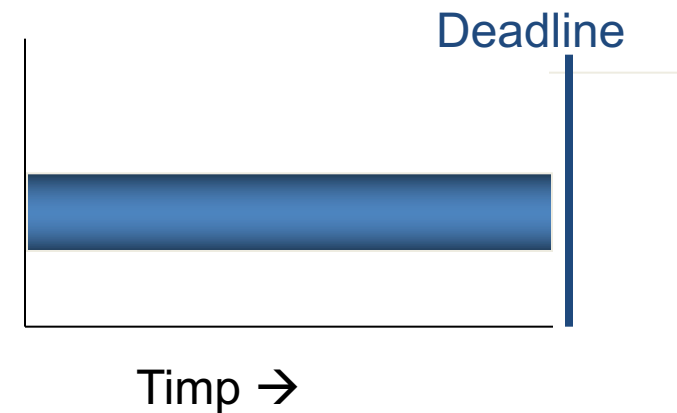
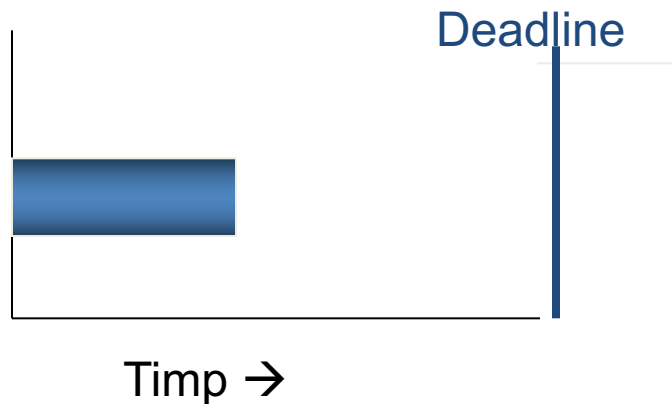
Exemplu: INTEL Xscale



Sistemul de operare trebuie să facă managementul consumului în funcție de necesități și de bugetul energetic dat.

From Intel's Web Site

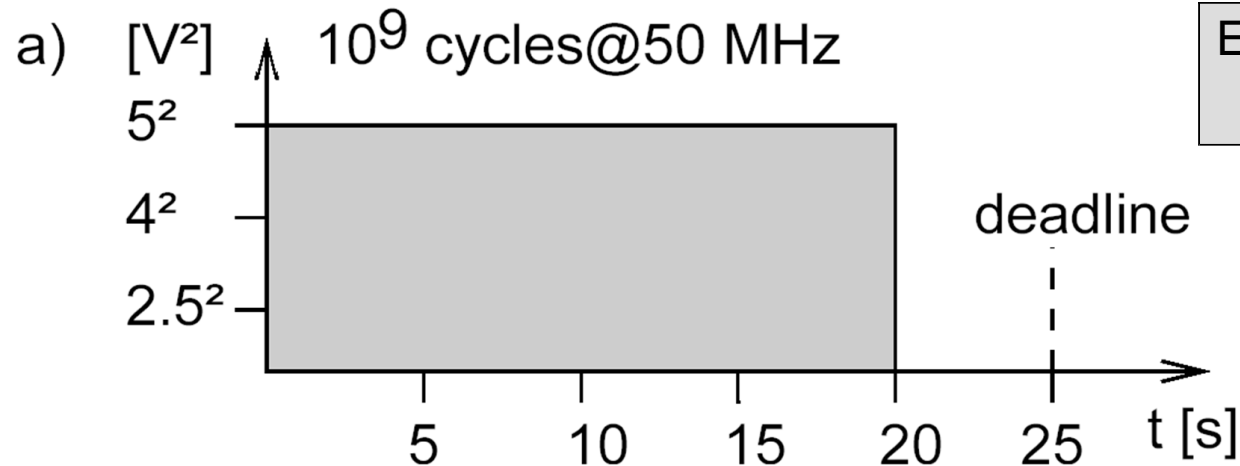
- Exploatează la maxim timpul oferit pentru procesarea unui volum de date.
- Procesorul rulează la o tensiune sau o frecvență redusă pentru a îndeplini sarcina exact în timpul alocat ei.



Exemplu DVS: a) Complete task ASAP

V_{dd} [V]	5.0	4.0	2.5
Energy per cycle [nJ]	40	25	10
f_{max} [MHz]	50	40	25
cycle time [ns]	20	25	40

Task-ul trebuie să execute 10^9 cicli în 25 secunde.

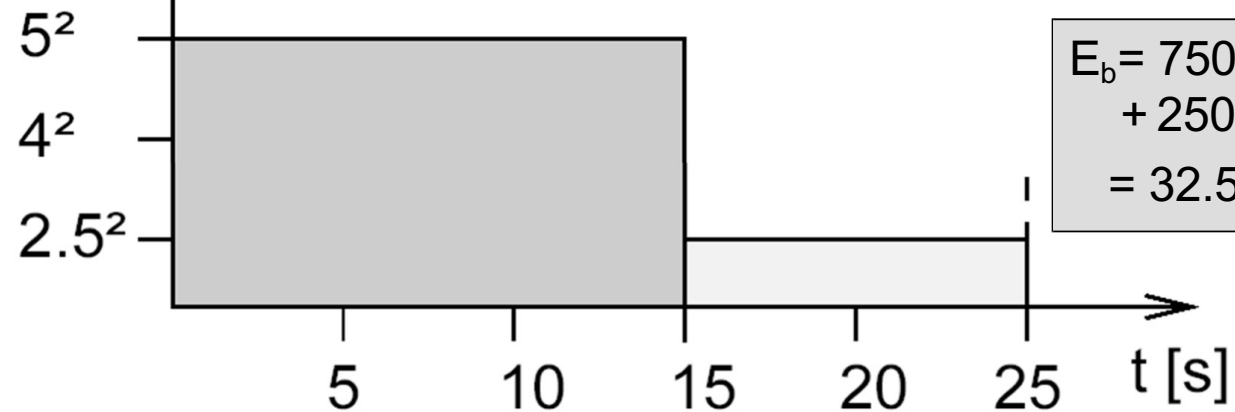


$$E_a = 10^9 \times 40 \times 10^{-9} = 40 \text{ [J]}$$

Exemplu DVS: b) Două tensiuni

V_{dd} [V]	5.0	4.0	2.5
Energy per cycle [nJ]	40	25	10
f_{max} [MHz]	50	40	25
cycle time [ns]	20	25	40

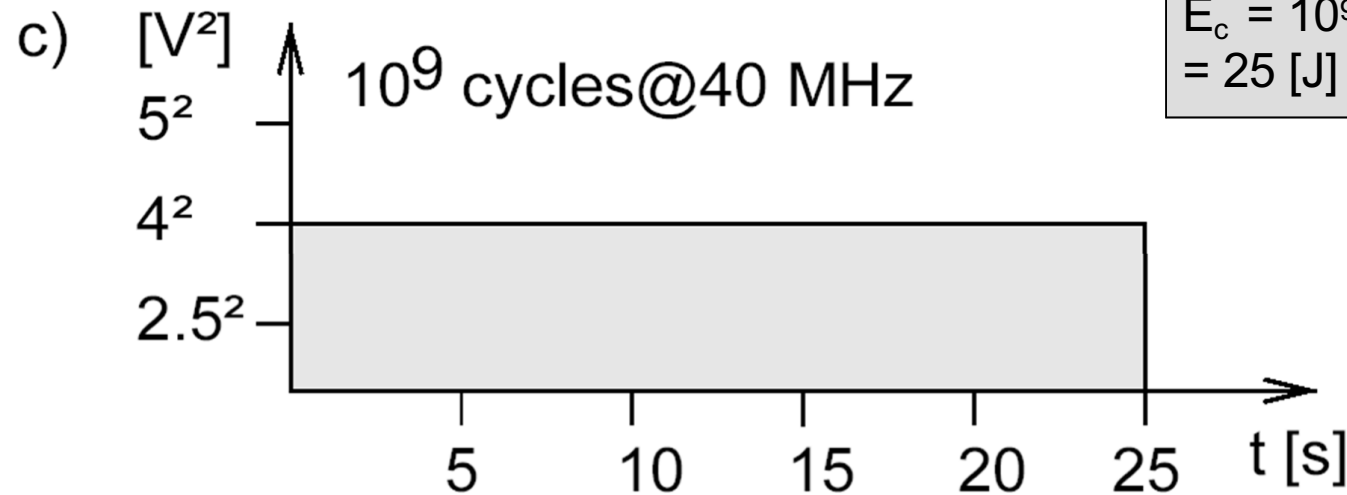
b) [V²] 750M cycles @ 50 MHz + 250M cycles @ 25



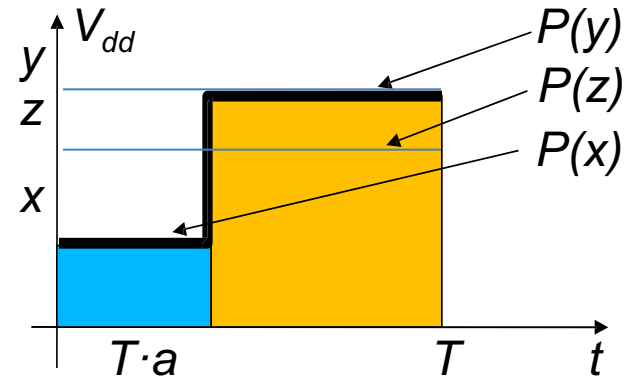
$$\begin{aligned} E_b &= 750 \cdot 10^6 \times 40 \times 10^{-9} \\ &\quad + 250 \cdot 10^6 \times 10 \times 10^{-9} \\ &= 32.5 \text{ [J]} \end{aligned}$$

Exemplu DVS: c) Tensiune optimă

V_{dd} [V]	5.0	4.0	2.5
Energy per cycle [nJ]	40	25	10
f_{max} [MHz]	50	40	25
cycle time [ns]	20	25	40



$$E_c = 10^9 \times 25 \times 10^{-9} = 25 \text{ [J]}$$



$$z = a \cdot x + (1-a) \cdot y$$

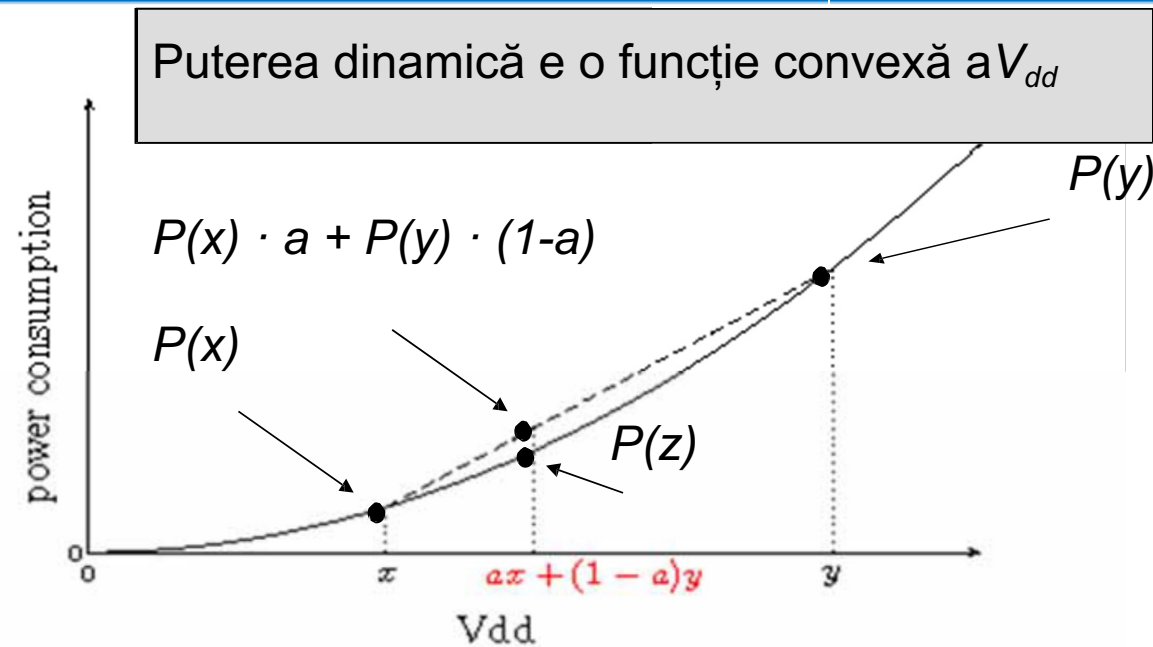
Execută task-ul în timpul fix T cu tensiunea variabilă $V_{dd}(t)$:

gate delay: $\tau \sim \frac{1}{V_{dd}}$

execution rate: $f(t) \sim V_{dd}(t)$

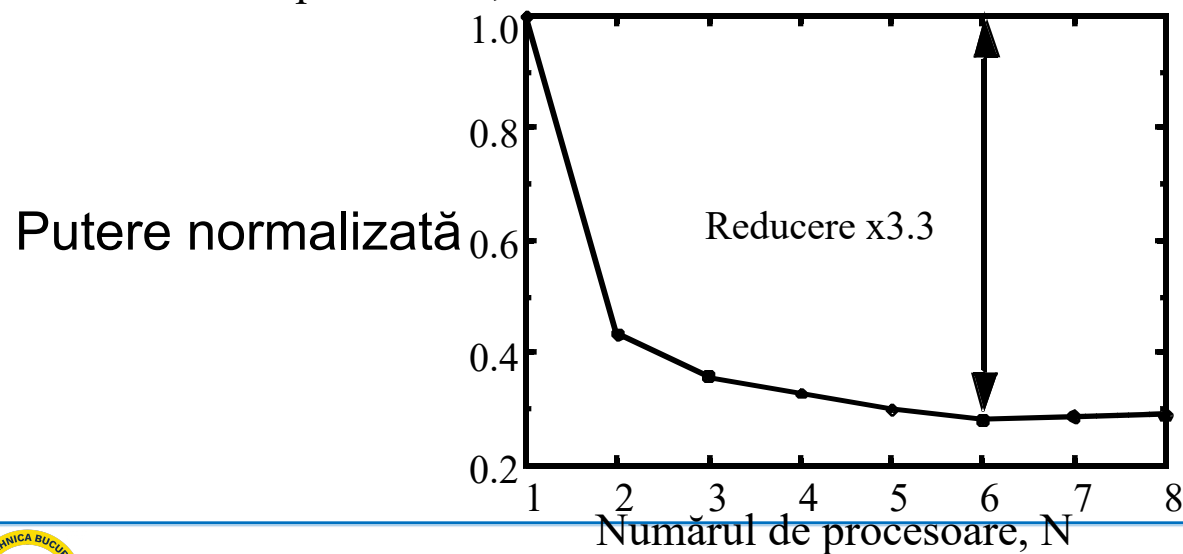
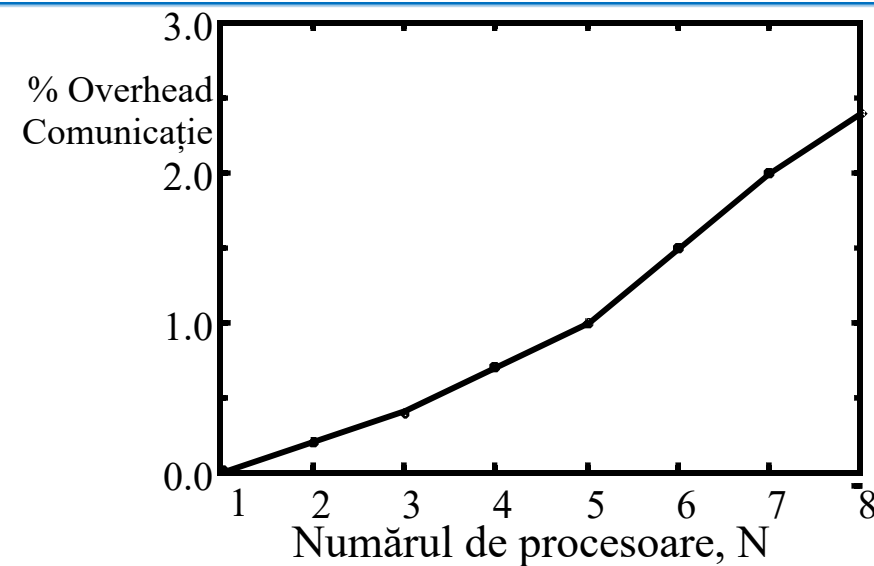
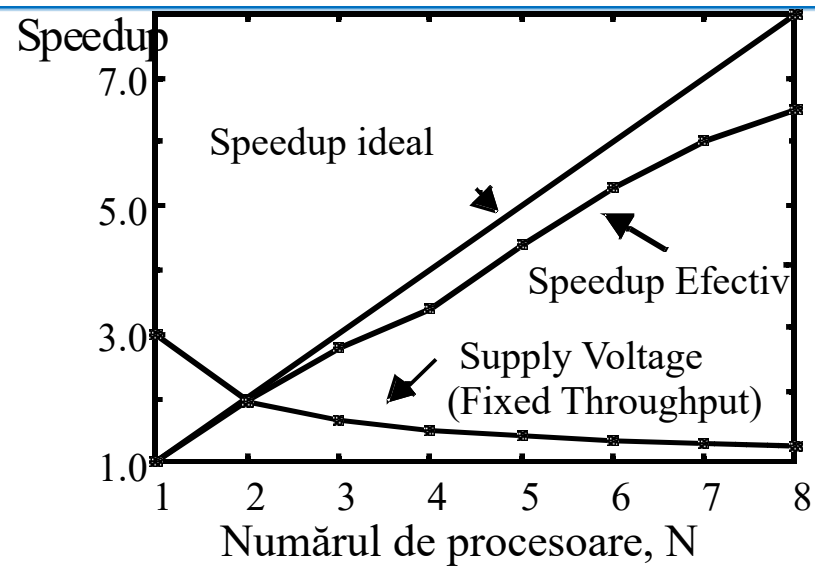
invariant: $\int V_{dd}(t) dt = \text{const.}$

- **cazul A**: execută la tensiunea x pentru $T \cdot a$ unități de timp și la tensiunea y pentru $(1-a) \cdot T$ unități de timp;
Consumul de energie: $T \cdot (P(x) \cdot a + P(y) \cdot (1-a))$
- **cazul B**: execută la tensiunea $z = a \cdot x + (1-a) \cdot y$ pentru T unități de timp; consumul de energie $T \cdot P(z)$



- ▶ Dacă este posibil, rularea la o frecvență constantă (tensiune) minimizează consumul de energie pentru dynamic voltage scaling:
 - **cazul A** este întotdeauna cel mai rău dacă consumul de putere este o funcție convexă a tensiunii de alimentare

Voltage Scaling - exemplu



Managementul energetic la nivel de sistem

Aplicație	-> Exportarea job-urilor comp. intensive
Algoritm	-> Procesare variabilă în funcție de calitate
Cod Sursă	-> Structuri de date îmbunătățite
Compiler	-> Compilare energy-aware
Runtime/OS	-> Just-in-time scheduling
ISA	-> ISA redus
Microarhitectura	-> Filter cache
Logica	-> Clock gating
Circuit	-> Reducerea tensiunii de alimentare. Paralelizare

- Înlocuirea hard-discului cu memorie flash
 - Consum scăzut și viteză comparabilă cu DRAM
 - Ștergerea are totuși o latență mare
- Echipamente wireless de comunicație
 - Idle mode la transmițător
 - Posibilitatea de modificare a puterii de emisie
- Display și backlight
 - Tehnicile de reducere a consumului pot micșora timpul de viață