

## Caratteristiche dinamiche

- In presenza di segnali lentamente variabili nel tempo le caratteristiche delle commutazioni possono essere determinate sulle caratteristiche statiche delle porte logiche. Questo equivale a trascurare integralmente l'effetto delle capacità parassite sul circuito.
- In generale vista l'elevata frequenza di funzionamento dei circuiti questo non è possibile ed è invece necessario definire un opportuno insieme di metriche che possano rappresentare le caratteristiche delle porte logiche dal punto di vista dinamico a livelli di astrazione superiori a quello circuitale

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



27

## Cifre di merito delle caratteristiche dinamiche (invertitore)

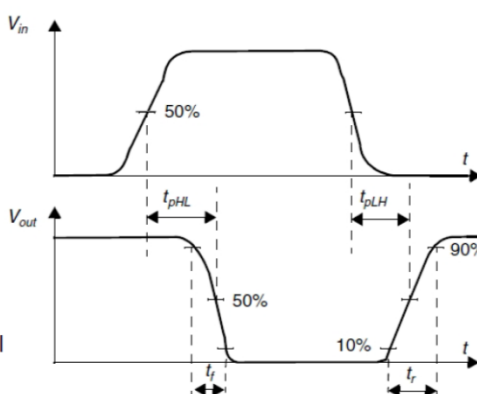
$t_{pHL}$  = tempo fra una variazione del 50% dell'ingresso ed una del 50% dell'uscita quando l'uscita commuta dal livello alto al livello basso

$t_{pLH}$  = tempo fra una variazione del 50% dell'ingresso ed una del 50% dell'uscita quando l'uscita commuta dal livello basso al livello alto

$$t_p = (t_{pHL} + t_{pLH}) / 2$$

$t_r$  = tempo di variazione dell'uscita dal 10% del valore nominale alto al 90%

$t_f$  = tempo di variazione dal 90% del valore nominale alto al 10%



(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



28

## Caratteristiche dinamiche

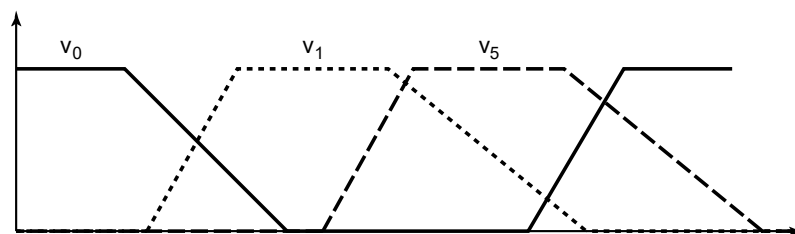
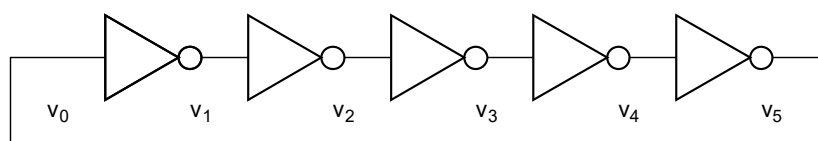
- $t_{pHL}$ ,  $t_{pLH}$ ,  $t_p$ ,  $t_r$  e  $t_f$  in generale dipendono dalla porta logica considerata, dal suo fan-in, dal suo fan-out, dalla configurazione degli ingressi che produce la variazione dell'uscita, dalla temperatura, etc.
- Non è dunque possibile dare un unico valore di questi parametri rappresentativo della tecnologia con cui sono realizzati.
- A livello di caratterizzazione della tecnologia si utilizzano principalmente due metriche
  - il tempo di propagazione dell'inverter con fan out = 4
  - il tempo di propagazione dell'inverter determinato utilizzando oscillatori ad anello.
- Come vedremo studiando la metodologia del logical effort  $T_{fo4}$  è un valore che consente stime di ritardo di caso peggiore in un certo numero

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



29

## Oscillatore ad anello (ring oscillator)



$$T = 2 \times t_p \times N$$

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



30

## Consumo di potenza

- Il funzionamento di qualsiasi circuito elettronico non adiabatico, quindi anche delle porte logiche dei circuiti digitali per come li conosciamo attualmente, richiede energia e quindi implica un consumo di potenza.
- Il consumo di potenza è un parametro fondamentale per misurare le caratteristiche di una tecnologia, in particolar modo nei sistemi moderni contenenti milioni di gate
- Il consumo di potenza è infatti oggi il limite fondamentale alla complessità dei circuiti. I moderni sistemi elettronici digitali sono fondamentalmente «power constrained»
- In genere la potenza dissipata da una porta logica si divide in 2 componenti:
- **Statica** (consumata in situazione di stabilità degli ingressi e dunque dell'uscita),  $P_{st}$
- **Dinamica** (consumata in presenza di commutazioni degli ingressi e dunque dell'uscita). Questa componente aumenta all'aumentare del numero di commutazioni per unità di tempo, e normalmente si divide in
  - Potenza dinamica indispensabile per far variare la tensione di uscita,  $P_{dyn}$
  - Potenza di corto circuito dovuta a non idealità degli switch utilizzati,  $P_{sc}$

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



31

## Consumo di potenza statico

- Consideriamo un generico circuito avente  $N$  terminali di comunicazione con il mondo esterno, comprensivi di tutti i segnali di ingresso e uscita e delle alimentazioni
- Indichiamo con  $V_i$  la tensione del terminali  $i$ -esimo rispetto al riferimento e con  $I_i$  la corrente che fluisce attraverso il terminale intesa positiva se entrante nel circuito
- Il consumo di potenza statico del circuito in presenza di tensioni e correnti tutte costanti nel tempo (da misurare in Watt) vale

$$P_{st} = \sum_{i=1}^N V_i I_i$$

- Se in uno o entrambi gli stati logici abbiamo un percorso di corrente statico dall'alimentazione verso la massa o verso il carico allora avremo certamente un consumo statico (esempio degli invertitori «a rapporto» con un solo switch sulla rete di pull-up o pull-down)

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



32

## Consumo di potenza dinamico

- Abbiamo visto che la variazione della tensione di uscita è prodotta da momentaneo squilibrio tra la conducibilità di due reti
  - **rete di pull-up** che connette l'uscita all'alimentazione e che tende a portare  $V_o$  al valore alto  $V_{oH}$  (transitorio di salita con carica della capacità del nodo di uscita)
  - **rete di pull-down** che connette l'uscita alla massa e che tende a portare  $V_o$  al valore basso  $V_{oL}$  (transitorio di discesa con scarica della capacità del nodo di uscita)
- Per sistemi alimentati tra una sola tensione positiva e massa la scarica può avvenire senza assorbimento di energia dall'alimentazione; non altrettanto per la carica.

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



33

## Potenza istantanea, media, di picco

Potenza istantanea assorbita dall'alimentazione:

$$P(t) = v(t) \cdot i(t) = V_{DD} i(t)$$

Potenza di picco assorbita dall'alimentazione:

$$P_{\text{peak}} = V_{DD} I_{\text{peak}} = \max\{P(t)\}$$

Potenza media assorbita dall'alimentazione nel periodo tra  $t$  e  $(t+T)$ :

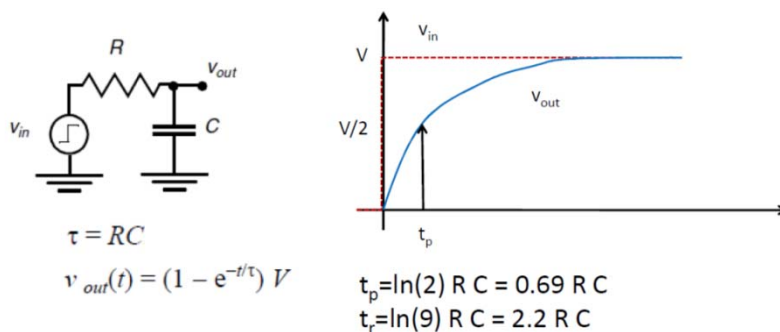
$$P_{\text{ave}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} P(t) dt = \frac{V_{DD}}{T} \int_t^{t+T} I_{DD}(t) dt$$

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



34

## Energia e potenza durante la fase di carica



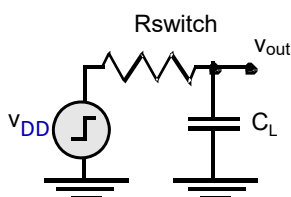
- $V_{in}$  rappresenta la tensione di alimentazione che viene improvvisamente connessa al carico tramite la resistenza  $R$  dello switch (pMOS).  $C$  rappresenta la capacità di ingresso delle porte logiche a valle di quella considerata

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



35

## Energia e potenza durante la fase di carica



Supponendo di consentire al transitorio di esaurirsi completamente in un tempo infinito fino al raggiungimento del valore asintotico di tensione

EDD=energia assorbita dall'alimentazione

ECL= energia immagazzinata in  $C_L$

$$E_{DD} = \int_0^{\infty} P(t) dt = V_{DD} \int_0^{\infty} I_{DD}(t) dt = V_{DD} \int_0^{V_{DD}} C_L dV_{out} = C_L V_{DD}^2$$

$$E_{CL} = \int_0^{\infty} P_{CL}(t) dt = \int_0^{\infty} V_{out}(t) I_{CL}(t) dt = \int_0^{V_{DD}} C_L V_{out} dV_{out} = C_L V_{DD}^2 / 2$$

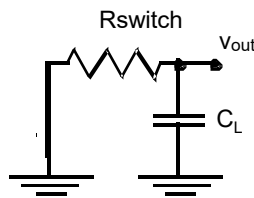
Metà dell'energia assorbita dall'alimentazione viene immagazzinata nella capacità, l'altra metà viene dissipata nella resistenza dello switch

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



36

## Energia e potenza durante la fase di scarica



- Durante la fase di scarica non esiste connessione tra carico e alimentazione.
- La tensione  $V_{out}$  su  $C_L$  parte da un valore  $V_{OH}$  (idealmente  $=V_{DD}$ ) e decresce fino a 0 se la rete di pull down non si spegne o stabilizza prima.
- L'energia immagazzinata nella capacità pertanto viene dissipata sulla resistenza della rete di pull-down

$$E_{CL} = \int_0^{\infty} P_{CL}(t) dt = \int_0^{\infty} -V_{out}(t) I_{CL}(t) dt = \int_{V_{DD}}^0 -C_L V_{out} dV_{out} = C_L V_{DD}^2 / 2$$

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



37

## Consumo di potenza dinamico

- Supponiamo che le commutazioni avvengano con transizioni istantanee degli ingressi e attraverso switch idealmente privi di corrente di perdita nello stato OFF; considerando inoltre  $V_{OL}=0V$ ,  $V_{OH}=V_{DD}$  e dunque il massimo swing logico possibile.
- Supponiamo inoltre che si abbia un ciclo completo  $V_{iL} \rightarrow V_{iH} \rightarrow V_{iL}$  ogni  $T$  secondi (frequenza di clock  $f=1/T$ )
- L'assorbimento di energia avverrà esclusivamente durante il transitorio di salita ( $E_{DD}=0.5 C_L V_{DD}^2$ ) ma l'energia dissipata per nel circuito ad ogni periodo di clock sarà  $E=C_L V_{DD}^2$ .
- Detta  $P_{01}$  la probabilità che l'uscita del circuito passi dal valore basso a quello alto in un dato ciclo di clock (attività del circuito) abbiamo che il consumo di potenza dinamico vale

$$P_{dyn} = P_{01} * C_L * f * V_{DD}^2$$

(c) Luca Selmi - Univ. di Modena



38

## Ulteriori metriche dinamiche

**Power-Delay Product (PDP) =**

$$E = \text{Energy per operation} = P \times t_p$$

**Energy-Delay Product (EDP) =**

$$\text{quality metric of gate} = E \times t_p$$