

### Procedimento transitorio:

- Per  $t \rightarrow 0^-$ ,
  - calcolare variabile di stato prima dell'inizio del transitorio
  - In questa fase il condensatore/induttore si comporta come circuito aperto/cortocircuito
  - Sfrutterò nella fase 2 la continuità della variabile di stato
- Per  $t \rightarrow 0^+$  (per var. NON di stato es.  $v_x, i_x$ ) ,
  - (Eventuale chiusura interruttore)
  - Sfrutto continuità variabile di stato:**  
 $v_C(t_0^-) = v_C(t_0^+)/i_L(t_0^-) = i_L(t_0^+)$
  - Sostituisco al transitorio GENERATORE IDEALE DI TENSIONE/ CORRENTE con valore pari alla variabile di stato appena calcolata**

$$E = V_C(t \rightarrow 0^-) \quad I = I_L(t \rightarrow 0^-)$$

- Per  $t \rightarrow \infty$  /  $t > 0$  :

#### (a) Soluzione di tipo esponenziale

i. Formule variabili di stato:

$$\begin{aligned} V_C(t) &= V_{C_\infty} + [V_C(0) - V_{C_\infty}] e^{-\frac{t}{\tau}} \\ I_L(t) &= I_{L_\infty} + [I_L(0) - I_{L_\infty}] e^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned}$$

ii. Formule per le grandezze non di stato:

$$\begin{aligned} I_C(t) &= I_{C_\infty} + [I_C(0^+) - I_{C_\infty}] e^{\frac{-t}{\tau}} \\ V_L(t) &= V_{L_\infty} + [V_L(0^+) - V_{L_\infty}] e^{\frac{-t}{\tau}} \end{aligned}$$

iii. Qui, siamo ancora a regime: il condensatore/induttore si comporta come circuito aperto/cortocircuito

iv. Cerco la variabile di stato per  $t \rightarrow \infty$

v. Cerco  $\tau$ :

- Mi serve  $R_{eq}$  ai morsetti di dove c'è transitorio
- Spengo generatori non pilotati**
- uso generatore sonda (c.g.) - cerco corrente che passa sul ramo della sonda in funzione di  $V_S$ :  $\rightarrow I_S(V_S)$

$$R_{eq} = \frac{V_S}{I_S(V_S)}$$

D. Calcolo  $\tau$ :

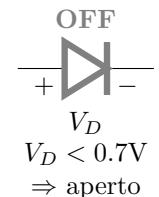
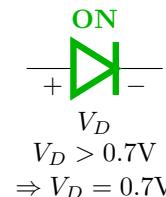
$$\tau = C \cdot R_{eq} = \frac{L}{R_{eq}}$$

### Grafico

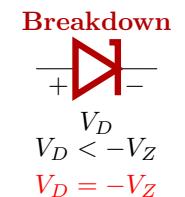
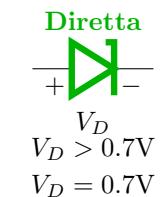
- Traccio asintoto
- Sfrutto proprietà dell'esponenziale: tangente al grafico in  $t = 0$  interseca il valore asintotico dopo  $\Delta t = \tau$
- Dopo  $t = 5\tau$  la funzione assume valore asintotico

### Diodi

#### 1. Diodo normale:

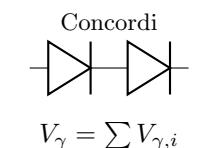
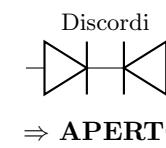


#### 2. Diodo Zener:



**ATTENZIONE:** In breakdown, la tensione  $V_D = -V_Z$  ha polarità opposta rispetto ai +0.7V della conduzione diretta!

#### 3. Configurazioni in serie:



$\Rightarrow$  APERTO

$$V_\gamma = \sum V_{\gamma,i}$$

#### ★ TRUCCO PRATICO - Verifica stato diodo:

Quando sei in un intorno della soglia ( $V_D \approx 0.7V$ , anche infinitesimalmente superiore), le correnti sono molto basse.

$\Rightarrow$  Per verificare se il diodo si accende puoi ignorare le resistenze in serie ( $I \approx 0 \Rightarrow \Delta V_R \approx 0$ ).

**Uso nei transitori:** A fine esercizio, verifica che l'ipotesi sul diodo (ON/OFF) resti valida in:

- $\hat{T}^-$  (istante prima della transizione)
- $\hat{T}^+$  (istante dopo della transizione)
- $t \rightarrow \infty$  (regime)

## Resistenze e Alimentazioni

Resistenze in parallelo:

### 1. Caso con 2 resistenze:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

### 2. Caso generale (n resistenze):

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

### △ NOTA IMPORTANTE - Tensioni di alimentazione

Le tensioni fornite dalle alimentazioni sono le **massime e minime** possibili nel circuito.

I NODI della rete NON possono mai avere tensioni:

- Più alte di  $V_{max}$  (alimentazione massima)
- Più basse di  $V_{min}$  (alimentazione minima)

**ATTENZIONE:** Questo vale per le tensioni dei **NODI** (riferite a massa).

Le **cadute di tensione** (misurate tra due nodi diversi) possono superare questi limiti!

**Uso pratico:** Fondamentale quando si fanno ipotesi sullo stato dei diodi (ON/OFF). Se un'ipotesi porta un nodo oltre  $V_{max}$  o sotto  $V_{min}$ , l'ipotesi è **sbagliata**.

## Capacità: Formule e Comportamento

### 1. Tensione del condensatore:

$$V_C(t) = V_C(0^+) + [V_C(\infty^*) - V_C(0^+)] \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$V_C(0^+)$ : iniziale;  $V_C(\infty^*)$ : a regime;  $\infty^* \neq \infty$

### 2. Corrente: $I_C(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}$

**Proprietà:** La **corrente varia istantaneamente**; La **tensione** NON commuta:  $V_C(t_0^-) = V_C(t_0^+)$

### ★ REGOLA D'ORO - A REGIME

A regime ( $t \rightarrow \infty$ ):  $\frac{dV_C}{dt} = 0 \Rightarrow I_C = 0$   
Condensatore = **CIRCUITO APERTO**

Per calcolare  $V_C(\infty)$ :

1. Sostituisci C con **circuito aperto**
2. Risovi il circuito semplificato
3. Calcola la tensione nel punto dove c'era C

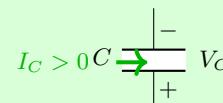
Es:  $V \xrightarrow{R_1} \bullet \xrightarrow{R_2} GND + C \parallel R_2$   
 $\Rightarrow V_C(\infty) = V \frac{R_2}{R_1 + R_2}$  (partitore)

### 3. Ripple: $\Delta V_{out} = V_{picco} \frac{\Delta T}{\tau} = V_{picco} \frac{T}{f \cdot \tau}$

### 4. Comportamento fisico ( $Q = C \cdot V$ ; $I = C \frac{dV}{dt}$ )

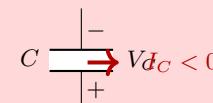
**CARICA** ( $\frac{dV_C}{dt} > 0$ ): Corrente **ENTRA** ( $I_C > 0$ )  
Il condensatore accumula energia;  $V_C \uparrow$

Corrente ENTRA



**SCARICA** ( $\frac{dV_C}{dt} < 0$ ): Corrente **ESCE** ( $I_C < 0$ )  
Il condensatore rilascia energia;  $V_C \downarrow$

Corrente ESCE



**Regola:**  $V_C \uparrow \Rightarrow$  CARICA;  $V_C \downarrow \Rightarrow$  SCARICA; segno  $I_C$  indica verso

## Transitori con gradini multipli

Formula tempo centrale  $\hat{T}$ :

$$V_C(\hat{T}) = V_C(0^+)_{\hat{T}} + [V_C(\infty^*) - V_C(0^+)_{\hat{T}}] \left(1 - e^{-\frac{\hat{T}}{\tau}}\right)$$

**Prassi:** segnale rettangolare  
salita → plateau → discesa

Procedimento step-by-step:

### 1. FASE 1 - Salita

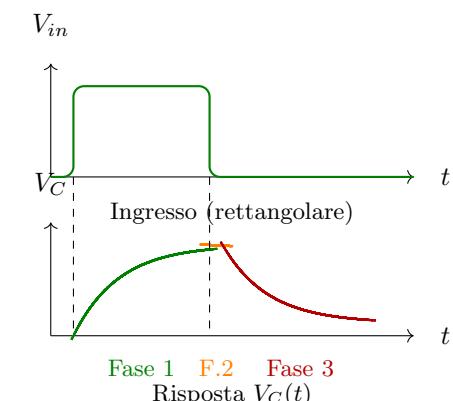
- Analizza  $t = 0^-$  (condizioni iniziali)
- $V_C(0^+)$  per continuità
- Determina stato diodi
- Calcola  $V_C(\infty^*)$
- Applica formula con  $\tau$

### 2. FASE 2 - Plateau

- Se durata  $\gg 5\tau$ : regime
- Se durata  $< 5\tau$ : calcola  $V_C$  fine
- Verifica diodi (Box 7)

### 3. FASE 3 - Discesa

- $V_C(0^+) = V_C(\text{fine plateau})$
- Ridetermina stato diodi
- Nuovo  $V_C(\infty^*)$
- Applica formula



## Verifica ipotesi stato diodi

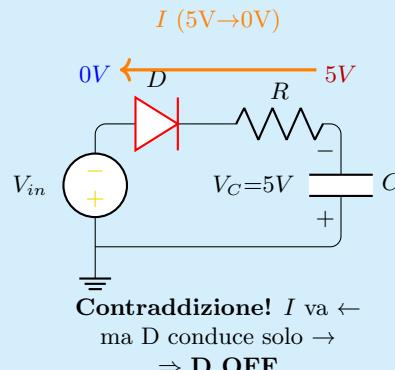
### △ VERIFICA FONDAMENTALE

Verifica ipotesi diodo (ON/OFF) rimanga valida per tutto il transitorio

#### FASE 0: Metodo intuitivo

**Regola:**  $I$  scorre da  $V_+$  a  $V_-$

- 1)  $V_C(0^+)$  continuità
- 2) Trova  $V_{max}$
- 3)  $I$  va da  $V_{max}$  a  $V_{min}$
- 4) Compatibile con diodo?
- 5) No  $\Rightarrow$  cambia stato



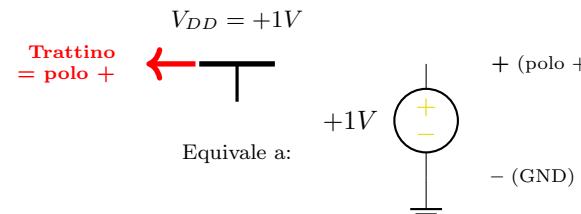
1. Ipotesi (es: D ON)
2. Risolvi (ON: gen 0.7V; OFF: aperto)
3. Calcola  $V_C(t)$
4. Verifica  $\forall t$ :
  - ON:**  $I_D(t) > 0$ ? No  $\rightarrow$  errore
  - OFF:**  $V_D(t) < 0.7V$ ? No  $\rightarrow$  errore
5. Se errore: dividi in 2 fasi ( $t^*$  cambio), ricalcola

## Notazione alimentazioni

### NOTAZIONE ALIMENTAZIONI

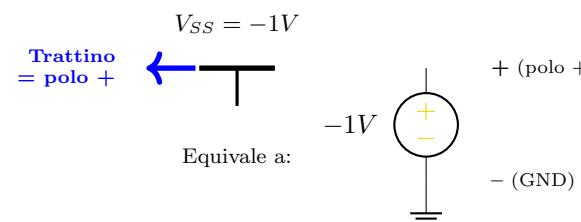
**REGOLA D'ORO:** Il trattino indica SEMPRE il polo + del generatore, sia con tensione positiva che negativa!

#### Caso 1: $V_{DD} = +1V$ (alimentazione positiva)



Tensione  $+1V \rightarrow$  polo + sul trattino, tutto normale

#### Caso 2: $V_{SS} = -1V$ (alimentazione negativa)



Tensione  $-1V \rightarrow$  polo + è comunque sul trattino!

**TRUCCO:** Con  $V_{SS} = -1V$  puoi ridisegnare il generatore invertendo polarità E segno: diventa  $+1V$  con polo + su GND. Utile per evitare tensioni negative nei calcoli.

## Formazione del Canale nei MOSFET

### 1. Zona OFF (o Cutoff):

- (a) Non c'è formazione del canale.
- (b) Il dispositivo è spento e non permette il flusso di corrente tra drain e source.

### 2. Zona Ohmica (o Triodo):

- (a) Si forma un canale.
- (b) Quando il gate è abbastanza polarizzato (cioè  $V_{GS} > V_{Tn}$  per nMOS o  $V_{GS} < V_{Tp}$  per pMOS), si forma un canale conduttivo tra il drain e il source.
- (c) Il dispositivo si comporta come un **resistore il cui valore varia in base alla tensione  $V_{GS}$** .

### 3. Zona di Saturazione (o Pinch-off):

- (a) Si forma un canale.
- (b) Il canale diventa "strozzato" o "pinched-off" vicino al drain (per il nMOS) o vicino al source (per il pMOS).
- (c) Anche se la tensione  $V_{DS}$  aumenta ulteriormente, la corrente  $I_D$  rimane costante.
- (d) Questo comportamento è **analogo a quello di un generatore di corrente**.

## Overdrive

**Overdrive:** quanto fortemente è acceso il transistor. Differenza fra **tensione G/S e soglia**.

$$V_{OV} = V_{GS} - V_T$$

dove  $V_T = V_{Tn}$ ,  $V_T = V_{Tp}$   
a seconda che si tratti di **nMOS o pMOS**.

Ogni qualvolta in cui un transistor si trova in saturazione, la corrente che scorre da D a S sarà:

$$I_D = k(V_{GS} - V_T)^2 = k \cdot V_{OV}^2$$

## nMOS e pMOS

### Parametri di Transconduttanza:

$$K_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{OX} \frac{W}{L} \quad \text{e} \quad K_p = -\frac{1}{2} \mu_p C_{OX} \frac{W}{L}$$

$\mu_n$  : Mobilità degli elettroni nel nMOS

$\mu_p$  : Mobilità delle lacune nel pMOS

$C_{OX}$  : Capacità per unità di area dell'ossido gate

$W$  : Larghezza del canale

$L$  : Lunghezza del canale

### nMOS:

#### 1. Spegnimento (Cutoff):

$$V_{GS} < V_{Tn}$$

$$I_D = 0$$

Circuito aperto tra drain e source

#### 2. Zona Ohmica (Triodo):

$$V_{GS} > V_{Tn}, \quad V_{DS} < V_{OV}$$

$$I_D = k_p [2(V_{GS} - V_{Tn})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Resistore controllato da tensione

#### 3. Zona di Saturazione (Pinch-off):

$$V_{GS} > V_{Tn}, \quad V_{DS} > V_{OV}, \quad V_{GD} < V_{Tn}$$

Generatore di corrente controllato

### pMOS: $I_D < 0, V_{DS} < 0$

#### 1. Spegnimento (Cutoff):

$$V_{GS} > |V_{Tp}|$$

$$I_D = 0$$

Circuito aperto tra drain e source

#### 2. Zona Ohmica (Triodo):

$$V_{GS} < V_{Tp}, \quad V_{SD} < V_{OV}$$

$$I_D = k_p [2(V_{GS} - V_{Tp})V_{DS} - V_{DS}^2]$$

Resistore controllato da tensione

#### 3. Zona di Saturazione (Pinch-off):

$$V_{GS} < V_{Tp}, \quad V_{SD} > V_{OV}, \quad V_{GD} > V_{TP}$$

Generatore di corrente controllato

## cMOS

### cMOS (Inverter):

- 1. **Ingresso Alto (logica '1')**: rete PULL-UP(pMOS ON SAT, nMOS OFF)

nMOS:  $V_{GS} > V_{th}$  (Conduzione)

pMOS:  $V_{GS} > V_{TP}$  (Cutoff)

Uscita: GND (logica '0')

- 2. **Ingresso Basso (logica '0')**: rete PULL-DOWN(nMOS ON SAT, pMOS OFF)

nMOS:  $V_{GS} < V_{th}$  (Cutoff)

pMOS:  $V_{GS} < V_{TP}$  (Conduzione)

Uscita: VDD (logica '1')

- 3. **Zona intermedia: entrambi in saturazione**  
[.....]

[grafico delle caratteristiche]  
cMOS

**AND/nAND****AND (AND/nAND):****1. Entrata:**

$$A = 0, \quad B = 0$$

Uscita: 0

2.

$$A = 0, \quad B = 1$$

Uscita: 0

3.

$$A = 1, \quad B = 0$$

Uscita: 0

4.

$$A = 1, \quad B = 1$$

Uscita: 1

**XOR/nXOR****XOR (nXOR):****1. Entrata:**

$$A = 0, \quad B = 0$$

Uscita: 0

2.

$$A = 0, \quad B = 1$$

Uscita: 1

3.

$$A = 1, \quad B = 0$$

Uscita: 1

4.

$$A = 1, \quad B = 1$$

Uscita: 0

**Box 19****Box 20****Box 21****OR/nOR****OR (nOR):****1. Entrata:**

$$A = 0, \quad B = 0$$

Uscita: 0

2.

$$A = 0, \quad B = 1$$

Uscita: 1

3.

$$A = 1, \quad B = 0$$

Uscita: 1

4.

$$A = 1, \quad B = 1$$

Uscita: 1

**Box 17****Box 18**

**Box 22**

**Box 23**