

# **ELETTRONICA**

**CdS Ingegneria Biomedica**

## **LEZIONE A.03**

**Circuiti a diodi: configurazioni, analisi, dimensionamento**

**Raddrizzatori a semplice e doppia semionda**

**Raddrizzatori a filtro (L, C e LC)**

**Moltiplicatori di tensione**

**Regolatori a zener**

**Parte 1**

# **Raddrizzatori**

**Definizioni**

**Circuito a semplice semionda**

**Circuiti a doppia semionda**

**Circuiti per sistemi trifasi**

# Ondulazione ed efficienza (1)

## ➤ Raddrizzatore

- Sistema che, alimentato da una sinusoide a valore medio nullo, presenta una tensione di uscita formata da una componente continua e una a valore medio nullo detta ondulazione residua o *ripple*

## ➤ Fattore di ondulazione $RF$

- Rapporto tra valore efficace dell'ondulazione e componente continua dell'uscita (idealmente 0)

## ➤ Efficienza di raddrizzamento $\eta_R$

- Rapporto tra potenza di uscita dovuta alla tensione continua e potenza totale (idealmente 100%)

# Ondulazione ed efficienza (2)

## ➤ Dalle definizioni

- Si possono ricavare le formule necessarie per ottenere le prestazioni delle varie configurazioni

$$v_U(t) = V_U + v_u(t) = V_U + r(t)$$

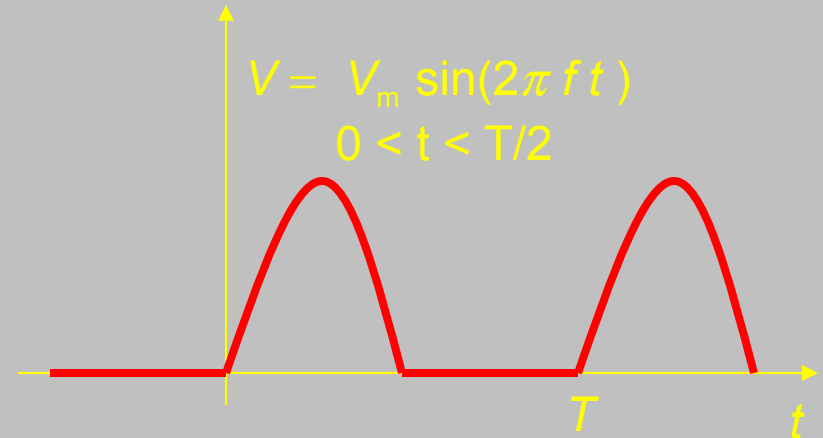
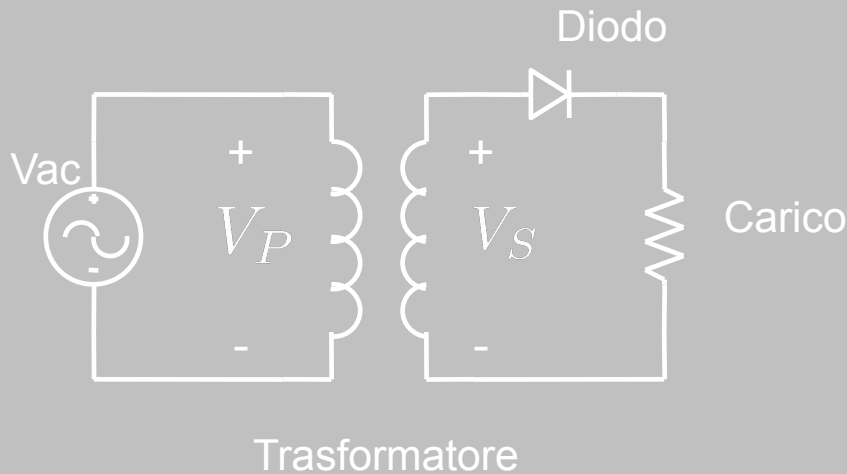
$$V_U = \frac{1}{T} \int_0^T v_U(t) dt \quad V_{\text{ueff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_U(t)^2 dt}$$

$$V_{\text{ueff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (V_U + r(t))^2 dt = V_U^2 + \frac{1}{T} \int_0^T r^2(t) dt = V_U^2 + R_{\text{eff}}^2$$

$$RF = \frac{R_{\text{eff}}}{V_U} = \frac{\sqrt{V_{\text{ueff}}^2 - V_U^2}}{V_U} \quad \eta_R = \frac{V_U^2}{V_{\text{ueff}}^2} \quad (\text{con carico resistivo})$$

# Raddrizzatore a semplice semionda

- Problema: corrente continua nel secondario
  - Può saturare il nucleo del trasformatore



$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

# Raddrizzatore a semplice semionda

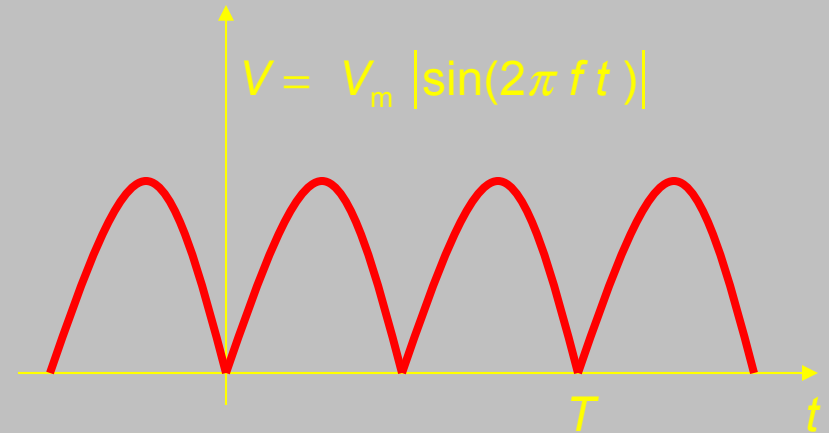
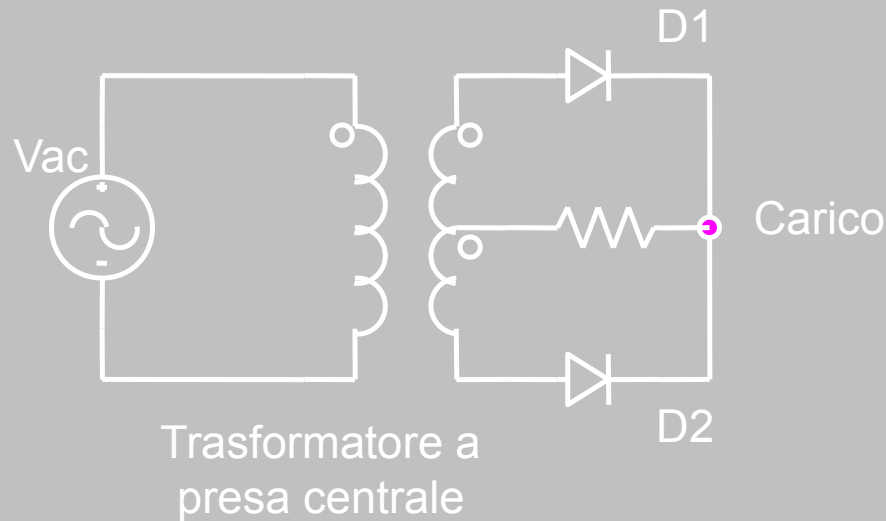
$$V_U = \frac{V_m}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin(\omega t) dt = \frac{V_m}{\pi} = 0.3183 \cdot V_m$$

$$V_{\text{ueff}} = V_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2(\omega t) dt} = V_m \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^{\frac{T}{2}} [1 - \cos(2\omega t)] dt} = \frac{V_m}{2} = 0.5 \cdot V_m$$

$$RF = \frac{\sqrt{V_{\text{ueff}}^2 - V_U^2}}{V_U} = \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1} = 1.211$$

$$\eta_R = \frac{V_U^2}{V_{\text{ueff}}^2} = \frac{4}{\pi^2} = 0.4053$$

# Raddrizzatore a doppia semionda



# Raddrizzatore a doppia semionda

$$V_U = \frac{2V_m}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin(\omega t) dt = \frac{2V_m}{\pi} = 0.6366 \cdot V_m$$

$$V_{\text{ueff}} = V_m \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2(\omega t) dt} = V_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} [1 - \cos(2\omega t)] dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.7101 \cdot V_m$$

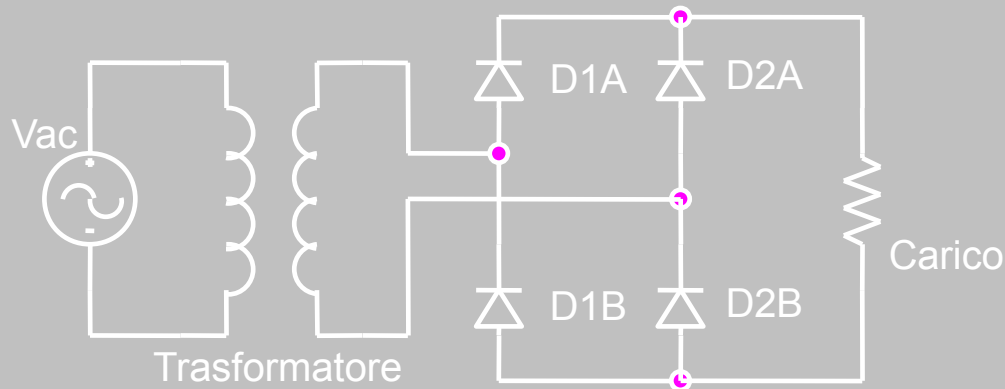
$$RF = \frac{\sqrt{V_{\text{ueff}}^2 - V_U^2}}{V_U} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1} = 0.4834$$

$$\eta_R = \frac{V_U^2}{V_{\text{ueff}}^2} = \frac{8}{\pi^2} = 0.8106$$

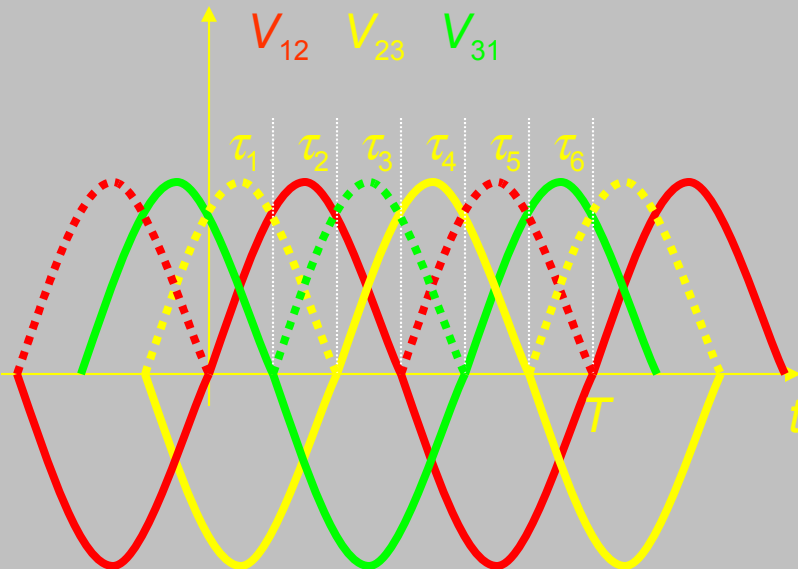
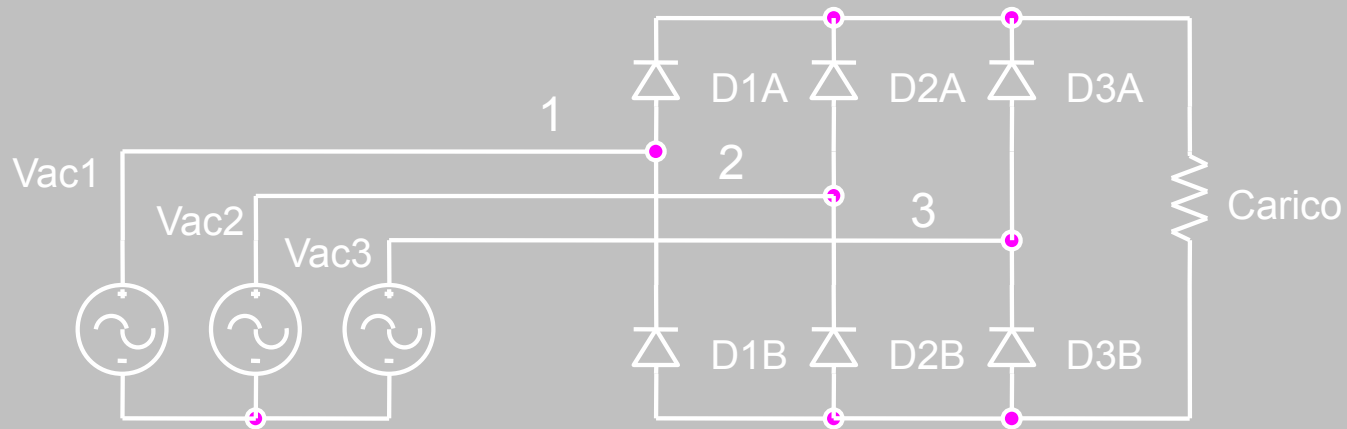


# Raddrizzatore a ponte di Graetz

- **Semplificazione del doppia semionda**
  - **Non richiede trasformatore a presa centrale**
  - **Miglior impiego del rame**
  - **Massima tensione inversa  $\cong V_{acMAX}$  per ogni diodo**
    - **Contro un valore doppio nella versione precedente**



# Raddrizzatore esafase



$\tau_1$	<b>D3A, D2B</b>
$\tau_2$	<b>D1A, D2B</b>
$\tau_3$	<b>D1A, D3B</b>
$\tau_4$	<b>D2A, D3B</b>
$\tau_5$	<b>D2A, D1B</b>
$\tau_6$	<b>D3A, D1B</b>

# Raddrizzatore esafase

$$V_u = \frac{6V_M}{T} \int_{\frac{2T}{12}}^{\frac{4T}{12}} \sin(\omega t) dt = \frac{3V_M}{\pi} \left( \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right) = \frac{3V_M}{\pi} = 0.9549 \cdot V_M$$

$$\begin{aligned} V_{Ueff} &= V_M \sqrt{\frac{6}{T} \int_{\frac{2T}{12}}^{\frac{4T}{12}} \sin^2(\omega t) dt} = V_M \sqrt{\frac{3}{T} \int_{\frac{2T}{12}}^{\frac{4T}{12}} (1 - \cos(2\omega t)) dt} = \\ &= V_M \sqrt{\frac{3}{T} \left( \frac{T}{6} + \frac{\sqrt{3}}{2\omega} \right)} = V_M \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi}} = 0.9958 \cdot V_M \end{aligned}$$

$$RF = \frac{\sqrt{V_{Ueff}^2 - V_u^2}}{V_u} = 0.04197$$

$$\eta_R = \frac{V_u^2}{V_{Ueff}^2} = 0.9982$$

# Osservazioni

- **Le prestazioni aumentano all'aumentare delle fasi**
  - **La tensione di uscita non è mai nulla**
  - **Ma i sistemi polifase sono disponibili solo per grandi potenze**
- **Conclusione**
  - **Per le applicazioni comuni è difficile andare oltre al raddrizzatore a doppia semionda**
  - **Occorrono sistemi di filtraggio per aumentare l'efficienza di raddrizzamento**

Parte 2

# Filtri per alimentatori

Generalità

Filtro induttivo

Filtro capacitivo

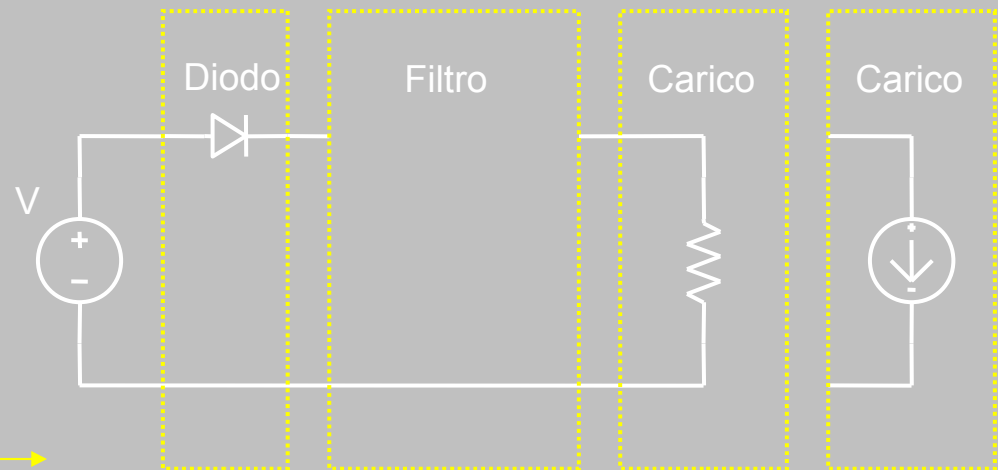
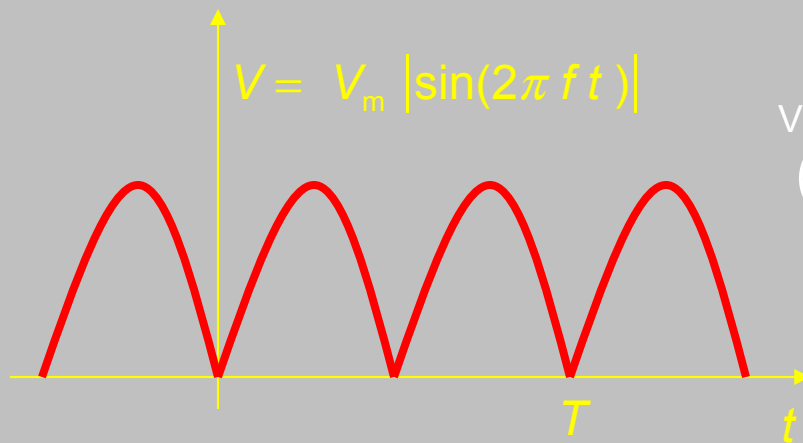
Filtro LC

# Generalità

- **Per aumentare l'efficienza di conversione occorre**
  - Usare almeno un sistema a doppia semionda
  - Usare almeno un elemento per immagazzinare energia
    - Induttore, condensatore o entrambi
    - Erogano corrente al carico quando i diodi sono interdetti
- **Per modellare il carico si può ricorrere**
  - A una resistenza di carico
  - A un generatore di corrente costante
    - Questo caso si verifica di frequente nei circuiti elettronici, dove i sistemi a valle dell'alimentatore sono progettati per assorbire una corrente costante

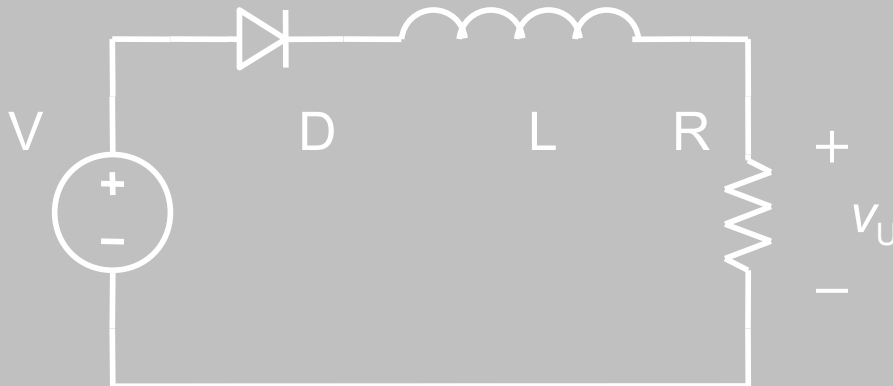
# Modello

- **Modello per la valutazione del funzionamento**
  - **Trasformatore e diodi ideali (doppia semionda)**
  - **In uscita resistenza o generatore di corrente**



# Raddrizzatore a filtro L

- Viene posto un induttore in serie al carico
  - Tende a garantire la costanza della corrente nel carico
    - Esiste un legame tra  $L$ ,  $R$  (o  $i_U$ ),  $T$  e ondulazione residua
    - I diodi si scambiano di ruolo con correnti non nulle per  $v_{in} = 0$
- Non adatto per carichi digitali
  - A causa delle brusche variazioni di assorbimento



$$v_{in} = v_u + \frac{L}{R} \frac{dv_u}{dt}$$

$$v_u(j\omega) = v_{in}(j\omega) \frac{R}{R + j\omega L}$$



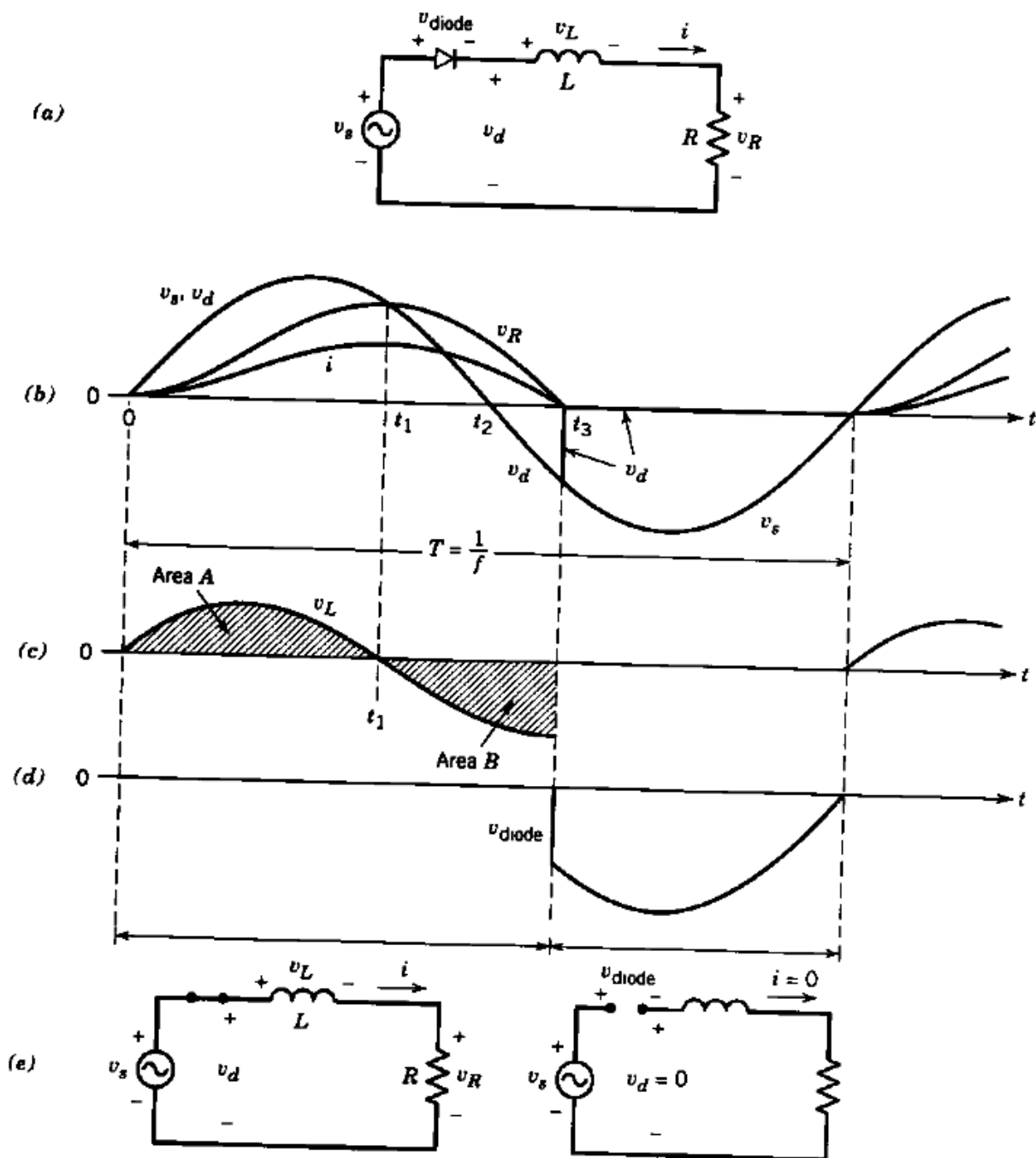
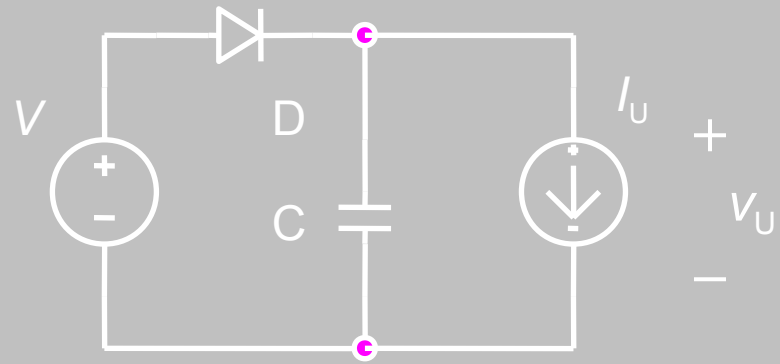
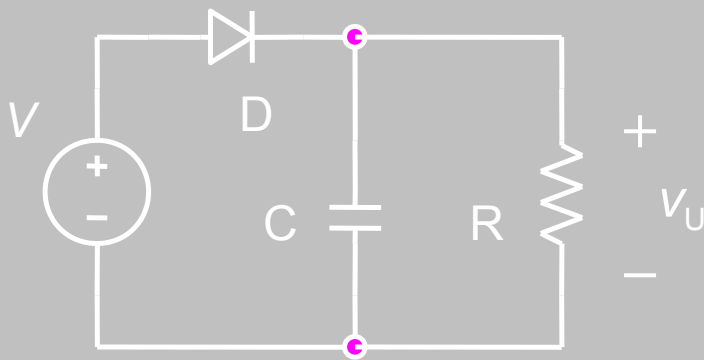


Figure 5-3 Basic rectifier with an inductive load.

# Raddrizzatore a filtro C (1)

- Viene posto un condensatore in parallelo al carico
  - Si carica quando la tensione di ingresso è massima
  - Alimenta il carico quando il diodo si interdice
- Il diodo cambia stato periodicamente
  - **Attenzione: il sistema non è lineare!**



# Raddrizzatore a filtro C (2)

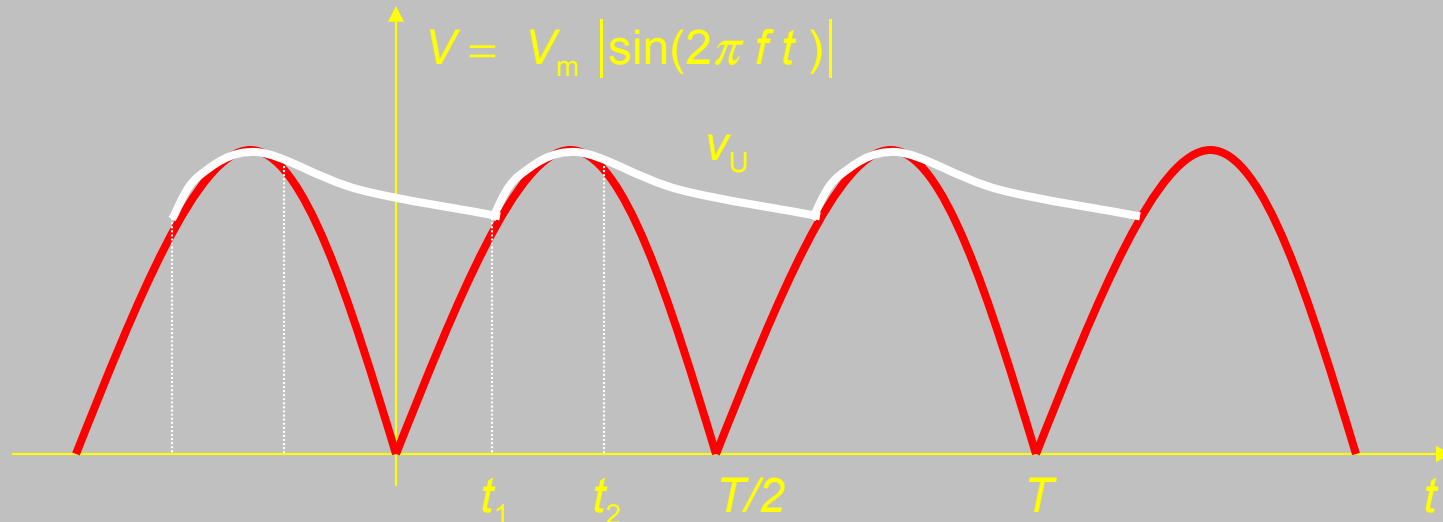
## ➤ Funzionamento

### ➤ Fase di carica

➤ Dal generatore al condensatore e al carico (da  $t_1$  a  $t_2$ )

### ➤ Fase di scarica

➤ Dal condensatore al carico, con diodo interdetto (da  $t_1$  a  $T/2$ )



# Raddrizzatore a filtro C (3)

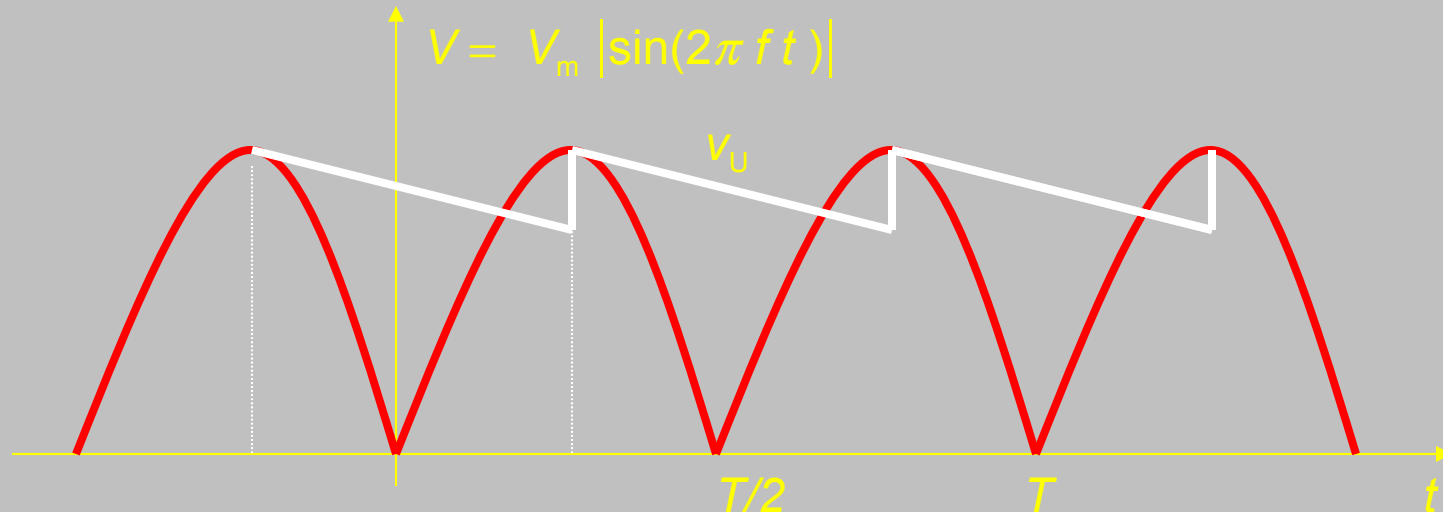
## ➤ Analisi approssimata

### ➤ Carica istantanea e scarica di durata $T/2$

➤ Si assume  $(t_2 - t_1)$  trascurabile rispetto a  $T/2$

➤ Entità della scarica pari a  $\Delta v_U = I_U T / 2C$  con corrente costante

➤ Oppure  $\Delta v_U = V_M (1 - e^{-T/2RC})$  con carico resistivo



# Raddrizzatore a filtro C (4)

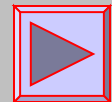
$$V_U = V_m - \frac{\Delta v_U}{2} = V_m - \left( \frac{T}{4C} \right) I_U = V_m - R_R I_U$$

$$\begin{aligned} V_{\text{ueff}} &= \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left( V_m - \frac{I_U t}{C} \right)^2 dt} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left( V_m^2 - 2V_m \frac{I_U t}{C} + \frac{I_U^2 t^2}{C^2} \right) dt} = \\ &= \sqrt{V_m^2 - 2V_m R_R I_U + \frac{4}{3} (R_R I_U)^2} \end{aligned}$$

$$RF = \frac{\sqrt{V_{\text{ueff}}^2 - V_U^2}}{V_U} = \frac{R_R I_U}{\sqrt{3} (V_m - R_R I_U)}$$

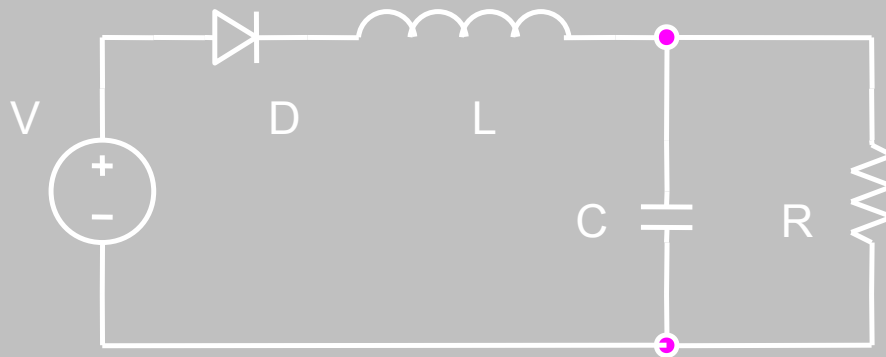
# Progetto di un raddrizzatore a filtro C

- Topologia circuitale
- Specifiche
  - Condizioni dell'ingresso
  - Tensione e massima corrente di uscita
  - Parametri sulla qualità dell'uscita
    - Massimo fattore di ondulazione ammesso
    - Minimo valore assoluto della tensione di uscita (in alternativa)
- Dimensionamento
- Analisi delle prestazioni, ottimizzazione
- Convalida del progetto



# Raddrizzatore a filtro LC

- Sfrutta le caratteristiche positive dei precedenti
  - Corrente quasi costante nei diodi
  - Riduzione dei picchi di assorbimento per caricare la capacità
  - Ridotta influenza dalle variazioni dell'ingresso
  - Bassa resistenza equivalente di uscita
- Usato per gli alimentatori di potenza maggiore



$$v_u(j\omega) = v_{in}(j\omega) \frac{R}{R + j\omega L(1 + j\omega RC)}$$

**Parte 3**

# **Moltiplicatore di tensione**

**Descrizione**

**Schema**

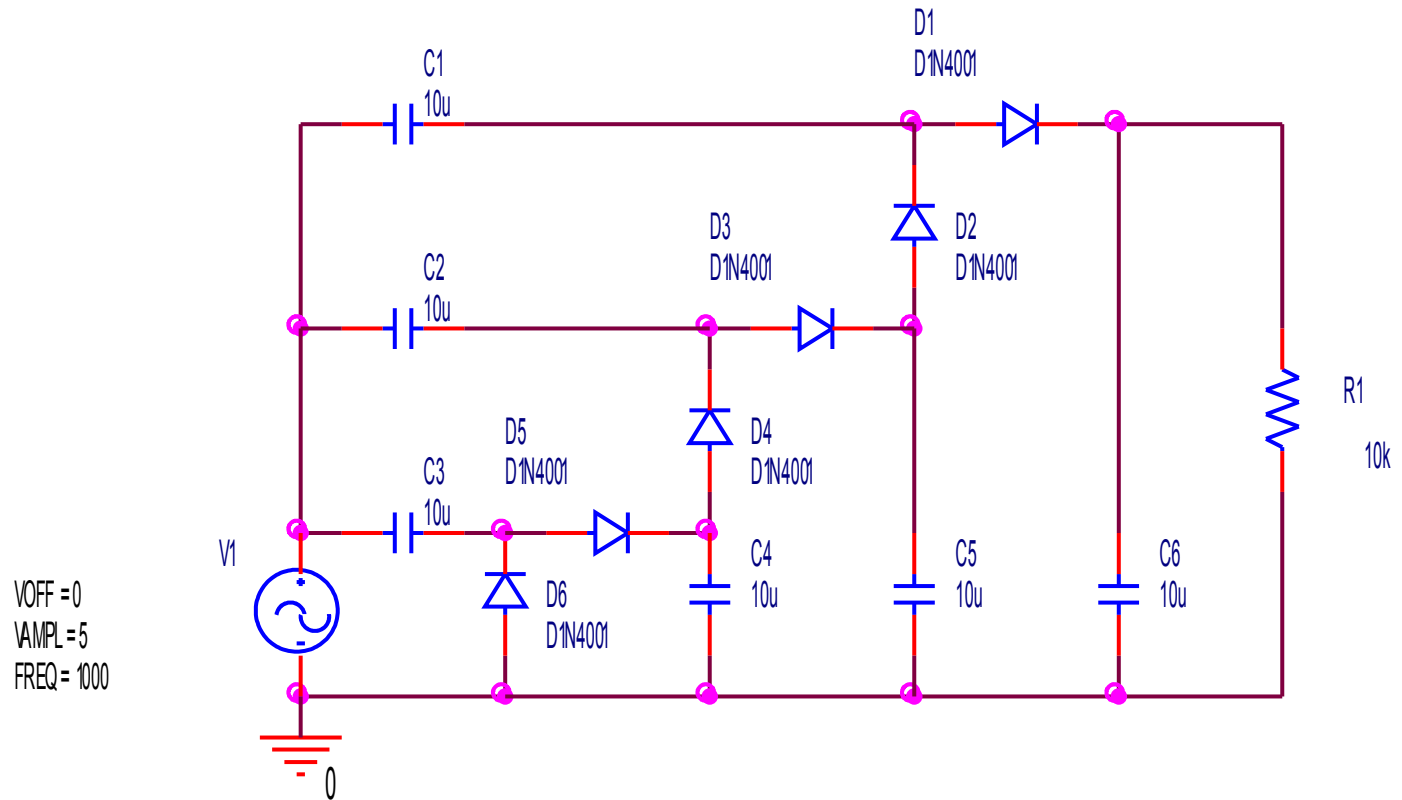
**Funzionamento**



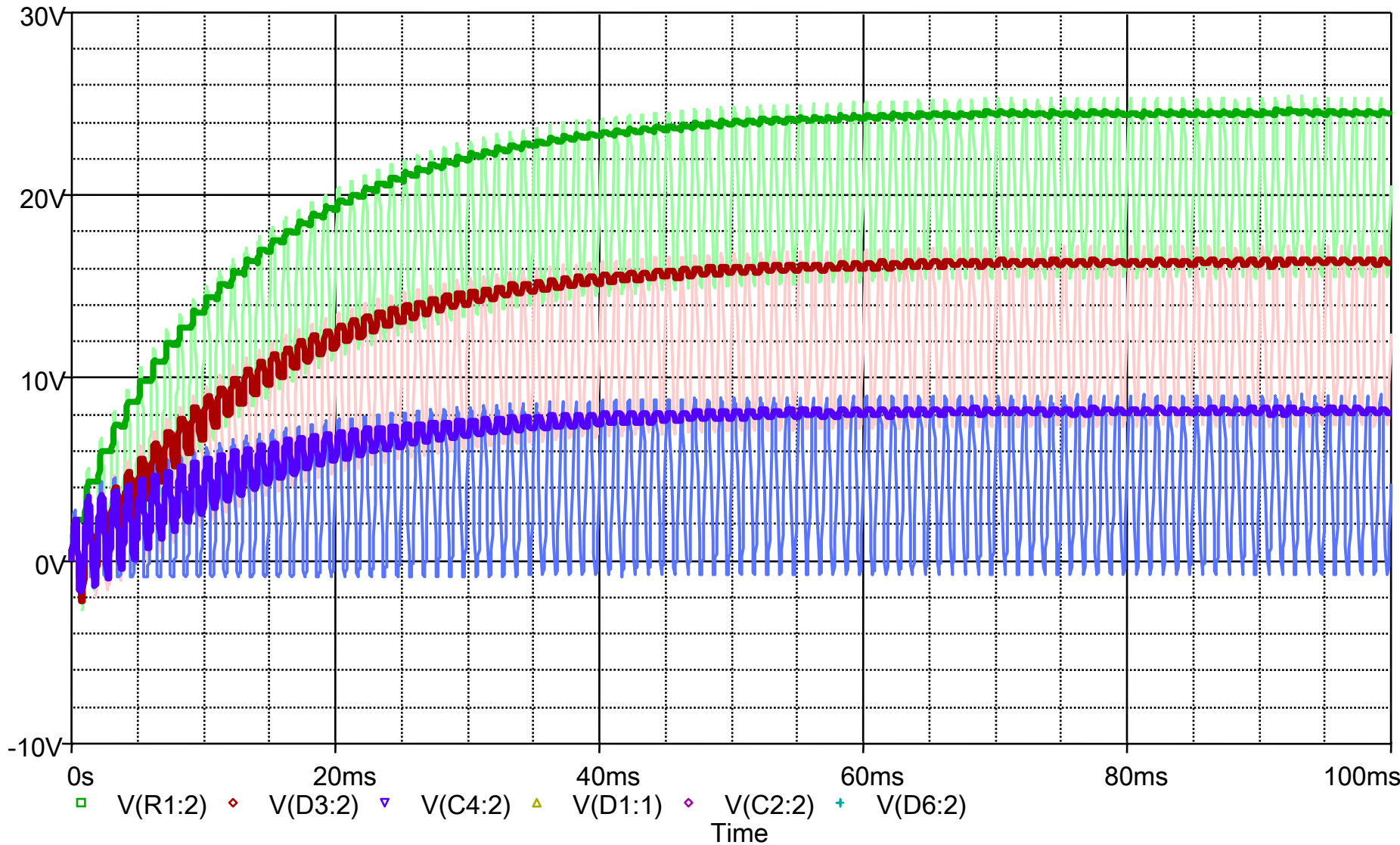
# Moltiplicatori di tensione (1)

- Cascata di fissatori e rivelatori di inviluppo
  - Fissatore a zero
  - Rivelatore di picco ( $V_1 = V_{inpp}$ )
  - Fissatore a  $V_1$
  - Rivelatore di picco ( $V_2 = 2V_{inpp}$ )
  - Fissatore a  $V_2$
  - Rivelatore di picco ( $V_3 = 3V_{inpp}$ )
- Si perdono  $2V_\gamma$  per ogni stadio

# Moltiplicatori di tensione (2)



# Moltiplicatori di tensione (3)



**Parte 5**

# **Regolatore di tipo parallelo** **(shunt regulator)**

**Definizioni**

**Circuito**

**Dimensionamento**

# Definizione di regolatore

- **Sistema per generare una tensione costante**
  - **Adatta per alimentare sistemi elettronici**
- **Caratteristiche ideali**
  - **Indipendente dalle variazioni della tensione di ingresso**
    - Tipicamente per un intervallo pari al  $\pm 10\%$  del valore nominale
  - **Indipendente dalle variazioni di temperatura**
    - In tutto l'intervallo di funzionamento (per esempio  $50^{\circ}\text{C} + 70^{\circ}\text{C}$ )
  - **Indipendente dalle variazioni della corrente nel carico**
    - Da 0 alla corrente massima erogabile  $I_{\text{MAX}}$

# Parametri di prestazione

- **Fattore di regolazione  $S_V$** 
  - Quantifica l'effetto delle variazioni della tensione di ingresso sull'uscita
- **Coefficiente di temperatura  $S_T$**
- **Resistenza di uscita  $r_u$** 
  - Resistenza differenziale dell'uscita

$$S_V = \left| \frac{dv_U}{dv_{IN}} \right|$$

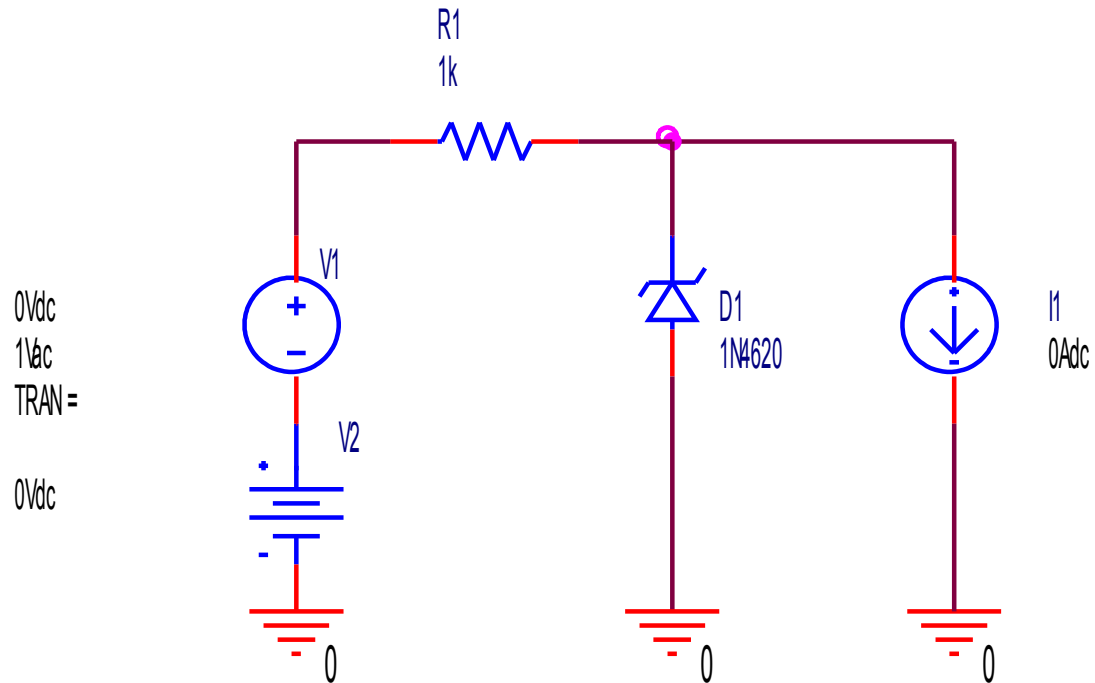
$$S_T = \left| \frac{dv_U}{dT} \right|$$

$$r_u = \left| \frac{dv_U}{di_U} \right|$$

# Regolatore parallelo

- Sfrutta il tratto ripido della caratteristica  $i-v$  di un diodo zener in polarizzazione inversa
  - La giunzione polarizzata in inversa deve andare in parallelo al carico
  - La  $V_z$  presenta solo piccole variazioni nelle diverse condizioni di funzionamento
- Vantaggi e svantaggi
  - ↑ Semplice
  - ↓ Prestazioni mediocri
  - ↓ Dissipa energia anche a vuoto
    - Deve scorrere sempre corrente nel diodo per rimanere in breakdown

# Circuito del regolatore





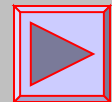
# Prestazioni del regolatore

- Si determina il punto di lavoro
  - Se è disponibile la caratteristica  $i-v$ , si usa il metodo grafico, con la retta di carico in funzione di  $V_{IN}$  e  $I_U$
  - Oppure si usa il modello dello zener per grandi segnali
- Si trova l'effettivo valore di  $r_z$ 
  - Inverso della pendenza della  $i-v$ , se disponibile
- Si ricavano i parametri di prestazione nel circuito per piccoli segnali

$$S_V = \frac{r_z}{R + r_z} \quad r_u = R \parallel r_z$$

# Progetto di un regolatore

- Topologia circuitale
- Specifiche
  - Esempio:
    - $v_U = 12\text{ V}$
    - $I_{UMAX} = 50\text{ mA}$
    - $V_{IN} = 15\text{ V} \pm 10\%$  cioè  $13.5\text{ V} \leq V_{IN} \leq 16.5\text{ V}$
- Dimensionamento
- Analisi delle prestazioni, ottimizzazione
- Convalida del progetto
  - Simulazione in varie condizioni



# Fatto & Da fare

- **Caratteristica di trasferimento**
- **Rivelatori, fissatori**
- **Raddrizzatori**
- **Regolatore a zener**
- **Circuiti amplificatori**
- **Modelli per amplificatori**
- **Equivalenza dei modelli**
- **Risposta in frequenza**