

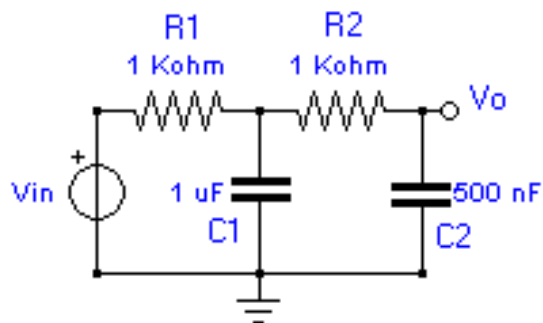
Definizione:

È una tecnica formale per determinare la relazione ingresso-uscita di un circuito, in modo tale che:

- la variabile indipendente (frequenza o tempo)
- le variabili dipendenti (tensioni o correnti)
- gli elementi del circuito (tutti o alcuni)

siano rappresentati da simboli.

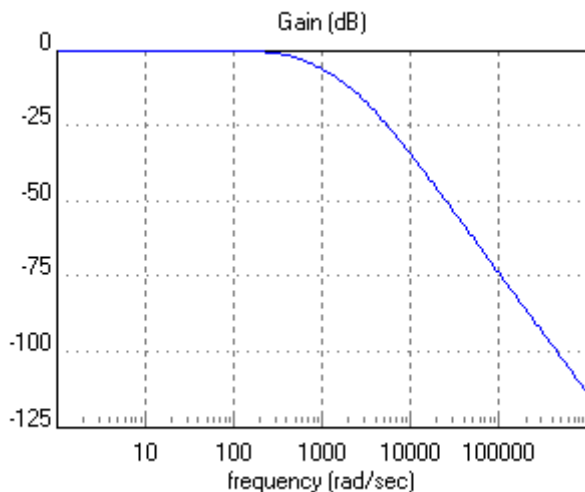
Analisi Simbolica dei Circuiti



Analisi Simbolica

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 + (C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_2 R_1)s + (C_2 C_1 R_1 R_2)s^2}$$

Simulazione numerica



Analisi Semisimbolica

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{2 \cdot 10^6}{1 + 4000s + 2 \cdot 10^6 s^2}$$

Analisi Simbolica dei Circuiti

- È uno strumento complementare alla simulazione numerica
- Non costituisce un'alternativa ai simulatori numerici

Descrizione del circuito
(netlist)



Funzione di rete
In forma simbolica

Cenni Storici

- I primi programmi di analisi simbolica risalgono agli anni '70
- Erano in grado di analizzare circuiti di dimensioni molto limitate (10 – 15 nodi)
- Negli anni '90 si è verificato un notevole ritorno di interesse per i programmi di analisi simbolica
- Sono stati sviluppati e distribuiti numerosi programmi:
SAPEC, SYNAP, SCYMBAL, ISAAC, SSPICE, SCAPP,
GASCAP, ASAP,

Motivazioni

- Disponibilità di computers sempre più potenti ed economici
- Sviluppo di nuovi e più efficienti algoritmi di analisi simbolica
- Nuovi campi di applicazione
 - Progetto di circuiti integrati analogici

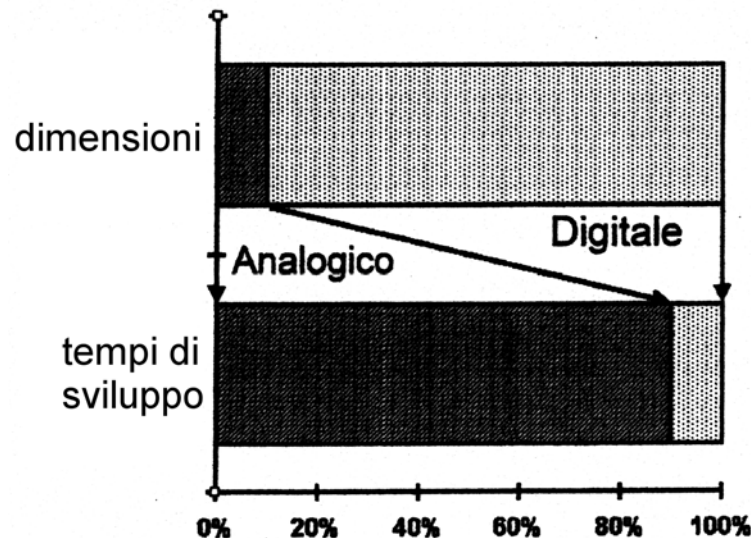
Tendenza attuale nel settore VLSI e ASIC

Integrazione su di un unico chip di sistemi
completi per specifiche applicazioni



Integrazione sullo stesso chip
sia della parte digitale che
della parte analogica

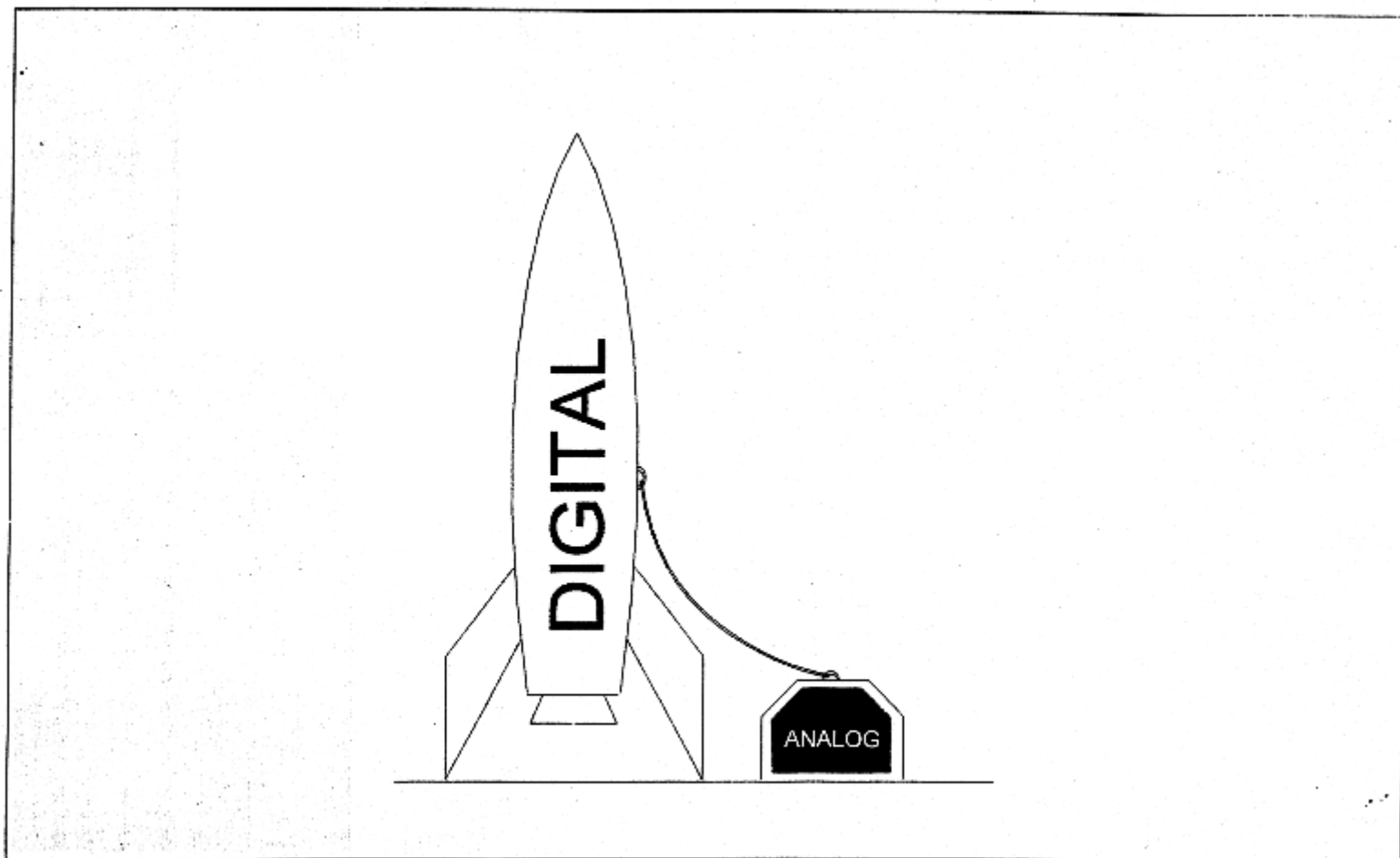
Analisi Simbolica dei Circuiti



Progetto e sviluppo di C.I.

- Parte digitale: automazione pressoché completa
- Parte analogica: viene svolto, in gran parte, in modo pressoché manuale;
richiede una notevole esperienza da parte del progettista.

Analisi Simbolica dei Circuiti



© Alle Rechte bei Robert Bosch GmbH, auch für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen. Jede Weiterverbreitung, wie Kopieren und Weitergeben, ist untersagt.

BOSCH



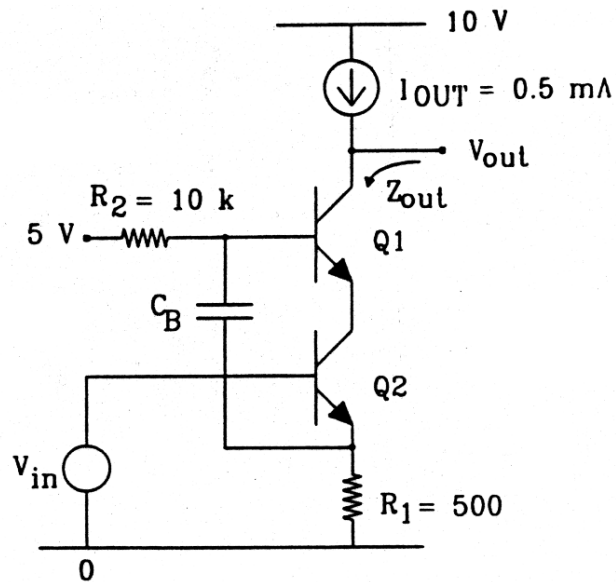
Symbolic Group / Kaiserslautern

K8/DIC-Berger

Obiettivi delle tecniche di Analisi Simbolica nel settore CAD per C.I. analogici

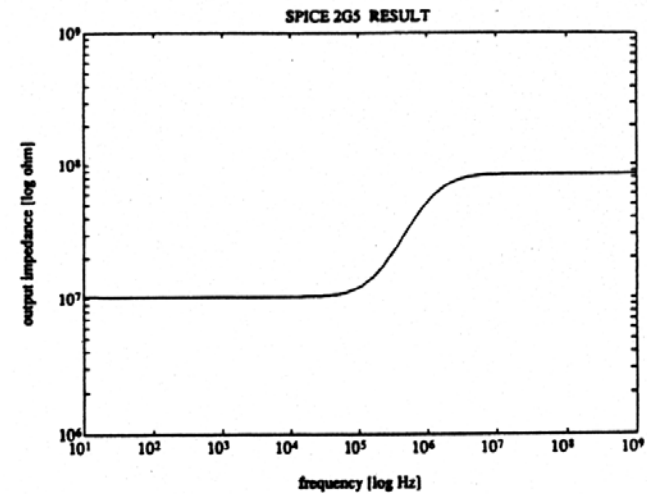
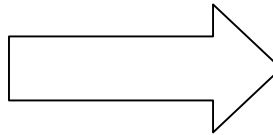
- Fornire al progettista uno strumento che gli consenta una maggiore comprensione del funzionamento del circuito
- Automatizzare alcune funzioni finora svolte manualmente e con metodi, prevalentemente, euristici
 - Dimensionamento del circuito, analisi di testabilità, centraggio di tolleranza,
- Le tecniche di analisi simbolica trovano utili applicazioni anche in settori diversi dal CAD per C.I.

Esempio



Bipolar cascode output stage with bootstrap capacitor.

Simulazione
numerica
dell'impedenza
d'uscita

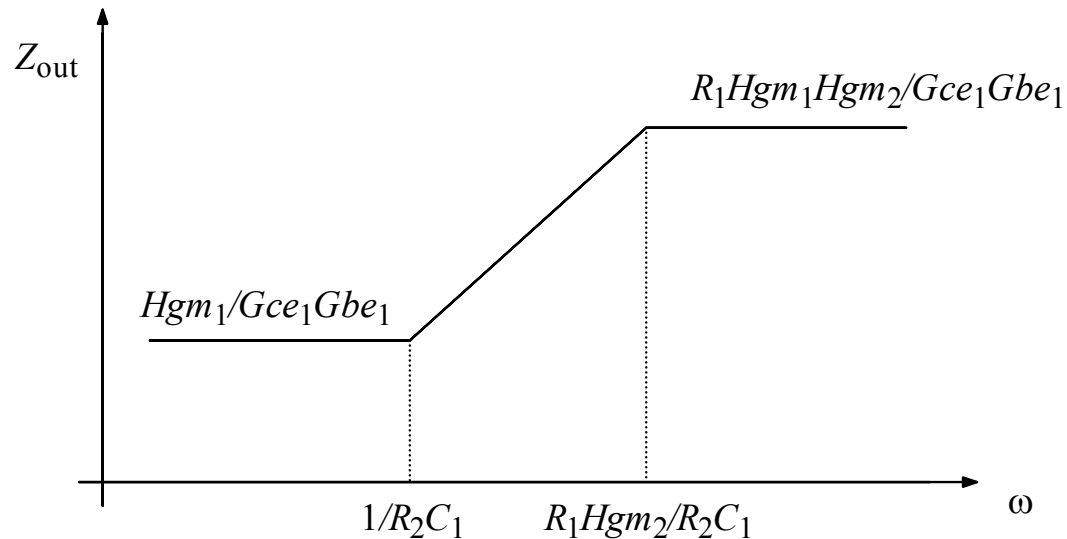


Esempio

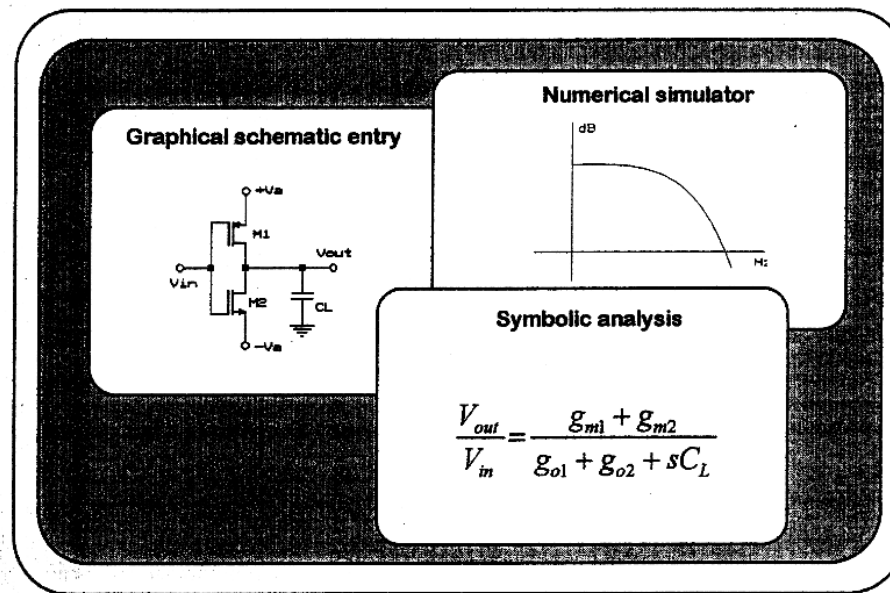
$$Z_{out} = \frac{Hgm_1 Hgm_2 (G_2 + sC_1)}{Gce_1 Gbe_1 (Hgm_2 G_2 + sC_1 G_1)}$$

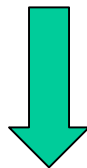
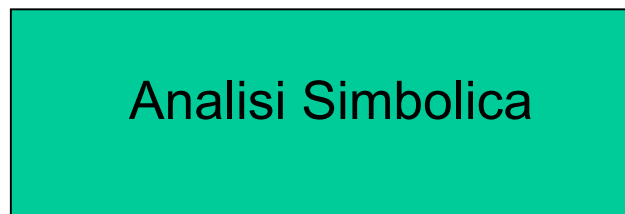
$$\text{zero: } \frac{1}{R_2 C_1} \quad \text{polo: } \frac{R_1 Hgm_2}{R_2 C_1}$$

$$Z_{out}(0) = \frac{Hgm_1}{Gce_1 Gbe_1} \quad Z_{out}(\infty) = R_1 \frac{Hgm_1 Hgm_2}{Gce_1 Gbe_1}$$

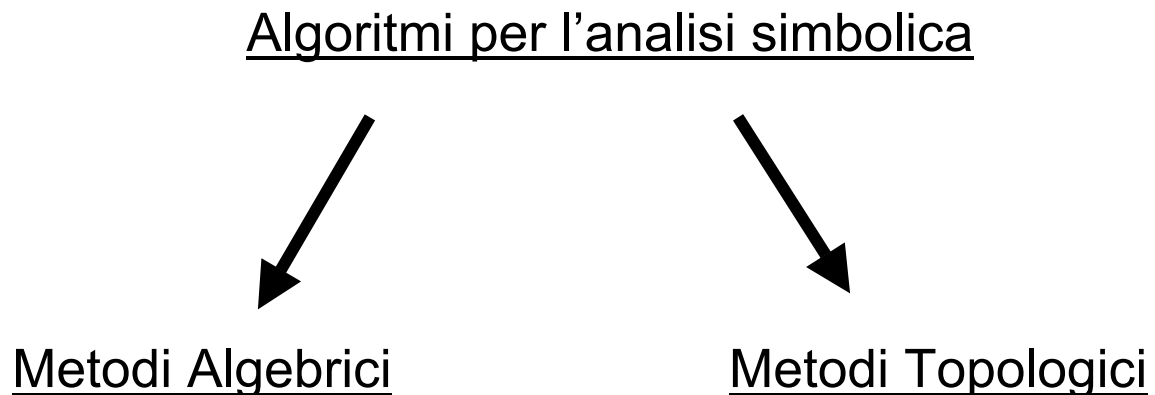


Esplorazione interattiva di nuove topologie circuitali





- Monte Carlo Statistical Simulation
- Large-change sensitivity analysis
- Yield estimation
- Design centering
- Fault diagnosis
-



Metodi Algebrici

- Formulazione delle equazioni della rete (MNA, Tableau, ...)
- Le f.d.r. sono ottenute tramite *tecniche di manipolazione simbolica delle espressioni algebriche* applicate a queste equazioni
 - Metodi tipo *Cramer*
 - Espansione simbolica di determinanti
 - Nonzero Permutation,
 - Sparse Laplace expansion,
 - ...

Metodi Topologici

- Rappresentazione del circuito mediante grafi con pesi di ramo simbolici
- Le f.d.r. sono ottenute tramite operazioni sui grafi
 - Tree enumeration
 - Signal Flowgraph
 -

Two-Graph tree enumeration

- Circuito RCgm (cioè circuito costituito solo da componenti con rappresentazione ammettenza e transconduttanze (CVT))
- Si costruiscono il grafo delle correnti ed il grafo delle tensioni.
- Il determinante della matrice delle ammettenze ai nodi è dato da:

$$\Delta = \sum_{\substack{\text{alberi comuni} \\ \text{ai due grafi}}} \varepsilon_i \left(\begin{array}{l} \text{prodotto delle ammettenze presenti} \\ \text{sull}'i\text{-esimo albero comune} \end{array} \right)$$

$$\varepsilon_i = \pm 1$$

$$\varepsilon_i = \left(\det m \{ \mathbf{A}_i \} \right) \left(\det m \{ \mathbf{A}_v \} \right)$$

$m \{ \mathbf{A}_i \}$ e $m \{ \mathbf{A}_v \}$ minori matrici incidenza relativi
ai due alberi considerati

W. Mayeda, S. Seshu, *Topological Formulas for Network Functions*, Eng. Exper. Stat., Univ. Illinois, Bull. 446, Urbana, 1957

Two-Graph tree enumeration

- I componenti bipolari producono, sui due grafi (G_i e G_v), un ramo tra gli stessi due nodi.
- La transconduttanza (g_m) produce, nel grafo G_v , un ramo tra i nodi di controllo e, nel grafo G_i , un ramo tra i nodi controllati. In entrambi i grafi il peso del ramo è il valore della transconduttanza.
- E' un metodo *cancellation-free*.
- Algoritmo per la determinazione degli alberi comuni:
 - *MRT Algorithm* (Schach – 1983):

Partendo dalla lista dei rami costruisce, in parallelo, i due alberi, aggiungendo un ramo alla volta sui due grafi, testando la presenza di anelli.

S.R. Schach, *Efficient algorithm for common spanning tree problem*, Elect. Letters, v.19, n.9, Apr. 1983.

Determinazione del Numeratore

Consideriamo un circuito con n nodi, con un'eccitazione tra i nodi 1 e 0 ed uscita tra i nodi 2 ed 0.

Le f.d.r. del circuito possono essere scritte come:

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}$$

$$\frac{V_o}{I_{in}} = \frac{V_2}{I_1} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta}$$

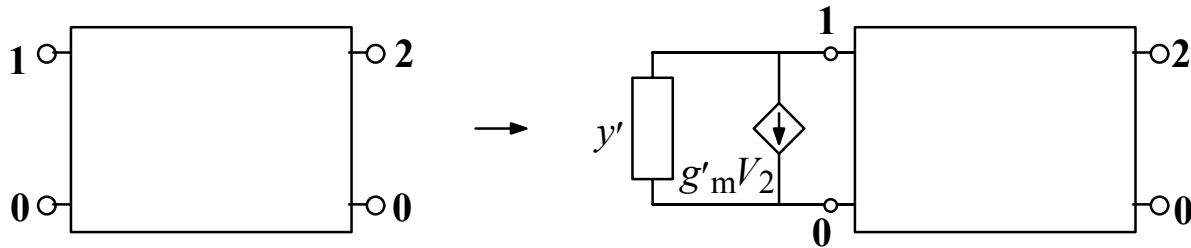
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta_{11}}$$

$\Delta = \det.$ matrice ammettenze ai nodi

$\Delta_{ij} = ij - \text{esimo cofattore}$

Two-Graph tree enumeration

Circuito modificato:



Il determinante della matrice delle ammettenze per il circuito modificato è:

$$\Delta' = \Delta + y' \Delta_{11} + g'_m \Delta_{12}$$

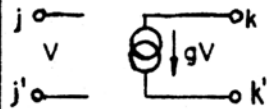
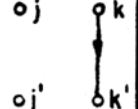
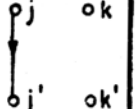
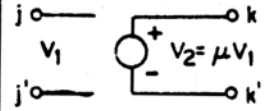
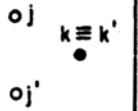
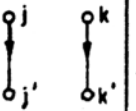
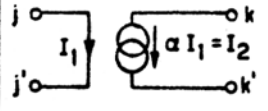

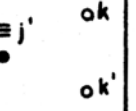
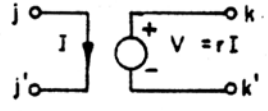
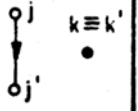
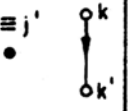
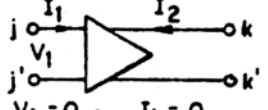
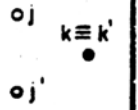
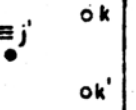
Two-Graph tree enumeration

Estensione a componenti con rappresentazione impedenza:

$$\Delta = \sum_{\substack{\text{alberi comuni} \\ \text{ai due grafi}}} \varepsilon_i \left(\begin{array}{l} \text{prodotto delle ammettenze presenti} \\ \text{sull}'i\text{-esimo albero comune} \\ \textbf{e delle impedenze presenti sul coalbero} \end{array} \right)$$

Two-Graph tree enumeration

Estensione a circuiti contenenti nullori e generatori controllati non di tipo transconduttanza.

ELEMENT	SYMBOL	I-GRAPH	V-GRAPH	CONSTITUTIVE EQUATIONS
VCT				$gV - I = 0$
VVT				$\begin{bmatrix} \mu & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = 0$
CCT				$\begin{bmatrix} \alpha & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = 0$
CVT				$rI - V = 0$
OPAMP				—

Problema:

I due grafi hanno un diverso numero di nodi e di rami

Two-Graph tree enumeration

Nullore:

Nullatore \longrightarrow i 2 nodi collassano in G_v

Noratore \longrightarrow i 2 nodi collassano in G_i

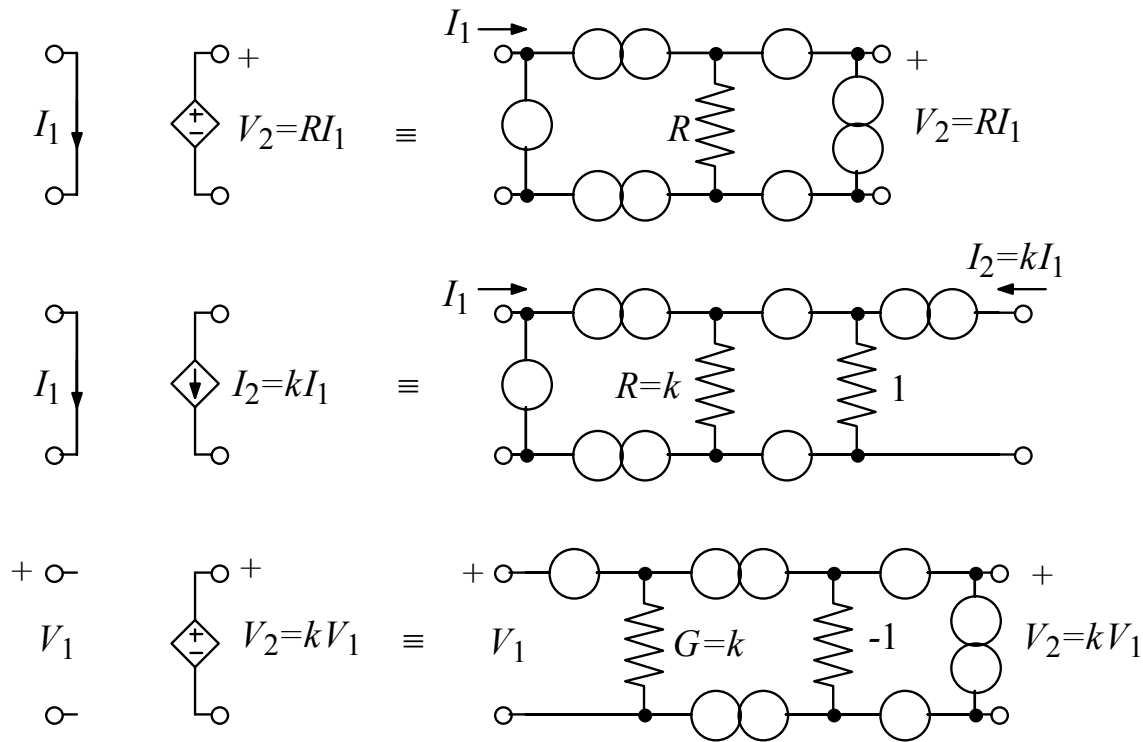
Modifica:

I 2 nodi restano distinti, nei due grafi, ma il ramo corrispondente deve far parte dell'albero.

L'algoritmo di ricerca degli alberi comuni parte forzando la presenza sull'albero dei rami nullatore per G_v e dei rami noratore per G_i .

Two-Graph tree enumeration

- I generatori controllati (non transconduttanza) vengono sostituiti da circuiti equivalenti realizzati con nullori:



Approssimazione delle espressioni simboliche

- Il massimo errore, nella formula semplificata, deve essere prefissabile dall'utente:
 - errore della risposta in ampiezza, della risposta in fase, di poli e zeri, o dei coefficienti della f.d.r.
- L'errore deve essere valutato su un intervallo di frequenze, sugli estremi dell'intervallo, o su un valore particolare della frequenza.

Tecniche principali

- Approssimazione dopo la generazione
 - L'algoritmo è applicato dopo che l'espressione completa della f.d.r. è stata generata.
- Approssimazione durante la generazione
 - L'approssimazione è applicata insieme all'algoritmo di generazione delle espressioni simboliche.
- Approssimazione prima della generazione
 - La semplificazione è applicata a livello di circuito, operando sul grafo o sulla formulazione matriciale.
 - E' applicata, insieme ad una delle altre due tecniche.

Approssimazione durante la generazione

- La generazione della f.d.r. simbolica è preceduta dal calcolo numerico (per esempio risolvendo il sistema MNA) dei valori del numeratore e del denominatore della f.d.r. alle frequenze prefissate (*valori numerici esatti di riferimento*).
- L'algoritmo *Two-Graph tree enumeration* viene modificato in modo tale da generare i vari termini in ordine decrescente di ampiezza.
- La generazione dei termini, per numeratore e denominatore, viene interrotta non appena i valori della f.d.r. simbolica alle frequenze prefissate sono affetti da un errore inferiore a quello stabilito.

Approssimazione durante la generazione

- In caso di approssimazione dei coefficienti della f.d.r., la generazione della f.d.r. simbolica è preceduta dal calcolo numerico dei valori dei coefficienti del numeratore e del denominatore della f.d.r., mediante la tecnica di interpolazione polinomiale sul cerchio di raggio unitario (*valori esatti di riferimento per i coefficienti*).