

Cap.2. Aplicație: Analiza circuitelor electrice liniare (c.c. și c.a.)

Prof.dr.ing. Gabriela Ciuprina

Universitatea "Politehnica" București, Facultatea de Inginerie Electrică

Suport didactic pentru disciplina *Metode numerice*,
Facultatea de Inginerie Electrică, 2017-2018

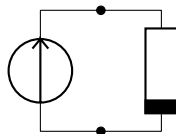
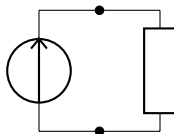
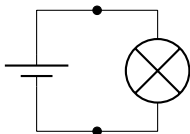
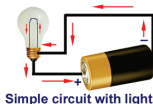
Cuprins

- 1 Introducere
 - Modelare
 - Simulare
- 2 Analiza circuitelor rezistive liniare în c.c.
 - Formularea problemei
 - Metoda nodală clasică
- 3 Analiza circuitelor liniare în c.a.
 - Formularea problemei
 - Similitudinea cu c.c.
 - Caracteristici de frecvență

Circuitele electrice sunt modele ale realității

Circuitele electrice

- modele ale realității;
- conțin elemente ideale, obținute prin idealizarea elementelor reale;
- reprezintă o mulțime de elemente ideale conectate între ele pe la borne (terminale).

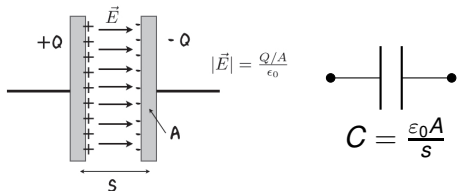
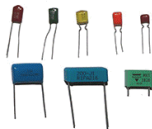


Circuitele electrice sunt alcătuite din elemente ideale

Elementele ideale de circuit electric

- sunt caracterizate de mărimi electrice definite la borne (curenți, tensiuni sau potențiale);
- se definesc funcțional, printr-o relație caracteristică (constitutivă) între mărimile definite la borne.

Modelarea nu este obiectul teoriei circuitelor, ea presupune analiza câmpului electromagnetic.

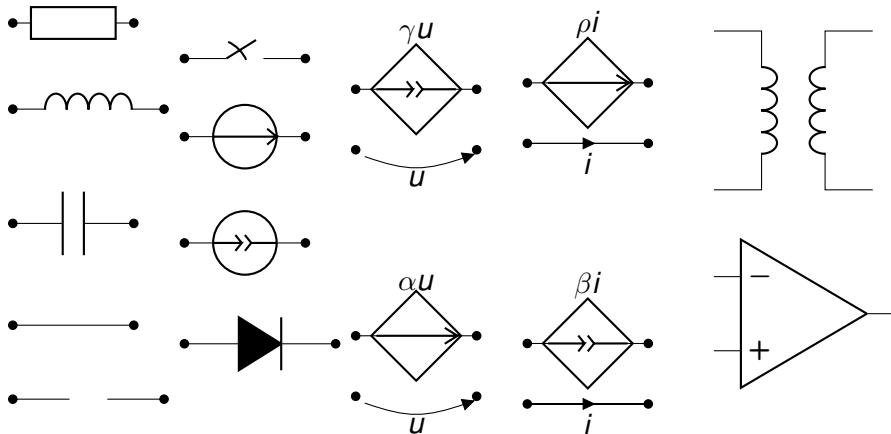


Exemple de elemente ideale

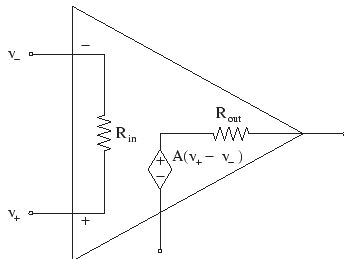
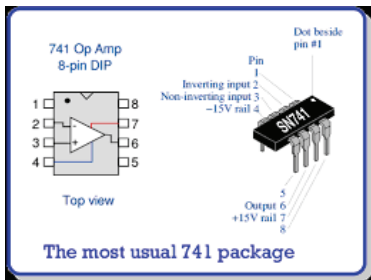
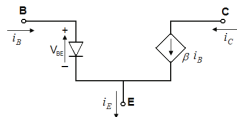
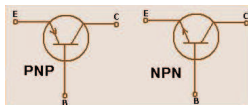
Cele mai frecvent folosite:

- liniare dipolare: R, L, C, conductorul și izolatorul perfect;
- parametrice: K (comutatorul);
- neliniare rezistive : SIT, SIC, DP;
- liniare multipolare: SICU, SUCI, SUCU, SICI, AOP, M;
- neliniare multipolare: AOPn.

Exemple de elemente ideale



Modelarea componentelor din circuitele reale



Determinarea răspunsului sub acțiunea unei excitații

Simulare = **simulare numerică** (cu ajutorul calculatorului)

Simularea

- determinarea mărimilor de interes (tensiuni, curenți) din circuit;
- determinarea răspunsului sub acțiunea unui semnal de excitație cunoscut.

Determinarea răspunsului sub acțiunea unei excitații

O simulare făcută cu succes presupune

- **buna formulare a circuitului** (soluția să existe și să fie unică); este echivalentă cu buna formulare a problemei matematice asociate;
- conceperea sau alegerea unui **algoritm numeric robust** pentru rezolvare.

Algoritmul de rezolvare

Algoritmul potrivit pentru rezolvare depinde de

- **caracteristicile elementelor** de circuit (liniare/nelineare, rezistive/reactive);
- **tipul mărimilor** din circuit (constante - c.c., sinusoidale - c.a., periodice, oarecare).

Tipuri de circuite / probleme matematice

Tip de circuit

- 1 Circuite rezistive liniare/nelineare în c.c.)
- 2 Circuite liniare în regim sinusoidal (c.a.);
- 3 Circuite liniare/nelineare în regim tranzitoriu;
- 4 Circuite liniare/nelineare în regim periodic;
- 5 Oscilatoare (frecvențe de rezonanță.)

Problema matematică

- 1 Sisteme de ec. algebrice liniare/nelineare, în \mathbb{R} ;
- 2 Sisteme de ec. algebrice liniare, în complex.
- 3 Sisteme ODE, lin./nelin. cu condiții inițiale.
- 4 Superpoziție de c.a./ODE cu condiții de periodicitate.
- 5 Calcul de valori proprii (analiza modală).

Scopul acestui curs

Întelegerea:

- modului în care se dezvoltă **instrumentele software** pentru analiza circuitelor electrice;
- importanței **bunei formulări a problemei** (circuitului) ce trebuie rezolvată;
- modului în care se **generează automat** sistemele de rezolvat;
- faptului că fundamentul simulării numerice a circuitelor electrice îl constituie disciplina **Metode numerice** ⇒ **Algoritmi**.

Problema fundamentală

Conțin: rezistoare (R), surse ideale de tensiune (SIT) și curent (SIC), surse comandate liniar (SUCU, SUCI, SICU, SUCI).

Problema fundamentală a analizei acestor circuite

Se dau:

- topologia circuitului (schemă/tabel de descriere (netlist)/matrice de incidență sau apartenență);
- valorile parametrilor (rezistențele, valorile surselor).

Se cer:

- curenții și tensiunile din fiecare latură;
- puteri.

Condiții de bună formulare

Teoreme

Topologice:

- Pentru ca circuitul să fie bine formulat **este necesar să existe un arbore normal**;
- Dacă circuitul nu are surse comandate și toate rezistoarele sunt strict pozitive, atunci este necesar și suficient să existe un arbore normal.

Algebrice:

- Pentru ca circuitul să fie bine formulat **este necesar și suficient ca matricea sistemului** de ecuații algebrice liniare, asamblat printr-o metodă sistematică **să fie nesingulară**.

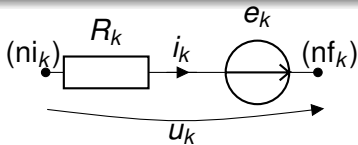
Q1: Ce este un arbore normal?

Metode de rezolvare sistematice

- metoda ecuațiilor Kirchhoff :(
 - metoda potențialelor nodurilor :) (dacă nu sunt surse comandate matricea coeficienților este simetrică și diagonal dominantă)
 - metoda curenților ciclici :| (dacă nu sunt surse comandate matricea este simetrică, necesită definirea unui sistem de bucle independente convenabil ales)
- ⇒ metoda potențialelor nodurilor ("*tehnica nodală*")

Tratarea SRT

Laturi standard:



Formularea problemei

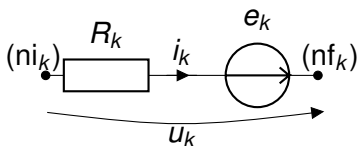
Se dau:

- topologia: $N, L, (ni_k, nf_k, k = 1, \dots, L)$;
- toate rezistențele $R_k, k = 1, \dots, L$, presupuse nenule,
- toate t.e.m. $e_k, k = 1, \dots, L$

Se cer:

- $u_k, k = 1, \dots, L$
- $i_k, k = 1, \dots, L$
- puterea consumată și puterea generată în circuit.

Ecuții



Kirchhoff clasic:

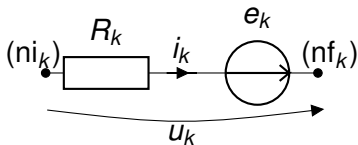
$$\sum_{k \in (n)}^A i_k = 0, \quad n = 1, \dots, N - 1, \quad (1)$$

$$\sum_{k \in [b]}^A u_k = 0, \quad b = 1, \dots, L - N + 1, \quad (2)$$

$$u_k = R_k i_k - e_k, \quad k = 1, \dots, L, \quad (3)$$

2L ecuații cu 2L necunoscute

Necunoscute



Schimbare de variabilă - necunoscutele sunt:

$$v_k, k = 1, \dots, N, \quad v_N = 0 \text{ (prin convenție)}$$

Kirchhoff II:

$$\sum_{k \in [b]}^A u_k = 0, \quad b = 1, \dots, L - N + 1, \quad (4)$$



$$u_k = v_{ni_k} - v_{nf_k}, \quad k = 1, \dots, L. \quad (5)$$

Notății

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u} &= [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_L]^T \in \mathbb{R}^{L \times 1} \\
 \mathbf{i} &= [i_1 \quad i_2 \quad \dots \quad i_L]^T \in \mathbb{R}^{L \times 1} \\
 \mathbf{v} &= [v_1 \quad v_2 \quad \dots \quad v_{N-1}]^T \in \mathbb{R}^{N-1 \times 1} \\
 \mathbf{e} &= [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_L]^T \in \mathbb{R}^{L \times 1} \\
 \mathbf{R} &= \text{diag}([R_1 \quad R_2 \quad \dots \quad R_L]) \in \mathbb{R}^{L \times L}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Kirchhoff I:

$$\mathbf{A}\mathbf{i} = \mathbf{0}, \tag{7}$$

$\mathbf{A} = (a_{ij})_{i=1, N-1; j=1, L}$ este **matricea incidentelor laturi-noduri** - matrice topologică, $(N-1) \times L$

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{dacă nodul } i \text{ nu aparține laturii } j; \\ +1 & \text{dacă nodul } i \text{ este nod inițial pentru latura } j; \\ -1 & \text{dacă nodul } i \text{ este nod final pentru latura } j. \end{cases}$$

Ecuatii scrise compact

Kirchhoff I (KCL):

$$\mathbf{A}\mathbf{i} = \mathbf{0}, \quad (8)$$

Kirchhoff II (KVL):

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}^T \mathbf{v}, \quad (9)$$

Joubert (relații constitutive):

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{i} - \mathbf{e}. \quad (10)$$

Dacă \mathbf{R} este inversabilă ($R_k \neq 0, \forall k = 1, L$)

$$\mathbf{i} = \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{u} + \mathbf{e}). \quad (11)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{A}^T \mathbf{v} = -\mathbf{A}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{e}. \quad (12)$$

$$\mathbf{G}_n \mathbf{v} = \mathbf{j}_n. \quad (13)$$

Sistem de ecuații

$$\mathbf{G}_n \mathbf{v} = \mathbf{j}_n. \quad (14)$$

\mathbf{G}_n conductanțe nodale; \mathbf{j}_n injecții de curent în noduri.

$$\mathbf{G}_n = \mathbf{A} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}^T \in \mathbb{R}^{(N-1) \times (N-1)} \quad (15)$$

$$G_{nii} = \sum_{k \in (i)} \frac{1}{R_k}, \quad G_{nij} = - \sum_{k \in (i); k \in (j)} \frac{1}{R_k} \quad \text{pentru } i \neq j.$$

$$\mathbf{j}_n = -\mathbf{A} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{e} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times 1} \quad (16)$$

$$j_{nk} = \sum_{m \in (k)}^A \frac{e_m}{R_m}$$

Proprietățile matricei \mathbf{G}_n

\mathbf{G}_n : simetrică, diagonal dominantă și pozitiv definită dacă rezistențele sunt pozitive

$\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ este pozitiv definită dacă ea este simetrică și dacă $\mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} > 0$ pentru orice vector real, nenul $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$.

$$\mathbf{R}^{-1} = \text{diag}([1/R_1 \quad 1/R_2 \quad \dots \quad 1/R_L]). \quad (17)$$

Simetria:

$$\mathbf{G}_n^T = (\mathbf{A} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}^T)^T = (\mathbf{A}^T)^T (\mathbf{R}^{-1})^T (\mathbf{A})^T = \mathbf{A} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}^T = \mathbf{G}_n$$

Pozitiv definire: Fie \mathbf{x} vector coloană arbitrar, nenul.

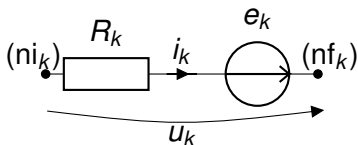
$$\mathbf{x}^T \mathbf{G}_n \mathbf{x} = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{x} = \mathbf{y}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} = \sum_{k=1}^L \frac{y_k^2}{R_k} > 0,$$

unde $\mathbf{y} = \mathbf{A}^T \mathbf{x}$ are componentele $y_k, k = 1, \dots, L$.

Etapele algoritmului

- **etapa de preprocesare** în care se descrie problema și se assemblează sistemul de ecuații de rezolvat;
- **etapa de rezolvare** în care se apelează o procedură propriu-zisă de rezolvare a sistemului de ecuații rezultat ("solver");
- **etapa de postprocesare** în care se calculează alte mărimi de interes.

Structuri de date



; declaratii date - varianta A

intreg N

intreg L

tablou intreg $ni[L]$

tablou intreg $nf[L]$

tablou real $R[L]$

tablou real $e[L]$

; număr de noduri

; număr de laturi

; noduri inițiale ale laturilor

; noduri finale ale laturilor

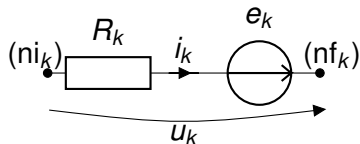
; rezistențe

; tensiuni electromotoare

În vederea obținerii unui algoritm simplu, vom presupune că:

- sensul de referință al curentului unei laturi este identic cu cel al t.e.m de pe latură;
- toate laturile sunt orientate cf. regulii de la receptoare.

Structuri de date



Se recomandă agregarea datelor:

; declarații date - varianta B

înregistrare circuit

întreg N ; număr de noduri
întreg L ; număr de laturi
tablou întreg $ni[L]$; noduri inițiale ale laturilor
tablou întreg $nf[L]$; noduri finale ale laturilor
tablou real $R[L]$; rezistențe
tablou real $e[L]$; tensiuni electromotoare

•

Matrice rare

G_n și j_n sunt foarte rare.

Exemplu:

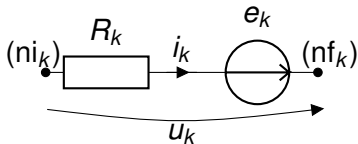
dacă pp. 4 laturi care concură la un nod, atunci densitatea matricei

$d = 5n/n^2 = 5/n$, (pentru $n \approx 1000 \Rightarrow d = 0.5 \%$).

Pentru simplitate:

```
; declarații variabile utile  
tablou real Gn[N, N] ; stocată rar  
tablou real jn[N] ; stocat rar  
tablou real v[N] ; vectorul potențialelor
```

Citire date



```
funcție citire_date_B ()  
; declarații
```

```
...
```

```
citește circuit.N, circuit.L
```

```
pentru k = 1, circuit.L
```

```
    citește circuit.ni_k, circuit.nf_k
```

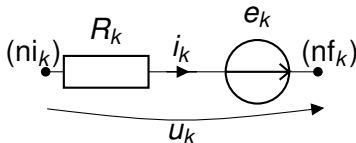
```
    citește circuit.R_k, circuit.e_k
```

```
•
```

```
întoarce circuit
```

Asamblarea sistemului de ecuații

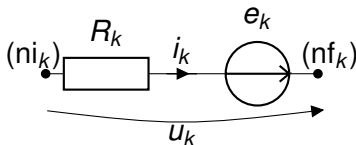
Orientată pe laturi:



	ni_k		nf_k						
ni_k	*	*	*	*	*	*	*	ni_k	*
	*	$+1/R_k$	*	*	$-1/R_k$	*	*		$-e_k/R_k$
	*	*	*	*	*	*	*		*
nf_k	*	*	*	*	*	*	*	nf_k	*
	*	$-1/R_k$	*	*	$+1/R_k$	*	*		$+e_k/R_k$
	*	*	*	*	*	*	*		*
	*	*	*	*	*	*	*		*

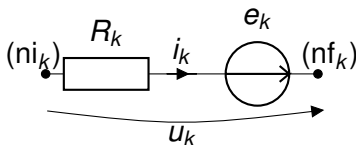
Contribuția unei laturi k la matricea conductanțelor nodale (stânga) și la vectorul injecțiilor de curent (dreapta).

Preprocesare



```
procedură nodalRE_v1 (circuit, Gn, t)
; asamblează sistemul de ecuații pentru un circuit
; cu laturi de tip R,E folosind tehnica nodală
; parametri de intrare:
;           circuit - structură de date ce descrie circuitul
; parametri de ieșire:
;           Gn - matricea conductanțelor nodale și
;           jn - vectorul injecțiilor de curent
; declarații
....
L = circuit.L ; pentru simplificarea scrierii algoritmului
N = circuit.N
ni = circuit.ni
nf = circuit.nf
R = circuit.R
e = circuit.e
```

Preprocesare



procedură nodalRE_v1 (circuit, Gn, jn)

....

Gn = 0

jn = 0

; asamblează sistem

pentru $k = 1, L$

$i = ni_k$

$j = nf_k$

$Gn_{ii} = Gn_{ii} + 1/R_k$

$Gn_{jj} = Gn_{jj} + 1/R_k$

$Gn_{ij} = Gn_{ij} - 1/R_k$

$Gn_{ji} = Gn_{ji} - 1/R_k$

$jn_i = jn_i - e_k/R_k$

$jn_j = jn_j + e_k/R_k$

•

retur

; parcurge laturi

; nodul inițial al laturii k

; nodul final al laturii k

Preprocesare

Observații:

- am folosit pseudocod simplificat pentru a scrie anularea componentelor

Atenție! varianta

pentru $i = 1, N$
pentru $j = 1, N$
 $G_{ij} = 0$

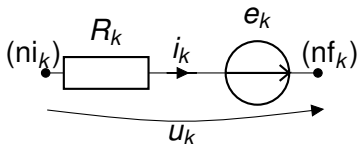
•

•

scrisă pentru "instrucțiunea" $\mathbf{Gn} = \mathbf{0}$ va umple complet matricea \mathbf{Gn} .

- pentru a evita repetarea unor calcule, se pot memora valorile $1/R_k$ și e_k/R_k .

Preprocesare - varianta a II-a



procedură nodalIRE_v2 (circuit, Gn, jn)

....

; anulează componentele:

A = 0 ; matricei incidente laturi noduri

G = 0 ; matricei diagonale R^{-1}

; asamblează sistem

pentru $k = 1, L$; parcurge laturi

$i = ni_k$; nodul inițial al laturii k

$j = nf_k$; nodul final al laturii k

$A_{ik} = -1$

$A_{jk} = +1$

$G_{kk} = 1/R_k$

•

Gn = A * G * A^T ; apel proceduri speciale pentru matrice rare

jn = -A * G * e

retur

Rezolvare

- Sistemul asamblat are dimensiunea $N \times N$, nodul de referință nefiind tratat special.
- Sistemul de rezolvat trebuie să aibă dimensiunea $N - 1$.
- După rezolvare trebuie adăugată o componentă în plus vectorului potențialelor: $v_N = 0$.

Exemplu:

Gauss ($N - 1, G, t, v$)

$$v_N = 0$$

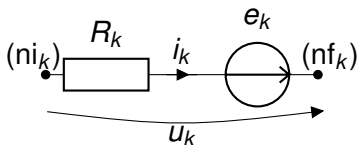
Q2: Cum implementați această idee în Matlab/Octave ?

Rezolvare

Metode posibile de rezolvare:

- **directe** (Gauss, factorizare) - nu introduc erori de trunchiere, dar matricele se umple în cursul algoritmului;
- **iterative** (Jacobi, Gauss-Seidel, SOR) - matricele își păstrează gradul de raritate, dar apar erori de trunchiere și eventuale probleme de convergență;
- **semiiterative** (gradienti conjugați, GMRES, etc) - avantajoase dacă matricea sistemului este simetrică și pozitiv definită (dacă nu există surse comandate).

Postprocesare



procedură postprocesare_circuitRE (circuit, v)

```

...
Pc = 0 ; puterea consumată
Pg = 0 ; puterea generată
pentru k = 1, L ; parcurge laturi
    u = vnik - vnfk ; tensiunea laturii
    c = (u + ek) / Rk ; curentul prin latură
    scrie "Latura" k "are tensiunea" u "și curentul" c
    Pc = Pc + Rk c2 ; adaugă contribuția laturii la Pc
    Pg = Pg + ek c ; adaugă contribuția laturii la Pg

```

•
scrie Pc, Pg

retur

Q3: Cum implementați postprocesarea în Matlab/Octave folosind operații cu matrice?

Formularea problemei

Conțin:

- rezistoare liniare (R);
- bobine liniare (L);
- bobine liniare cuplate (M);
- condensatoare liniare (C);
- surse ideale de tensiune (SIT);
- surse ideale de curent (SIC);
- surse comandate liniar (SUCU, SUCI, SICU, SUCI).

SIT sau SIC au variații de forma:

$$y(t) = Y\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi). \quad (18)$$

unde ω are aceeași valoare pentru toate mărimile.

Formularea problemei

Problema fundamentală a analizei circuitelor de c.a.

Se dau:

- topologia circuitului (schemă/tabel de descriere (netlist)/matrice de incidență sau apartenență);
- valorile parametrilor (rezistențele, bobinele, cuplajele, condensatoarele, valorile surselor: frecvență, valorile efective, fazele inițiale).

Se cer:

- curenții și tensiunile din fiecare latură (valori efective, faze inițiale);
- puteri (active, reactive, aparente, defazaje).

Similitudinea cu c.c.

- Metoda de analiză se bazează pe reprezentarea în complex.

$$y(t) = Y\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi) \quad \Leftrightarrow \quad \underline{Y} = Y e^{j\varphi}. \quad (19)$$

- Ideea: ecuațiile similare:

	Circuitul de c.c.	Circuitul de c.a.
TK1	$\sum_{k \in (n)} i_k = 0$	$\sum_{k \in (n)} \underline{I}_k = 0$
TK2	$\sum_{k \in [b]} u_k = 0$	$\sum_{k \in [b]} \underline{U}_k = 0$
SRT	$u_k = R_k i_k - e_k$	$\underline{U}_k = \underline{Z}_k \underline{I}_k - \underline{E}_k$
SRC	$i_k = G_k u_k + j_k$	$\underline{I}_k = \underline{Y}_k \underline{U}_k + \underline{J}_k$
SUCI	$e_k = r_{km} i_m$	$\underline{E}_k = \underline{z}_{km} \underline{I}_m$
SICU	$j_k = g_{km} u_m$	$\underline{J}_k = \underline{y}_{km} \underline{U}_m$
SUCU	$e_k = \alpha_{km} u_m$	$\underline{E}_k = \underline{\alpha}_{km} \underline{U}_m$
SICI	$j_k = \beta_{km} i_m$	$\underline{J}_k = \underline{\beta}_{km} \underline{I}_m$

Reprezentarea în complex a elementelor ideale

	Rezistor (R)	Bobină (L)	Condensator (C)
Impedanța complexă \underline{Z}	R	$j\omega L$	$1/(j\omega C)$
Admitanța complexă: \underline{Y}	$1/R$	$1/(j\omega L)$	$j\omega C$
Defazajul: φ	0	$\pi/2$	$-\pi/2$
Impedanța: Z	R	ωL	$1/(\omega C)$
Admitanța: Y	$1/R$	$1/(\omega L)$	ωC
Rezistență de c.a.: R	R	0	0
Reactanța: X	0	ωL	$-1/(\omega C)$
Conductanța de c.a.: G	$1/R$	0	0
Susceptanța: B	0	$-1/(\omega L)$	ωC

Algoritm

Similar cu cel din c.c.:

- în loc de rezistențe se lucrează cu impedanțe complexe;
- parametrii surselor sunt tot valori constante, dar complexe, obținute din reprezentarea în complex a variațiilor care se dau.

Diferențe față de algoritmul din c.c.:

- în etapa de preprocesare: citirea datelor de descriere și reprezentarea lor în complex;
- în etapa de asamblare, apar în plus bobinele cuplate, care contribuie la sistem cu următoarele ștampile:

Algoritm

	Cuplaje
A_m	$\begin{bmatrix} ni_j & nf_j & ni_k & nf_k \\ +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 \end{bmatrix}$
B_m	$ni_j \quad j \quad k$ $nf_j \begin{bmatrix} +1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ $ni_k \begin{bmatrix} 0 & +1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ nf_k
Z_m	$j \quad k$ $\begin{bmatrix} -j\omega L_{jj} & -j\omega L_{jk} \\ -j\omega L_{kj} & -j\omega L_{kk} \end{bmatrix}$
e_m	Nu contribuie
i_n	$\begin{bmatrix} i_j \\ i_k \end{bmatrix}$

Caracteristici de frecvență

În multe aplicații practice interesează reprezentarea caracteristicilor de frecvență: comportarea semnalelor de ieșire pentru un interval al frecvențelor semnalelor.

Variante de implementare:

- 1 Se lucrează simbolic, cu parametrul ω și se obțin expresii simbolice ale mărimilor de ieșire care apoi se evaluează numeric;
- 2 Se lucrează numeric, pentru frecvențe din intervalul de interes se rezolvă mai multe probleme de c.a.

Lectura obligatorie pentru această săptămână

● Cap.5 din

[1] Gabriela Ciuprina, Mihai Rebican, Daniel Ioan - Metode numerice in ingineria electrica - Indrumar de laborator pentru studentii facultatii de Inginerie electrica, Editura Printech, 2013, disponibil la

http://mn.lmn.pub.ro/indrumar/IndrumarMN_Printech2013.pdf

Notă: dacă folosiți Matlab, nu aveți voie la acest curs să folosiți operații cu vectori și matrice decât pentru validarea rezultatelor, nu pentru implementarea procedurilor.

De exemplu, într-o primă variantă puteți folosi *mldivide* (*backslash*) pentru rezolvarea sistemului de ecuații asamblat, pentru a verifica programul, dar în final înlocuiți-o cu una din procedurile de rezolvare pe care le-ați implementat voi.

Simulatoare de circuit

- **Free and Open Source**

NgSpice (are și varianta online), GnuCap, CircuitLogix, **LTSpice**, MultiSim, TopSpice, MacSpice, Xyce (open source, SPICE-compatible, high-performance analog circuit simulator)

- **Licensed/Paid Circuit simulation software**

Spectre (Cadence), PSpice, MultiSim, SiMetrix, TINA

Vedeți și

<http://www.circuitstoday.com/circuit-design-and-simulation-softwares>

https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_circuit_simulation

Tema pentru bonus

- 1 Scrieți un program pentru analiza circuitelor de curent alternativ pentru circuite care conțin rezistoare, bobine necuplate, condensatoare și surse independente de tensiune.
- 2 Alegeți pentru testarea codului un exemplu simplu (de exemplu, dar nu obligatoriu, un filtru pasiv adică fără A.O., din lista <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm>. Structura de date pentru circuitul de test ales va fi instanțiată într-o funcție (nu se vor cere date de la tastatură).
- 3 Verificați soluția comparând-o cu o soluție de referință care poate fi: analitică sau obținută cu un instrument de tipul calculator online <http://sim.okawa-denshi.jp/en/CRLowkeisan.htm>
- 4 Verificați soluția comparând-o cu un simulator de circuit de tipul spice - vă recomandăm:
→ *ngspice* varianta online disponibilă la <http://www.ngspice.com/> sau
→ *LTSpice* <http://www.linear.com/designtools/software>

Scrieți un raport care să rezolve punctele de mai sus. Este obligatoriu ca raportul să aibă: o pagină de titlu, un cuprins generat automat, o lista de referințe. Dați o structură coerentă raportului.

Fișierele care rezolvă tema se vor organiza într-un folder numit NumePrenume_grupa. În acest folder vor exista următoarele subfoldere care vor conține fișiere relevante: raport, surse, spice. Folderul se arhivează (zip) și se încarcă pe moodle.

Termenul de predare a acestei teme va fi anunțat pe moodle.