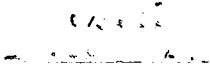


UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ



inginer : Nicoleta Gillich

**CONTRIBUȚII LA MODELAREA FIZICĂ A
FENOMENELOR TRANZITORII ȘI STAȚIONARE
ÎNȘOȚITE DE CREȘTERI ALE TENSIUNII**

Teză pentru obținerea titlului științific de doctor inginer

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC :
PROF.DR.ING. VIOREL NEGRU

1997

CUPRINS

		pag
Introducere		1
Cap.1.	Considerații generale privind modelarea fizică a liniei electrice aeriene de înaltă tensiune	5
1.1.	Criterii de similitudine	5
1.2.	Modelarea fizică a unei porțiuni de linie printr-un multipol	7
1.3.	Deformarea proceselor în lanțul de multipoli	14
Cap.2.	Parametrii liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune	20
2.1.	Dependența de frecvență a parametrilor liniei electrice aeriene	20
2.1.1.	Considerații generale	20
2.1.2.	Parametrii liniei de înaltă tensiune la 50 Hz	26
2.1.3.	Aprecieri privind domeniul de interes al frecvenței oscilațiilor	27
2.1.4.	Determinarea frecvenței oscilațiilor în regim de comutație	30
2.2.	Caracteristicile de frecvență ale rezistenței de secvență directă	36
2.3.	Caracteristicile de frecvență ale rezistenței de secvență omopolară	38
2.4.	Caracteristicile de frecvență ale inductivității de secvență omopolară	41
Cap.3.	Dimensionarea modelului liniei electrice aeriene	43
3.1.	Alegerea parametrilor nominali ai modelului	43
3.1.1.	Alegerea scărilor de modelare	43
3.1.2.	Stabilirea lungimii modelate de un octopol și a tensiunii nominale a modelului	44
3.1.3.	Calculul parametrilor octopolului la 50 Hz	51
3.2.	Modelarea caracteristicilor de frecvență ale parametrilor LEA	53
3.2.1.	Calculul parametrilor de secvență directă ai modelului	53
3.2.2.	Calculul parametrilor de secvență omopolară ai modelului	56
3.2.3.	Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență directă ai liniilor de 110–220KV ; 400KV ; 750KV	57
3.2.3.1.	Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență directă pentru LEA 110–220KV	58
3.2.3.2.	Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență directă pentru LEA 400KV	62
3.2.3.3.	Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență directă pentru LEA 750KV	66

3.2.4.	Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență omopolară ai liniilor electrice aeriene 110–220KV ; 400KV ; 750KV	69
3.2.4.1.	Dependența de frecvență a rezistenței din conductorul de nul al modelului	70
3.2.4.2.	Calculul impedanței derivație Z_d	70
3.2.4.3.	Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență omopolară ai modelului	72
Cap.4.	Modelarea fizică a fenomenului Corona	81
4.1.	Parametri descărcării Corona	81
4.2.	Determinarea parametrilor neliniari g , ΔC datorită efectului Corona	84
4.3.	Calculul pierderilor datorate efectului Corona	84
4.4.	Modelarea fizică a fenomenului Corona	89
4.4.1	Studiul analitic al schemei de modelare a efectului Corona	91
4.4.2.	Calculul pierderilor de putere în model	100
4.4.3.	Determinarea parametrilor modelului	101
4.5.	Componența modelului	109
Cap.5.	Determinări experimentale	113
5.1.	Determinarea parametrilor bobinelor octopolului	113
5.2.	Regimul de mers în gol	114
5.3.	Determinarea parametrilor modelului	119
5.3.1	Determinarea impedanței de secvență directă a modelului	120
5.3.2.	Determinarea impedanței de secvență omopolară a modelului	121
5.4.	Descrierea instalației pentru modelarea LEA 110–220KV și LEA 400–750KV	122
Cap.6.	Concluzii	125
Anexa 1	Ordinograma programului PARAMRLC pentru calculul parametrilor LEA	133
Anexa 2, 3, 4	Ordinograma pentru programele ce aproximează rădăcini prin metoda înjumătățirii	146
Anexa 5	Ordinograma pentru programul Rb și Rb2	155
Anexa 6	Ordinograma pentru programul Zd	157
Anexa 7	Ordinograma pentru programul ROL0	158
Anexa 8	Ordinograma pentru programul g_0	159
Anexa 9	Ordinograma pentru programul ΔC_0	161
Anexa 10	Ordinograma pentru programul P_M25	163
Bibliografie		165

Introducere

Dezvoltarea continuă a sistemelor electroenergetice sub aspectul complexității configurației și a multitudinii regimurilor de funcționare, în condițiile creșterii nivelului de tensiune la care sunt solicitate elementele componente ale acestora, mențin în permanentă actualitate determinarea valorilor supratensiunilor care apar în rețele. Cunoașterea acestor supratensiuni - care nu pot fi evitate - este impusă de asigurarea unui grad de fiabilitate mărit de funcționare a componentelor rețelei în condiții economice acceptabile.

Dacă supratensiunile de origine externă sunt determinante în dimensionarea izolației elementelor de rețea cu tensiuni de funcționare mai scăzute, supratensiunile de origine internă sunt determinante în ceea ce privește coordonarea izolației sistemelor de foarte înaltă tensiune.

Apariția supratensiunilor de origine internă în sistemele electroenergetice este consecința comutației sau a fenomenelor de rezonanță, în cazul acestora din urmă caracterul neliniar al elementelor cu miez magnetic având un rol important.

Studiul acestor supratensiuni a constituit obiect de preocupare încă din deceniul trei al secolului XX, iar din 1960, comitete și instituții de profil cum sunt CIGRE și IEE Trans on PAS, studiază și publică periodic concluziile lor asupra domeniului în cauză. Metodele utilizate pentru studiul supratensiunilor se pot grupa în : experimentări pe „viu”, metode analitice și modele analogice.

Experimentarea în sistem electric real, impune utilizarea unei aparaturi complexe și necesită scoaterea din funcțiune a porțiunii de circuit supusă experimentării, rezultatele obținute având o generalitate limitată pentru alte sisteme [1-3].

Metodele analitice de calcul asupra modelului matematic ales determinist sau probabilist au în vedere cu pregnanță obținerea soluțiilor pe căi cât mai simple, cu minimum de erori funcție de caracteristicile modelului stabilit și natura procesului studiat. Mijloacele de investigație analitică, frecvent utilizate, au la bază :

- transformata Laplace sau Fourier, instrumente matematice care reduc ordinul de dificultate al problemelor, oferind posibilitatea utilizării calculului operațional cât și introducerea în calcule a variației cu frecvența a parametrilor sistemului energetic [4-12].

- metoda coordonatelor generalizate a lui Lagrange, aplicabilă circuitelor liniare, metodă care evită recurgerea la utilizarea numerelor complexe în analizarea regimului tranzitoriu din sistemele electrice [13,14].

- metoda undelor directe și reflectate, utilizată la schemele ce conțin atât parametrii

concentrați cât și distribuiți, având ca forme particulare : metoda caracteristicilor (Schnyder-Bergeron) care rezolvă integrarea sistemului diferențial al ecuației telegrafistilor prin metode grafice [15-17] ; metoda diagramei-rețea (Bewley) bazată pe compunerea diferitelor forme de undă cu ajutorul funcției treaptă de amplitudine cât mai mică [18] ; metoda undelor călătoare (Kostenko) care folosește generalizarea noțiunii de undă incidentă și reflectată [19] ;

- metoda funcțiilor Laguerre generalizate, metodă care oferă și posibilitatea modelării analogice [20,21] ;

- metoda transformatelor modale aplicabilă cazurilor mai complexe ale configurației rețelei [9,10,11,22] ;

- metoda funcției de răspuns tranzitoriu, completată de folosirea integralei Duhamel [23-26] ;

Modelarea analogică oferă posibilitatea soluționării ecuațiilor diferențiale ce descriu fenomenul prin apelarea la metoda diferențelor finite sau la cea a separării variabilelor și includerea în schemele echivalente a unor elemente operaționale de tip integratoare și amplificatoare inversoare [21,27-30] ;

Analizorul tranzitoriu de rețea, variantă a modelării analogice, a constituit după deceniul al șaselea, obiect de preocupare intensă în cadrul CIGRE-ului [31]. Din cercetarile întreprinse, se desprinde cu pregnanță concluzia potrivit căreia, cu toată dezvoltarea rapidă a tehnicii de calcul numeric, în studierea fenomenelor tranzitorii, modelul de rețea specializat („Transient Network Analyzer”) prezintă încă o importanță deosebită.

Modelarea fizică asociată puternicelor căi de cercetare cu ajutorul calculatorului, poate conduce la rezultate deosebite în cercetarea și soluționarea multor probleme.

Comportarea sistemelor electroenergetice în cazul transportului de energie la mari distanțe, instalațiile noi de reglare, necesare pentru stabilizarea și menținerea parametrilor între limitele normale, sistemele moderne de protecție adaptate noii evoluții și alte probleme în legătură cu stabilitatea statică și dinamică sau cu comportarea în general a sistemului în caz de incident au putut fi studiate în numeroase și complicate alternative cu ajutorul modelului fizic și prin acesta formulate apoi matematic.

Multitudinea elementelor neliniare prezente în sistemele electroenergetice, a căror comportare este de multe ori necunoscută complet în toate cazurile de accident (caracteristicile dinamice ale sarcinilor, sarcinile de o deosebită varietate ș.a.), conduce întotdeauna la simplificări în modelarea matematică. Aceste simplificări pot fi evitate în cazul unui prim studiu pe un model fizic dezvoltat, prin modelarea elementelor fizice componente.

Cu ajutorul modelului fizic, se poate efectua de asemenea, studiul supratensiunilor luând în considerare caracterul aleatoriu al unor mărimi de stare sau al fenomenelor care intervin în studiul efectuat [32].

Folosirea în paralel a calculatorului numeric și a modelului sau chiar în varianta „model” completat cu un „calculator analogic” poate conferi valențe superioare cercetării în domeniul interesat.

Obiectul tezei îl constituie conceperea, proiectarea și realizarea unui model fizic a liniei electrice aeriene de înaltă tensiune, componenta principală a modelului reticular, care oferă posibilitatea simulării supratensiunilor care apar ca urmare a proceselor tranzitorii datorate operațiilor de comutare (voite ori nu) sau a rezonanței. Pentru modelarea efectului Corona, care apare pe liniile electrice aeriene din cauza acestor supratensiuni a fost conceput și construit un model fizic utilizabil pentru cele mai frecvente tipuri de conductoare și tensiuni ale LEA din România.

Lucrarea a fost structurată pe cinci capitole, având un caracter original în modul de abordare a problematicii acestor capitole. Axată pe elaborarea unor programe de calcul complexe pentru determinarea oscilațiilor supratensiunilor datorate comutației sau pentru calculul parametrilor de secvență a liniilor electrice aeriene și ai modelului fizic al acestora, respectiv a pierderilor prin efect Corona, teza aduce o contribuție inedită la studiul supratensiunilor interne. La baza lucrării se află un amplu material documentar din care au fost trecute în bibliografie 101 titluri, dintre acestea 14 aparținând autorului.

În capitolul 1 al tezei, pe baza unei analize pertinente a factorilor care influențează valoarea parametrilor liniei, se optează pentru schema modelului fizic al liniei electrice aeriene.

Capitolul 2 debutează cu o analiză a domeniului frecvenței oscilațiilor supratensiunilor interne datorate comutației, care pune în evidență necesitatea abordării diferențiate a studiului caracteristicilor de frecvență ale parametrilor liniilor, funcție de tensiunea acestora. Pornind de la această constatare se determină caracteristicile de frecvență ale parametrilor liniei în domenii de frecvență diferite, specifice nivelului de tensiune al liniei electrice aeriene.

Conceperea și proiectarea modelului fizic al liniei este realizată în capitolul 3 al tezei, care cuprinde în prima sa parte opțiunea pentru scările de modelare și lungimea porțiunii de linie modelată de un octopol. În acest scop se ridică curba de magnetizare, caracteristicile de magnetizare și cele ale pierderilor prin curenți turbionari, efect pelicular și postmagnetice ale miezului de ferită, utilizat la confecționarea bobinelor pentru modelarea parametrilor de secvență directă și omopolară ale LEA. Schemele adoptate pentru modelarea rezistenței de secvență directă

și omopolară precum și pentru inductivitatea de secvență omopolară, au la bază o analiză detaliată a familiilor de curbe determinate cu ajutorul unor programe de calcul elaborate de autor.

Influența efectului Corona și modelul fizic conceput, proiectat și executat de autor sunt analizate în capitolul 4 al lucrării. La determinarea conductanței, a capacității suplimentare și a pierderilor prin efect Corona, s-au elaborat programe de calcul. S-a executat un model fizic care simulează fenomenul Corona pe principalele tipuri de conductoare și tensiuni ale LEA din România

Rezultatele experimentale sunt prezentate în capitolul 5 al lucrării, acestea validând comportarea modelului fizic ca simulator al LEA. În acest sens, prezintă interes utilizarea modelului fizic al LEA ca instrument de investigare în studierea supratensiunilor de origine internă, respectiv ca suport de învățare și consolidare a cunoștințelor în domeniul electroenergeticii.

Concluziile asupra tezei de doctorat și contribuțiile originale ale autorului sunt cuprinse în capitolul 6 al lucrării.

În final sunt prezentate selecțiuni din bibliografia utilizată, respectiv anexele cuprinzând ordinogramele programelor elaborate de autor.

Profund recunoscător pentru competența îndrumare și orientare în clarificarea problematicei abordate, autorul prezentei teze de doctorat, își exprimă cu acest prilej considerația și respectul deosebit față de conducătorul științific al acestei teze dl.prof.dr.ing. Negru Viorel.

Adresez mulțumiri colectivului Catedrei de energetică al Facultății de Electrotehnică din Timișoara, și în mod deosebit domnilor : prof.dr.ing. Heinrich Iulius, prof.dr.ing. Velicescu Cornelius, prof.dr.ing. Buta Adrian și conf.dr.ing. Titihăzan Viorel pentru discuțiile utile purtate în elucidarea unor probleme specifice domeniului abordat.

Pentru sprijinul acordat în facilitarea desfășurării părții experimentale a tezei de doctorat aduc mulțumiri conducerii Universității „Eftimie Murgu” Reșița, Facultății de Inginerie precum și domnilor : prof.dr.ing. Gârlașu Ștefan, conf.dr.ing. Ruja Ioan, asist.univ. Praisach Wilhelm Ion.

Cap.1. Considerații generale privind modelarea fizică a liniei electrice aeriene de înaltă tensiune

1.1. Criterii de similitudine

Modelarea fizică a liniilor electrice aeriene se poate realiza fie sub formă de modele micșorate care copiază conductoarele și izolatoarele liniei naturale, fie sub formă de scheme cu circuite echivalente (cu parametri concentrați). Indiferent de varianta aleasă pentru modelare, criteriile de similitudine care stau la baza modelării se obțin din criteriile principale de similitudine. Renunțând la similitudinea geometrică și introducând în criterii parametri raportați la unitatea de lungime, se obține :

$$\frac{C_{(o)}}{G_{(o)} l} = idem; \quad \frac{L_{(o)}}{R_{(o)} l} = idem; \quad R_{(o)} G_{(o)} \Delta l^2 = idem \quad (1.1)$$

unde Δl este lungimea porțiunii modelate a liniei.

Posibilitatea modelării liniei prin model geometric similar este foarte limitată, construirea unui astfel de model necesită modificarea frecvenței și modificarea proprietăților fizice ale mediului ambiant și a materialelor, condiție extrem de greu de îndeplinit.

Prin renunțarea la modificarea frecvenței ca mijloc de modelare se renunță implicit la realizarea modelelor similare ale liniilor cu parametri uniform distribuiți și se adoptă modelarea cu circuite echivalente având parametri concentrați. Este de precizat că în acest caz procesele fizice care au loc în model diferă principal de cele care au loc în linie, spațiul în jurul liniei și procesele ce au loc în acest spațiu nemodelându-se. În astfel de modele se poate vorbi doar convențional despre timpul de propagare a undei și compararea acestui timp cu timpul din linia original, care are parametri distribuiți pe lungimea ei. Practic impulsul de tensiune aplicat la începutul liniei model ajunge instantaneu la capătul opus. Privită ca viteza de propagare a unei valori medii a impulsului, ca și în cazul liniei reale, se poate vorbi de viteza de propagare a undei de curent și tensiune în linia reală și în modelul cu circuite echivalente ale acesteia.

Determinarea parametrilor circuitului care reprezintă o linie electrică aeriană poate fi realizată fie pornind de la dimensiunile geometrice ale liniei originale fie de la parametrii electrici

echivalenți ai acestora care corespund unei anumite scheme echivalente. Cunoscând dimensiunile geometrice ale liniei (dimensiunile și amplasarea geometrică a conductoarelor, parametrii materialului din care sunt confecționate conductoarele), linia se poate reprezenta printr-un circuit fără a cunoaște parametrii electrice trifazați echivalenți (R, G, L, C).

Inductanța unui conductor în sistemul de n conductoare diferite are expresia :

$$L_i = \frac{\sum_{j=1}^n M_{ij} \frac{di_j}{dt} + L_{ii} \frac{di_i}{dt}}{\frac{di_i}{dt}} \quad (1.2)$$

unde : $i, j=1, \dots, n$

L_{ii} - inductanța proprie a conductorului

M_{ij} - inductanța mutuală între orice pereche de conductoare considerate ca linie bifilară

Din relația (1.2) rezultă că pentru obținerea similitudinii inductanței conductorului este necesar să existe similitudinea valorilor curenților ce trec prin conductoare, similitudinea inductanței mutuale M_{ij} și similitudinea inductanței proprii L_{ii} . În consecință se impune respectarea relațiilor :

$$m_L L_{ii}^M = L_{ii}^0; \quad m_L M_{ij}^M = M_{ij}^0 \quad (1.3)$$

unde : m_L - factorul de scară al inductanțelor

L_{ii}^M, M_{ij}^M - inductanțele modelului

L_{ii}^0, M_{ij}^0 - inductanțele liniei

$i, j=1 \dots n$

n - numărul de conductoare

Relații analoge se pot scrie și pentru capacități luând în considerare dimensiunile conductoarelor, amplasarea geometrică a acestora și proprietățile mediului în care se află. Capacitatea oricărui conductor în sistemul de conductoare fiind exprimabilă prin capacitățile parțiale rezultă că pentru similitudinea capacităților acestui sistem este necesar ca toate capacitățile parțiale ale modelului să fie similare cu capacitățile parțiale ale liniei original și anume :

$$m_C C_{ij}^M = C_{ij}^0 \quad (1.4)$$

unde : m_C - factorul de scară al capacităților

C_{ij}^M - capacitățile parțiale ale modelului

C_{ij}^0 - capacitățile parțiale ale liniei

$i, j = 1 \dots n$

n - numărul de conductoare ale sistemului

Relațiile (1.2), (1.3), (1.4) pot fi utilizate pentru modelarea unei linii fizic similare cu altă linie care are parametrii distribuți pe lungimea ei, însă geometric nu este similară cu originalul.

Modelarea complexă a sistemului electric în această variantă fiind practic greu de realizat se recurge pentru modelare la schemele echivalente cu multipoli în lanț. Multipolii sunt formați din rezistențe, inductivități și capacități care modelează fiecare din conductoarele sistemului de conductoare modelat. Pentru modelarea influenței pământului, se introduc în schemă conductoare imagine convenționale [33-35].

1.2. Modelarea fizică a unei porțiuni de linie printr-un multipol

Relațiile valabile pentru modelarea unei porțiuni de linie cu un circuit echivalent se deduc din ecuația tensiunilor pe fiecare conductor :

$$U_i = Z_{ii}I_i + \sum_{j=1}^n Z_{ij}I_j \quad i=1, \dots, n \quad (1.5)$$

unde : U_i - căderea de tensiune în conductoarele liniei

Z_{ii} - impedanța fiecărui conductor al liniei

Z_{ij} - impedanța mutuală dintre conductoare

Pentru o linie simplu circuit ($i=1,2,3$) cu două conductoare de protecție ($i=4,5$) ecuația tensiunilor pe fază devine :

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + Z_{13}I_3 + Z_{14}I_4 + Z_{15}I_5 \\ U_2 &= Z_{22}I_2 + Z_{21}I_1 + Z_{23}I_3 + Z_{24}I_4 + Z_{25}I_5 \\ U_3 &= Z_{33}I_3 + Z_{31}I_1 + Z_{32}I_2 + Z_{34}I_4 + Z_{35}I_5 \end{aligned} \quad (1.6)$$

iar cea aferentă conductorului de protecție :

$$\begin{aligned} U_4 &= 0 = Z_{44}I_4 + Z_{41}I_1 + Z_{42}I_2 + Z_{43}I_3 + Z_{45}I_5 \\ U_5 &= 0 = Z_{55}I_5 + Z_{51}I_1 + Z_{52}I_2 + Z_{53}I_3 + Z_{54}I_4 \end{aligned} \quad (1.7)$$

În cazul amplasării simetrice a conductoarelor de gardă și a celor de protecție a acestora, impedanțele identice ale acestora pot fi înlocuite cu valori medii rezultând :

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z & : Z_4 = Z_5 = Z_T \\ Z_{12} = Z_{23} = Z_{13} = Z_M & \\ Z_{41} = Z_{42} = Z_{43} = Z_{51} = Z_{52} = Z_{53} = Z_{TM} & \end{aligned} \quad (1.8)$$

În consecință relațiile (1.6) se pot scrie astfel :

$$\begin{aligned} U_1 &= Z I_1 + Z_M (I_2 + I_3) + Z_{TM} (I_4 + I_5) \\ U_2 &= Z I_2 + Z_M (I_1 + I_3) + Z_{TM} (I_4 + I_5) \\ U_3 &= Z I_3 + Z_M (I_1 + I_2) + Z_{TM} (I_4 + I_5) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Relațiile (1.7) vor deveni :

$$\begin{aligned} Z_T I_4 + Z_{TM} I_1 + Z_{TM} I_2 + Z_{TM} I_3 + Z_{45} I_4 &= 0 \\ Z_T I_5 + Z_{TM} I_1 + Z_{TM} I_2 + Z_{TM} I_3 + Z_{45} I_5 &= 0 \end{aligned} \quad (1.10)$$

Aceste două relații pot fi scrise și sub forma :

$$2Z_{TM} (I_1 + I_2 + I_3) + (Z_T + Z_{45}) (I_4 + I_5) = 0 \quad (1.11)$$

rezultând pentru curentul total din conductoarele de protecție expresia :

$$-(I_4 + I_5) = \frac{2Z_{TM}}{Z_T + Z_{45}} (I_1 + I_2 + I_3) \quad (1.12)$$

Pe baza relației (1.12) ecuațiile (1.9) se pot scrie sub forma :

$$\begin{aligned} U_1 &= (Z - Z_M) I_1 + Z_M (I_1 + I_2 + I_3) - \frac{2Z_{TM}^2}{Z_{TM} + Z_{45}} (I_1 + I_2 + I_3) \\ U_2 &= (Z - Z_M) I_2 + Z_M (I_1 + I_2 + I_3) - \frac{2Z_{TM}^2}{Z_{TM} + Z_{45}} (I_1 + I_2 + I_3) \\ U_3 &= (Z - Z_M) I_3 + Z_M (I_1 + I_2 + I_3) - \frac{2Z_{TM}^2}{Z_{TM} + Z_{45}} (I_1 + I_2 + I_3) \end{aligned} \quad (1.13)$$

Notându-se cu :

$$\begin{aligned} Z' &= Z_M - 2 \frac{Z_{TM}^2}{Z_{TM} + Z_{45}} \\ Z_1 &= Z - Z_M \end{aligned}$$

unde Z_1 este impedanța de secvență directă a fazei liniei, se obține :

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_1 I_1 + Z' (I_1 + I_2 + I_3) \\ U_2 &= Z_1 I_2 + Z' (I_1 + I_2 + I_3) \\ U_3 &= Z_1 I_3 + Z' (I_1 + I_2 + I_3) \end{aligned} \quad (1.14)$$

Aplicând pe conductoarele fazelor tensiunile $U_1=U_2=U_3=U_0$ care determină curenți egali $I_1=I_2=I_3=I_0$, se obține din (1.13) :

$$U_0 = (Z_1 + 3Z') I_0$$

de unde rezultă :

$$Z_0 = Z_1 + 3Z'$$

În modelul care nu are inductanță mutuală, această creștere a impedanței Z_1 cu $3Z'$ se poate imita prin conectarea unei impedanțe suplimentare Z_{0p} în conductorul neutru.

Impedanța omopolară a modelului (Z_0) se poate determina dacă se alimentează toate cele trei conductoare conectate în paralel cu un curent monofazat ce se întoarce prin conductorul neutru și anume :

$$U_0 = I_0 Z_1 + 3 I_0 Z_{0p} \quad Z_0 = \frac{U_0}{I_0} = Z_1 + 3 Z_{0p} \quad (1.15)$$

Rezultă deci că atât în model cât și în original ecuațiile echilibrului tensiunilor omopolare au caracter identic dacă în conductorul neutru se conectează impedanța $Z_{0p}=Z'$ ce imită impedanța pământului.

Adoptând un factor de scară m , se poate determina valoarea impedanței din model cu formula :

$$Z_{0p}^M = \frac{1}{m_z} \left(Z_M - \frac{2Z_T^2}{Z_T + Z_{45}} \right)^{0r} \quad ; \quad Z_{0p}^M = \frac{1}{m_z} \left(\frac{Z_0 - Z_1}{3} \right)^{0r} \quad (1.16)$$

La determinarea impedanței suplimentare Z_{0p} s-a considerat impedanța omopolară Z_0 =constant. În cazul necesității reflectării pe model a variației rezistenței R_0 și a reactanței X_0 în funcție de frecvență sau de valoarea curentului se conectează în conductorul neutru bobine cu miez de fier, rezistențe neliniare și condensatoare.

La elaborarea modelului liniei cât și în multe programe ce se derulează pe calculatorul

numeric, din motive de simplificare linia se consideră simetrică, deși această simetrie nu poate fi realizată din cauza așezării conductoarelor pe stâlp și a comportării în procesele tranzitorii, cu toată transpunerea tehnică adecvată ce se realizează de obicei. Această ipoteză simplificatoare conferă matricilor impedanțelor longitudinale și a coeficienților capacităților o identitate valorică atât pentru elementele diagonalei (trei) cât și pentru cele exterioare diagonalei (șase) corespunzător valorii lor medii ceea ce presupune o transpunere continuă.

Matricea de impedanță longitudinală $[Z_{ij}]$ se prezintă sub forma :

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} Z & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Sistemul de ecuații pentru determinarea tensiunilor longitudinale ale liniilor funcție de impedanță și curenți se prezintă astfel :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Acest sistem de ecuații poate fi descompus sub forma :

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z-Z_M) & 0 & 0 \\ 0 & (Z-Z_M) & 0 \\ 0 & 0 & (Z-Z_M) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

iar tensiunile \underline{u} se vor prezenta astfel :

$$U_i = (Z-Z_M) I_i + Z_M \sum_{i=1}^3 I_i \quad (1.20)$$

Termenul sumei este identic pentru toate cele trei tensiuni, ceea ce face posibilă introducerea impedanței mutuale (Z_{Ml}) în serie cu impedanța conductorului de întoarcere reprezentat de sol. În acest fel schema octopolului din figura 1.1. poate fi decuplată ușor într-o schema prezentată în figura 1.2. în care se renunță la montarea transformatorului de cuplare.

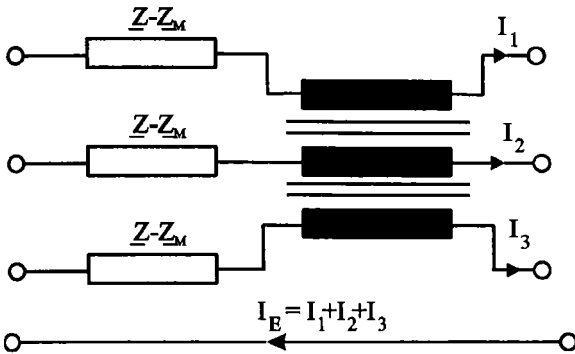


Fig.1.1.Octopol cu transformator de cuplare

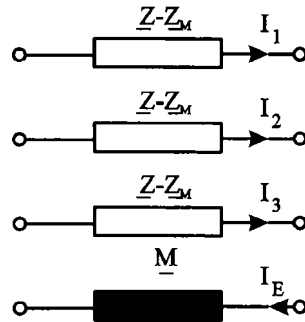


Fig.1.2.Octopol fără transformator de cuplare

Notând impedanțele de succesiune directă cu $R_1+j\omega L_1$ și cele de succesiune omopolară cu $R_0+j\omega L_0$ rezultă pentru ramurile conductorilor de fază :

$$\underline{Z}-\underline{Z}_M=R_1+j\omega L_1 \tag{1.21}$$

iar pentru conductorul echivalent de întoarcere :

$$\underline{Z}_M=R_s+j\omega L_s=\frac{1}{3} [(R_0-R_1) +j\omega (L_0-L_1)] \tag{1.22}$$

Capacitatea față de pământ C_s și cea mutuală C_M se pot exprima funcție de capacitatea de succesiune directă C_1 și cea de succesiune omopolară C_0 în felul următor

$$C_s=C_0 \tag{1.23}$$

$$C_M=\frac{1}{3} (C_1-C_0) \tag{1.24}$$

Cu aceste precizări schema unei porțiuni de rețea se poate reprezenta ca în figura 1.3, atunci când modelarea capacităților se face cu 8 condensatoare, respectiv figura 1.4 în care sunt

utilizate 12 condensatoare.

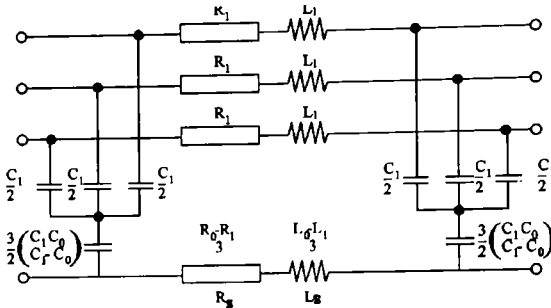


Fig. 1.3. Schema de modelare a rețelei simetrice cu 8 condensatoare

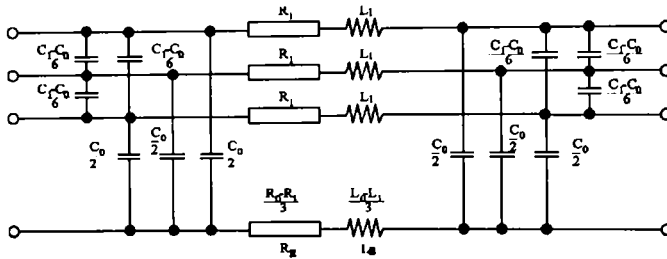


Fig. 1.4. Schema de modelare a rețelei simetrice cu 12 condensatoare.

Cu luarea în considerare a nesimetriei, matricea de inductanță longitudinală de forma :

$$[L_{ij}] = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{12} & L_{22} & M_{23} \\ M_{13} & M_{23} & L_{33} \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

se descompune în două matrici, și anume :

$$[L_{ij}] = \begin{bmatrix} (L_{11}-M_{13}) & (M_{12}-M_{13}) & 0 \\ (M_{12}-M_{13}) & (L_{22}-M_{13}) & (M_{23}-M_{13}) \\ 0 & (M_{23}-M_{13}) & (L_{33}-M_{13}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{13} & M_{13} & M_{13} \\ M_{13} & M_{13} & M_{13} \\ M_{13} & M_{13} & M_{13} \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Considerând, fără a comite o eroare semnificativă, ca simetrică matricea componentelor reale ale conductorilor de fază, schema de modelare a rețelei cu inductivități nesimetrice se prezintă ca în figura 1.5.

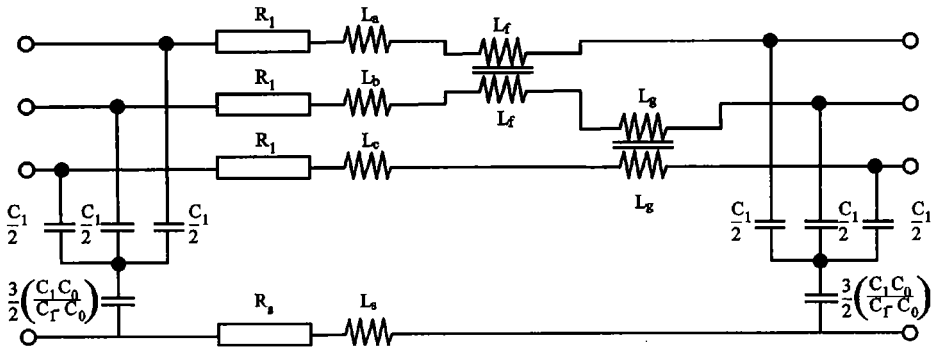


Fig. 1.5. Schema de modelare a rețelei cu inductivități nesimetrice

unde :

$$\begin{aligned}
 L_a &= L_{11} - M_{12} ; & L_b &= L_{22} - M_{12} - M_{23} + M_{13} \\
 L_c &= L_{33} - M_{23} ; & L_f &= M_{12} - M_{13} \\
 L_g &= M_{23} - M_{13} ; & L_s &= M_{13} \\
 R_s &= \frac{1}{3} (R_0 - R_1)
 \end{aligned}
 \tag{1.27}$$

Dezavantajul schemei din figura 1.5. este generat de neidentitatea valorilor inductivităților \$L_a, L_b, L_c\$, care printr-o potrivită alegere a cuplajelor \$M\$ poate fi diminuată. Deoarece orice cuplaj \$M\$ poate fi realizat și prin utilizarea a două inductivități diferite (\$L_{h1}, L_{h2}\$) cu condiția :

$$\sqrt{L_{h1} L_{h2}} = M
 \tag{1.28}$$

și utilizarea unui transformator de cuplaj cu o dispersie neglijabil de mică, schema inductivităților longitudinale ale cuadripolului se poate prezenta ca în figura 1.6.

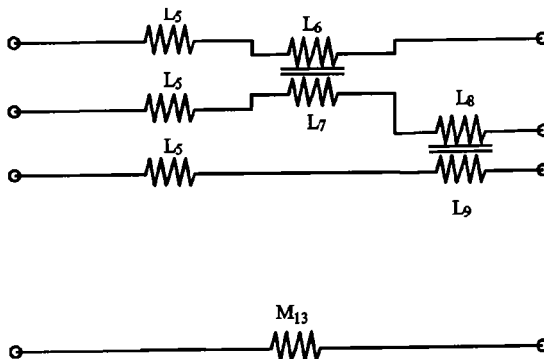


Fig. 1.6. Schema de modelare cu inductivități egale pe fază

unde inductivitățile L_5 - L_9 , trebuie astfel alese încât:

$$\begin{aligned} L_5 + L_6 &= L_{11} - M_{13} ; & L_5 + L_7 + L_8 &= L_{22} - M_{13} \\ L_5 + L_9 &= L_{33} - M_{13} ; & \sqrt{L_6 L_7} &= L_{12} - M_{13} \\ & & \sqrt{L_8 L_9} &= M_{23} - M_{13} \end{aligned} \quad (1.29)$$

Întreaga analiză prezentată, atât pentru modelul de linie simetric, cât și pentru cel nesimetric, a avut în vedere linia fără conductor de gardă. Practic însă, liniile electrice aeriene de înaltă și foarte înaltă tensiune sunt prevăzute cu conductoare de gardă, a căror influență neluată în seamă conduce la erori ce nu depășesc 3...4% [36].

Având în vedere cele de mai sus și în mod deosebit luând în considerare dificultățile de ordin tehnologic privind realizarea practică a unor transformatoare de cuplaj cu miez magnetic care să prezinte caracteristici identice pentru fiecare octopol, pentru realizarea modelului liniei electrice aeriene se va lua în considerare modelul simetric reprezentat în figura 1.3 care, așa cum se va vedea în continuare asigură o bună similitudine a proceselor cu cele din original.

1.3. Deformarea proceselor în lanțul de multipoli.

În lanțul de octopoli care modelează linia electrică, fenomenele de undă diferă de cele din original, procesele care apar înregistrând deformări ca urmare a imposibilității reproducerii exacte a impedanței de undă și a coeficientului de propagare [37].

Impedanța \underline{Z}_Δ și admitanța \underline{Y}_Δ a octopolului care reprezintă o porțiune Δl a liniei, se pot scrie sub forma :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_\Delta &= \underline{Z}_{(0)} \Delta l \\ \underline{Y}_\Delta &= \underline{Y}_{(0)} \Delta l \end{aligned} \quad (1.30)$$

unde : $\Delta l = l/n$, n -fiind numărul de octopoli.

În original relațiile dintre curenți și tensiuni sunt stabilite prin intermediul ecuațiilor :

$$\begin{aligned} U_x &= U_2 \operatorname{ch} \gamma l_x + I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma l_x \\ I_x &= I_2 \operatorname{ch} \gamma l_x + \frac{U_2}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma l_x \end{aligned} \quad (1.31)$$

unde : U_x , I_x - tensiunea respectiv curentul în punctul x , măsurate de la capătul liniei.

$$\gamma = \sqrt{\underline{Z}_{(0)} \underline{Y}_{(0)}} \quad \text{-coeficientul de propagare al liniei}$$

Z_c - impedanța caracteristică a liniei

Ecuțiile analoage se pot scrie pentru lanțul de octopoli echivalenți ai acestei porțiuni de linie și anume :

$$\begin{aligned} \underline{U}_x &= \underline{U}_2 \operatorname{ch} \underline{v}^M n_x + \underline{I}_2 \frac{\underline{Z}^M}{c} \operatorname{sh} \underline{v}^M n_x \\ \underline{I}_x &= \underline{I}_2 \operatorname{ch} \underline{v}^M n_x + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}^M c} \operatorname{sh} \underline{v}^M n_x \end{aligned} \quad (1.32)$$

unde :

\underline{v}^M -coeficientul de propagare în model

n_x -numărul de octopoli din lanț numărat de la capătul lanțului.

Coefficientul de propagare în octopol \underline{v}^M este diferit de cel al originalului (\underline{v}) și se poate determina, pentru octopoli tip π , sub forma :

$$\underline{v}^M = 2 \operatorname{arcsch} \frac{\sqrt{\underline{Z}_\Delta \underline{Y}_\Delta}}{2} \quad (1.33)$$

În consecință mărimea $\underline{v}^M n_x$ diferă de mărimea $\underline{v} n_x$, legătura dintre ele putându-se aproxima [37] cu expresia :

$$\underline{v}^M n_x = \underline{v} n_x \left(1 - \frac{\underline{v}^2 (\Delta l)^2}{24} \right) \quad (1.34)$$

Considerând linia fără pierderi expresia lui \underline{v} va fi :

$$\underline{v} = j \omega \sqrt{L_{(0)} C_{(0)}}$$

În aceste condiții relația (1.34) se va scrie sub forma :

$$\underline{v}^M n_x = \underline{v} n_x \left[1 - \frac{(j \omega \sqrt{L_{(0)} C_{(0)}})^2 (\Delta l)^2}{24} \right] \quad (1.35)$$

respectiv :

$$\underline{v}^M n_x = \underline{v} n_x \left(1 + \frac{\omega^2 L_{(0)} C_{(0)} (\Delta l)^2}{24} \right) = \underline{v} n_x \left(1 + \frac{\omega^2 L_{(0)} C_{(0)} l^2}{24 n^2} \right)$$

Eroarea care apare astfel între model și original va fi :

$$\Delta \underline{v} = \frac{\underline{v}^M n_x - \underline{v} n_x}{\underline{v} n_x} = \frac{\omega^2 l^2 L_{(0)} C_{(0)}}{24 n^2} = \frac{\omega^2 l^2}{v^2 24 n^2} \quad (1.36)$$

Pentru o frecvență dată și o anumită lungime de linie, eroarea va fi cu atât mai mică cu

cât este mai mare numărul de octopoli.

Eroarea impedanței caracteristice poate fi stabilită în mod analog. Cunoscându-se valoarea impedanței caracteristice a originalului,

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_{(0)}}{Y_{(0)}}}$$

se poate determina în cazul cadrupolului de tip π care îl modelează, impedanța caracteristică Z_c^M , astfel

$$Z_c^M = \frac{Z_c}{\sqrt{1 + 0,25\gamma\Delta l^2}} = Z_c \left(1 - \frac{\gamma^2 l^2}{8n^2}\right) \quad (1.37)$$

Eroarea valorii impedanței caracteristice va fi în consecință :

$$\Delta Z_c = \frac{Z_c^M - Z_c}{Z_c} = \frac{Z_c \left(1 - \frac{\gamma^2 l^2}{8n^2}\right) - Z_c}{Z_c} = \frac{\omega^2 l^2}{v^2 8n^2} \quad (1.38)$$

Comparând eroarea impedanței caracteristice cu cea a coeficientului de propagare, rezultă că prima este mult mai mare decât a doua.

În tabelul 1.1 sunt prezentate dependențele erorilor $\Delta(v)_o$ % și $\Delta(Z_c)_o$ % pentru diferite valori ale frecvenței în cazul $\Delta l = 25\text{Km}$.

Tabelul 1.1.

f [Hz]	50	100	200	500
$\Delta(v)_o$	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$11,41 \cdot 10^{-5}$	$45,66 \cdot 10^{-5}$	$2,853 \cdot 10^{-3}$
$\Delta(Z_c)_o$	$8,56 \cdot 10^{-5}$	$34,23 \cdot 10^{-5}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	$8,56 \cdot 10^{-3}$

f [Hz]	1000	1300	1600	2000
$\Delta(v)_o$	$11,41 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$	$2,92 \cdot 10^{-2}$	$3,456 \cdot 10^{-2}$
$\Delta(Z_c)_o$	$34,23 \cdot 10^{-3}$	$5,79 \cdot 10^{-2}$	$8,76 \cdot 10^{-2}$	$10,37 \cdot 10^{-2}$

În cazul liniei original, fără pierderi și având la capăt o sarcină pur rezistivă, egală ca valoare cu impedanța caracteristică, tensiunea și curentul de-a lungul acesteia sunt cunoscute ca mărime și variază cu faza.

Raportul tensiunilor între două puncte oarecare ale liniei situate la distanța Δl unul față de celălalt se exprimă prin relația :

$$\frac{U_x}{U_{x+\Delta l}} = e^{-j\alpha\Delta l} \quad (1.39)$$

unde :

$$\alpha = \omega \sqrt{L_{(0)} C_{(0)}}$$

Relația este valabilă în original pentru orice frecvență. Pentru model se poate utiliza o relație analogă, valabilă însă numai pentru un domeniu limitat de frecvență. Astfel, raportul tensiunilor pentru două elemente succesive ale lanțului de cuadripoli este :

$$\frac{U_k}{U_{k+1}} = e^{-\underline{y}^M} \quad (1.40)$$

În absența amortizării, \underline{y}^M este o mărime imaginară de forma :

$$\underline{y}^M = j\alpha^M \quad (1.41)$$

Ținând seama de (1.33) se obține :

$$\underline{y}^M = 2 \operatorname{arc sh} \frac{1}{2n} \sqrt{Z_{(0)} Y_{(0)}}$$

astfel încât :

$$\begin{aligned} \operatorname{sh} \frac{\underline{y}^M}{2} &= \frac{1}{2n} \sqrt{Z_{(0)} Y_{(0)}} \\ \operatorname{ch}^2 \frac{\underline{y}^M}{2} &= 1 + \frac{1^2}{4n^2} Z_{(0)} Y_{(0)} \end{aligned} \quad (1.42)$$

iar pentru cazul liniei ideale:

$$\operatorname{ch}^2 \frac{j\alpha^M}{2} = 1 + \frac{1^2}{4n^2} \cdot Z_{(0)} Y_{(0)} = 1 - \frac{1^2 \omega^2}{4n^2} L_{(0)} C_{(0)} \quad (1.43)$$

$$\operatorname{cos}^2 \frac{\alpha^M}{2} = 1 - \frac{1^2 \omega^2}{4n^2} L_{(0)} C_{(0)} \quad (1.44)$$

de unde :

$$\cos^2 \frac{\alpha^M}{2} = 1, \text{ pentru } \omega = 0 \quad (1.45)$$

$$\cos^2 \frac{\alpha^M}{2} = 0, \text{ pentru } \omega = \omega_{\max} = \frac{2n}{l\sqrt{L_{(0)}C_{(0)}}} \quad (1.46)$$

și corespunzător

$$f_{\max} = \frac{n}{\pi l\sqrt{L_{(0)}C_{(0)}}} \quad (1.47)$$

Octopoulul se comportă deci ca un filtru trece-jos [38-39] permițând transmiterea fără distorsiuni a unui număr limitat de armonici superioare.

În cazul unei frecvențe a tensiunii aplicate mai mare decât f_{\max} reflectarea undelor în fiecare nod al lanțului de octopoli conduce la micșorarea tensiunii echivalent cu efectul de amortizare, fenomen ce nu se produce în linia omogenă. Matematic, această amortizare se exprimă prin apariția în expresia lui \underline{v}^M a unei componente reale.

Dacă $k = \omega_{\max}/\omega_1$ este ordinul armonicii transmise prin model fără distorsiune din relația (1.46) rezultă :

$$k \leq \frac{2n}{\omega_1 l\sqrt{L_{(0)}C_{(0)}}} = 1900 / \Delta l \quad (1.48)$$

În aceste condiții expresiile (1.36) și (1.38) devin :

$$\Delta Z_c = \frac{k^2 \omega_1^2 l^2}{8 v^2 n^2} \quad \Delta v = \frac{k^2 \omega_1^2 l^2}{24 v^2 n^2} \quad (1.49)$$

Pentru procesele care duc la apariția armonicilor superioare de curent și tensiune, distorsionate pe model, mai ales în partea superioară a spectrului transmis, alegerea lanțului de octopoli trebuie făcută astfel încât să fie satisfăcute criteriile de similitudine pentru toate frecvențele care interesează.

Dispersia valorilor lui Z_c și v la model și original conduce în acest caz la distorsiuni, erorile $\Delta Z_c\%$ (figura 1.10) și $\Delta v\%$ (figura 1.11) crescând rapid odată cu creșterea frecvenței.

Conform relației (1.48), pentru o porțiune de linie $\Delta l = 100$ km reprezentată printr-un octopol se pot transmite pe model, fără distorsiuni, armonicele superioare până la armonica de ordinul 19 inclusiv, iar pentru $\Delta l = 25$ km numărul de ordine al armonicilor nedeformate este 76, ceea ce după cum se va vedea în continuare, este mai mult decât satisfăcător.

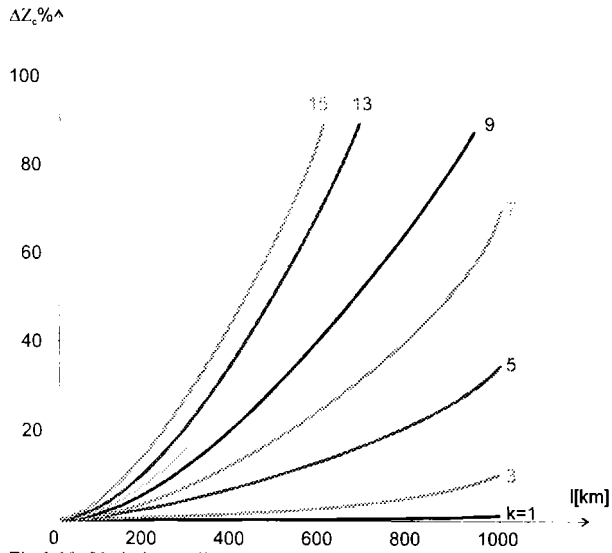


Fig.1.10. Variația erorii procentuale a impedanței caracteristice

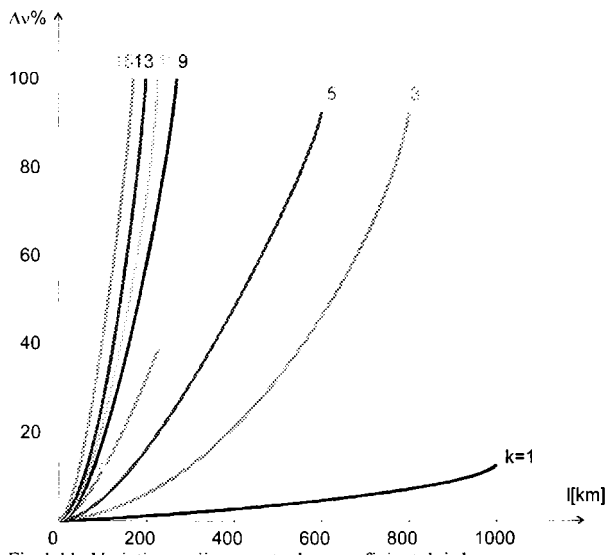


Fig.1.11. Variația erorii procentuale a coeficientului de propagare

Diminuarea distorsiunilor se poate realiza deci prin alegerea unui număr cât mai mare de octopoli pentru modelul aferent originalului, în cazul modelului realizat, așa cum se va vedea în continuare, lungimea modelată de un octopol este $\Delta l=25\text{km}$.

Cap.2. Parametrii liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune

2.1. Dependența de frecvență a parametrilor liniei electrice aeriene

2.1.1. Considerații generale

Parametrii longitudinali ai liniilor electrice aeriene cu trei conductoare de fază și 1 sau 2 conductoare de protecție se pot reprezenta printr-o matrice de impedanță longitudinală, pătratică, conform relației

$$[\underline{U}_i] = [\underline{Z}_{ij}] \cdot [\underline{I}_i] \quad \text{unde } i, j = 1, \dots, 5 \quad (2.1)$$

unde $[\underline{U}_i]$ și $[\underline{I}_i]$ reprezintă matricea coloană aferentă căderilor de tensiune respectiv curenților din conductoare.

Elementele diagonale ale matricii $[\underline{Z}_{ij}]$, care țin seama de componentele interne ale conductorului (R_c , L_c) de influența câmpului exterior (L_g) respectiv corecțiile datorate solului (R_{ip} , L_p) se pot scrie sub forma :

$$\underline{Z}_{i=j} = R_c + R_{iip} + j\omega (L_c + L_g + L_p) \quad (2.2)$$

iar cele exterioare diagonalelor prin relația :

$$\underline{Z}_{i \neq j} = R_{ijp} + j\omega (M_g + M_p) \quad (2.3)$$

unde R_{ip} și M_p reprezintă componente datorate influenței solului, iar M_g influenței câmpului exterior conductorului.

Exceptând pe L_g și M_g , toate celelalte componente ale elementelor matricii $[\underline{Z}_{ij}]$, într-o mai mare sau mai mică măsură sunt dependente de frecvență. Practic, influența maximă a frecvenței în valoarea parametrilor impedanțelor longitudinale se regăsește în componentele care realizează corecția datorată influenței solului (componente notate cu indicele p).

Calculul componentelor impedanței longitudinale ale unei linii aeriene a fost soluționat de Carson [33] care și-a întemeiat metoda de calcul pe baza unor simplificări cum sunt :

- linia este infinit lungă, desfășurată la o înălțime constantă și paralelă cu suprafața de pământ plană .

- conductibilitatea omogenă a pământului ;
- permeabilitatea (μ_r) și constanta dielectrică (ϵ_r) a pământului egală cu unitatea ;
- intensitatea câmpului electric în raport cu pământul prezintă o singură componentă (în lungul liniei).

Componentele de impedanță ($R_{iip} + j \omega L_p$) și ($R_{ijp} + j \omega M_p$) sunt reprezentate prin relația:

$$Z_p = 2 \mu_0 \mathcal{F} (P + jQ) \tag{2.4}$$

în care P și Q sunt la rândul lor funcții de mărimile W și θ .

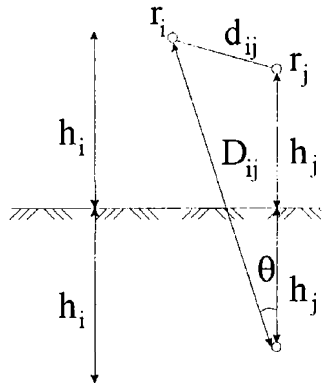


Fig.2.1. Mărimi geometrice

Cu specificațiile din figura 2.1 expresiile lui W și θ sunt:

$$W = 2h_i \sqrt{\mu_0 \frac{\omega}{\rho}} \quad ; \theta = 0 \tag{2.5}$$

pentru componentele elementelor diagonale.

$$W = D_{ij} \sqrt{\mu_0 \frac{\omega}{\rho}} \quad ; \theta = \arccos \frac{h_i + h_j}{D_{ij}} \tag{2.6}$$

pentru componentele exterioare diagonalei.

Pentru funcțiile P și Q reprezentările în serii infinite, date de Carson pe baza dezvoltării în serie a funcțiilor Bessel și Struve, oferă relații de calcul corective și în același timp utile încadrării în programe pe calculatorul numeric.

Pe baza studierii cu exactitate a formelor analitice scrise în transformată Laplace pentru impedanțele lineice, bazate pe dezvoltările funcțiilor Struve și Bessel, s-au adoptat corecții conforme cu concluziile studiului în domeniul frecvenței, a influenței efectului pelicular și a pământului [40].

Pentru calcule estimative a funcțiilor P și Q sunt deasemeni indicate soluții de aproximație pentru diferite valori ale lui W cât și reprezentări grafice a celor două funcții.

Limitarea intensității câmpului electric în raport cu pământul la o singură componentă reprezintă o aproximație admisibilă [41], iar componentele de câmp perpendiculare pe sensul circuitului liniei sunt foarte mici și influențează cu mai puțin de 2% valorile lui P și Q în cazul unor frecvențe de 100 KHz până la 1 MHz [42].

Considerarea permitivității relative (ϵ_r) de valoare egală cu unitatea, se poate accepta fără rezervă, deoarece rezultatul calculului este influențat cu sub 2% abia la valori ale frecvenței de peste 100 KHz [5;40;42].

Privitor la valorile permeabilității, este rezonabil a fi considerată sub 10, ceea ce ar conduce la modificări sensibile asupra corecțiilor rezistenței și inductivității. Cum însă este puțin probabil ca traseul liniei să străbată terenuri pe porțiuni lungi cu proprietăți magnetice, devine explicabil faptul că în literatura de specialitate nu apar cazuri de folosire concretă în calculele parametrilor lineici, a proprietăților magnetice ale solului, diferite de cea a vidului.

Omogenitatea conductibilității solului până la mari adâncimi nu reprezintă o descriere fidelă a realității. Metodele de calcul frecvent adoptate partiționează solul în două, trei sau chiar mai multe straturi horizontale cu conductivități diferite, stratul inferior fiind considerat infinit de adânc. Pentru valori mici ale lui W, funcțiile P și Q au o dependență evidentă în raport cu stratificarea, deosebindu-se mult de valorile calculate pentru un sol omogen, însă aceste deosebiri practic dispar în cazul valorilor mari ale lui W. Diferențele mari în calculul lui W apar datorită utilizării conductibilității solului din stratul superior și nu cel mai adânc.

În cazul concret al determinării parametrilor lineici, dependenți de frecvența oscilațiilor care apar în procesele tranzitorii generate de operațiile de comutare, luarea în calcul a conductibilității stratului cel mai adânc este rațională, abaterile care apar în raport cu condiția de omogenitate fiind ne semnificative pentru dimensionarea unui model fizic al liniei.

Asimilarea cu o linie infinit lungă și înălțimea constantă a liniei față de pământ, prin neglijarea variației acestei înălțimi, datorate greutateii proprii și a formelor de relief, constituie o simplificare acceptată în metodele de calcul din literatura de specialitate.

Componentele R_c și X_c ale conductorului, determinate de câmpul propriu, reprezintă în

cadrul matricii impedanței longitudinale, termeni de importanță secundară atât ca valoare cât și dependență de frecvență. Valoarea mică a inductivității L_c (cca 0,05 mH/Km), cu tendință de scădere la creșterea frecvenței curentului vehiculat prin conductor, se neglijează în calcule, omiterea ei neinfluențând semnificativ la elaborarea modelului liniei.

În cazul rezistenței interioare (R_c) dependentă de frecvență, în sensul creșterii acesteia odată cu mărirea frecvenței, deși mică în comparație cu cea a solului, se necesită a fi luată în considerare, fiind determinantă în amortizarea proceselor tranzitorii dintre faze.

Determinarea influenței efectului pelicular asupra valorii rezistenței și reactanței interne au în vedere formule elaborate pe baza funcțiilor Bessel. Calculul acestor termeni ai elementelor diagonalei matricii apelează la următoarele formule [43] :

$$\frac{R_{ca}}{R_{cc}} = \frac{mr}{2} \cdot \frac{ber(mr) \cdot bei'(mr) - bei(mr) \cdot ber'(mr)}{[ber'(mr)]^2 + [bei'(mr)]^2} \quad [\Omega/Km] \quad (2.7)$$

$$\frac{X_{ca}}{X_{cc}} = 10^3 \frac{4}{mr} \frac{ber(mr) \cdot ber'(mr) + bei(mr) \cdot bei'(mr)}{[ber'(mr)]^2 + [bei'(mr)]^2} \quad [\Omega/Km] \quad (2.8)$$

unde : - $R_{cc} = \rho l / S$ - este rezistența lineică în curent continuu

- $X_{cc} = 2\pi f \mu_0 l / 8\pi$ - este reactanța conductorului corespunzător câmpului interior al acestuia

- $ber(mr) = Re\{J_0(\sqrt{jmr})\}$, $bei(mr) = Im\{J_0(\sqrt{jmr})\}$ - sunt partea reală,

respectiv imaginară a funcției Bessel de speța întâi și ordin zero

- $ber'(mr)$; $bei'(mr)$ - sunt derivatele de ordinul întâi ale funcțiilor $ber(mr)$, $bei(mr)$

- $m = \sqrt{\mu_0 \omega / \rho}$ - este o constantă funcție de frecvență, rezistivitate a conductorului și

permeabilitatea magnetică a mediului

- r - raza geometrică a conductorului

- R_{ca} , X_{ca} - rezistența și inductivitatea internă în curent alternativ.

Este de menționat că pentru calculul cu aproximație acceptabilă a impedanței interioare a conductorilor se poate utiliza relația :

$$Z_c = R_c + j\omega L_c = \frac{kl}{2\pi r \sigma} \cdot \frac{J_0(kr)}{J_1(kr)} \quad (2.9)$$

unde : r - raza conductorului echivalent

l - lungimea liniei

$$k = (1 - j) \sqrt{\omega \sigma \mu / 2}$$

J_0, J_1 - funcții Bessel de speța întâi ordinul zero și unu.

σ - conductivitatea materialului

μ - permeabilitatea absolută a materialului.

Pornind de la relațiile lui Carson au fost stabilite formule operante de calcul [44;45] pentru determinarea caracteristicii de frecvență a rezistenței de secvență directă a liniei (R'_1) care ține seama de influența efectului pelicular și a solului :

$$\frac{R'_1}{R_1} = 1 + \frac{1}{3} A^4 f^2 \quad \text{pentru } 0 \leq f \leq f_{cr} \quad (2.10)$$

$$\frac{R'_1}{R_1} = A\sqrt{f} + \frac{1}{4} + \frac{3}{64A} \cdot \frac{1}{\sqrt{f}} \quad \text{pentru } f > f_{cr} \quad (2.11)$$

unde : - R_1 - rezistența în curent continuu

- $A = d/4\sqrt{\pi\mu\sigma}$ - constantă care depinde de proprietățile materialului conductorului

- d - diametrul conductorului

- μ - permeabilitatea magnetică a materialului conductorului

- σ - conductibilitatea electrică a materialului conductorului

- $f_{cr} = 1/A^2$ - frecvența critică

Valorile dependente de frecvență ale rezistenței de secvență omopolară $R'_{\alpha(0)}$ și inductivității de secvență omopolară $L'_{\alpha(0)}$ pentru 1km de linie, se pot calcula cu ajutorul relațiilor următoare [35;45] :

$$R'_{0(0)} = R'_{1(0)} + 3\pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \quad [\Omega/km] \quad (2.12)$$

$$L'_{0(0)} = \frac{\mu_0}{2\pi} l g \frac{H_{med}}{\sqrt[3]{I_m D_m^2}} \quad [H/Km] \quad (2.13)$$

unde : - $R'_{1(0)}$ - rezistența lineică de secvență directă [Ω/Km]

- f - frecvența [Hz]
- σ_p - conductibilitatea specifică a solului [sim/m]
- r_m - raza medie a conductorului fascicularizat [m]
- D_m - distanța medie între faze a conductorului fascicularizat [m]
- H_{med} - adâncimea medie a căii de întoarcere prin pământ care se calculează cu relația:

$$H_{med} = \frac{(1,78...2,1) \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f \sigma_p 10^{-11}}} \quad (2.14)$$

Înlocuind în relația (2.13) pe H_{med} rezultă :

$$L'_{0(0)} = 1,387 \cdot 10^{-3} \lg \frac{(1,78...2,1) \cdot 10^{-3}}{\sqrt[3]{r_m D_m^2} \sqrt{f \sigma_p 10^{-11}}} \quad (2.15)$$

Componentele independente de frecvență (L_g și M_g) se calculează din geometria conductorilor, cu notațiile din figura 2.1., utilizând relațiile :

$$L_g = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad (2.16)$$

$$M_g = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (2.17)$$

și luarea în considerare a săgeții f_{max} datorate greutatei proprii.

Înălțimea medie a conductorului se calculează cu formula :

$$h = h_i - 2/3 f_{max} \quad (2.18)$$

unde :

h_i - este înălțimea conductorului la stâlp [m].

Pentru conductoarele fasciculare, în locul lui r se ia raza medie r_m determinată cu relația:

$$r_m = \sqrt[n]{n \cdot a^{(n-1)} \cdot r} \quad (2.19)$$

unde :

- n - numărul conductorilor din fascicol
- r - raza conductorului
- a - raza cercului ce trece prin centrul conductoarelor fascicolului.

Capacitățile de secvență directă și omopolară [F/Km] determinate pe baza ecuațiilor lui Maxwell, se calculează cu relațiile :

$$C_{1(0)} = \frac{0,0241}{1g \frac{D_m}{r_m}} \quad [mF/Km] \quad (2.20)$$

$$C_{0(0)} = \frac{0,0241}{31g \frac{2h}{\sqrt{r_m D_m^2}}} \quad [mF/Km] \quad (2.21)$$

unde : - r_m - raza medie a conductorului [m]

- D_m - distanța medie geometrică între conductoare [m]

- h - înălțimea medie de suspendare a conductoarelor [m].

Din relațiile (2.20), (2.21) rezultă că valorile capacităților de secvență directă și cele ale capacităților de secvență omopolară nu depind de frecvență.

2.1.2. Parametrii liniilor de înaltă tensiune la frecvența de 50 Hz

Parametrii de secvență ai liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune, se înscriu într-o gamă largă de valori, funcție de condițiile de execuție cum sunt: diametrul conductoarelor, înălțimea de suspendare, distanța dintre faze, rezistența specifică a solului. Pentru clasele de tensiuni 110-220 KV și 400-500 KV în tabelele 2.1, respectiv 2.2, sunt prezentate din literatura de specialitate [45], limitele superioare și inferioare ale rezistențelor, reactanțelor inductive și ale capacităților atât pentru secvența directă cât și pentru cea omopolară.

Tabelul 2.1.

Parametrul	$R_{1(0)}$ [Ω/Km]	$L_{1(0)}$ [mH/Km]	$C_{1(0)}$ [pF/Km]	$R_{0(0)}$ [Ω/Km]	$L_{0(0)}$ [mH/Km]	$C_{0(0)}$ [pF/Km]
Limita superioară	0,28	1,433	10000	0,6	4,65	6000
Limita inferioară	0,064	1,21	7900	0,2	3,47	5000

Tabelul 2.2.

Parametrul	$R_{l(0)}$ [Ω /Km]	$L_{l(0)}$ [mH/Km]	$C_{l(0)}$ [pF/Km]	$R_{0(0)}$ [Ω /Km]	$L_{0(0)}$ [mH/Km]	$C_{0(0)}$ [pF/Km]
Limita superioară	0,108	1,05	12200	0,26	3,5	7100
Limita inferioară	0,065	0,796	11900	0,17	3,025	6900

Pentru unele linii electrice aeriene de înaltă tensiune, valorile parametrilor de secvență directă și omopolară sunt cele prezentate în tabelul 2.3. Determinarea acestora s-a făcut pe baza unui program de calcul elaborat de autor în limbaj Visual Basic, denumit PARAMRLC și cuprins în anexa 1 [67,68].

Este de precizat că pentru determinarea parametrilor de secvență directă și omopolară ai liniilor electrice aeriene de înaltă și foarte înaltă tensiune, au fost luate în considerare tipurile frecvente de stâlpi din țară precum și secțiunile tipizate de conductoare. La calcularea inductivităților de secvență omopolară au fost utilizate rezistențe specifice ale solului în intervalul 5-500 Ω m.

Analizând datele sintetizate în tabelul 2.3, este de menționat că valorile parametrilor liniilor electrice aeriene de 110-220KV sunt cuprinse în general între valorile limită din tabelul 2.1. Excepție fac inductivitatea de secvență omopolară a LEA 110KV (montată pe stâlpi SCS 1109 și echipată cu conductor de Cu 1x70mm²) și capacitățile de secvență omopolară ale LEA 220KV, care depășesc nesemnificativ limitele maxime din tabelul 2.1. În cazul LEA 400KV deasemeni se constată o încadrare în limitele cuprinse în tabelul 2.2, cu excepția unor capacități de secvență directă care se abat cu puțin la stânga intervalului de referință, respectiv capacitățile de secvență omopolară care depășesc limita superioară a intervalului din tabelul 2.2.

2.1.3. Aprecieri privind domeniul de interes al frecvenței oscilațiilor.

Oscilațiile care apar în procesele de comutație sau avarie au fost și sunt studiate cu preponderență sub aspectul amplitudinilor acestora.

Referitor la valorile frecvenței oscilațiilor, acestea sunt relativ puțin tratate în literatura de specialitate. Menționăm astfel, datele prezentate la deconectarea liniilor în gol [50], reprezentate în tabelul 2.4, de unde rezultă că frecvența oscilațiilor se situează între 114-1443 Hz, pentru tensiuni ale liniei cuprinse între 138 KV și 330 KV și lungimi de până la 480 Km,

Tabelul 2.3.

	Parametrul Tipul linii	R_{100} [Ω /Km]	L_{100} [mH/Km]	C_{100} [pF/Km]	R_{500} [Ω /Km]	L_{500} [mH/Km]	C_{500} [pF/Km]
110KV	Cu 1x70mm ²	0.28	1.425	7848	0.428	3.572-3.058	5188
	Ol-Al 1x240mm ²	0.128	1.339	8685	0.272	3.3-4.786	5775
220KV	Ol-Al 1x300mm ²	0.1	1.38	8415	0.248	3.148-4.635	616
	Ol-Al 1x450mm ²	0.064	1.343	8654	0.212	3.111-4.598	6287
400KV	Ol-Al 2x300mm ²	0.05	1.084	10476	0.198	2.622-4.109	7883
	Ol-Al 2x450mm ²	0.032	1.066	1075	0.18	2.604-4.09	7986
	Ol-Al 3x300mm ²	0.033	0.96	1186	0.18	2.5-3.985	8583
	Ol-Al 3x450mm ²	0.021	0.948	12027	0.169	2.486-3.972	8665
750KV	Ol-Al 4x300mm ²	0.025	0.974	11641	0.175	2.232-3.719	9273
	Ol-Al 4x450mm ²	0.015	0.965	11753	0.164	2.223-3.709	9344
	Ol-Al 5x300mm ²	0.02	0.902	12327	0.168	2.161-3.647	9833
	Ol-Al 5x450mm ²	0.0128	0.895	12641	0.161	2.153-3.64	9897

alimentate de la surse de puteri cuprinse între 25 și 800 MW.

Tabelul 2.4.

Tensiunea sistemului [KV]	Lungimea liniei [Km]	Puterea sursei [MW]	Ordinul de multiplicare a supratensiunii		Frecvența [Hz]	Timpul la atingerea maximumului tensiunii [μs]
			Barc	Linie		
138	16	25	2,8	2,8	510	1000
		100	2,8	2,8	1020	500
		200	2,8	2,8	1443	346
	160	50	2,4	3,5	221	2260
		200	1,9	3,3	460	1100
230	32	50	2,5	3,1	306	1630
		200	2,5	3,2	615	810
	320	100	2,0	3,0	150	3300
		400	1,7	3,0	160	2770
330	48	100	2,3	2,4	220	2200
		400	2,6	3,2	430	1000
	480	200	2,1	3,2	114	4400
		800	1,5	3,1	125	4000

În cazul punerilor monofazate la pământ, oscilația tensiunii pe faza neavariată, înainte de ruperea arcului [51] este $\omega_1 \cong 7\omega$, iar după ruperea arcului de punere la pământ este $\omega_2 \cong 2\omega$, deci de ordinul 300-700Hz.

Pe baza acestor date rezultă un domeniu de variație a frecvenței oscilațiilor corespunzătoare diferitelor regimuri tranzitorii a căror domenii nu depășește 1000 Hz pentru linii de 110-220 KV, respectiv 250 Hz pentru linii de 400 - 500 KV.

Datele din literatură prezentate, privind domeniul de frecvență al oscilațiilor datorate comutației se impune a fi apreciat cu o rezervă din cel puțin două motive : în primul rând nu se precizează întotdeauna condițiile de determinare și parametrii rețelei și în al doilea rând, aprecierea frecvenței din date experimentale se face pe baza duratei de timp în care supratensiunea obține valoarea maximă.

Deoarece în studiul pe model, realizat printr-un lanț de octopoli, se produc deformări ale proceselor comparativ cu cele care au loc în linia reală, mai ales în partea superioară a spectrului

transmis, se impune ca la alegerea parametrilor octopolilor să fie satisfăcute criteriile de similitudine pentru toate frecvențele de interes și în consecință, cunoașterea domeniului în care se înscriu aceste frecvențe.

Ținând seama de cele menționate anterior ne propunem în continuare o analiză detaliată a acestei probleme.

2.1.4. Determinarea frecvenței oscilațiilor în regim de comutație.

În vederea aprecierii domeniului frecvențelor care caracterizează procesele tranzitorii ce însoțesc operațiile de comutare ale LEA de înaltă tensiune, pornim de la expresia transformatei Laplace a tensiunii [45] :

$$u(x, p) = u_0(p) \frac{Z_c Z_2 \operatorname{ch} \nu(1-x) + Z_0^2 \operatorname{sh} \nu(1-x)}{Z_c(Z_0 + Z_2) \operatorname{ch} \nu l + (Z_c^2 + Z_0 Z_2) \operatorname{sh} \nu l} \quad (2.22)$$

unde : ν - coeficient de propagare

Z_c - impedanța caracteristică a LEA

Z_0 - impedanța interioară a sursei

Z_2 - impedanța transversală reprezentată de elementele de compensare a LEA.

Pulsația oscilațiilor libere se determină din valorile $\nu_k l$, reprezentând rădăcinile numitorului expresiei (2.22) :

$$Z_c(Z_0 + Z_2) \operatorname{ch} \nu_k l + (Z_c^2 + Z_0 Z_2) \operatorname{sh} \nu_k l = 0 \quad (2.23)$$

Considerând linia fără pierderi $\nu_k l = p_k \tau = \pm j \omega_k \tau$ din relația (2.23) se obține :

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = -j \frac{Z_c^2 + Z_0 Z_2}{Z_c(Z_0 + Z_2)} \quad (2.24)$$

Expresia (2.24) în diverse ipoteze, pentru impedanța sursei Z_0 , respectiv pentru impedanța transversală Z_2 devine :

1. În cazul $Z_0 = p_1 L_0$, $Z_2 = p_1 L_2$, $T_0 = L_0 / Z_c$, $T_2 = L_2 / Z_c$

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = \frac{\omega_k^2 T_0 T_2 - 1}{\omega_k (T_0 + T_2)} \quad (2.25)$$

care va fi pentru :

I.1. $L_0 = 0$ și $L_2 \neq 0$

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = -\frac{1}{\omega_k \tau \frac{T_2}{\tau}} \quad (2.26)$$

I.2. $L_0 \neq 0$ și $L_2 = \infty$ ($Z_2 = \infty$)

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = \omega_k \tau \frac{T_0}{\tau} \quad (2.27)$$

I.3. $L_0 \neq 0$ și $L_2 \neq 0$

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = \omega_k \tau \frac{T_0'}{\tau} - \frac{1}{\omega_k \tau \frac{T_2'}{\tau}} \quad (2.28)$$

unde :

$$T_0' = \frac{T_0 T_2}{T_0 + T_2} ; \quad T_2' = T_0 + T_2 \quad (2.29)$$

II. În cazul $Z_0 = p_k L_0$; $Z_2 = 1/(p_k C_2)$; $T_0 = L_0/Z_c$; $T_2 = 1/(C_2 Z_c)$; $\omega_0 = 1/\sqrt{L_0 C_2}$

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = \frac{1 + \frac{T_0}{T_2}}{1 - \left(\frac{\omega_k}{\omega_0}\right)^2} \omega_k T_2 \quad (2.30)$$

Dacă $L_0 \rightarrow 0$, $\omega_0 \rightarrow \infty$ și $1 - (\omega_k/\omega_0)^2 \rightarrow 1$, atunci

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = \omega_k \tau \frac{T_0 + T_2}{\tau} \quad (2.31)$$

iar pentru

II.1. $L_0 = 0$, $C_2 \neq 0$

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau = \omega_k \tau \frac{T_2}{\tau} \quad (2.32)$$

II.2. $L_0 \neq 0$, $C_2 = 0$

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau \approx \omega_k \tau \frac{T_0}{\tau} \quad (2.33)$$

II.3. $L_0 \neq 0$, $C_2 \neq 0$

$$\operatorname{ctg} \omega_k \tau \approx \omega_k \tau \frac{T_0 + T_2}{\tau} \quad (2.34)$$

Pentru determinarea soluțiilor ecuației (2.24) în diversele ipoteze menționate s-au elaborat programe de calcul prezentate în anexele 2÷4 [53,54,55].

Programele elaborate au fost axate pe rezolvarea ecuațiilor:

$$f(x) = \operatorname{ctg} x - ax = 0 \quad (2.35)$$

$$f(x) = \operatorname{ctg} x - ax + 1/bx = 0 \quad (2.36)$$

S-a utilizat metoda înjumătățirii intervalului care, bazată pe proprietatea lui Darboux, micșorează intervalul până când lungimea acestuia este mai mică decât precizia cerută.

Metoda utilizată, deși mai puțin agreată în literatura de specialitate a fost preferată deoarece :

- nu se impun condiții de margine asupra funcției sau derivatei sale, ca în cazul metodei iterative (condiții care nu sunt îndeplinite de aceste funcții) ;

- spre deosebire de alte metode, nu impune existența derivatelor și nici ca funcția să-și păstreze concavitatea în jurul soluției cum este cazul metodei tangentei sau cea iterativă.

Singura cerință care se impune metodei aplicate, este ca funcția să aibă proprietatea lui Darboux, care în cazul cercetat este îndeplinită, funcția în cauză fiind continuă. Argumentul invocat în literatura de specialitate, privind slaba convergență a metodei aplicate, îl apucăm ca ne fiind relevant în acest caz, având în vedere că pentru determinarea rădăcinilor ecuațiilor (2.35; 2.36) cu condiția obținerii unei precizii de 10^{-10} - calculatorul efectuează cel mult 35 iterații. Numărul mai mic de iterații necesar în cazul celorlalte metode este contrabalansat de complexitatea sporită a calculelor la fiecare iterație, generate de evaluarea derivatelor respectiv caracterul mai complicat al formulelor de calcul.

Intervalele între care au fost determinate rădăcinile ecuațiilor (2.36; 2.37) sunt de forma $(k-1+10^{-10})\pi$; $(k-10^{-10})\pi$; nu s-a adoptat o precizie mai mare deoarece nu este necesară, evitându-se totodată apropierea prea mare a intervalului de valoarea care ar conduce la mesaj de eroare.

Analiza domeniului de interes al oscilațiilor de frecvență care apar la comutația LEA de înaltă și foarte înaltă tensiune, s-a efectuat pentru trei categorii de sisteme și tensiuni. Astfel, au fost studiate :

- sistemele puternice ($Z_0=0$), la care se racordează LEA de tensiuni foarte înalte compensate ($Z_2 \neq 0$);
- sisteme relativ puternice ($Z_0 \neq 0$), alimentând LEA cu compensare ($Z_2 \neq 0$) de tensiuni ridicate ;
- sisteme slabe ($Z_0 \neq 0$) alimentând LEA fără compensare ($Z_2 = \infty$) de tensiuni sub 220KV.

Calculul frecvenței oscilațiilor în cazul sistemelor puternice, cu luarea în considerare a valorii armonicilor până la ordinul cinci, s-a efectuat asupra LEA cu compensare transversală cu reactor, care să asigure tensiuni egale la ambele capete, având tensiuni de 220-750 KV și lungimi cuprinse între 300-1000Km.

Valorile frecvențelor oscilațiilor libere care apar la comutarea LEA în cazul unor lungimi de 300, 600, 1000 Km, având constantele de propagare (τ) egale cu 10^{-3} ; $2 \cdot 10^{-3}$ respectiv $3,33 \cdot 10^{-3}$ secunde, sunt prezentate în tabelul 2.5. Rezultă, din datele cuprinse în tabelul 2.5, că valoarea armonicii de ordinul 5 în cazul lungimilor de linie de 300Km, care reprezintă în general limita superioară a lungimii LEA de 220KV, respectiv cea inferioară pentru LEA de 400KV, depășește 2000Hz.

Tabelul 2.5.

X^*	f [Hz]	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
0	$\tau=10^{-3}$	254.6	748	1249.4	1742.7	2228.2
	$\tau=2 \cdot 10^{-3}$	139.3	382	628.7	873.4	1114.1
	$\tau=3,33 \cdot 10^{-3}$	90.9	234.2	379.9	525.7	666.1

În tabelul 2.6 au fost sintetizate valorile frecvențelor corespunzătoare armonicilor până la ordinul cinci, în cazul comutării LEA de înaltă tensiune cu compensare, alimentate de sisteme relativ puternice ($Z_0 \neq 0$). Modul în care variază valorile frecvenței oscilațiilor libere corespunzătoare armonicilor până la ordinul cinci, funcție de valoarea reactanței relative de scurtcircuit a sursei (X^*), pentru diferite lungimi (l) ale LEA de înaltă tensiune cu compensare transversală, este prezentat în figura 2.2. Din analiza familiilor de curbe pentru diferite lungimi de linie și valori ale lui X^* , pentru armonici până la ordinul cinci rezultă următoarele :

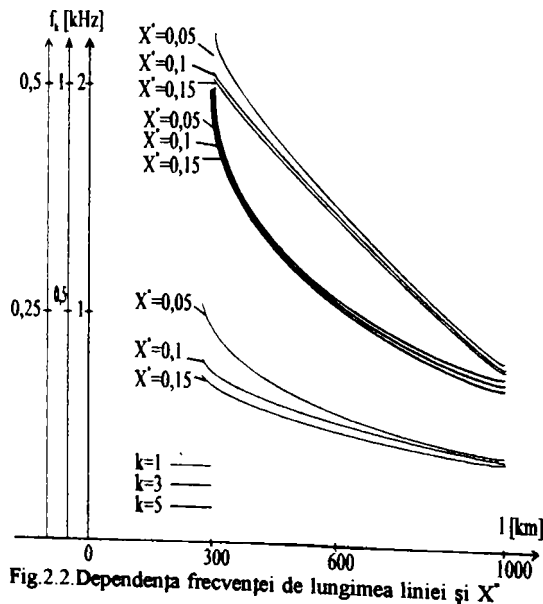
- frecvența oscilațiilor libere crește cu scăderea lungimii LEA pentru armonici de același ordin ;
- la o linie electrică aeriană de aceeași lungime, frecvența oscilațiilor libere corespunzătoare armonicii de un anumit ordin scade relativ lent cu creșterea reactanței de

scurtcircuit a sursei.

- în cazul armonicii de ordin cinci, frecvența oscilațiilor libere depășește 2000Hz pentru lungimi ale LEA de 300Km ;

Tabelul 2.6.

X^*	$f [Hz]$	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
0.05	$\tau=10^{-4}$	230.8	668.5	1130	1591.5	2084.9
	$\tau=2 \cdot 10^{-4}$	123.3	354.1	587.3	819.6	1066.3
	$\tau=3.33 \cdot 10^{-4}$	88.4	215.1	359.2	504.2	651.4
0.1	$\tau=10^{-4}$	191	614.3	1066.3	1553.4	2037.2
	$\tau=2 \cdot 10^{-4}$	113	332.6	563.4	791.8	1036
	$\tau=3.33 \cdot 10^{-4}$	85.1	210.3	349.9	494.7	633.3
0.15	$\tau=10^{-4}$	175.1	585.7	1050.4	1527.9	2005.3
	$\tau=2 \cdot 10^{-4}$	107.4	322.3	549.1	786.2	1026.5
	$\tau=3.33 \cdot 10^{-4}$	78.9	205.5	335.1	482.7	626.1



Valorile frecvențelor oscilațiilor libere care apar la comutarea LEA de tensiuni sub 220KV, racordate la sisteme slabe, sunt sintetizate în tabelul 2.7 și reprezentate în figura 2.3.

Tabelul 2.7.

X^*	f [Hz]	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
0,2	$\tau=5 \cdot 10^{-4}$	284,3	1066,3	2053,1	3023,9	4039,4
	$\tau=6 \cdot 10^{-4}$	225,5	901,9	1730,9	2533,2	3368,8
	$\tau=7 \cdot 10^{-4}$	204,6	784,4	1577,9	2182,7	2889,8
0,3	$\tau=5 \cdot 10^{-4}$	206,9	1050,4	2048,3	3014,4	4026,6
	$\tau=6 \cdot 10^{-4}$	191	888,6	1724,2	2520	3360,8
	$\tau=7 \cdot 10^{-4}$	177,3	768,5	1500,6	2166,8	2885,3
0,4	$\tau=5 \cdot 10^{-4}$	191	1044,1	2043,5	3011,2	4013,9
	$\tau=6 \cdot 10^{-4}$	172,4	875,4	1705,6	2514,6	3350,2
	$\tau=7 \cdot 10^{-4}$	159,2	754,8	1464,2	2160	2880,7

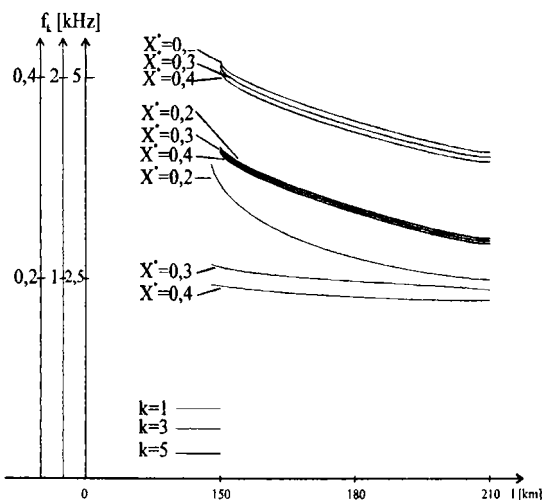


Fig.2.3.Dependența frecvenței de lungimea liniei și X^*

Au fost analizate cazuri de LEA cu lungimi de 150; 180; 210Km fără compensare, racordate la surse cu $X^*=0,2; 0,3; 0,4$ rezultând următoarele :

- similar liniilor electrice aeriene compensate, frecvența oscilațiilor libere crește cu scăderea lungimii liniei în cazul LEA necompensate ;
- pentru LEA de aceeași lungime, frecvența oscilațiilor libere corespunzătoare armonicilor de un anumit ordin, variază relativ lent funcție de reactanța de scurtcircuit a sursei la care este racordată linia ;

- frecvența oscilațiilor libere aferente armonicii de ordinul cinci depășește valoarea de 4000Hz în cazul LEA de 150Km.

Din analiza atentă a spectrului frecvențelor oscilațiilor libere datorate comutației, rezultă faptul că în condițiile modelării fizice a liniei, domeniul de frecvență care trebuie luat în considerare se impune a fi extins față de cel indicat în literatură, constatându-se că valoarea armonicii de ordinul cinci depășește 4000Hz, sau în valori raportate la frecvența industrială este $f^*_{c5}=80$.

Se observă deasemeni că extinderea domeniului de frecvență ce trebuie luat în considerare, se necesită a fi diferențiată în funcție de lungimea LEA și tensiunea acesteia. Astfel pentru LEA 110-220KV domeniul de interes se impune a fi extins la 4000Hz. În cazul LEA de 400KV extinderea domeniului de analiză este suficient a fi efectuată până la 2000Hz iar pentru LEA de 750KV la 1000Hz.

2.2. Caracteristicile de frecvență ale rezistenței de secvență directă

Pe baza programului de calcul PARAMRLC, au fost determinate valorile rezistenței de secvență directă funcție de frecvență pentru liniile electrice aeriene de înaltă și foarte înaltă tensiune sintetizate astfel: în tabelul 2.8 pentru familia de caracteristici aferente tensiunilor de 110-220 KV, în tabelul 2.9 pentru caracteristicile corespunzătoare liniilor de 400KV și în tabelul 2.10 caracteristicile pentru linii de 750KV.

Tabelul 2.8.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R'_{1(0)}$ [Ω /km]											
Limita minimă	0,064	0,076	0,114	0,142	0,165	0,193	0,217	0,239	0,265	0,322	0,369
Limita maximă	0,28	0,282	0,301	0,34	0,379	0,442	0,494	0,54	0,596	0,715	0,814

Tabelul 2.9.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R'_{1(0)}$ [Ω /km]											
Limita minimă	0,0213	0,0254	0,0381	0,0416	0,0472	0,0643	0,0725	0,0797	0,088	0,111	0,123
Limita maximă	0,05	0,0546	0,0774	0,0976	0,113	0,128	0,144	0,159	0,176	0,212	0,253

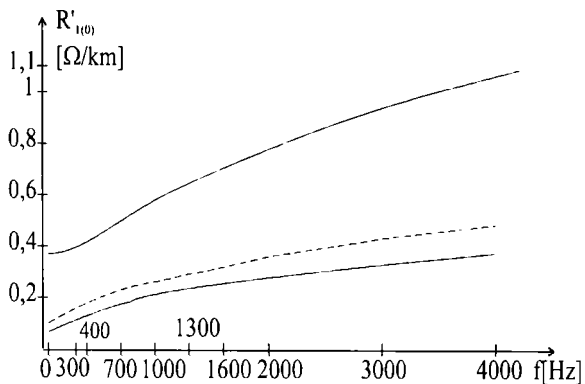


Fig.2.4. Dependența $R'_{1(0)}=f(f)$ pentru LEA 110-220 KV

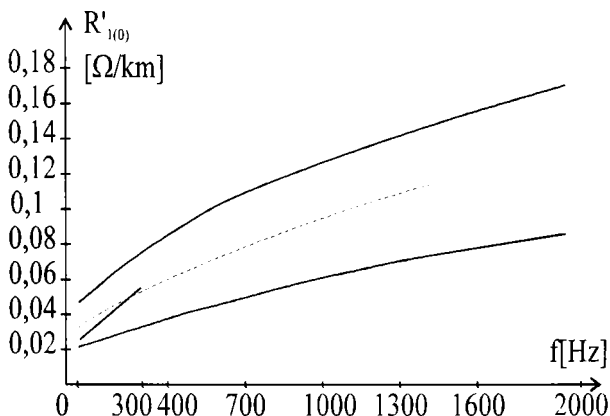


Fig.2.5. Dependența $R'_{1(0)}=f(f)$ pentru LEA 400 KV și 500 KV

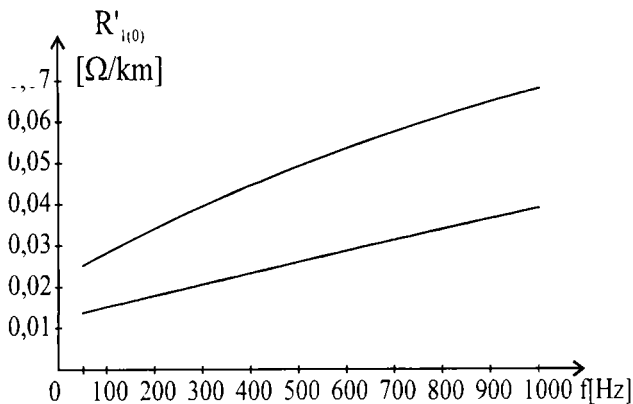


Fig.2.6. Dependența $R'_{1(0)}=f(f)$ pentru LEA 750 KV

Tabelul 2.10.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R'_{\text{tot.}} [\Omega/\text{km}]$											
Limita minimă	0,0128	0,0152	0,0229	0,025	0,0283	0,04	0,0452	0,0497	0,0553	0,0673	0,0768
Limita maximă	0,025	0,0273	0,0387	0,0488	0,0566	0,0666	0,075	0,0825	0,0915	0,1105	0,1265

Pe baza datelor din tabelul 2.8 s-au trasat graficele de variație ale rezistenței de secvență directă, funcție de frecvență pentru liniile electrice aeriene cu tensiuni de funcționare de 110-220KV (figura 2.4)

Caracteristicile de frecvență pentru rezistența liniilor de 400KV respectiv 750KV, sunt reprezentate grafic în figura 2.5 și figura 2.6. Reprezentările caracteristicilor de frecvență pentru rezistența lineică a LEA de 400KV și 750KV s-au realizat în figurile 2.5 și 2.6 numai pentru domeniile de interes ale frecvenței oscilațiilor supratensiunilor (2000Hz respectiv 1000Hz). Domeniul 50-4000Hz fiind prea larg pentru studiul supratensiunilor în cazul LEA de 400KV și 750KV, s-au ales mărimi diferite ale domeniilor de frecvență comparativ cu cel aferent LEA de 110-220KV, corelat cu concluziile rezultate din studiul asupra frecvenței oscilațiilor supratensiunilor de comutație prezentate în subcapitolul 2.1. În figurile 2.4; 2.5 și 2.6 sunt reprezentate cu lime punctată curbele medii adoptate pentru modelare, corespunzător LEA 220KV Ol-Al 1x300mm², LEA 400KV Ol-Al 2x450mm² și LEA 750KV Ol-Al 5x300mm².

În tabelul 2.11 sunt trecute valorile rezultate din măsurători efectuate la linie de 500KV [49] iar în figura 2.5 sunt reprezentate grafic.

Tabelul 2.11.

f [Hz]	50	100	150	200	250	300
$R'_{\text{tot.}} [\Omega/\text{km}]$	0,024	0,03	0,036	0,042	0,048	0,054

Comparând valorile măsurătorilor pe linia de 500KV cu cele calculate și prezentate în tabelele 2.9 și 2.10 se constată apartenența acestora între limitele minime și maxime ale familiilor de curbe aferente LEA 400KV respectiv 750KV.

2.3. Caracteristicile de frecvență ale rezistenței de secvență omopolară

Dependența de frecvență a rezistenței de secvență omopolară a fost determinată pe baza

aceluiași program de calcul, rezultatele fiind trecute în tabelul 2.12 pentru linii de 110-220KV și având reprezentarea dată în figura 2.7.

Tabelul 2.12.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R'_{(0)} [\Omega/\text{km}]$											
Limita minimă	0.212	0.372	1.002	1.622	2.238	3.154	4.066	4.976	6.187	9.205	12.213
Limita maximă	0.428	0.578	1.189	1.82	2.415	3.403	4.343	5.277	6.518	9.598	12.658

Pentru liniile de 400KV, valorile limită ale rezistenței de secvență omopolară sunt prezentate în tabelul 2.13 și reprezentate în figura 2.8 pentru domeniul de frecvență 50-2000Hz.

Tabelul 2.13.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R'_{(0)} [\Omega/\text{km}]$											
Limita minimă	0.169	0.321	0.926	1.522	2.12	3.028	3.924	4.82	6.014	8.995	11.972
Limita maximă	0.198	0.351	0.966	1.578	2.186	3.094	3.999	4.9	6.105	9.104	12.097

Caracteristicile de frecvență pentru rezistența de secvență omopolară a liniilor de 750KV sunt date în tabelul 2.14 și reprezentate în figura 2.9 pentru domeniul de frecvență 50-1000Hz.

Tabelul 2.14.

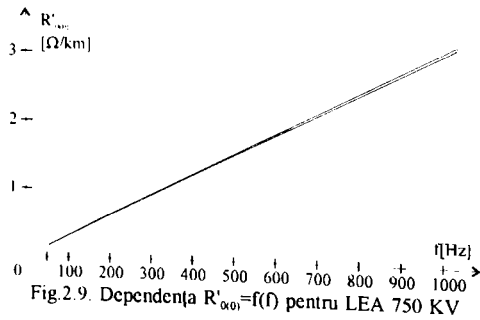
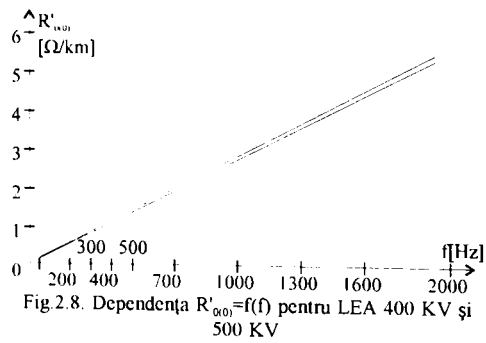
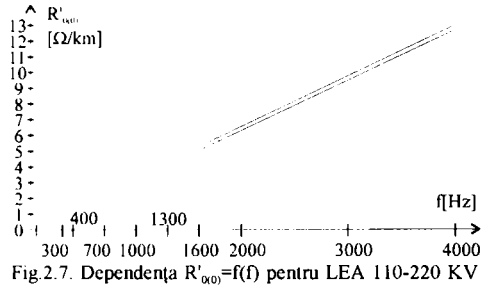
f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R'_{(0)} [\Omega/\text{km}]$											
Limita minimă	0.161	0.311	0.911	1.505	2.101	3.001	3.894	4.787	5.977	8.95	11.92
Limita maximă	0.175	0.323	0.927	1.529	2.129	3.027	3.924	4.82	6.013	8.993	11.97

În tabelul 2.15 sunt prezentate valorile determinate experimental pentru o linie de 500KV [49], iar curba aferentă acestor valori este reprezentată în figura 2.8.

Tabelul 2.15.

f [Hz]	75	100	125	150	200	300
$R'_{(0)} [\Omega/\text{km}]$	0.3165	0.433	0.5495	0.666	0.89	1.12

Analizând valorile rezistențelor de secvență omopolară calculate pentru LEA de 400KV și 750KV, se constată că acestea se înscriu în domenii înguste de valori, având marimi foarte apropiate de cele determinate experimental la o linie de 500KV.



2.4. Caracteristicile de frecvență ale inductivității de secvență omopolară.

Dependența de frecvență a inductivității de secvență omopolară pentru liniile electrice aeriene de 110-220KV este prezentată în tabelul 2.16.

Tabelul 2.16.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$L'_{(00)}$ [mH/km]											
Limita minimă	3.111	2.903	2.572	2.418	2.317	2.209	2,13	2,068	2,001	1,878	1,792
Limita maximă	5.058	4.85	4.519	4,365	4,264	4,156	4,077	4,015	3,947	3,825	3,739

Valorile inductivităților pentru limita minimă și cea maximă din tabelul 2.16 sunt reprezentate sub formă grafică în figura 2.10.

În tabelul 2.17 sunt prezentate sintetic pentru liniile de 400KV valorile limită ale dependenței de frecvență a inductivității de secvență omopolară iar în figura 2.11 este dată reprezentarea lor grafică pentru domeniul 50-2000Hz.

Tabelul 2.17.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$L'_{(00)}$ [mH/km]											
Limita minimă	2.486	2.277	1,946	1,792	1,691	1,583	1,504	1,442	1,375	1,253	1,16
Limita maximă	4.109	3.9	3.57	3,415	3,314	3,206	3,127	3,065	2,998	2,876	2,789

Pentru linia de 750KV, valorile limită ale inductivității de secvență omopolară funcție de frecvență sunt prezentate în tabelul 2.18 și reprezentate grafic în figura 2.12 pentru domeniul 50-1000Hz.

Tabelul 2.18.

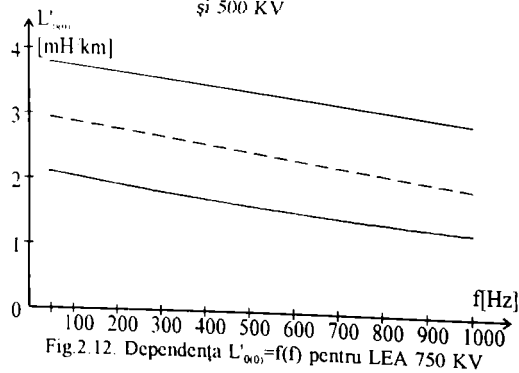
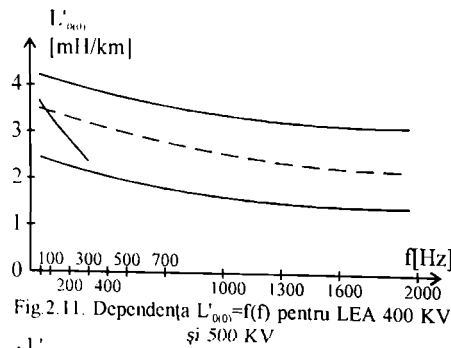
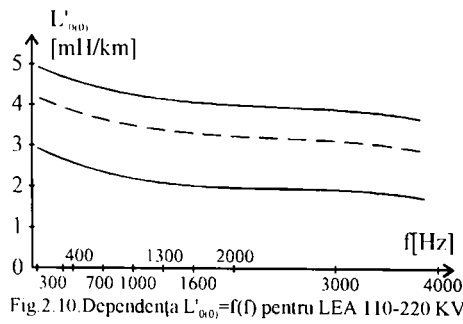
f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$L'_{(00)}$ [mH/km]											
Limita minimă	2.153	1.944	1,613	1,46	1,358	1,251	1,172	1,109	1,042	0,92	0,833
Limita maximă	3.719	3.51	3,179	3,025	2,924	2,816	2,737	2,675	2,608	2,485	2,399

În figurile 2.10; 2.11 și 2.12 sunt reprezentate cu linie punctată curbele medii adoptate pentru modelare, corespunzător LEA 220KV OI-Al 1x300mm², LEA 400KV OI-Al 2x450mm² și LEA 750KV OI-Al 5x300mm².

În tabelul 2.19 sunt prezentate valorile inductivității de secvență omopolară pentru o linie de 500KV, determinată prin măsurători experimentale [49], iar graficul acestor valori este reprezentat în figura 2.11

Tabelul 2.19.

f [Hz]	50	75	100	125	150	200	250	300
$L'_{(0,0)}$ [mH/km]	3,46	3,305	3,17	3,02	2,88	2,69	2,55	2,27



CAP.3. Dimensionarea modelului liniei electrice aeriene

3.1. Alegerea parametrilor nominali ai modelului

3.1.1. Alegerea scării de modelare

Între mărimile modelului, notate cu "M" și cele ale originalului u, i, R, L, C, t , există următoarele relații :

$$u^M = m_u \cdot u; \quad i^M = m_i \cdot i; \quad R^M = m_R \cdot R; \quad L^M = m_L \cdot L; \quad C^M = m_C \cdot C; \quad t^M = m_t \cdot t; \quad (3.1)$$

Aceste mărimi de transformare (scări) nu pot fi alese în mod liber, ele fiind legate prin legile fundamentale ale electrotehnicii care trebuie luate în considerare la modelare.

Astfel, pornind de la relațiile :

$$u = R \cdot i \quad u = L \frac{di}{dt} \quad u = \frac{1}{C} \int i dt \quad (3.2)$$

rezultă :

$$m_u = m_R \cdot m_i \quad m_u = m_L \frac{m_i}{m_t} \quad m_u = \frac{m_i m_t}{m_C} \quad (3.3)$$

Pe baza relațiilor (3.3) se obține :

$$m_R = \frac{m_L}{m_t} = \frac{m_t}{m_C} \quad (3.4)$$

Raporturile cele mai simple se formează când scara timpului și cea a rezistenței sunt egale cu unitatea. În acest caz rezultă :

$$m_R = m_L = m_C = m_t = 1 \quad (3.5)$$

$$m_u = m_i \quad (3.6)$$

Această alegere nu este coercitivă. Frecvent se utilizează și alte combinații pentru cele patru mărimi legate prin relația (3.4), îndeosebi la modelele cvasistaționare de cercetare a

stabilității sau a circulației de puteri. Analiza pertinentă [36] a avantajelor și dezavantajelor altei scări decât unitatea pentru m_r și m_p pune în evidență faptul că pentru studiul proceselor tranzitorii care ne interesează nu se justifică o asemenea alegere.

3.1.2. Stabilirea lungimii modelate de un octopol și a tensiunii nominale a modelului

Deoarece domeniul de frecvență corespunzător modelării cu un singur octopol a unei porțiuni de linie $\Delta l=100$ km nu depășește 956 Hz, se impune ca lungimea de linie modelată să fie mai mică. În conformitate cu cele prezentate anterior, pentru a se permite trecerea fără distorsiuni a unor oscilații cu frecvența de cca 4000 Hz, lungimea de linie modelată de un octopol, pe baza relației (1.47), rezultă :

$$\Delta l = \frac{v}{\pi \cdot f_k} = \frac{3 \cdot 10^5}{\pi \cdot 4000} = 23,873 \text{ Km}$$

Alegem $\Delta l=25$ km, astfel încât modelul va permite transmiterea armonicelor până la cea de ordinul $K \leq 1900/\Delta l=76$.

Privitor la alegerea scării tensiunii (m_u) problema este mai delicată. Prioritar este respectarea relației :

$$[I_{\max}/I_{\text{nom}}]_{\text{linie}} < [I_{\text{sat}}/I_{\text{nom}}]_{\text{bobină}} \quad (3.7)$$

Valoarea raportului I_{\max}/I_{nom} pentru linia reală depinzând de regimul de funcționare al acesteia, s-a admis ca valoare limită pentru curentul maxim, curentul de scurtcircuit monofazat.

Pornind de la expresia tensiunii optime de transport [56] pentru o putere și lungime date:

$$U_n = \sqrt{P(0,1+0,015\sqrt{l})} \quad (3.8)$$

unde : P -puterea[KW]

l -lungimea liniei[km]

U_n -tensiunea nominală [KV]

rezultă :

$$P = \frac{U_n^2}{0,1+0,015\sqrt{l}} \quad (3.9)$$

Din relația (3.9) rezultă pentru calculul curentului nominal expresia :

$$I_{nom} = \frac{P}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi} = \frac{U_n}{(0,1+0,015\sqrt{I}) \sqrt{3} \cos \varphi} \quad (3.10)$$

Curentul maxim de scurtcircuit monofazat (I_{max}) se calculează cu relația [56] :

$$I_{max} = k I_{sc}^{(1)} \quad (3.11)$$

unde :

$k=1,5-1,8$ - pentru puncte ale liniei apropiate de stație

$k=1,3-1,5$ - pentru puncte îndepărtate de stație.

Luând pentru k valoarea 1,5 se obține: $I_{max}=1,5 I_{sc}^{(1)}$

$$I_{sc}^{(1)} = \sqrt{3} \frac{U_n 10^3}{x_1 + x_2 + x_0} \quad (3.12)$$

Admițând $x_1=x_2$ și aproximând conform literaturii de specialitate, pe x_0 ca fiind de 3-3,5 ori mai mare decât x_1 , unde limita minimă corespunde tensiunilor de 110-220 KV, iar cea maximă tensiunilor de 400-750 KV, va rezulta :

$$I_{max} = k \sqrt{3} \frac{U_n 10^3}{2x_1 + (3 \div 3,5) x_1} k_L = 1,5 \sqrt{3} \frac{U_n 10^3}{(5 \div 5,5) x_1} k_L \quad (3.13)$$

Astfel încât în final se obține :

$$\frac{1}{k_L} \cdot \frac{I_{max}}{I_{nom}} = \frac{4,5 \cdot 10^2 \cos \varphi}{(5 \div 5,5) \lambda_1} \left(\frac{0,1}{I} + \frac{0,015}{10\sqrt{10I}} \right) \cdot \frac{1}{Z_1} \quad (3.14)$$

unde : λ_1 e dat în [rad/m]

$k_L = l / I_x$, iar I_x este lungimea liniei până la locul scurtcircuitului.

Admițând $\cos \varphi = 0,8$ și $\lambda_1 = \omega / v = 2\pi 50 / 300000 = 1,047 \cdot 10^{-6}$ rad/m

se obține :

$$\frac{I_{max}}{I_{nom}} = (6,25 \div 6,88) \cdot 10^7 \left(\frac{1}{I} + \frac{0,015}{\sqrt{10I}} \right) \cdot \frac{k_L}{Z_1} \quad (3.15)$$

Pe baza acestei relații, au rezultat pentru raportul I_{max}/I_{nom} aferent claselor de tensiuni 110-220KV respectiv 400-750KV, valorile reprezentate grafic în figurile 3.1, 3.2, valori care trebuie comparate cu cele rezultate din raportul I_{sat}/I_{nom} al bobinei octopolului.

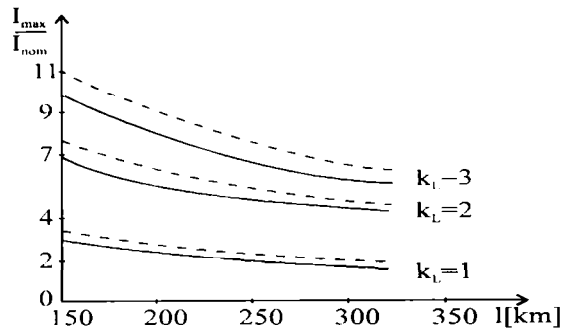


Fig.3.1 Valorile raportului I_{max}/I_{nom} pentru liniile de 110-220 KV, -- $Z_c=350\Omega$, — $Z_c=400\Omega$

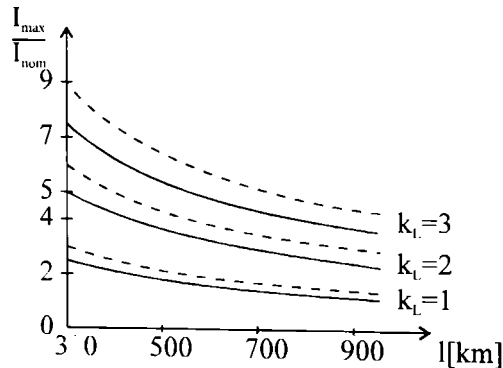


Fig.3.2 Valorile raportului I_{max}/I_{nom} pentru liniile de 400-750 KV, -- $Z_c=250\Omega$, — $Z_c=300\Omega$

Curentul nominal al bobinei se determină cu relația :

$$I_{nom} = U^M/Z_c$$

unde U^M -tensiunea de alimentare a modelului.

Bobina utilizată pentru modelare se amplasează pe un miez de ferită de tip 3C6FEROXCUBE (de fabricație românească), având o lungime medie (l_m) de 180 mm și o secțiune de 176 mm^2 fiind reprezentat în figura 3.3. Caracteristicile miezului au fost determinate experimental și sunt reprezentate în figurile 3.4 - 3.8., rezultând pentru permeabilitatea miezului de ferită o valoare medie de 5961.

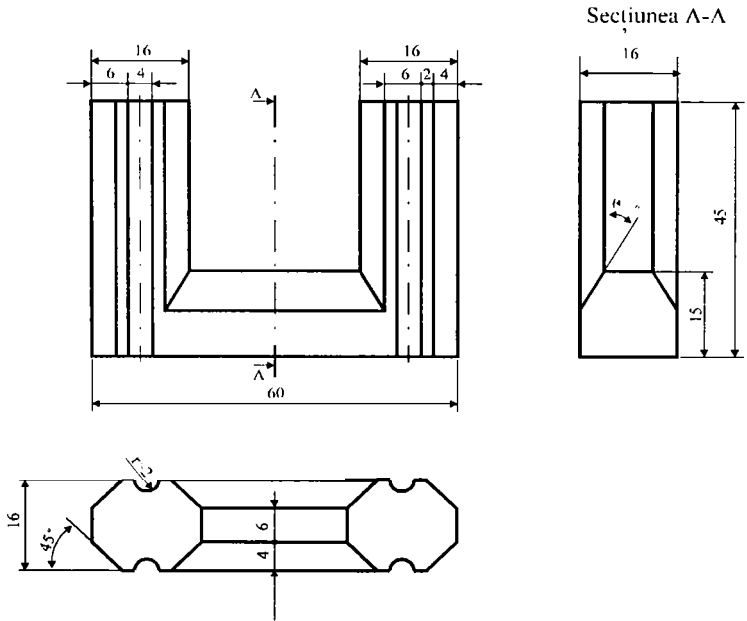


Fig.3.3. Dimensiunile miezului 3C6 FEROXCUBE

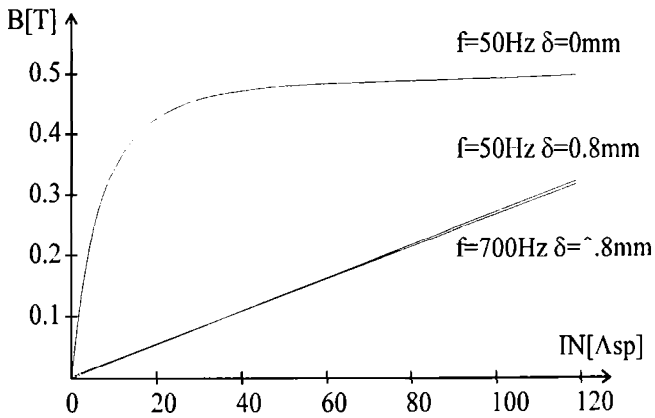


Fig.3.4. Curba de magnetizare a miezului de ferită ($\delta=0$, $f=50\text{Hz}$) și caracteristicile de magnetizare pentru $\delta=0,8\text{mm}$, $f=50\text{Hz}$, respectiv 700 Hz .

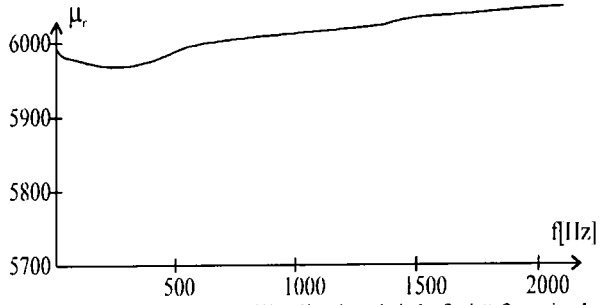


Fig.3.5. Variația permeabilității miezului de ferită funcție de frecvență

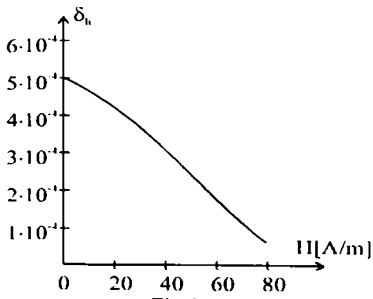


Fig.3.6.

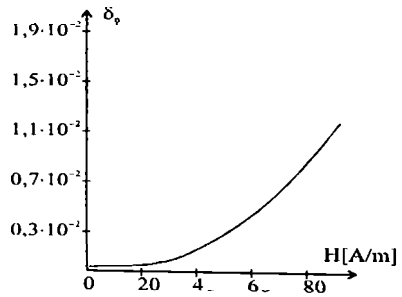


Fig.3.7.

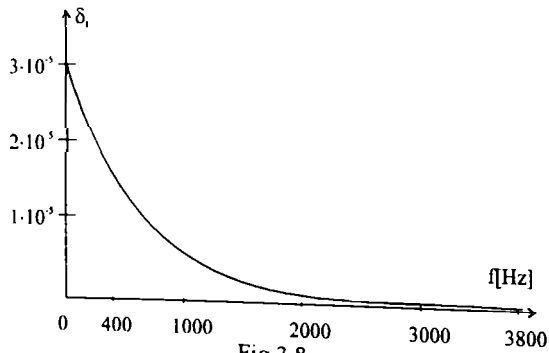


Fig.3.8.

Pentru circuitul magnetic cu întrefier rezultă, pe baza legii circuitului magnetic, următoarea relație :

$$H_{Fe} l_m + H_{\delta} \delta = IN \quad (3.16)$$

unde :
 I - curentul în bobină
 H_{Fe} - câmpul magnetic în miez
 H_{δ} - câmpul magnetic în întrefier
 δ - întrefierul circuitului
 N - numărul de spire al bobinei.

Luând în considerare relațiile dintre câmpul magnetic și inducție :

$$B_{Fe} = \mu H_{Fe} \quad B_{\delta} = \mu_0 H_{\delta} \quad (3.17)$$

unde :
 μ - permeabilitatea relativă a miezului de ferită
 μ_0 - permeabilitatea aerului,
 respectiv constanța fluxului prin circuitul magnetic și $S_{Fe} = S_{\delta}$, rezultă :

$$B_{Fe} = \frac{IN \mu_0 \mu_r}{l_m + \delta \mu_r} \quad (3.18)$$

Din expresia fluxului total care străbate bobina

$$\Psi = N \Phi = N S B_{Fe} = \frac{IN^2 \mu_0 \mu_r S}{l_m + \delta \mu_r} \quad (3.19)$$

unde : Φ - fluxul care străbate o singură spirală, rezultă pentru inductivitate expresia :

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N^2 \mu_0 \mu_r S}{l_m + \delta \mu_r} \quad (3.20)$$

asfel încât numărul de spire necesar va fi :

$$N = \sqrt{\frac{L(l_m + \delta \mu_r)}{\mu_0 \mu_r S}} \quad (3.21)$$

Curentul de saturație H_{sat} al bobinei se determină cu ajutorul relației :

$$I_{sat}N = H_{sat} (l_m + \delta \mu_r) \tag{3.22}$$

Din relația (3.22) rezultă pentru curentul de saturație expresia :

$$I_{sat} = H_{sat} \frac{\sqrt{(l_m + \delta \mu_r) \mu_0 \mu_r S}}{\sqrt{L}} \tag{3.23}$$

în care :

$$L = L_{1(0)} \Delta l = \sqrt{\frac{L_{1(0)}}{C_{1(0)}}} \sqrt{L_{1(0)} C_{1(0)}} \Delta l = \frac{Z_c}{V} \Delta l = \frac{Z_c}{\omega} \lambda \Delta l \tag{3.24}$$

S-a notat cu : $L_{1(0)}$ -inductivitatea lineică

$C_{1(0)}$ -capacitatea lineică

Z_c -impedanța caracteristică

λ -lungimea de undă

ω -pulsatia

Δl -lungimea porțiunii de linie modelată.

Înlocuind în relația (3.23) expresia inductivității date de relația (3.24) rezultă pentru curentul de saturație al bobinei formula :

$$I_{sat} = H_{sat} \sqrt{\frac{(l_m + \delta \mu_r) \mu_0 \mu_r S \omega}{Z_c \lambda \Delta l}} \tag{3.25}$$

Pe baza relației (3.25) rezultă pentru raportul I_{sat}/I_{nom} expresia :

$$\frac{I_{sat}}{I_{nom}} = K' \sqrt{\frac{Z_c}{\Delta l} \cdot \frac{1}{U^M}} \tag{3.26}$$

unde K' este o constantă care se calculează cu formula :

$$K' = H_{sat} \sqrt{\frac{(l_m + \delta \mu_r) \mu_0 \mu_r S \omega}{\lambda}} \tag{3.27}$$

și are valoarea $K'=1097,8$ pentru miezul de ferită ales în prezenta lucrare. Pentru determinarea lui H_{sat} s-a luat în considerare solenația de saturare $I_{sat}N=120A \cdot sp$, acoperitoare în cazul caracteristicii de magnetizare a circuitului magnetic cu $\delta=0,8mm$, rezultând $H_{sat}=24,248A/m$.

Valorile calculate pentru I_{sat}/I_{nom} cu relația (3.26) la un $K'=1097,8$ sunt reprezentate grafic în figurile 3.9 a și 3.9 b

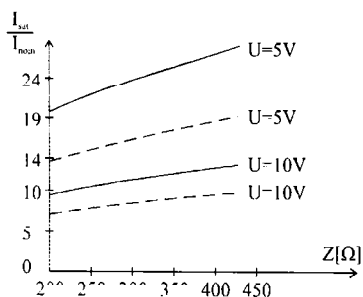


Fig.3.9.a Raportul I_{sat}/I_{nom} pentru model, corespunzător la $U^M=5-10V$, $\Delta l=25km$, $--\Delta l=50km$

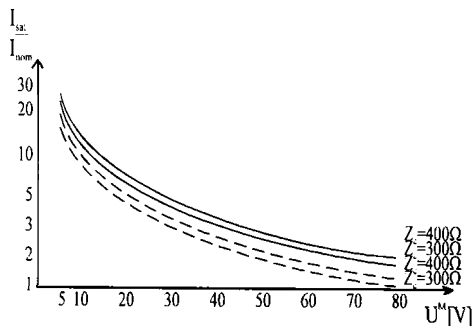


Fig.3.9.b Variația raportului I_{sat}/I_{nom} funcție de tensiunea modelului $U^M[V]$, pentru, $--\Delta l=25km$, $--\Delta l=50km$

Din curbele prezentate în figurile 3.1 și 3.2 se poate constata că pentru lungimile curente de 150-300 km ale liniilor de 110-220KV mărimea raportului I_{max}/I_{nom} este sub 12 pentru $k_l=3$. Pentru liniile de 400-750KV a căror lungime este cuprinsă între 300-1000km, acest raport este mai mic decât 9 pentru $k_l=3$.

Pentru respectarea condiției (3.7), în cazul regimului de scurtcircuit monofazat, tensiunea de alimentare a modelului nu trebuie să depășească 10V, dacă $\Delta l=25km$; în cazul studierii altor regimuri de lucru ale liniei, tensiunea de alimentare a modelului poate fi majorată, ceea ce permite creșterea preciziei la determinarea valorii supratensiunilor.

3.1.3. Calculul parametrilor octopolului la 50 Hz

Optând pentru o lungime a porțiunii de linie $\Delta l=25 km$, având parametrii de secvență cunoscuți $R_1, R_0, L_1, L_0, C_1, C_0$, și scara $m_r=1$, se pot determina valorile elementelor concentrate care modelează parametrii de secvență directă și omopolară, notate cu indicele M.

Pentru modelare s-au ales parametrii de secvență directă și omopolară ai unor linii, care se situează practic cât mai aproape de valorile medii ale domeniului de variație determinat pentru LEA 110-220KV, 400KV și 750KV.

În tabelul 3.1 sunt prezentate sintetic valorile alese și care corespund pentru LEA 220KV OI-AI $1 \times 300mm^2$, LEA 400KV OI-AI $2 \times 450mm^2$ și LEA 750KV OI-AI $5 \times 300mm^2$.

Tabelul 3.1.

Parametrul LEA modelată	$R_{1(0)}$ [Ω/km]	$L_{1(0)}$ [mH/km]	$C_{1(0)}$ [pF/km]	$R_{0(0)}$ [Ω/km]	$L_{0(0)}$ [mH/km]	$C_{0(0)}$ [pF/km]
110-220KV	0.1	0.142	7900	0,248	4,46	5000
400KV	0,032	0,0945	11900	0.18	3,46	6900
750KV	0,02	0,0922	12160	0.168	2,85	8600

Pe baza valorilor parametrilor aferenți unității de lungime a liniei, prezentați în tabelul 3.1 s-au calculat valorile pentru elementele concentrate care modelează parametrii liniilor la frecvența de 50 Hz. Pentru parametrii de secvență directă aceste valori sunt prezentate în tabelul 3.2 și sunt calculate cu relațiile :

$$R_1^M = R_{1(0)} \Delta l \quad L_1^M = L_{1(0)} \Delta l \quad C_1^M = C_{1(0)} \Delta l \quad (3.28)$$

$$R_o^M = R_{0(0)} \Delta l \quad L_o^M = L_{0(0)} \Delta l \quad C_o^M = C_{0(0)} \Delta l \quad (3.29)$$

Tabelul 3.2.

Parametrul Linia modelată	R_1^M [Ω]	L_1^M [mH]	C_1^M [μF]	R_o^M [Ω]	L_o^M [mH]	C_o^M [μF]
110-220KV	2.5	35,5	0,1975	6,2	111,52	0,125
400KV	0,8	23,65	0,2975	4,5	86,5	0,1725
750KV	0,5	22	0,275	4,2	75,63	0,215

Parametrii de secvență omopolară, se modelează prin introducerea în conductorul de nul a unei impedanțe suplimentare :

$$Z_s = R_s + j\omega L_s \quad (3.30)$$

în care

$$R_s = \frac{R_{0(0)} - R_{1(0)}}{3} \cdot \frac{\Delta l}{m_z} \quad (3.31)$$

$$L_s = \frac{L_{0(0)} - L_{1(0)}}{3} \cdot \frac{\Delta l}{m_z} \quad (3.32)$$

Pentru calculul capacității de secvență omopolară (C_s), montată în serie cu steaua capacităților de secvență directă (C_1), se utilizează formula :

$$C_s = 3 \frac{C_{1(0)} C_{0(0)}}{C_{1(0)} - C_{0(0)}} \quad (3.33)$$

Utilizând formulele (3.32), (3.33) rezultă pentru parametrii R_s, L_s, C_s valorile cuprinse în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3.

Parametrul LEA modelată	R_s [Ω]	L_s [mH]	C_s [μ F]
110-220KV	1.23	25.34	1.022
400KV	1.23	20.95	1.23
750KV	1.18	17.88	2.14

3.2. Modelarea caracteristicilor de frecvență ale parametrilor LEA

3.2.1. Calculul parametrilor de secvență directă ai modelului

Analizând valorile lui R^M , și L^M , care modelează parametrii de secvență directă ai unei porțiuni de linie original, de o tensiune nominală dată, se poate adopta pentru modelare o singură bobină prevăzută cu prize intermediare.

Rezistența de secvență directă a modelului va fi compusă din rezistența bobinei (R_b) și o rezistență serie (R_s), sau paralel (R_p) ca în figura 3.10.

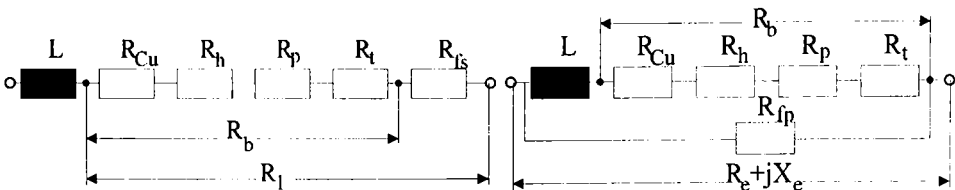


Fig.3.10. Schemele principale de modelare a rezistenței de secvență directă.

În cazul schemei cu rezistență suplimentară serie, rezistența bobinei se va exprima astfel:

$$R_b = R_{Cu} + R_h + R_p + R_t \quad (3.34)$$

- unde :
- R_{Cu} - rezistența ohmică a bobinei
 - R_h - rezistența datorată pierderilor prin histerezis

R_p - rezistența datorată pierderilor postmagnetice

R_l - rezistența datorată curenților turbionari în miezul magnetic.

Valorile rezistențelor R_h , R_p , R_l depind de frecvență conform relațiilor :

$$\begin{aligned} R_h &= 2\pi f L \delta_h H \\ R_p &= 2\pi f L \delta_p \\ R_l &= 2\pi f^2 L \delta_l \end{aligned} \quad (3.35)$$

Dependența rezistenței bobinei R'_b de frecvență se va exprima cu relația :

$$R'_b = R_{cu} + 2\pi f L (\delta_h H + \delta_p + f \delta_l) \quad (3.36)$$

Analizând această expresie se constată că dependența de frecvență a rezistenței bobinei nu coincide cu cea a rezistenței de secvență directă a liniei reale exprimată prin relațiile (3.28). Coincidența valorilor caracteristicii modelului cu cea a originalului se poate realiza pentru o singură frecvență prin utilizarea unor scheme ca în figura 3.10. Întrucât caracteristica de frecvență a bobinei depinde și de intensitatea câmpului magnetic al bobinei, variația cu frecvența a rezistenței de succesiune directă are loc în limitele unui interval delimitat de valoarea curentului care trece prin bobină.

În cazul schemei cu rezistență suplimentară paralel, rezistența echivalentă a circuitului R_e care reprezintă rezistența de secvență directă a modelului (dependentă de frecvență și prin intermediul reactanței X_b a bobinei), va avea alura caracteristicii $R^M_1 = f(f)$, diferită de cea realizată prin schema serie.

Impedanța echivalentă Z_e pentru această schemă va fi :

$$\begin{aligned} Z_e &= \frac{(R'_b + jX'_b) R_{fp}}{(R'_b + R_{fp}) + jX'_b} = \frac{R_{fp} (R'_b + jX'_b) [(R'_b + R_{fp}) - jX'_b]}{(R'_b + R_{fp})^2 + X_b'^2} \\ &= R_{fp} \frac{R'_b (R'_b + R_{fp}) + X_b'^2}{(R'_b + R_{fp})^2 + X_b'^2} + jX'_b \frac{R_{fp}^2}{(R'_b + R_{fp})^2 + X_b'^2} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Din această expresie rezultă :

$$R_e = R_{fp} \frac{R'_b (R'_b + R_{fp}) + X_b'^2}{(R'_b + R_{fp})^2 + X_b'^2} = R_1^M \quad (3.38)$$

$$X_e = X'_b \frac{R_{fp}^2}{(R'_b + R_{fp})^2 + X_b'^2} = X_1^M \quad (3.39)$$

Din relațiile (3.38), (3.39) după efectuarea unor operații matematice, se obține următoarea ecuație:

$$R_{fp}^2 (R_e - R'_b) + R_{fp} (2R_e R'_b - R_b'^2 - X_b'^2) + R_e (R_b'^2 + X_b'^2) = 0 \quad (3.40)$$

Simplificând această ecuație cu factorul $(R_e - R'_b)$ rezultă :

$$R_{fp}^2 + R_{fp} \frac{2R_e R'_b - R_b'^2 - X_b'^2}{R_e - R'_b} + R_e \frac{R_b'^2 + X_b'^2}{R_e - R'_b} = 0 \quad (3.41)$$

Această ecuație în R_{fp} are soluția :

$$\begin{aligned} R_{fp} = & -\frac{2R_e R'_b - R_b'^2 - X_b'^2}{2(R_e - R'_b)} \pm \sqrt{\left[\frac{2R_e R'_b - R_b'^2 - X_b'^2}{2(R_e - R'_b)} \right]^2 - R_e \frac{R_b'^2 + X_b'^2}{R_e - R'_b}} = \\ & = \frac{R_b'^2 + X_b'^2 - 2R_e R'_b \pm (R_b'^2 + R_e'^2) \sqrt{1 - \left[\frac{2R_e X'_b}{R_b'^2 + X_b'^2} \right]^2}}{2(R_e - R'_b)} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Pentru determinarea lui R_{fp} în punctul de intersecție al caracteristicii modelului cu cea a originalului, se egalează expresia lui R_e cu cea a lui R'_1 . În aceste condiții expresia rezistenței fixe R_{fp} va fi :

$$R_{fp} = \frac{R_b'^2 + X_b'^2 - 2R'_1 R'_b \pm (R_b'^2 + X_b'^2) \sqrt{1 - \left(\frac{2R'_1 X'_b}{R_b'^2 + X_b'^2} \right)^2}}{2(R'_1 - R'_b)} \quad (3.43)$$

Întrucât valorile lui R'_1 și R'_b sunt mult mai mici decât cele ale lui X'_b , se poate admite simplificarea :

$$\sqrt{1 - \left(\frac{2R'_1 X'_b}{R_b'^2 + X_b'^2} \right)^2} \approx 1 \quad (3.44)$$

În aceste condiții relația (3.43) devine :

$$R_{fp} \approx \frac{R_b'^2 + X_b'^2 - 2R'_1 R'_b \pm (R_b'^2 + X_b'^2)}{2(R'_1 - R'_b)} \quad (3.45)$$

Eliminând soluția aferentă semnului (-) la paranteza numărătorului (aceasta dând o valoare

negativă pentru R_{ip}), se va obține expresia :

$$R_{fp} = \frac{R_b'^2 + X_b'^2 - R_1' R_b'}{R_1' - R_b'} \quad (3.46)$$

Având în vedere că R_1' și R_b' au același ordin de mărime și în același timp sunt mult mai mici decât X_b' , rezultă, după cum se va vedea dealtfel în continuare, că rezistența R_{ip} va avea valori de ordinul câtorva $k\Omega$, astfel încât relația (3.46) se poate scrie :

$$R_{fp} \approx \frac{X_b'^2}{R_1' - R_b'} \quad (3.47)$$

În aceste condiții, din relația (3.39), rezultă că $X_4^M = X_b'$, deci inductivitatea de secvență directă a modelului rămâne neschimbată, cu alte cuvinte este independentă de frecvență, ceea ce dealtfel reprezintă o necesitate.

3.2.2. Calculul parametrilor de secvență omopolară

Parametrii de secvență omopolară ai liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune, dependenți de frecvență sunt rezistența și inductivitatea.

Impedanța Z_s care modelează acești parametri se realizează din două bobine $Z_c/2$, una din acestea fiind conectată în paralel cu impedanța Z_d (figura 3.11).

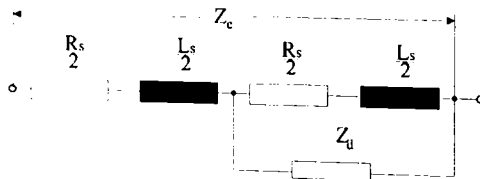


Fig.3.11. Schema conductorului de nul al unui octopol

Valoarea impedanței Z_d se calculează astfel încât, pentru o frecvență dată, impedanța Z_c din conductorul de nul să fie egală ca mărime cu cea determinată de parametrii de secvență omopolară a liniei reale :

$$Z_d' = \frac{Z_{0(0)}' - Z_{1(0)}'}{3} \cdot \frac{\Delta l}{m_z} \quad (3.48)$$

În acest fel ea va reproduce la scara modelului, impedanța de secvență omopolară a liniei.

Expresia acestei impedanțe rezultante (\underline{Z}'_e) va fi :

$$\underline{Z}'_e = \left(\frac{\underline{Z}'_s}{2} \right) + \frac{\left(\frac{\underline{Z}'_s}{2} \right) \cdot \underline{Z}_d}{\left(\frac{\underline{Z}'_s}{2} \right) + \underline{Z}_d} \quad (3.49)$$

Din această relație rezultă pentru \underline{Z}_d :

$$\underline{Z}_d = R_d + jX_d = \left(\underline{Z}'_s / 2 \right) \cdot \frac{\underline{Z}'_e - (\underline{Z}'_s / 2)}{\underline{Z}'_s - \underline{Z}'_e} \quad (3.50)$$

Înlocuim în relația (3.50) pe \underline{Z}'_s și \underline{Z}'_e cu :

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_s &= R'_s + j\omega L_s \\ \underline{Z}'_e &= R'_e + j\omega L'_e \end{aligned} \quad (3.51)$$

După separarea părților reale și imaginare, se obține :

$$R_d = \frac{\omega^2 [2R'_s L'_e (L_s - L'_e) + L_s^2 (R'_e - R'_s)] - R'_s (R'_e - R'_s) (2R'_e - R'_s)}{4 [(R'_e - R'_s)^2 + \omega^2 (L_s - L'_e)^2]} \quad (3.52)$$

$$X_d = \omega \cdot \frac{\omega^2 L_s (L_s - L'_e) (2L'_e - L_s) - R_s'^2 (L_s - L'_e) - 2R'_e L_s (R'_e - R'_s)}{4 [(R'_e - R'_s)^2 + \omega^2 (L_s - L'_e)^2]} \quad (3.53)$$

Pe baza relației (3.48) parametrii impedanței \underline{Z}'_e se vor determina cu expresiile :

$$\begin{aligned} R'_e &= \frac{R_{0(0)} - R_{1(0)}}{3} \cdot \frac{\Delta l}{m_z} \\ L'_e &= \frac{L_{0(0)} - L_{1(0)}}{3} \cdot \frac{\Delta l}{m_z} \end{aligned} \quad (3.54)$$

3.2.3. Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență directă ai liniilor de 110-220KV; 400KV; 750KV.

Determinarea dependenței de frecvență a valorii rezistenței bobinei care modelează parametrii de secvență directă a liniilor aeriene de înaltă și foarte înaltă tensiune s-a efectuat cu ajutorul relațiilor (3.34) și (3.35). Datele constructive ale bobinelor sunt prezentate în tabelul 3.4, iar la dimensionarea acestora au fost luate în considerare valorile inductivităților cuprinse în

tabelul 3.2.

Tabelul 3.4.

Tensiunea LEA[KV]	Bobina	d_{cond} [mm]	n_{spire}	l_{cond} [m]	R_{Cu} [Ω]
110-220KV	I	1	183	14,645	0.3263
	II	1	182	14,525	0.3237
	I + II	1	365	29.17	0.65
400KV	I	1	183	14,645	0.3263
	II	1	115	9,182	0.2047
	I + II	1	298	23,827	0,531
750KV	I	1.2	144	13,684	0,212
	II	1.2	144	13,684	0,212
	I + II	1.2	288	27,368	0,424

Calculul valorilor rezistenței bobinei funcție de frecvență la diverși curenți de funcționare precum și ridicarea caracteristicilor de frecvență a parametrilor de secvență directă a modelului liniilor electrice aeriene s-a efectuat pe baza unui program de calcul prezentat în anexa 5.

3.2.3.1. Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență directă pentru LEA 110-220 KV.

Valorile rezistenței bobinei care modelează parametrii de secvență directă ale LEA 110-220 KV în funcție de curent și frecvență sunt prezentate în tabelul 3.5.

Tabelul 3.5.

f [Hz]		50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
R_v' [Ω]	I=0.1[A]	0.771	0.795	1.26	1.766	2.096	2.548	2.944	3.509	4.402	6.947	9,224
	I=0.2[A]	0.747	0.866	1.472	2.12	2.591	3.256	3.864	4.642	5.818	9,071	12,057
	I=0.3[A]	0.773	0.919	1.631	2.386	2.963	3,787	4,554	5,491	6,88	10,663	14,18

Dependența de frecvență a rezistenței de secvență directă $R'_{1(0)}$ a liniei original, aleasă pentru modelare, este prezentată în tabelul 3.6.

Tabelul 3.6.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R'_{1(0)}$ [Ω/km]	0.1	0.109	0.155	0.19	0.22	0.26	0.289	0.317	0.352	0.424	0.48

Porțiunea de 25km din linia original care se modelează, având rezistența de secvență directă mai mare decât cea a bobinei modelului, necesită montarea în serie sau paralel a unei rezistențe, care să conducă la intersecția caracteristicii de frecvență a modelului cu cea a originalului. Din familia de caracteristici, determinate pentru diferiți curenți de funcționare și frecvențe la care să se realizeze intersecția caracteristicii originalului cu cea a modelului, s-au reținut cele aferente curentului de 100mA și 200mA la frecvența de intersecție de 500Hz respectiv 700Hz. S-au ales aceste puncte de funcționare pentru curentul din bobină, deoarece limita liniarității bobinei corespunde unei valori de 329mA.

Valorile rezistenței serie necesare pentru asigurarea intersecției la 500Hz și 700Hz a caracteristicii de frecvență a modelului cu cea a originalului sunt prezentate în tabelul 3.7 pentru un curent de 100mA, respectiv în tabelul 3.8 pentru un curent de 200mA prin bobina modelului.

Tabelul 3.7.

f [Hz]		50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R_{is}=3$ [Ω]	$R'_{1(0)}$ [Ω/km]	0.148	0.152	0.17	0.191	0.204	0.222	0.238	0.26	0.296	0.398	0.489
	ΔR [%]	48	39.4	9.7	0.5	-7.3	-14.6	-17.6	-18	-15.9	-6.1	1.9
$R_{is}=3,4$ [Ω]	$R'_{1(0)}$ [Ω/km]	0.164	0.168	0.186	0.207	0.22	0.238	0.254	0.276	0.312	0.414	0.505
	ΔR [%]	64	54.1	20	8,9	0	-10,7	-12.1	-12,9	-11.4	-2.4	5,2

Tabelul 3.8.

f [Hz]		50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R_{is}=2.65$ [Ω]	$R'_{1(0)}$ [Ω/km]	0.136	0.141	0.165	0.191	0.21	0.236	0.261	0.292	0.339	0.469	0.588
	ΔR [%]	36	29.4	6,5	0,5	-4,5	-9,2	-9,7	-7,9	-3,4	10,6	22,5
$R_{is}=2,9$ [Ω]	$R'_{1(0)}$ [Ω]	0.146	0.151	0.175	0,201	0,22	0,246	0,271	0,302	0,349	0,479	0,598
	ΔR [%]	46	38,5	12,9	5,8	0	-5,4	-6,2	-4,7	-0,9	13	24,6

În tabelele 3.7 și 3.8 sunt deasemenea prezentate valorile caracteristicilor de frecvență ale modelului corespunzătoare punctelor de intersecție alese, precum și abaterile procentuale față

de caracteristica de frecvență a originalului.

Intersecția caracteristicilor de frecvență ale modelului cu cea a originalului se poate realiza și prin legarea în paralel cu bobina modelului a unor rezistențe (R_{fp}). Valorile acestor rezistențe și caracteristicile de frecvență ale modelului sunt prezentate în tabelul 3.9, în cazul unui curent de 100mA prin bobina modelului, respectiv în tabelul 3.10 pentru un curent de 200mA. Au fost selectate și prezentate în figura 3.12 caracteristicile de frecvență ale modelului care au cele mai apropiate valori față de caracteristica de frecvență a LEA, atât în varianta serie, cât și în varianta paralel.

Din analiza celor două caracteristici alese pentru modelare se observă că varianta cu rezistență serie ($R_{fs}=2,65\Omega$) la un curent de 200mA al bobinei, respectiv punct de intersecție cu cea a originalului la 500Hz, este mai avantajoasă decât cea corespunzătoare variantei paralel. Eroarea față de caracteristica liniei este mai mică în varianta serie, fiind acceptabilă pe un domeniu larg de frecvențe (0,3-2,5kHz).

Opțiunea pentru varianta serie susmenționată rezultă și din compararea constantelor de timp ale modelului (τ^M) cu cele ale originalului (τ^L), prezentate în tabelul 3.11 și reprezentate în figura 3.13.

Tabelul 3.9.

f [Hz]		50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R_{fp}=4200$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0.03	0.037	0.093	0.189	0.316	0.576	0.919	1.353	2.071	4.542	7.95
	ΔR [%]	-236.7	-196.3	-62.9	2.58	32.85	53.64	69.85	77.58	83.75	91.08	94.17
$R_{fp}=7200$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0.029	0.035	0.076	0.142	0.223	0.38	0.598	0.868	1.313	2.837	4.918
	ΔR [%]	-242.8	-214.5	-104	-34.06	1.41	27.63	51.69	63.49	73.2	85.05	90.12

Tabelul 3.10.

f [Hz]		50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R_{fp}=4500$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0.031	0.039	0.099	0.195	0.32	0.566	0.902	1.318	2.002	4.343	7.558
	ΔR [%]	69	-64.2	-37.4	0.5	41.4	113.1	201	300.6	447.2	884.4	1411.9
$R_{fp}=8500$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0.03	0.037	0.08	0.144	0.22	0.367	0.555	0.792	1.18	2.495	4.273
	ΔR [%]	-70	-66.1	-48.4	-24.2	0	41.2	92	149.8	235.2	488.4	790.2

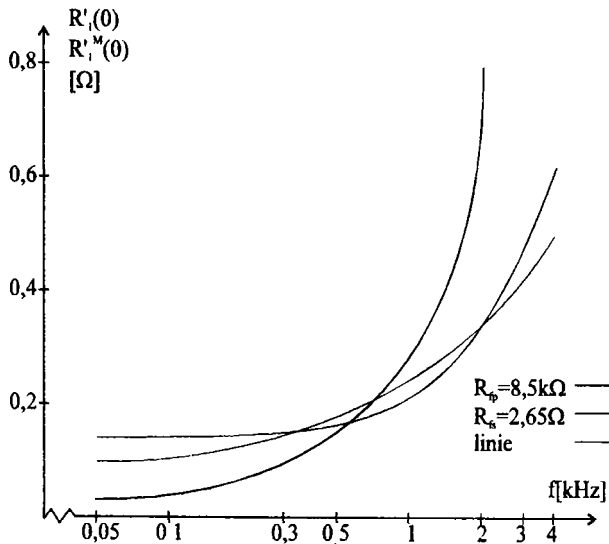


Fig.3.12. Dependența $R'_{1(0)}=f(f)$ pentru modelul liniilor de 110-220 KV

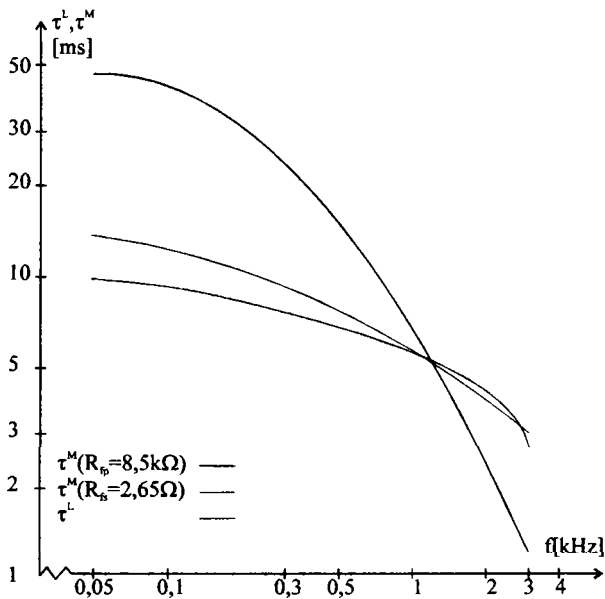


Fig.3.13. Dependența $\tau=f(f)$ pentru modelul liniilor de 110-220 KV

Tabelul 3.11.

f [Hz]		50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
L ₁₍₀₎ [mH]		1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
LEA	R' ₁₍₀₎	0,1	0,109	0,155	0,19	0,22	0,26	0,298	0,317	0,352	0,424	0,48
	[Ω/km]											
τ ^l [ms]		14,2	13,03	9,16	7,47	6,45	5,46	4,77	4,48	4,03	3,335	2,96
Model I=0,2[A] R _{lg} =2,65 [Ω]	R st ₁₍₀₎	0,136	0,141	0,165	0,191	0,21	0,236	0,261	0,292	0,339	0,469	0,588
	[Ω/km]											
	τ st [ms]	10,44	10,07	8,61	7,43	6,76	6,02	5,44	4,86	4,29	3,03	2,41
Model I=0,2[A] R _{lg} =8,5k [Ω]	R st ₁₍₀₎	0,03	0,037	0,08	0,144	0,22	0,367	0,555	0,792	1,18	2,495	4,273
	[Ω/km]											
	τ st [ms]	47,33	38,38	17,75	9,86	6,45	3,87	2,56	1,79	1,17	0,57	0,33

3.2.3.2. Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență directă pentru LEA 400 kV

Valorile rezistenței bobinei care modelează parametrii de secvență directă ale LEA 400 KV, funcție de curent și frecvență, sunt prezentate în tabelul 3.12.

Tabelul 3.12.

f [Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
R _i [Ω]	I=100 [mA]	0,567	0,618	0,683	0,756	0,833	0,909	1,227	1,428	1,701	1,936	2,284	2,841
	I=200 [mA]	0,587	0,658	0,743	0,836	0,933	1,029	1,428	1,708	2,101	2,457	2,925	3,642
	I=300 [mA]	0,603	0,691	0,792	0,901	1,014	1,126	1,589	1,935	2,425	2,877	3,442	4,289

Caracteristica de frecvență a rezistenței de secvență directă R'₁₍₀₎ a liniei original de 400 KV aleasă pentru modelare este prezentată în tabelul 3.13.

Tabelul 3.13.

f [Hz]	50	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
R' ₁₍₀₎ [Ω]	0,032	0,038	0,043	0,048	0,053	0,057	0,071	0,082	0,097	0,109	0,12	0,133

Cele mai apropiate valori pentru rezistența serie R_s cu aproximație de cel mult $0,05\Omega$ (stabilite prin program) sunt de $0,35\Omega$ pentru coincidența caracteristicii de frecvență a modelului cu cea a liniei într-un punct situat între 150 și 200Hz, respectiv $0,4\Omega$ pentru punctul de coincidență între 200Hz și 250 Hz la un curent de 200mA.

Caracteristicile de frecvență ale modelului liniei de 400 KV în cazul schemei serie cu $R_s=0,35\Omega$, respectiv $R_s=0,4\Omega$ și eroarea față de caracteristica de frecvență a liniei original de 400 KV (aleasă pentru modelare) sunt prezentate în tabelul 3.14.

Tabelul 3.14.

f [Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
$R_s=0,35$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0,037	0,04	0,044	0,047	0,051	0,055	0,071	0,0823	0,098	0,111	0,131	0,16
	ΔR [%]	15,6	5	2,3	-2,1	-3,8	-3,5	0	0,4	1	1,8	9,2	20,3
$R_s=0,4$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0,039	0,042	0,046	0,049	0,053	0,057	0,073	0,0843	0,1	0,114	0,133	0,162
	ΔR [%]	21,9	10,5	7	4,3	3,9	0	2,8	2,81	3,1	4,6	10,8	21,8

Pentru schema de legare în paralel, la curent de 200mA în bobină și puncte de coincidență a caracteristicii modelului la frecvențe de 150; 200 și 250Hz, valorile rezistențelor modelului și erorile față de LEA original sunt prezentate în tabelul 3.15.

Tabelul 3.15.

f [Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
$R_{ip}=1400$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0,025	0,033	0,044	0,059	0,077	0,098	0,215	0,377	0,715	1,164	1,732	2,669
	ΔR [%]	-21,9	-13,2	2,3	22,9	45,3	71,9	202,8	359,8	637,1	967,9	1343,3	1906,8
$R_{ip}=2300$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0,024	0,03	0,038	0,049	0,061	0,076	0,153	0,257	0,468	0,747	1,1	1,682
	ΔR [%]	-25	-21,1	11,6	2,1	15,1	33,3	115,5	213,4	382,5	585,3	816,7	1164,7
$R_{ip}=3400$ [Ω]	R_{100}^M [Ω/km]	0,024	0,029	0,036	0,044	0,054	0,065	0,112	0,196	0,344	0,537	0,782	1,185
	ΔR [%]	-25	-23	-16,2	-8,3	1,9	14	57,7	139	254,6	392,7	551,7	791

În cazul schemei serie, varianta cu $R_{fs}=0,35\Omega$ conduce la cele mai apropiate valori ale caracteristicii de frecvență a modelului față de cele ale originalului. În figura 3.14 sunt reprezentate atât valorile funcție de frecvență a rezistenței de secvență ale liniei de 400KV aleasă pentru modelare, cât și cele ale modelului pentru $R_{fs}=0,35\Omega$ și curent prin bobină de 200mA.

Din tabelul 3.15 se observă că varianta paralel care se impune a fi luată în considerare, din familia de curbe aferente acestei scheme este cea cu $R_{fp}=3,4K\Omega$, variantă reprezentată deasemeni în figura 3.14.

Comparând cele două variante alese din familiile de caracteristici de frecvență ale modelului aferente schemei serie respectiv schemei paralel, rezultă că cea mai avantajoasă este varianta corespunzătoare schemei serie. Opțiunea pentru această variantă are în vedere următoarele :

- un domeniu de frecvențe larg (0,1 - 1,3KHz) în care eroarea caracteristicii de frecvență a modelului este acceptabilă în raport cu cea a originalului;

- constanta de timp a modelului (τ^M), după cum rezultă din tabelul 3.16 și figura 3.15, este sensibil apropiată de cea a liniei (τ^L).

Tabelul 3.16.

f [Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
L_{1-c} [mH]		0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946	0.946
LEA	R_{1-0} [Ω /km]	0,032	0,038	0,043	0,048	0,053	0,057	0,071	0,082	0,097	0,109	0,12	0,133
	τ^L [ms]	29.66	24.97	22.07	19.77	17.91	16.65	13.37	11.57	9.78	8.71	7.91	7.14
Model $I=0,2A$ $R_{fs}=2,9\Omega$	R_{1-0}^M [Ω /km]	0,037	0,04	0,044	0,047	0,051	0,055	0,071	0,0823	0,098	0,112	0,131	0,16
	τ^M [ms]	25.65	23.73	21.57	20.19	18.61	17.25	13.37	11.53	9.68	8.47	7.24	5.93
Model $I=0,2A$ $R_{fp}=8,5k\Omega$	R_{1-0}^M [Ω /km]	0,024	0,029	0,036	0,044	0,054	0,065	0,112	0,196	0,344	0,537	0,782	1,185
	τ^M [ms]	39.54	32.72	26.36	21.57	17.57	14.6	8.47	4.84	2.76	1.77	1.21	0,8

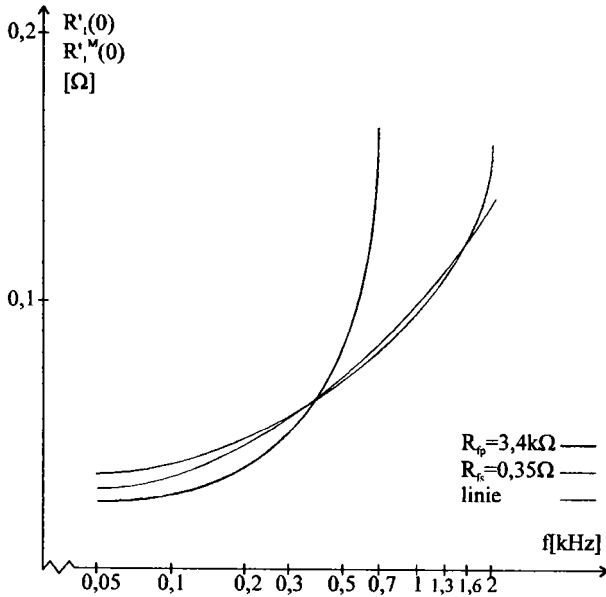


Fig.3.14. Dependența $R'_{1(0)}=f(f)$ pentru modelul liniilor de 400KV

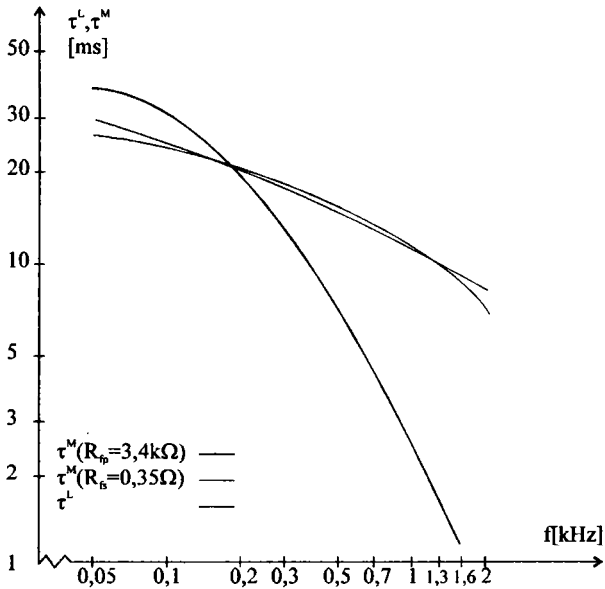


Fig.3.15. Dependența $\tau=f(f)$ pentru modelul liniilor de 400KV

3.2.3.3. Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență directă pentru LEA 750 KV.

Pe baza programului rulat pe calculator pentru determinarea valorilor rezistenței bobinei care modelează parametrii de secvență directă ale LEA 750 KV, au rezultat (la curenți de funcționare de 50mA, 100mA, 200mA) valorile trecute în tabelul 3.17.

Tabelul 3.17.

f [Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000
R _b [Ω]	I=50 [mA]	0,447	0,484	0,534	0,592	0,652	0,713	0,967	1,112	1,303
	I=100 [mA]	0,457	0,504	0,564	0,631	0,702	0,772	1,066	1,25	1,5
	I=200 [mA]	0,475	0,54	0,618	0,703	0,792	0,88	1,246	1,503	1,861

Caracteristica de frecvență a rezistenței de secvență directă $R'_{1(0)}$ a LEA 750 KV aleasă pentru modelare, este prezentată în tabelul 3.18.

Tabelul 3.18.

f [Hz]	50	100	150	200	250	300	500	700	1000
$R'_{1(0)}$ [Ω/km]	0,02	0,0219	0,0242	0,0265	0,0288	0,0309	0,0375	0,0453	0,0604

Din programul rulat pe calculator, pentru determinarea rezistențelor suplimentare ce se necesită a fi legate în serie cu bobina care modelează parametrii de secvență directă ai LEA 750 KV, a rezultat pentru un curent de 100mA și puncte de coincidență a caracteristicii original cu cea a modelului, valori de 0,05Ω pentru frecvența de 100Hz. Deasemenea a fost analizat cazul intersecției curbei model cu originalul la 300Hz și curent de 100mA, în acest caz $R_{fs}=0$.

În tabelul 3.19 sunt prezentate caracteristicile de frecvență ale rezistenței de secvență directă a modelului liniei aeriene de 750 KV pentru cele două cazuri cât și erorile acestor caracteristici față de original.

Tabelul 3.19.

f [Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000
R _{fs} =0,05 [Ω]	$R'_{1(0)}$ [Ω/km]	0,0203	0,0222	0,0246	0,0272	0,03	0,0329	0,0446	0,052	0,062
	ΔR [%]	1,5	1,4	-2,8	2,6	-4,2	6,5	18,9	14,8	-2,6
R _{fs} =0 [Ω]	$R'_{1(0)}$ [Ω/km]	0,0183	0,0202	0,0226	0,0252	0,0281	0,0309	0,0426	0,05	0,06
	ΔR [%]	-8,5	-7,8	-6,6	-4,9	-2,4	0	13,6	10,4	-0,7

În varianta legării în paralel cu bobina a unei rezistențe suplimentare, la un curent prin

bobină de 100mA, au fost alese valorile de 150Hz; 200Hz și 250Hz, pentru intersecția caracteristicii de frecvență a originalului cu cea a modelului.

În tabelul 3.20 sunt prezentate caracteristicile de frecvență ale modelului în cele trei cazuri și abaterile față de cele ale originalului.

Tabelul 3.20.

f [Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000
$R_p=10,5$ [K Ω]	$R_{1(0)}^M$ [Ω /km]	0,0185	0,0209	0,0242	0,0282	0,0327	0,0363	0,0519	0,0667	0,0925
	ΔR [%]	-7,5	-4,6	0	6,4	13,5	17,5	38,4	47,2	53,1
$R_p=24$ [K Ω]	$R_{1(0)}^M$ [Ω /km]	0,0184	0,0205	0,0232	0,0265	0,03	0,0337	0,0505	0,0655	0,0917
	ΔR [%]	-9	-6,4	-4,1	0	4,2	9,1	34,7	44,6	51,8
$R_p=65$ [K Ω]	$R_{1(0)}^M$ [Ω /km]	0,0183	0,0203	0,0228	0,0257	0,0288	0,0319	0,0456	0,0558	0,0719
	ΔR [%]	-8,5	-7,3	-5,8	-3	0	3,2	21,6	23,2	19

Caracteristica de frecvență a rezistenței modelului, în cazul legării în serie cu bobina modelului a unei rezistențe suplimentare de 0,05 Ω , prezintă erori mai mici pe domeniul 50-200Hz, dar alegerea variantei $R_s=0$ (fără rezistență) este validată de următoarele avantaje :

- schema octopolului care modelează originalul este mai simplă;
- eroarea caracteristicii modelului față de cea a liniei este sub 5% pe domeniul de frecvență 150-300Hz și depășește 10% doar pentru frecvențele situate în domeniul 500-700Hz.

Pentru schema de legare în paralel cu bobina modelului a unei rezistențe, se poate considera ca reprezentativă pentru familia caracteristicilor de frecvență aferente acestei scheme, cea corespunzătoare rezistenței $R_p=65K\Omega$, deoarece pe întreg domeniul de frecvență analizat, eroarea față de caracteristica de frecvență a originalului nu depășește 20%.

În figura 3.16 sunt reprezentate atât caracteristica de frecvență a originalului, cât și cele aferente caracteristicilor reprezentative pentru cele două familii de curbe.

Comparativ cu originalul, caracteristica de frecvență a modelului, în cazul $R_s=0$, este mai apropiată decât cea aferentă schemei paralel având $R_p=65K\Omega$.

Opțiunea pentru schema fără rezistență ($R_s=0$) este justificată și prin faptul că în acest caz constanta de timp a modelului (τ^M) este mult mai apropiată de cea a originalului (τ^L) pe întreg domeniul de frecvență față de varianta schemei paralel. Elementele de comparație sunt prezentate în tabelul 3.21 și figura 3.17.

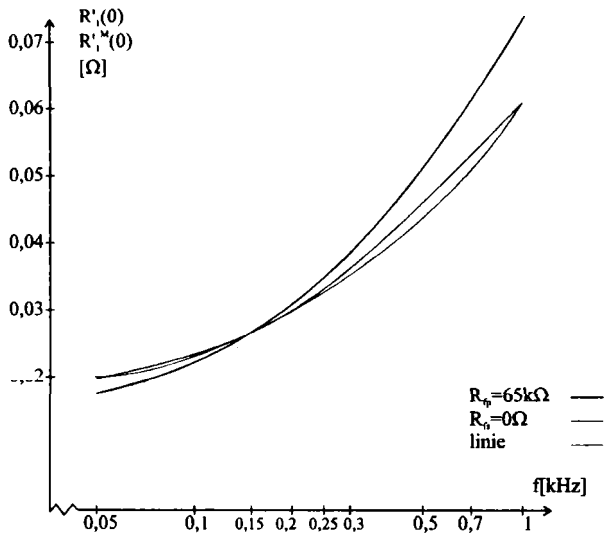


Fig.3.16. Dependența $R'_{l(0)}=f(f)$ pentru modelul liniilor de 750KV

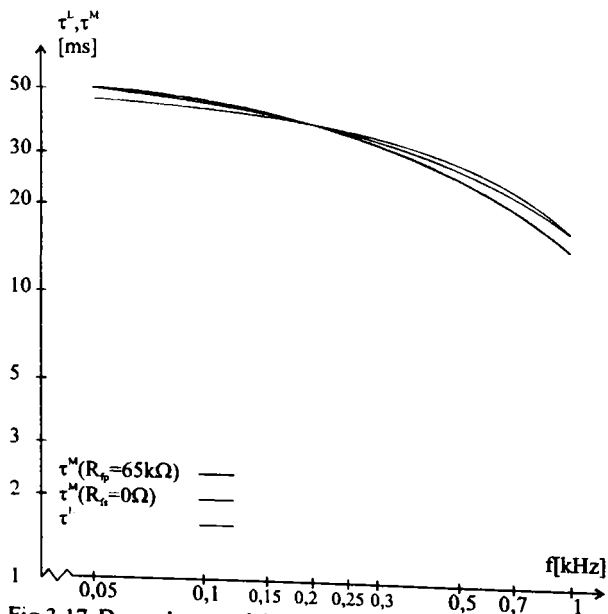


Fig 3.17. Dependența $\tau=f(f)$ pentru modelul liniilor de 750KV

Tabelul 3.21.

f [Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000
$L_{1(0)}$ [mH]		0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922	0,922
LEA	$R_{1(0)}^I$ [Ω /km]	0,02	0,0219	0,0242	0,0265	0,0288	0,0309	0,0375	0,0453	0,0604
	τ^I [ms]	46,1	42,1	38,1	34,79	32,01	29,84	24,59	20,35	15,26
Model $I=0,2$ [A] $R_{is}=0$ [Ω]	$R_{1(0)}^{RM}$ [Ω /km]	0,0183	0,0202	0,0226	0,0252	0,0281	0,0309	0,0426	0,05	0,06
	τ^N [ms]	50,38	45,64	40,8	36,59	32,81	29,84	21,64	18,44	15,3 [*]
Model $I=0,2$ [A] $R_{ip}=6,5$ [k Ω]	$R_{1(0)}^{RM}$ [Ω /km]	0,0183	0,0203	0,0228	0,0257	0,0288	0,0319	0,0456	0,0558	0,0719
	τ^N [ms]	50,38	45,42	40,44	35,88	32,01	28,9	20,2	16,52	12,82

3.2.4. Caracteristicile de frecvență ale parametrilor de secvență omopolară ale liniilor electrice aeriene (110-220 KV, 400 KV, 750 KV)

Modelarea parametrilor de secvență omopolară ale LEA 110-220KV, 400KV și 750KV, se realizează ca și în cazul modelării parametrilor de secvență directă prin utilizarea unor miezuri magnetice din ferită pe care se amplasează bobine a căror caracteristici dimensionale și rezistențe sunt prezentate în tabelul 3.22. Pentru modelarea parametrilor de secvență omopolară ale LEA 110-220KV s-au amplasat 219 spire pe două miezuri, iar pentru modelarea parametrilor afărenp LEA 400KV s-a practicat o priză la spira 199 a aceleiași bobine. În cazul modelării parametrilor de secvență omopolară ale LEA 750KV s-au amplasat 184 spire repartizate pe coloanele miezului de ferită.

Tabelul 3.22

Tensiunea LEA [KV]	Bobina	d_{cond} [mm]	n_{spire}	l_{miez} [m]	R_{s} [Ω]
110-220KV	I	1	110	8,650	0,193
	II	1	109	8,496	0,191
	I + II	1	219	17,155	0,384
400KV	I	1	110	8,650	0,193
	II	1	89	6,866	0,153
	I + II	1	199	15,525	0,346
750KV	I	1	92	7,045	0,15 [*]
	II	1	92	7,045	0,15 [*]
	I + II	1	184	14,090	0,314

3.2.4.1. Dependența de frecvență a rezistenței din conductorul de nul al modelului

Valorile rezistenței bobinei ($R'_l/2$) funcție de frecvență și curent care o străbate s-au determinat utilizând același program de calcul (anexa 5) elaborat pentru determinarea dependenței de frecvență a rezistenței bobinei pentru modelarea caracteristicilor de frecvență ale parametrilor de secvență directă.

Dependența de frecvență a rezistenței bobinei din conductorul de nul a modelului aferent LEA 110-220KV la curent de funcționare de 200 mA, este prezentată în tabelul 3.23.

Tabelul 3.23.

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
$R'_l/2$ [Ω]	0,408	0,441	0,568	0,806	0,933	1,109	1,265	1,481	1,818	2,775	3,635

În cazul LEA 400KV dependența de frecvență a rezistenței din conductorul de nul al modelului (pentru un curent de 200 mA) este prezentată în tabelul 3.24.

Tabelul 3.24.

f [Hz]	50	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
$R'_l/2$ [Ω]	0,365	0,39	0,422	0,457	0,494	0,531	0,684	0,784	0,923	1,044	1,216	1,486

Tabelul 3.25 prezintă dependența de frecvență a rezistenței bobinei care modelează conductorul de nul al LEA 750KV (pentru curent de 100mA).

Tabelul 3.25.

f [Hz]	50	100	150	200	250	300	500	700	1000
$R'_l/2$ [Ω]	0,324	0,341	0,362	0,386	0,412	0,437	0,545	0,608	0,692

3.2.4.2. Calculul impedanței derivație Z'_d

Valoarea impedanței Z'_d care conduce la coincidența parametrilor de secvență omopolară la linie și model în cazul unei frecvențe date și curent dat, s-a determinat cu ajutorul calculatorului pe baza unui program de calcul elaborat în acest scop (Anexa 6).

În tabelul 3.26 sunt trecute datele de calcul și valoarea impedanței Z'_d care conduce la coincidența parametrilor de secvență omopolară la linie și model pentru o anumită frecvență și un curent de 200 mA, în cazul LEA 110-220 KV.

Tabelul 3.26.

f [Hz]	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
R'_s [Ω]	1.232	1.612	1.866	2.218	2.53	2.962	3.363	5.55	7.24
L'_s [mH]	25.34	25.34	25.34	25.34	25.34	25.34	25.34	25.34	25.34
R'_0 [Ω]	26.08	41.5	57.33	80.45	103.45	126.35	156.85	232.68	308.25
R'_1 [Ω]	3.88	4.75	5.5	6.43	7.23	7.93	8.8	10.6	12.15
R'_e [Ω]	7.4	12.25	17.28	24.67	32.1	39.48	49.35	74.03	98.7
L'_0 [mH]	85.5	82	80.5	79.5	78	77.2	76	75.3	74.81
L'_e [mH]	16.67	15.5	15	14.65	14.17	13.9	13.5	13.27	13.1
R_d [Ω]	12.48	16.81	21.87	29.62	35.74	42.183	49.56	71.75	93.29
X_d [Ω]	6.05	5.36	4.81	4.46	1.88	-0,189	-4,65	-10,59	-17,67
Z_d [Ω]	13.87	17.65	22.09	29.95	35.81	42.184	49.78	72,52	94,95

Pentru LEA 400KV datele de calcul și valorile impedanței Z_d , care conduc la coincidența parametrilor de secvență omopolară a liniei cu cei ai modelului la anumite frecvențe și curent de 200 mA, sunt trecute în tabelul 3.27.

Tabelul 3.27.

f [Hz]	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
R'_s [Ω]	0.78	0.844	0.914	0.988	1.062	1.368	1.568	1.846	2.088	2.432	2.972
L'_s [mH]	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95	20.95
R'_0 [Ω]	8.35	12.9	16.02	19.85	23.63	38.78	53.88	76.45	98.95	121.43	151.38
R'_1 [Ω]	0.95	1.09	1.22	1.34	1.43	1.78	2.05	2.43	2.73	3	3.33
R'_e [Ω]	2.47	3.94	4.93	6.17	7.4	12.33	17.28	24.67	32.07	39.48	49.35
L'_0 [mH]	82	79	76.5	75	73.75	69.75	67.25	64.5	62.75	61	59.5
L'_e [mH]	19.48	18.45	17.02	17.17	16.7	15.37	14.53	13.62	13.03	12.45	11.95
R_d [Ω]	20.56	20.77	21.7	23.63	24.74	28.92	33.1	38.61	44.4	48.66	55.25
X_d [Ω]	1.83	3.57	6.93	8.05	8.89	10.33	10.22	8.63	6.53	2.83	-1.71
Z_d [Ω]	20.46	21.08	22.78	24.09	26.29	30.71	34.64	39.56	44.87	48.74	55.28

În cazul LEA 750KV datele de calcul și valorile impedanței Z_d , care conduc la coincidența parametrilor de secvență omopolară a liniei cu cei ai modelului pentru anumite

frecvențe și curent de 100 mA, sunt prezentate în tabelul 3.28.

Tabelul 3.28.

f [Hz]	100	150	200	250	300	500	700	1000
R'_c [Ω]	0,682	0,724	0,772	0,812	0,874	1,09	1,216	1,384
L_c [mH]	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88
R'_d [Ω]	7,92	11,71	15,46	19,23	22,98	37,95	52,9	75,3
R'_l [Ω]	0,55	0,61	0,66	0,72	0,77	0,94	1,13	1,15
R'_e [Ω]	2,46	3,7	4,93	6,17	7,4	12,34	17,26	24,6
L'_c [mH]	66,25	63,01	61	59,25	58	56	54,5	53,75
L'_l [mH]	14,75	13,67	13	12,42	12	11,33	10,83	10,58
R_d [Ω]	8,68	9,19	10,13	10,87	11,74	16,73	20,95	28,37
X_d [Ω]	2,21	2,27	2,19	1,88	1,58	0,79	-0,63	-2,1
Z_d [Ω]	8,96	9,47	10,37	11,04	11,85	16,75	20,96	29,45

Dependența de frecvență a valorilor R_d , X_d și Z_d ale modelului liniilor de 110-220KV sunt reprezentate în figura 3.18. În figura 3.19 sunt prezentate variația cu frecvența a valorilor R_d , X_d , Z_d ale modelului LEA 400KV iar în figura 3.20, dependențele de frecvență a parametrilor R_d , X_d , Z_d ale modelului 750KV.

Deoarece valoarea impedanței Z_d , în domeniul de frecvență relevant demersului întreprins este apropiată de valoarea rezistenței R_d , apare suficientă conectarea în conductorul de nul al modelului, numai a acestei rezistențe (R_d).

3.2.4.3. Caracteristicile de frecvență a parametrilor de secvență omopolară ale modelului

Neglijând reactanța X_d în relația (3.49) va rezulta :

$$Z'_e = \frac{Z'_s}{2} + \frac{\frac{Z'_s}{2} \cdot R_d}{\frac{Z'_s}{2} + R_d} \quad (3.63)$$

în care, ținând seama de relațiile (3.51) se obține :

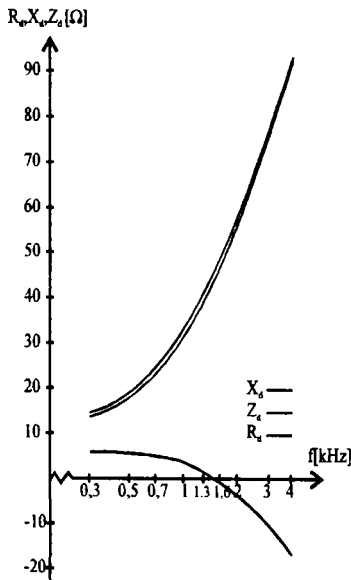


Fig.3.18. Dependența de frecvență a parametrilor impedenței Z_d la modelul liniilor de 110-220KV

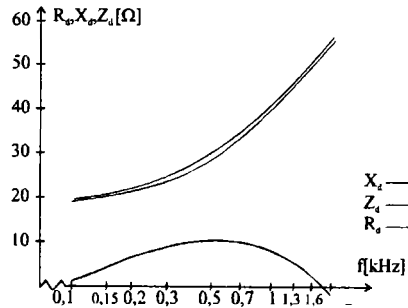


Fig.3.19. Dependența de frecvență a parametrilor impedenței Z_d la modelul liniilor de 400KV

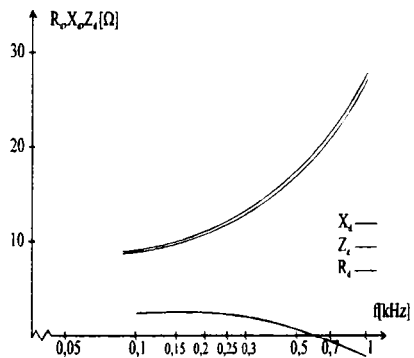


Fig.3.20. Dependența de frecvență a parametrilor impedenței Z_d la modelul liniilor de 750KV

$$R_e' = \frac{R_s'}{2} + R_d \frac{R_s'(2R_d + R_s') + \omega^2 L_s^2}{(2R_d + R_s')^2 + \omega^2 L_s^2} \quad (3.64)$$

$$L_e' = \frac{L_s}{2} + \frac{2R_d^2 \cdot L_s}{(2R_d + R_s')^2 + \omega^2 L_s^2} \quad (3.65)$$

Cunoscându-se din literatura de specialitate [58] că:

$$Z_0 = Z_1 + 3Z_e$$

rezultă:

$$R_0^M = R_1^M + 3R_e' \quad (3.66)$$

$$L_0^M = L_1^M + 3L_e' \quad (3.67)$$

Raportând la unitatea de lungime, pentru a putea compara cu parametrii liniilor se obțin următoarele relații ale dependenței de frecvență a parametrilor de secvență omopolară ai modelului, în cazul utilizării numai a rezistenței derivație R_d .

$$R_{o(0)}^M = R_{1(0)}^M + \frac{3}{\Delta R} \left[\frac{R_s'}{2} + R_d \frac{R_s'(2R_d + R_s') + \omega^2 L_s^2}{(2R_d + R_s')^2 + \omega^2 L_s^2} \right] \quad (3.68)$$

$$L_{o(0)}^M = L_{1(0)}^M + \frac{3}{\Delta L} \left[\frac{L_s}{2} + \frac{2R_d^2 \cdot L_s}{(2R_d + R_s')^2 + \omega^2 L_s^2} \right] \quad (3.69)$$

În anexa 7 este prezentat programul de calcul pentru determinarea caracteristicilor de frecvență exprimate prin relațiile (3.68) și (3.69).

Dependența de frecvență a parametrilor de secvență omopolară ai modelului LEA 110-220 KV pentru $R_{fs} = 2,65\Omega$ și curent de 200mA - la o anumită valoare a lui R_d - este prezentată în tabelul 3.29 și reprezentată în figura 3.21.

În cazul LEA 400 KV dependența de frecvență a parametrilor de secvență omopolară a modelului pentru $R_{fs} = 0,35\Omega$ și curent de 200mA - la o valoare de 20Ω respectiv 23Ω - este prezentată în tabelul 3.30 și reprezentată în figura 3.22.

Parametrii de frecvență omopolară ai modelului LEA 750 KV cu $R_{fs} = 0 \Omega$ și curent de 100mA depind de frecvență conform tabelului 3.31. Dependența de frecvență a acestor parametri este reprezentată în figura 3.23.

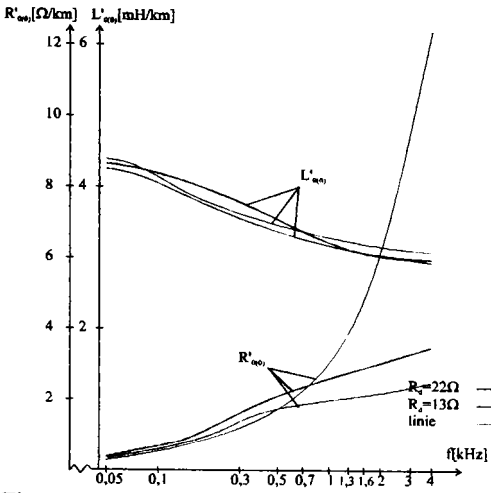


Fig.3.21. Dependența $R'_{\alpha(0)}=f(f)$ și $L'_{\alpha(0)}=f(f)$ pentru modelul liniilor 110-220KV

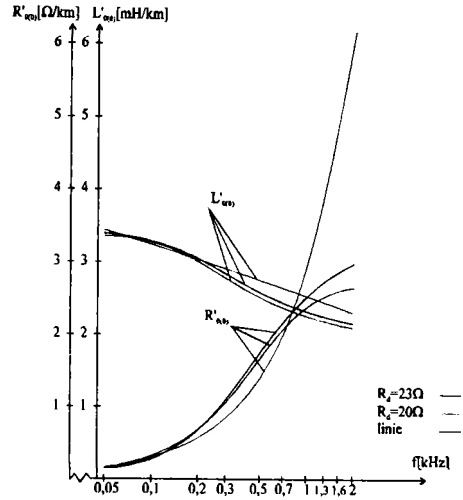


Fig.3.22. Dependența $R'_{\alpha(0)}=f(f)$ și $L'_{\alpha(0)}=f(f)$ pentru modelul liniilor 400KV

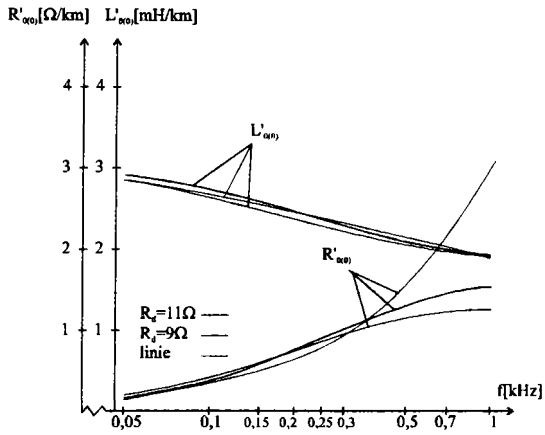


Fig.3.23. Dependența $R'_{\alpha(0)}=f(f)$ și $L'_{\alpha(0)}=f(f)$ pentru modelul liniilor 750KV

Tabelul 3.29

f [Hz]	50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
R'_{s2} [Ω]	0,408	0,441	0,616	0,806	0,933	1,081	1,265	1,481	1,818	2,775	3,635
L_{s2} [mH]	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67	12,67
R^M_{40} [Ω /km]	0,136	0,141	0,165	0,191	0,21	0,236	0,261	0,292	0,339	0,469	0,588
L^M_{40} [mH/km]	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42	1,42
$R_d=13$											
$R^M_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,355	0,637	1,434	1,69	1,796	1,882	1,946	2,012	2,105	2,356	2,561
[Ω]											
$L^M_{\alpha 0}$ [mH/km]	4,25	3,99	3,28	3,09	3,02	2,98	2,964	2,956	2,95	2,945	2,942
$R_d=22$											
$R^M_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,312	0,535	1,665	2,298	2,595	2,811	2,933	3,028	3,144	3,417	3,65
[Ω]											
$L^M_{\alpha 0}$ [mH/km]	4,36	4,24	3,62	3,29	3,14	3,05	3,01	2,98	2,97	2,95	2,94

Tabelul 3.30.

f [Hz]	50	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
R'_{s2} [Ω]	0,365	0,39	0,422	0,457	0,494	0,531	0,684	0,784	0,899	1,044	1,216	1,486
L_{s2} [mH]	10,475	10,475	10,475	10,475	10,475	10,475	10,475	10,475	10,475	10,475	10,475	10,475
R^M_{40} [Ω /km]	0,037	0,04	0,044	0,047	0,051	0,055	0,071	0,0823	0,098	0,112	0,131	0,16
L^M_{40} [mH/km]	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946
$R_d=20$												
$R^M_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,184	0,355	0,589	0,842	1,086	1,304	1,896	2,186	2,395	2,507	2,589	2,68
[Ω]												
$L^M_{\alpha 0}$ [mH/km]	3,38	3,3	3,18	3,05	2,93	2,82	2,53	2,4	2,31	2,27	2,25	2,23
$R_d=23$												
$R^M_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,177	0,332	0,553	0,804	1,058	1,297	1,998	2,375	2,656	2,804	2,905	3,012
[Ω]												
$L^M_{\alpha 0}$ [mH/km]	3,4	3,33	3,23	3,12	3,01	2,91	2,61	2,45	2,34	2,29	2,26	2,24

Tabelul 3.31.

f [Hz]	50	100	150	200	250	300	500	700	1000
R_{s2} [Ω]	0,322	0,335	0,354	0,376	0,399	0,422	0,519	0,572	0,601
L_{s2} [mH]	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
R^M_{10} [Ω /km]	0,0183	0,0202	0,0226	0,0252	0,0281	0,0309	0,0426	0,05	0,06
L^M_{10} [mH/km]	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
$R_d=9$									
$R^M_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,18	0,374	0,569	0,722	0,834	0,914	1,079	1,141	1,185
[Ω]									
$L^M_{\alpha 0}$ [mH/km]	2,86	2,68	2,1	2,35	2,25	2,18	2,05	2	1,97
$R_d=11$									
$R^M_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,168	0,35	0,558	0,741	0,887	0,999	1,242	1,338	1,403
[Ω]									
$L^M_{\alpha 0}$ [mH/km]	2,9	2,76	2,6	2,46	2,35	2,26	2,09	2,03	1,99

Dependența de frecvență a constantei de timp a circuitului de secvență omopolară a LEA110-220KV (τ_0^I) și a modelului aferent (τ_0^M), sunt prezentate în tabelul 3.32 și reprezentate

în figura 3.24. Pentru LEA400KV și modelul acesteia valorile constantelor de timp funcție de frecvență (τ_0^L, τ_0^M) sunt prezentate în tabelul 3.33 și reprezentate grafic în figura 3.25, iar în cazul LEA750KV dependențele de frecvență a constantei de timp pentru linie cât și pentru model sunt cuprinse în tabelul 3.34 și reprezentate grafic în figura 3.26.

Tabelul 3.32.

f[Hz]		50	100	300	500	700	1000	1300	1600	2000	3000	4000
LEA 110- 220KV	$R'_{\alpha(0)}$ [Ω /km]	0,248	0,428	1,043	1,66	2,293	3,218	4,138	5,054	6,274	9,307	12,33
	$L'_{\alpha(0)}$ [mH/km]	4,46	4,11	3,42	3,28	3,22	3,18	3,16	3,136	3,12	3,1	3,08
	τ_0^L [ms]	17,98	9,6	3,28	1,96	1,4	0,99	0,76	0,62	0,5	0,33	0,25
MODEL $R_d=13$ [Ω]	$R^M_{\alpha(0)}$ [Ω /km]	0,355	0,637	1,737	1,69	1,796	1,882	1,946	2,012	2,105	2,356	2,561
	$L^M_{\alpha(0)}$ [mH/km]	4,25	3,99	3,28	3,09	3,02	2,98	2,964	2,956	2,95	2,945	2,942
	τ_0^M [ms]	11,97	6,26	2,29	1,83	1,68	1,58	1,52	1,47	1,4	1,25	1,15
MODEL $R_d=22$ [Ω]	$R^M_{\alpha(0)}$ [Ω /km]	0,312	0,535	1,665	2,298	2,595	2,811	2,933	3,028	3,144	3,417	3,65
	$L^M_{\alpha(0)}$ [mH/km]	4,36	4,24	3,62	3,29	3,14	3,05	3,01	2,98	2,97	2,95	2,94
	τ_0^M [ms]	13,97	7,93	2,17	1,43	1,21	1,09	1,07	0,98	0,94	0,86	0,81

Tabelul 3.33.

f[Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000	1300	1600	2000
LEA 400KV	$R'_{\alpha(0)}$ [Ω /km]	0,18	0,334	0,516	0,641	0,794	0,945	1,55	2,155	3,058	3,958	4,857	6,055
	$L'_{\alpha(0)}$ [mH/km]	3,46	3,28	3,16	3,06	3	2,95	2,79	2,69	2,58	2,51	2,44	2,38
	τ_0^L [ms]	19,22	9,82	6,12	4,77	3,78	3,12	1,8	1,25	0,84	0,63	0,5	0,39
MODEL $R_d=20$ [Ω]	$R^M_{\alpha(0)}$ [Ω /km]	0,184	0,355	0,589	0,842	1,086	1,304	1,896	2,186	2,395	2,507	2,589	2,68
	$L^M_{\alpha(0)}$ [mH/km]	3,38	3,3	3,18	3,05	2,93	2,82	2,53	2,4	2,31	2,27	2,25	2,23
	τ_0^M [ms]	13,36	9,3	5,4	3,62	2,7	2,16	1,33	1,1	0,96	0,91	0,87	0,83
MODEL $R_d=23$ [Ω]	$R^M_{\alpha(0)}$ [Ω /km]	0,177	0,332	0,553	0,804	1,058	1,296	1,998	2,375	2,656	2,804	2,905	3,012
	$L^M_{\alpha(0)}$ [mH/km]	3,4	3,33	3,23	3,12	3,01	2,91	2,61	2,45	2,34	2,29	2,26	2,24
	τ_0^M [ms]	19,21	10,03	5,84	3,88	2,84	2,25	1,31	1,03	0,88	0,82	0,78	0,74

Tabelul 3.34.

f[Hz]		50	100	150	200	250	300	500	700	1000
LEA 750KV	$R'_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,0183	0,0202	0,0226	0,0252	0,0281	0,0309	0,0426	0,05	0,06
	$L'_{\alpha 0}$ [mH/km]	2,85	2,65	2,53	2,44	2,36	2,31	2,16	2,06	1,97
	τ^l_o [ms]	16,96	8,36	5,41	3,95	3,1	2,52	1,42	0,97	0,65
MODEL $R_d=9$ [Ω]	$R^M_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,18	0,374	0,569	0,722	0,834	0,914	1,079	1,141	1,185
	$L^M_{\alpha 0}$ [mH/km]	2,86	2,68	2,5	2,35	2,25	2,18	2,05	2	1,97
	τ^M_o [ms]	15,89	7,17	4,39	3,25	2,7	2,39	1,9	1,75	1,66
MODEL $R_d=11$ [Ω]	$R^M_{\alpha 0}$ [Ω /km]	0,168	0,35	0,558	0,741	0,887	0,999	1,242	1,338	1,403
	$L^M_{\alpha 0}$ [mH/km]	2,9	2,76	2,6	2,46	2,35	2,26	2,09	2,03	1,99
	τ^M_o [ms]	17,26	7,89	4,66	3,32	2,65	2,26	1,68	1,52	1,42

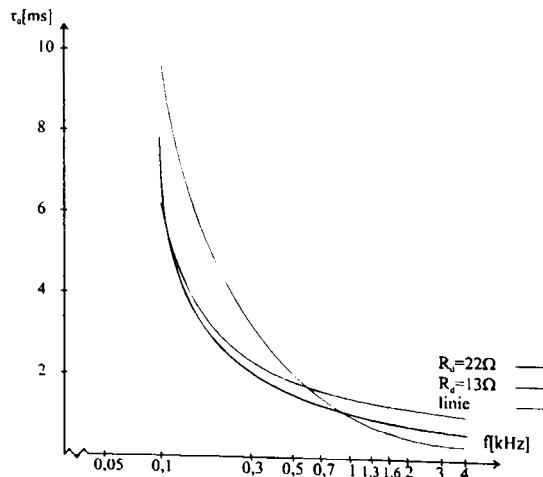


Fig.3.24. Dependența $\tau=f(f)$ pentru modelul liniilor de 110-220KV

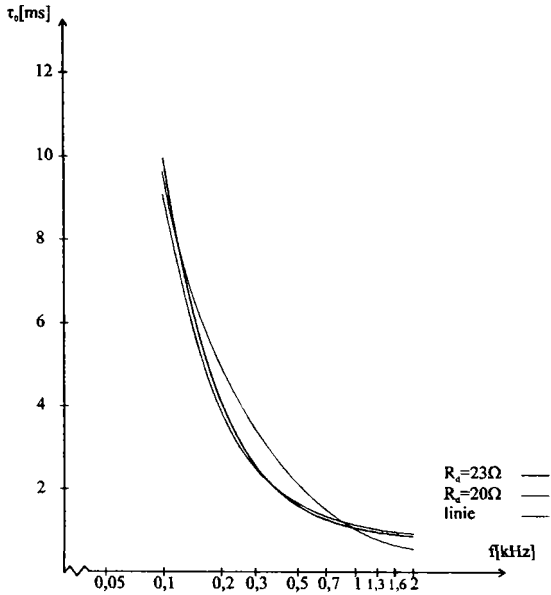


Fig.3.25. Dependența $\tau=f(f)$ pentru modelul liniilor de 400KV

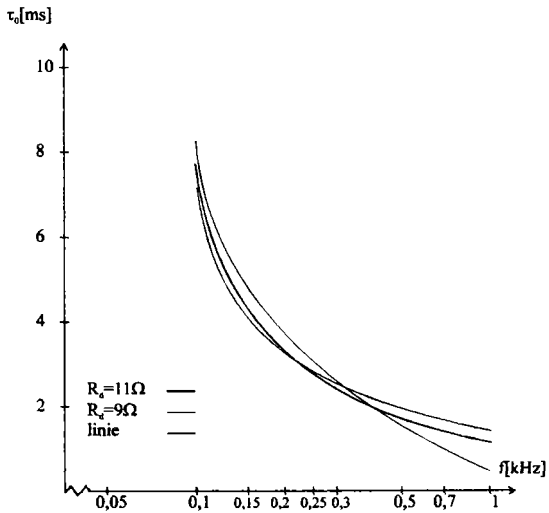


Fig.3.26. Dependența $\tau=f(f)$ pentru modelul liniilor de 750KV

În baza analizei întreprinse rezultă, pentru modelarea liniilor de 110-220KV, 400KV și 750KV, valorile rezistențelor R_d sintetizate în tabelul 3.35.

Tabelul 3.35.

R_d [Ω]	MODEL LINIE	f [Hz]						
		100	150	200	250	300	500	700
	110-220KV	-	-	-	-	12,48	16,81	21,87
	400KV	20,56	20,77	21,7	23,63	-	-	-
	750KV	8,68	9,19	10,13	10,87	-	-	-

La realizarea practică a modelului s-au utilizat pentru rezistența R_d valorile standardizate de : 20 Ω , 13 Ω și 11 Ω . Inductivitățile de secvență directă și omopolară ale LEA400KV și LEA750KV fiind apropiate ca valori, s-au utilizat pentru modelul ambelor tipuri de linii cele aferente LEA400KV.

Cap.4. Modelarea fizică a fenomenului Corona

4.1. Parametrii descărcării Corona

Pornind de la ecuațiile lui Maxwell ale câmpului electromagnetic, în condițiile considerării constante a permitivității (ϵ) și permeabilității (μ), respectiv a neglijării curentului de deplasare în conductoarele metalice și pământ, rezultă pentru legea conservării sarcinii și fluxului electric următoarea relație [40] :

$$-\frac{\partial i_x}{\partial x} = i_r + \frac{\partial q_x}{\partial t} \quad (4.1)$$

unde : i_x - curentul longitudinal

q_x - sarcina lineică a conductorului

i_r - curentul transversal de conductibilitate Corona.

Relația $q=f(u)$ este dependentă de caracteristicile geometrice ale conductorului, mărimea tensiunii și viteza de variație a tensiunii. Pe baza rezultatelor experimentale, în literatura de specialitate [60], [61], [62], [64] este prezentată dependența $q=f(u)$ (figura 4.1).

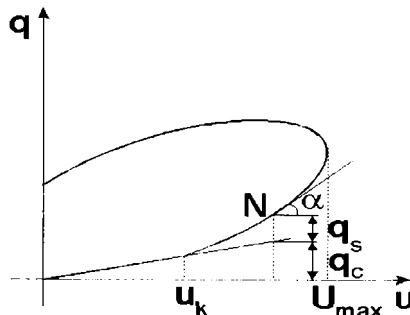


Fig.4.1. Dependența ciclică sarcină-tensiune

unde : u_k - tensiunea critică la care apare fenomenul Corona

q_c - sarcina determinată de geometria conductorului

q_s - sarcina suplimentară datorită efectului Corona.

Referitor la dependența sarcină-tensiune se disting următoarele mărimi de calcul :

- $C = q_c/u$ pentru $u \leq U_k$ - capacitatea geometrică
- $C_s = q_k/u$ pentru $U_k < u < U_{max}$ - capacitatea statică
- $C_d = \delta q_k / \delta u$ pentru $U_k < u < U_{max}$ - capacitatea dinamică.

În domeniul $u < U_k$ sarcina electrică este datorată numai capacității geometrice determinate de geometria conductorului deasupra solului și față de celelalte conductoare. Pentru acest domeniu se poate scrie relația :

$$q_c = C u \quad (4.2)$$

La o valoare a tensiunii (u) mai mare decât tensiunea critică (U_k), apare o sarcină suplimentară (q_s) datorită descărcării Corona, domeniu pentru care se poate scrie relația :

$$q_k = q_c + q_s = C u + q_s \quad (4.3)$$

În cazul când se depășește tensiunea maximă (U_{max}) valoarea sarcinii electrice scade. Dependența $q=f(u)$ are o variație ciclică, suprafața ciclului reprezentând pierderea de energie în timpul descărcării.

Legătura dintre capacitatea dinamică (C_d) și cea geometrică (C) se poate obține din relația (4.3) și anume :

$$C_d = \frac{\partial q_k}{\partial u} = C + \frac{\partial q_s}{\partial u} = C + \Delta C \quad (4.4)$$

unde

$$\Delta C = \frac{\partial q_s}{\partial u}$$

Apariția efectului Corona conduce la creșterea capacității liniei (10÷20%) și îndeosebi a pierderilor care cresc semnificativ în comparație cu pierderile active în conductoare.

Elementele neliniare g și ΔC care apar datorită efectului Corona se pot determina dacă sunt cunoscute :

- curba pierderilor de putere prin efect Corona $P_k=f_1(U)$ și
- unghiul de defazaj al primei armonici a curentului Corona față de tensiune $\varphi_1=f_2(U)$.

Expresiile acestor elemente sunt :

$$g = \frac{P_k}{U^2} \quad \text{și} \quad \omega \Delta C = g \operatorname{tg} \varphi_1 \quad (4.5)$$

unde U - valoarea efectivă a tensiunii.

Conductanța activă g precum și creșterea conductanței capacitive C se pot exprima prin

$$g = b_p \cdot \left(1 - \frac{U_k}{U_{max}} \right) \tag{4.6}$$

$$\omega \cdot \Delta C = b_p \cdot \left(\frac{U_{max}}{U_k} - 1 \right) \tag{4.7}$$

unde : - b_p - coeficientul unghiular al caracteristicii reduse a pierderilor prin efect Corona
 $P_k/U_k = f(U_{max}/U_k)$, care reprezintă o dreaptă

- U_k - tensiunea de apariție a efectului Corona.

$$b_p = \omega C \cdot \frac{0,7}{\frac{C_e}{C} - 1} \tag{4.8}$$

unde : - C_e - capacitatea echivalentă a volumului sarcinii efectului Corona.

În general C_e/C variază între 2 și 3 astfel că :

$$b_p = (0,35 \div 0,7) C \omega$$

Raportul dintre conductanța activă g și conductanța capacitivă a liniei (determinată pornind de la capacitatea geometrică), va fi :

$$\frac{g}{\omega C} = (0,35 \div 0,7) \cdot \left(1 - \frac{U_k}{U_{max}} \right) \tag{4.9}$$

În figura 4.2 este prezentată curba g/b_p și $\omega \Delta C/b_p$ funcție de U_{max}/U_k .

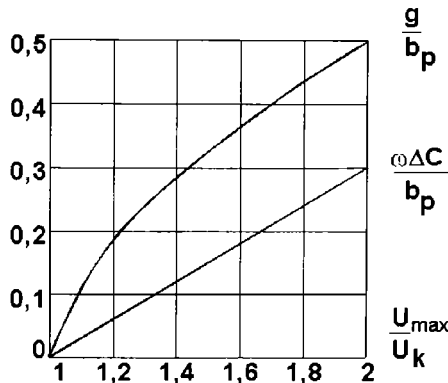


Fig.4.2. Dependența de tensiune a conductanței efectului Corona și a creșterii capacității.

Caracteristica :

$$\frac{\omega \Delta C}{b_p} = f \left(\frac{U_{\max}}{U_k} \right)$$

practic este o dreaptă cu coeficient unghiular 0,31. În aceste condiții creșterea relativă a conductanței capacitive va fi :

$$\frac{\omega \Delta C}{\omega C} = 0,31 \frac{0,7}{\frac{C_e}{C} - 1} \left(\frac{U_{\max}}{U_k} - 1 \right) = \frac{0,22}{\frac{C_e}{C} - 1} \left(\frac{U_{\max}}{U_k} - 1 \right)$$

4.2. Determinarea parametrilor neliniari g, ΔC datorită efectului Corona

Pentru calculul parametrilor g și ΔC ai liniei coronate se folosesc următoarele relații [66]:

$$g_{(0)} = 0,83 \cdot 10^{-3} \left(\frac{f}{50} \right)^{1-\alpha_p} \left(\frac{C_{(0)}}{11,1} \right)^2 \left(\frac{13,3}{r_m} \right)^{0,76} \left(\frac{q_{fk}}{6,54} \right)^{0,38} \cdot \left[1 - e^{-3,05 \left(\frac{U_{\max}}{U_k} - 1 \right)} \right] \quad [1/M\Omega m] \quad (4.10)$$

$$\Delta C_{(0)} = 1,9 \left(\frac{50}{f} \right)^{\alpha_{\Delta C}} \left(\frac{C_{(0)}}{11,1} \right)^2 \left(\frac{13,3}{r_m} \right)^{0,84} \left(\frac{q_{fk}}{6,54} \right)^{0,42} \left(\frac{U_{\max}}{U_k} - 1 \right) [pF/m] \quad (4.11)$$

- unde : - f - frecvența tensiunii [Hz]
- U_{\max} - amplitudinea tensiunii
- r_m - raza medie geometrică pe fază [cm]
- $\alpha_p, \alpha_{\Delta C}$ - coeficienți calculați cu formulele :

$$\alpha_p = 0,0116 [C_{(0)} + 21,7] \quad (4.12)$$

$$\alpha_{\Delta C} = 0,0116 C_{(0)} + 0,29 \quad (4.13)$$

În relațiile (4.10), (4.11), tensiunea critică U_k de apariție a efectului Corona, capacitatea geometrică $C_{(0)}$ și sarcina electrică q_k a liniei trifazate se calculează cu relațiile :

$$U_k = 84 m_1 m_2 \delta r n \lg \frac{D_m}{r_m} \quad (4.14)$$

$$C_{(0)} = \frac{24,1}{lg \frac{2h_m}{r_m}} \quad [pF/m] \quad (4.15)$$

$$Q_K = C_{(0)} U_k \quad [\mu C/m] \quad (4.16)$$

iar pentru o fază :

$$Q_{fk} = \frac{Q_k}{\sqrt{3}} \quad [\mu C/m] \quad (4.17)$$

unde : - m_1, m_2 - coeficienți dependenți de starea suprafeței conductorului, respectiv starea atmosferică ($m_1 \approx 1, m_2 \approx 0,85$)

- δ - densitatea relativă a aerului (≈ 1)
- r - raza unui conductor din fascicol [cm]
- n - numărul de conductoare din fascicol
- D_m - distanța medie dintre faze [cm]
- h_m - înălțimea medie de suspendare a conductorului față de pământ [cm]

Calculul parametrilor neliniari ($g, \Delta C$) s-a efectuat pe baza unor programe de calcul elaborate de autor [68] prezentate în anexele 8 și 9 pentru aceleași variante care au fost luate în considerare la modelarea liniilor electrice aeriene 110-220KV, 400KV și 750KV. Rezultatele calculului, pentru porțiuni de 25km de linie, sunt sintetizate în tabelele 4.1, 4.2, 4.3 și reprezentate în figurile 4.3, 4.4, 4.5.

Domeniul de frecvență (50-250Hz) și cel al raportului supratensiunilor U_{max}/U_k (1,25-2), luate în considerare, sunt acoperitoare pentru analiza influenței efectului Corona în lungul conductoarelor asupra creșterilor de tensiune în regim de rezonanță a liniilor lungi.

Tabelul 4.1.

f [Hz]	$U_{max}/U_k = 1,25$		$U_{max}/U_k = 1,5$		$U_{max}/U_k = 2$	
	$g[1/M\Omega]$	$\Delta C[nF]$	$g[1/M\Omega]$	$\Delta C[nF]$	$g[1/M\Omega]$	$\Delta C[nF]$
50	12,05	14,5	17,675	29	21,5	58
100	19,175	11,2	28,125	22,425	34,2	44,875
150	25,15	9,65	36,9	19,3	44,875	38,625
200	30,5	8,675	44,725	17,35	54,425	34,725
250	35,425	7,975	51,95	15,975	63,2	31,975

Tabelul 4.2.

f [Hz]	$U_{max}/U_k = 1.25$		$U_{max}/U_k = 1.5$		$U_{max}/U_k = 2$	
	g[1/MΩ]	ΔC[nF]	g[1/MΩ]	ΔC[nF]	g[1/MΩ]	ΔC[nF]
50	6.675	8.175	9.8	16.4	11.925	32.775
100	10.475	6.025	12.5	15.575	18.7	25
150	13.625	5.325	20.025	12.675	24.35	21.35
200	16.425	4.75	24.125	9.55	29.35	19.075
250	19	4.35	27.9	8.75	33.95	17.475

Tabelul 4.3.

f [Hz]	$U_{max}/U_k = 1.25$		$U_{max}/U_k = 1.5$		$U_{max}/U_k = 2$	
	g[1/MΩ]	ΔC[nF]	g[1/MΩ]	ΔC[nF]	g[1/MΩ]	ΔC[nF]
50	6.525	6.95	9.55	13.9	11.65	27.825
100	10.15	5.275	14.875	10.525	18.15	21.025
150	13.175	4.475	19.275	8.95	23.525	17.925
200	15.35	3.725	23.175	7.975	28.275	15.975
250	18.275	3.65	26.75	7.275	32.625	14.6

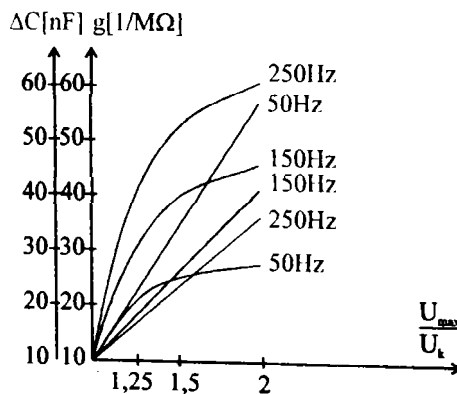


Fig. 4.3. Dependența $\Delta C=f(U_{max}/U_k)$ și $g=f(U_{max}/U_k)$ pentru LEA 110-220KV, $\Delta l=25km$

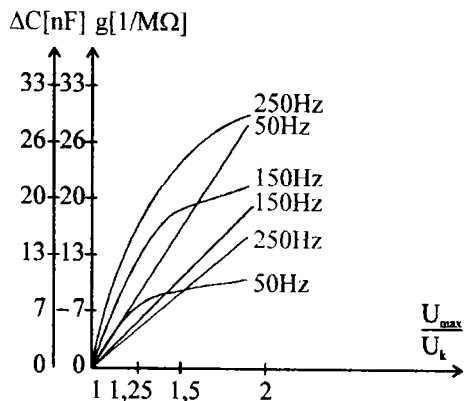


Fig.4.4. Dependența $\Delta C=f(U_{max}/U_k)$ și $g=f(U_{max}/U_k)$ pentru LEA 400KV, $\Delta l=25km$

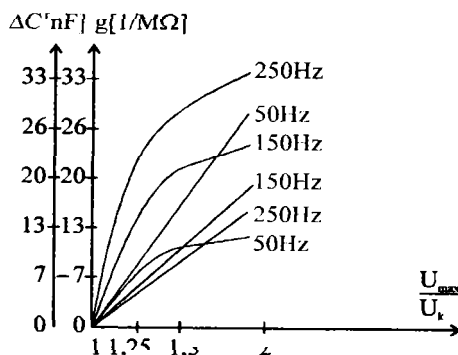


Fig.4.5. Dependența $\Delta C=f(U_{max}/U_k)$ și $g=f(U_{max}/U_k)$ pentru LEA 750KV, $\Delta l=25km$

4.3. Calculul pierderilor datorate efectului Corona.

Determinarea pierderilor prin efect Corona pentru cazurile analizate, se efectuează cu ajutorul unei relații [66], în care mărimile de referință sunt frecvența oscilațiilor și valoarea raportului U_{max}/U_k , celelalte mărimi având aceeași semnificație ca și în relația (4.10).

$$P=520\left(\frac{f}{50}\right)^{1-\alpha_f}\left(\frac{g_{kp}}{6,54}\right)^{2,38}\left(\frac{U_{max}}{U_k}-1\right)\left(\frac{13,3}{r_m}\right)^{0,76} \quad [kW/km] \quad (4.18)$$

Pentru calculul valorilor pierderilor reale transpuse la scara modelului fizic (P_M) se impune cunoașterea scării tensiunilor, impedanțelor și a puterilor. Scara impedanței fiind deja impusă ($m_z=1$) și admitând pentru modelul Corona o tensiune de 30V, vor rezulta pentru tensiune și putere următoarele scări :

$U_n=220$ KV	$m_u=4240$	$m_p=17,98 \cdot 10^6$	
$U_n=400$ KV	$m_u=7700$	$m_p=59,29 \cdot 10^6$	(4.19)
$U_n=750$ KV	$m_u=14434$	$m_p=208,34 \cdot 10^6$	

Programul de calcul pentru pierderile pe linia reală și cele transpuse la scara modelului este prezentat în anexa 10.

Valorile pierderilor de putere la scara modelului (P_M) pentru 1km de linie respectiv pentru 25km de linie (P_{M25}) aferente celor trei nivele de tensiune luate în considerare, sunt prezentate

în tabelele 4.4, 4.5, 4.6., respectiv reprezentate grafic în figurile 4.6, 4.7, 4.8.

Tabelul 4.4.

f [Hz]	P _M [mW/km]			P _{M25} [mW]		
	U _{max} /U _k =1.25	U _{max} /U _k =1.5	U _{max} /U _k =2	U _{max} /U _k =1.25	U _{max} /U _k =1.5	U _{max} /U _k =2
50	0,472	0,944	1,888	11,8	23,6	47,2
100	0,751	1,502	3,004	18,775	37,55	75,1
150	0,985	1,971	3,942	24,625	49,275	98,55
200	1,195	2,39	4,779	29,875	59,75	119,475
250	1,388	2,776	5,55	34,7	69,4	138,75

Tabelul 4.5.

f [Hz]	P _N [mW/km]			P _{M25} [mW]		
	U _{max} /U _k =1.25	U _{max} /U _k =1.5	U _{max} /U _k =2	U _{max} /U _k =1.25	U _{max} /U _k =1.5	U _{max} /U _k =2
50	0,289	0,568	1,136	7,105	14,209	28,419
100	0,446	0,892	1,784	11,15	22,3	44,6
150	0,58	1,161	2,321	14,51	29,021	58,041
200	0,699	1,399	2,799	17,75	34,975	69,975
250	0,809	1,618	3,236	20,224	40,45	80,899

Tabelul 4.6.

f [Hz]	P _N [mW/km]			P _{M25} [mW]		
	U _{max} /U _k =1.25	U _{max} /U _k =1.5	U _{max} /U _k =2	U _{max} /U _k =1.25	U _{max} /U _k =1.5	U _{max} /U _k =2
50	0,316	0,632	1,265	7,906	15,813	31,625
100	0,493	0,985	1,971	12,325	24,625	49,275
150	0,639	1,277	2,555	15,971	31,943	63,883
200	0,768	1,536	3,072	19,2	38,4	76,8
250	0,886	1,772	3,543	22,147	44,295	88,587

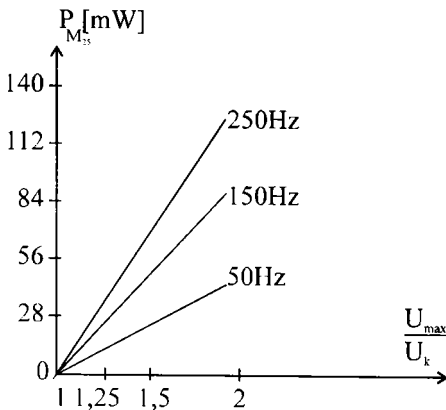


Fig.4.6. Dependența $P_{M25}=f(U_{max}/U_k)$ pentru LEA110- 220KV, $\Delta l=25km$

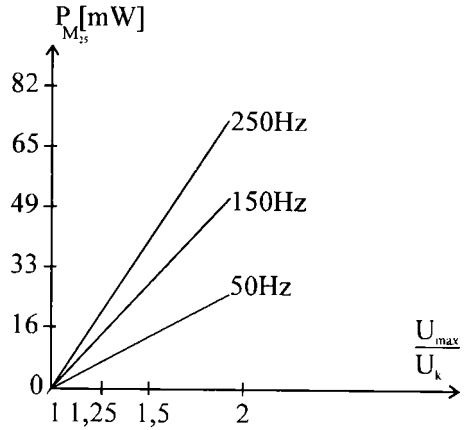


Fig.4.7. Dependența $P_{M25}=f(U_{max}/U_k)$ pentru LEA 400KV, $\Delta l=25km$

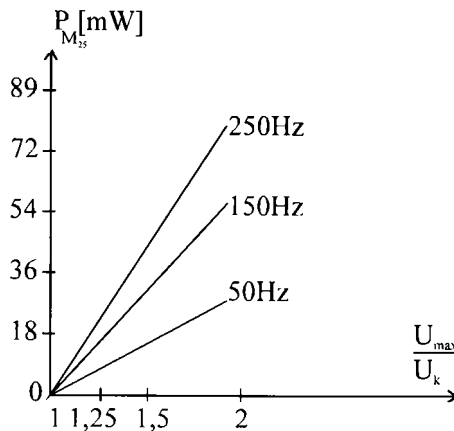


Fig.4.8. Dependența $P_{M25}=f(U_{max}/U_k)$ pentru LEA 750KV, $\Delta l=25km$

4.4. Modelarea fizică a fenomenului Corona.

Studiul pe model a influenței efectului Corona asupra proceselor tranzitorii care apar pe liniile electrice aeriene, se poate realiza prin legarea la fiecare octopol al modelului liniei a unor elemente suplimentare de circuit care reproduc modificarea corespunzătoare a parametrilor rețelei respectiv a pierderilor.

Schema analizată în lucrare, pentru reprezentarea cât mai fidelă a caracteristicilor efectului

Corona, este cea din figura 4.9. [66], unde :

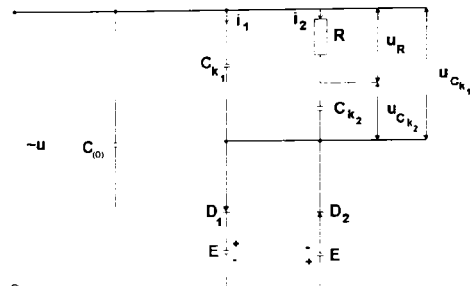


Fig 4.9. Schema pentru modelarea efectului Corona

- $C_{(0)}$ - capacitatea geometrică lineică
- C_{k1} - capacitatea care modelează formarea sarcinii spațiale în câmpul electric al liniei coronate
- C_{k2} - capacitatea care inserată cu rezistența R modelează deplasarea sarcinilor spațiale în câmpul liniei coronate însoțită de pierderi de energie (fără a se schimba mărimea sarcinii ce se deplasează).
- E - sursa de tensiune continuă pentru polarizarea diodelor D_1 și D_2
- D_1, D_2 - diode care asigură prin intrarea lor în conducție punerea în paralel cu capacitatea lineică ($C_{(0)}$) a grupului C_k, R pentru ambele alternanțe ale tensiunii aplicate modelului.
- u - tensiunea liniei reduse la scara modelului

La tensiuni pe linie care depășesc tensiunea critică de apariție a fenomenului Corona (tensiune modelată prin valoarea surselor de polarizare E a diodelor) se conectează în paralel cu capacitatea geometrică ($C_{(0)}$) atât capacitatea C_{k1} cât și capacitatea C_{k2} inserată cu rezistența R.

În lipsa elementului RC_{k2} , curentul prin modelul Corona se întrerupe în momentul în care curba tensiunii u trece prin maxim, întrucât $u < E + u_{ck1}$ și dioda se blochează. În prezența elementului RC_{k2} inegalitatea tensiunii pe capacitățile C_{k1} și C_{k2} asigură posibilitatea micșorării tensiunii u_{ck1} și menținerea în consecință a curentului prin model un timp oarecare după trecerea tensiunii prin maxim ; atâta timp cât derivata du/dt nu depășește derivata du_{ck1}/dt , determinată de descărcarea capacității C_{k1} peste C_{k2} , fenomen care asigură disiparea energiei înmagazinată în capacitatea C_{k1} în rezistența R, până când tensiunile pe cele două capacități devin egale. Fenomenele se repetă în mod identic în semialternanța negativă.

Evident, toate cele menționate anterior, referitor la procesele din schema modelului

Corona, presupun alegerea corespunzătoare a constantei de timp a modelului $T = \frac{C_{k1} C_{k2}}{C_{k1} + C_{k2}} R$.

Dacă T este mic, ambele capacități se încarcă simultan și modelul se reduce practic la unul capacitiv având capacitatea echivalentă $C_{k1} + C_{k2}$. În cazul în care T are valori mult prea mari, capacitatea C_{k2} nu se va încărca și din nou modelul se reduce la unul capacitiv cu capacitatea C_{k1} .

Considerații cu privire la aprecierea constantei de timp T se vor face în paragraful 4.4.3.

4.4.1. Studiul analitic al schemei de modelare a efectului Corona

Schema adoptată pentru model este cea din figura 4.9. Tensiunea de lucru a liniei (u) și tensiunea critică de apariție a efectului Corona (U_k) sunt date de relațiile (figura 4.10) :

$$u = U_{fmax} \sin(\omega t + \varphi) \tag{4.20}$$

$$U_k = E = U_{fmax} \sin\varphi \tag{4.21}$$

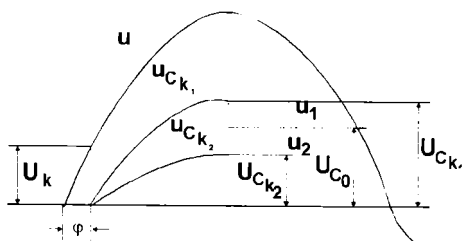


Fig. 4.10. Variația tensiunii u, u_{Ck1} , u_{Ck2}

Considerăm că inițial capacitățile C_{k1} și C_{k2} sunt încărcate la un anumit potențial U_{C0} , valoare ce se stabilește din momentul în care diodele nu mai conduc și are loc fenomenul de încărcare și descărcare a capacității C_{k1} peste C_{k2} și invers.

$$u = u_{Ck1} \pm (E - U_{C0}) \tag{4.22}$$

$$u_{Ck1} = u \mp (E - U_{C0}) \tag{4.23}$$

$$u_{Ck1} = U_{fmax} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \mp (E - U_{C0}) \tag{4.24}$$

Iar expresia curentului va fi :

$$i_1 = C_{k1} \frac{du_{Ck1}}{dt} = C_{k1} \omega U_{fmax} \cos(\omega t + \varphi) \tag{4.25}$$

Tinând seama de relația :

$$i_1(p) \frac{1}{pC_{k_1}} = i_2(p) \left(R + \frac{1}{pC_{k_2}} \right) = \frac{1+pRC_{k_2}}{pC_{k_2}} i_2(p) \quad (4.26)$$

rezultă :

$$i_2(p) = \frac{C_{k_2} i_1(p)}{C_{k_1}(1+pRC_{k_2})} = \frac{U_{fmax} p(\omega \cos \varphi + p \sin \varphi) \mp (E - U_{C_0})(p^2 + \omega^2)}{(p^2 + \omega^2)(1+pRC_{k_2})} C_{k_2} \quad (4.27)$$

Rădăcinile numitorului relației (4.27) sunt : $P_1 = -\frac{1}{RC_{k_2}}$ și $P_{2,3} = \pm j\omega$ iar pentru

$i_2(t)$ după aplicarea teoremei dezvoltării rezultă :

$$i_2(t) = - \left[\frac{U_{fmax}(\omega RC_{k_2} \cos \varphi - \sin \varphi)}{(1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2)R} \frac{E - U_{C_0}}{R} \right] e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} + \frac{\omega C_{k_2} U_{fmax}}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} [(\cos \varphi + \omega RC_{k_2}) \cos \omega t - (\sin \varphi - \omega RC_{k_2} \cos \varphi) \sin \omega t] \quad (4.28)$$

Notând cu $I_2 \sin(\omega t - \psi)$ termenul doi al membrului drept din relația (4.28) rezultă

pentru ψ și I_2 , expresiile :

$$\psi = \arctg \frac{\cos \varphi + \omega RC_{k_2} \sin \varphi}{\sin \varphi - \omega RC_{k_2} \cos \varphi} \quad I_2 = \frac{\omega C_{k_2} U_{fmax}}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2}} \quad (4.29)$$

Pe baza relațiilor (4.28) și (4.29) se obține pentru i_2 următoarea relație :

$$i_2 = I_2 \sin(\omega t - \psi) - I'_2 e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} \quad (4.30)$$

unde

$$-I'_2 = - \frac{U_{fmax}(\omega RC_{k_2} \cos\varphi - \sin\varphi)}{(1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2)R} \mp \frac{E - U_{C_0}}{R} \quad (4.31)$$

Curentul de efect Corona i_k este dat de suma curenților de pe cele două ramuri :

$$i_k = C_{k_1} \omega U_{fmax} \cos(\omega t + \varphi) + I_2 \sin(\omega t - \psi) - I'_2 e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} \quad (4.32)$$

Variația tensiunii pe capacitatea C_{k_2} se obține pornind deasemeni de la transformata Laplace și anume :

$$u_{C_{k_2}}(p) = \frac{i_2}{pC_{k_2}} = \frac{U_{fmax} p (\omega \cos\varphi + p \sin\varphi) \mp (E - U_{C_0})(p^2 + \omega^2)}{p(p^2 + \omega^2)(1 + pRC_{k_2})} \quad (4.33)$$

Pentru rădăcinile : $p_1 = 0$, $p_2 = -\frac{1}{RC_{k_2}}$, $p_{3,4} = \pm j\omega$ variația în timp a tensiunii u_{ck_2} , cu

luarea în considerare a încărcării sale inițiale U_{C_0} după o serie de calcule, este dată de relația :

$$u_{C_{k_2}}(t) = \mp E + \left[\frac{U_{fmax}(\omega RC_{k_2} \cos\varphi - \sin\varphi)}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} \pm (E - U_{C_0}) \right] e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} + \frac{U_{fmax}}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} [(\cos\varphi + \omega RC_{k_2} \sin\varphi) \sin\omega t + (\sin\varphi - \omega RC_{k_2} \cos\varphi) \cos\omega t] \quad (4.34)$$

Dacă se notează cu $U_2 \sin(\omega t - \theta)$ termenul al patrulea din membrul drept al relației (4.34) rezultă pentru θ și U_2 expresiile :

$$\theta = \arctg \frac{\omega RC_{k_2} \cos\varphi - \sin\varphi}{\omega RC_{k_2} \sin\varphi + \cos\varphi} \quad U_2 = \frac{U_{fmax}}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2}} \quad (4.35)$$

iar pentru $u_{ck_2}(t)$ relația :

$$u_{C_{k_2}}(t) = \mp E + U'_2 e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} + U_2 \sin(\omega t - \theta) \quad (4.36)$$

unde :

$$U'_2 = \left[\frac{U_{fmax}(\omega RC_{k_2} \cos \varphi - \sin \varphi)}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} \pm (E - U_{C_0}) \right] \quad (4.37)$$

Variația în timp a tensiunii pe rezistența R este dată de expresia :

$$u_R(t) = i_2(t)R = - \left[\frac{U_{fmax}(\omega RC_{k_2} \cos \varphi - \sin \varphi)}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} \pm (E - U_{C_0}) \right] e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} + \frac{\omega RC_{k_2} U_{fmax}}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} [(\cos \varphi + \omega RC_{k_2} \sin \varphi) \cos \omega t - (\sin \varphi - \omega RC_{k_2} \cos \varphi) \sin \omega t] \quad (4.38)$$

Notând cu $U_R \sin(\omega t - \psi)$ termenul al doilea din membrul drept al relației (4.38) rezultă pentru ψ și U_R expresiile :

$$\psi = \arctg \frac{\cos \varphi + \omega RC_{k_2} \sin \varphi}{\sin \varphi - \omega RC_{k_2} \cos \varphi} ; U_R = \frac{\omega RC_{k_2} U_{fmax}}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2}} \quad (4.39)$$

respectiv

$$u_R = U'_R e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} + U_R \sin(\omega t - \psi) \quad (4.40)$$

unde

$$U'_R = - \left[\frac{U_{fmax}(\omega RC_{k_2} \cos \varphi - \sin \varphi)}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} \pm (E - U_{C_0}) \right] \quad (4.41)$$

Datorită ramurii RC_{k_2} curentul prin modelul Corona nu se stinge în momentul trecerii curbei tensiunii u prin valoarea maximă ci se menține o anumită perioadă de timp t_0 , până când derivata du dt nu depășește (în mărime absolută) derivata du_{ck1}/dt. Corespunzător cu procesul real

pe linia coronată după trecerea sarcinii totale prin valoarea maximă se continuă disiparea energiei acumulate de capacitatea C_{k1} în rezistența R, scăzând treptat ca urmare a diferenței tensiunilor.

În conformitate cu cele pecizate la începutul paragrafului, după trecerea curbei tensiunii u prin maxim, urmează procesul tranzitoriu de încărcare-descărcare a condensatoarelor din bucla prezentată în figura 4.11. Notând cu U_{Ck1} , U_{Ck2} valorile-tensiunii pe cele două capacități în momentul trecerii prin maxim a tensiunii de alimentare ($U_{Ck1} > U_{Ck2}$), se poate scrie :

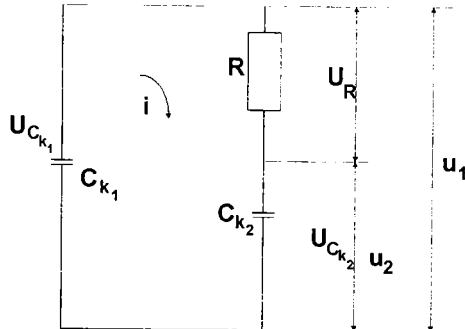


Fig.4.11. Schema buclei capacităților C_{k1} , C_{k2} , R

$$u_1(p) = \frac{U_{Ck1}}{p} - i(p) \frac{1}{pC_{k1}} = \frac{U_{Ck2}}{p} + i(p) \left(R + \frac{1}{pC_{k2}} \right) \quad (4.42)$$

Din relația (4.42) rezultă pentru $i(p)$ expresia :

$$i(p) = C_{k1} C_{k2} \frac{U_{Ck1} - U_{Ck2}}{pRC_{k1}C_{k2} + C_{k1} + C_{k2}} \quad (4.43)$$

Înlocuind pe $i(p)$ în relația (4.42), se obține după o serie de calcule :

$$u_1(p) = \frac{C_{k1} U_{Ck1}}{p} \cdot \frac{pRC_{k2} + 1 + \frac{U_{Ck2}}{U_{Ck1}} \frac{C_{k2}}{C_{k1}}}{pRC_{k1}C_{k2} + C_{k1} + C_{k2}} \quad (4.44)$$

Soluțiile numitorului ecuației (4.44) sunt : $p_1=0$ și $p_2 = -\frac{C_{k1} + C_{k2}}{RC_{k1}C_{k2}} = -\frac{1}{T}$

unde T reprezintă constanta de timp a fenomenului :

$$T = \frac{C_{k_1} C_{k_2} R}{C_{k_1} + C_{k_2}} \quad (4.45)$$

Variația în timp a tensiunii u_1 va fi :

$$u_1(t) = \frac{C_{k_1} U_{C_{k_1}}}{C_{k_1} + C_{k_2}} \left(1 + \frac{U_{C_{k_2}} \cdot C_{k_2}}{U_{C_{k_1}} \cdot C_{k_1}} \right) + \frac{C_{k_1} U_{C_{k_1}} - RC_{k_1} C_{k_2}}{-(C_{k_1} + C_{k_2})} \frac{\left(-RC_{k_2} \frac{C_{k_1} + C_{k_2}}{RC_{k_1} C_{k_2}} + 1 + \frac{U_{C_{k_2}} C_{k_2}}{U_{C_{k_1}} C_{k_1}} \right)}{RC_{k_1} C_{k_2}} e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.46)$$

Relația (4.46) după efectuarea unor calcule devine :

$$u_1(t) = \frac{U_{C_{k_1}} C_{k_1} + U_{C_{k_2}} C_{k_2}}{C_{k_1} + C_{k_2}} + \frac{C_{k_2}(U_{C_{k_1}} - U_{C_{k_2}})}{C_{k_1} + C_{k_2}} e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.47)$$

pentru $t \rightarrow \infty$

$$u_1(\infty) = \frac{U_{C_{k_1}} C_{k_1} + U_{C_{k_2}} C_{k_2}}{C_{k_1} + C_{k_2}} = U_{C_0} \quad (4.48)$$

În figura 4.12 este reprezentată variația în timp a tensiunii u_1 .

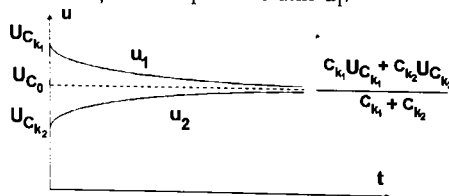


Fig. 4.12. Variația în timp a tensiunilor u_1 și u_2

Pentru determinarea variației în timp a tensiunii u_2 se pornește de la relația :

$$u_2(p) = \frac{U_{C_{k_2}}}{p} + \frac{i(p)}{pC_{k_2}} \quad (4.49)$$

Înlocuind în (4.49) expresia lui i din relația (4.43) se obține :

$$u_2(p) = \frac{1}{p} \left(U_{C_{k_2}} + C_{k_1} \frac{U_{C_{k_1}} - U_{C_{k_2}}}{pRC_{k_1}C_{k_2} + C_{k_1} + C_{k_2}} \right) =$$

$$= \frac{1}{p} \frac{pRC_{k_1}C_{k_2}U_{C_{k_2}} + C_{k_1}U_{C_{k_1}} - C_{k_1}U_{C_{k_2}} + C_{k_1}U_{C_{k_2}} + C_{k_2}U_{C_{k_2}}}{pRC_{k_1}C_{k_2} + C_{k_1} + C_{k_2}}$$

respectiv :

$$u_2(p) = \frac{1}{p} \cdot \frac{pRC_{k_1}C_{k_2}U_{C_{k_2}} + C_{k_1}U_{C_{k_2}} + C_{k_1}U_{C_{k_1}}}{pRC_{k_1}C_{k_2} + C_{k_1} + C_{k_2}} \quad (4.50)$$

Soluțiile numitorului sunt : $p_1=0$, $p_2 = -\frac{C_{k_1}+C_{k_2}}{RC_{k_1}C_{k_2}} = -\frac{1}{T}$

astfel încât expresia lui u_2 va fi :

$$u_2(t) = \frac{U_{C_{k_2}}C_{k_2} + U_{C_{k_1}}C_{k_1}}{C_{k_1} + C_{k_2}} - \frac{RC_{k_1}C_{k_2}}{C_{k_1} + C_{k_2}} \cdot$$

$$- \frac{C_{k_1}C_{k_2}}{C_{k_1} + C_{k_2}} \frac{RC_{k_1}C_{k_2} + C_{k_2}U_{C_{k_2}} + C_{k_1}U_{C_{k_1}}}{RC_{k_1}C_{k_2}} e^{-\frac{t}{T}} =$$

$$= \frac{U_{C_{k_2}}C_{k_2} + U_{C_{k_1}}C_{k_1}}{C_{k_1} + C_{k_2}} + C_{k_1} \frac{U_{C_{k_1}} - U_{C_{k_2}}}{C_{k_1} + C_{k_2}} e^{-\frac{t}{T}}$$

iar pentru $t \rightarrow \infty$:

$$u_2(\infty) = \frac{U_{C_{k_1}}C_{k_1} + U_{C_{k_2}}C_{k_2}}{C_{k_1} + C_{k_2}} = U_{C_0} \quad (4.52)$$

Variația în timp a tensiunii u_2 este reprezentată în figura 4.12. Este de remarcat că pentru $t \rightarrow \infty$ atât tensiunea u_1 cât și tensiunea u_2 tind spre aceeași valoare U_{C_0} . Această valoare (U_{C_0}) se atinge practic după o durată de timp $t=3T$.

Determinarea tensiunii U_{C_0} implică stabilirea expresiilor tensiunilor $U_{C_{k_1}}$ și $U_{C_{k_2}}$.

Astfel, pentru : $\omega t + \varphi = \frac{\pi}{2}$ din expresiile lui u_{Ck1} și u_{Ck2} se obține :

$$U_{C_{k_1}} = U_{fmax} \mp (E - U_{C_0}) \quad (4.53)$$

$$U_{C_{k_2}} = \mp E + \frac{U_{fmax}}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} + [k \pm (E - U_{C_0})] e^{-\frac{\frac{\pi}{2} - \varphi}{\omega R C_{k_2}}} \quad (4.54)$$

unde :

$$k = \frac{U_{fmax}(\omega R C_{k_2} \cos\varphi - \sin\varphi)}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} \quad (4.55)$$

$$U_{C_0} = \frac{U_{C_{k_1}} C_{k_1} + U_{C_{k_2}} C_{k_2}}{C_{k_1} + C_{k_2}} = \frac{U_{C_{k_1}} + (C_{k_2}/C_{k_1}) \cdot U_{C_{k_2}}}{1 + C_{k_2}/C_{k_1}}$$

Cu aceste notații și în urma unor calcule asupra relațiilor (4.53), (4.54) se obțin pentru $U_{C_{k1}}$, $U_{C_{k2}}$ expresiile :

$$U_{C_{k_1}} = \frac{U_{fmax} \mp \left(E - \frac{U_{C_{k_2}} C_{k_2}/C_{k_1}}{1 + C_{k_2}/C_{k_1}} \right)}{1 \mp \frac{1}{1 + C_{k_2}/C_{k_1}}} \quad (4.56)$$

$$U_{C_{k_2}} = \frac{1}{A \pm \frac{C_{k_2}}{C_{k_1}} e^{-\frac{\frac{\pi}{2} - \varphi}{\omega R C_{k_2}}}} \left[\frac{A U_{fmax}}{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2} + k A \pm \right. \\ \left. \pm (EA - U_{fmax} + E) e^{-\frac{\frac{\pi}{2} - \varphi}{\omega R C_{k_2}}} \mp EA \right] \quad (4.57)$$

unde

$$A = \left(1 + \frac{C_{k_2}}{C_{k_1}} \right) \left(1 \mp \frac{1}{1 + C_{k_2}/C_{k_1}} \right)$$

Înlocuind în relația (4.56) expresia lui U_{Ck2} din (4.57), se determină valoarea lui U_{Ck1} .

Determinarea momentului în care se anulează curentul de efect Corona în modelul considerat, luând ca referință trecerea prin maxim a tensiunii de alimentare se face pornind de la relațiile :

$$\frac{du}{dt} \leq \frac{du_1}{dt} \quad ; \quad u = U_{fmax} \sin(\omega t + \varphi) \quad ;$$

$$u_1 = \frac{U_{C_{k1}} C_{k1} + U_{C_{k2}} C_{k2}}{C_{k1} + C_{k2}} + C_{k2} \frac{U_{C_{k1}} - U_{C_{k2}}}{C_{k1} + C_{k2}} e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.58)$$

În consecință, momentul t_0 al anulării curentului de efect Corona este determinabil cu relația :

$$\omega U_{fmax} \cos(\omega t + \varphi) \leq - \frac{C_{k2}(U_{C_{k1}} - U_{C_{k2}})}{T(C_{k1} + C_{k2})} e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.59)$$

Admițând $t_0/T \cong 3$ rezultă ; $e^{-t_0/T} = \frac{1}{e^3} \cong 0$ și deci : $\omega t_0 + \varphi = \frac{\pi}{2} \div \pi$, astfel încât valorile

limită pentru t_0 se vor putea calcula cu relațiile :

$$t_0 = \frac{\pi/2 - \varphi}{\omega} \quad ; \quad t_0 = \frac{\pi - \varphi}{\omega} \quad (4.60)$$

În tabelul 4.7. sunt prezentate valorile raportate ale lui t_0 , la perioada T_{50} a tensiunii de frecvență industrială, de unde se constată că durata de existență a efectului Corona, după trecerea tensiunii sursei prin maxim, și deci valoarea pierderilor, poate fi controlată prin alegerea corespunzătoare a constantei de timp T , așa cum se va demonstra în paragraful 4.4.3.

Tabelul 4.7.

U_{max}/U_k		1	1.25	1.5	2	3
φ [rad]		1	0.9723	0.734	0.5236	0.3398
t_0/T_{50}	minim	0.09089	0.0953	0.13318	0.16677	0.19602
	maxim	0.341	0.3454	0.38337	0.41688	0.44615

4.4.2. Calculul pierderilor de putere în model

Pierderea de putere la nivelul modelului se calculează pornind de la expresia :

$$P = \frac{R}{T} \int_0^T i^2 dt \quad (4.61)$$

Curentul care trece prin rezistența modelului este $i_2(t)$ dat de relația :

$$i_2 = I_2 \sin(\omega t - \psi) - I_2' e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} \quad (4.62)$$

în care

$$I_2 = \frac{\omega C_{k_2} U_{fmax}}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2}}$$

iar

$$I_2' = \frac{U_{fmax}(\omega RC_{k_2} - \sin\varphi)}{(1 + \omega^2 R^2 C_{k_2}^2)R} \pm \frac{E - U_{C_0}}{R}$$

Înlocuind pe i_2 în relația (4.61) se obține :

$$P = \frac{R}{T} \int_0^T I_2^2 \sin^2(\omega t - \psi) dt - \frac{2R}{T} \int_0^T I_2 I_2' e^{-\frac{t}{RC_{k_2}}} \sin(\omega t - \psi) dt + \frac{R}{T} \int_0^T I_2'^2 e^{-\frac{2t}{RC_{k_2}}} dt \quad (4.63)$$

Din calculul celor trei integrale rezultă :

$$\frac{R}{T} \int_0^T I_2^2 \sin^2(\omega t - \psi) dt = \frac{RI_2}{2}$$

$$-\frac{2R}{T} \int_0^T I_2' e^{-\frac{t}{RCk_2}} \sin(\omega t - \psi) dt = \frac{2RI_2' RCk_2}{T} \cos\varphi \left(1 - e^{-\frac{T}{RCk_2}}\right)$$

$$\frac{R}{T} \int_0^T I_2'^2 e^{-\frac{2t}{RCk_2}} dt = \frac{RI_2'^2}{2} \cdot \frac{RCk_2}{T} \left(1 - e^{-\frac{2T}{RCk_2}}\right)$$

În consecință calculul pierderilor P la nivelul modelului se va realiza utilizând relația :

$$P = \frac{RI_2'^2}{2} + \frac{2RI_2' RCk_2}{T} \cos\varphi \left(1 - e^{-\frac{T}{RCk_2}}\right) + \frac{RI_2'^2}{2} \cdot \frac{RCk_2}{T} \left(1 - e^{-\frac{2T}{RCk_2}}\right) \quad (4.64)$$

Din calculele realizate pentru pierderile la nivelul modelelor, în cazul diferitelor linii de înaltă tensiune, a rezultat că valorile termenilor doi și trei din membrul drept al relației (4.64) sunt foarte mici în comparație cu valoarea primului termen. În aceste condiții pentru determinarea pierderilor se poate utiliza cu aproximație acceptabilă formula:

$$P \approx \frac{R\omega^2 Ck_2^2 U_{fmax}^2}{2(1 + \omega^2 R^2 Ck_2^2)} \quad (4.65)$$

Pentru exemplificare este de arătat că în cazul liniei de 400 kV calculul acestor trei termeni au condus la valorile $2,04 \cdot 10^{-3} \text{W}$ pentru prima integrală și $5,88 \cdot 10^{-5} \text{W}$ respectiv $9,2 \cdot 10^{-8} \text{W}$ pentru integrala a doua și a treia.

4.4.3. Determinarea parametrilor modelului.

Reproducerea pe model a fenomenelor care au loc pe linia reală, în condițiile apariției fenomenului Corona stabilizat, presupune atât condiția identității dependenței pierderilor de frecvența tensiunii $P=F_1(f)$, cât și de factorul de supratensiune $P=F_2(U_{max}/U_k)$. În cazul liniei reale această dependență este exprimată prin relația (4.18), în care intervin atât frecvența, cât și raportul (U_{max}/U_k) .

În cazul modelului adoptat, în expresia pierderilor date prin relația (4.65), doar frecvența

tensiunii intervine în mod explicit, raportul U_{\max}/U_k intervenind prin intermediul lui R și C_{k2} , primul determinabil cu ajutorul relației (4.10) sub forma parametrului $g_{(0)}$ și al doilea cu relația (4.11), sub forma parametrului $\Delta C_{(0)}$ reprezentând de fapt pe C_{k1} din schema modelului Corona. Apare deci necesitatea alegerii unui raport C_{k1}/C_{k2} , care să permită modificarea corespunzătoare a dependenței $P=F_2(U_{\max}/U_k)$, necesare pentru model și a constantei de timp $T=RC_{k2}/(1+C_{k1}/C_{k2})$.

Valorile definitive ale parametrilor modelului se stabilesc prin compararea dependenței pierderilor de factorul de supratensiune, în raport cu tensiunea inițială Corona pe linia reală și în model, cu luarea în considerare a scărilor de modelare : scara tensiunilor m_u și scara puterilor m_p . Pentru aceasta, dependența cunoscută a pierderilor pe linie se transpune la scara modelului și stabilind punctele în care trebuie asigurată coincidența pierderilor, în funcție de tensiune (mai exact raportul U_{\max}/U_k), a modelului și liniei, (pentru o supratensiune oarecare $-U_{\max}/U_k=1,25; 1,5; 2$) se determină capacitățile necesare modelului (C_{k1} și C_{k2}) cu formula :

$$C_K = C_K' \left(\frac{U_k'}{U_k} \right)^2 \frac{P_M}{P_M'} \quad (4.66)$$

unde : - C_k - capacitatea modelului, a cărei caracteristică $P=f(U_{\max}/U_k)$ este cunoscută pentru valorile C_{k2}/C_{k1} și T alese,

- U_k, P_M - tensiunea critică de apariție a efectului Corona și pierderile în punctul de coincidență, prin transpunere la scările modelului a curbei pierderilor Corona pe linie,

- U_k', P_M' - tensiunea critică și pierderile în model, a cărei caracteristici sunt cunoscute pentru factorul de supratensiune corespunzător punctului de coincidență.

Rezultă, prin urmare, că alegerea definitivă a parametrilor modelului necesită efectuarea unor determinări experimentale pentru ridicarea caracteristicii $P=F_2(U_{\max}/U_k)$.

Pentru stabilirea criteriilor de alegere a parametrilor modelului, reprezentați în ultimă instanță de raportul C_{k1}/C_{k2} și constanta de timp T , pornim de la relația (4.60), dedusă în paragraful anterior și care în condițiile menționate ($t_0 \approx 3T$), conduce la următoarea expresie :

$$fT = \frac{\pi/2 - \varphi}{6\pi} \quad ; \quad fT = \frac{\pi - \varphi}{6\pi} \quad (4.67)$$

însă

$$fT = f \frac{RC_{k_1}}{1 + C_{k_1}/C_{k_2}} = f \frac{\Delta C/g}{1 + C_{k_1}/C_{k_2}}$$

de unde rezultă conform (4.67), următoarele relații de calcul ale raportului C_{k_1}/C_{k_2} :

$$1 + \frac{C_{k_1}}{C_{k_2}} = \frac{\omega \Delta C}{g} \cdot \frac{3}{\pi/2 - \varphi} \quad \text{și} \quad 1 + \frac{C_{k_1}}{C_{k_2}} = \frac{\omega \Delta C}{g} \cdot \frac{3}{\pi - \varphi} \quad (4.68)$$

Cu luarea în considerare a relațiilor (4.6) și (4.7), ultimele relații devin :

$$1 + \frac{C_{k_1}}{C_{k_2}} = \frac{U_k}{U_{\max}} \cdot \frac{3}{\pi/2 - \varphi} \quad ; \quad 1 + \frac{C_{k_1}}{C_{k_2}} = \frac{U_k}{U_{\max}} \cdot \frac{3}{\pi - \varphi} \quad (4.69)$$

Aceste expresii obținute pentru valoarea raportului C_{k_1}/C_{k_2} corelate cu relațiile (4.67), scot în evidență faptul foarte important din punct de vedere al modelării efectului Corona, că alegerea parametrilor schemei este independentă de frecvența oscilațiilor, motiv pentru care această alegere se va face pentru frecvența de 50Hz.

În conformitate cu relațiile (4.67), în tabelul 4.8 sunt prezentate rezultatele privind domeniul de variație a produsului fT în funcție de raportul U_{\max}/U_k . Se observă că valoarea acestuia crește odată cu creșterea factorului de supratensiune, tinzând spre o limită superioară, $fT = 1/12 = 0,08333$, respectiv $fT = 1/6 = 0,16666$ pentru valori mari ale factorului de supratensiune, când $\varphi = 0$.

Tabelul 4.8.

U_{\max} / U_k		1	1.25	1.5	2	3
φ [rad]		1	0.9723	0.7341	0.5236	0.3398
fT	min	0.0303	0.03175	0.04439	0.0556	0.06531
	max	0.1136	0.1151	0.1278	0.1389	0.1491

Subliniem faptul că această valoare calculată este confirmată de rezultatele cercetărilor experimentale [100], care precizează că această limită superioară este de $fT = 0,083$. Pe baza acestuia se poate concluziona că din punct de vedere al modelării caracteristicii $P = F_1(f)$, este de

dorit ca valoarea de calcul a acestui parametru să se adopte apropiată de 0,10, pentru valoarea cea mai mică a frecvenței posibile a supratensiunii. Această concluzie rămâne valabilă cu atât mai mult cu cât această valoare $fT \approx 0,1$, este confirmată de datele cuprinse în tabelul 4.8.

Pe baza relației (4.69), în funcție de același factor de supratensiune U_{\max} / U_k s-au calculat valorile $1+C_{k1}/C_{k2}$, rezultatele fiind prezentate în tabelul 4.9, de unde se constată că raportul C_{k1}/C_{k2} variază în limite relativ restrânse, astfel încât pentru determinarea prealabilă a parametrilor modelului Corona, se poate adopta $C_{k1}/C_{k2}=1$.

Tabelul 4.9.

U_{\max} / U_k		1	1.25	1.5	2	3
φ [rad]		1	0,9723	0,7341	0,5236	0,3398
$1+C_{k1}/C_{k2}$	max	5,263	5,019	3,589	2,867	2,439
	min	1,4	1,384	1,247	1,147	1,071

În acest fel, pentru cele trei tipuri de linie alese pentru modelare, valorile acestora sunt sintetizate în tabelul 4.10, unde se specifică și valoarea tensiunii critice de apariție a efectului Corona U_k , redusă la scara modelului. Valorile R și C_{k1} , așa cum s-a precizat, sunt cele determinate în paragraful 4.3. pentru $f=50\text{Hz}$, alegere care ia în considerare regimul cel mai defavorabil, adică apariția unui proces rezonant prelungit pe frecvența industrială. Această alegere prezintă avantajul important al posibilității simple de măsurare a pierderilor Corona $P=F_2(U_{\max}/U_k)$ la frecvența industrială și recalcularea parametrilor C_{k1} și C_{k2} conform relației 4.66.

Pe baza acestor considerații în continuare se vor determina parametrii definitivi ai schemei de modelare a efectului Corona. Porțiunea de linie modelată este de 25 km, iar parametrii liniilor de 220, 400, 750 KV sunt prezentați în cele ce urmează.

Tabelul 4.10.

Tipul liniei	U_k [V]	U_{\max}/U_k	1.25	1.5	2
220 KV OI-AI 300/50	34	R [k Ω]	83	57	47
		$C_{k1}=C_{k2}$ [nF]	15	29	58
400 KV 2 X O I - A I 450/75	35	R [k Ω]	150	102	84
		$C_{k1}=C_{k2}$ [nF]	8	16	32
750 KV 5 X O L - A L 300.69	37	R [k Ω]	153	105	86
		$C_{k1}=C_{k2}$ [nF]	7	14	28

Pentru calculul pierderilor se utilizează relația (4.65), în cazul liniei de 220KV valorile

pierderilor calculate și a celor determinate experimental fiind trecute în tabelul 4.11.

Tabelul 4.11.

U_{max}/U_k	R [kΩ]	$C_{k1} = C_{k2}$ [nF]	I_R [mA]	Pierderi P_{M25} [mW]	
				calc.	exp.
1.25	83	15	0,095	1.44	0.75
1.5	57	29	0.21	4.84	2,5
2	47	58	0.74	20,8	25,74

Dependența pierderilor calculate analitic și determinate experimental pentru modelul liniei de 220KV, cât și graficul pierderilor reale pe linie, transpuse la scara modelului sunt reprezentate în figura 4.13.

Diferența semnificativă între dependențele pierderilor calculate, respectiv determinate experimental pentru model și cele aferente liniei transpuse la scara modelului, impune calculul noilor capacități C_k (cu relația (4.66)). Astfel cu pierderile P_{M25} calculate rezultă:

$$\begin{array}{ll}
 U_{max}/U_k = 1,25 & C_{k1} = C_{k2} = 83 \text{ nF} \\
 U_{max}/U_k = 1,5 & C_{k1} = C_{k2} = 76 \text{ nF} \\
 U_{max}/U_k = 2 & C_{k1} = C_{k2} = 68 \text{ nF}
 \end{array}$$

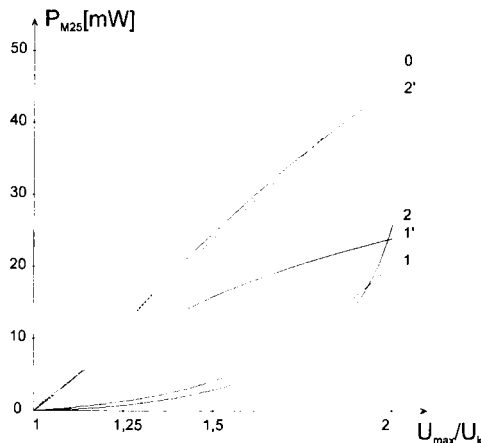


Fig.4.13. Dependența pierderilor. Calculate analitic: inițial (1), cu noile capacități (1')
 Determinate experimental: inițial (2) cu noile capacități (2'). Pe linia reală de 220 KV (0)

Cu aceste valori noi ale capacității C_{k2} , obținute pe baza pierderilor calculate rezultă :

$$U_{\max}/U_k = 1,25 \quad P_{M25} = 8,97 \text{ mW}$$

$$U_{\max}/U_k = 1,5 \quad P_{M25} = 12,49 \text{ mW}$$

$$U_{\max}/U_k = 2 \quad P_{M25} = 21,13 \text{ mW}$$

Noile pierderi determinate experimental și capacitățile aferente sunt prezentate în tabelul 4.12. Aceste pierderi cât și cele calculate cu noile capacități sunt prezentate în figura 4.13.

Tabelul 4.12.

U_{\max}/U_k	R [kΩ]	$C_{k1} = C_{k2}$ [nF]	I_R [mA]	P_{M25} [mW]
1.25	83	157	0,36	10,76
1.5	57	134	0,66	24,83
2	47	64	1.25	45,31

În cazul liniei de 400KV, valorile pierderilor calculate și a celor determinate experimental sunt trecute în tabelul 4.13.

Tabelul 4.13.

U_{\max}/U_k	R [kΩ]	$C_{k1} = C_{k2}$ [nF]	I_R [mA]	Pierderi P_{M25} [mW]	
				calc.	exp.
1.25	150	8	0,065	0,78	0,63
1.5	102	16	0,115	2,81	1,35
2	84	32	0,39	12,13	12,78

Dependența pierderilor calculate pentru model, a celor determinate experimental, cât și cea corespunzătoare pierderilor reale pe linie, transpuse la scara modelului sunt reprezentate în figura 4.14.

Noile capacități determinate cu pierderile calculate sunt :

$$U_{\max}/U_k = 1,25 \quad C_{k1} = C_{k2} = 49 \text{ nF}$$

$$U_{\max}/U_k = 1,5 \quad C_{k1} = C_{k2} = 44 \text{ nF}$$

$$U_{\max}/U_k = 2 \quad C_{k1} = C_{k2} = 38 \text{ nF}$$

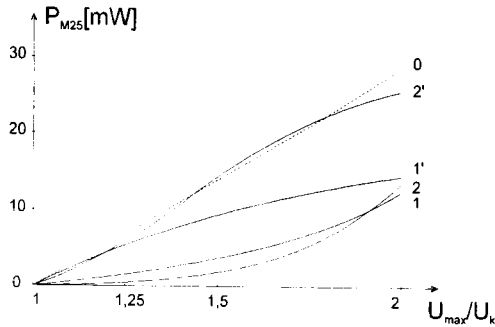


Fig.4.14. Dependența pierderilor. Calculate analitic : inițial (1) ; cu noile capacități (1'). Determinate experimental : inițial (2) ; cu noile capacități (2'). Pe linia reală de 400KV.

Pierderile determinate cu noile capacități calculate sunt :

$$\begin{aligned}
 U_{\max}/U_k = 1,25 & & P_{M25} = 5,37 \text{ mW} \\
 U_{\max}/U_k = 1,5 & & P_{M25} = 8,99 \text{ mW} \\
 U_{\max}/U_k = 2 & & P_{M25} = 14,62 \text{ mW}
 \end{aligned}$$

Noile pierderi determinate experimental și capacitățile aferente sunt prezentate în tabelul 4.14. și reprezentate grafic în figura 4.14.

Tabelul 4.14.

U_{\max}/U_k	R [kΩ]	$C_{k1} = C_{k2}$ [nF]	I_r [mA]	P_M [mW]
1.25	150	60	0,21	6,6
1.5	102	82	0.38	14,73
2	84	37	0,55	25,41

În cazul liniei de 750 KV valorile pierderilor calculate și a celor determinate experimental sunt trecute în tabelul 4.15.

Variația pierderilor calculate analitic și determinate experimental pentru modelul liniei de 750KV, cât și graficul pierderilor reale pe linie, transpuse la scara modelului, sunt reprezentate în figura 4.15.

Tabelul 4.15.

U_{max}/U_k	R [kΩ]	$C_{k1} = C_{k2}$ [nF]	I_R [mA]	P_{M25} [mW]	
				calc.	exp.
1,25	153	7	0,03	0,71	0,14
1,5	105	14	0,106	2,58	1,18
2	86	28	0,325	11,58	9,08

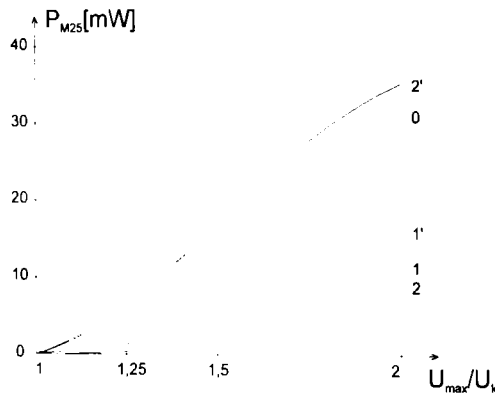


Fig.4.15. Dependența pierderilor. Calculate analitic : inițial (1) ; cu noile capacități (1').
 Determinate experimental : inițial (2) ; cu noile capacități (2'). Pe linia reală de 750KV(0).

Noile capacități determinate cu pierderile calculate sunt :

$$\begin{aligned}
 U_{max}/U_k = 1,25 & \quad C_{k1} = C_{k2} = 52 \text{ nF} \\
 U_{max}/U_k = 1,5 & \quad C_{k1} = C_{k2} = 44 \text{ nF} \\
 U_{max}/U_k = 2 & \quad C_{k1} = C_{k2} = 36 \text{ nF}
 \end{aligned}$$

Pierderile determinate cu noile capacități calculate sunt :

$$\begin{aligned}
 U_{max}/U_k = 1,25 & \quad P_{M25} = 6,02 \text{ mW} \\
 U_{max}/U_k = 1,5 & \quad P_{M25} = 12,6 \text{ mW} \\
 U_{max}/U_k = 2 & \quad P_{M25} = 15,82 \text{ mW}
 \end{aligned}$$

Noile pierderi determinate experimental și capacitățile aferente sunt prezentate în tabelul

Tabelul 4.16.

U_{\max}/U_k	R [k Ω]	C_{k2} [nF]	I_R [mA]	P_{M25} [mW]
1.25	153	258	0,206	6,49
1.5	105	90	0,41	17,65
2	86	41	0,64	35,22

4.5. Componența modelului

Modelul conceput pentru modelarea efectului Corona, la trei valori diferite ale supratensiunilor ($U_{\max}/U_k = 1.2; 1.5; 2$), este adaptat pentru utilizare în cazul diferitelor tensiuni și conductoare ale liniei. S-au ales cele mai reprezentative tipuri de linii și conductoare din țara noastră și anume :

- LEA 220 kV , OL - AL 300/50
- LEA 220 kV , OL - AL 450/50
- LEA 400 kV , 2 x OL - AL 450/75
- LEA 400 kV , 3 x OL - AL 450/75
- LEA 750 kV , 5 x OL - AL 300/69
- LEA 220 kV dublu circuit OL - AL 450/75

Modelul pentru simularea efectului Corona este compus din cinci subansamble și are schema din figura 4.16. În principiu acesta este compus din :

- capacități și rezistențe;
- diode prepolarizatoare;
- sursă de alimentare cu tensiune continuă de polarizare;
- comutatoare pentru nivele de supratensiune(K_1);
- comutatoare pentru tipuri de conductoare(K_2).

Ansamblul capacităților și rezistențelor este format din 18 module specifice fiecărui nivel de supratensiune și fiecărui tip de conductor.

Tensiunea continuă de polarizare s-a realizat cu ajutorul unei punți duble cu diode și capacități de netezire a curbei tensiunii.

Comutatorul necesar asigurării nivelului supratensiunii (K_1) este prevăzut cu trei poziții ($U_{\max}/U_k=1,25$; $U_{\max}/U_k=1,5$; $U_{\max}/U_k=2$). Comutatoarele pentru alegerea tipului de conductor (K_2)

sunt prevăzute cu șase poziții. Constructiv, atât comutatoarele pentru selectarea supratensiunii cât și cele pentru alegerea tipului de conductor sunt astfel executate încât să fie exclusă conectarea din greșeală a mai mult de o componentă de supratensiune și tip de conductor.

Modelul cuprinde borne de acces prin care se poate racorda modelul pentru simularea efectului Corona la octopol, borne de oscilografere și măsură a tensiunii de alimentare a octopolilor, borne de măsură a tensiunii continue de polarizare și borne de racordare la model a tensiunii alternative necesare alimentării modelului.

Instalația utilizată pentru realizarea experimentărilor pe dispozitivele de modelare a efectului Corona este prezentată în figura 4.17.

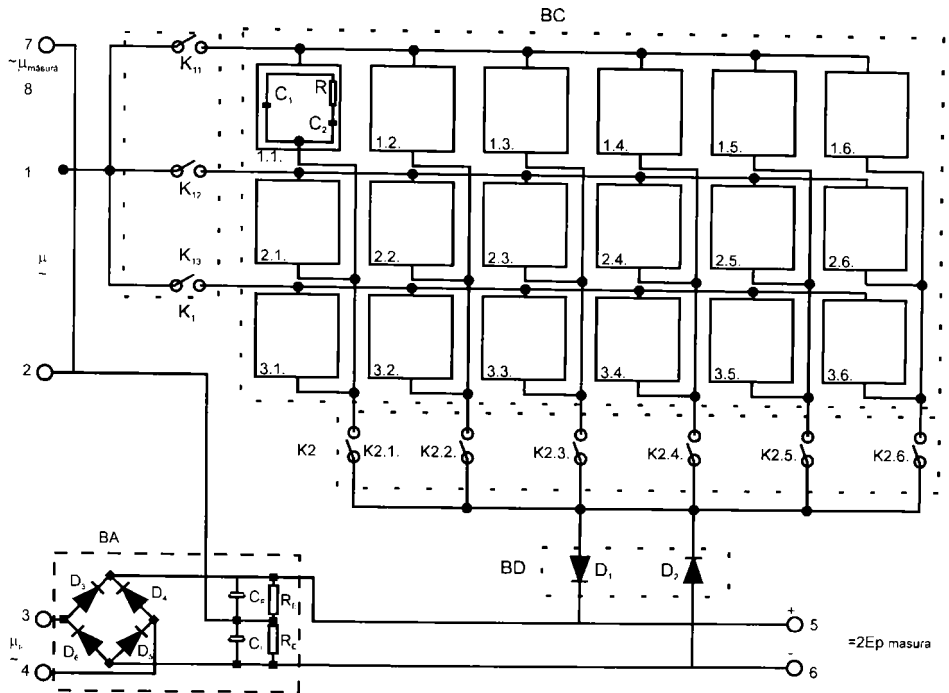


Fig. 4.16. Schema generală a modelului.

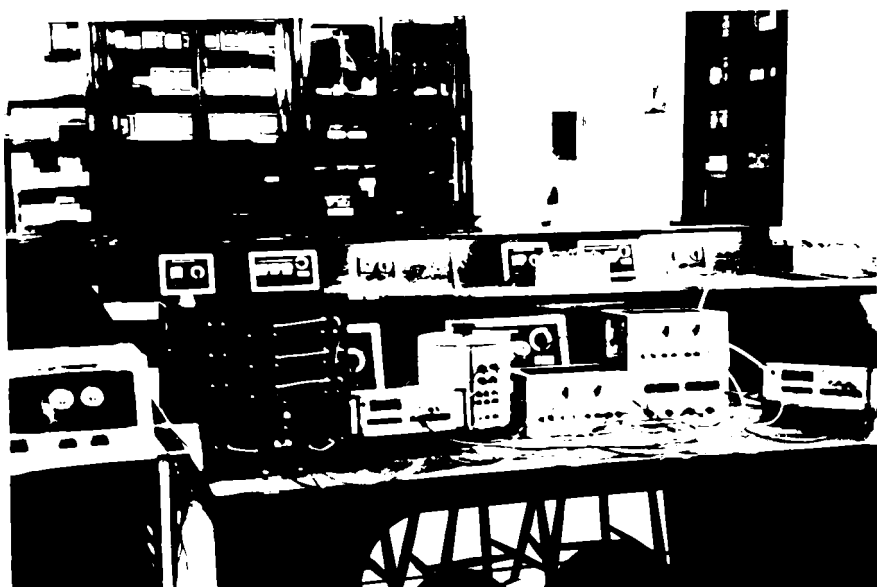


Fig 4 17 Instalația experimentală pentru modelarea efectului Corona

Cap.5 Determinări experimentale

În vederea verificării parametrilor calculați ai modelului proiectat și realizat, s-au efectuat determinări experimentale la 50Hz, cu privire la valoarea rezistenței și inductivității bobinelor octopolului, a regimului de mers în gol (efectul Ferranti), respectiv valoarea impedanței caracteristice și a coeficientului de fază pentru succesiunile directă și omopolară.

5.1. Determinarea parametrilor bobinelor octopolului

Bobinele care modelează parametrii de secvență directă și cele aferente secvenței omopolare, au fost dimensionate și executate pentru modelarea liniilor electrice aeriene de 110-220 KV. Prin practicarea unor prize, pe aceleași bobine s-au obținut inductivitățile necesare modelării parametrilor LEA de 400-750KV. Inductivitatea de secvență directă a LEA 750KV fiind apropiată de cea a liniei de 400KV, s-a adoptat pentru modelul LEA 400-750KV valoarea de 23,65mH , aferentă LEA 400KV.

Măsurătorile pentru determinarea valorilor reale ale inductivității și rezistenței acestor bobine au fost efectuate cu ajutorul unei punți RLC (tip E 0704) și sunt prezentate în tabelul 5.1. În acest tabel sunt deasemenea trecute și valorile inductivităților care au stat la baza proiectării bobinelor, respectiv valoarea rezistenței acestor bobine rezultată din calcul.

Tabelul 5.1.

Tipul liniei		L_1^M [mH]	R_1^M [Ω]	L_1 [mH]	R_1 [Ω]
LEA 110-220kV	Valori de calcul	35,5	0,65	25,34	0,768
	Valori măsurate	36,5	0,68	24,8	0,74
LEA 400-750kV	Valori de calcul	23,65	0,531	20,95	0,692
	Valori măsurate	24,2	0,55	20,4	0,65

Valorile măsurate pentru inductivitățile și rezistențele bobinelor prezentate în tabel corespund mediei aritmetice a valorilor rezultate pentru măsurători efectuate asupra fiecărui octopol. Din compararea datelor de calcul și cele determinate prin măsurătorile efectuate asupra bobinelor care modelează parametrii de secvență directă ai LEA 110-220KV și 400-750KV, rezultă diferențe nesemnificative între datele de calcul și cele reale, validând astfel concepția și execuția acestor bobine. O situație similară se observă și în cazul datelor aferente bobinelor care

modelează parametrii de secvență omopolară ai LEA 110-220KV și LEA 400-750KV. În consecință, bobinele executate pentru octopoul care modelează 25km de linie corespund scopului propus.

5.2. Regimul de meis în gol

Creșterea tensiunii pe liniile ce funcționează în gol, este determinată de curentul capacitiv (natural) absorbit de linie pe reactanțele inductive ale liniei. În cazul liniilor foarte lungi creșterea tensiunii, teoretic, este foarte mare dar existența pierderilor longitudinale și transversale limitează mult această creștere.

Determinarea creșterilor de tensiune pe modelul liniilor electrice aeriene s-a efectuat pe lanțul de octopoli înseriați, la ieșirea fiecărui octopol al lanțului. Pentru măsurare s-au utilizat instrumente de tip multimetru numeric (E-0304). Tensiunea de fază aplicată la intrarea modelului a fost de 30V iar tensiunea de linie de 51,96V. Rezultatele aferente măsurătorilor pe lanțul de octopoli, pentru liniile de 110-220KV, cu $R_1^M=2,5\Omega$, $L_1^M=35,5mH$, $C_1^M=0,224\mu F$ sunt cuprinse în tabelul 5.2.

Tabelul 5.2.

Nr. octopoli	Tensiunea de fază			Tensiunea înălțuită			k	U_2^M [V]
	U_R^M [V]	U_S^M [V]	U_T^M [V]	U_{RS}^M [V]	U_{RT}^M [V]	U_{ST}^M [V]		
1	30,05	30,1	30,05	52,1	52,05	52,05	1,0004	51,98
2	30,15	30,15	30,1	52,15	52,15	52,1	1,0016	52,04
3	30,2	30,2	30,15	52,25	52,2	52,2	1,0035	52,14
4	30,25	30,3	30,3	52,4	52,4	52,5	1,0063	52,29
5	30,35	30,35	30,4	52,55	52,6	52,6	1,0099	52,47
6	30,4	30,45	30,45	52,7	52,7	52,75	1,0143	52,7
7	30,5	30,55	30,55	52,85	52,9	52,9	1,0196	52,98
8	30,6	30,6	30,65	53	53,1	53,1	1,0256	53,29
9	30,8	30,85	30,8	53,4	53,35	53,4	1,0326	53,65
10	31,1	31,1	31,15	53,9	53,9	53,95	1,0406	54,06
11	31,4	31,45	31,4	54,45	54,4	54,5	1,0494	54,53
12	31,75	31,8	31,75	55,05	55	55,1	1,0593	55,04
13	32,25	32,3	32,3	55,9	55,9	55,95	1,0702	55,6
14	32,5	32,6	32,65	56,4	56,45	56,5	1,0821	56,22
15	32,85	32,8	32,9	56,85	56,94	56,89	1,0953	56,9

Similar, la același nivel al tensiunii de alimentare, s-au efectuat măsurători pe lanțul de 15 octopoli înseriați care modelează liniile electrice de 400-750KV. Un octopol modelaează 25km de linie, având $R_1^M=0,8\Omega$, $L_1^M=23,65$ și $C_1^M=0,32\mu F$. Rezultatele sunt cuprinse în tabelul 5.3.

Tabelul 5.3.

Nr. octopoli	Tensiunea de fază			Tensiunea înălțuită			k	$U_2^M[V]$
	$U_R^M [V]$	$U_S^M [V]$	$U_T^M [V]$	$U_{RS}^M[V]$	$U_{RT}^M[V]$	$U_{ST}^M[V]$		
1	30.1	30.05	30.05	52.1	52.1	52.05	1.0004	51.98
2	30.15	30.1	30.15	52.15	52.2	52.1	1.0015	52.04
3	30.2	30.2	30.2	52.3	52.35	52.25	1.0033	52.13
4	30.25	30.3	30.25	52.45	52.4	52.4	1.0056	52.27
5	30.35	30.35	30.3	52.6	52.5	52.5	1.0094	52.46
6	30.45	30.4	30.4	52.7	52.65	52.65	1.0135	52.66
7	30.55	30.5	30.55	52.85	52.9	52.9	1.0184	52.92
8	30.8	30.75	30.75	53.3	53.25	53.25	1.0243	53.22
9	30.9	30.9	30.85	53.5	53.5	53.45	1.0308	53.56
10	31.1	31	31	53.85	53.9	53.7	1.0383	53.95
11	31.25	31.25	31.2	54.15	54.1	54.1	1.0467	54.39
12	31.65	31.6	31.6	54.8	54.9	54.7	1.05597	54.86
13	31.95	31.95	31.9	55.35	55.3	55.3	1.0661	55.39
14	32.3	32.25	32.25	55.9	55.95	55.85	1.07735	55.98
15	32.7	32.6	32.65	56.55	56.6	56.5	1.0898	56.62

În tabelele 5.2 și 5.3 au fost trecute pe lângă valorile măsurate pentru tensiunile de fază ale modelului respectiv cele înălțuite și valoarea tensiunii înălțuite la capătul liniei original, transpusă la scara modelului (U_2^M) precum și coeficientul de supratensiune (k).

Pentru calculul coeficientului de supratensiune (k) al liniei electrice la funcționare în gol se poate utiliza formula [48] :

$$k = \frac{1}{\cos \alpha l + j \beta l \sin \alpha l} \quad (5.1)$$

unde - α - coeficient de fază [rad/100km]

- β - coeficient de atenuare [1/100km]

- l - lungimea liniei [km]

Valorile coeficienților α și β au fost determinate cu relațiile :

$$\alpha = \omega \sqrt{L_{1(0)} C_{1(0)}} \quad ; \quad \beta = \frac{R_{1(0)}}{2Z_c}$$

Valoarea produsului βl fiind mult mai mică decât unitatea, în cazul lungimii de linie (l) modelată cu cei 15 octopoli, s-a calculat valoarea coeficientului de supratensiune (k) cu formula:

$$K = \frac{1}{\cos \alpha l}$$

Din compararea măsurătorilor efectuate și prezentate în tabelele 5.2 și 5.3 cu valorile calculate, rezultă diferențe acceptabile între tensiunile măsurate pe model și tensiunile înlănțuite calculate (U_2^M).

Creșterea tensiunii, la regimul de funcționare în gol a liniilor electrice aeriene, a fost simulată și pe modelele aferente acestora și oscilografiată prin intermediul sistemului de achiziție NI-DAQ cu prelucrare pe calculator PC 486. Astfel, în figura 5.1 este prezentată oscilograma tensiunii la intrarea lanțului de octopoli care modelează LEA 110-220KV iar în figura 5.2 oscilograma tensiunii la sfârșitul acestui lanț.

Similar au fost oscilografiate tensiunile de intrare pe lanțul de octopoli care modelează LEA 400-750KV (figura 5.3), respectiv de ieșire în figura 5.4.

Din analiza oscilogramelor tensiunilor de intrare și de ieșire pe lanțul de octopoli, rezultă o simulare acceptabilă a creșterilor de tensiune pe liniile originale la regimul de funcționare în gol. Deasemenea este de observat că modelul practic nu introduce deformări în alura sinusoidelor tensiunii, analiza armonică Fourier indicând drept armonică fundamentală valoarea de 50Hz.

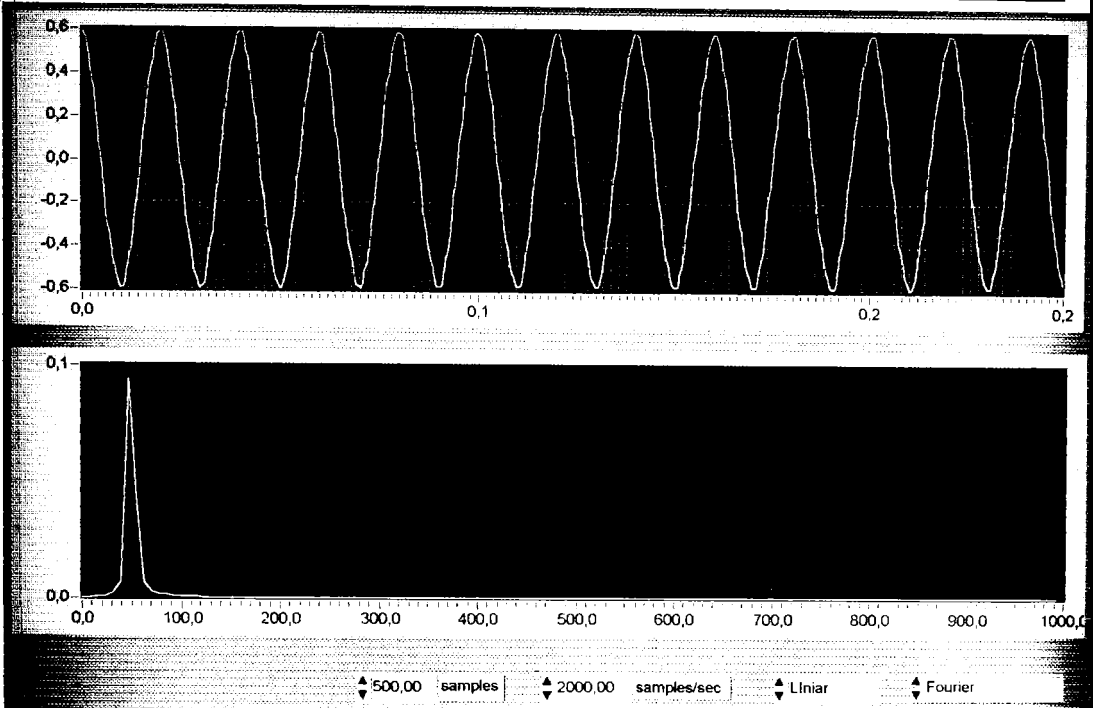


Fig 5.1. Oscilograma tensiunii la începutul modelului LEA 110-220KV

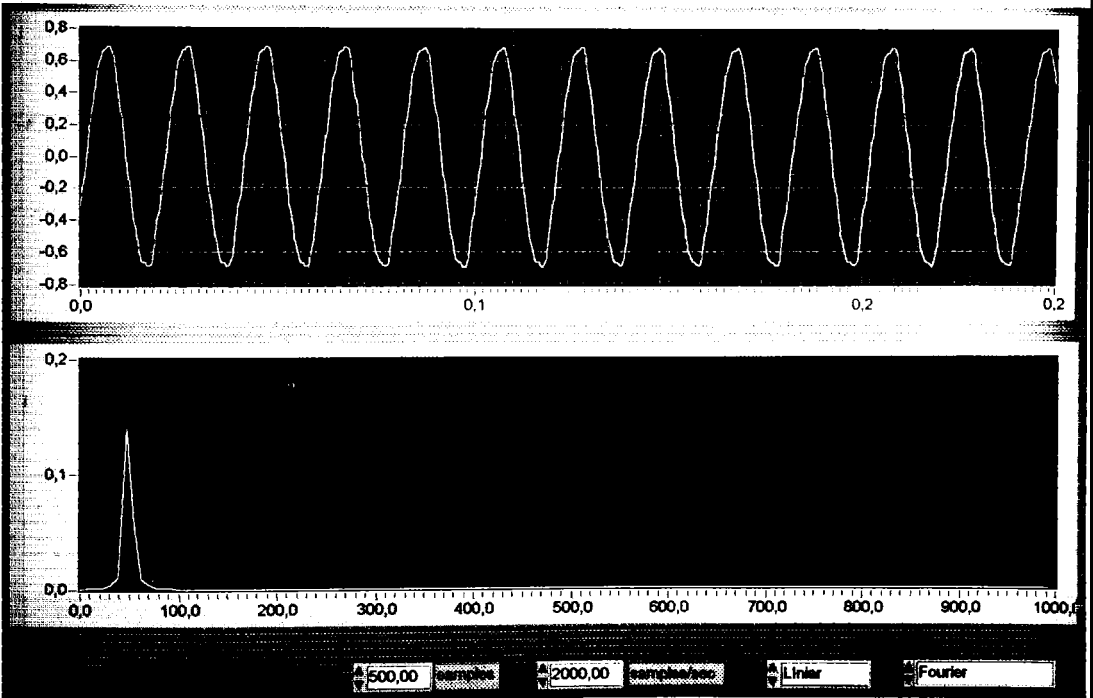


Fig.5.2. Oscilograma tensiunii la sfârșitul modelului LEA 110-220KV

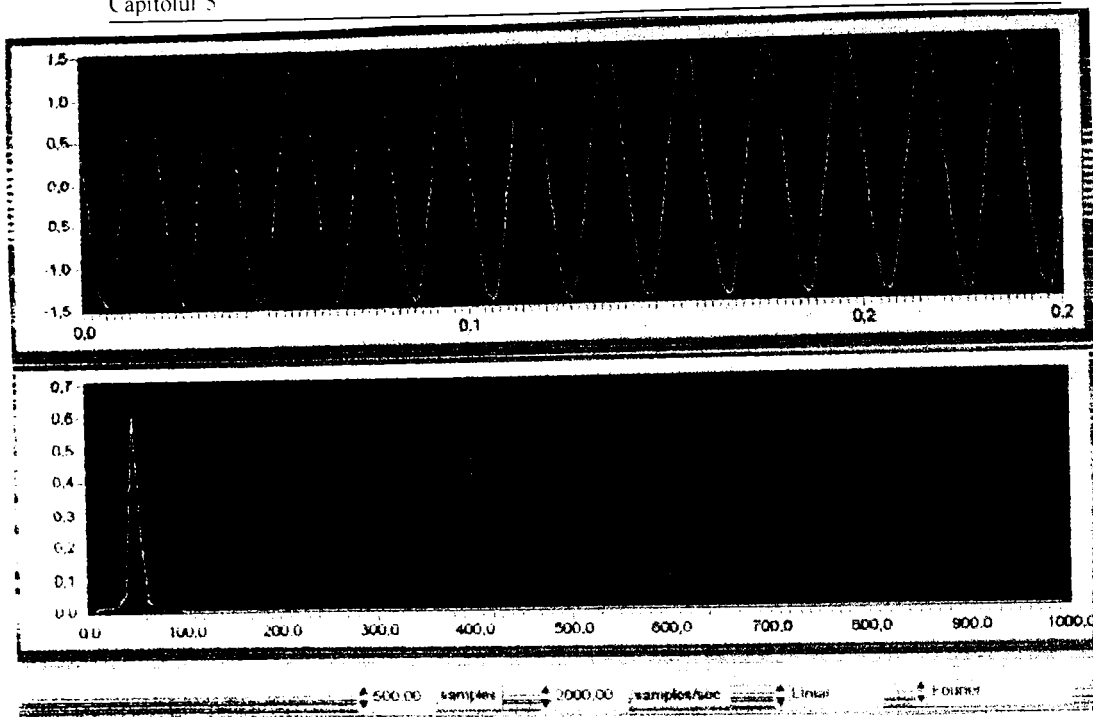


Fig.5.3. Oscilograma tensiunii la începutul modelului LEA 400-750KV

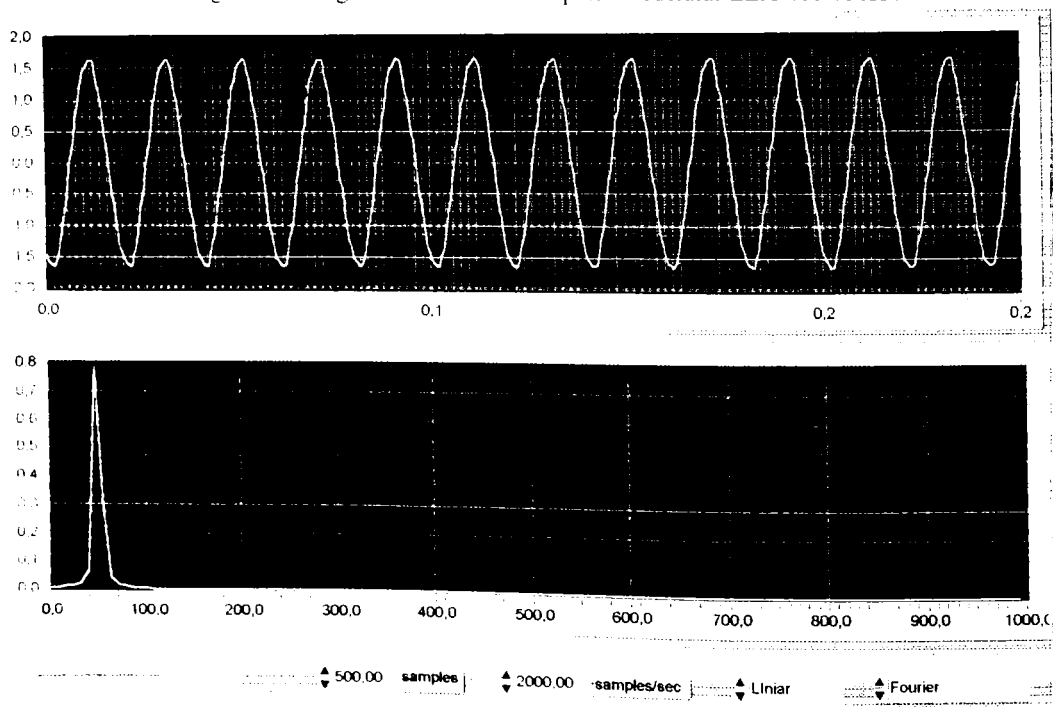


Fig.5.4. Oscilograma tensiunii la sfârșitul modelului LEA 400-750KV

5.3. Determinarea parametrilor modelului

Impedanța de secvență directă și de secvență omopolară se calculează cu ajutorul relației:

$$Z_c = \frac{U}{\sqrt{I_{gol} I_{sc}}} \quad (5.2)$$

- unde:
- U - tensiunea aplicată modelului [V]
 - I_{gol} - curentul la funcționarea în gol a modelului [A]
 - I_{sc} - curentul la funcționarea în scurtcircuit a modelului [A]

Schemele aferente măsurării curenților la funcționarea în gol sau în scurtcircuit, pe baza cărora se determină impedanța de secvență directă a modelului, sunt prezentate în figurile 5.5 și

5.6.

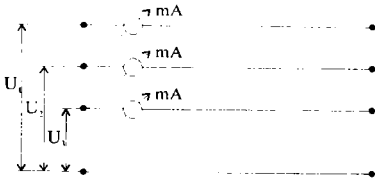


Fig.5.5. Schema pentru măsurarea I_{gol} la secvența directă

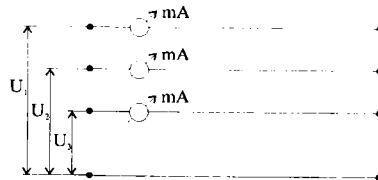


Fig.5.6. Schema pentru măsurarea I_{sc} la secvența directă

Măsurarea curenților la funcționarea în gol și în scurtcircuit, necesari determinării impedanței de secvență omopolară a modelului, s-a efectuat utilizând schemele prezentate în figurile 5.7 și 5.8.

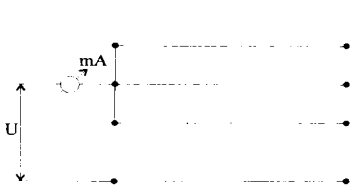


Fig.5.7. Schema pentru măsurarea I_{gol} la secvența omopolară

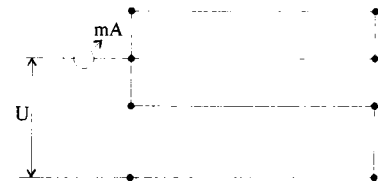


Fig.5.8. Schema pentru măsurarea I_{sc} la secvența omopolară

Valoarea unghiului $(\alpha l)^\circ$, atât pentru secvența directă cât și pentru secvența omopolară, s-a calculat cu formula :

$$tg(\alpha l)^\circ = \sqrt{\frac{I_{gol}}{I_{sc}}} \quad (5.3)$$

5.3.1 Determinarea impedanței de secvență directă a modelului

Rezultatele obținute din măsurătorile pentru determinarea impedanței de secvență directă aferente modelului LEA 110-220KV, pentru un număr de 5 octopoli înseriați, cât și valorile calculate ale acesteia, ale unghiului (α)^o, α [°/km] și lungimile l [km] sunt sintetizate în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4.

Nr. octopoli	U [V]	I_{got} [mA]	I_{sc} [mA]	Z_c [Ω]	αl [°]	α [°/km]	l [km]
5	20	7.2	350	398.4	8.16	0,0653	127,1
		7.15	355	397	8.08	0,0646	125,9
		7.2	355	395.6	8,105	0,0648	126,2
10	20	14.4	180	392.8	15.79	0,0632	246
		14.4	175	398.4	16.0	0,064	249,2
		14.3	180	394.2	15,74	0,063	245,1
15	20	22.1	115	396.7	23.67	0,0631	368,7
		22.15	115	396.2	23,7	0,0632	369,2
		22.2	115	395.8	23,72	0,0633	369,5

Determinarea lungimii de linie modelată (l) s-a efectuat cu o valoare $\alpha = 0,0642$ [°/km] calculată pe baza valorilor parametrilor liniei modelate, prezentați la subcapitolul 5.1.

Din analiza valorilor rezultate pentru impedanța caracteristică (Z_c), a constantei de fază (α) și a lungimii de linie modelată (l), comparativ cu valorile aferente liniei original, rezultă diferențe acceptabile, probând astfel validitatea modelului pentru LEA analizată.

În cazul modelului LEA 400-750KV, valorile curenților I_{got} și I_{sc} obținute prin măsurători, respectiv cele calculate pentru Z_c și (αl)^o sunt prezentate în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5.

Nr. octopoli	U [V]	I_{got} [mA]	I_{sc} [mA]	Z_c [Ω]	αl [°]	α [°/km]	l [km]
5	10	5.15	255	275.9	8.09	0,0647	129,4
		5.2	260	271.9	8,05	0,0644	128,8
		5.15	255	275.9	8,09	0,0647	129,4
10	20	21.2	250	274.7	16.24	0,065	259,8
		21.1	255	272.7	16,05	0,0642	256,8
		21.1	250	275.4	16,2	0,0648	259,2
15	20	33.4	165	269.4	24.22	0,0646	387,5
		33.5	170	273.2	23,94	0,0638	383
		33.4	165	269.4	24,22	0,0646	387,5

Lungimile de linie modelate (l) au fost calculate cu coeficientul de fază $\alpha = 0,0625$ [°/km], cât rezultă din parametrii liniei original modelate și prezentate în subcapitolul 5.1., pentru LEA

400-750KV.

Compararea valorilor rezultate pe baza experimentărilor efectuate pentru impedanța caracteristică de secvență directă, coeficientul de fază și lungimea de linie modelată, cu cele aferente liniei original pun în evidență o bună concordanță pentru un lanț de 5, 10 respectiv 15 octopoli. În cazul măsurătorilor efectuate pe 5 octopoli s-a aplicat o tensiune de 10V pentru a se evita apariția unor valori ale curenților prin bobină, care ar intra în domeniul de saturație al miezului.

Impedanțele caracteristice de secvență directă (Z_c) se înscriu în valorile limită pentru care s-au ridicat curbele $I_{\max} / I_{\text{nom}}$ și $I_{\text{sat}} / I_{\text{nom}}$, atât pentru LEA 110-220kV (350-400 Ω) cât și pentru LEA 400-750kV (250-300 Ω).

5.3.2. Determinarea impedanței de secvență omopolară a modelului

Experimentările pe modelul liniilor de 110-220KV pentru determinarea impedanței de secvență omopolară (Z_c) a modelului au condus la rezultatele sintetizate în tabelul 5.6.

Tabelul 5.6.

Nr. octopoli	U_f [V]	I_{get} [mA]	I_{sc} [mA]	Z_c [Ω]	αl [$^\circ$]	α [$^\circ$ /km]	l [km]
5	15	10,3	255	878,1	11,36	0,0909	123,5
10	30	42,8	245	878,9	22,68	0,0907	247,6
15	30	69,8	150	879,6	34,3	0,0915	374,5

Rezultatele măsurătorilor efectuate pentru cele trei lungimi de linie modelate cu 5, 10 și 15 octopoli, cuprinse în tabelul 5.6., pun în evidență faptul că impedanța caracteristică de secvență omopolară este apropiată de cea calculată (876,9 Ω) cu valorile parametrilor liniei original ($L_{(0)}=4,46$ mH/km, $C_{(0)}=5800$ pF/km). Se constată deasemeni că valoarea impedanței caracteristice de secvență omopolară (Z_c) determinată experimental pe model se înscrie în limitele de valori date de literatura de specialitate [45] pentru LEA 110-220KV (833-880 Ω). Lungimea de linie modelată (l) s-a determinat cu valoarea coeficientului de fază $\alpha = 0,0916$ [$^\circ$ /km], rezultată din calcul pe baza parametrilor liniei original modelate.

În cazul măsurătorilor efectuate pe grupa de 5 octopoli înserați s-a ales pentru tensiunea de alimentare valoarea de 15V. Această opțiune a fost determinată de necesitatea înscrierii valorilor curenților de scurtcircuit sub valoarea curenului de saturație al bobinei.

În cazul modelului liniilor de 400-750KV, rezultatele experimentale și valorile calculate pentru impedanța de secvență omopolară, unghiul α pentru porțiunea de linie raportat la 1km de linie și lungimea liniei l sunt prezentate în tabelul 5.7.

Tabelul 5.7.

Nr. octopoli	U_f [V]	I_{rot} [mA]	I_{sc} [mA]	Z_c [Ω]	αl [$^\circ$]	α [$^\circ/\text{km}$]	l [km]
5	15	14	325	667.1	11.73	0.0938	124.9
10	20	39.3	210	660.5	23.39	0.0936	249.1
15	20	62.9	130	663.5	34.82	0.0928	370.8

Experimentările pentru modelul liniilor electrice de 400-750KV s-au efectuat pentru LEA 400KV cu $R_{\alpha(0)}=0,18\Omega/\text{km}$, $L_{\alpha(0)}=3,46\text{mH}/\text{km}$, $C_{\alpha(0)}=7870\text{pF}/\text{km}$, a cărui coeficient de fază calculat este $\alpha=0,0939$ [$^\circ/\text{km}$]. Pentru cele trei grupe de octopoli care modelează porțiuni de linie de 125, 250 și 375km, măsurătorile efectuate și valorile rezultate pentru impedanța de secvență omopolară a modelului conduc la concluzia că modelul este corespunzător scopului propus. Valoarea impedanței caracteristice de secvență omopolară determinată pe baza măsurătorilor se înscrie în valorile limită date de literatura de specialitate [48], care prevede pentru LEA 400KV valori cuprinse între 630Ω și 695Ω .

Valorile parametrului Z_c determinate pe cale experimentală se abat în mod acceptabil de la valoarea impedanței caracteristice de secvență omopolară a liniei ($663,1\Omega$) calculată pornind de la parametrii liniei original modelate. Abateri nesemnificative au rezultat și pentru lungimile de porțiuni de linie modelate comparativ cu cele rezultate din determinările experimentale. Pentru grupul de octopoli care modelează 125km de linie s-a ales tensiunea de alimentare de 15V în vederea evitării apariției curenților de saturație în bobină, așa cum de altfel s-a procedat și în cazul modelului LEA110-220KV.

5.4.Descrierea instalației pentru modelarea LEA 110-220KV și LEA 400-750KV

Cei 15 octopoli construiți pentru modelarea diferitelor tipuri de LEA 110-220KV și 400-750KV sunt asamblați într-o instalație compactă astfel organizată încât să permită modelarea diferitelor lungimi de linie.

Conexiunile pentru simularea unei anumite porțiuni și tip de LEA se realizează cu ajutorul unor cordoane de legătură prevăzute cu fișe la ambele capete. În fiecare octopol sunt practicate

practicare jacuri de legătură (figura 5.9) la care sunt conectate elementele R, L, C ale modelului. Unele din aceste jacuri sunt utilizate pentru racordarea în lanț a numărului de octopoli necesari modelării porțiunii de linie studiate. Instalația experimentală destinată modelării LEA este prezentată în figura 5.10.

Sursa de alimentare a lanțului de octopoli a constat dintr-un autotransformator trifazat reglabil în domeniul 0-500V.

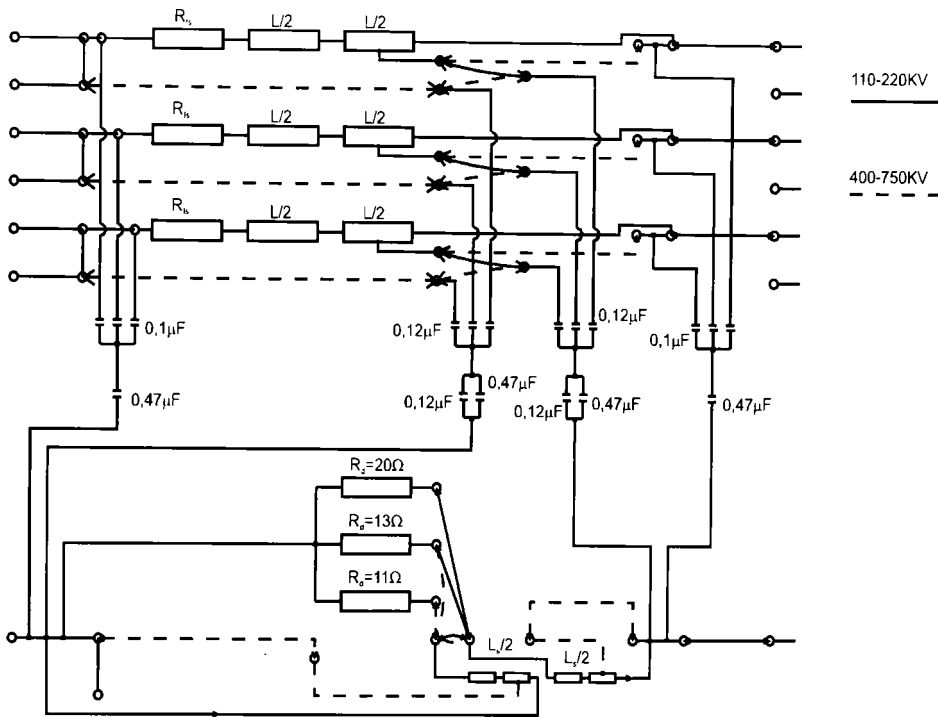


Fig. 5.9. Schema generală a octopolului



Fig. 5.10. Instalația experimentală pentru modelarea LEA

Cap.6. Concluzii

Modelarea fizică a rețelelor electrice de înaltă tensiune, rămâne în continuare una din posibilitățile de studiu ale supratensiunilor, permițând ca alături de modelarea matematică și utilizarea calculatoarelor, să conducă la cunoașterea intimă a proceselor care le condiționează. În același timp modelul fizic oferă avantajul legăturii strânse cu experimentatorul, putând substitui într-o anumită măsură experimentările directe în rețea.

În acest context, teza de doctorat își propune elaborarea metodologiei de proiectare și realizare practică a modelului fizic al LEA, pentru clasele de tensiune de 110-220KV, 400KV și 750KV, cu luarea în considerare a caracteristicilor de frecvență ale parametrilor electrici, respectiv a influenței efectului Corona, pornind de la o sumă de elemente cunoscute și rezolvate de literatura de specialitate, referitoare la aceste probleme.

În aceste condiții, în primul capitol se prezintă pe baza unei sinteze corespunzătoare a datelor din literatură, cele două variante posibile de modelare a liniei, considerată simetrică, respectiv nesimetrică.

În primul caz multipolul care modelează o porțiune de linie se poate reprezenta ca un octopol cu patru circuite, primele trei conținând parametrii de succesiune directă ai conductoarelor de fază, iar ultimul pentru conductorul echivalent de întoarcere, impedența rezultată este identică cu cea mutuală. În acest fel modelul liniei se poate prezenta ca o schemă în care se renunță la transformatoare de cuplare. Schemele pentru linia considerată simetrică pot fi realizate : cu 8 condensatoare respectiv cu 12 condensatoare.

În cel de al doilea caz luarea în considerare a nesimetriei liniei condce la două scheme de reprezentare a octopolului. Prima din acestea are în componență pentru inductivitățile de secvență directă valori diferite, iar cea de a doua valori egale pe fază pentru acești parametri. Ambele scheme necesită utilizarea unor transformatoare de cuplare cu dispersie mică.

Pe baza analizei efectuate și luând în considerare dificultățile de ordin tehnologic privind realizarea practică a unor transformatoare de cuplaj cu miez magnetic, care să prezinte caracteristici identice pentru fiecare octopol, s-a adoptat pentru realizarea modelului liniei electrice aeriene, un model simetric, model ce asigură o bună similitudine a proceselor cu cele din original.

Capitolul al doilea se referă la calculul impedanțelor longitudinală și transversală ale liniilor electrice aeriene. Metoda de calcul a elementelor impedenței longitudinale se bazează pe simplificările cunoscute adoptate de Carson. Pornind de la aceste simplificări, s-au adoptat formule operante de calcul, care au stat la baza programului de calcul (PARAMRLC) elaborat

de autor. Dependența de frecvență a matricei impedanței longitudinale s-a considerat numai în cazul rezistenței de secvență directă și omopolară, respectiv a inductivității de secvență omopolară a liniei. Inductivitatea de secvență directă, redusă ca valoare și cu variație nesemnificativă funcție de frecvență, s-a considerat constantă. Componentele matricii impedanței transversale a liniei au fost calculate pornind de la ecuațiile lui Maxwell. Formulele adoptate pentru calculul capacităților de secvență directă și omopolară a liniei, pun în evidență independența de frecvență a acestor parametri. Calculul capacităților a fost deasemenea cuprins în programul PARAMRLC, aplicație scrisă în limbaj Visual Basic 3.0., aptă atât pentru calculul valorilor parametrilor liniei, cât și pentru trasarea graficelor acestora.

Valorile parametrilor de secvență directă și omopolară calculate pentru unele linii electrice aeriene se înscriu în general în limitele date de literatura de specialitate, validând astfel programul de calcul propus.

Studiul frecvenței oscilațiilor care apar în procesele de comutație sau avarie, relativ puțin tratate în literatura de specialitate, a fost analizat detaliat de către autor. Această analiză s-a impus și ca urmare a studiului pe model a proceselor care apar în linie, deformate de model, mai ales în partea superioară a spectrului oscilațiilor. Întrucât la alegerea parametrilor multipolilor, se necesită satisfacerea criteriilor de similitudine pentru toate frecvențele de interes, s-a studiat în detaliu domeniul în care se înscriu aceste frecvențe. Pentru aprecierea domeniului frecvențelor care caracterizează procesele tranzitorii ce însoțesc oscilațiile de comutație s-a pornit de la expresia transformatei Laplace a tensiunii.

Pentru determinarea soluțiilor ecuației Laplace s-au elaborat programe de calcul. S-a utilizat metoda înjumătățirii intervalului care permite obținerea preciziei impuse, preferată altor metode deoarece nu se impun condiții de margine asupra funcției sau derivatei sale, ca în cazul metodei iterative (condiții care nu sunt îndeplinite de aceste funcții), respectiv nu se impune existența derivatelor și nici ca funcția să-și păstreze concavitatea în jurul soluției, cum este cazul metodei tangentei sau cea iterativă.

Singura cerință ce se impune funcției este ca să aibe proprietatea lui Darboux, care în cazul dat este îndeplinită, funcția în cauză fiind continuă. Argumentul invocat în literatura de specialitate privind slaba convergență a metodei aplicate îl apreciem ca fiind nerelevant în acest caz, având în vedere că pentru determinarea rădăcinilor ecuației, cu condiția obținerii unei precizii de 10^{-10} - calculatorul efectuează 35 de iterații. Numărul mai mic de iterații necesar în cazul celorlalte metode este contrabalansat de complexitatea sporită a calculelor la fiecare iterație, generate de evaluarea derivatelor, respectiv caracterul mai complicat al formulelor de calcul.

Intervalele între care au fost determinate rădăcinile ecuației Laplace sunt de forma $(k-1+10^{-10})\pi$, $(k-10^{-10})\pi$. Nu s-a adoptat o precizie mai mare deoarece nu este necesară, evitându-se totodată apropierea prea mare a intervalului de valoare, care ar conduce la mesaje de eroare.

Analiza domeniului de interes al frecvenței oscilațiilor s-a efectuat pentru următoarele trei categorii de sisteme și tensiuni :

- sisteme puternice ($Z_0=0$) la care se racordează LEA de tensiuni foarte înalte compensate ($Z_2 \neq 0$) ;
- sisteme relativ puternice ($Z_0 \neq 0$), alimentând LEA de tensiuni ridicate compensate ($Z_2 \neq 0$) ;
- sisteme slabe ($Z_0 \neq 0$) alimentând LEA fără compensare ($Z_2 = \infty$) de tensiune sub 220KV.

Din analiza atentă a spectrului frecvenței oscilațiilor libere datorate comutației, rezultă faptul că în condițiile modelării fizice a liniei, domeniul de frecvență care trebuie luat în considerare se impune a fi extins față de cel indicat în literatură și prezentat în lucrare, constatându-se că valoarea armonicii de ordinul cinci depășește 4000Hz, sau în valori raportate la frecvența industrială $f_3 \approx 80$. Se observă deasemenea că extinderea domeniului de frecvență ce trebuie luat în considerare, se necesită a fi diferențiat în funcție de lungimea liniei și tensiunea acesteia. Astfel, pentru LEA 110-220KV domeniul de interes se impune a fi extins la 4000Hz, în cazul LEA 400KV extinderea domeniului de analiză este suficient a fi efectuată până la 2000Hz iar pentru LEA 750KV la 1000Hz.

Pe baza acestor observații și utilizând programul de calcul PARAMRLC au fost determinate valorile parametrilor de secvență directă și omopolară funcție de frecvență, în limitele domeniului menționat. Comparând valorile cu cele rezultate din măsurătorile efectuate pe o linie de 500KV, se constată că acestea sunt cuprinse între limitele maxime și minime ale familiilor de curbe aferente LEA 400KV respectiv 750KV.

Contribuțiile autoarei care pot fi desprinse din conținutul acestui capitol, constau în :

- prezentarea dependenței de frecvență a parametrilor LEA, sub forma unui domeniu de valori, în funcție de caracteristicile constructive ale acestora, pentru nivelele de tensiune de 110-220KV respectiv 400 și 750KV ;
- adoptarea pentru modelarea caracteristicilor de frecvență ale parametrilor de secvență directă și omopolară, a unei curbe medii, situate în interiorul domeniului, pentru fiecare nivel de tensiune menționat, aleasă astfel încât să se apropie în cât mai mare măsură de rezultatele unor determinări experimentale (acolo unde acestea există) ;

- elaborarea unui program propriu de calcul PARAMRLC, pentru determinarea caracteristicilor de frecvență ale parametrilor LEA ;
- stabilirea domeniului de interes al frecvenței oscilațiilor în regim de comutație, pentru cele trei nivele de tensiune, pe baza unor programe proprii de calcul, utilizând metoda înjumătățirii intervalului

În capitolul trei, apreciind că alegerea parametrilor nominali ai modelului reprezintă una din condițiile de bază ale dimensionării acestuia, s-au studiat cu atenție scările de modelare, lungimea liniei modelate de un octopol și tensiunea nominală a modelului.

Pentru scările de modelare a parametrilor liniei (m_r , m_l , m_c) și cea a timpului (m_t) s-a ales din motive cunoscute o valoare egală cu unitatea, rezultând pentru tensiuni și curenți aceeași scară ($m_u = m_i$), alegerea acesteia presupunând luarea în considerare a caracteristicilor miezului magnetic, folosit pentru realizarea bobinelor octopolului. S-a utilizat un miez de ferită tip 3C6 FEROCUBE (de fabricație românească) având lungime medie de 180mm și secțiune de 170mm². Pentru acest miez s-au determinat experimental curbele de magnetizare, la diferite valori ale întrefierului și frecvenței, rezultând pentru permeabilitatea relativă a miezului o valoare practic constantă $\mu_r = 5961$. Deasemeni au fost determinate valorile coeficienților de pierderi ai miezului, necesari pentru determinarea cât mai exactă a rezistenței ohmice a bobinei.

Cu aceste elemente cunoscute alegerea scării tensiunii modelului (m_u) s-a determinat astfel încât să fie evitată saturația miezului magnetic, astfel încât raportul I_{max} / I_{nom} al liniei să fie mai mic decât I_{sat} / I_{nom} al bobinei modelului. Au fost calculate valorile raportului I_{max} / I_{nom} pentru LEA 110-220KV și LEA 400-750KV, funcție de lungimea liniei, considerându-se regimul de scurtcircuit monofazat, determinant din acest punct de vedere și valorile I_{sat} / I_{nom} , acestea din urmă depinzând de tensiunea de alimentare a modelului U^M și de lungimea Δl modelată de un octopol. Pe această bază a rezultat că tensiunea de alimentare a modelului nu poate depăși valoarea de 10V, în regim de scurtcircuit monofazat a modelului, evident această valoare poate fi depășită în cazul studiului altor regimuri de funcționare.

Deoarece între tensiunea de alimentare a modelului U^M și lungimea Δl modelată de un octopol, în baza criteriului enunțat, există o relație directă, pe această bază, simultan cu stabilirea scării pentru tensiune, s-a definitivat și lungimea modelată la valoarea $\Delta l = 25\text{km}$. În aceste condiții, modelul permite transmiterea fără distorsiuni a armonicilor până la cea de ordinul 76, ceea ce este în deplin acord cu rezultatele obținute în capitolul al doilea în ceea ce privește domeniul de interes al frecvenței oscilațiilor.

În aceste condiții cu $\Delta l = 25\text{km}$ și scara impedanțelor $m_z = 1$, s-au determinat valorile

parametrilor de secvență directă și omopolară ai octopolului, pentru $f=50\text{Hz}$, pornind de la parametrii de secvență corespunzători curbelor medii ale domeniului de variație adoptate în capitolul anterior, pentru cele trei nivele de tensiune ; aceste valori corespund practic cu cele ale unei linii de 220KV OI-Al $1 \times 300\text{mm}^2$, respectiv 400KV OI-Al $2 \times 400\text{mm}^2$ și 750KV OI-Al $5 \times 300\text{mm}^2$

Pentru reproducerea pe model a caracteristicilor de frecvență ale parametrilor LEA, se pornește de la faptul că inductivitatea bobinelor este constantă (permeabilitatea miezului nu depinde de frecvență), în timp ce rezistența acestora depinde de frecvență prin intermediul coeficienților de pierderi prin histerezis, postmagnetice și curenți turbionari și de intensitatea câmpului magnetic al bobinei, deci de valoarea curentului care trece prin bobină.

Prin urmare, dacă inductivitatea de secvență directă a modelului și a liniei original coincid, fiind independente de frecvență, caracteristica de frecvență a rezistenței de secvență directă a modelului diferă de cea a originalului, motiv pentru care se impun măsuri de corecție. Soluția adoptată a fost aceea a conectării în serie sau paralel cu bobina a unor rezistențe de valoare fixă, care să conducă la coincidența caracteristicilor modelului cu a originalului, pentru o valoare prestabilită a frecvenței, astfel încât în restul intervalului erorile să fie cât mai mici.

Dacă valoarea rezistenței fixe serie rezultă din diferența rezistenței liniei original și cea a bobinei, pentru o valoare dată a frecvenței și determină o simplă translare a caracteristicilor modelului, pentru schema cu rezistențe fixe paralel, au fost deduse relații de calcul, pentru determinarea valorii acesteia, respectiv pentru ridicarea caracteristicilor de frecvență a rezistenței de secvență directă a modelului. Subliniem că relațiile de calcul obținute evidențiază faptul că și în acest caz inductivitatea de secvență directă a modelului ca și cea a liniei - original este practic independentă de frecvență.

Pentru modelarea caracteristicilor de frecvență ale rezistenței și inductivității de secvență omopolară, impedanța conductorului de nul a modelului este realizată din două semibobine identice, una dintre ele având conectată în paralel o impedanță Z_d astfel aleasă încât să asigure intersecția caracteristicilor linie - model la o frecvență dată și erori cât mai mici în restul intervalului.

În aceste condiții se stabilesc relațiile de calcul pentru Z_d , respectiv componentele R_d și X_d ale acesteia și pentru caracteristicile de frecvență ale rezistenței și inductivității omopolare ale modelului. Relațiile deduse pun în evidență faptul că valoarea reactanței X_d este neglijabilă și practic este suficientă conectarea doar a unei rezistențe R_d .

În afara caracteristicilor de frecvență, au fost calculate și constantele de timp pentru

secvențele directă și omopolară pentru linia original și model, din comparația cărora rezultă o coincidență foarte bună în întreg spectrul de frecvențe.

Principalele contribuții din conținutul acestui capitol sunt următoarele :

- determinarea experimentală a caracteristicilor miezului de ferită, folosit pentru realizarea bobinelor modelului, în domeniul de frecvență 50-700Hz, cu și fără întrefier ;
- elaborarea metodei de determinare a tensiunii de lucru a modelului și implicit a lungimii modelate de un octopol, în condițiile evitării saturației miezului magnetic ;
- stabilirea unor relații de calcul pentru parametrii de corecție ai modelului în vederea reproducerii cât mai fidele a caracteristicilor de frecvență ale originalului ;
- stabilirea relațiilor de calcul pentru determinarea caracteristicilor de frecvență ale modelului ;
- elaborarea unor programe proprii de calcul pentru determinarea parametrilor electrici și constructivi ai modelului, respectiv a caracteristicilor de frecvență ale acestuia.

În capitolul patru al tezei s-a tratat modelarea fizică a fenomenului Corona. Schema de modelare adoptată este cea cunoscută din literatura de specialitate și se bazează pe reproducerea parametrilor liniei coronate $g_{(0)}$ și $\Delta C_{(0)}$ și a pierderilor prin efect Corona, mai exact a dependenței pierderilor de frecvență $P = f_1(f)$ și respectiv de factorul de supratensiune $P = f_2(U_{max}/U_k)$.

Pentru determinarea parametrilor $g_{(0)}$ și $\Delta C_{(0)}$, s-au elaborat două programe de calcul ; pe baza cărora s-a obținut dependența valorilor acestora în funcție de mărimea raportului dintre amplitudinea supratensiunii U_{max} și tensiunea de apariție a efectului Corona U_k pentru un domeniu de frecvență $f=50 \div 250\text{Hz}$ și factor de supratensiune $k=1,25 \div 2$ acoperitoare pentru evidențierea influenței efectului Corona asupra creșterilor de tensiune în regim de rezonanță a liniilor lungi. Calculul pierderilor datorate efectului Corona s-a efectuat deasemeni pe baza unui program de calcul elaborat în acest scop.

În continuare se evidențiază studiul analitic al proceselor care au loc în schema de modelare a efectului Corona, pe baza căruia se determină relația de calcul pentru pierderile de putere în model, relație care evidențiază faptul că acestea sunt determinate în mod hotărâtor de componenta staționară a curentului care se stabilește în schemă în urma conectării acesteia la modelul liniei.

Această creștere este foarte importantă și evidențiază faptul că parametrii schemei trebuie astfel aleși încât blocarea ei să nu se producă la trecerea prin maxim a tensiunii care acționează asupra acesteia, ceea ce practic înseamnă că se impune pentru constanta de timp T a schemei o valoare care să satisfacă această condiție.

Pe baza acestui considerent și a analizei proceselor fizice care au loc în schema de modelare, se ajunge la concluzia că principalii parametri ai schemei sunt constanta de timp a acesteia și raportul capacităților C_{k1} / C_{k2} . Se deduc pe această cale relații de calcul originale, care scot în evidență faptul că produsul fT și respectiv raportul capacităților C_{k1} / C_{k2} variază în limite relativ restrânse, de unde rezultă că influența frecvenței oscilațiilor asupra alegerii raportului C_{k1}/C_{k2} este ne semnificativă.

În aceste condiții valorile lui C_{k1} și R ale schemei, definite de parametrii liniei coronate $g_{(0)}$ și $\Delta C_{(0)}$ (recalculați pentru lungimea Δl modelată de un octopol) pot fi aleși într-o primă etapă corespunzător frecvenței de 50Hz. O asemenea alegere are avantajul foarte important al faptului că permite determinarea experimentală la frecvența industrială a pierderilor în model și compararea lor cu cele determinate pentru linia original, transpuse la scara modelului.

În cazul unor diferențe semnificative se adoptă noi valori pentru capacitățile C_{k1} și C_{k2} , obținute pe baza unei relații evidente, astfel încât valoarea pierderilor în model să coincidă cu cea a liniei original, într-un anumit punct al curbei pierderilor $P=f(U_{max} / U_k)$. Procedeeul se oprește atunci când diferența dintre pierderile calculate analitic și cele determinate experimental, comparate cu cele de pe linia reală (transpuse la scara modelului) devin ne semnificative.

În teză au fost prezentate pe baza acestei metode, calculele parametrilor modelelor pentru simularea efectului Corona în cazul LEA 220KV Ol-Al 300mm² ; LEA 400KV Ol-Al 2x450mm² și LEA 750KV Ol-Al 5x300mm².

Rezultatele consemnate în cadrul acestui capitol permit evidențierea următoarelor contribuții ale autoarei :

- studiul analitic al proceselor fizice care au loc în schema adoptată pentru modelarea efectului Corona ;
- stabilirea unei relații de calcul a pierderilor Corona în model, calculul acestora și validarea lor prin comparare cu cele determinate experimental ;
- stabilirea unor relații de calcul originale care să permită determinarea prealabilă a parametrilor schemei modelului Corona ;
- elaborarea unei metodologii pentru alegerea definitivă a parametrilor modelului în două etape, prin recalcularea acestora pe baza rezultatelor experimentale ;
- elaborarea unor programe de calcul pentru rezolvarea problemelor abordate în cadrul acestui capitol.

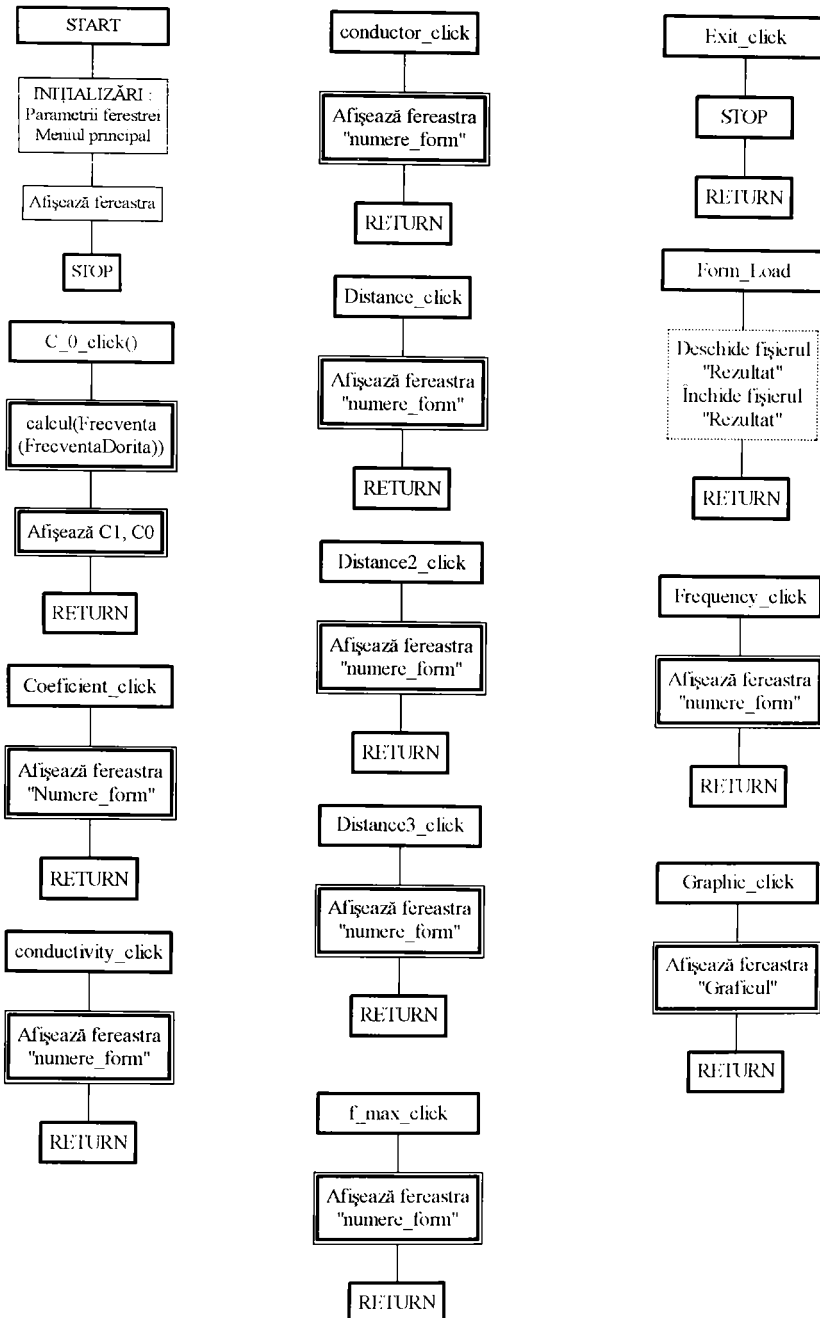
Capitolul cinci al tezei este destinat unor încercări experimentale având drept scop validarea principalilor parametri ai modelului LEA.

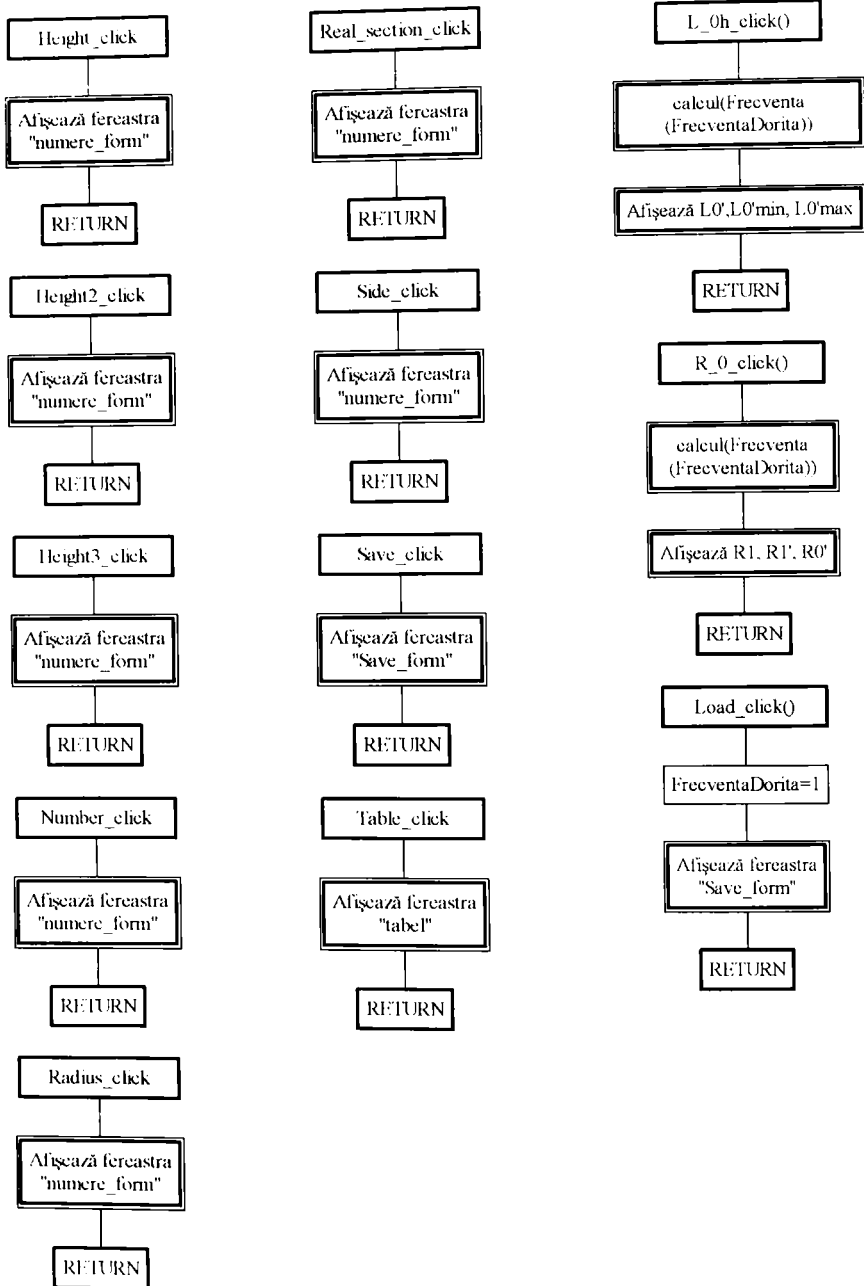
Bobinele care modelează parametrii de secvență directă respectiv omopolară au fost dimensionate și executate pentru modelarea liniilor de 110-220KV. Prin practicarea unor prize, pe aceleași bobine, s-au obținut inductivitățile necesare modelării parametrilor LEA 400-750KV. Din compararea datelor de calcul și cele determinate prin măsurători privind valoarea inductivității bobinelor care modelează parametrii de secvență directă și omopolară rezultă diferențe ne semnificative între elementele constructive ale modelului.

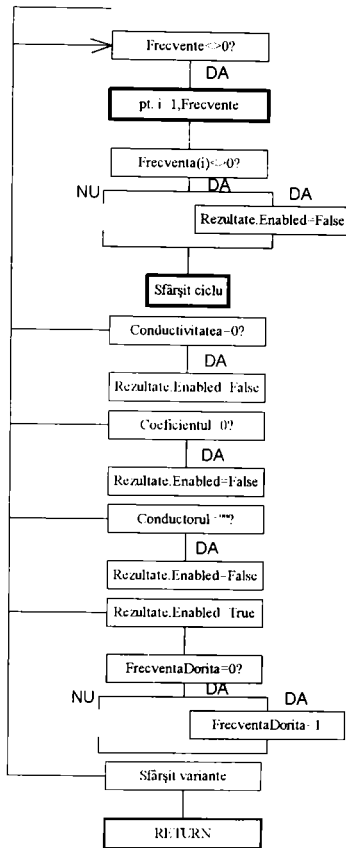
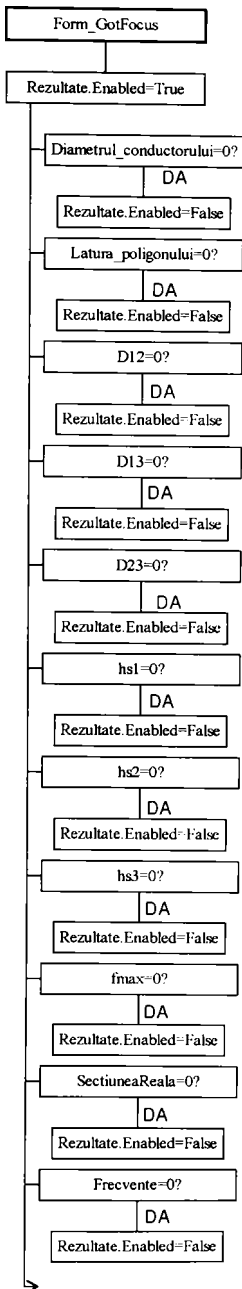
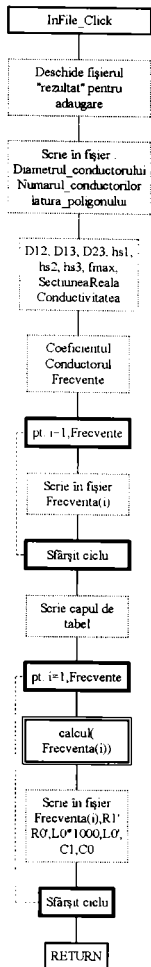
Determinarea creșterii tensiunii ca urmare a efectului Ferranti s-a efectuat prin măsurători la ieșirea fiecărui octopol din lanț, utilizând instrumente de tip multimetru numeric (E-0304) și oscilografiera tensiunii de intrare și de ieșire din lanțul de octopoli cu ajutorul unui sistem de achiziție NI-DAQ cuplat cu un calculator PC 486. Atât la modelul aferent LEA 110-220KV, cât și la cel al LEA 400-750KV, creșterile de tensiune concordă cu cele calculate. Un rezultat semnificativ al acestor determinări, constă în faptul că nu apar armonici în curba tensiunii, care ar fi putut fi determinate de imperfecțiuni constructive, respectiv prezența miezului magnetic.

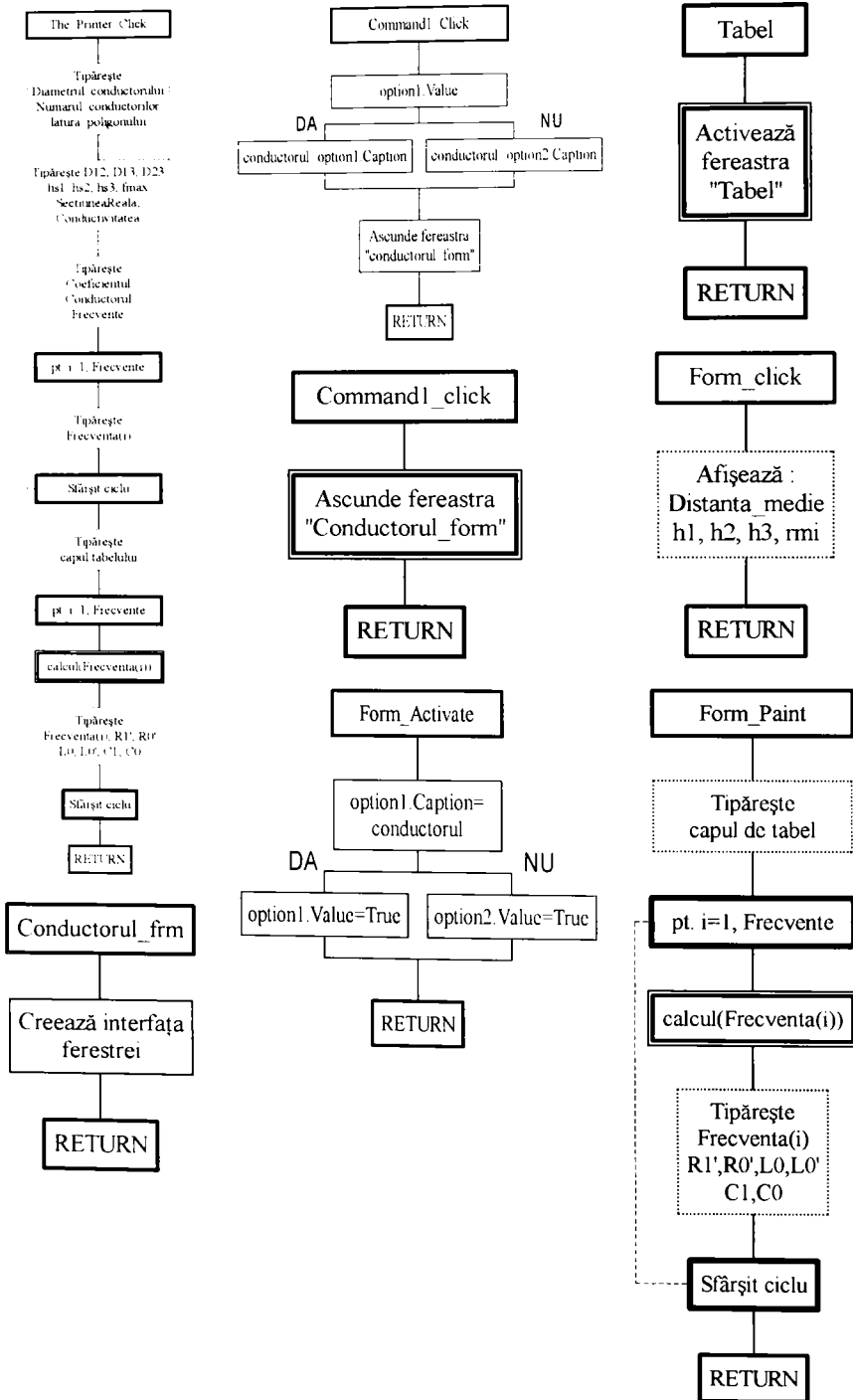
S-au determinat pe cale experimentală, impedanțele de secvență directă, omopolară și coeficientul α pentru LEA 110-220KV și LEA 400-750KV, rezultând valori care se înscriu în limitele minime și maxime ale liniilor reale.

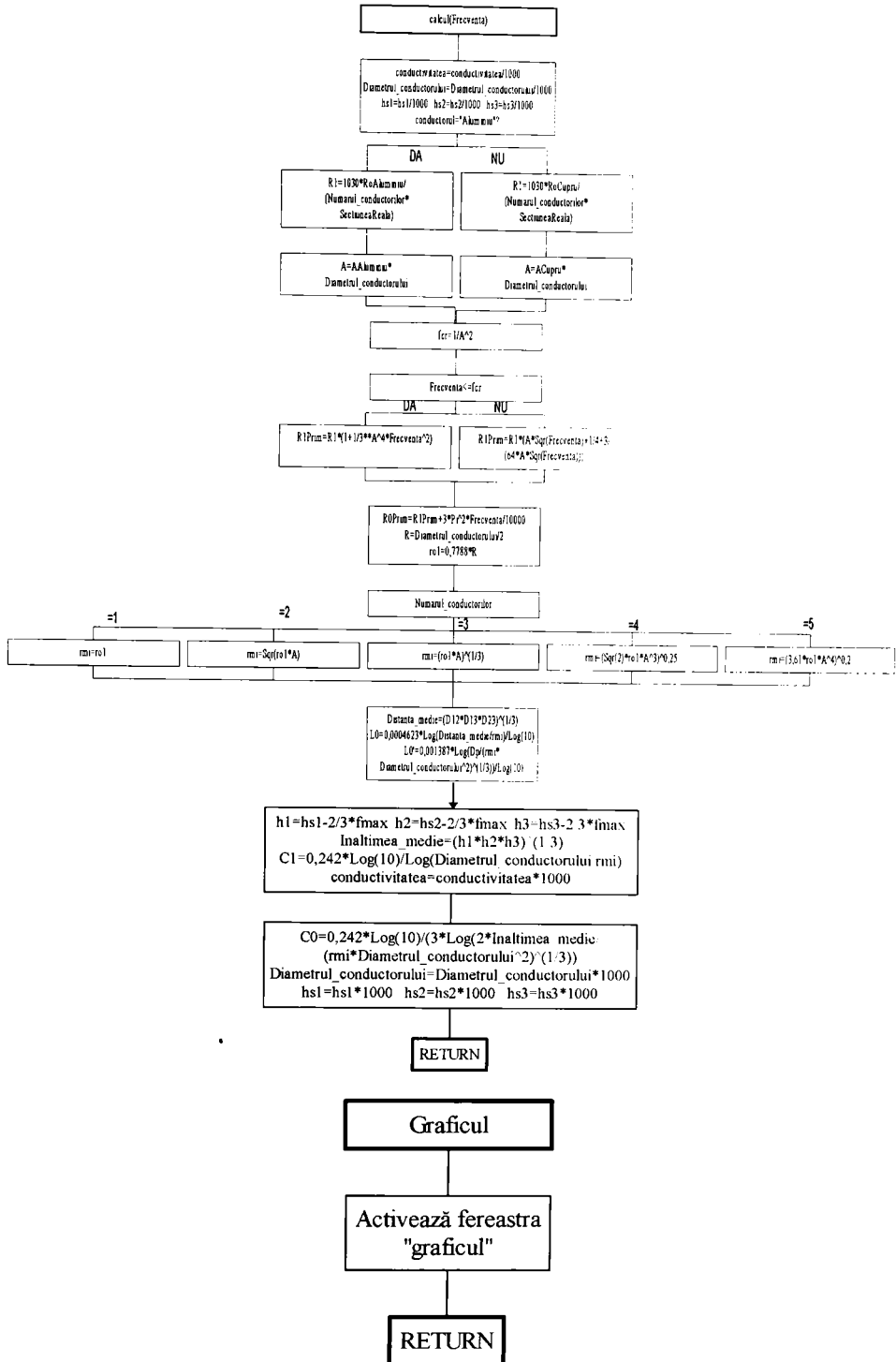
Ordinograma programului PARAMRLC pentru calculul parametrilor LEA

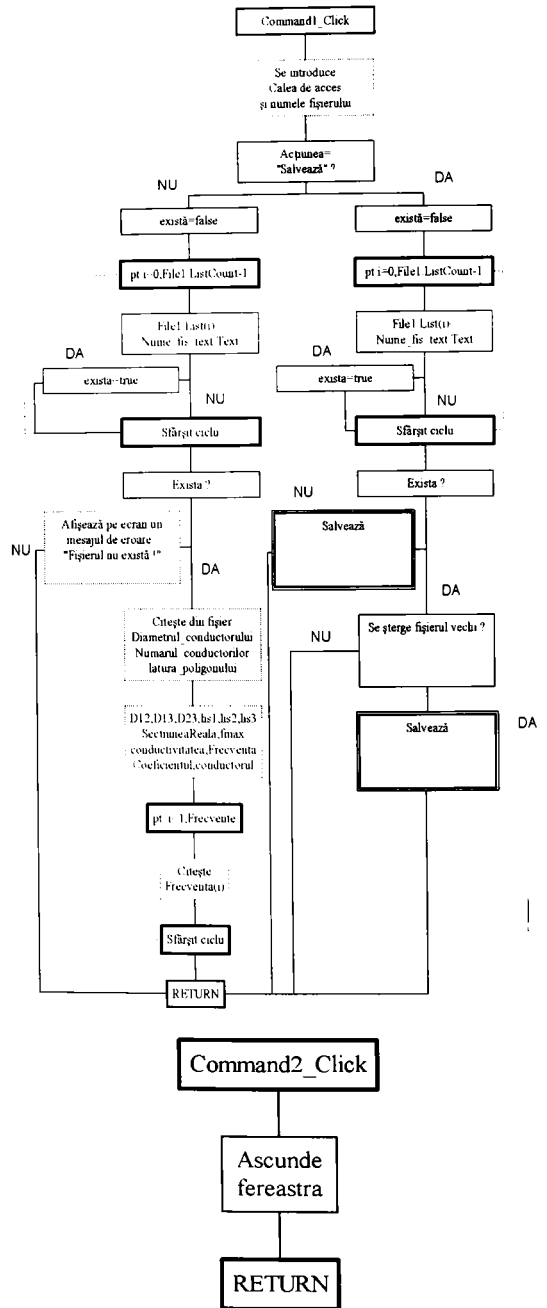
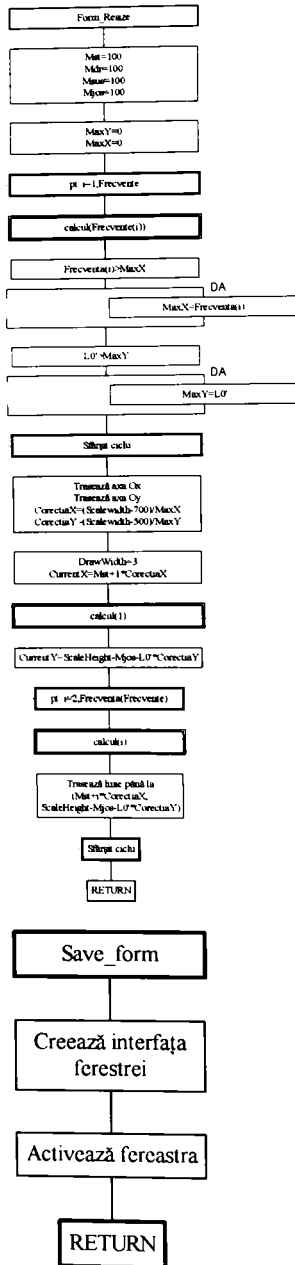


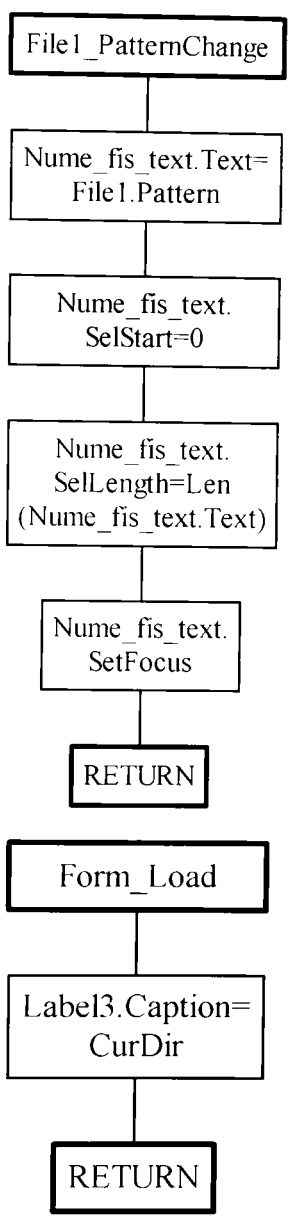
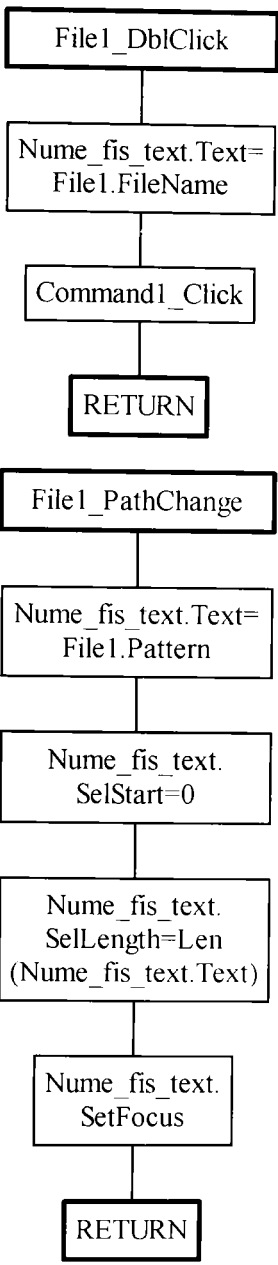
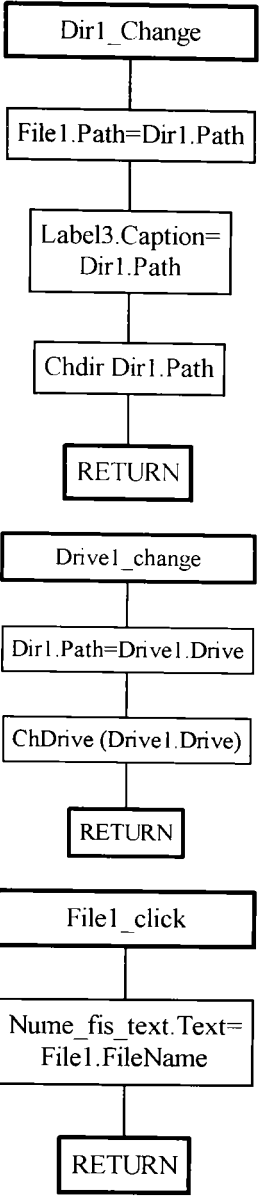


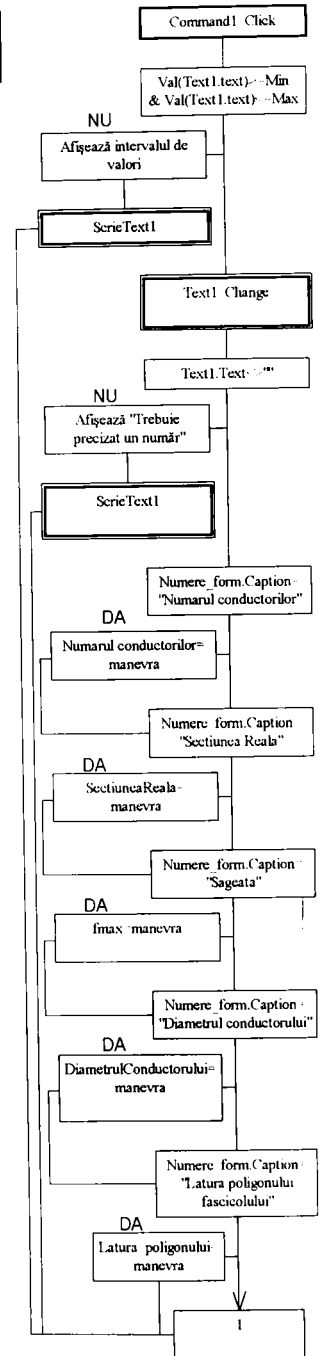
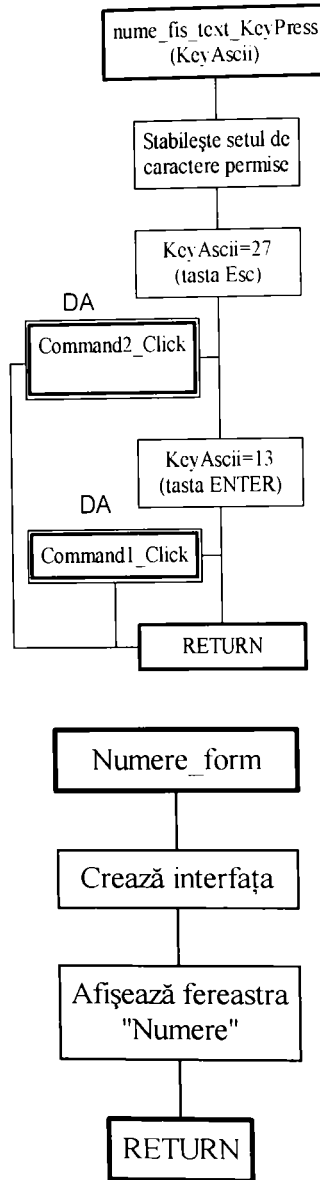
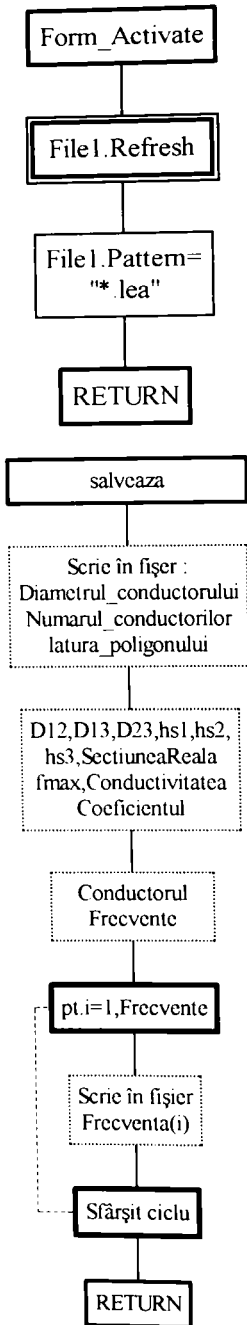


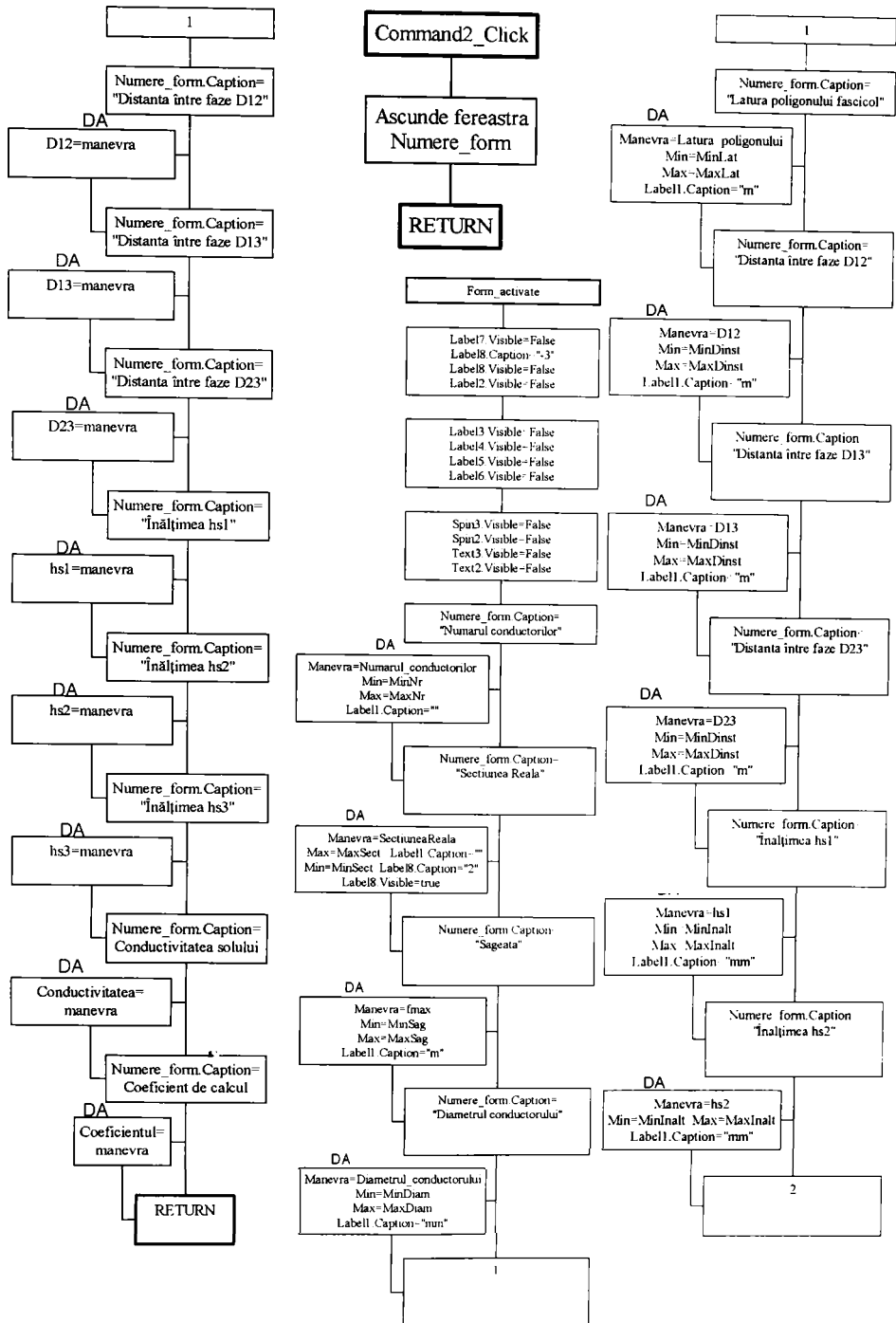


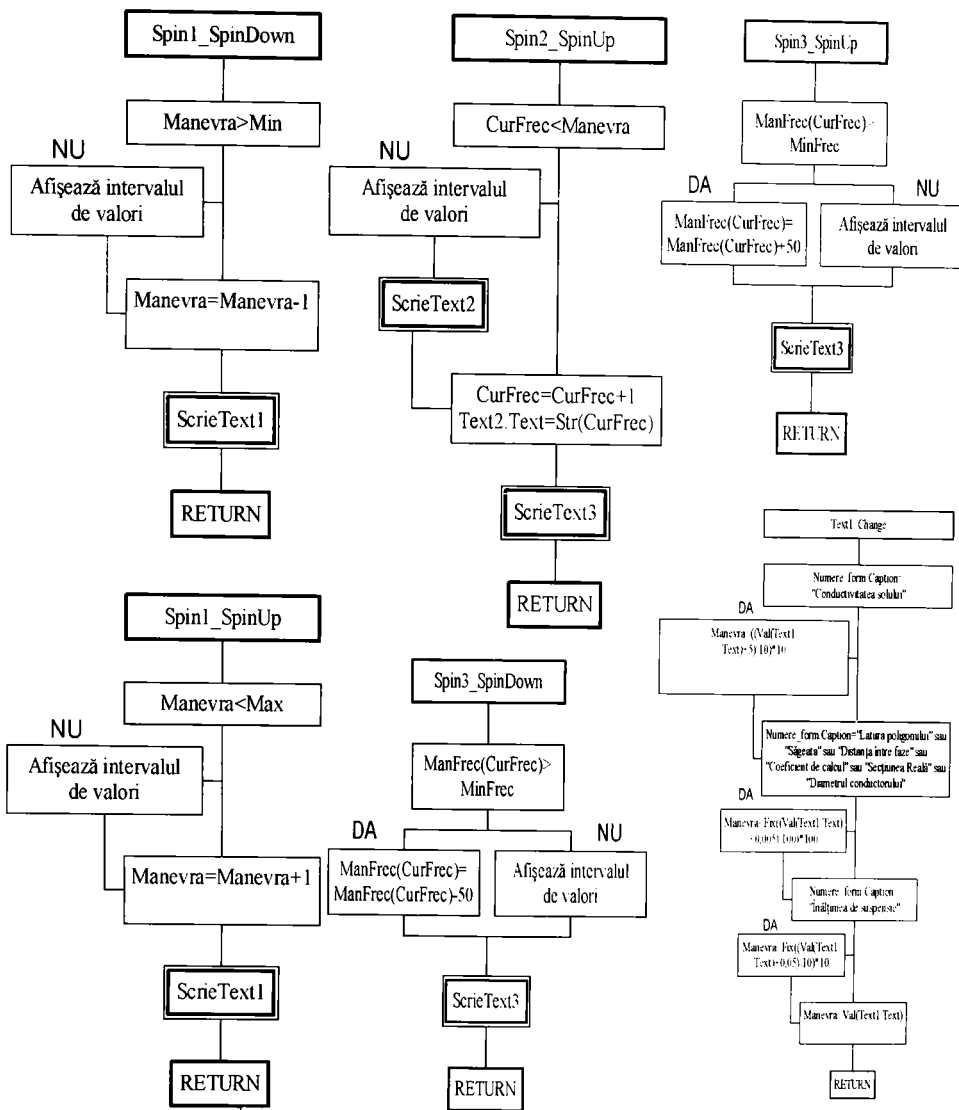


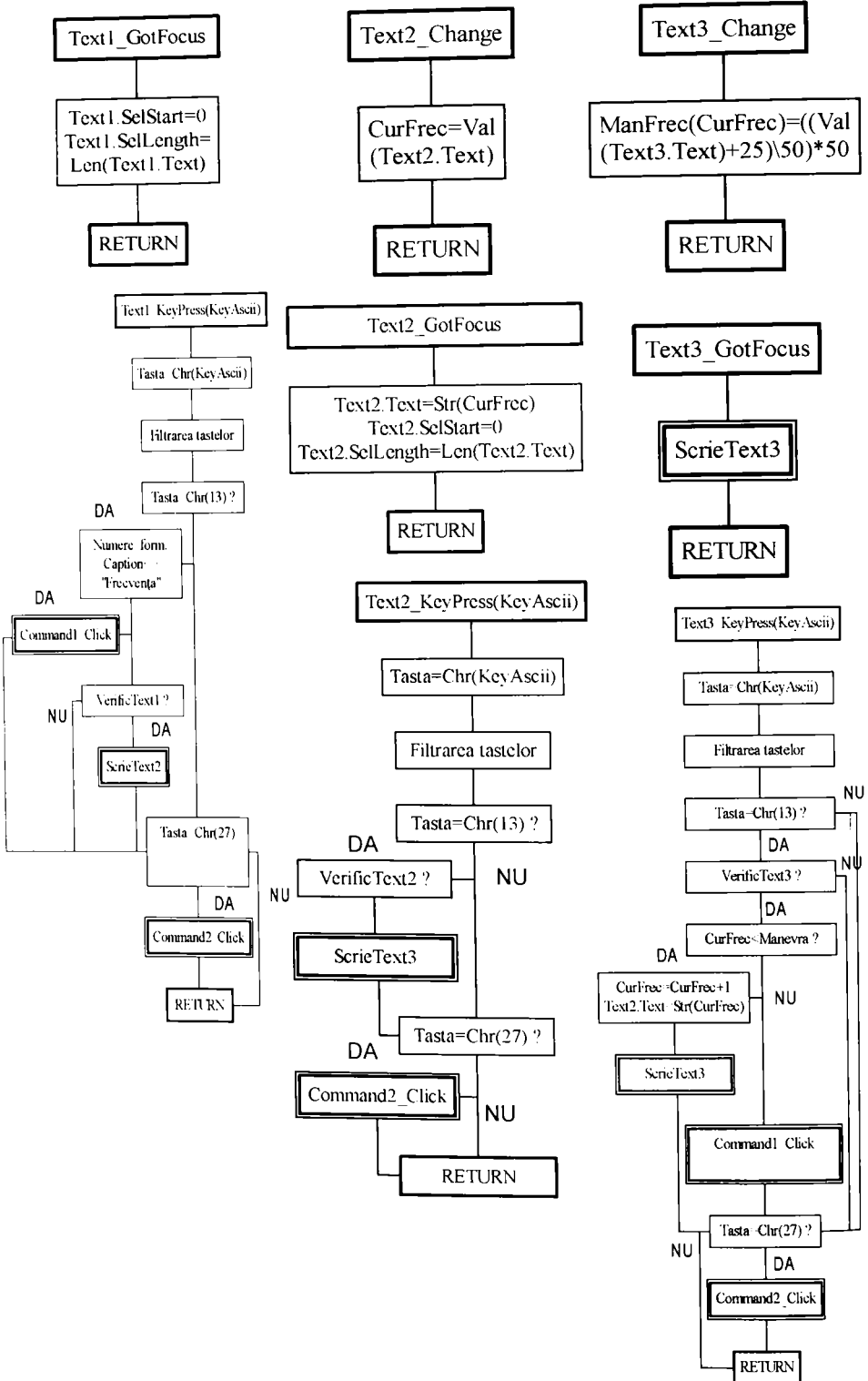


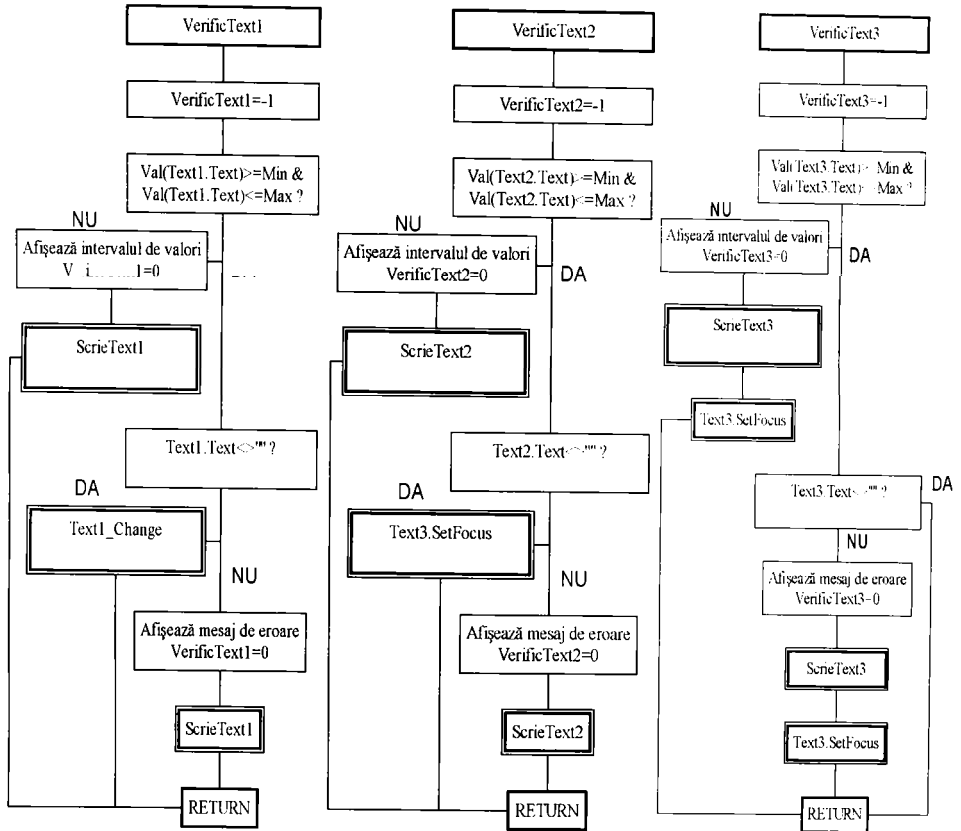




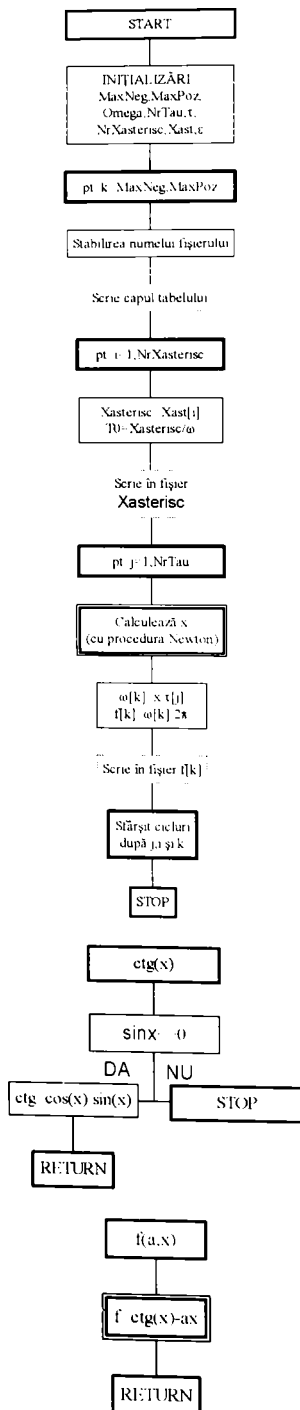


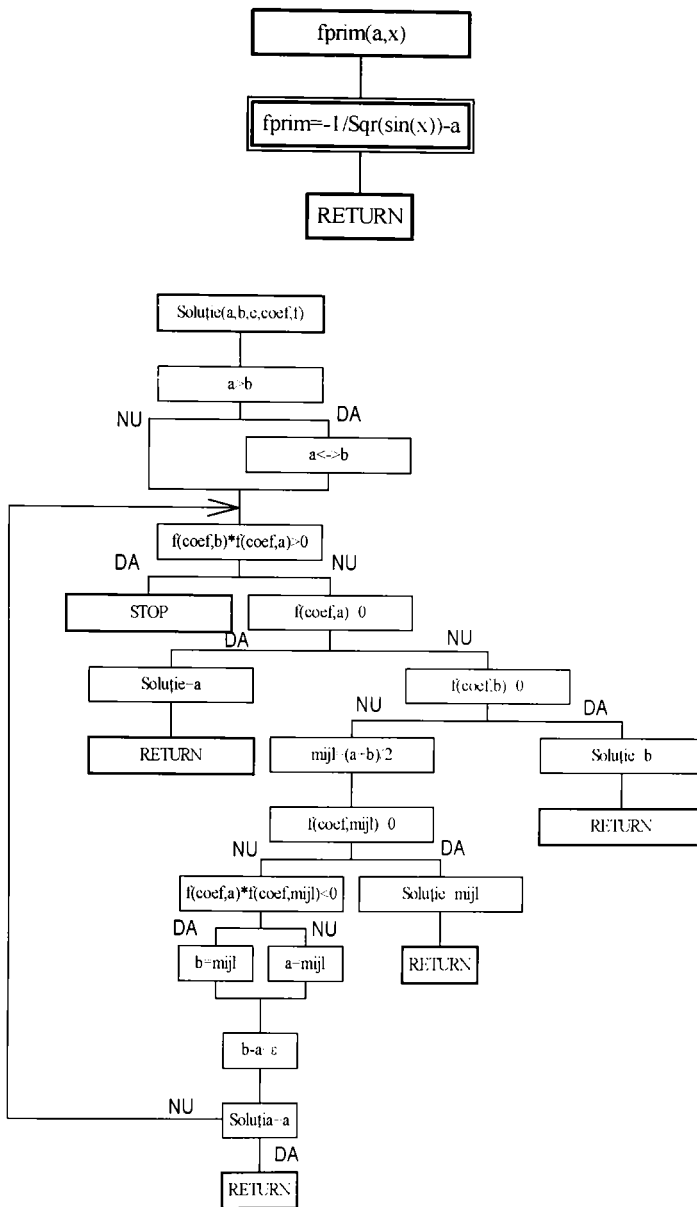


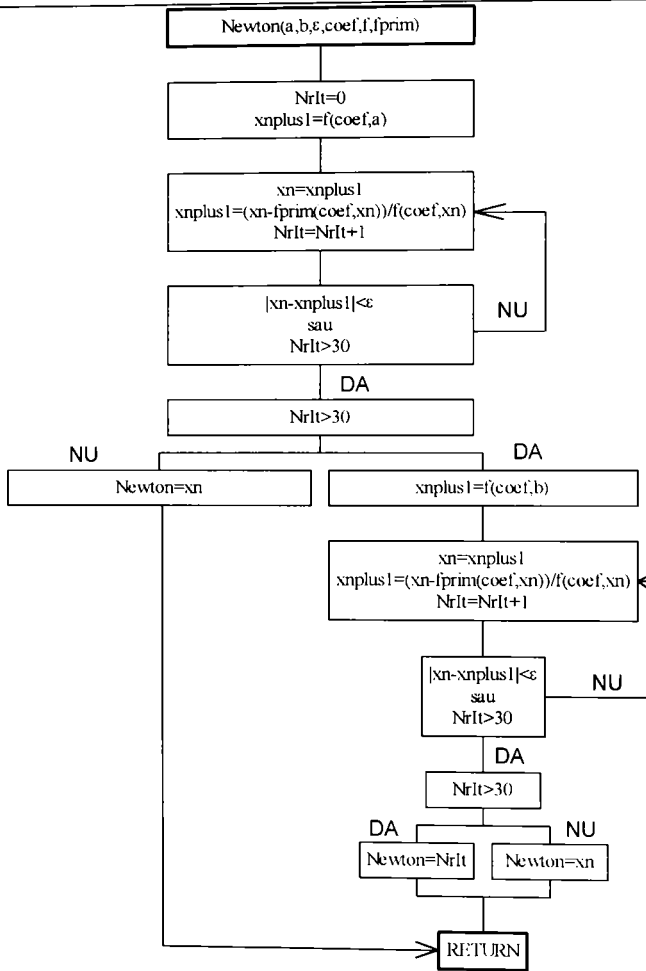




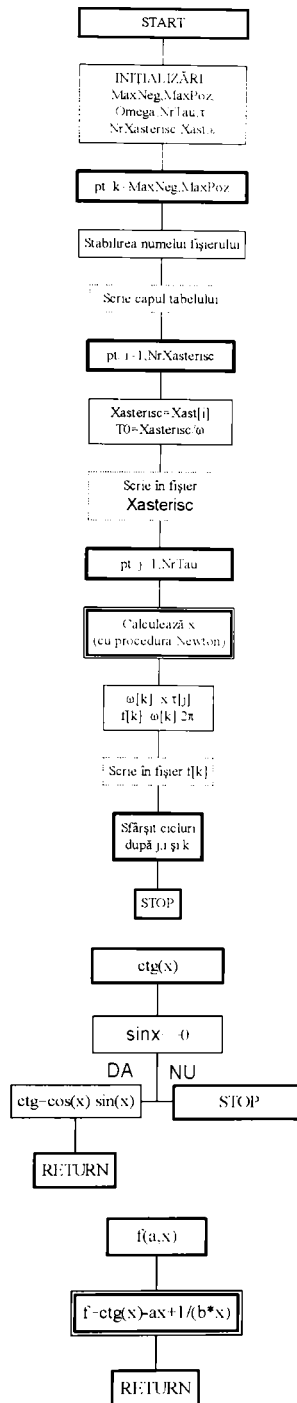
Ordinograma pentru programele ce aproximează rădăcini prin metoda înjumătățirii

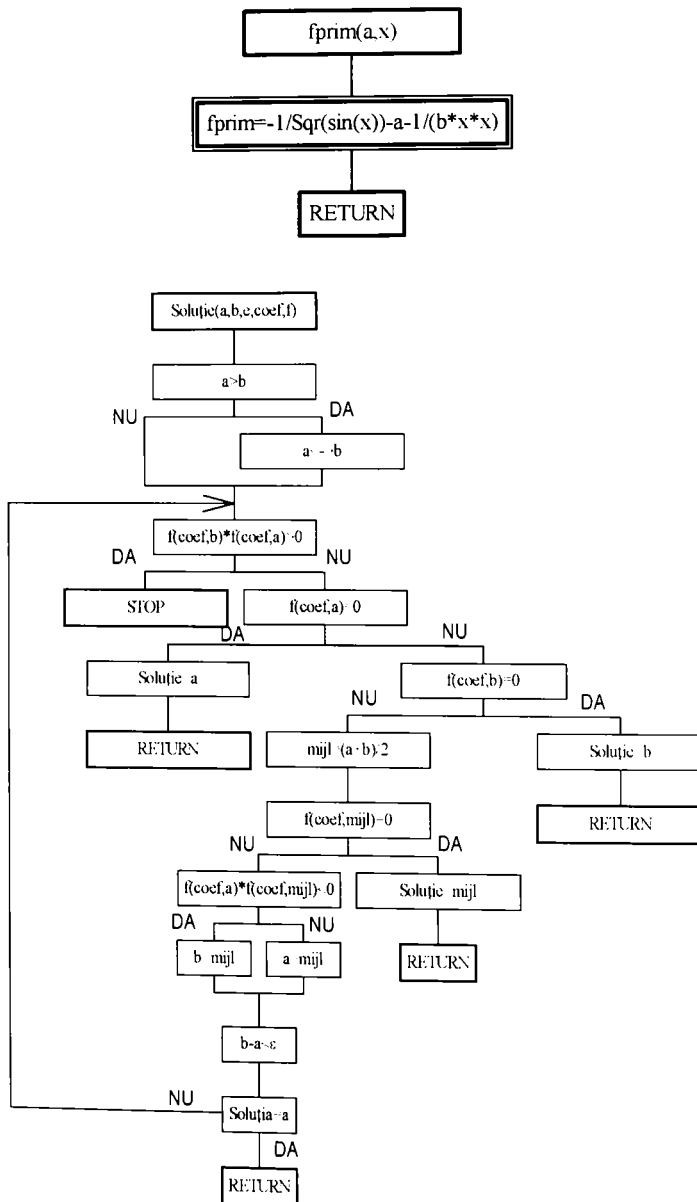


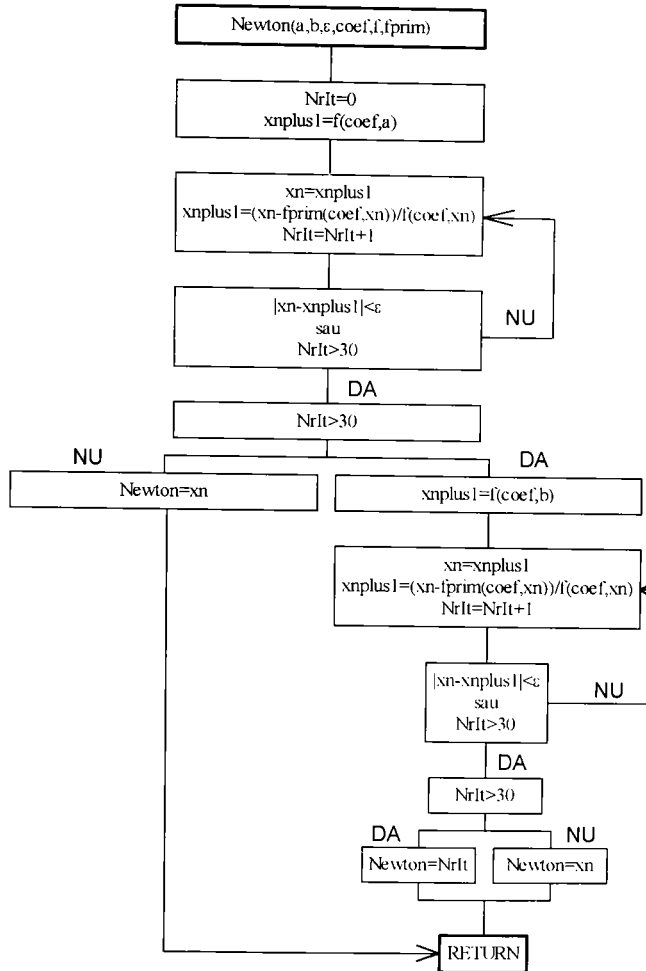




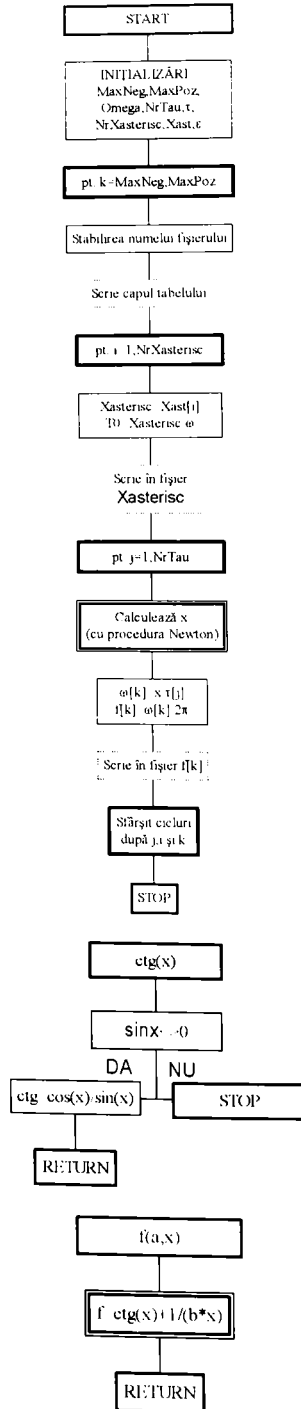
Ordinograma pentru programele ce aproximează rădăcini prin metoda înjumătățirii

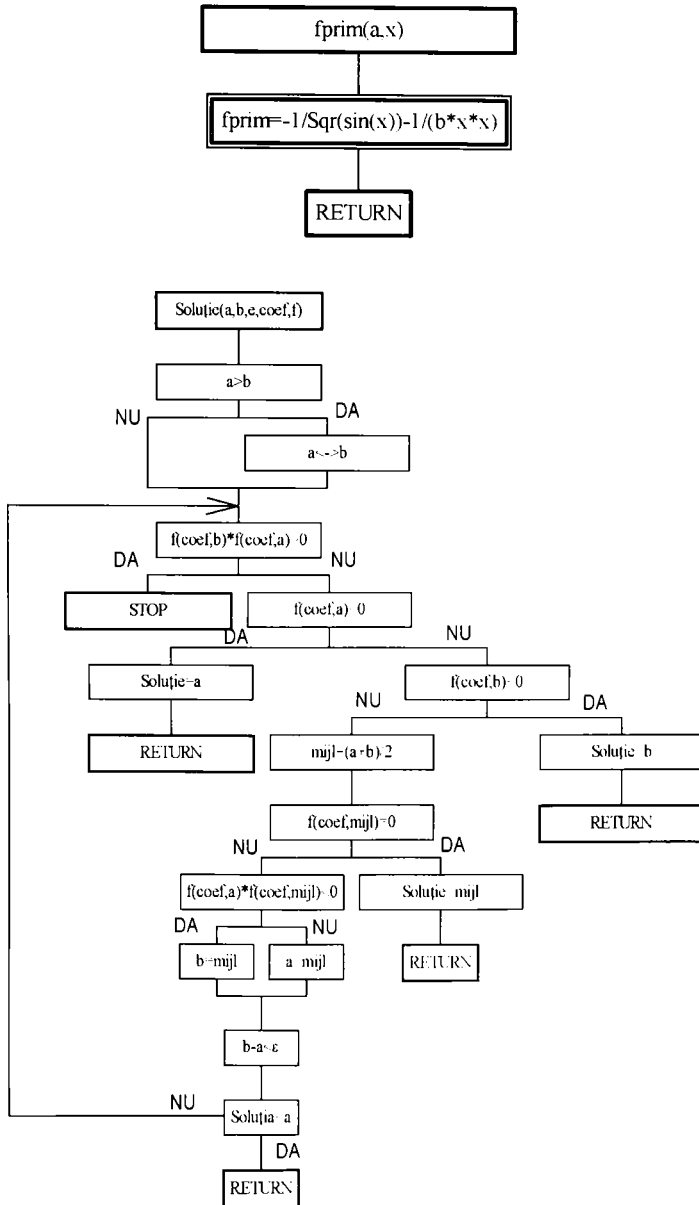


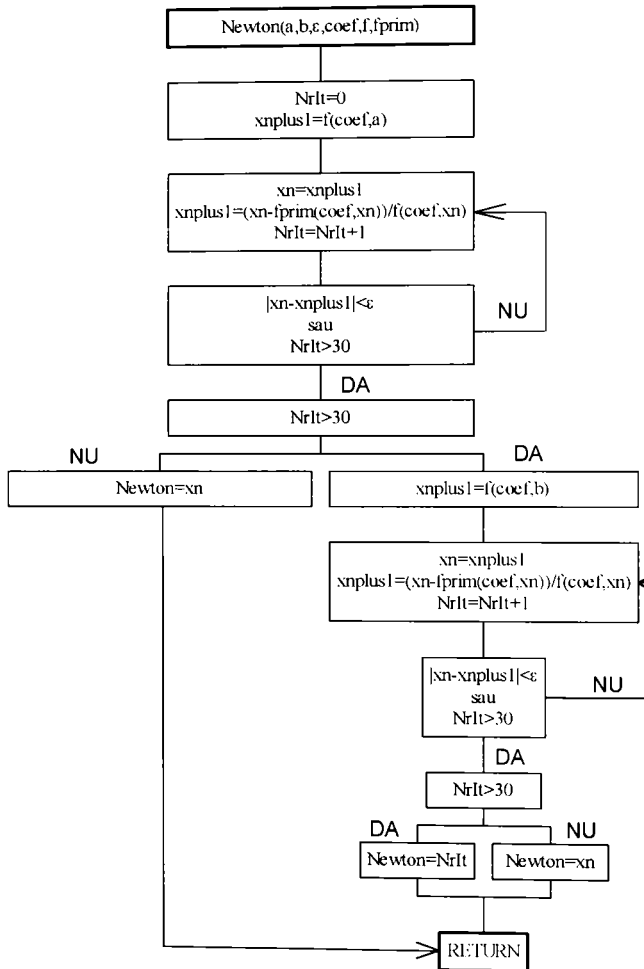




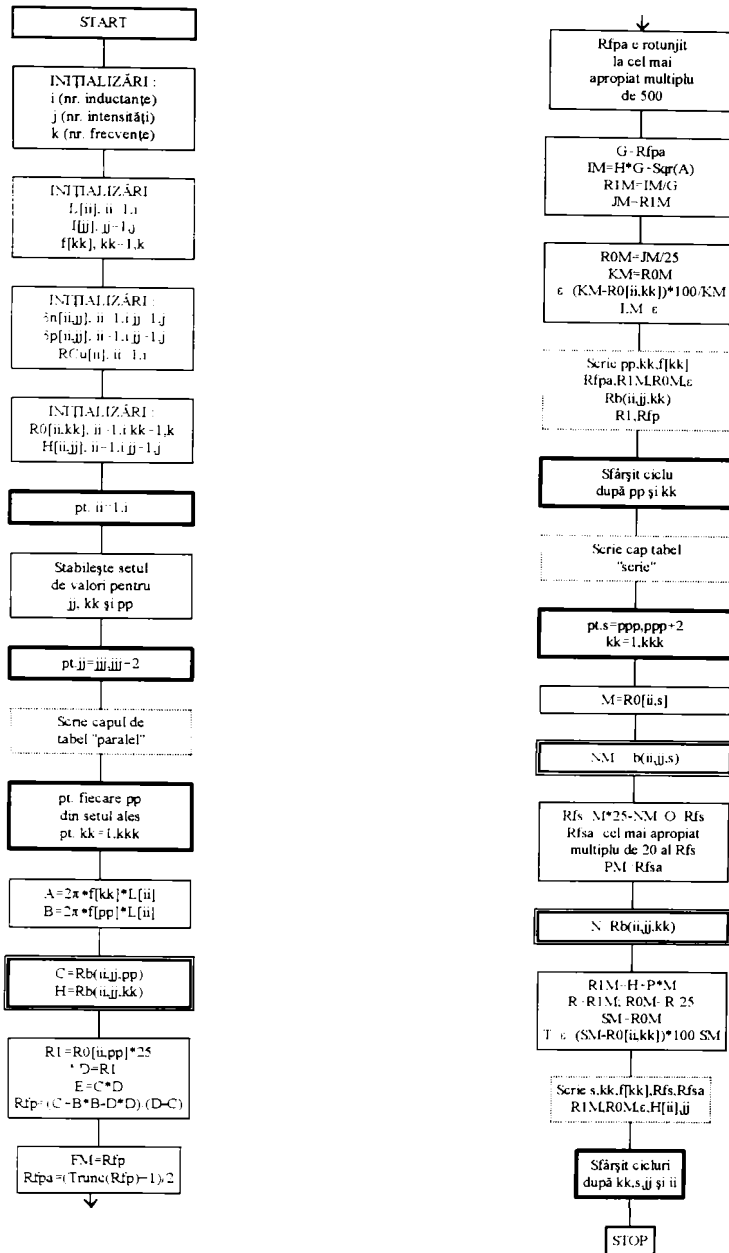
Ordinograma pentru programele ce aproximează rădăcini prin metoda înjumătățirii

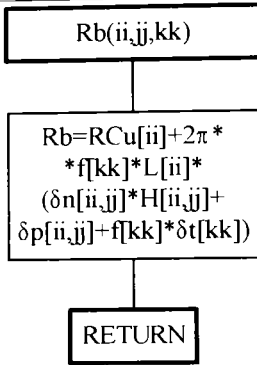




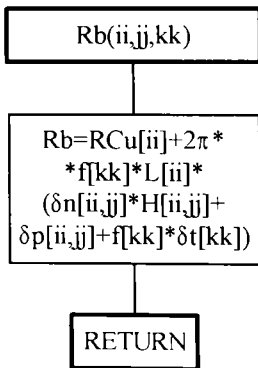


Ordinograma pentru programul Rb

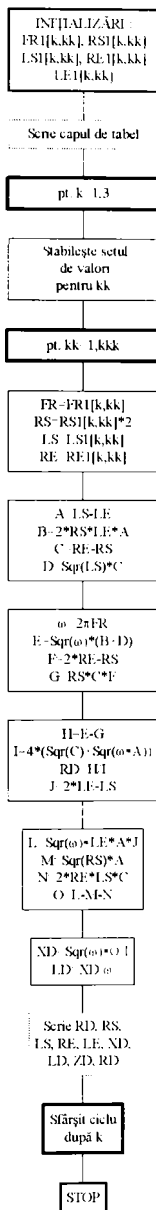




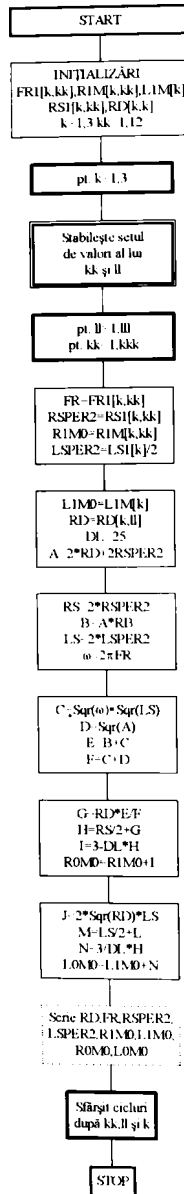
Ordinograma pentru programul RB2



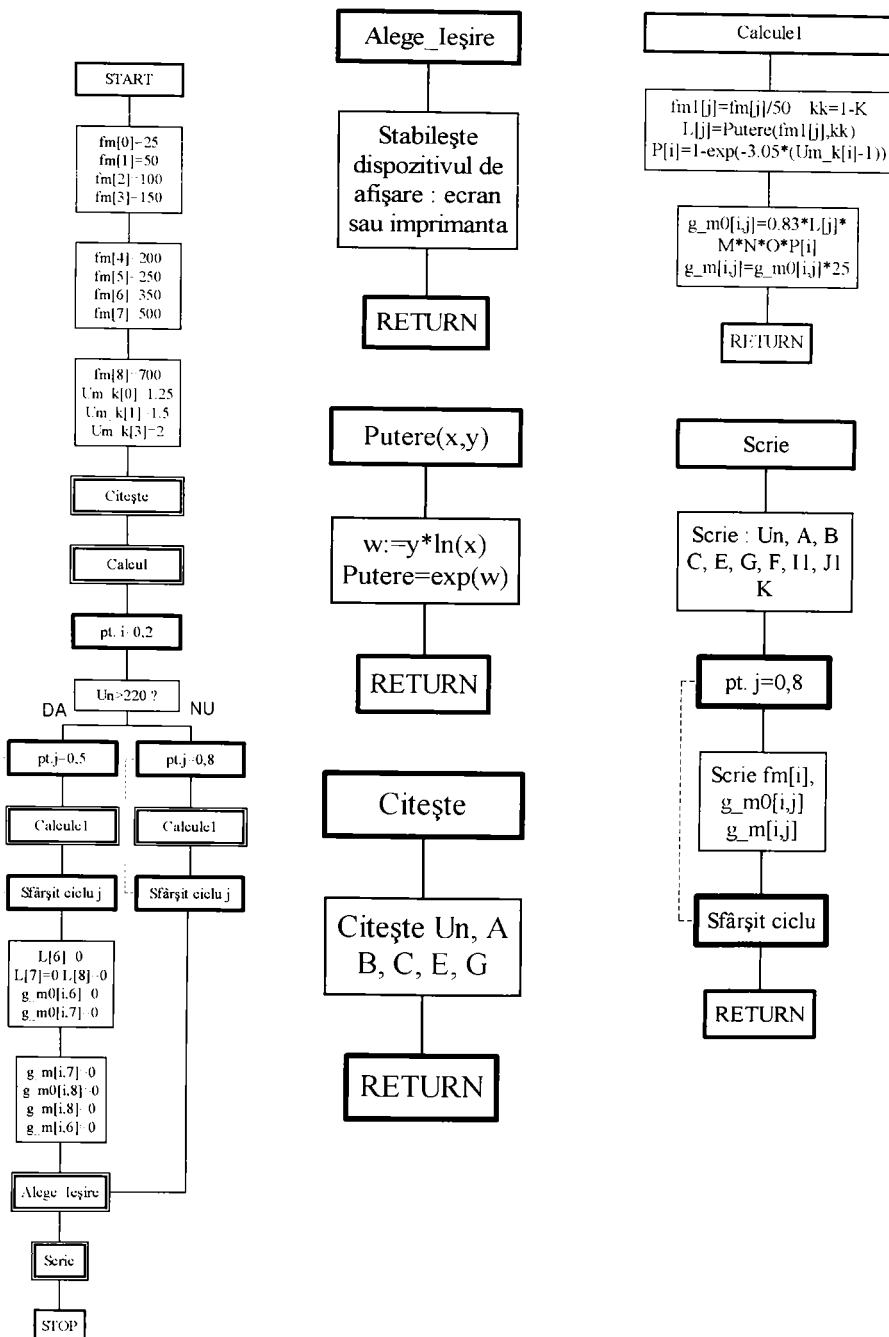
Ordinograma pentru programul ZD

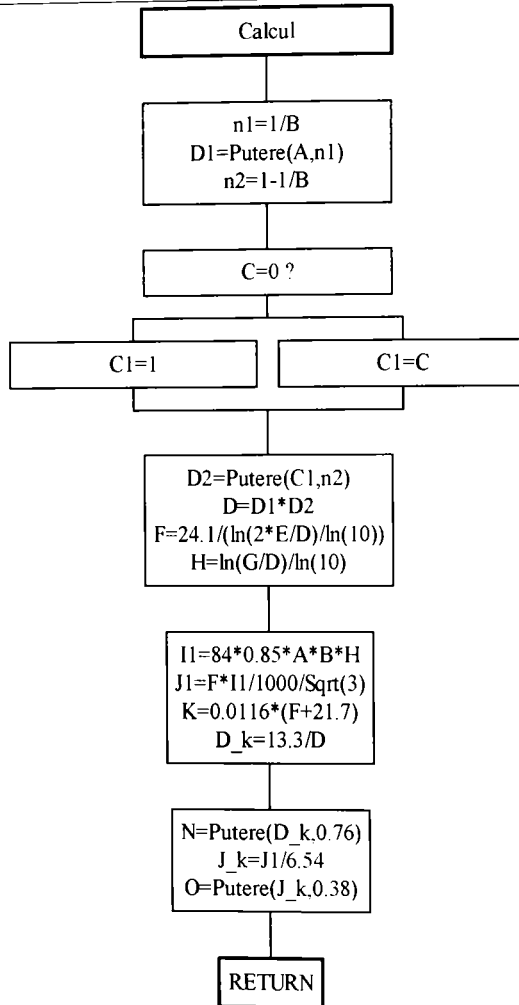


Ordinograma pentru programul ROL0

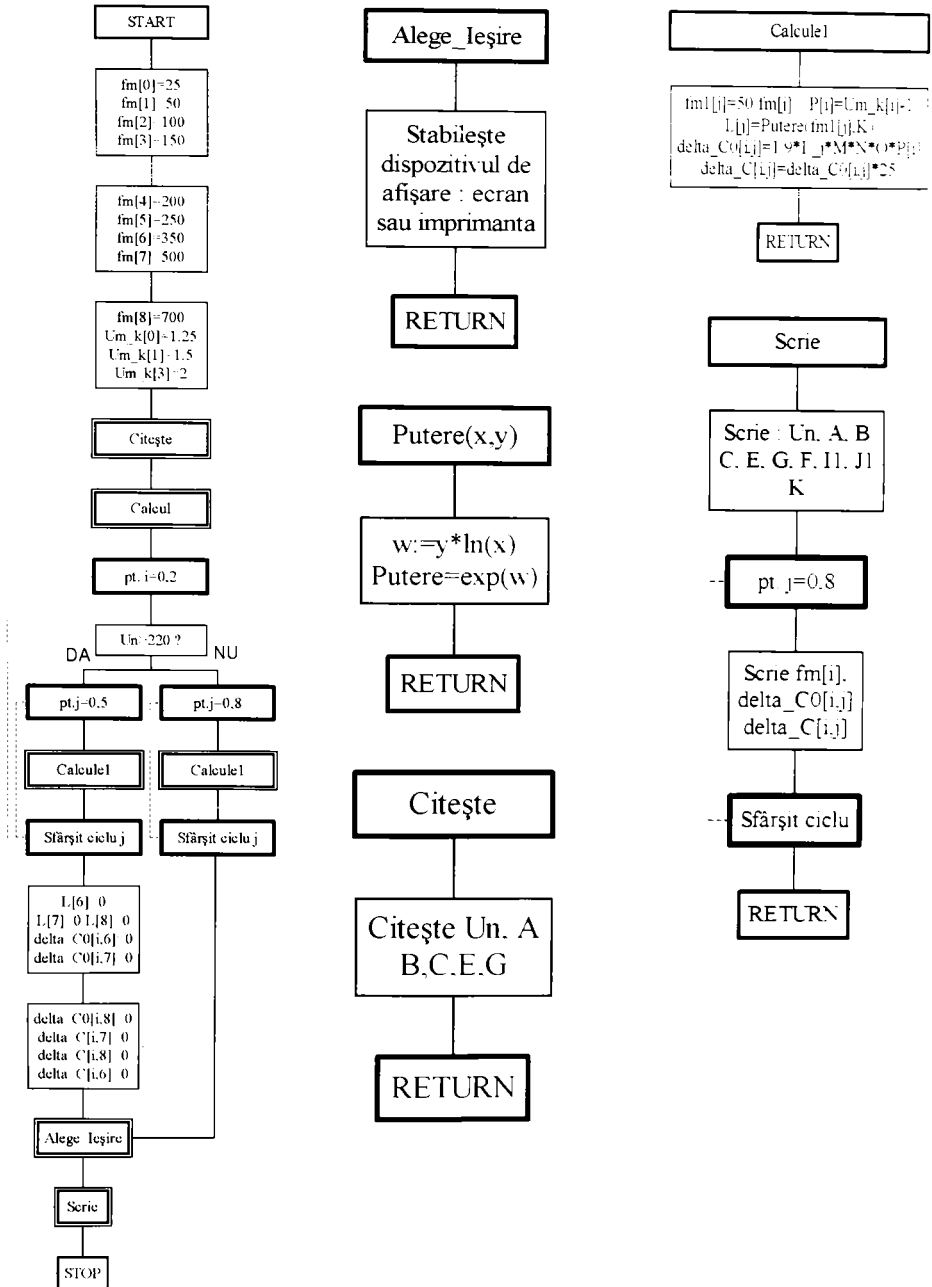


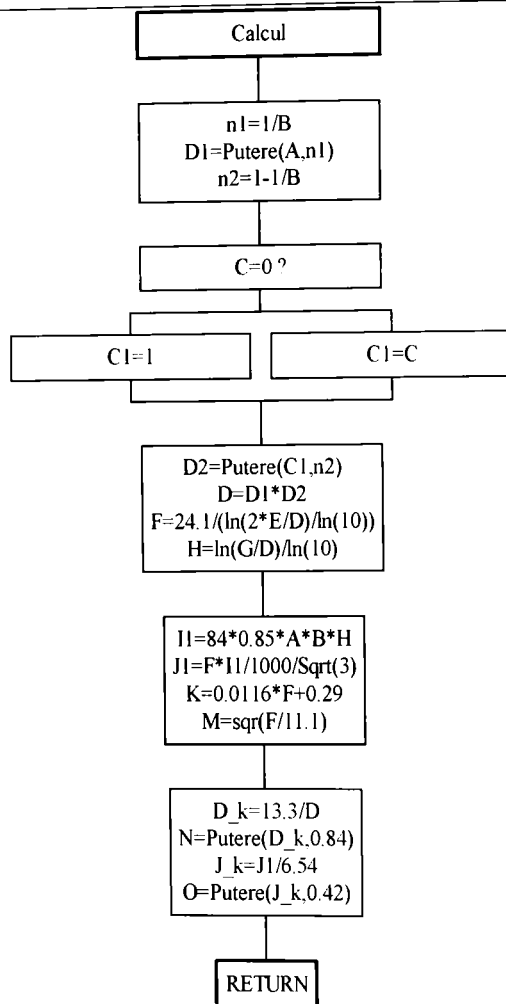
Ordinograma pentru programul g_0



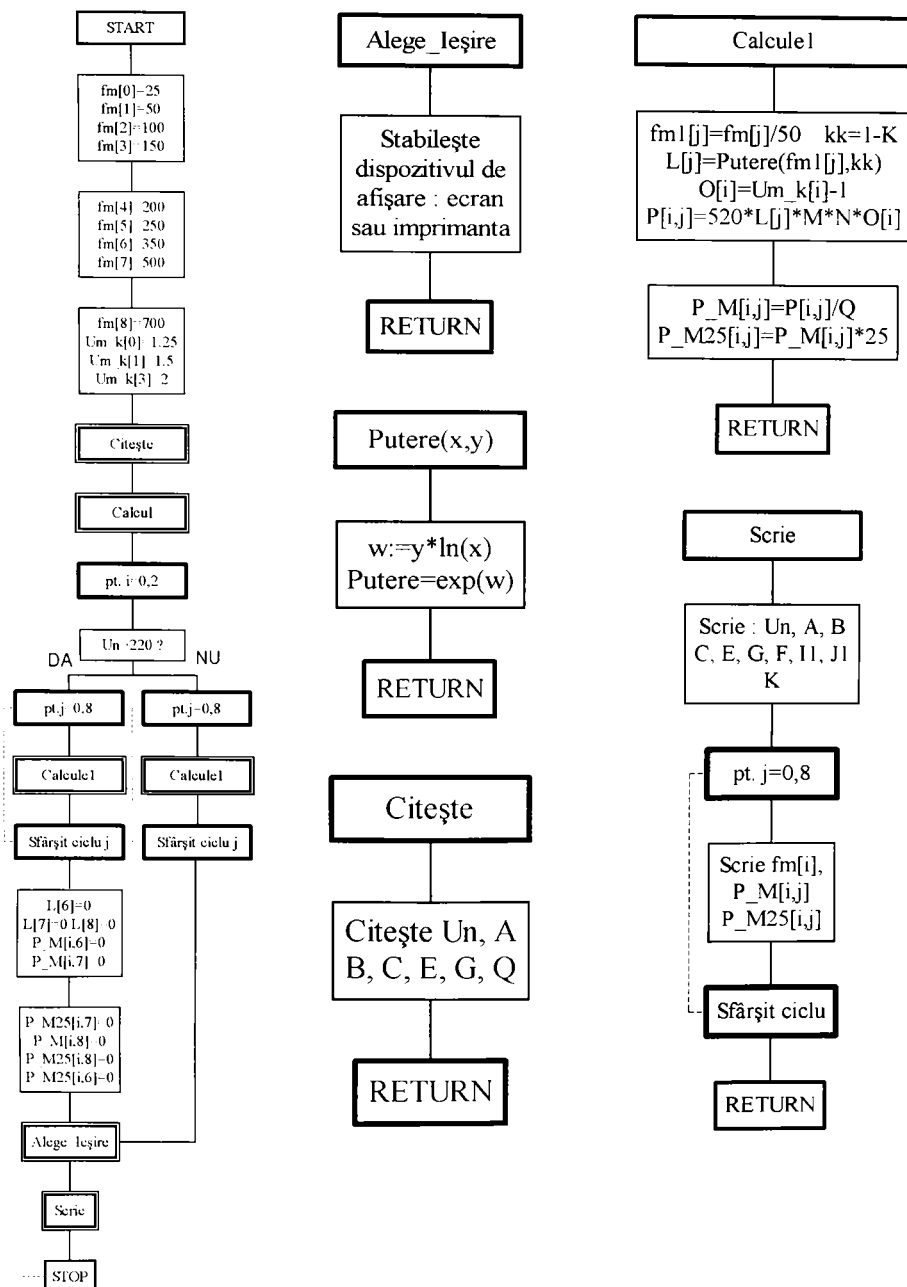


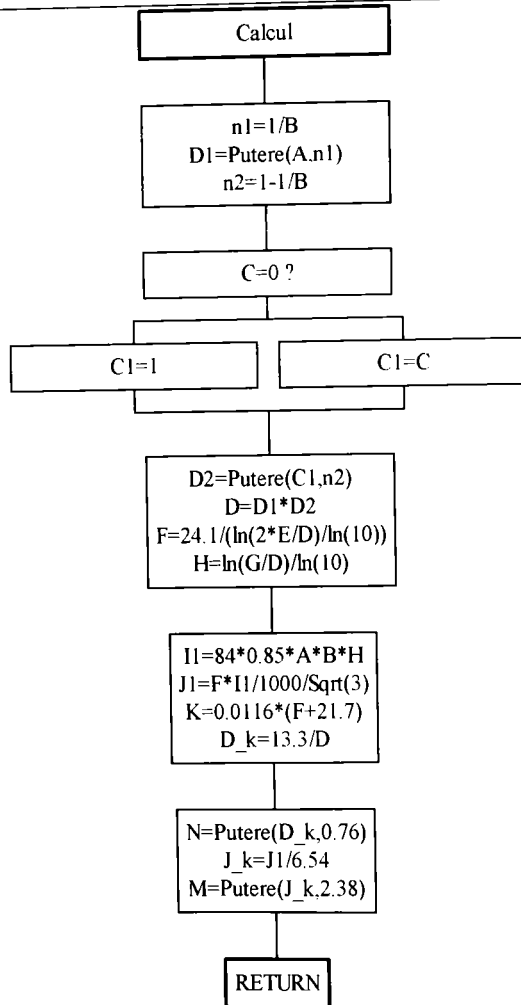
Ordinograma pentru programul ΔC_0





Ordinograma pentru programul P_M25





BIBLIOGRAFIE

1. JEAN, G.S.,
LATOUR, Y. Experimental determination of the durability of HV arresters, IEEE ROY, M. Trans. On PAS Vol. 100, nr. 3, 1981.
2. MAGNUSSON, PH. Prediction of surge response of a symmetrically excited threephase line and comparison with experimental results, IEEE Trans. On PAS Vol. 94, nr.2, March-April, pp561-571.
3. PHELPS, J.D.,
CARLOMAGNO, A. Experience with part-windings resonance in EHV autotransformers : diagnosis and corrective measures. IEEE Trans. on PAS, Vol. 94, nr. 4, July - Aug 1975, pp. 1294-1300.
4. KONTOROVICI, M.I. Calculul operațional și fenomenele tranzitorii în circuitele electrice, Editura Energetică de stat. București, 1955.
5. HEDMAN, D.E. Propagation on overhead transmission lines Earth-conduction effects and practical results. IEEE Trans. On PAS, Vol. march 1965, pp 205-211.
6. TALUKDAR, S.N. Algorithms for the simulation of transients multiphase variable parameter transmission lines. IEEE Trans. on PAS, March-April Vol. 91, nr. 2, 1972, pp. 679-687.
7. LUKE, Y.M. Multiconductor analysis. Part. I: A Study of the characteristics of EHV bundled conductor transmission lines. Part II An investigation of faults EHV transmission lines. IEEE Trans. on PAS, nr. 3, May-June 1972, pp. 1107-1119.
8. PRIEST, K.W.,
CARTER, G.K.,
JUETTE, G.W. Calculation of the radio interference statistics of transmission lines. IEEE Trans. on PAS, nr. 1, May-June 1972, pp. 92-99.
9. PERZ, M.C. Propagation analysis of HF currents and voltages on lousy power lines. IEEE Trans. on PAS nr. 6, 1972, pp. 2032-2044.
10. URAMI, R.,
MILLER, R.W. Mathematical analysis and solution of transmission line transients. I. Theory; IEEE Trans on PAS 83, 1964, pp 1116-1123 II Applications. IEEE Trans on PAS 83, 1964, pp 1123-1137
11. WENDEPOHL, L.M. Applications of matrix methods to the solution of traveling wave phenomena in polyphase system. Proceedings of IEEE, 110, dec. 1963, pp. 2200-2212
12. CARSON, J.R. Electric Circuit Theory and the Operational Calculus. Bell Syst. Techn. Journ. 4, 685 (1925)

Bibliografie

13. KARAEV, R.I. Perekhodniie proțessî v trefaznîh dlinnîh linia., In: *Electricstvo*, nr. 10, 1954.
14. KARAEV, R.I. Perekhodniie proțessî v liniiah bolsoi proteajnosti, Moscova, GEI, 1963.
15. MAUDUIT, M.A. Methode grafique de Bergeron pour l'étude de la propagation des ondes le long des lignes électricques, In: *RGE*, 1954, p 191-221.
16. SATCHE, P.
GROSSE, V. Le calcul de tensions de rétablissement et des surtension par la methode, *CIGRE, R.*, 128. 1950.
17. BERGERON, L. Du coup béliier en hydraulique au coup de foudre en électricite, Dunad, Paris, 1950.
18. BEWELEY, L.V. Traveling waves on transmission systems, New York, Tohn Wiley and Sans. Inc. London, Chapman and Hall Ltd, 1951.
19. KOSTENKO, M.V. Atmosferniie perenaprajenia i grozozascita vîsokovoltnih ustanovok, Moscova, GEI 1949.
20. ADĂMUȚ, I.A. Cercetări privind variația tensiunii la extremitatea receptor a unei linii de lungime finită fără pierderi pe o cale nouă-modelarea funcțiilor Laguerre generalizate, *St. cerc. Energ. Electrotehn.* 18.1, pag. 179-197 (1968).
21. ADĂMUȚ, I.A. Analiza propagării undelor electromagnetice pe linii în regim tranzitoriu, Ed. Academiei, București, 1972.
22. CLARKE, E. Analiza circuitelor electrice ale sistemelor electroenergetice, Ed. Tehnică, București, 1975.
23. MAGNUSSON, P.H. Step - function response of a line with ground return. Empirical asymptotic approximations for impedance, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. 61.
24. HEDMAN, D.E. Theoretical evaluation of multiphase propagation, *IEEE Trans. on PAS*, Vol 90, nr. 6, nov-dec. 1971, pp 2460-2471.
25. NEMEȘ, M.,
TEODORESCU, E. Funcția de răspuns tranzitoriu la liniile electrice cu elemente terminale concentrate de tip impedanță, *Stud. cercet. energ. Electrotehn.*, Vol. 22, nr. 4, 1972, pag. 903-912.
26. NEMEȘ, M.,
VELICESCU, C. Optimizarea folosirii unor metode de calcul în fenomenele tranzitorii, Sesiunea de comunicări Științifice, I.P. Timișoara, 1974.
27. ADĂMUȚ, I. Considerații asupra preciziei modelării analogice prin metoda diferențelor finite a ecuațiilor de propagare pe o linie electrică, *Stud. Cercet. energ. Electrotehn.*, Vol. 19, nr.1, 1969, pag. 199-216.

28. ADĂMUȚ, I. Metode analitice de rezolvare a ecuațiilor telegrafistilor generalizate de ordinul întâi, Stud. cercet. energ. Electrotehn., Vol. 19, nr.2, 1965, pag. 357-375.
29. THOMAS, C.H., WELLE, D.H., HEDIN, R.A. Switching surges of parallel HV on EHV un transposed transmission lines studied by analog simulation, IEEE Trans. on PAS, Vol 95, nr. 1, Jan-Feb. 1972, pp 180-190.
30. IEEE Working group Control an reduction on AC transmission lines, on switching surges IEEE Trans. on PAS, Vol 101, nr.8, aug. 1982, pp 2694-2701.
31. CIGRE W.G. 13.05 - The calculation of switching surges I - A comparison of transient network analyzer results, ELECTRA, Paris, nr. 19, 1971 S-67-78.
- The calculation of switching surges II - Network representation for energization and re-energization study on lines fed by an inductive source, ELECTRA, Paris, nr. 32, 1974 S-17-42.
- The calculation of switching surges III - Transmission line representation for energization re-energization studies with complex feeding networks, ELECTRA, Paris nr. 62, 1979 S-45-78.
32. DRĂGAN, G. și alții Supratensiuni interne în sistemele electroenergetice, Ed. Tehnică București, 1975.
33. CARSON, J.R. Wave propagation in wires with ground return, Bell System Technical Journal 5, 1926.
34. POLLACZEK, K. Über das feld einer unendlich largen Wechselstromderflossenen ein fachlai Zung, Electric. Nach. Tech., 1926.
35. MARGOLIN, N.F. Toki v zemle, Moscova, GEI., 1947
36. BERTSCHINGER, A. Über die simulation von schaltuberspannungen auf dem netzmodele unter besonderer beruecksichtigung der leitungsnachbildung. Teză de doctorat, 1981.
37. VENICOV, M. Aplicarea teoriei similitudinii și modelării în electroenergetică, Ed. Tehnică, București, 1972.
38. ȘORA, C. Bazele electrotehnicii, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1984.
39. NEGRU, V., POP, E. Referat final asupra proiectării unui model fizic al LEA de transport, I.P.Timișoara, 1969.
40. VELICESCU, C. Contribuții la calculul regimurilor tranzitorii ale liniilor electrice lungi cu parametri variabili, Teză de doctorat, IPTV Timișoara, 1985.
41. WENDEPOHL, L.M., EFTIMYADIS, A.E. Wave propagation in transmission lines over lousy ground a new complete field solution, Proceedings IEE 125 (1978) pp 505-511.

Bibliografie

42. EFTIMYADIS, A.E., WENDEPOHL, L.M. Propagation characteristics of infinitely-long single-conductor lines by the complete field solution method, *Proceedings IEE* 125 (1978) pp. 511-517.
43. STEWENSON, W.D. *Element of power system analysis*, Mc. Graw-Hill, New York 1962.
44. KARPOV, V.A., ZUEV, E.N. Voprosî priblijennovo modelirovania ciastotnih karakteristik linii elektroperedacii vîbora napriajeniia model, LEP-Sbornik, Dokladî iv Mejvurovskoi Konferenții po primeniuiu fiziceskovo modelirovania v razlicinîh otraslah, nr. 4, MEI, Moscova, 1962, pag. 57.
45. NEGRU, V., POP, E. K voprosu modelirovaniia ciastotnih karakteristik elektroperedacii vîsokovo napriajeniia, *Buletinul științific și tehnic al I.P. Timișoara*, tom 17(31), fasc.2/1972.
46. BICKFORD, J.P. *Computation of power system transients*, I.E.E. Monograph series and oth.18, Peter Peregrinus Ltd. Sterenage (GB), 1976.
47. BUTA, A. *Transportul și distribuția energiei electrice*, curs vol I și II, Lito IPTV Timișoara, 1991.
48. NEGRU, V. *Tehnica tensiunilor înalte. Supratensiuni interne*, Lito UT Timișoara, 1995.
49. NEKRASOV, A.M., ROKOTIAN, S.S. *Dalnaia elektroperedacia voljskaia GES imeni V.I.L.-Moskva*, Sbornik statii GEI Moskva-Leningrad, 1958, pag. 438-442.
50. BURGSDORF, V.V. *Vaprosî zaščiti ot perenapnjenii, Koordinații izolații v SSA-GEI*, Moskva-Leningrad, 1959, pag. 128-129.
51. WILLHEIM, R.W., WATERS, M. *Zazemlenie neutrali v vîsokoltnîh sistemah-trad englez.*, GEI, Moskva-Leningrad, 1959, pag. 128-129.
52. RAZEVIK, D.V. *Tehnica vîsochih napriajenii*, Moskva-Leningrad, 1963.
53. GILLICH, N. *Analiza domeniului de frecvență al oscilațiilor datorate comutației*, *Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița*, Fascicola 1, 1994.
54. GILLICH, N., PRAISACH, V.I. *Program de calcul pentru determinarea frecvenței oscilațiilor libere la comutație*, Universitatea „Politehnica” Timișoara, Facultatea de Inginerie Hunedoara, Sesiunea aniversară de comunicări științifice Vol II, 12-13 oct., 1995.
55. GILLICH, N., PRAISACH, V.I. *Utilizarea metodelor de aproximare a rădăcinilor unei ecuații pentru determinarea frecvenței oscilațiilor libere la comutație*, *Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița*, 1995.

56. MELNIKOV, N.A.,
ROKOTIAN, S.S.,
SERENTIS, A.N. Proiectivarea electricei cisteri vozdusnăh linii elektroperedaci 330-500 KV, GEI, Moskva - Leningrad, 1963, pag. 100.
57. DOLGHINOV, A.I. Perenaprajenia velektriceskih sistemah, GEI Moskva-Leningrad, 1962, pag. 139.
58. VENICOV, V.A. Teoria podobii i modelirovanio k zadaciam elektroenerghetiki, Vășșaia șkola Moskva, 1966, pag. 351-365.
59. GAVRILAȘ, N.,
OLAH, R.,
GUȘĂ, M.,
ASAFTEI, C. Tehnica tensiunilor înalte. Lucrări de laborator, Lito IP „GH. ASACHI”, Iași, Facultatea de Electrotehnică, 1986.
60. DRĂGAN, G.,
CRISTESCU, D. Măsurarea pierderilor prin descărcarea Corona în liniile de 400 KV efectuată în țară, Conferința Națională de Electrotehnică și Energetică, 17-18 sept. 1982, Timișoara.
61. CLADE, S.,
GARY, G.,
LEFEVRE, C.L. Calculation of Corona losses beyond the critical gradient in alternating voltage, IEEE Trans. on PAS, Vol 88, may 1969, pp 695-703.
62. KIRMAN, H. The influence of rain rate on transmission line corona performance, IEEE Trans. on PAS, Jan 1981, pp 420-424.
63. GARY, C.,
DRĂGAN, G.,
CRISTESCU, D. Attenuation of surge propagation due to corona, GIGRE 33.01, Paris, 1981.
64. GARY, C.,
DRAGAN, G. The parameters of an electrical line considering the influence of impulse corona discharge, Edinburgh, 1983, Rapport WG 33-a.83.
65. DMOHOVSKAIA,
L.F. Inginerieie rascioti vnutrenih perenaprajonii velectroperedaceh., Moscova, 1972.
66. ALEXANDROV,
G.N. Coronii razvirad na liniiah elektroperedaci, Moscova, 1962.
67. GILLICH, N. Determinarea parametrilor neliniari g, ΔC , datorită efectului Corona, Sesiunea de comunicări, Hunedoara, 12-13 oct. 1995.
68. GILLICH, N. Studiul analitic al schemei de modelare a efectului Corona., Sesiunea de comunicări, Hunedoara, 12-13 oct. 1995.
69. CONTOROVICI,
M.I. Calculul operațional și fenomenele tranzitorii în circuitele electrice, Editura Energetică de stat, 1989.

70. GILLICH, N. Posibilitatea folosirii bobinelor cu miez de fier la modelarea liniilor electrice de transport, Sesiunea de comunicări, Hunedoara, 5-6 nov. 1992.
71. GAVRILAȘ, N.,
OLAH, R., GUȘĂ, M.,
DUDICI, M. Tehnica tensiunilor înalte, Lito I.P. „Gh.Asachi”, Iași, 1975.
72. TIMOTIN, A. și alții Bazele electrotehnicii, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1964.
73. RAZEVIĞ, D.V.,
DMOHOVSKAIA, L.F.,
LARIONOV, V.P., ș.a. Tehnica vîsochih napriajenii, Energia Moskva, 1976.
74. NEGRU, V. Folosirea calculatoarelor analogice pentru studiul supratensiunilor, la deconectarea liniilor în gol, Buletinul științific și tehnic I.P.Timișoara, tom. 10(34) fasc.2, 1965.
75. RUDENBERG, R. Fenomene tranzitorii în sistemele electroenergetice, (trad. din l. engleză), Ed. Tehnică, București, 1959.
76. DOLGHINOV, A.I. Tehnica vîsochih napriajenii v electroenerghetice, Energia Moskva, 1968.
77. KOSTENKO, M.V. Tehnica vîsochih napriajenii v electroenerghetice, Moskva, 1973.
78. ROTH, A. Hochspannungsmesstechnik, Wien, Springer-Verlag, 1965.
79. ALEXANDROV, G.N., ș.a. Proiectarea liniilor electrice de foarte înaltă tensiune, Ed. Tehnică, București, 1989.
80. DRĂGAN, G.,
GOLOVANOV, N.,
COATU, S. Tehnica tensiunilor înalte, I.P. București, 1989.
81. CRISTESCU, D.,
OLAH, R. Supratensiuni și izolația rețelelor electrice, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1983.
82. AVRĂMESCU, A.
ș.a. Switching over voltages modeled by quadripoles, Rev. Roum., Sec. techn., Serie electr. et energ.9, nr.3, 1964.
83. DRĂGAN, G.,
CRISTOVICI, A. Asupra metodelor de studiu a supratensiunilor de origine internă, Simpozionul de Analiza și sinteza rețelelor electrice, București, 1967.
84. LARIONESCU, D. Metode numerice, Ed. Tehnică, București, 1989.
85. DEMIDOVICI, B.,
MARON, T. Elements de calculs numerique, Editions Mir, Moscou, 1973.
86. JAEGER, J.C.,
NEWSTEAD, G.H. Introducere în teoria transformatei Laplace, (trad. din l. engleză) Ed. Tehnică, București, 1971.

87. BERCOVICI, M., Rețele electrice. Calculul electric, Ed. Tehnică, București, 1974.
ș.a.
88. NEMEȘ, M. Analiza fenomenelor tranzitorii de comutație în rețele electrice cu elemente terminale de tip reactor transversal și autotransformator, Teză de doctorat, IPTV Timișoara, 1973.
89. NEMEȘ, M. Sisteme electroenergetice, Lito IPTV Timișoara, 1990.
90. CURELET-BĂLAN, Gh. Visual Basic. Introducere în programarea vizuală a aplicațiilor WINDOWS, Ed. Done, București, 1994.
91. BORLAND Turbo Pascal 4.0.
92. Microsoft Visual Basic 4.0 Programmers Reference
93. GILLICH, N. Modelarea fizică a liniei electrice aeriene de înaltă tensiune, Referat 1, Teză de doctorat, Aprilie 1994, U.T. Timișoara.
94. GILLICH, N. Modelarea fizică a unor elemente neliniare de rețea, Referat 2, Teză de doctorat, Aprilie 1995, U.T. Timișoara.
95. GILLICH, N. Studiu asupra metodelor de calcul a supratensiunilor interne, Sesiunea de comunicări tehnico-științifice, 20-21 sept., F.I. Reșița.
96. GILLICH, N. Study about simulation diagrams of aerial lines, Optimization electric and electronic equipment, OPTIM' 96, 15-17 May 1996, Brașov.
97. GILLICH, N., PRAISACH, V.I. Frequency characteristics of aerial lines, Optimization electric and electronic equipment, OPTIM' 96, 15-17 May 1996, Brașov.
98. GILLICH, N., PRAISACH, V.I., BÎTEA, F. Program de calcul a parametrilor liniilor electrice aeriene de înaltă și foarte înaltă tensiune, Sesiunea de comunicări U.E.M. Reșița, 25-26 oct., 1996.
99. GILLICH, N., PRAISACH, V.I. Analiza pe model fizic a caracteristicilor de frecvență ale L.E.A., Conferința națională de energetică industrială, 31 oct.-2 noe. 1996, Bacău.
100. DMOHOVSKAIA, L. F. Inginerie rascetî vnutrennih perenapreajenii v electroperedaciiah, Energia, Moscva, 1972.
101. GILLICH, N., PRAISACH, V.I. Studiu pe model fizic a efectului Ferrantti, Sesiunea anuală de comunicări științifice, 30-31 mai, Oradea, 1997.

1/2