

MINISTERUL EDUCATIEI SI INVATAMINTULUI
INSTITUTUL POLITEHNIC "TRAIAN VUIA" TIMISOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

ING. VIOREL TITIHAZAN

TEZA DE DOCTORAT

METODE DE CALCUL A SOLICITARII
IZOLATIEI CABLURILOR DE INALTA TENSIUNE
SI MARE PUTERE

CONDUCATOR STIINTIFIC,

PROF.DR.ING. IOAN NOVAC

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMISOARA

TIMISOARA 1986

517.400
359 E

METODE DE CALCUL A SOLICITĂRII IZOLAȚIEI CABLURILOR
DE ÎNALȚĂ TENSIUNE ȘI MARE PUTERE.

C U P R I N S

	Pag.
INTRODUCERE	1
Cap.1. CARACTERISTICILE CABLURILOR DE Î.T. ȘI MARE PUTERE ȘI STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL CABLURILOR.	3
1.1. Rolul și aspecte caracteristice utilizării ca- blurilor de înaltă tensiune și mare putere în- tr-un sistem electroenergetic	3
1.2. Evoluția, parametrii principali și exemple de cabluri de f.t. construite pe plan mondial.	6
1.3. Probleme specifice privind concepția, cons- truția și montarea cablurilor de f.t.	15
1.4. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul cablurilor.	20
1.4.1. Laboratoarele de încercări ale Societă- ții "Electricité de France" de la Renardières.	21
1.4.2. Stand de încercări cabluri în cadrul Laboratoarelor KEMA-Olanda	23
1.4.3. Stația experimentală de la Suvereto Firenze, a Societății ENEL-Italia.	24
Cap.2. METODE ÎN CALCULUL REGIMULUI TERMIC AL CABLURILOR.	26
2.1. Regimul termic tranzitoriu rezolvat prin fo- losirea funcțiilor Green.	28
2.1.1. Baza matematică a metodei.	28
2.1.2. Soluția ecuației transmisiei căldurii.	30
2.1.3. Modul de aplicare a rezultatelor stu- diului în diverse cazuri practice.	33
a) Calculul temperaturii la suprafața unui cabluri cu un singur înveliș omogen.	33
b) Calculul temperaturii la suprafața con- ductorului pentru un cablu cu mai mul- te învelișuri concentrice.	34

	Pag.
c) Calculul temperaturii la suprafața unui singur cablu pozat în sol la adâncimea h	35 .
d) Cazul a trei cabluri pozate în sol.	36 .
2.2. Regimul termic al cablurilor cu răcire naturală	37 .
2.2.1. Ecuația bilanțului termic.	37 .
2.2.2. Calculul încălzirii în regim de lungă durată.	38 .
2.2.2.1. Regimul permanent - regim de lungă durată cu sarcină permanent constantă.	38 .
2.2.2.2. Regimul de lungă durată cu sar- cină variabilă în trepte.	40 .
2.2.2.3. Schema termică echivalentă pen- tru regimul de lungă durată cu sarcină variabilă	42 .
2.2.2.4. Regimul de lungă durată cu sar- cină variabilă ciclică - soluții numerice	46 .
2.2.3. Calculul încălzirii în regim de scurtă durată.	50 .
2.2.3.1. Încălzirea conductorului în ipo- teza adiabatică.	51 .
2.2.3.2. Schema termică echivalentă pentru regimul de scurtă durată	52 .
2.3. Regimul termic al cablurilor cu răcire forțată.	54 .
2.3.1. Ecuația de bilanț termic în cazul unui singur cablu.	55 .
2.3.2. Influența reciprocă între circuitul de dus și circuitul de întors al fluidului de răcire.	56 .
2.3.2.1. Modelarea pe calculator analogic a răcirii forțate a unui cablu de mare putere.	58 .
2.3.2.2. Modelarea pe calculator numeric a răcirii forțate a unui cablu de mare putere.	60 .
2.3.2.3. Soluții analitice pentru sistemul de ecuații diferențiale(2.127)	62 .

	Pag.
2.4. Incercări experimentale în LIT-ICPE	
București, IPTV Timișoara și rezultate obținute prin calcul privind încălzirea cablurilor	64
2.4.1. Laboratorul de înaltă tensiune al ICPE București	65
2.4.2. Laboratorul de Rețele electric în cablu din I.P.București.	66
2.4.3. Laboratorul de Modele pentru TTI din IPTV Timișoara.	67
2.4.4. Rezultate obținute prin măsurători experimentale.	68
2.4.5. Rezultate obținute prin calcul	74
2.4.5.1. Aplicarea metodei funcțiilor Green	74
2.4.5.2. Simularea pe calculator analogic tip MEDA 42 TA.	78
2.4.5.3. Calculul regimului de durată pentru cabluri trifazate.	86
2.4.5.4. Calculul regimului de durată pentru cabluri monofazate	90
Cap.3. CALCULUL REPARTITIEI CIMPULUI ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA COMPUSĂ DIN MAI MULTE STRATURI ÎN ZONA CILINDRICĂ A CABLURILOR	94
3.1. Cimpul electric în izolația unui cablu cu două straturi, la aplicarea unui impuls dreptunghiular	101
3.2. Cimpul electric în izolația unui cablu cu două straturi, la aplicarea tensiunii alternative.	108
3.3. Cimpul electric în izolația din trei straturi a unui cablu, la aplicarea tensiunii continue	113
3.4. Cimpul electric în izolația din trei straturi a unui cablu, la aplicarea tensiunii alternative.	116
3.5. Aplicații numerice și încercări în Laboratorul de înaltă tensiune din IPTV Timișoara	118
3.5.1. Încercarea cablului tip A2YSEY 1x120 mm ² 12/20 kV fabricat la ICPE București.	118
3.5.2. Modelarea pe calculator a solicitării izolației cablului tip /HXADMK 1x500 mm ² 110 kV fabricat de firma NOKIA-Finlanda.	123

	Pag.
Cap.4. CALCULUL REPARTITIEI CIMPULUI ELECTRIC IN ZONA PROFILULUI DEFLECTOR AL CABLURILOR	129 .
4.1. Cimpul electric in izolația conului deflector cu un singur dielectric, fără pierderi dielectrice.	133
4.2. Cimpul electric in izolația conului deflector cu "n" straturi dielectrice, fără pierderi	137
4.3. Metoda diferențelor finite pentru calculul cimpului electric in profilul deflector	140
4.4. Calculul profilului deflector de întărire și respectiv de reducere a izolației.	144
4.5. Cimpul electric in izolația profilului deflector liniarizat, cu două straturi dielectrice, cu pierderi dielectrice, la aplicarea tensiunii continue.	147
4.6. Cimpul electric in izolația profilului deflector cu două straturi dielectrice - cu pierderi, la aplicarea tensiunii alternative.	156
4.7. Verificări experimentale și rezultate obținute prin calcul.	158
5. CONCLUZII	168
6. A N E X E	170
7. BIBLIOGRAFIE.	180

INTRODUCERE

Creșterea capacității de transport și extinderea domeniului de tensiuni ale cablurilor, legată de dezvoltarea în ritm deosebit a rețelelor și sistemelor electrice, ridică o serie de probleme din cele mai complexe. Valoarea deosebită a investițiilor, durata mare de viață a cablurilor și siguranța în funcționare necesară, problemele specifice în fabricare și montare, pledează pentru eforturi susținute de cercetare și tehnologie în domeniul cablurilor și impune perfecționarea metodelor de calcul ale acestora.

Aceste preocupări sînt scoase în evidență de numeroase articole publicate în ultimul timp în literatura de specialitate. Este semnificativ și faptul că în cadrul Comisiei Internaționale a Marilor Rețele Electrice - CIGRE, Comitetul de studii 21 este specializat în problemele cablurilor de înaltă tensiune.

Problema prezintă un interes deosebit și în țara noastră unde producția de cabluri se dezvoltă într-un ritm accentuat, fabricîndu-se o gamă largă de tipuri constructive atât pentru necesități interne cît și pentru export. Potrivit prevederilor Programului de cercetare științifică, dezvoltare tehnologică și introducere a progresului tehnic pe perioada 1986-1990 - activitatea de cercetare va trebui să asigure creșterea substanțială a nivelului tehnic și calitativ al produselor, îmbunătățirea structurii producției, sporirea gradului de competitivitate a produselor românești.

Obiectul prezentei teze, care se referă la metode de calcul a solicitării izolației cablurilor de înaltă tensiune și mare putere, reprezintă o temă de actualitate și de importanță, mai ales că se are în vedere trecerea la fabricația în țara noastră a cablurilor cu tensiuni nominale de 110 kV și mai mari. Perfecționarea metodelor de calcul a cablurilor de înaltă tensiune permite o mai bună cunoaștere a solicitărilor rețelei a cablurilor și pe baza lor - o proiectare optimă a acestora.

Teza doctorat cuprinde cinci capitole la care se adaugă un set de anexe și lista bibliografiei consultate.

În capitolul 1 se prezintă o sinteză bibliografică privind caracteristicile cablurilor de înaltă tensiune și mare putere și stadiul actual al cercetărilor în domeniul cablurilor.

In capitolul 2 se analizează principalele metode de calcul ale regiului termic atât pentru cablurile cu răcire naturală cât și pentru cablurile cu răcire forțată. Sînt prezentate modelările efectuate de autorul tezei pe calculator analogic și numeric, precum și încercările experimentale din cadrul unui contract de cercetare aplicat în Laboratorul de înaltă tensiune de la ICPE București.

In capitolul 3 se tratează metodele de calcul a repartiției cîmpului electric în izolația compusă din mai multe straturi în zona cilindrică a cablurilor. Sînt prezentate metode originale care au fost soluționate atât analitic, cât și pe calculatoare. Încercările experimentale au fost efectuate în Laboratorul de înaltă tensiune din IPTV Timișoara.

In capitolul 4 se continuă aplicarea metodelor de calcul a solicitării electrice a izolației stratificate în zona profilului deflector pentru manșonarea de joncțiune sau cutiile terminale ale cablurilor. Metodele propuse de autor permit o soluționare cu un grad ridicat de generalizare prin folosirea unor notații adecvate și pot fi aplicate în mai multe variante de execuție a sistemelor de izolație din zona profilului deflector.

Capitolul 5, capitol de concluzii generale, sintetizează aprecierile și concluziile desprinse în cadrul fiecărui capitol, evidențînd elementele originale ale lucrării.

Preocupările autorului privind problema solicitării izolației cablurilor de înaltă tensiune se concretizează și prin lucrările publicate individual sau în colaborare [14]÷[16-17].

Teza de doctorat reprezintă rezultatul unei activități de mai mulți ani sub îndrumarea atentă și generoasă a tovarășului profesor dr.ing. Ioan Novac, pentru care autorul îi aduce respectuoase mulțumiri.

Autorul exprimă sincere mulțumiri tovarășilor: profesor dr.ing. Viorel Negru și conf.dr.ing. Alexandru Vasilevici - de la Institutul politehnic "Traian Vuia" Timișoara și prof.dr.ing. Arie A.Arie - de la Institutul politehnic București, pentru sprijinul, preocuparea și încurajarea acordată pentru finalizarea tezei. De asemenea, autorul a fost sprijinit în aplicațiile experimentale de către tov.ing. Gheorghe Bucea - șef Secție cabluri de înaltă tensiune IDE București, de către tovarășii din colectivul LIT-ICPE București: dr.ing. Ioan Marinescu, ing. Alexandru Vădcan, ing. Mihai Maricaru și ing. Dan Cristian Rucinechi, cărora le aduce calde mulțumiri.

Autorul aduce mulțumiri colegilor din colectivul Catedrei Electroenergetice din IPTV Timișoara și tuturor care au contribuit direct sau indirect la realizarea tezei de doctorat.

C a p i t o l u l 1.

CARACTERISTICILE CABLURILOR DE INALTA T ENSIUNE SI MARE PUTERE SI STADIUL ACTUAL AL CERCETARILOR IN DOMENIUL CABLURILOR.

1.1. ROLUL SI ASPECTE CARACTERISTICE UTILIZARII CABLURILOR DE INALTA TENSIUNE SI MARE PUTERE INTR-UN SISTEM ELECTROENERGETIC.

O caracteristică a etapei actuale de dezvoltare a sistemelor electroenergetice constă în realizarea unor unități furnizoare de energie electrică de putere foarte ridicată și în realizarea de interconexiuni la tensiuni de până la 750 kV, experimentându-se și linii de 1300 kV [1], [2], [7], [11], [19], [85], [126]. În perspectiva anului 2000 sînt analizate proiectele unor grupuri cu puterea de 1200...4000 MVA pentru supercentrale electrice de 20 000 MVA [10].

Cablurile electrice de înaltă tensiune și mare putere sînt necesare la alimentarea cu energie electrică a marilor orașe, a zonelor puternic industrializate sau care prezintă interese culturale, la traversări subfluviale sau submarine, la legături între grupurile generator-transformator și barele stațiilor de transformare, la ieșirea din stațiile de transformare a liniilor electrice aeriene (LEA) prin linii electrice în cablu (LEC).

Deși costul specific al LEC este mai mare decît al LEA și deci limitează utilizarea liniilor electrice în cablu în situații în care prezența liniilor electrice aeriene nu este acceptabilă (marile aglomerații urbane sau industriale, zone cu poluare intensă industrială sau marină, necesitatea traversării unor zone întinse cu apă) - se pot sublinia și alte avantaje ale LEC față de LEA: putere naturală mai mare, nu necesită un culoar liber de mari dimensiuni, nu sînt expuse agenților atmosferici - depuneri masive de chiciură, vânturi puternice, descărcări electrice directe sub formă de trăenet [19], [22], [34], [66], [99], [197].

Puterea naturală a LEC lungi este mult superioară puterii naturale a LEC lungi din cauza impedanței caracteristice mult mai mici a LEC. În exploatarea liniilor electrice lungi se tinde ca funcționarea să aibă loc în jurul puterii naturale. Valoarea puterii naturale a unei linii electrice lungi constituie un indicator al capacității

Înălțimii de transfer de energie a acestuia [1]. Regimul de funcționare la puterea naturală se obține când se conectează la sfârșitul liniei o impedanță egală cu impedanța caracteristică a liniei. Puterea naturală este o putere pur activă și pentru o linie trifazată are expresia:

$$P_{nat} = \frac{U_n^2}{Z_c} \quad (1.1)$$

Puterea naturală crește când impedanța caracteristică a liniei (Z_c) este mai mică. Impedanța caracteristică pentru o linie cu pierderi neglijabile are expresia relativ simplă:

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{B_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1.2)$$

LEC au o inductivitate pe unitate de lungime (L_0) mai mică decât inductivitatea LEA și capacitatea pe unitate de lungime (C_0) mai mare. În timp ce impedanțele caracteristice ale LEC au valori în domeniul $30...40 \Omega$, impedanțele caracteristice ale LEA au valori în domeniul $250...400 \Omega$.

Încălzirea LEC cu răcire naturală până la puterea naturală nu este posibilă, deoarece în aceste condiții rezultă o încălzire inadmisibil de mare; creșterea puterii transportate prin cabluri este însă posibilă dacă se adoptează o tehnică de răcire forțată potrivită. În tabelul 1.1 se prezintă o comparație privind puterile naturale pentru LEA și LEC și puterea maximă din considerente termice pentru cablurile cu răcire naturală.

Tabelul 1.1. Comparație între LEA și LEC [19].

Nr. crt.	U_n (kV)	LEA P_{nat} (MVA)	LEC P_{nat} (MVA)	LEC $P_{max.termic}$ (MVA)
1	110	30	300	190
2	220	125	1200	382
3	400	650	6400	684
4	750	2500	22500	1300

Se observă că în cazul LEC decalajul între $P_{max.termic}$ și P_{nat} crește cu creșterea tensiunii nominale și deci la tensiuni nominale mari vor fi posibilități mai mari de creștere a capacității de transport a cablurilor spre puteri care să se apropie de puterea naturală.

În cazul LEA, odată cu creșterea tensiunii nominale crește și încălzirea cablurilor ocupat de acestea (tab.1.2) cu o serie de dezavantaje pentru fondul forestier și agricol.

Tabelul 1.2. Culoar necesar pentru L E A /17/.

1	U_n /kV/	220	400	750	1300
2	P /MVA/	150	600	2000	8000
3	L ^x time culoar/m/	10	20	30	50

Principalul dezavantaj al LEC îl constituie costul mai ridicat decât al LEA dar care tinde să se micșoreze prin dezvoltarea tehnicii cablurilor și prin creșterea capacității de transport al acestora.

În tabelul 1.3 se prezintă costurile specifice comparative pentru câteva tipuri de cablu, iar în tabelul 1.4 - costurile raportate pentru cabluri răcite cu gaz și cu ulei.

Tabelul 1.3. Costuri specifice pentru L E C /51/.

Nr. crt.	Tip Parametru	Cablu clasic	Cablu cu ulei	Cablu cu SF ₆	C a b l u criogenic
1	U_n /kV/	400	400	400	120
2	P /MVA/	2500	1500	2500	2500
3	Pierderi specifice /kW/km/	350	340	270	130
4	Cost specific $\left[\frac{F}{MVA \cdot km} \right]$	4480	3740	3600	3010

Tabelul 1.4. Costuri raportate pentru LEC 392 kV și 900 MVA /88/.

Nr. crt.	Categorie	Cablu cu gaz		Cablu cu ulei	
		tip rigid	tip flexibil	8 km	32 km
1	Costul instalației complete	1,00	0,75	0,97	0,93
2	Pierderi	0,29	0,36	0,31	0,31
3	Cost total	1,29	1,11	1,28	1,24

Se observă că la puteri mari cablurile de construcție clasică nu mai sînt economice în comparație cu cablurile cu hexafluorură de sulf sau criogenice. În structura costurilor pentru cablurile criogenice experimentale intervin elemente care depind de varianta constructivă adoptată și perfecționările tehnologice (tat.1.5).

Tabelul 1.5. Costuri specifice pentru cabluri criogenice experimentale (51).

Nr. crt.	Parametri	Firma	Linde Division of Union Carbide	Furukawa Electric Co	British Insulated Callendars Cables Ltd.	Université Technique de Graz
			S. U. A.	Japonia	Anglia	Austria
1	Tensiunea nominală și puterea		138 kV - 1690 MVA	110 kV cc - 5000 MW	33 kV - 750 MVA	20 kV - 1100 MVA
2	Tip cablu		cablu coaxial rigid	cablu coaxial rigid	cablu coaxial rigid	cablu flexibil
3	Lungimea modelului		6 m	5 m	2,7 m	50 m
4	Construcția conductorilor		plăcaj de Nb pe Cu	strat de 25 Nb placat pe 1 mm Cu	folie de Nb	Nb sau Pb placat pe sirmă de Cu
5	Diametrul conductorului		30 mm	40 mm	35 mm	fascicul de fire
6	Densitatea de curent specifică		580 $\frac{A}{cm}$	240 $\frac{A}{cm}$	190 $\frac{A}{cm}$	100 $\frac{A}{cm}$
7	Curent maxim		5,4 kA	3 kA	2,08 kA	10,7 kA
8	Cost estimativ specific		1900 $\frac{F}{MVA \cdot Km}$	-	3750 $\frac{F}{MVA \cdot Km}$	2200 $\frac{F}{MVA \cdot Km}$

1.2. EVOLUTIA, PARAMETRII PRINCIPALI SI EXEMPLE DE CABLURI DE INALTA TENSIUNE CONSTRUITE PE PLAN MONDIAL.

În mai puțin de un secol, cablurile au cunoscut o mare varietate constructivă, o continuă creștere a tensiunii nominale și a capacității de transport. Pe baza experienței obținute la fabricarea cablurilor telegrafice cu izolație de iută sau de gutapercă, au fost construite primele cabluri de forță pentru tensiunea de 2 kV cu izolație de iută.

Primul cablu de 10 kV a fost pus sub tensiune în anul 1891 la Londra de către Ferranti (24). Cablul avea o lungime de cca 10 km, conductoare din cupru, izolație din hirtie impregnată în ulei și a necesitat 7 000 de îmbinări, deoarece tronșoanele aveau lungimea de 20 feet (6,094 m).

Protecția izolației cablurilor împotriva umezelii a fost soluționată prin confecționarea unui mantale de plumb.

Izolația cablurilor de forță a fost realizată și din cauciuc vulcanizat sau pinză uleiată. Cauciucul vulcanizat este elastic și foarte rezistent la acțiunea umidității, dar proprietățile dielectrice scad sub acțiunea ionizării și ozonului (106). Izolația din pinză uleiată este flexibilă și rezistentă la acțiunea uleiului și a apei, adăite o temperatură de încălzire mai mare decât cauciucul vulcanizat și rezistă mai bine la acțiunea ozonului. La tensiuni mai mari de 30 kV, în izolația din pinză uleiată apar pierderi dielectrice mari și nu se pot elimina ionizările favorizate de existența unor straturi de aer între straturile de pinză.

O mare răspândire au primit cablurile cu izolație de hirtie și ulei, datorită unui preț de cost mai scăzut decât cele cu izolație din cauciuc vulcanizat sau pinză uleiată. Materialul tradițional a devenit hirtie natron chimic pură, impregnată până la saturare cu ulei de cablu. Uleiul de cablu asigură atât o rigiditate dielectrică omogenă în lungul cablului, evită prezența golurilor de aer în izolație și împiedică umezirea hirtiei. La cablurile de medie tensiune se utilizează un ulei mai viscos (masă de impregnare migratoare sau nemigratoare - obținută prin amestecarea uleiului cu substanțe de adăus - de exemplu - colofoniu). La cablurile de înaltă tensiune se utilizează un ulei mai fluid, cu o viscozitate similară cu cea a uleiului de transformator. Se poate utiliza uleiul mineral sau uleiuri sintetice. Uleiul sintetic - de tipul dodecilbenzen are o viscozitate redusă, o mare stabilitate la solicitări termice și electrice, o rezistență mare la îmbătrânire prin oxidare și o bună capacitate de absorbție a gazelor care apar în timpul funcționării cablului (23).

Creșterea tensiunii nominale la 110 kV și mai mult a fost posibilă prin fabricarea cablurilor cu ulei sub presiune sau cu gaze inerte sub presiune, pentru evitarea posibilităților de apariție a ionizărilor în incluziunile gazoase dintre straturile de izolație solidă în timpul proceselor succesive de încălzire și răcire. Creșterea în continuare a tensiunii nominale a fost posibilă prin creșterea presiunii uleiului sau a gazului. În cazul presiunilor ridicate - cablurile au fost introduse în țevi de oțel.

Cablurile de înaltă tensiune și mare putere se execută în general de tip monofazat și se pozează câte trei faze în paralel (fig.1.2) în configurație: triunghi și U în plan orizontal cu transpuneri. Se obțin cabluri mai ușoare pe unitatea de lungime, se sim-

plifică relativ și tehnologia de fabricare și de montaj și se obține o disipare mai bună spre exterior a căldurii dezvoltate în cele trei faze. Din această categorie de ansamblu de cabluri monofazate fac parte cablurile cu circulație internă de ulei și cablurile cu gaz sub presiune interioară.

Au fost proiectate și cabluri de înaltă tensiune de tip trifazat introduse într-o teavă de oțel cu ulei sau cu gaz (azot, hexafluorură de sulf) sub presiune. Fiecare fază a cablului are o izolație proprie și ecrane din folii conductoare perforate pentru a permite o circulație a dielectricului fluid de impregnare. Din această categorie fac parte cablurile cu circulație externă de ulei și cablurile cu gaz sub presiune exterioară.

Cablurile cu circulație de gaz exterioară sau interioară s-au dovedit mai avantajoase în comparație cu cablurile cu ulei, prin simplificarea aparatajului și a instalațiilor pentru obținerea presiunilor necesare, cât și prețul de cost mult mai scăzut al gazului în raport cu uleiul [77], [88], [131]. De asemenea, se recomandă utilizarea ^{cablurilor} cu gaz pentru trasee verticale (evacuarea energiei dintr-o CHE subterană) sau cu mari denivelări.

Creșterea capacității de transport a fost posibilă prin introducerea răcirii forțate a cablurilor. Pierderile de energie prin efect Joule în conductor, în ecrane și în armăturile metalice - cât și pierderile de energie în dielectric trebuie preluate de fluidul de răcire. Răcirea forțată a cablurilor se poate realiza în următoarele variante: răcire interioară, răcire exterioară, răcire laterală și răcire mixtă internă-externă. În cazul cablurilor cu răcire forțată internă - fluidul de răcire circulă prin canalul central al cablului, către un rezervor și un schimbător de căldură pentru răcire prevăzut la intervale de 5-10 km. Circuitul de dus pentru ulei îl poate constitui o fază a cablului, iar circuitul de întors - celelalte două faze în paralel. În cazul cablurilor cu răcire forțată externă fluidul de răcire circulă prin teava de oțel în care se găsește plasată o fază sau toate cele trei faze ale cablului. Fluidul de răcire poate circula și printr-un sistem de conducte pozate în paralel cu fazele cablului - în cazul răcirii laterale. Pot exista și sisteme mixte.

Sistemele de răcire forțată au permis mărirea capacității de încărcare a cablurilor, dar nu și micșorarea pierderilor de energie. În multe laboratoare se experimentează cabluri hiperrezistive și supraconductoare [7], [21], [39], [51], [111], [112], [114]. Prețul de cost ridicat al instalațiilor de lichefiere a heliului și azotului, a limitat deocamdată extinderea utilizării acestor cabluri.

Progresele importante obținute în domeniul elastomerilor și al maselor plastice au dus la fabricarea unor cabluri de înaltă tensiune de "tip uscat" - fără fluid de înregnare lichid sau gazos. Izolația este realizată din polietilena reticulată chimic (XLPE) sau cauciuc sintetic etilen-propilen (EPR). La aceste cabluri nu sînt necesare accesorii speciale pentru circuitele de ulei sau de gaz, greutatea este mai mică și se pot fabrica tronsoane de cablu de lungimi mai mari și de asemenea operațiile de înțreținere sînt mai simple [74], [75], [39], [139], [139], [140].

În etapa actuală se folosesc frecvent cabluri de medie tensiune $U_n = 1 \div 35$ kV și cabluri de înaltă tensiune $U_n = 35 \div 275$ kV. Cablurile de foarte înaltă tensiune se încadrează în domeniul $U_n = 275 \div 1000$ kV și sînt rezultatul cercetărilor și perfecționărilor tehnologice din ultimele decenii.

Parametrii principali ai unui cablu sînt: tensiunea nominală, secțiunea și materialul conductorului, materialul izolației și tipul constructiv. În continuare se prezintă capacitățile de transport ale cablurilor cu secțiuni pînă la 2000 mm^2 , principalii parametri ai cablurilor cu diferite tensiuni nominale și exemple de cabluri de înaltă tensiune în gama 225 kV ÷ 525 kV.

Graficele din figura 1.1 dau o privire generală asupra capacității de transport în funcție de secțiunea și tensiunea cablurilor, pentru cabluri cu răcire naturală.

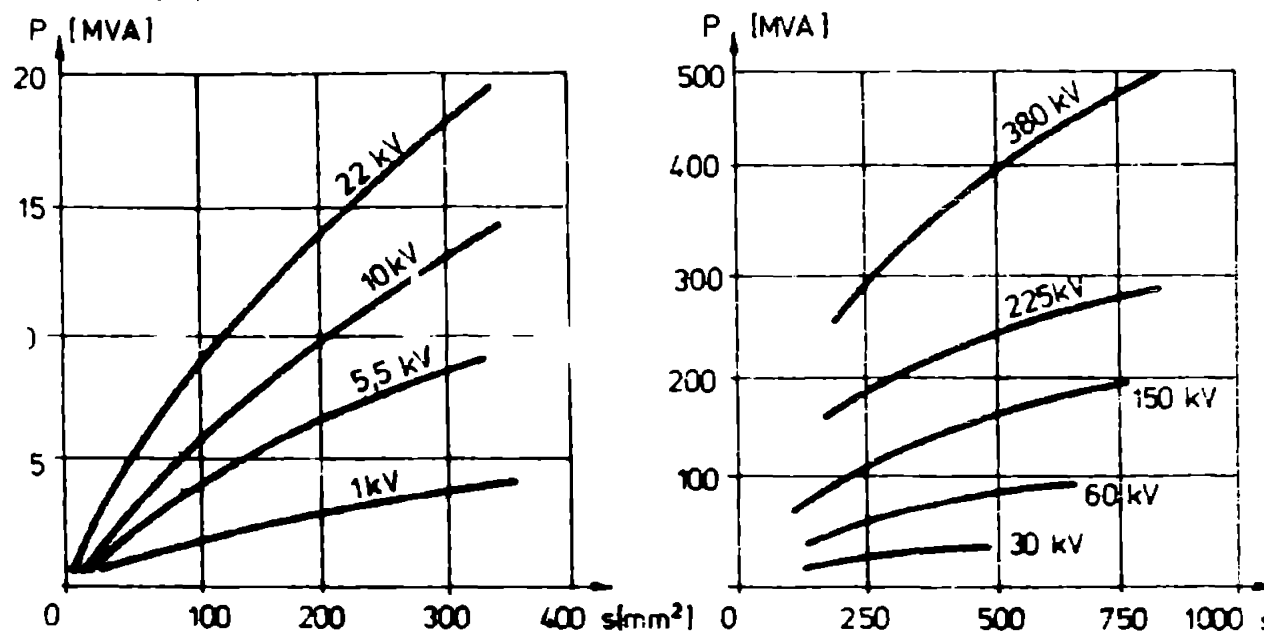


Fig.1.1. Capacitățile de transport ale cablurilor trifazate [40].

În figura 1.2 se prezintă capacitățile de transport la cabluri de 110 kV și 380 kV pentru poziția în triunghi sau în plan orizontal a fazelor, cu răcire naturală sau forțată și pentru diferite temperaturi ale apei de răcire.

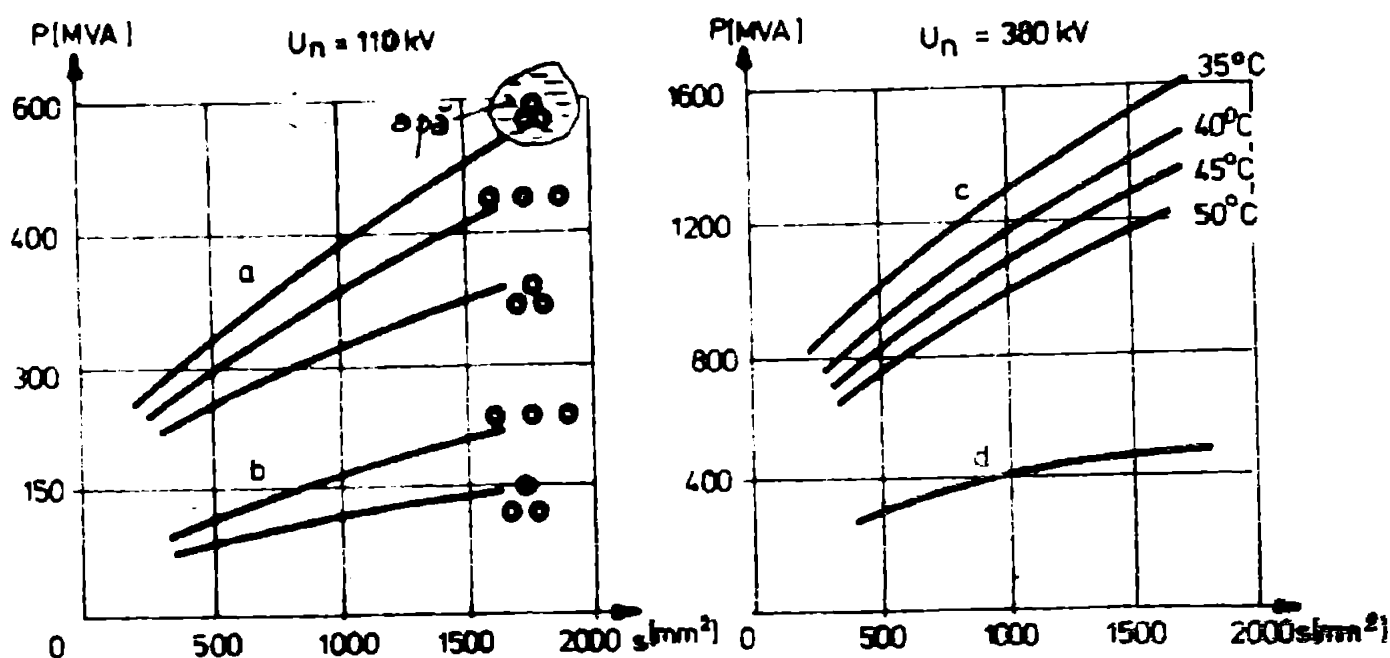


Fig.1.2. Cabluri de 110 kV și 330 kV /40?.

- a - $U_n = 110 \text{ kV}$, cabluri cu răcire forțată;
- b - $U_n = 110 \text{ kV}$, cabluri cu răcire naturală;
- c - $U_n = 330 \text{ kV}$, temperatură apei de răcire;
- d - $U_n = 330 \text{ kV}$, cabluri fără răcire.

Odată cu creșterea secțiunii conductorului cablului, se manifestă în curent alternativ o mai mare neuniformitate în repartiția densității de curent din cauza efectului de suprafață. Spre periferia conductorului densitatea este mai mare, ceea ce echivalează cu o reducere a secțiunii lui reale. Pentru a se limita încălzirea, odată cu creșterea secțiunii conductorului este necesară o reducere a densității de curent - tabelul 1.6.

Tabelul 1.6 . Valori optime pentru densitățile de curent /19?.

Nr. crt.	Secțiunea [mm ²]	$J_{\text{cupru}} \left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right]$	$J_{\text{Aluminiu}} \left[\frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right]$
1	500	1,3	1,1
2	1000	1,0	0,8
3	1500	0,8	0,65
4	2000	0,65	0,55

În tabelele A.1.1 și A.1.2 din Anexa 1 se prezintă parametrii cablurilor în domeniile de tensiuni nominale 10 ÷ 60 kV și 63 ÷ 380 kV; fiind cabluri cu răcire naturală - capacitatea de transport în regim de vară este mai redusă, decât capacitatea din regim de iarnă.

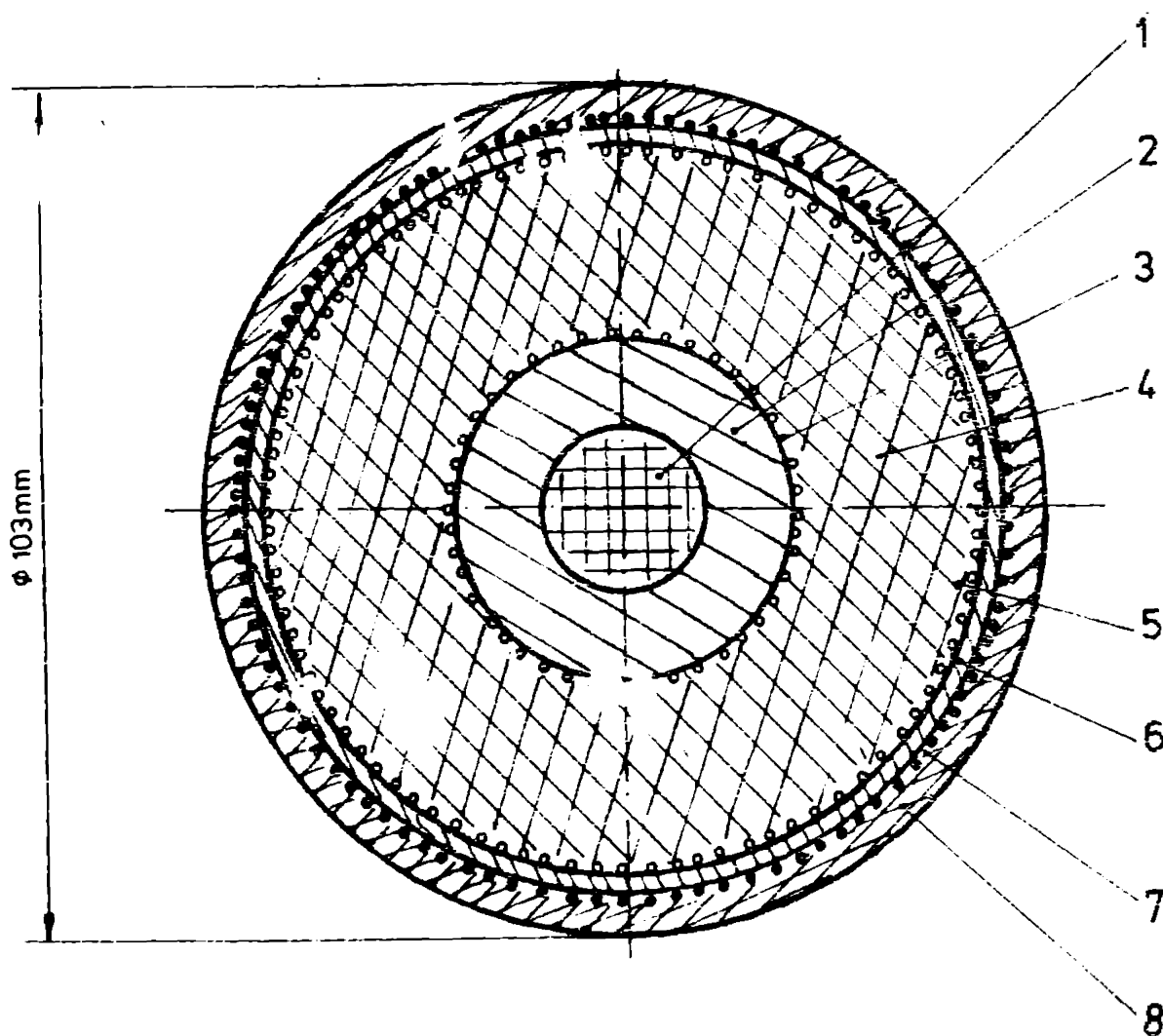


Fig.1.3. Cablu de 225 kV cu ulei.

Tabelul 1.7 . Cablu de 225 kV cu ulei.

CABLU CU ULEI 1 x 890 mm ² Cu 345 MVA - 225 kV scara 1:1				
Poz.	DESCRIERE	Ø EXT (mm)	REXT/mm ²	GROSIME RADIALA mm
1	Canal central ulei	19	9,5	9,5
2	Conductor Cu	41,3	20,65	11,15
3	Hirtie semiconduc.	43,3	21,65	1
4	Izolatie hirtiu	85,3	42,65	21
5	Hirtie metaliz.	87,3	43,65	1
6	Manta de plumb	93,5	46,75	3,1
7	Trei straturi bande inox	95	47,5	1,75
8	Manta de PVC	103	51,5	4

Tabelul 1.7 (continuare)

E.D.F.		ALTI PARAMETRI;
Centrale EMILE HUCHET		
Poz. 1	$S = 283,52 \text{ mm}^2$	
" 2	Secțiunea 890 mm^2	
" 3	$E_{\text{max}} = 8,75 \text{ V}_{\text{ef}}/\text{mm}$	
" 4	Hirtie impregnată cu dodecilbenzen	
" 5	Suprapusă pe hirtie semiconductoră	
" 6	$S = 880,37 \text{ mm}^2$	
" 7	2 benzi în paralel $30 \times 0,2$	
" 8	-	
Curentul nominal		$I = 885,27 \text{ A}$
Densitatea de curent		$J = 0,994 \text{ A/mm}^2$

În figura 1.3 și tabelul 1.7 se prezintă o secțiune și dimensiunile unui cablu cu tensiunea $U_n = 225 \text{ kV}$. Cablul a fost pus în funcțiune în 1972, între centralele termoelectrice "Emile Huchet" și stație "Saint-Vold" din orșinul Lorenei-Franța [32]. Puterea transportată este de 345 MVA și lungimea traseului de 1800 m. Temperatura maximă a conductorului a fost limitată la 70°C , iar debitul de ulei este reabil între 60...350 l/oră, în funcție de temperatură. Grosimea izolației de fază este de 21 mm.

În tabelul A.1.3 din Anexa 1 se prezintă comparativ parametrii a două cabluri cu tensiunea $U_n = 230 \text{ kV}$ de construcție canadiană și engleză [24]. Cablurile au fost proiectate pentru o capacitate de transport de 280 MVA. Pentru varianta canadiană, grosimea izolației este de 21, mm și intensitatea maximă a câmpului electric de $9,7 \text{ kV}_{\text{ef}}/\text{mm}$, iar pentru varianta engleză grosimea izolației este de 17,6 mm și intensitatea maximă a câmpului de $10,9 \text{ kV}_{\text{ef}}/\text{mm}$.

Un cablu cu ulei cu tensiunea $U_n = 275 \text{ kV}$ are parametrii prezentați în tabelul A.1.4 din Anexa 1. Cablul a fost construit în Japonia în anul 1960, în trei variante cu secțiuni diferite - pentru capacități de transport cuprinse între 133 MVA și 400 MVA. Grosimea izolației pentru aceste variante este de 21...22 mm, iar intensitățile maxime ale câmpului electric de 11...13 kV/mm [24].

La Sydney - în Australia [37] s-a pus în funcțiune un tronșon de cablu de 370 kV, pentru a transporta pe o distanță de 19,5 km, din zona aglomerată de sud a orașului, o putere de 600 MVA.

Cablul are secțiune 1200 mm^2 - cupru cu un canal central pentru ulei cu diametrul 16 mm, grosimea izolației 17,6 mm și intensita-

tea maximă a câmpului 15 kV/mm. Cablul are răcire naturală, solicitarea termică fiind caracteristică unui regim de vară permanent. Un sistem de răcire artificial - încă neexecutat - ar permite creșterea puterii la 1200 MVA. Costul specific al cablului a fost de 770 \$/MVA/km - iar alți parametri sînt prezentați în tabelul A.1.5.

Firmele Anaconda Wire and Cable Co, General Cable Corporation, The Okonite Company și Phelps Dodge Copper Products Corporation au construit cabluri cu tensiunea $U_n = 345$ kV pentru puteri de 450...500 MVA [24]. Grosimea izolației de fază este de 25,4 mm, iar alți parametri sînt prezentați în tabelul A.1.6.

Un tronson de cabluri cu tensiunea de 380 kV a fost pus în funcțiune la Viena în anul 1979 [86]. Lungimea tronsonului este de 12 km, iar capacitatea de transport cu răcire naturală este de 600 MVA. În următoarea etapă se va introduce răcirea forțată care va permite creșterea capacității de transport pînă la 1100 MVA. Răcirea va fi asigurată de o tubulatură din polietilenă prin care circulă apă, plasată în paralel cu fazele cablului. Extremitățile cablului, în posturile capsulate cu SF₆, vor fi răcite cu o soluție de glicol - în circuit închis. Cablul are secțiunea 1200 mm² din cupru, cu un canal central cu diametrul de 12 mm pentru ulei. Grosimea izolației de hirtie este de 23 mm, iar intensitatea maximă a câmpului electric nu depășește 15 kV/mm.

Pentru tensiunea de 405 kV, firma Cable de Lyon a realizat o legătură în cablu în anul 1956, care a fost montată la centralele Lesclé din Suedia [40]. Cablul transportă 890 MVA. Tot un cablu de 425 kV a fost fabricat în 1956 de aceeași firmă și care a fost instalat la centralele Kinstad-Suedia. Grosimea izolației de hirtie a cablului este de 22 mm, iar intensitatea maximă a câmpului electric este de 16,1 kV/mm. Alți parametri sînt prezentați în tabelul A.1.7.

Se poate remarca evoluția sistemului de alimentare cu energie electrică a insulei Vancouver din Canada, care în prezent conține și cabluri cu tensiunea $U_n = 525$ kV și puterea 1200 MVA [130]. În anul 1956 insula era alimentată de pe continent printr-un sistem de 7 cabluri monopolare (două circuite trifazate și un cablu monopolar de rezervă) la tensiunea de 138 kV și puterea 240 MVA [24]. În anul 1970 sistemul a fost completat cu 5 cabluri de curent continuu (două circuite ± 300 kV și o rezervă) care transportă 840 MW. În anul 1983 sistemul a fost din nou completat cu

două circuite trifazate cu tensiunea nominală $U_n = 525$ kV și puterea 1200 MVA [130]. Cablul de 138 kV are grosimea izolației de 14,6 mm, iar intensitatea maximă a câmpului de 17 kV/mm, iar ceilalți parametri sînt prezentați în tabelul A.1.9 din Anexa 1.

Se pot menționa și realizări de cabluri de curent continuu: cablul cu tensiunea ± 100 kV, puterea 160 MW montat în 1951 între Franța și Anglia; cablul de 100 kV și 20 MW care face legătura între Insula Gotland și Suedia; cablul de 250 kV 250 MW între Suedia și Danemarca; cablul de 200 kV și 100 MW între I.Sardinia - I.Corsica și Italia [24].

*

În țara noastră s-a pus în funcțiune în anul 1950 prima linie în cablu de 60 kV, pentru traversarea Dunării între Giurgiu și Ruse [5]. În anul 1959 a fost achiziționată de la firma Pirelli - Italia prima furnitură de cablu de 110 kV cu izolație de hirtie și ulei sub presiune, pentru racordarea la sistem a stației electrice București centru [124]. În prezent sînt în funcțiune cabluri de 110 kV în orașele: București, Galați, Craiova, Reșița, Arad, Oradea, Cluj; la CTE Luduș; pentru traversarea Dunării la Hirșova, Măcin; la mai multe CHE construite subteran. La CHE Porțile de Fier, legătura între barele stației de 220 kV și transformatoarele de 15,75/242 kV-190 MVA, aferente fiecărui hidrogenerator, este realizată prin cabluri de 220 kV, cu secțiunea de 300 mm^2 , din cupru și cu circulație de ulei.

1.3. PROBLEME SPECIFICE PRIVIND CONCEPTIA, CONSTRUCTIA SI MONTAREA C ABURILOR DE INALTA TENSIUNE.

Circuitul de ulei al unui cablu cu izolația de hirtie și ulei sub presiune, prezentat în figura 1.4 conține următoarele elemente:

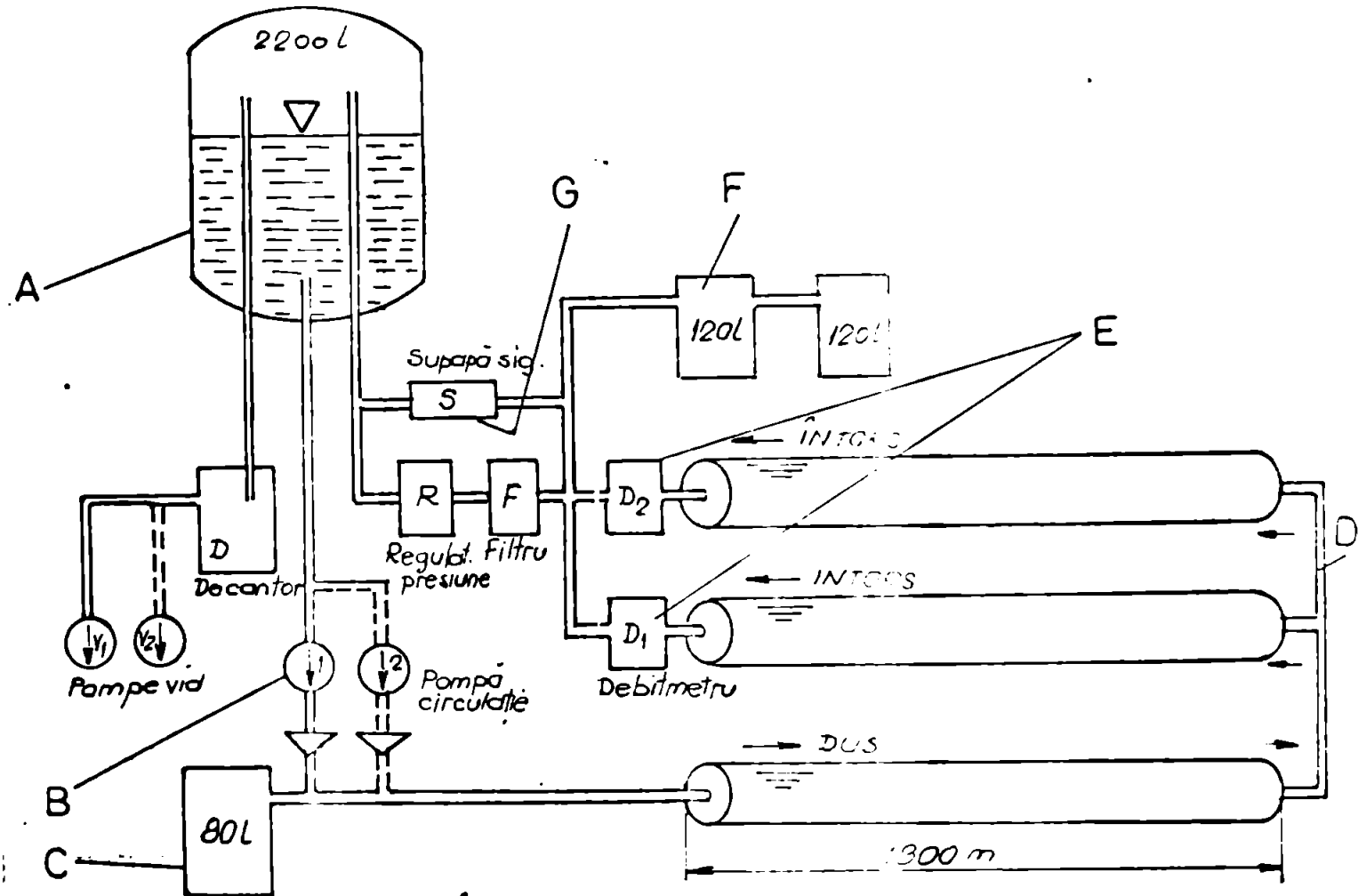


Fig.1.4. Circuitul de ulei al unui cablu de 225 kV (32).

A - rezervor central (2000 l) cu pompe de vid (4...5 torr); B - pompe de circulație; C - rezervor tampon (80 l); D - întorcerea uleiului; E - debitmetre; F - rezervoare de joasă presiune; G - filtru și regulator presiune, supapă siguranță.

A) - un rezervor central de mare capacitate (2200 l) capabil să preia întreaga cantitate de ulei din canalizare, prevăzut cu două pompe de vid (4 și respectiv 5 torr) pentru conservarea proprietăților dielectrice ale uleiului;

b) - două pompe de punere sub presiune, pentru circulația uleiului, prevăzute cu clapete antiretur;

c) - un rezervor tampon de înaltă presiune, cu capacitatea de 80 l, recordat în derivație la ieșirea din pompele pentru ulei și la intrarea într-una din fazele cablului - care constituie circuitul de dus;

D) - la extremitatea opusă a tronsonului de cablu, uleiul care provine de pe o fază este repartizat pe celelalte două - care constituie circuitul de întors:

E) - pe fiecare din cele două faze în care uleiul circulă în paralel, se montează câte un debitmetru notate cu D_1 , D_2 , pentru verificarea unei repartizări egale a debitului;

F) - la ieșirea din circuitul de întors al uleiului, se racordează în derivație două rezervoare de joasă presiune cu capacitatea de 120 l;

G) - întoarcerea în rezervorul central se efectuează printr-un filtru de ulei F și un regulator de presiune R, care pot fi șuntate în caz de avarie, de o legătură în paralel pe care se găsește o supapă de siguranță S. Răcirea uleiului se efectuează de la rezervorul central, amplasat la înălțimea de 2,5 m de la sol, spre mediul ambiant.

Alte accesorii importante pentru un cablu cu ulei sub presiune le constituie [23]:

- cutiile terminale care îndeplinesc rolul de terminație pentru izolația de fază a cablului, a ecranului metalic și a mantalei exterioare de protecție anticorozivă; asigură continuitatea circuitului electric prin racordul din cupru sau aluminiu; etanșează circuitul de ulei și creează posibilitatea alimentării cu ulei a circuitului acestuia;

- manșoanele normale de joncțiune, manșoanele de stopare și manșoanele de alimentare cu ulei;

- rezervoarele de ulei, cu celule metalice elastice umplute cu azot sub presiune. La creșterea temperaturii cablului determinată fie de curentul de încălzire al cablului, fie de temperatura mediului ambiant rezultă o mărire prin dilatare a volumului de ulei. Volumul excedentă de ulei este preluat de rezervoare, prin comprimarea elementelor elastice. Scăderea temperaturii cablului determină o reducere prin contracție a volumului de ulei din cablu și ca urmare apare o circulație de ulei dinspre rezervoare spre cablu.

Probleme specifice ridică sistemele de conexiuni ale mantalelor metalice ale cablurilor de înaltă tensiune. La cablurile de curent alternativ datorită inductivităților mutuale între conductoarele de fază și manta apar în mantalele metalice tensiuni de inducție. Legarea la pământ în mai multe puncte a mantalelor metalice permite apariția unor curenți de circulație și deci a unor pierderi suplimentare. Legarea la pământ într-un singur punct elimină curenții de circulație dar prezintă dezavantajul că la lungimi mari pot

să apară tensiuni periculoase, chiar în regim staționar, în punctul extrem nelegat la pământ. Metodele de calcul sînt prezentate în [5], [100]. Se poate arăta că la aplicarea unui impuls de tensiune pe conductorul de fază, izolația mantalei metalice va fi solicițată în extremitatea opusă punctului de legare la pământ, la o valoare a tensiunii apropiată de valoarea maximă a impulsului aplicat [147].

Mantalele metalice ale cablurilor pot fi conectate în următoarele variante [25], [68]:

a) legarea la pământ a singurii extremitate și transpunerea fazelor - dacă sînt trei tronsoane, sau folosirea unui conductor de ecranare paralel și transpus (al doilea capăt al mantalelor se leagă la pământ prin rezistențe neliniare (fig.1.5.a și fig.1.5.b)).

b) legarea la pământ într-un singur punct a unui tronson scurt (fig.1.6);

c) legarea a două tronsoane într-un singur punct la pământ (fig.1.7);

d) folosirea unui conductor în paralel, transpus, la care se leagă mantalele celor două tronsoane în zona de mijloc (fig.1.8);

e) transpunerea mantalelor metalice pentru trei tronsoane (fig.1.9);

f) conectarea în sistem "cross bonding" - adică transpunerea fazelor pentru trei tronsoane, dar cu inserierea mantalelor de la cele trei faze pentru ca suma tensiunilor induse într-un astfel de circuit să fie aproape zero (fig.1.10). (în cutiile de transpunere se montează rezistențe neliniare R_N pentru punerea la pământ în cazul apariției unor supratensiuni).

517 400
359 E

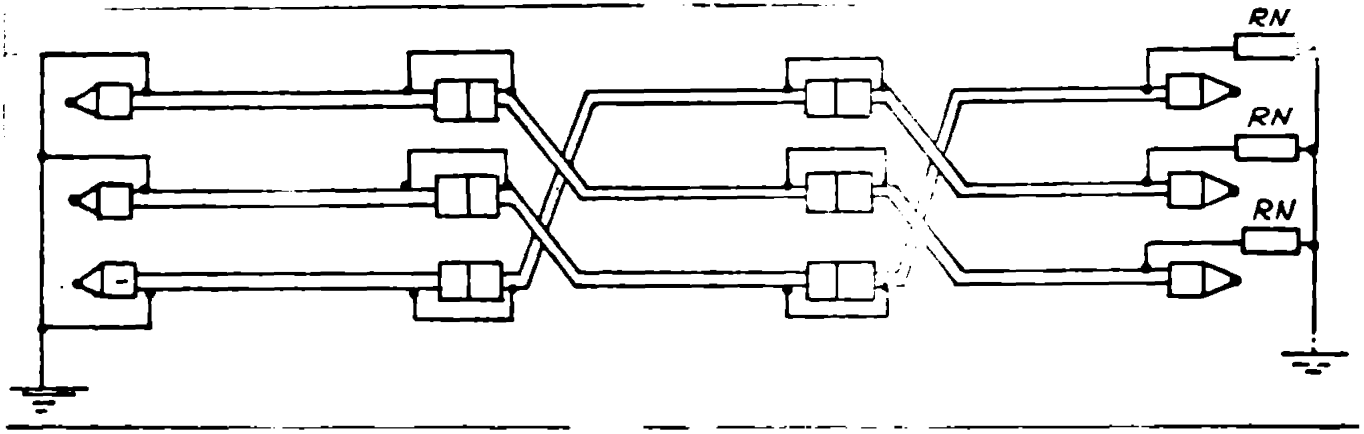


Fig.1.5.a. Transparența fazelor în cazul a trei tronsoane, pentru cabluri pozate orizontal (principiu).

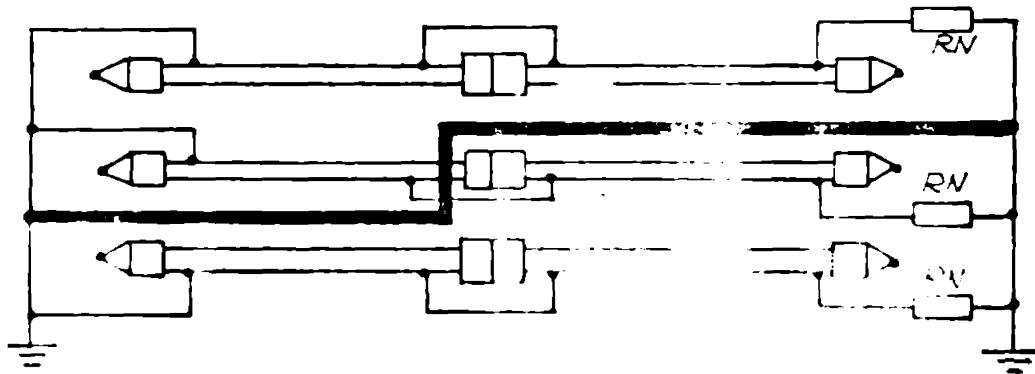


Fig.1.5.b. Poziția unui conductor de ecranare paralel cu fazele cablului și transparent.

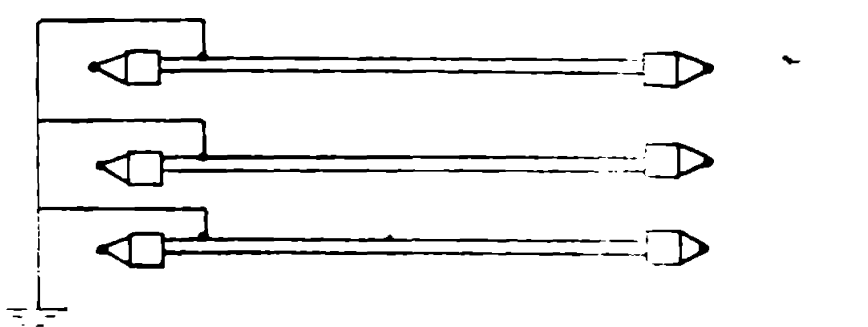


Fig.1.6. Legarea la pământ într-un singur punct (principiu).

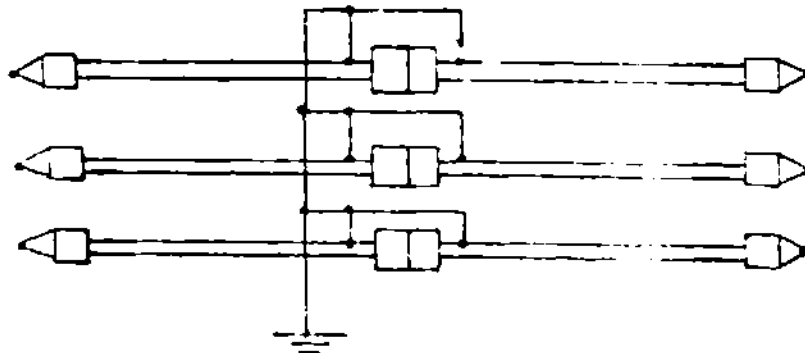


Fig.1.7. Două tronsoane legate la pământ într-un singur punct, în zona centrală.

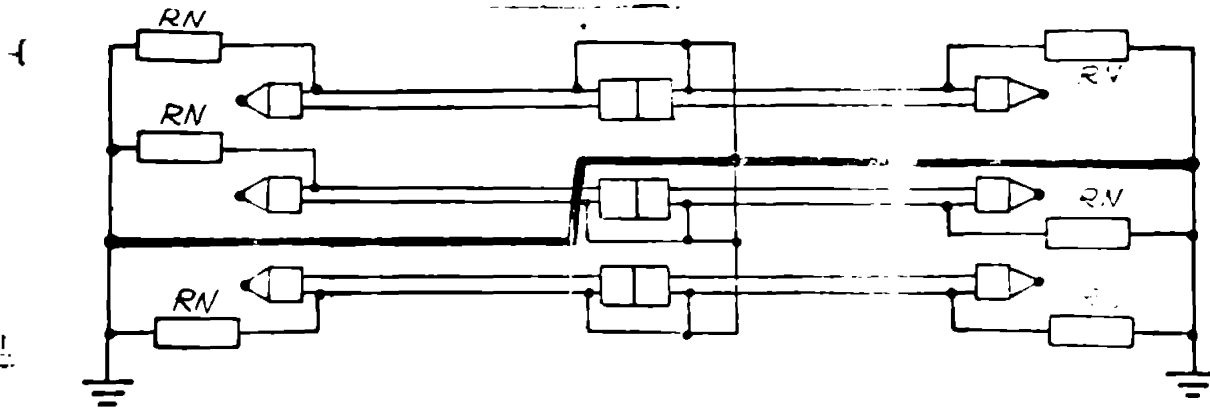


Fig.1.8. Conductor în paralel, transpus, la care se leagă mentalele metalice în zona de mijloc.

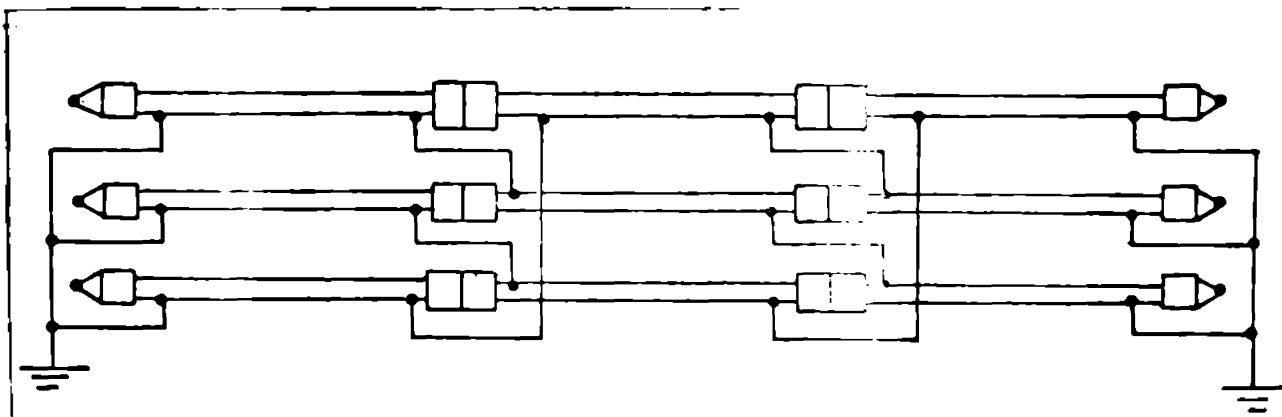


Fig.1.9. Transpunerea mentalelor metalice pentru trei transoane (principiu).

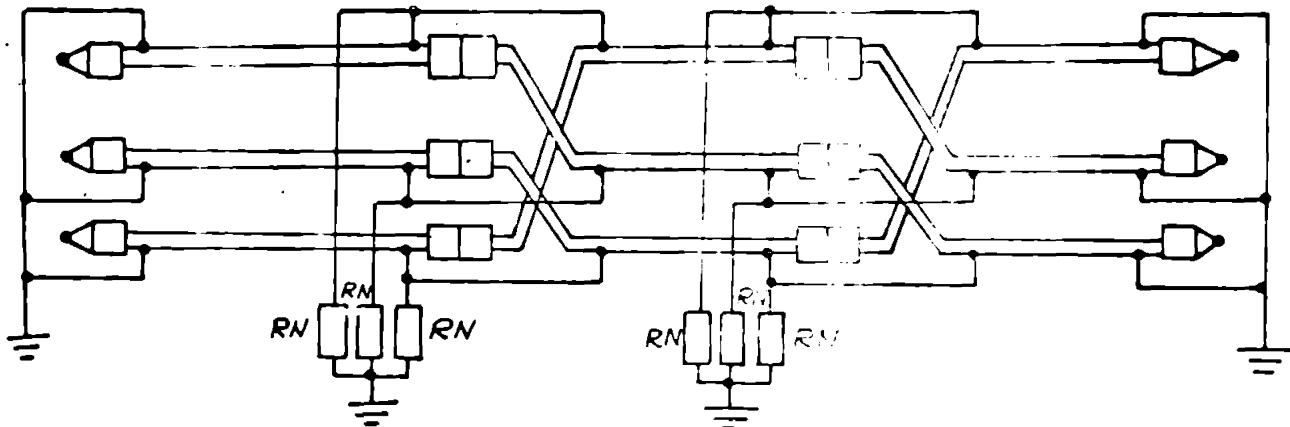


Fig.1.10. Conexiune cross-bonding.

La execuția manșonelor de joncțiune și a cutiilor terminale apar probleme tehnologice speciale datorită faptului că acestea trebuie să se execute în condiții de șantier, spre deosebire de cablul propriu-zis executat în întreprinderea furnizoare specializată.

În figura 1.11 se prezintă o secțiune într-un manșon de joncțiune pentru conectarea mentalelor în sistem de conexiune "cross-bonding" pentru un cablu cu 4 uli sub presiune. Pentru fiecare tip constructiv de cablu - modul de execuție manșonelor

de joncțiune și a cutiilor terminale conține o serie de elemente specifice [23], [54], [55], [56], [70], [78]. O problemă generală care apare la refacerea izolației și a ecranelor, o constituie asigurarea unei repartiții cât mai uniforme a intensității câmpului electric și o scădere progresivă a acestuia, fără puncte de discontinuitate. Pentru această izolație trebuie întărită și redusă după un anumit profil deflector care - în caz de liniarizare devine un con deflector.

Metodele de calcul pentru izolația profilului deflector nu sînt suficient de dezvoltate în lucrări de specialitate - motiv pentru care autorul s-a preocupat de elaborarea unei metode de calcul cât mai exact (în cap.4).

1.4. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL CABLURILOR DE ÎNALTA TENSIUNE ȘI MARE PUTERE.

În cadrul ultimei Sesiuni CIGRE din 29.08.-06.09.84 [126], referențele s-au axat pe trei subiecte principale:

a) Probleme de fiabilitate ale liniilor în cablu submarine (stabilitatea mecanică, compensarea inductivă la extremități, utilizarea unor vehicule submarine speciale pentru studiul și amenajarea traseelor de pozare ale cablurilor, dezvoltarea unor noi metode de calcul);

b) Probleme de concepție, fabricație, instalare și întreținere a cablurilor cu izolație sintetică (influența umidității asupra tensiunii de țirere a izolației din XLPE, evoluția descărcărilor arborescente, comparație între metodele de reticulizare a polietilenei, metode de încercare pentru punerea în evidență a gradului de îmbătrânire a izolației sintetice, metode de realizare a joncțiunilor, încercări privind accesoriile cablurilor);

c) Cabluri de foarte înaltă tensiune de o nouă concepție, care se referă la:

c.1. cabluri pentru transportul unor mari puteri (analiza și optimizarea soluțiilor adoptate pentru linii lungi sau scurte, soluții pentru răcirea forțată și riscul defectării instalațiilor de răcire - calculul regimului termic la întreruperea răcirii forțate);

c.2. cabluri de curent continuu (încercări efectuate pentru verificarea exactității metodelor de calcul a gradientilor electrici în izolație la suprapunerea unor tensiuni de impuls sau la inversarea bruscă a polarității, protecția prin limitarea tensiunilor tranzitorii);

c.3. cabluri cu izolație gazoasă (aspecte economice care limi-

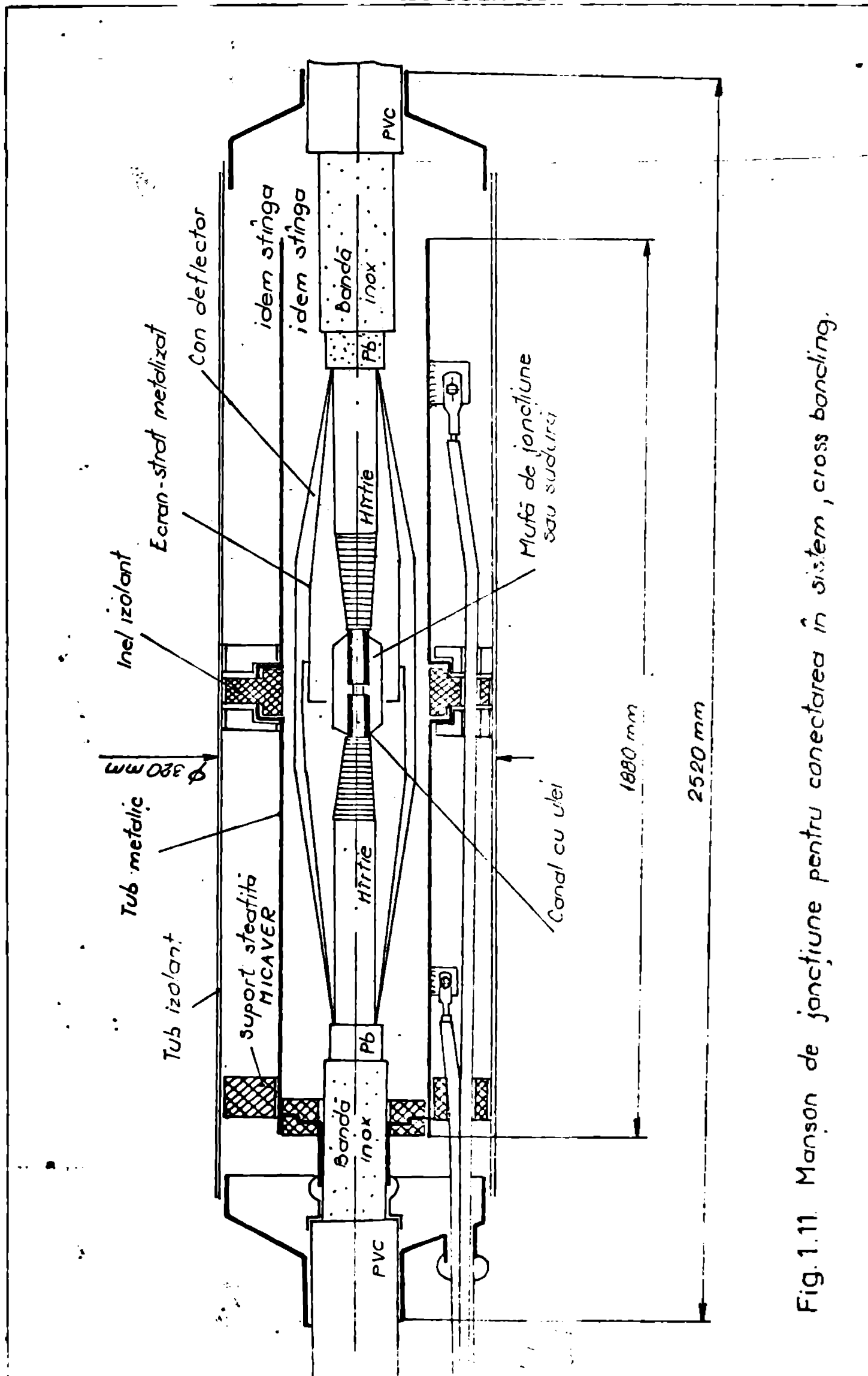


Fig.1.11. Manson de jonctiune pentru conectarea în sistem, cross banding.

tează utilizarea cablurilor cu SF₆, soluții de protecție antisismică aplicate în Japonia, influența umidității asupra tensiunii de tiere a izolației gazease, metode de protecție specifice regimurilor tranzitorii cu reflexii ale undelor de supratensiune).

Cercetările în domeniul cablurilor de înaltă tensiune și mare putere necesită și încercări experimentale, deoarece pentru siguranța ulterioară în funcționare - încercarea cablurilor prezintă o necesitate obiectivă. Costul încercărilor experimentale este foarte ridicat și implică amenajări speciale atât prin instalațiile de încercare necesare, cât și prin sistemele de măsură. În continuare se prezintă modul de organizare a încercării cablurilor de înaltă tensiune în câteva mari laboratoare pe plan mondial: Electricité de France, KEMA-Olanda, INEL-Italia.

1.4.1. Laboratoarele de încercări electrice ale Centrului de cercetări al Societății "Electricité de France" de la Renardières.

Centrul de cercetări al Societății EDF, construit în 1974 cuprinde: Laboratorul de foarte înaltă tensiune, Stația de încercări de cabluri de înaltă tensiune, Laboratorul de mare putere, Laborator de cercetări de magnetohidrodinamică (26).

Stația de încercări de cabluri de înaltă tensiune este destinată cablurilor de 225 kV și 380 kV. Se încercă diferite variante constructive:

- cablu cu izolație din polietilenă, cu răcire forțată prin circulație exterioară de apă ($U_n = 225$ kV, $P = 600$ MVA, $I = 1,53$ kA, $S = 1200$ mm², $j = 1,28$ A/mm²);

- cablu cu răcire forțată prin circulație internă de ulei ($U_n = 225$ kV, $P = 600$ MVA și $U_n = 380$ kV, $P = 1200$ MVA);

- diferite soluții tehnice de cabluri cu izolație sintetică pentru capacități de transport pînă la 300 MVA.

Fiecare cablu formează o buclă decca 1000 m și este pozat în condiții cât mai apropiate de condițiile de exploatare. Curentul de sarcină este indus în buclă cu ajutorul unor transformatoare toroidale alimentate în joasă tensiune. Partea de joasă tensiune și cea de înaltă tensiune sînt separate funcțional.

Încercările efectuate asupra cablurilor combină efectul dielectric datorit tensiunii aplicate, cu efectul termic datorit curentului de sarcină. Se disting:

- încercări la tensiunea nominală a cablului care nu au scopul de a studia cablul în sine, ci noi tehnici de transport (răcirea forțată):

- încercări la tensiuni superioare tensiunii nominale pentru a accelera îmbătrânirea dielectrică a cablului, cu ocazia studiului noilor tipuri de cabluri.

În toate situațiile tensiunea se aplică în mod permanent și încercările cuprind cicluri zilnice succesive:

- o perioadă de încălzire de 8 ore cu circulația unui curent constant care aduce conductorul la o temperatură determinată;

- o perioadă de răcire de 16 ore.

Conducerea și controlul încercărilor sunt automatizate, iar prelucrarea datelor este asigurată de un calculator de proces. Comanda încercărilor de cabluri comportă două funcții principale:

- măsurarea parametrilor de încercare și supravegherea unui număr mare de parametri de stare (tensiunea pe barele colectoare, semnalizări de defect și securitatea instalațiilor);

- comanda circuitelor și reglarea curentului de încălzire.

Parametrii de încercare ai cablurilor sunt măsurăți în general pe cale analogică. Numărul de canale este limitat la 30 pentru un cablu încercat: se măsoară 20 de temperaturi și 10 mărimi particulare (curent de încălzire, tensiune, etc.).

Capacitatea maximă a ansamblului de măsurări corespunde pentru încercarea simultană a 12 cabluri. Ținând seama de evoluția relativ lentă a parametrilor încercării, ritmul de culegere a datelor a fost cu o perioadă de 5 min pentru regimul de încălzire și cu o perioadă de 17 min pentru regimul de răcire. Sistemul permite culegerea datelor și în ritm de ordinul a 20 canale pe secundă.

Pentru măsurarea parametrilor la cablurile subuse la tensiune ridicată, se perfecționează un sistem cu centrale automate de măsură instalate pe platforme izolate față de pământ și legate de ansamblul sistemului de măsură și reglaj printr-un sistem de transmisie optică. Capacitatea unei astfel de centrale automate permite măsurarea a 15 temperaturi.

Circuitul de încălzire a unui cablu se compune dintr-un număr de transformatoare toroidale, din care o parte servesc la stabilirea curentului de bază în tot timpul perioadei de încălzire, iar altele servesc pentru producerea unui supracurent în timpul primei ore de încălzire, cu scopul de a atinge mai rapid temperatura de serviciu.

Reglajul curentului de încălzire menține intensitatea la o va-

loare determinată cu ajutorul calculatorului, astfel ca la sfârșitul ciclului, cablul să stingă temperatura lui nominală. Acest reglaj se realizează prin alimentarea transformatoarelor toroidale prin intermediul unui autotransformator - a cărui variație de tensiune este comandată direct de calculator.

Parametrii de stare, ca și semnalizările de defect și de prezență a tensiunii pe bare, sînt înregistrați permanent sub formă: tot sau nimic, iar calculatorul poate comanda întreruperea imediată a încercării pe fiecare cablu în parte - la modificarea unui parametru de stare în afara limitelor prescrise.

1.4.2. Stand de încercări cabluri în cadrul Laboratoarelor KEMA - Olanda (128).

Cablul încercat are tensiunea maximă între conductor și mantaua de plumb - de 325 kV. Lungimea cablului este de 100 m, montat în buclă (fig.1.12); la distanța de 0,8 m între circuitul de dus și

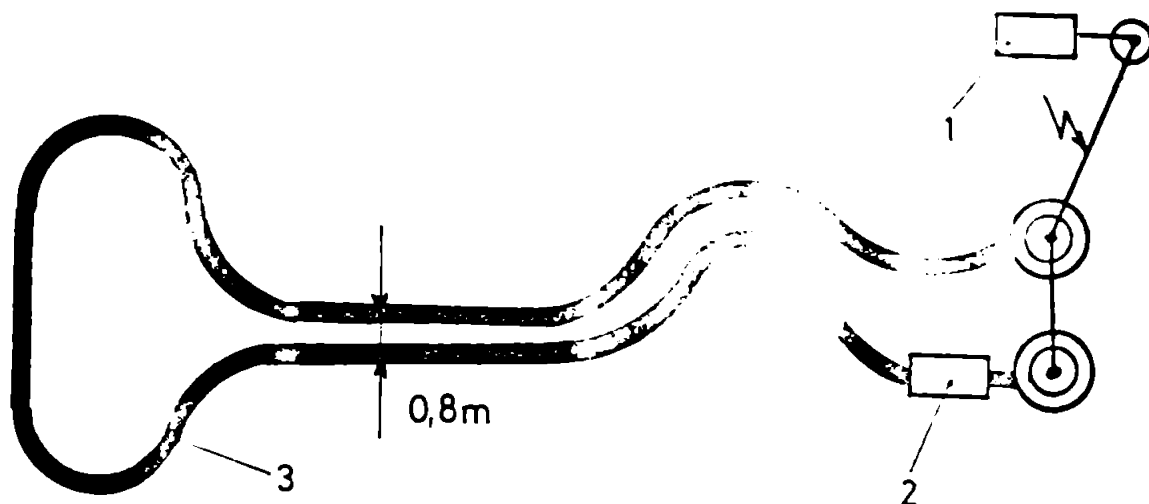


Fig.1.12. Dispunerea cablului în instalația de încercare, KEMA - Olanda.

- 1 - sursa de tensiune înaltă; 2 - sursa de curent;
- 3 - cablu pozat în sol.

de întors - și îngropat în sol la 1 m adîncime. Ciclurile de sarcină sînt aplicate prin intermediul unor transformatoare toroidale pînă la intensitatea maximă 2100 A. Temperatura maximă a conductorului este de 95°C, iar ciclul termic constă din: 9 ore mere în plină sarcină și 16 ore mere în gol.

Se măsoară următorii parametri:

- intensitatea curentului prin transformator de curent;
- tensiunea prin divizor de tensiune capacitiv;
- temperaturi prin termocuple plasate pe suprafața cablului și în sol;
- gradul de umiditate al solului.

În timpul încercării se măsoară periodic $\operatorname{tg} \delta$ și descărcările parțiale.

1.4.3. Stația experimentală de la Suvereto Toscana, a Societății ENEL - Italia (135).

Pe baza unui acord între Societățile ENEL și Pirelli, se efectuează încercări în domeniul transmiterii de energie prin cablu la ultra-înaltă tensiune $U_n = 1100 \text{ kV}$.

La Stația experimentală de la Suvereto (Toscana) Italia se experimentează un cablu cu ulei fluid și accesoriile sale, pentru a se compara rezultatele cu calculul capacității de transport în regim permanent cu răcire prin circulație forțată laterală de apă - în exterior și prin circulație forțată de ulei - în interior. Cablul experimental are o lungime de 200 m, o joncțiune și două cutii terminale. Cercetările urmăresc (135):

- verificarea capacității de transport la tensiunea nominală de serviciu și măsurarea pierderilor dielectrice reale;
- comportarea izolației în cursul unor perioade lungi sub influența unor încălziri termice ciclice sau tensiuni mărite;
- verificarea sistemelor de răcire cu ulei și cu apă, funcționarea automatizărilor pe o perioadă îndelungată;
- determinarea unor coeficienți care depind de condițiile de mediu ambiant în vederea perfecționării metodelor de calcul.

Cablul încercat are tensiunea 1100 kV și secțiunea 2000 mm^2 . Încălzirea este asigurată de transformatoarele toroidale până la intensitatea de 5200 A (fig.1.13).

Încercările sînt complet automatizate utilizînd microprocesoare. Temperaturile se măsoară cu ajutorul unor termocuple amplasate pe mantaua metalică a cablului, în sol și în circuitele uleiului și apei de răcire.

* * *

În domeniul fabricării cablurilor de înaltă tensiune din țara noastră există preocupări pentru pregătirea introducerii în fabricație a unor tipuri noi de cabluri care să înlocuiască importurile. Recent, la Întreprinderea de Cabluri și Materiale Electroizolante ICME București, a fost introdus în fabricația de serie cablul A2YSEY-EF pentru electrofiltre (75), cu tensiunea de 111 kV. Întreprinderea Electroputere Craiova a obținut o anumită experiență în fabricație și montajul celulelor capsulate cu SF_6 și poate prelua și cereri de cabluri tip conductă izolate cu hexafluorură de sulf, la tensiunea de 123 kV (119).

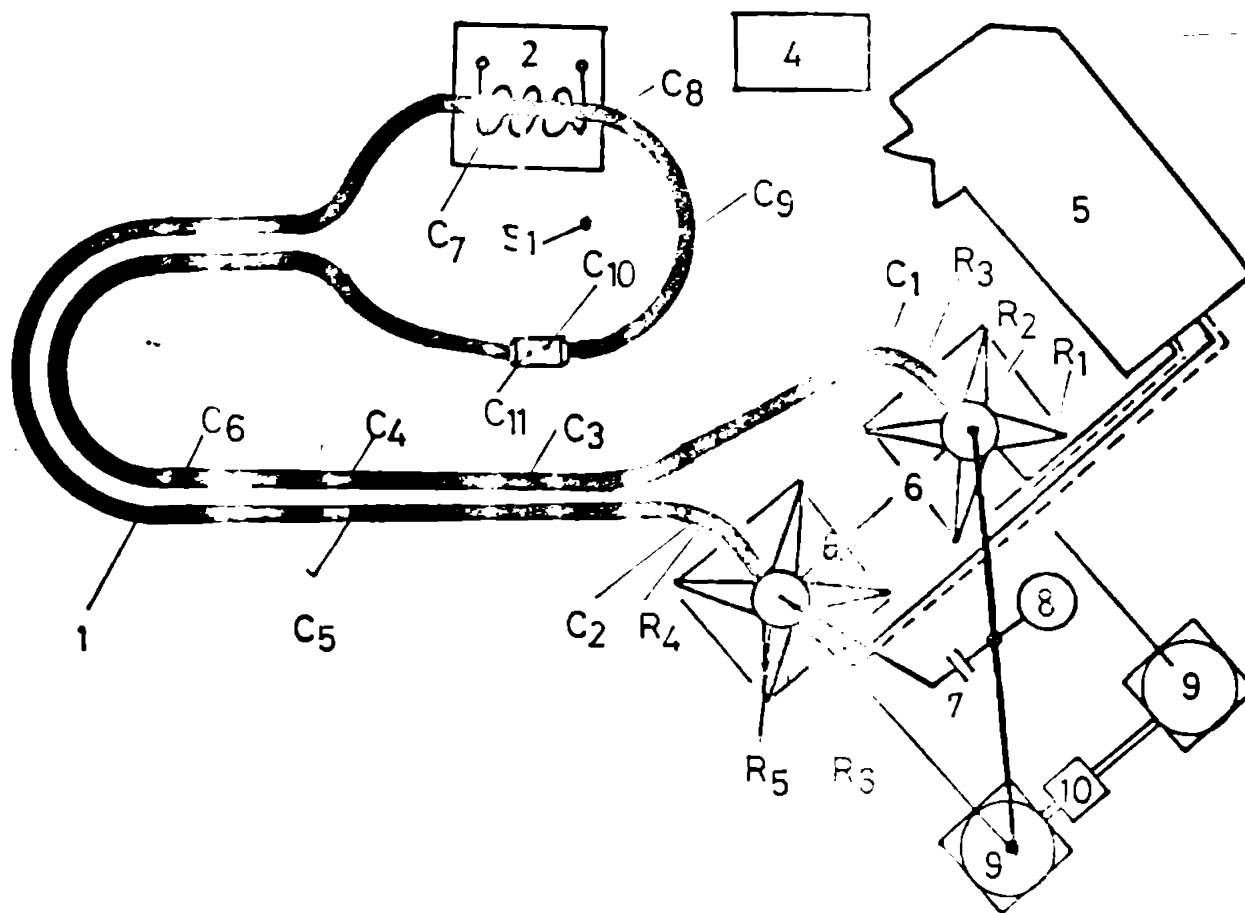


Fig.1.13. Dispunerea sistemului de cabluri ENEL-Italia.

1 - cablu pozat; 2 - transformatoare de încălzire; 3 - cutia de joncțiune; 4 - sala cu instrumente; 5 - sala cu echipamente de răcire a cablului; 6 - izolatoare terminale; 7 - condensator de cuplaj; 8 - divizor de tensiune capacitiv; 9 - reactanță; 10 - transformatoare de înaltă tensiune; $C_1 \dots C_{11}$ - termocuple montate pe armături metalică a cablului și în cutia de joncțiune a tronsoanelor; $R_1 \dots R_6$ - termocuple montate în circuitele uleiului și apei de răcire; S_1 - termocuplu montat în sol.

Pentru elaborarea tezei, autorul s-a documentat la Întreprinderea de Cabluri și Materiale Electroizolante București, la Institutul de Cercetări și Proiectări pentru Industria Electrotehnică ICPE București, la Institutul Politehnic București și la Întreprinderea Electroputere Craiova. De asemenea, a participat la lucrările de montaj al unui cablu de 110 kV la Arad. Încercările experimentale au fost efectuate de autor, în cadrul laboratoarelor de înaltă tensiune din cadrul ICPE București și Institutului Politehnic "Traian Vuia" din Timișoara.

C a p i t o l u l 2.

METODE IN CALCULUL REGIMULUI TERMIC AL CABLURILOR.

Avind în vedere că încălzirea limitează puterea care poate fi transmisă, studiul regimului termic al cablurilor reprezintă o chestiune esențială în scopul găsirii unor posibilități pentru creșterea capacității de încărcare, de gărire a unor rezerve care să permită creșterea solicitărilor.

Căldura dezvoltată în urma pierderilor în conductor, în armături și în dielectric, trebuie disipată pentru ca temperatura să nu depășească anumite limite precizate. Disiparea căldurii se poate efectua, după cum s-a amintit, prin răcire naturală sau cu ajutorul unui agent de răcire - prin răcire forțată. Modul de variație în timp al încălzirii unui cablu depinde de consumator și de condițiile din sistemul electroenergetic. În anumite condiții extreme pot să apară suprasolicități, scurtcircuite.

Calculul regimului termic urmărește determinarea valorilor admisibile ale curentului electric în diferite regimuri de funcționare, precum și în anumite condiții de răcire ale cablurilor, astfel încât temperaturile maxime de regim ale conductoarelor și ale izolației acestora să nu depășească valorile maxime admisibile indicate în norme sau recomandări.

În funcționarea liniilor electrice se disting două regimuri de funcționare caracteristice (5):

- regimul de lungă durată, apreciat în cazul fenomenului de încălzire la o durată de ordinul orelor;
- regimul de scurtă durată, apreciat în cazul fenomenului de încălzire al conductoarelor timp maxim de 5 secunde.

Pentru regimul termic de lungă durată există următoarele situații: sarcină permanent constantă, sarcină variabilă în trepte, sarcină variabilă ciclică. Regimul termic de scurtă durată este un regim tranzitoriu.

Urmărind o tratare cât mai precisă a problemei încălzirii cablurilor s-au dezvoltat mai multe metode de calcul atât pentru regimul permanent de lungă durată cât și pentru cel de scurtă durată. Metodele cu un caracter mai general se referă la calculul regimurilor tranzitorii: utilizând funcții Bessel de variabilă complexă; utilizând funcții

de tip integro-diferențial - metodă propusă de Whitehead și Huching; metoda lui Wormer - pe baza introducerii unor circuite echivalente din rezistențe și capacități termice; metode numerice; metoda funcțiilor potențiale de tip Green [6]. [12]. [14]. [15]. [45]. [103].

Metoda funcțiilor de tip Bessel se aplică ușor când se studiază un singur cablu și apare complexă în cazul unui grup de cabluri. Pentru valori mici ale timpului se preferă scheme echivalente tip Van Wormer, iar pentru perioade lungi de timp, de ordinul orelor - se obțin rezultate bune prin metoda Whitehead- Huching. În multe cazuri practice apare mai potrivită utilizarea funcției integral-exponențială și a funcțiilor Green [14].

În țara noastră, într-un număr mare de lucrări au fost prezentate rezultatele cercetărilor privind: metode generale de calcul ale regimurilor termice [4]. [6]; regimuri tranzitorii cu aplicații la cabluri de 20 kV; rezolvarea ecuației căldurii pentru corpuri cilindrice cu surse interioare neuniform repartizate [14]. [15]; calculul rezistențelor termice și al pierderilor în dielectric [16]; metodă numerică pentru regimul de lungă durată cu sarcină variabilă ciclică [20]; cabluri criogenice [7]. [10]. [11]. [19]. [21]. [111]. [112]. [114].

În cadrul acestui capitol al tezei autorul a analizat și a sintetizat principalele metode de calcul existente ale regimului termic la cabluri cu răcire naturală și cu răcire forțată. Contribuțiile aduse se referă la întocmirea unor programe de calcul numeric și modelare analogică care au fost aplicate pentru determinarea temperaturii conductoarelor cablurilor fabricate de ICPE București și pregătite pentru încercarea cu impuls de tensiune în cadrul LIT-ICPE București. Autorul tezei a stabilit metode noi de determinare a temperaturii conductorului cablului, care nu necesită străbungerii izolației de fază. Verificările experimentale au fost efectuate atât la ICPE București, cât și pe un stand special amenajat în Laboratorul de modele TTI din IPTV Timișoara [141]. [152]. [159]. [160].

Autorul tezei a studiat regimul termic pentru cabluri cu răcire forțată și a stabilit o metodă proprie de deducere a ecuațiilor de bilanț termic, luând în considerare influența reciprocă între circuitul de dus și circuitul de întors al fluidului de răcire. S-au făcut aplicații privind răcirea forțată a unui cablu de 225 kV cu circulație de ulei, prin modelare pe calculator analogic și pe calculator numeric [144]. [145].

2.1. REGIMUL TERMIC TRANZITORIU. REZOLVAT PRIN FOLOSIREA
FUNCTIILOR GREEN [4], [6].

Metoda funcțiilor Green permite găsirea unei expresii generale a potențialului termic și o suprapunere a efectelor atât în regim permanent (echilibru staționar), cât și în regim variabil de lungă durată și de scurtă durată (regim tranzitoriu). Astfel aspectul regimului variabil poate fi tratat în mod analog cu cel al regimului permanent.

În condițiile unui spațiu omogen, având surse punctuale de căldură, soluțiile cu caracter general obținute prin utilizarea funcțiilor Green pot fi particularizate în diferite situații și permit calculul regimului termic și pentru un grup de cabluri.

Calculul regimului termic prin această metodă conduce la utilizarea funcției integral-exponențială - $Ei(-x)$ care este tabelată sau poate fi calculată prin dezvoltarea în serie.

2.1.1. Baza matematică a metodei [4], [6], [41], [42], [43], [44], [10]. Regimul termic într-un plan perpendicular pe axa conductorului este descris de ecuația diferențială:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \rho_T \cdot W(x, y, t) = \rho_T \cdot C_T \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2.1)$$

S-au folosit notațiile:

$\theta(x, y, t)$ - temperatura [$^{\circ}C$],

ρ_T - rezistivitatea termică a mediului [$^{\circ}C \cdot m/W$],

$W(x, y, t)$ - densitatea fluxului termic raportată la unitatea de lungime (identică cu energia disipată în unitatea de timp, de către unitatea de volum) [$\frac{W}{m^3}$].

C_T - capacitatea termică a mediului raportată la unitatea de volum [$\frac{W \cdot sec}{^{\circ}C \cdot m^3}$].

$$\frac{1}{a^2} = \rho_T \cdot C_T$$

Recupărind termenii ecuației (2.1), se obține ecuația:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \right) \theta(x, y, t) = - \rho_T \cdot W(x, y, t) \quad (2.2)$$

Ecuația obținută este o formă particulară a ecuației generale:

$$L[x] \cdot \theta[x] = - \rho_T \cdot W[x] \quad (2.3)$$

unde: $[x] = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ coordonate în spațiul n dimensional,

$L[x]$ - operator liniar de formă:

$$L[x] = a_0 + a_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + a_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + \dots + a_{11} \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + a_{22} \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \dots \quad (2.4)$$

Soluția (2.5) a ecuației generale (2.3), reprezintă temperatura mediului în punctul și la momentul luat în considerare:

$$\Theta[x] = - \rho_T \cdot L^{-1}[x] \cdot W_x \quad (2.5)$$

Deoarece sursa de căldură are o geometrie spațială cunoscută, densitatea specifică a fluxului termic se poate exprima prin intermediul funcției Dirac (41):

$$W[x] = \int_{-\infty}^{+\infty} W[x'] \cdot \delta[x'-x] \cdot dx'_1 \cdot dx'_2 \dots dx'_n \quad (2.6)$$

în care $W[x']$ se exprimă prin intermediul unei funcții de tip salt (funcția Heaviside):

$$W[x'] = W(x'_1, x'_2, \dots, x'_{n-1}) \cdot h(x'_n - x'_n) \quad (2.7)$$

unde:

$$W[x'] = W(x'_1, x'_2, \dots, x'_{n-1}, x'_n)$$

$$h(x'_n - x'_n) = 0 \quad \text{pentru } x'_n \leq 0$$

$$h(x'_n - x'_n) = 1 \quad \text{pentru } x'_n \geq 0$$

$[x] = (x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$ coordonatele spațial-temporale pentru un punct oarecare în mediul cu $(n-1)$ dimensiuni geometrice, la un moment oarecare „ x_n ”.

$[x'] = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{n-1}, x'_n)$ coordonatele spațial-temporale ale sursei termice (în punctul cu cele „ $n-1$ ” coordonate geometrice cunoscute și la momentul x'_n).

În spațiul cu „ n ” dimensiuni, funcția Dirac poate fi scrisă sub formă unei integrale Fourier (42):

$$\delta[x'-x] = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathcal{Z}} \exp[iK_1(x_1-x'_1) + iK_2(x_2-x'_2) + \dots] dK_1 \cdot dK_2 \dots \quad (2.8)$$

Operatorul $L^{-1}[x]$ se va aplica funcției exponențiale:

$$L^{-1}[x] \delta[x'-x] = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathcal{Z}} \frac{\exp[iK_1(x_1-x'_1) + iK_2(x_2-x'_2) + \dots] dK_1 \cdot dK_2 \dots}{a_0 + a_1 iK_1 + a_2 iK_2 + \dots + a_{11} (iK_1)^2 + \dots} \quad (2.9)$$

Funcția Green, fiind prin definiție (41):

$$G[x', x] = - L^{-1}[x] \delta[x'-x] \quad (2.10)$$

soluția (2.5) devine:

$$\Theta[x] = \rho_T \int_{\mathcal{Z}'} W[x'] G[x', x] d\mathcal{Z}' \quad (2.11)$$

Prin intermediul funcției Green, se poate calcula în punctul de coordonate $[x]$ câmpul termic creat de sursa din punctul $[x']$ - cu intensitate egală cu unitatea. Câmpul total se poate obține ca rezultat al integrării în volumul generalizat a întregii distribuții spațial-temporale a sursei.

2.1.2. Soluția ecuației transmisiei de căldură [4], [6]. Ecuația diferențială punctuală a transmisiei căldurii (2.2) pentru un câmp plan, în coordonate este o ecuație de tip parabolic, iar operatorul liniar (2.4) are forma:

$$L(x, y, t) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial}{\partial t} \quad (2.12)$$

Funcția Green devine:

$$G(x', y', t', x, y, t) = -\frac{1}{(2\pi)^3} \int_{\sigma} \frac{\exp[iK_1(x-x') + iK_2(y-y') + iK_3(t-t')] dK_1 dK_2 dK_3}{(iK_1)^2 + (iK_2)^2 - iK_3 \frac{1}{a^2}} \cdot \frac{a^2}{(2\pi)^3} \int_{\sigma} \frac{\exp[iK_1(x-x') + iK_2(y-y') + iK_3(t-t')] dK_1 \cdot dK_2 \cdot dK_3}{iK_3 - [-a(K_1^2 + K_2^2)]} \quad (2.13)$$

Integrala din expresia (2.13) este o integrală de tip Cauchy, de forma:

$$\int_{(c)} \frac{f(K) \cdot dK}{K - K_0} = 2\pi \cdot i \cdot f(K_0) \quad (2.14)$$

în care s-au folosit notațiile:

$$K = (iK_3) \quad ; \quad K_0 = -a^2(K_1^2 + K_2^2) \quad .$$

Calculând integrala în raport cu variabila (iK_3) , funcția Green devine:

$$G(x', y', t', x, y, t) = \frac{a^2}{(2\pi)^2} \int_{K_1, K_2 \rightarrow \infty} \exp[iK_1(x-x') + iK_2(y-y') - a^2(K_1^2 + K_2^2)(t-t')] dK_1 dK_2 \quad (2.15)$$

Prin gruparea conform relației (2.16), funcția Green se poate exprima printr-un produs de două integrale:

$$G(x', y', t', x, y, t) = \frac{a}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[iK_1(x-x') - a^2 K_1^2 (t-t')] dK_1 \cdot \frac{a}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[iK_2(y-y') - a^2 K_2^2 (t-t')] dK_2 = I_1 \cdot I_2 \quad (2.16)$$

Integralele I_1 și I_2 sînt simetrice față de K_1 și K_2 . Prin grupări de termeni, se obțin integrale rezolvabile prin teorema lui Cauchy (10):

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{a}{(2\pi)} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-a^2(t-t')K_1^2 + i(x-x')K_1] dK_1 = \\
 &= \frac{a}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-a^2(t-t')\left[K_1 + i \frac{(x-x')}{2a^2(t-t')}\right]^2 - \frac{(x-x')^2}{4a^2(t-t')}\right\} dK_1 = \\
 &= \frac{a}{2\pi} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a^2(t-t')}\right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-a^2(t-t')\left[K_1 - i \frac{(x-x')}{2a^2(t-t')}\right]^2\right\} dK_1 = \\
 &= \left\{\frac{a}{2\pi} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a^2(t-t')}\right]\right\} \sqrt{\frac{\pi}{a^2(t-t')}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{(t-t')}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4a^2(t-t')}\right].
 \end{aligned}
 \tag{2.17.a}$$

Similar se obține:

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \frac{a}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-a^2(t-t')K_2^2 + i(y-y')K_2] dK_2 = \\
 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi}{(t-t')}} \cdot \exp\left[-\frac{(y-y')^2}{4a^2(t-t')}\right].
 \end{aligned}
 \tag{2.17.b}$$

Avînd în vedere relațiile (2.17.a) și (2.17.b), funcția (2.16) se poate exprima deci și sub formă:

$$\begin{aligned}
 G(x', y', t', x, y, t) &= I_1 \cdot I_2 = \\
 &= \frac{1}{4\pi(t-t')} \cdot \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4a^2(t-t')}\right] = \\
 &= \frac{1}{4\pi(t-t')} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{4a^2(t-t')}\right],
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

în care r - reprezintă distanța între sursă și punctul de calcul al temperaturii:

$$r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2.$$

Soluția ecuației (2.1) este deci de formă:

$$\begin{aligned}
 \Theta(x, y, t) &= \int_T \int_{\mathcal{B}'} W(x', y', t') \cdot G(x', y', t', x, y, t) dx' \cdot dy' \cdot dt' = \\
 &= \frac{\rho_T}{4\pi} \int_{t' \rightarrow 0}^{t' \rightarrow t} \int_{\mathcal{B}' \rightarrow \infty} W(x', y', t') \cdot \frac{1}{(t-t')} \cdot \exp\left[-\frac{r^2}{4a^2(t-t')}\right] dx' \cdot dy' dt'.
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Se consideră surse cu o variație tip treaptă, saltul fiind presupus la momentul $t^*=0$:

$$W(x^*, y^*, t^*) = W(x^*, y^*) \cdot h(t-t^*) \quad (2.20)$$

Introducând notațiile $f(t-t^*)$ și I_3 :

$$f(t-t^*) = \frac{1}{(t-t^*)} \exp \left[-\frac{r^2}{4a^2(t-t^*)} \right] \quad (2.21)$$

$$I_3(r, t) = \int_{t \rightarrow -\infty}^{t^*=t(t \rightarrow \infty)} h(t-t^*) \cdot f(t-t^*) \cdot dt^* \quad (2.22)$$

rezultă expresia temperaturii în punctul (x, y) la momentul "t":

$$\Theta(x, y, t) = \frac{\rho_T}{4\pi} \int_{z' \rightarrow \infty} W(x, y^*) \cdot I_3(r, t) \cdot dx^* \cdot dy^* \quad (2.23)$$

Soluționarea problemei depinde de calculul integralei $I_3(r, t)$. Se notează prin $F(t)$ primitiva funcției $f(t-t^*)$:

$$\int f(t-t^*) \cdot dt^* = F(t) \quad (2.24)$$

$$I_3 = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t-t^*) \cdot f(t-t^*) \cdot dt^* = h(t-z) [F(t) - F(z)] \quad (2.25)$$

Se efectuează substituția:

$$y = \frac{r^2}{4a^2(t-t^*)} \quad , \quad \text{iar} \quad dy = \frac{y}{(t-t^*)} \cdot dt^* \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} F(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(t-t^*)} \cdot \exp \left[-\frac{r^2}{4a^2(t-t^*)} \right] dt^* = \\ &= \int_{\frac{r^2}{4a^2}}^{+\infty} \frac{\exp(-y)}{y} \cdot dy \quad (2.27) \end{aligned}$$

În expresia (2.27) s-a obținut funcția integral-exponențială:

$$-E_1(-\alpha) = \int_{\alpha}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} \cdot dy \quad (2.28)$$

Funcția integral exponențială este tabelată [102], dar poate fi calculată și prin dezvoltarea:

$$-E_1(-\alpha) = -\gamma - \ln \alpha - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\alpha)^n}{n! n} \quad (2.29)$$

unde $\gamma = 0,5772157$ (constanta lui Euler).

Revenind la expresia (2.25):

$$I_3 = h(t-\bar{t}) \int_{\frac{r^2}{4a^2}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} \cdot dy - \int_{\frac{r^2}{4a^2}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} \cdot dy \quad (2.30)$$

La momentul $\bar{t}=0$, funcția salt $h_{(t=0)}=1$, integrala I_3 devine:

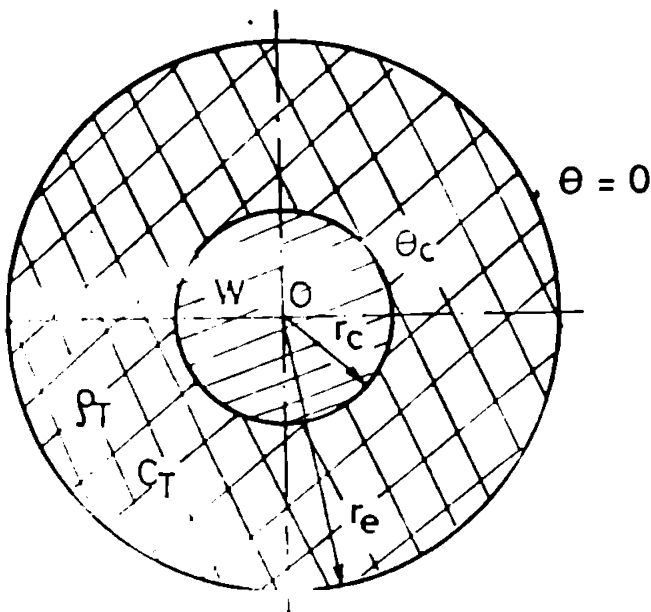
$$I_3 = \int_{\frac{r^2}{4a^2 t}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} \cdot dy = -E_1\left(-\frac{r^2}{4a^2 t}\right) \quad (2.31)$$

În cazul general, cu "n" surse termice punctiforme, soluția generală a ecuației transmisiei de căldură devine:

$$\theta(x, y, t) = \frac{\rho_T}{4\pi} \sum_{K=1}^n w_K \cdot \left[-E_1\left(-\frac{r_K^2}{4a^2 t}\right) \right] + C \quad (2.32)$$

2.1.3. Modul de aplicare a rezultatelor studiului în diferite cazuri practice [4], [6], [152].

a) Cablu cu un singur înveliș (fig. 2.1).



Se consideră conductorul cu raza r_c , iar la distanța r_e , $\theta = 0$.

Variația în timp a temperaturii pe suprafața conductorului, se obține particularizând relația (2.32):

$$\theta(r_c, t) = \frac{\rho_T}{4\pi} \cdot w \cdot \left[-E_1\left(-\frac{r_c^2}{4a^2 t}\right) \right] + C \quad (2.33)$$

Constanta C se determină din condiția la limită:

$$\theta(r_e, t) = 0 = \frac{\rho_T}{4\pi} \cdot w \cdot \left[-E_1\left(-\frac{r_e^2}{4a^2 t}\right) \right] + C \quad (2.34)$$

Fig. 2.1. Cablu cu un înveliș.

Rezultă expresia temperaturii:

$$\theta(r_c, t) = \frac{\rho_T}{4\pi} \cdot w \cdot \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{r_c^2}{4a^2 t}\right) \right] - \left[-E_1\left(-\frac{r_e^2}{4a^2 t}\right) \right] \right\} \quad (2.35)$$

În regiune staționară ($t \rightarrow \infty$), funcția integral exponențială are o expresie simplificată, deoarece $\alpha \rightarrow 0$:

$$-E_1(-\alpha) \approx \gamma - \ln \alpha \quad (2.36)$$

Din expresia (2.35), rezultă căderea de temperatură pe izolația de grosime radială ($r_e - r_c$), în regiune staționară:

$$\theta(r_c, t \rightarrow \infty) = \frac{\rho_T}{4\pi} \cdot w \cdot \ln \left(\frac{r_e}{r_c} \right)^2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot w \cdot \ln \frac{r_e}{r_c} \quad (2.37)$$

La același rezultat, pentru regimul staționar, se ajunge plecând și de la legea lui Fourier (2.38) și calculind fluxul termic pe suprafața cilindrică Σ , de lungime $l=1$ [3]:

$$q = - \frac{1}{r} \cdot \text{grad } \theta \quad (2.38)$$

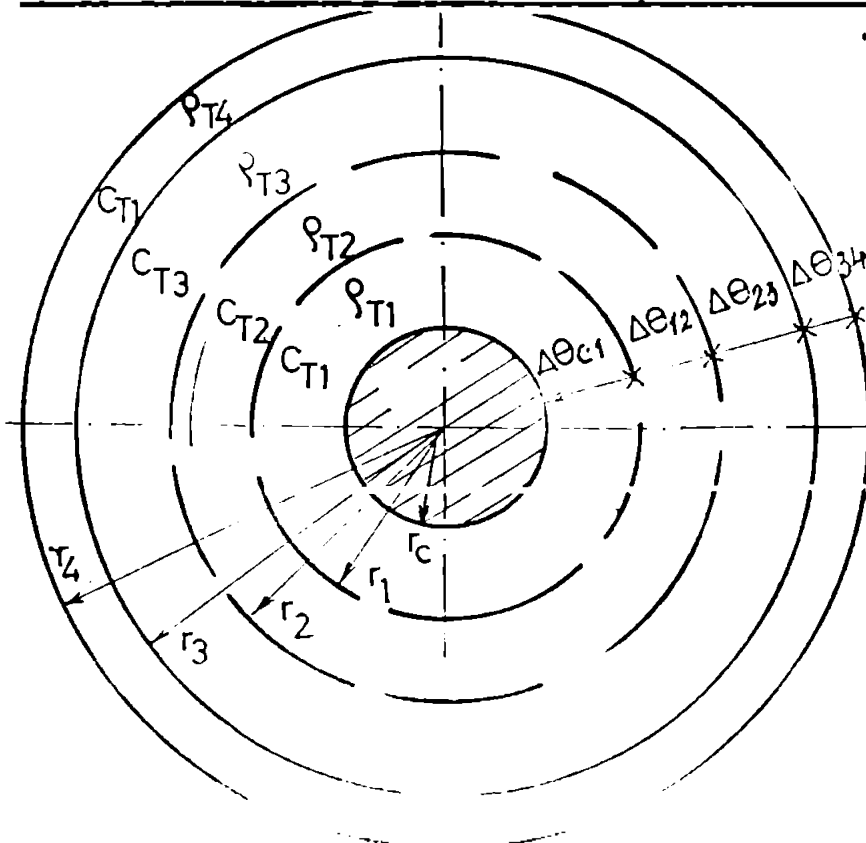
$$W = \int_{\Sigma} q \cdot ds \quad (2.39)$$

Prin înlocuire:

$$\frac{w \cdot \rho_T}{2\pi \cdot l} \int_{r_c}^{r_e} \frac{dr}{r} = - \int_{\theta_c}^{\theta=0} d\theta \quad (2.40)$$

$$\theta_c = \frac{\rho_T \cdot w}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_e}{r_c} \quad (2.41)$$

b) Calculul temperaturii la suprafața conductorului pentru un cablu cu mai multe învelișuri concentrice (fig.2.2).



In regim staționar:

$$\Delta\theta_{01} = \frac{\rho_{T1}}{2\pi} \cdot w \cdot \ln \frac{r_1}{r_c}$$

$$\Delta\theta_{12} = \frac{\rho_{T2}}{2} \cdot w \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$\Delta\theta_{23} = \frac{\rho_{T3}}{2} \cdot w \cdot \ln \frac{r_3}{r_2}$$

$$\Delta\theta_{34} = \frac{\rho_{T4}}{2} \cdot w \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}$$

(2.42)

Fig.2.2. Cablu cu 4 învelișuri.

$$\theta(r_c, t \rightarrow \infty) = \frac{w}{2\pi} \left(\rho_{T1} \cdot \ln \frac{r_1}{r_c} + \rho_{T2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \rho_{T3} \ln \frac{r_3}{r_2} + \rho_{T4} \ln \frac{r_4}{r_3} \right)$$

Aplicind relația (2.32) în acest caz se obține pentru regimul tranzitoriu:

$$\begin{aligned} \theta(r_c, t) = & \frac{W}{4\pi} \cdot \rho_{T_1} \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{r_c^2}{4a_1^2 t}\right) \right] - \left[-E_1\left(-\frac{r_1^2}{4a_1^2 t}\right) \right] \right\} + \\ & + \frac{W}{4\pi} \cdot \rho_{T_2} \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{r_1^2}{4a_2^2 t}\right) \right] - \left[-E_1\left(-\frac{r_2^2}{4a_2^2 t}\right) \right] \right\} + \\ & + \frac{W}{4\pi} \cdot \rho_{T_3} \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{r_2^2}{4a_3^2 t}\right) \right] - \left[-E_1\left(-\frac{r_3^2}{4a_3^2 t}\right) \right] \right\} + \\ & + \frac{W}{4\pi} \cdot \rho_{T_4} \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{r_3^2}{4a_4^2 t}\right) \right] - \left[-E_1\left(-\frac{r_4^2}{4a_4^2 t}\right) \right] \right\} . \end{aligned} \quad (2.43)$$

unde:

$$a_1^2 = \frac{1}{\rho_{T_1} \cdot c_{T_1}} \dots a_4^2 = \frac{1}{\rho_{T_4} \cdot c_{T_4}} . \quad (2.44)$$

c) Calculul temperaturii la suprafața unui singur cablu pozat în sol la adîncimea h (fig.2.3).

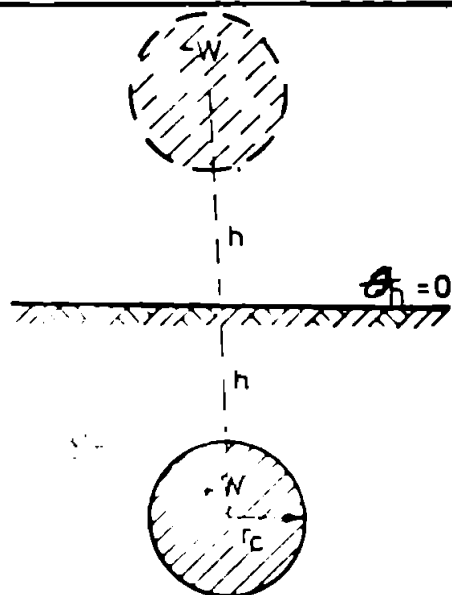


Fig.2.3. Cablu pozat în sol.

Se aplică metoda imaginilor electrice, considerînd $r_c \ll h$ și $\theta_h = 0$.

$$\begin{aligned} \theta(h, t) = 0 = & \frac{\rho_T \cdot W}{4\pi} \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{h^2}{4a^2 t}\right) \right] - \right. \\ & \left. - \left[-E_1\left(-\frac{h^2}{4a^2 t}\right) \right] \right\} + C . \end{aligned} \quad (2.45)$$

Rezultă $C=0$.

În regim tranzitoriu, căderea de temperatură între suprafața conductorului și suprafața solului devine:

$$\theta(r_c, t) = \frac{\rho_T \cdot W}{4\pi} \left[-E_1\left(-\frac{r_c^2}{4a^2 t}\right) \right] - \frac{\rho_T \cdot W}{4\pi} \left[-E_1\left(-\frac{(2h)^2}{4a^2 t}\right) \right] . \quad (2.46)$$

În regim staționar, se obține o relație simplificată:

$$\theta(r_c, t \rightarrow \infty) = \frac{\rho_T \cdot W}{2\pi} \cdot \ln \frac{2h}{r_c} . \quad (2.47)$$

În reprezentarea conformă, familia izotermelor formează partea reală a potențialului complex produs de două surse lineice de căldură, egale și de semn contrar [3]. Rezultatul calculului este asemănător:

$$\Theta(r_c, t \rightarrow \infty) = \frac{\rho_T \cdot W}{2\pi} \cdot \ln \left[\frac{h}{r_c} + \sqrt{\left(\frac{h}{r_c}\right)^2 - 1} \right]. \quad (2.48)$$

Pentru $\frac{h}{r_c} < 10$, relația (2.48) devine practic egală cu relația (2.47).

d) Cazul a trei cabluri pozate în sol.

Cablurile se consideră pozate în sol, la distanțele precizate în figura 2.4. În regim tranzitoriu, temperatura la suprafața cablului cu raza r_1 , pozat la adâncimea h_1 devine:

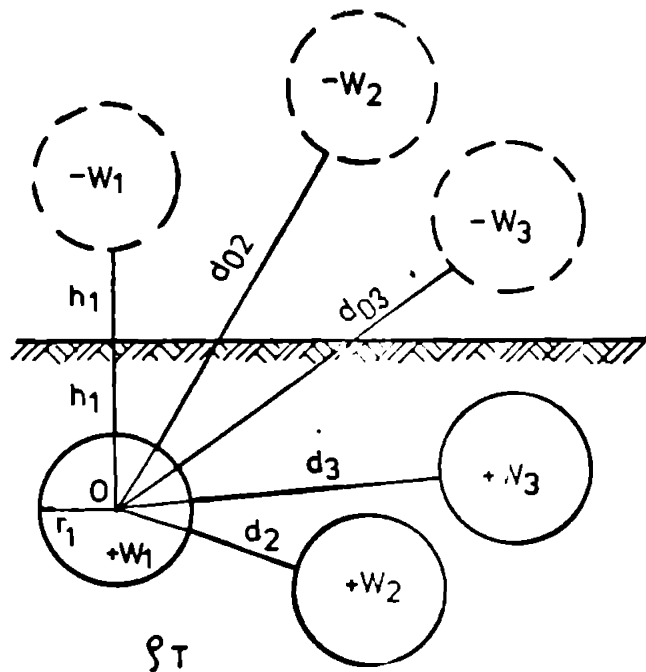


Fig.2.4. Pozarea oricare a 3 cabluri.

$$\begin{aligned} \Theta(r_1, t) = & \frac{\rho_T \cdot W_1}{4\pi} \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{r_1^2}{4a^2 t}\right) \right] - \left[-E_1\left(-\frac{(2h_1)^2}{4a^2 t}\right) \right] \right\} + \\ & + \frac{\rho_T \cdot W_2}{4\pi} \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{d_2^2}{4a^2 t}\right) \right] - \left[-E_1\left(-\frac{d_{02}^2}{4a^2 t}\right) \right] \right\} + \\ & + \frac{\rho_T \cdot W_3}{4\pi} \left\{ \left[-E_1\left(-\frac{d_3^2}{4a^2 t}\right) \right] - \left[-E_1\left(-\frac{d_{03}^2}{4a^2 t}\right) \right] \right\}. \quad (2.49) \end{aligned}$$

În regim staționar:

$$\Theta(r_1, t \rightarrow \infty) = \frac{\rho_T}{2\pi} \cdot \left[W_1 \ln \frac{2h_1}{r_1} + W_2 \ln \frac{d_{02}}{d_2} + W_3 \ln \frac{d_{03}}{d_3} \right]. \quad (2.50)$$

Metoda poate să fie generalizată și pentru un număr mai mare de cabluri.

În (6) și (152) se prezintă aplicații ale acestei metode de calcul pentru cabluri de 20 kV. Autorul tezei a utilizat această metodă de calcul pentru a compara variația căderilor de temperatură pe diferite straturi, cu rezultatele obținute prin modelarea analogică și prin determinări experimentale în LIT-ICPE București (152).

2.2. REGIUL TERMIC AL CABLURILOR CU RĂCIRE NATURALA.

Căldura dezvoltată în urma pierderilor din cablu ajunge să se disipeze în mediul ambiant trecând prin izolația de fază, ecrane, manta și sol sau aer. Transferul termic are loc radial. Capacitatea de transport a cablului va depinde de eficiența acestui transfer termic.

Metodele de calcul pentru cablurile cu răcire naturală prezintă o importanță deosebită și pentru cablurile cu răcire forțată, deoarece - așa cum s-a arătat în paragraful 1.2 - sînt cazuri cînd din considerente economice răcirea forțată este pusă în funcțiune esalonat.

Pe baza acestor metode de calcul autorul a modelat pe calculator analogic și a întocmit programe de calcul în limbaj BASIC pentru determinarea temperaturilor în diferite straturi din construcția cablurilor fabricate în țară (paragrafele 2.4.5.2; 2.4.5.3 și 2.4.5.4).

Calculul încălzirii pleacă de la ecuația bilanțului termic.

2.2.1. Ecuația bilanțului termic.

Pe baza principiului conservării energiei, rezultă relația de legătură între fluxurile (3), (4), (104):

$$W_{1t} + W_{2t} + W_{3t} = W_4 + W_5 \quad (2.51)$$

în care:

- W_{1t} - pierderi Joule totale în conductoare și armături;
- W_{2t} - pierderi totale în dielectric;
- W_{3t} - influența unor surse calde vecine;
- W_4 - fluxul termic înmagazinat;
- W_5 - disipare prin conducție, convecție și radiație.

În regim de echilibru staționar $W_4 = 0$, iar diferențele de temperatură se pot calcula cu ajutorul rezistențelor termice R_T :

$$\Delta\theta = W \cdot R_T.$$

2.2. Calculul încălzirii în regim de lungă durată.

Standardele de produs [47], [48] indică temperatura maximă a conductorului cablului atât pentru regimul de lungă durată, cât și pentru regimul de scurtă durată. Există și un regim forțat - apreciat la maximum 100 ore/an - care rezultă prin supraîncălzirea liniilor în caz de defec-tare a uneia din liniile ce alimentează același consumator. Pentru regi-mul forțat temperaturile maxime admisibile se iau mai mari cu cca 20 ÷ 25°C față de temperaturile indicate pentru regimul de lungă durată [5].

În cazul regimului de lungă durată se vor analiza: regimul de sarcină permanent constantă, regimul cu sarcină variabilă în trepte, schema termică echivalentă formată din rezistențe și capacități termice (metoda lui Wormer) și soluții numerice pentru sarcina variabilă ci-clică.

2.2.1. Regimul permanent - regim de lungă durată cu sarcină permanent constantă.

Prin regim permanent se înțelege regimul de funcționare în care curentul prin cablu este constant, valoarea intensității curentului fi-înd suficient de mare pentru ca temperatura conductorului să fie cea maximă admisă conform standardelor sau normelor tehnice de produs [47], [48], [71], [72].

În cazul unui cablu trifazat se consideră circuitul termic din figura 2.5, iar diferența de temperatură între suprafața conductorului

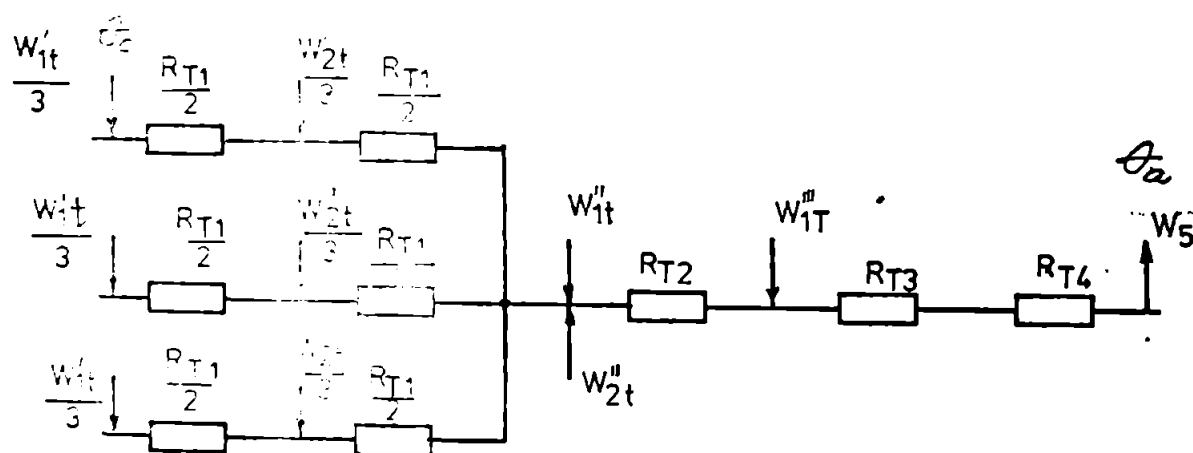


Fig.2.5. Circuitul termic pentru un cablu trifazat, cu nota-tiile: W_{1t} - pierderi Joule în conductorul de fază; W_{1t}'' - pierderi Joule în ecran; W_{1t}''' - pierderi dato-rită curentilor Foucault în armături; W_{2t} - pierderi diélectrice în izolația de fază; W_{2t}'' - pierderi diélectrice în centura izolantă comună; R_{T1} - rezia-

tență termică a izolației de fază; R_{T2} - rezistența termică a izolației de centură; R_{T4} - rezistența termică a solului.

și mediului ambiant este dată de relația (2.53), ca suma unor produse dintre densitățile fluxurilor termice raportate la unitatea de lungime (pierderile pe unitatea de lungime a cablului) și rezistențele termice corespunzătoare [104]:

$$\begin{aligned} \theta_c - \theta_a = & \left(\frac{W_{1t}^*}{3} + \frac{1}{2} \cdot \frac{W_{2t}^*}{3} \right) \cdot R_{T1} + (W_{1t}^* + W_{1t}^{**} + W_{2t}^* + W_{2t}^{**}) R_{T2} + \\ & + (W_{1t}^* + W_{1t}^{**} + W_{1t}^{***} + W_{2t}^* + W_{2t}^{**}) (R_{T3} + R_{T4}) . \end{aligned} \quad (2.53)$$

Prin explicitarea pierderilor:

$$\begin{aligned} W_{1t}^* &= 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (R - \text{rezistența electrică a fazei, iar } I \text{ curentul pe o fază}), \\ W_{1t}^{**} &= \lambda_1 \cdot 3 \cdot R \cdot I^2 , \\ W_{1t}^{***} &= \lambda_2 \cdot 3 \cdot R \cdot I^2 , \\ W_{2t}^* &\approx W_{2t} \quad (W_{2t}^{**} \approx 0) . \end{aligned} \quad (2.54)$$

se poate determina curentul maxim admisibil pe fază, pentru o temperatură maximă admisibilă a conductorului $\Delta\theta_{adm}$. Cum :

$$\begin{aligned} \Delta\theta_{adm} = \theta_{adm} - \theta_a = & (I_{adm}^2 \cdot R + \frac{1}{2} \cdot W_{2t}) R_{T1} + [3I_{adm}^2 \cdot R(1 + \lambda_1) + \\ & + W_{2t}] \cdot R_{T2} + [3 \cdot I_{adm}^2 \cdot R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_{2t}] \cdot (R_{T3} + R_{T4}) . \end{aligned} \quad (2.55)$$

rezultă că:

$$I_{adm} = \left[\frac{\Delta\theta_{adm} - W_{2t} (0,5 \cdot R_{T1} + 3R_{T2} + 3R_{T3} + 3R_{T4})}{R \cdot [R_{T1} + 3 R_{T2} (1 + \lambda_1) + 3(R_{T3} + R_{T4}) (1 + \lambda_1 + \lambda_2)]} \right]^{\frac{1}{2}} . \quad (2.56)$$

[72]
In SEAS 10955-83 se prezintă modul de calcul al factorilor de proporționalitate λ_1 și λ_2 (raportul dintre pierderile în ecran, respectiv armătură și pierderile totale în conductoare), calculul pierderilor dielectrice și calculul rezistenței în curent alternativ a conductorului ținând seama de efectul pelicular și de efectul de proximitate (care depind și de soluția constructivă adoptată). Acest standard are la bază Publicația CEI 287 (1969) cu completări sau modificări în 1971, 1974, 1977 și 1978.

*
Dacă în locul unui cablu trifazat există un cablu cu n_c conductoare, relația (2.56) devine:

$$I_{adm} = \left[\frac{\Delta\theta_{adm} - W_{2t} [0,5 \cdot R_{T1} + n_c \cdot (R_{T2} + R_{T3} + R_{T4})]}{R [R_{T1} + n_c \cdot R_{T2} (1 + \lambda_1) + n_c \cdot (R_{T3} + R_{T4}) (1 + \lambda_1 + \lambda_2)]} \right]^{1/2} \quad (2.57)$$

Luind în considerare și efectul radiațiilor solare (R_{T4} reprezintă rezistența termică externă pentru cablul pozat în aer liber;

- coeficientul de absorbție a radiației solare la suprafața cablului; H - intensitatea radiațiilor solare și D_e - diametrul exterior al cablului), curentul maxim admisibil se calculează cu ajutorul relației:

$$I_{adm} = \left[\frac{\Delta\theta_{adm} - W_{2t} [0,5 \cdot R_{T1} + n_c (R_{T2} + R_{T3} + R_{T4}) - \sigma \cdot D_e \cdot H \cdot R_{T4}]}{R [R_{T1} + n_c \cdot R_{T2} (1 + \lambda_1) + n_c \cdot (R_{T3} + R_{T4}) (1 + \lambda_1 + \lambda_2)]} \right] \quad (2.58)$$

2.2.2.2. Regimul de lungă durată cu sarcină variabilă în trepte [3].

În cazul în care densitatea fluxului termic are o variație tip treaptă la momentul inițial și considerind transferul termic prin conducție, ecuația (2.51) devine:

$$W_t = C_p \cdot M \cdot \frac{d\Delta\theta}{dt} + \frac{\Delta\theta}{R_T} \quad (2.59)$$

în care:

W_t - densitatea fluxului termic (pierderile totale pe unitate de lungime) [W/m];

$C_p \cdot M$ - capacitatea calorică echivalentă $\left(\frac{W \cdot s}{C \cdot kg} \right) \cdot \left(\frac{kg}{m} \right)$;

R_T - rezistența termică echivalentă [$^{\circ}C \cdot m/W$];

$\Delta\theta = \theta_c - \theta_a$ diferența de temperatură între conductorul cablului și mediul ambiant [$^{\circ}C$].

Transformind ecuația diferențială (2.53):

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} + \frac{\Delta\theta}{C_p \cdot M \cdot R_T} = \frac{W_t}{C_p \cdot M} \quad (2.60)$$

se poate nota constanta de timp $T = C_p \cdot M \cdot R_T$.

Cu condițiile la limită:

$$\Delta\theta_{(t=0)} = \Delta\theta_0$$

$$\Delta\theta_{(t \rightarrow \infty)} = \Delta\theta_{\infty} = W_t \cdot R_T$$

se obține soluția:

$$\Delta\theta_{(t)} = \Delta\theta_{\infty} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \Delta\theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (2.61)$$

În cazul în care densitatea fluxului termic are o variație în timp constând dintr-o succesiune oarecare de trepte (fig.2.6), variația în timp a diferenței de temperatură între conductor și

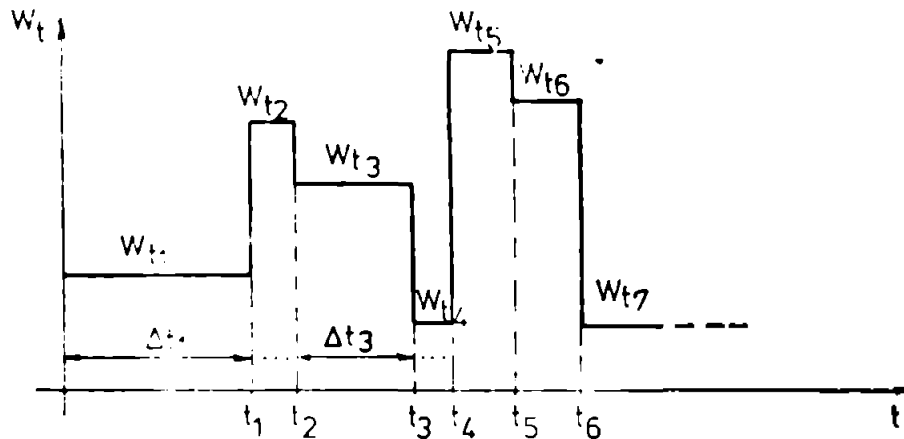


Fig.2.6. Variația pierderilor totale.

mediul ambiant se calculează cu relații similare cu relația (2.61):

$$\begin{aligned} \Delta\theta_1 &= W_{t1} \cdot R_T (1 - e^{-\frac{\Delta t_1}{T}}) + \Delta\theta_0 \cdot e^{-\frac{\Delta t_1}{T}} \\ \Delta\theta_2 &= W_{t2} \cdot R_T (1 - e^{-\frac{\Delta t_2}{T}}) + \Delta\theta_1 \cdot e^{-\frac{\Delta t_2}{T}} \\ &\vdots \\ \Delta\theta_n &= W_{tn} \cdot R_T (1 - e^{-\frac{\Delta t_n}{T}}) + \Delta\theta_{n-1} \cdot e^{-\frac{\Delta t_n}{T}} \end{aligned} \quad (2.62)$$

Dacă duratele Δt_k îndeplinesc condiția $\Delta t_k \ll T$, în dezvoltarea în serie a exponențialelor se pot neglija termenii de rang superior ($k \geq 2$):

$$e^{-\frac{\Delta t_k}{T}} \approx 1 - \left(\frac{\Delta t_k}{T}\right) \cdot \frac{1}{1!} \quad (2.63)$$

După înlocuiri și grupări de termeni, diferența de temperatură finală rezultă:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_n &= (W_{tn} \cdot \Delta t_n + W_{tn-1} \cdot \Delta t_{n-1} + \dots + W_{t1} \cdot \Delta t_1) \cdot \frac{R_T}{T} + \\ &+ \Delta\theta_0 - (\Delta t_n + \Delta t_{n-1} + \dots + \Delta t_1) \cdot \frac{\Delta\theta_0}{T} \end{aligned} \quad (2.64)$$

În ipoteza: $T \approx \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n$, diferența de temperatură fină se calculează cu relația simplificată:

$$\Delta \theta_n = w_e \cdot R_T \quad (2.65)$$

în care w_e reprezintă pierderile echivalente:

$$w_e = \frac{w t_1 \cdot \Delta t_1 + w t_2 \cdot \Delta t_2 + \dots + w t_n \cdot \Delta t_n}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n} \quad (2.66)$$

Similar se poate defini și curentul constant echivalent I_e , care produce aceeași încălzire ca și curenții I_k cu variația în trepte ($k = 1, n$)

$$I_e = \left[\frac{\sum_{k=1}^n I_k^2 \cdot \Delta t_k}{\sum_{k=1}^n \Delta t_k} \right]^{1/2} \quad (2.67)$$

Un caz particular îl reprezintă regimul periodic intermitent, în care curentul de amplitudine I , acționează pe durata Δt_1 și este zero pe durata Δt_2 .

Definind DA% - durată activă relativă a ciclului:

$$DA\% = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_1 + \Delta t_2} \cdot 100 \quad (2.68)$$

curentul constant echivalent I_{ei} al regimului intermitent devine :

$$I_{ei} = I \left[\frac{100}{DA\%} \right]^{1/2} \quad (2.69)$$

2.2.2.3. Schemă termică echivalentă pentru regimul de lungă durată cu sarcină variabilă.

Metoda de calcul prezentată în paragraful precedent reprezintă o tratare generală a încălzirii conductorului considerând o capacitate termică echivalentă pentru întregul cablu.

Deoarece în structura unui cablu intervin mai multe straturi cu capacități și rezistențe termice diferite - acestea se vor lua în considerare distinct, rezultând o schemă termică echivalentă - similară cu o schemă electrică formată din cuadripoli în π sau T.

Van Wormer a propus în 1955 [103] înlocuirea sistemului fizic cu o rețea termică echivalentă având mărimile R_T și C_T concentrate - corespunzătoare fiecărui strat: izolația fazei, ecran, izolație de centură, armături, manta.

In figura 2.7 se prezintă schema termică echivalentă, pentru un cablu monofazat, utilizând următoarele notații (6):

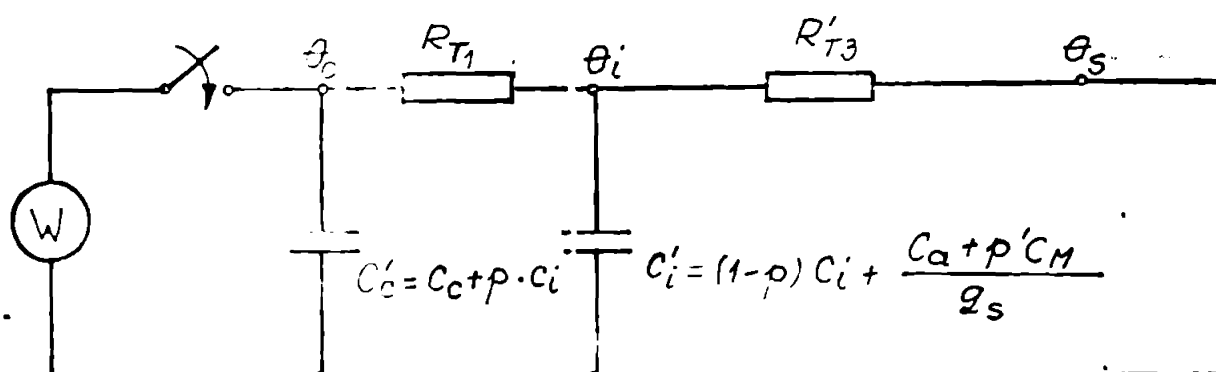


Fig.2.7. Schema termică echivalentă pentru regimul de lungă durată.

- θ_c - temperatura la suprafața conductorului,
- θ_i - temperatura pe suprafața izolației de fază,
- θ_s - temperatura pe suprafața cablului,
- R_{T1} - rezistența termică a izolației de fază,
- R_{T3} - rezistența termică a mantalei de protecție,
- $R'_{T3} = q_s \cdot R_{T3}$,
- q_s - raportul dintre pierderile în conductor și armăturile de protecție și pierderile în conductor,
- C_c - capacitatea termică a conductorului,
- C_i - capacitatea termică a izolației,
- $C'_c = C_c + p \cdot C_i$,
- p - coeficientul lui Wormer pentru izolanț,
- C_a - capacitatea termică a armăturilor metalice de protecție,
- C_M - capacitatea termică a mantalei de protecție,
- $C'_i = (1-p) \cdot C_i + \frac{C_a + p' \cdot C_M}{q_s}$,
- p' - coeficientul lui Wormer pentru învelișuri.

Coeficienții p și p' rezultă scriindu-se bilanțul pierderilor în dielectric pentru porțiunea considerată, rezultând expresiile:

$$p = \frac{1}{2 \ln \frac{r_1}{r_c}} - \frac{1}{\left(\frac{r_1}{r_c}\right)^2 - 1} ; p' = \frac{1}{2 \ln \frac{r_e}{r_a}} - \frac{1}{\left(\frac{r_e}{r_a}\right)^2 - 1} \quad (2.70)$$

unde: r_1 - raza exterioară a izolației; r_c - raza conductorului;
 r_e - raza exterioară a mantalei cablului; r_a - raza interioară a mantalei.

Calculul temperaturilor în scheme din figura 2.7 se poate efectua aplicînd o transformată de tip Laplace [6], sau scriînd sistemul de ecuații diferențiale de forma:

$$W = C_c' \cdot \frac{d\theta_c}{dt} + \frac{\theta_c - \theta_1}{R_{T1}} \quad (2.71)$$

Pe baza schemei din figura 2.7 se poate determina variația în timp a temperaturii conductorului θ_c și a temperaturii pe suprafața izolației de fază θ_1 . Schema poate să fie completată pentru a permite determinarea variației în timp a temperaturii în interiorul izolației de fază. În acest scop se împarte în două rezistența termică a izolației de fază, iar capacitățile termice ale celor două zone ale izolației de fază se vor grupa în nodurile schemei cu ajutorul coeficienților p și p' calculați pentru fiecare zonă.

În lucrare [152], autorul tezei a utilizat schema termică echivalentă (fig.2.8) care permite și determinarea variației temperaturii

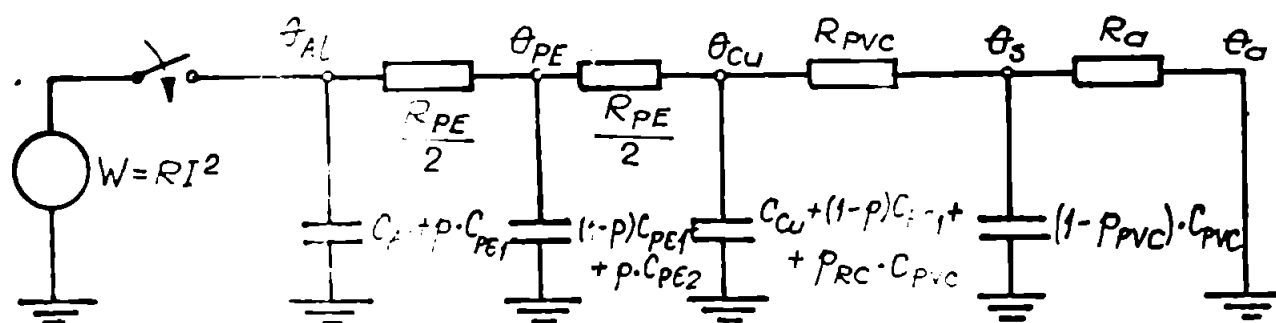


Fig.2.8. Schema termică echivalentă pentru un cablu cu conductor din Al, izolație din polietilenă, ecran de Cu și manta din PVC.

în interiorul izolației de fază θ_{PE} . Cablul analizat are izolația de fază din polietilenă (PE).

Pe baza schemei din figura 2.8 se poate scrie următorul sistem de ecuații diferențiale:

$$\begin{aligned}
 W &= K_1 \cdot \frac{d\theta_{Al}}{dt} + \frac{\theta_{Al} - \theta_{PE}}{\left(\frac{R_{PE}}{2}\right)}, \\
 \frac{\theta_{Al} - \theta_{PE}}{\left(\frac{R_{PE}}{2}\right)} &= K_2 \cdot \frac{d\theta_{PE}}{dt} + \frac{\theta_{PE} - \theta_{Cu}}{\frac{R_{PE}}{2}}, \\
 \frac{\theta_{PE} - \theta_{Cu}}{\left(\frac{R_{PE}}{2}\right)} &= K_3 \cdot \frac{d\theta_{Cu}}{dt} + \frac{\theta_{Cu} - \theta_{PVC}}{R_{PVC}}, \\
 \frac{\theta_{Cu} - \theta_s}{\left(\frac{R_{PVC}}{2}\right)} &= K_4 \cdot \frac{d\theta_s}{dt} + \frac{\theta_s - \theta_a}{R_a}.
 \end{aligned}
 \tag{2.72}$$

Temperatura θ_s reprezintă temperatura mediului ambiant, iar rezistența termică R_a reprezintă rezistența între suprafața cablului și mediul ambiant.

Pentru creșterea preciziei de calcul prin care schema termică echivalentă reproduce sistemul fizic real - fiecare strat din construcția cablului poate fi înlocuit cu un număr mai mare de secțiuni cu rezistențe și capacități termice. Creșterea secțiunilor va conduce la creșterea numărului de ecuații diferențiale care trebuie integrate iar rezolvarea devine mai laborioasă. Procedeu va fi folosit pentru stabilirea schemei termice echivalente în cazul regimului termic de scurtă durată.

Sistemul de ecuații diferențiale (2.72) a fost rezolvat pe calculator analogic și e necesitat patru integratori. În figura 2.9 se prezintă schema de cablaj:

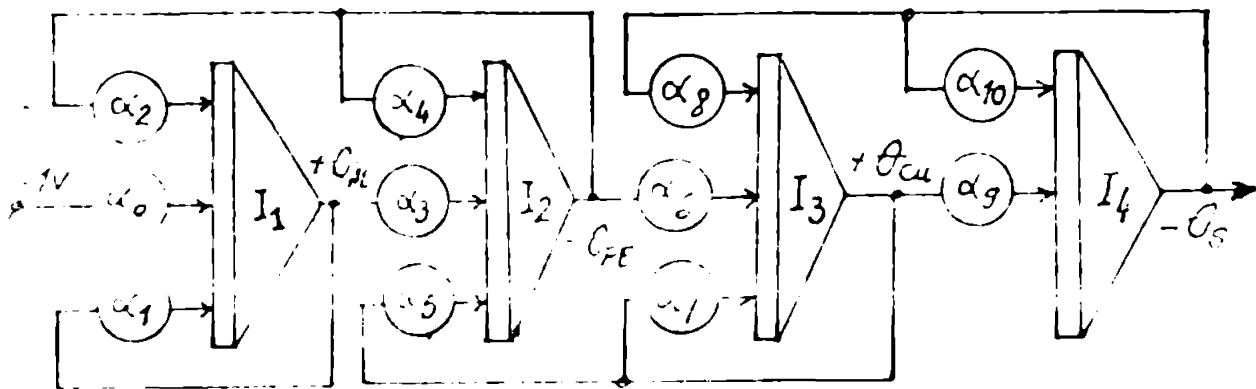


Fig.2.9. Schema de cablaj pentru rezolvarea sistemului (2.72).

Valorile numerice, scările de modelare și rezultatele obținute vor fi prezentate în paragraful 2.4.5.2 al tezei.

2.2.2.4. Regimul de lungă durată cu sarcină variabilă ciclică - soluții numerice (20).

Încărcarea cablurilor variază în funcție de necesitățile consumatorilor, dar în multe cazuri se constată o repetare zilnică a curbei de sarcină. Calculul regimului termic în cazul unei sarcini variabile ciclice caută să determine atât variația în timp a temperaturii, cât și rezerva cu care poate să fie supraîncărcat cablul în caz de urgență, pe o durată de timp precizată, astfel ca la sfârșitul duratei de supra-sarcină - să nu se depășească supratemperatura admisibilă.

Metoda de calcul propusă în lucrarea (20) se efectuează cu următoarele ipoteze:

a) Un ciclu cu variație oarecare continuă, se înlocuiește cu m trepte constante în intervalele respective și egale cu valoarea medie a sarcinii reale.

b) În condiții date - se cunoaște variația supratemperaturii $\Theta(t)$ la sarcină nominală.

Notatiile folosite:

m - numărul de sarcini variabile într-un ciclu; K - ordinul unei sarcini oarecare; n - numărul de cicluri; $R(t_1)$ - răspunsul tranzitoriu; $\varphi_1(t)$ - funcția răcirii; I_K - curentul pentru sarcina de ordinul K dintr-un ciclu; I_n - curentul nominal; I_{σ} - curentul de supra-sarcină; $I_{\sigma u}$ - curentul de supra-sarcină de urgență; $t_{\sigma K}$ - momentul producerii supra-sarcinii de urgență; T - durată supra-sarcinii de urgență; Θ_{ad} - supratemperatura admisibilă; $\Theta(0)$ - supratemperatura inițială; Θ_n - supratemperatura maximă la sarcină nominală; $\Theta_{\sigma}(T)$ - supratemperatura la supra-sarcina de urgență; $\Theta_K(t_k)$ - supratemperatura la sarcină de ordin K , după timpul t_k ; $\Theta_{K,m}^n$ - supratemperatura maximă pentru sarcina de ordin K , făcând parte din șirul de m sarcini ciclice, după n cicluri.

Cunoscând variația supratemperaturii $\Theta(t)$ la sarcină nominală, se poate calcula răspunsul tranzitoriu $R(t_1)$ și funcția răcirii cablului $\varphi_1(t)$:

$$R(t_1) = \frac{\Theta(t)}{\Theta(0)} ; R(0) = 0 ; R(\infty) = 1 ; \tag{2.73}$$

$$\varphi_1(t) = \frac{\Theta(t)}{\Theta(0)} ; \varphi_1(0) = 1 ; \varphi_1(\infty) = 0 ; \tag{2.74}$$

- funcția răcirii poate fi calculată și prin relația (2.75) - în situația în care variația rezistenței electrice cu temperatura este neglijabilă:

$$\varphi_1(t) = 1 - R(t) \quad (2.75)$$

Încălzirea corespunzătoare unei sarcini de ordinul K, se calculează cu ajutorul răspunsului tranzitoriu și al funcției răcirii:

$$\begin{aligned} \theta_{K(t)} &= \left(\frac{I_K}{I_n}\right)^2 \cdot \theta_{n\infty} \cdot \frac{\theta(t)}{\theta(\infty)} + \theta_{K(0)} \cdot \frac{\theta(t)}{\theta(0)} = \\ &= \theta_{K\infty} \cdot R(t) + \theta_{K(0)} \cdot \varphi(t). \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$\left(\frac{I_K}{I_n}\right)^2 \cdot \theta_{n\infty} = \theta_{K\infty} - \text{încălzirea maximă pentru } I_K ;$$

$$\theta_{K(0)} - \text{încălzirea la începutul treptei de ordin K.}$$

Supratemperaturile pentru diferite trepte și cicluri se calculează prin recurență:

- pentru ciclul 1:

$$\begin{aligned} \theta_{1,m}^1 &= \theta_1(t_1) \cdot \\ \theta_{2,m}^1 &= \theta_2(t_2) + \theta_{1,m}^1 \cdot \varphi_2 \cdot \\ \theta_{3,m}^1 &= \theta_3(t_3) + \theta_{2,m}^1 \cdot \varphi_3 \cdot \\ &\vdots \\ \theta_{m,m}^1 &= \theta_m(t_m) + \theta_{m-1,m}^1 \cdot \varphi_m \cdot \end{aligned} \quad (2.77)$$

- pentru ciclul 2:

$$\begin{aligned} \theta_{1,m}^2 &= \theta_1(t_1) + \theta_{m,m}^1 \cdot \varphi_1 \cdot \\ \theta_{2,m}^2 &= \theta_2(t_2) + \theta_{1,m}^2 \cdot \varphi_2 \cdot \\ \theta_{3,m}^2 &= \theta_3(t_3) + \theta_{2,m}^2 \cdot \varphi_3 \cdot \\ &\vdots \\ \theta_{m,m}^2 &= \theta_3(t_3) + \theta_{m-1,m}^2 \cdot \varphi_n \cdot \end{aligned} \quad (2.78)$$

După un număr "n" de cicluri, supratemperaturile se stabilizează:

$$\theta_{K,m}^{n-1} = \theta_{K,m}^n = \theta_{1,m} \quad K \in \overline{1..n} \quad (2.79)$$

Intr-un ciclu stabilizat, supratemperaturile devin:
 Explicitind:

$$\begin{aligned}
 \Theta_{1,m} &= \Theta_{m,m} \varphi_1 + \Theta_1(t_1) & \Theta_{m,m} &= \Theta_{m,m} \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdots \varphi_m + \\
 \Theta_{2,m} &= \Theta_{1,m} \cdot \varphi_2 + \Theta_2(t_2) & &+ \Theta_1(t_1) \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdots \varphi_m + \\
 \Theta_{3,m} &= \Theta_{2,m} \cdot \varphi_3 + \Theta_3(t_3) & &+ \Theta_2(t_2) \cdot \varphi_3 \cdot \varphi_4 \cdots \varphi_m + \cdots \\
 \vdots & & & \vdots \\
 \Theta_{m,m} &= \Theta_{m-1,m} \cdot \varphi_m + \Theta_m(t_m) & &+ \Theta_{m-1}(t_{m-1}) \cdot \varphi_m + \Theta_m(t_m) \cdot
 \end{aligned}
 \tag{2.80}$$

Grupind termenii:

$$\Theta_{m,m} = \frac{\Theta_1(t_1) \prod_{i=2}^m \varphi_i + \Theta_2(t_2) \prod_{i=3}^m \varphi_i + \cdots + \Theta_{m-1} \cdot \varphi_m + \Theta_m(t_m)}{1 - \prod_1^m \varphi_i}
 \tag{2.81}$$

Similar:

$$\Theta_{K,m} = \Theta_{m,m} \prod_1^K \varphi_i + \Theta_1(t_1) \prod_2^K \varphi_i + \Theta_2(t_2) \prod_3^K \varphi_i + \cdots + \Theta_K(t_K) =$$

(inlocuim $\Theta_{m,m}$ si grupam termenii)

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\Theta_1(t_1) \prod_2^m \varphi_i}{1 - \prod_1^m \varphi_i} \cdot \prod_1^K \varphi_i + \Theta_1(t_1) \cdot \prod_2^K \varphi_i + \\
 &+ \frac{\Theta_2(t_2) \prod_3^m \varphi_i}{1 - \prod_1^m \varphi_i} \cdot \prod_1^K \varphi_i + \Theta_2(t_2) \cdot \prod_3^K \varphi_i + \cdots \\
 &+ \frac{\Theta_K(t_K) \prod_{K+1}^m \varphi_i}{1 - \prod_1^m \varphi_i} \cdot \prod_1^K \varphi_i + \Theta_K(t_K) + \\
 &+ \frac{\sum_{K+1}^m \Theta_i(t_i) \cdot \prod_{K+2}^m \varphi_i}{1 - \prod_1^m \varphi_i} \cdot \prod_1^K \varphi_i \quad .
 \end{aligned}
 \tag{2.82}$$

Grupam termenii: $(\prod_2^m \varphi_i \cdot \prod_1^K \varphi_i = \prod_1^m \varphi_i \cdot \prod_2^K \varphi_i)$.

$$\begin{aligned} \Theta_{K,m} = & \frac{m}{\pi} \varphi_1 \cdot \frac{\Theta_1(t_1) \cdot \frac{\pi}{2} \varphi_1}{1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1} + \Theta_1(t_1) \cdot \frac{\pi}{2} \varphi_1 + \\ & + \frac{m}{\pi} \varphi_1 \cdot \frac{\Theta_2(t_2) \cdot \frac{\pi}{3} \varphi_1}{1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1} + \Theta_2(t_2) \cdot \frac{\pi}{3} \varphi_1 + \dots \\ & \vdots \\ & + \frac{m}{\pi} \varphi_1 \cdot \frac{\Theta_K(t_K)}{1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1} + \Theta_K(t_K) + \sum_{K+1}^m \Theta_1(t_1) \frac{\frac{m}{\pi} \varphi_1}{(1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1) \cdot \varphi_{K+1}} \quad (2.83) \end{aligned}$$

Cu observația: $\frac{\pi}{1-\pi} + 1 = \frac{1}{1-\pi}$

$$\begin{aligned} \Theta_{K,m} = & \frac{1}{1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1} \left[\Theta_1(t_1) \frac{\pi}{2} \varphi_1 + \Theta_2(t_2) \frac{\pi}{3} \varphi_1 + \dots + \Theta_K(t_K) \right] + \\ & + \left[\sum_{K+1}^m \Theta_1(t_i) \frac{\frac{m}{\pi} \varphi_1}{\frac{1-i}{\pi} \varphi_1} \right] \cdot \frac{1}{1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1} = \\ = & \frac{1}{1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1} \left[\Theta_1(t_1) \frac{\frac{\pi}{1} \varphi_1}{\frac{1}{\pi} \varphi_1} + \Theta_2(t_2) \frac{\frac{\pi}{2} \varphi_1}{\frac{2}{\pi} \varphi_1} + \dots + \Theta_K(t_K) \frac{\frac{\pi}{K} \varphi_1}{\frac{K}{\pi} \varphi_1} \right] + \\ & + \sum_{K+1}^m \Theta_1(t_1) \frac{\frac{m}{\pi} \varphi_1}{\frac{1}{\pi} \varphi_1} \cdot \frac{1}{1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1} = \\ \Theta_{K,m} = & \frac{\sum_1^K \Theta_1(t_1) \frac{\frac{\pi}{1} \varphi_1}{\frac{1}{\pi} \varphi_1} + \sum_{K+1}^m \Theta_1(t_1) \frac{\frac{\pi}{1} \varphi_1}{\frac{1}{\pi} \varphi_1}}{1 - \frac{m}{\pi} \varphi_1} \quad (2.84) \end{aligned}$$

În situația în care intervine o defecțiune, c. blurile pot să suporte o suprasarcină de urgență pe o durată T , astfel ca la sfârșitul acestei solicitări - încălzirea maximă să nu depășească încălzirea admisibilă:

$$[\Theta_{S(T)_{max}}] \leq \Theta_{ad} \quad (2.85)$$

Mărimea suprasarcinii de urgență și durata ei - depind de condițiile anterioare de funcționare ale cablului. Suprasarcina de urgență poate să apară la orice moment 0^+ în timpul unei sarcini de ordinul K :

$$\theta_S(T) = \left(\frac{I_{SU}}{I_n}\right)^2 \cdot \theta_{n\infty} \cdot R(T) + \theta_{K,m}(t_{oK}) \cdot \varphi(T) \quad (2.85)$$

$$\theta_{K,m}(t_{oK}) = \left(\frac{I_K}{I_n}\right) \cdot \theta_{n\infty} \cdot R(t_{oK}) + \theta_{K-1,m} \cdot \varphi(t_{oK}) \quad (2.87)$$

$$\theta_{K-1,m} = \frac{\sum_{i=1}^{K-1} \theta_i(t_i) \cdot \frac{1}{1} \varphi_i}{1 - \frac{\sum_{i=1}^m \theta_i(t_i) \cdot \frac{1}{K} \varphi_i}{1 - \frac{\sum_{i=1}^m \theta_i(t_i) \cdot \frac{1}{K} \varphi_i}}}{1 - \frac{\sum_{i=1}^m \theta_i(t_i) \cdot \frac{1}{K} \varphi_i}{1 - \frac{\sum_{i=1}^m \theta_i(t_i) \cdot \frac{1}{K} \varphi_i}}} \quad (2.88)$$

Rezultă mărimea supr sarcinii de urgență pentru o anumită durată T adoptată:

$$I_{SU} = I_n \left[\frac{\theta_{ad}}{\theta_{n\infty}} \cdot \frac{1}{R_T} - \frac{\theta_{K,m}(t_{oK})}{\theta_{n\infty}} \cdot \frac{\varphi(T)}{R(T)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.89)$$

Cunoscînd răspunsul tranzitoriu și mărimea suprasarcinii de urgență, se poate determina durata maximă T_{max} , din condiția:

$$R(T_{max}) \leq \frac{\theta_{ad} - \theta_{K,m}(t_{oK})}{\left(\frac{I_{SU}}{I_n}\right) \cdot \theta_{n\infty} - \theta_{K,m}(t_{oK})} \quad (2.90)$$

Cu ajutorul unui calculator numeric, calculele ar putea fi efectuate în timp foarte scurt și ar permite adoptarea unor decizii în exploatarea unor cabluri de importanță deosebită.

În (20) se exemplifică numeric metoda prezentată. De asemenea rezultă și importanța prelucrării pe calculator numeric a unor parametri care caracterizează regimul de funcționare a cablurilor de mare putere.

2.2.3. Calculul încălzirii în regim de scurtă durată.

Regimul de scurtă durată este un regim tranzitoriu care nu depășește 5 secunde (5). În cazul solicitării termice produse de curenții de scurtcircuit cu o durată de acțiune mult mai mică decît constanta de timp a procesului termic în cablu ($t_{acc} \ll R_T C_T$), calculul încălzirii se poate efectua în ipoteza adiabatică.

2.3.1. Incălzirea conductorului în ipoteza adiabatică. (3)

Ipoteza adiabatică presupune că nu există un transfer de căldură spre exterior pentru un regim de încălzire de foarte scurtă durată - regim de scurtcircuit. În ecuația de bilanț termic se va lua în considerare variația rezistivității electrice și variația căldurii specifice a conductorului cablului cu temperatura.

Pentru conductorii din cupru și aluminiu se pot utiliza următoarele relații de calcul (3):

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)_{Cu} = 1 + 0,424 \cdot 10^{-2} \cdot \theta + 0,453 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2 \quad (2.91)$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)_{Al} = 1 + 0,3867 \cdot 10^{-2} \cdot \theta + 1,10 \cdot 10^{-6} \cdot \theta^2$$

$$\left(\frac{c}{c_0}\right)_{Cu} = 1 + 3,35 \cdot 10^{-4} \cdot \theta + 2,95 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2 \quad (2.92)$$

$$\left(\frac{c}{c_0}\right)_{Al} = 1 + 3,801 \cdot 10^{-4} \cdot \theta + 5,010 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2$$

Pentru alte materiale, se pot stabili relații de calcul similare - obținute prin determinări experimentale și prin aplicarea metodei de interpolare Lagrangiană - pe un calculator numeric.

Plecând de la ecuația bilanțului termic, pentru acest regim:

$$w_t = c \cdot M \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2.93)$$

prin explicitarea și gruparea termenilor rezultă relația:

$$\int_0^{t_{acc}} \frac{i^2(t)}{s^2} dt = \int_{\theta_0}^{\theta_{max}} \frac{c_0 (1 + \beta \cdot \theta + \dots) \cdot \gamma}{c_0 (1 + \alpha_0 \theta + \dots) (1 + \gamma_s + \gamma_p)} \cdot d\theta \quad (2.94)$$

în care s-au folosit notațiile: s - secțiunea conductorului; γ - densitatea lui; γ_p - coeficient pentru efectul de proximitate; γ_s - coeficient pentru efectul de suprafață (skin).

Se poate defini o valoare medie pătratică a curentului de scurtcircuit I_{Km}^2 :

$$I_{Km}^2 = \frac{1}{t_{acc}} \int_0^{t_{acc}} i^2(t) dt \quad (2.95)$$

Prin rezolvarea integralei din partea dreaptă a ecuației (2.95), în situația în care $\theta_{max} = \theta_{adm}$:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_{adm}} \frac{c_0 (1 + \beta \cdot \theta + \dots) \cdot \gamma}{c_0 (1 + \alpha \cdot \theta + \dots) (1 + \gamma_s + \gamma_p)} \cdot d\theta = R(\theta_{adm}) - R(\theta_0) \quad (2.96)$$

se poate determina secțiunea conductorului S, care suportă un curent de scurtcircuit de durată și variație în timp cunoscută:

$$S = \left[\frac{I_{Km}^2 \cdot t_{scc}}{R(\theta_{adm}) - R(\theta_0)} \right]^{1/2} \quad (2.97)$$

Rezolvarea integralei (2.90) se poate face (3):

- după metoda VDE 0,103 (în ipoteza: $\rho = \rho_0(1 + \alpha_0 \cdot \theta)$; $C = C_0$ și $\gamma_p = \gamma_3 = 0$):

$$R(\theta_{adm}) - R(\theta_0) = \frac{C_0 \cdot \gamma}{\rho_0 \cdot \alpha_0} \ln \frac{1 + \alpha_0 \cdot \theta_{adm}}{1 + \alpha_0 \cdot \theta_0} \quad (2.98)$$

- după metoda sovietică (în ipoteza: $\rho = \rho_0(1 + \alpha_0 \cdot \theta)$, $C = C_0(1 + \beta_0 \cdot \theta)$, $\gamma_p = \gamma_3 = 0$):

$$R(\theta) = \frac{C_0 \cdot \gamma}{\rho_0} \left[\frac{\beta_0}{\alpha_0} \cdot \theta + \frac{\alpha_0 - \beta_0}{\alpha_0^2} \ln(1 + \alpha_0 \cdot \theta) \right] \quad (2.99)$$

2.2.3.2. Schemă termică echivalentă pentru regimul de scurtă durată.

Schema termică pentru regimul de scurtă durată are elemente comune cu schema termică pentru regimul de lungă durată (paragraful 2.2.2.3), cu deosebirea luării în considerare a mai multor secțiuni cu rezistențe și capacități termice - în scopul creșterii preciziei de calcul.

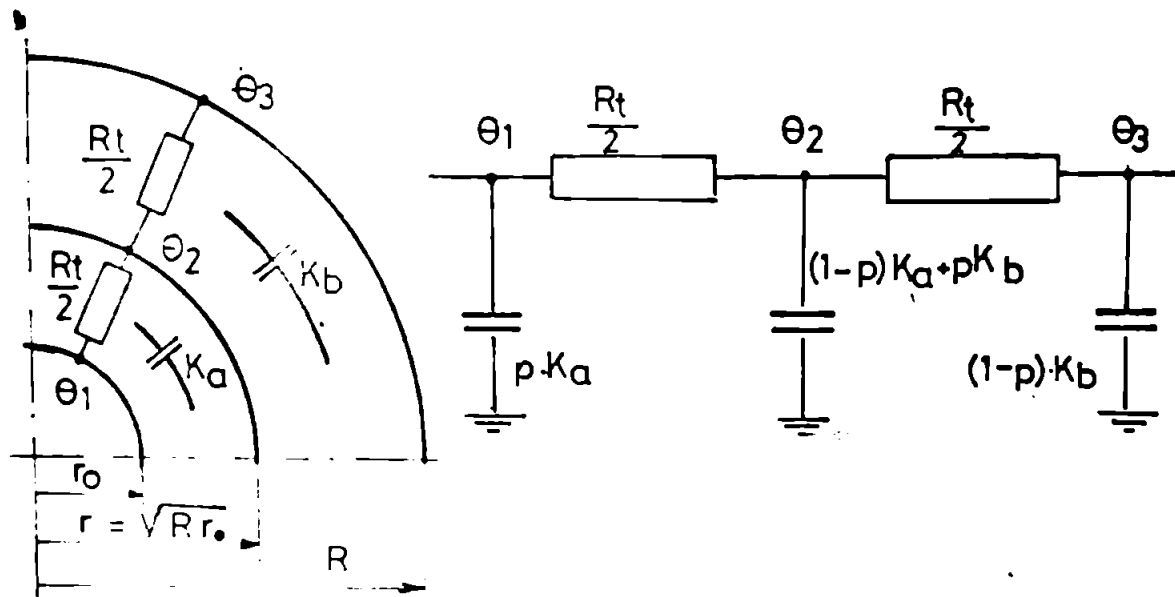
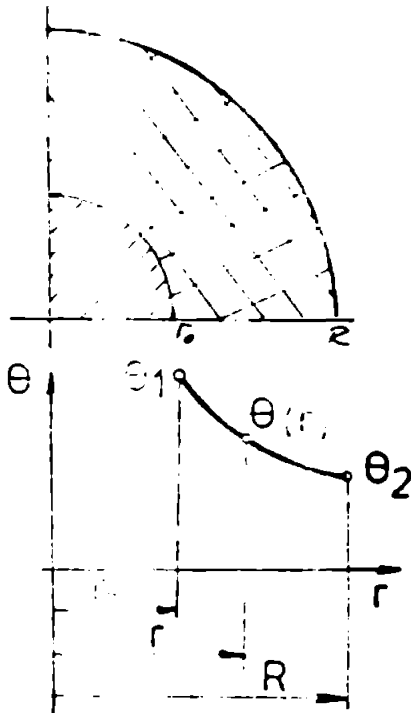


Fig.2.10 Cuadripoli echivalenți pentru izolația de fază.

Stratul cilindric al izolației de fază s-a împărțit în două zone cu aceeași rezistență termică (fig.2.10). Raze suprafeței izoterme care delimitează cele două straturi cilindrice rezultă din condiția de egalitate a rezistenței termice:

$$\frac{R_t}{2} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r}{r_0} = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (2.100)$$

$$\frac{r}{r_0} = \frac{R}{r} \quad \text{sau} \quad r = \sqrt{R \cdot r_0} \quad (2.101)$$



Pentru un strat cilindric (fig.2.11) temperatura variază cu raza, iar fluxul termic acumulat variază cu temperatura (103):

$$\theta_1 - \theta_2 = W \cdot R_t = W \cdot \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{R}{r_0} \quad (2.102)$$

$$\theta_1 - \theta(r) = W \cdot R(r) = W \cdot \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r}{r_0} \quad (2.103)$$

$$dW(r) = \theta(r) \cdot C \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \quad (2.104)$$

unde:

$$c \left[\frac{W \cdot s}{^{\circ}C \cdot m^3} \right] \text{ - căldura specifică;}$$

$$\rho \left[\frac{^{\circ}C \cdot m}{W} \right] \text{ - rezistivitatea termică.}$$

Temperatura în punctul de rază r se obține din relațiile (2.102), (2.103), (2.104):

Fig.2.11. Perete cilindric.

$$\theta(r) = \theta_1 - (\theta_1 - \theta_2) \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (2.105)$$

Fluxul termic rezultă din integrarea expresiei (2.105), și se poate echivala cu suma a două componente:

$$\int_{r_0}^R dW(r) = p \cdot W_1 + (1-p) \cdot W_2 = [p \cdot \theta_1 + (1-p) \cdot \theta_2] \cdot \pi (R^2 - r_0^2) \quad (2.106)$$

Cu o înlocuire și simplificări:

$$2 \int_{r_0}^R \left[\theta_1 - (\theta_1 - \theta_2) \frac{\ln \frac{r}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_0}} \right] r \cdot dr = [p \cdot \theta_1 + (1-p) \cdot \theta_2] (R^2 - r_0^2) \quad (2.107)$$

Integrând:

$$2 \cdot \theta_1 \left(\frac{R^2}{2} - \frac{r_0^2}{2} \right) - \frac{2(\theta_1 - \theta_2)}{\ln \frac{R}{r_0}} \left[\frac{R^2}{2} \ln \frac{R}{r_0} - \frac{R^2 - r_0^2}{4} \right] = [p \cdot \theta_1 + (1-p) \cdot \theta_2] (R^2 - r_0^2) \quad (2.108)$$

Prin transformări rezultă coeficientul p :

$$p = \frac{1}{2 \ln \frac{R}{r_0}} - \frac{1}{\left(\frac{R}{r_0}\right) - 1} \quad (2.109)$$

Schema termică echivalentă pentru regimul de scurtă durată are structura prezentată în figura 2.12 (6):

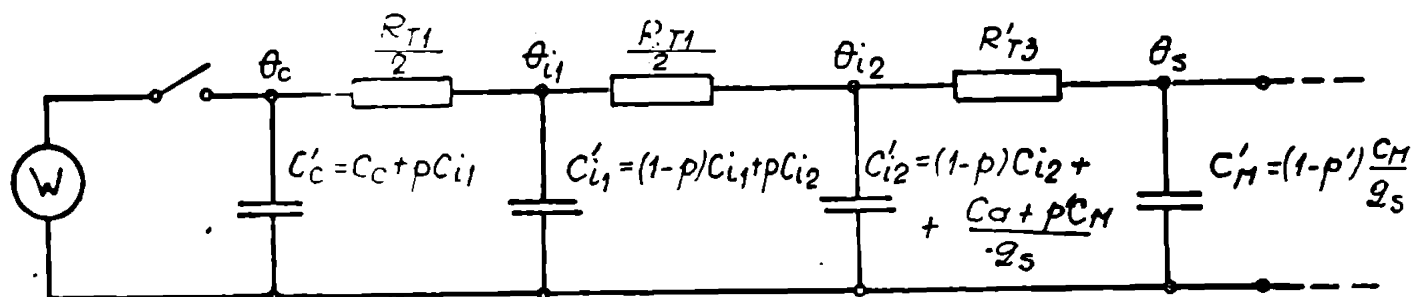


Fig.2.12. Schema termică echivalentă pentru regimul de scurtă durată.

Temperatura θ_{i1} reprezintă o valoare medie în volumul izolației de fază, iar θ_{i2} - temperatura la suprafața izolației de fază. Schema conține mai multe elemente, dar poate fi utilizată și pentru tratarea regimului termic de lungă durată.

2.3. REGIMUL TERMIC AL CABLURILOR CU RĂCIRE FORTATĂ.

În cazul creșterii puterii transportate, răcirea naturală devine insuficientă din cauza valorii mari a rezistențelor termice și a suprafeței limitate prin care se efectuează schimbul de căldură între conductor și izolație. Această solicitare termică mărită limitează puterea transportată prin cablurile de energie la valori reduse față de puterea naturală a acestora. Creșterea puterii transportate prin cablu este posibilă numai prin realizarea unei circulații a fluidului de răcire.

Adoptînd debite mici ale fluidului de răcire se asigură o uniformizare a temperaturii în lungul canalizării și se evită apariția unor puncte de hipertermie în care s-ar putea dezvolta defecte de izolație. Pentru debite mai mari ale fluidului de răcire se poate asigura o evacuare axială a căldurii, fiind necesar ca fluidul de răcire să fie trecut prin schimbătoare de căldură amplasate la unul sau la ambele extremități ale cablului.

Lungimea canalizării unui circuit de răcire este limitată, deoarece odată cu creșterea lungimii scade eficiența răcirii. În cazul cablurilor trifazate apare o interacțiune termică între faze. Distribuția temperaturii în lungul canalizării poate fi reglată prin reglajul debitului și al temperaturilor fluidului la ieșirea din schimbătoarele de căldură. Calculul distribuției temperaturii în lungul canalizării se poate efectua plecînd de la ecuațiile de bilanț termic.

2.3.1. Ecuatia bilanțului termic în cazul unui singur cablu.

Pierderile totale W_t sînt egale cu suma dintre pierderile disipate în sol $W_p(x)$ și pierderile absorbite de fluidul de răcire $W_f(x)$ (3):

$$W_t = W_p(x) + W_f(x) \quad (2.110)$$

În ipoteza că lungimea cablului este foarte mare, temperatura la suprafața cablului $\Theta_c(x)$ și temperatura fluidului de răcire $\Theta_f(x)$ tind spre o valoare comună: $\Theta_c(x \rightarrow \infty) = \Theta_f(x \rightarrow \infty)$.

În punctele de coordonată "x" în care aceste două temperaturi diferă, are loc o preluare de energie calorică de către fluidul de răcire:

$$\Theta_c(x) - \Theta_f(x) = Q_f(x) \cdot R_{TC} \quad (2.111)$$

unde:

R_{TC} - rezistența termică între suprafața cablului și fluidul de răcire $[m.K.W^{-1}]$.

Diferența dintre temperatura la suprafața cablului și temperatura mediului ambiant Θ_a , determină mărimea pierderilor disipate în sol:

$$\Theta_c(x) - \Theta_a = W_p(x) \cdot R_{TA} \quad (2.112)$$

R_{TA} - rezistența termică a solului.

În afară de condițiile de pozare, pierderile preluate de fluid depind și de parametrii fluidului:

$$W_f(x) = Q \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{d\Theta_f(x)}{dx} \quad (2.113)$$

în care:

Q - debitul fluidului $[m^3.s^{-1}]$; c - căldura specifică a fluidului $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$; ρ - densitatea fluidului de răcire $[kg.m^{-3}]$; $W_f(x)$ - pierderile preluate de fluid $[W.s^{-1}]$.

Prin înlocuiri, rezultă ecuație diferențială care descrie încălzirea fluidului de răcire în lungul canalizării:

$$\frac{d\Theta_f(x)}{dx} + \frac{1}{(R_{TC} + R_{TA}) \cdot Q \cdot c \cdot \rho} \cdot \Theta_f(x) = \frac{W_t + R_{TA} \cdot \Theta_a}{(R_{TC} + R_{TA}) \cdot Q \cdot c \cdot \rho} \quad (2.114)$$

Soluția ecuației (2.114) este de forma:

$$\Theta_f(x) = A \cdot e^{-\frac{x}{(R_{TC} + R_{TA}) \cdot Q \cdot c \cdot \rho}} + B \quad (2.115)$$

Constantele A și B se determină din condițiile de limită:

$$A = \Theta_f(x=0) - \Theta_f(x \rightarrow \infty) , \quad (2.116)$$

$$B = \Theta_f(x \rightarrow \infty) = \Theta_a + W_t \cdot R_{T4} .$$

Situația analizată apare în cazuri particulare în care fluidul de răcire poate fi utilizat în circuit deschis. De exemplu - se poate utiliza o răcire cu apă a unui cablu dacă se dispune de apă curentă, cu un debit suficient pe un traseu cu o anumită pantă pentru curgere naturală. Este de asemenea necesar ca apa să poată fi evacuată sau utilizată ulterior în alte scopuri, fără cheltuieli suplimentare.

2.3.2. Influența reciprocă dintre circuitul de dus și circuitul de întors al fluidului de răcire [28], [144].

În majoritatea cazurilor fluidul de răcire circulă într-un circuit închis prevăzut la capete cu refrigeratoare. Prezența circuitului de întors în apropierea circuitului de dus al fluidului și care este la o temperatură superioară temperaturii mediului ambiant, contribuie la modificarea bilanțului termic.

Pentru stabilirea ecuațiilor de bilanț termic, autorul tezei a avut ca punct de plecare lucrarea [28], în care se consideră ca ipoteze pentru simplificarea calculului următoarele elemente care în calculele practice au o pondere neglijabilă: conductibilitatea termică longitudinală a canalizării, a solului și a fluidului și de asemenea variația pierderilor, a căldurii specifice și a rezistenței termice a fluidului cu temperatura.

Numărul de faze în paralel ale canalizării a fost notat cu n , iar pentru canalizarea de întors a fluidului de răcire - toți parametrii au fost notați cu indice "prim".

Pierderile totale pe unitate de lungime $n \cdot W_t$ se descompun în pierderi care sînt preluate de fluidul de răcire și pierderi care se disipează în sol:

$$n \cdot W_t = n \cdot W_1(x) + n \cdot W_2(x) . \quad (2.117)$$

Pierderile preluate de fluidul de răcire $n \cdot W_1(x)$ se calculează în funcție de temperatura fluidului $\Theta(x)$ în punctul respectiv:

$$n \cdot W_1(x) \cdot dx = n \cdot Q \cdot c \cdot \rho \cdot d\Theta(x) , \quad (2.118)$$

Q - reprezintă debitul fluidului; c - căldura specifică a fluidului, iar ρ - densitatea fluidului de răcire.

Pierderile disipate în sol se exprimă în funcție de rezistența termică R echivalentă a celor n faze de canalizări de dus:

$$n \cdot W_2(x) \cdot R = \Theta(x) . \quad (2.119)$$

În cazul în care fluidul ar fi staționar, fără circulație,

atit conductorul cablului, cit și fluidul ar ajunge la temperatura maximă Θ_m constantă în lungul canalizării:

$$n \cdot W_f \cdot R = \Theta_m \quad (2.120)$$

Temperatura maximă se poate descompune în două componente :

$$\Theta_m = \Theta(x) + \Delta\Theta(x) \quad (2.121)$$

unde:

$\Theta(x)$ reprezintă temperatura rezultantă a conductorului și fluidului în cazul în care fluidul de răcire circulă;

$\Delta\Theta(x)$ este diferența între temperatura maximă și temperatura rezultantă și reprezintă o scădere de temperatură corespunzătoare răcirii produse de fluid.

Scăderea de temperatură corespunzătoare răcirii se poate descompune și ea în două componente: o scădere de temperatură $\Delta\Theta_{10}(x)$ corespunzătoare preluării de căldură din canalizarea proprie și o scădere de temperatură $\Delta\Theta_{12}(x)$ corespunzătoare preluării de căldură din canalizarea de întors:

$$\Delta\Theta(x) = \Delta\Theta_{10}(x) + \Delta\Theta_{12}(x) \quad (2.122)$$

Considerind că nu există interacțiune între canalizarea de dus și canalizarea de întors, în canalizarea de dus are loc o scădere de temperatură corespunzătoare unei răcirii proprii:

$$\Delta\Theta_{10}(x) = n \cdot W_1(x) \cdot R = n \cdot Q \cdot c \cdot \rho \cdot R \frac{d\Theta}{dx} \quad (2.123)$$

Interacțiunea termică dintre cele două canalizări ale fluidului de răcire depinde de rezistența termică A dintre aceste canalizări. Admitind că în canalizarea de întors nu există un fluid care să producă o răcire proprie, iar fluidul din canalizarea de dus preia numai căldura dezvoltată în canalizarea de întors, rezultă:

$$\Delta\Theta_{12}(x) = n' \cdot W_1'(x) \cdot A = - n' \cdot Q' \cdot c \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{d\Theta'}{dx} \quad (2.124)$$

Sensul minus corespunde inversării sensului de curgere a fluidului în canalizarea de întors și în raport cu sensul de variație al abscisei.

Suprapunind cele două situații (2.123) și (2.124), rezultă o ecuație diferențială de formă:

$$\Delta\Theta(x) = n \cdot Q \cdot c \cdot \rho \cdot R \cdot \frac{d\Theta}{dx} - n' \cdot Q' \cdot c \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{d\Theta'}{dx} \quad (2.125)$$

Deoarece $\frac{d\Theta_m}{dx} = 0$, cu ajutorul relației (2.121) se obține:

$$\Delta\Theta(x) = -n \cdot Q \cdot c \cdot \rho \cdot R \cdot \frac{d(\Delta\Theta)}{dx} + n' \cdot Q' \cdot c \cdot \rho \cdot A \cdot \frac{d(\Delta\Theta')}{dx} \quad (2.126)$$

În mod similar rezultă o ecuație care exprimă scăderea de

temperatură în canalizarea de întors, obținind sistemul de ecuații diferențiale:

$$\frac{d(\Delta\theta)}{dx} = \frac{A}{R} \cdot \frac{d(\Delta\theta^*)}{dx} - \frac{1}{n R Q c \rho} \cdot \Delta\theta \quad (2.127)$$

$$\frac{d(\Delta\theta^*)}{dx} = \frac{A}{R^*} \cdot \frac{d(\Delta\theta)}{dx} + \frac{1}{n^* R^* Q c \rho} \cdot \Delta\theta^* .$$

Sistemul (2.127) poate fi rezolvat analitic, pe calculator numeric sau analogic. Soluțiile sistemului reprezintă cu cât va scădea temperatura în lungul traseului cablului atât pentru circuitul de dus, cât și pentru circuitul de întors - față de temperatura maximă care ar rezulta dacă cablul nu ar fi fost prevăzut cu răcire forțată și disiparea căldurii s-ar obține prin răcirea naturală a cablului. Se poate evidenția faptul că răcirea naturală a cablurilor de mare putere - deși nu este suficientă, deține o pondere în bilanțul termic și nu poate fi neglijată.

Soluțiile sistemului de ecuații diferențiale obținut depind atât de rezistențele termice ale canalizării, de parametrii fluidului de răcire și de condițiile la limită - care pot fi impuse prin montarea unor schimbătoare de căldură care să asigure anumite răcirii impuse pentru fluidul de răcire. Problema optimizării răcirii unui cablu - este destul de complexă prin numărul mare de variabile care intervin.

2.3.2.1. Modelarea pe calculator analogic a răcirii forțate a unui cablu de mare putere [144].

Autorul tezei a utilizat calculatorul analogic MEDA 42TA. Operația pe calculator analogic prezintă avantajul repetării calculelor în diferite variante printr-un reglaj relativ simplu, din potențiometre, al coeficienților de transfer și al condițiilor inițiale. De asemenea, soluțiile grafice care se obțin direct de la înregistratorul calculatorului - permit o interpretare intuitivă a fenomenului studiat.

Sistemul de ecuații diferențiale (2.127) a fost transformat în formă:

$$\frac{d(\Delta\theta)}{dx} = \frac{A}{(RR^* - A^2)nQc\rho} \cdot \Delta\theta^* - \frac{R^*}{(RR^* - A^2)nQc\rho} \cdot \Delta\theta \quad (2.128)$$

$$\frac{d(\Delta\theta^*)}{dx} = \frac{R}{(RR^* - A^2)nQc\rho} \cdot \Delta\theta^* - \frac{A}{(RR^* - A^2)nQc\rho} \cdot \Delta\theta .$$

Coeficienții de transfer au fost notați:

$$K_{11} = \frac{R^*}{(RR^* - A^2)nQc\rho} ; K_{12} = \frac{A}{(RR^* - A^2)nQc\rho} ;$$

$$K_{22} = \frac{R}{(RR^* - A^2)nQc\rho} ; K_{21} = \frac{A}{(RR^* - A^2)nQc\rho} . \quad (2.129)$$

Sistemul (2.128) a devenit:

$$\frac{d(\Delta\theta)}{dx} = \kappa_{12} \cdot \Delta\theta' - \kappa_{11} \cdot \Delta\theta \quad (2.130)$$

$$\frac{d(\Delta\theta')}{dx} = \kappa_{22} \cdot \Delta\theta' - \kappa_{21} \cdot \Delta\theta$$

In figura 2.13 se prezintă schema de cablaj pentru rezolvarea sistemului (2.130) pe calculator analogic. $\Delta\theta(0)$ și $\Delta\theta'(0)$ reprezintă condițiile inițiale ($t=0$).

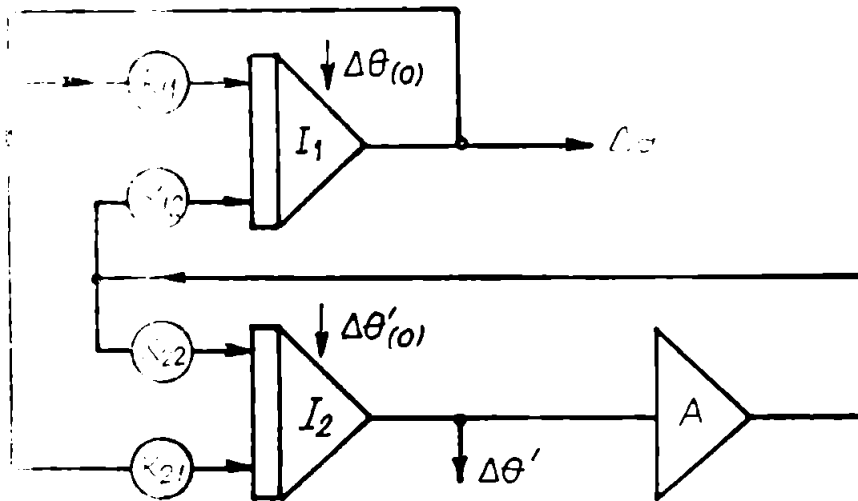


Fig.2.13. Schema de cablaj.

S-au considerat parametrii unui cablu cu circulație forțată de ulei [28]: $R = 0,77 \text{ m.K.W}^{-1}$; $R' = 1,14 \text{ m.K.W}^{-1}$; $A = 0,4 \text{ m.K.W}^{-1}$; $n_0 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $c = 1922 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\rho = 870 \text{ kg.m}^{-3}$.

Deoarece calculatorul analogic tranzistorizat MEDA 42 TA are tensiunile de lucru cuprinse între -10 V și $+10 \text{ V}$, autorul a adoptat scările: $10 \text{ K} \doteq 1 \text{ V}$, $200 \text{ m} \doteq 1 \text{ s}$.

In figura 2.14 se prezintă rezultatele calculului $\Delta\theta(x)$ și $\Delta\theta'(x)$, care a fost efectuat plecând de la condițiile inițiale $\Delta\theta(0) = 60 \text{ K}$ și $\Delta\theta'(0) = 20 \text{ K}$.

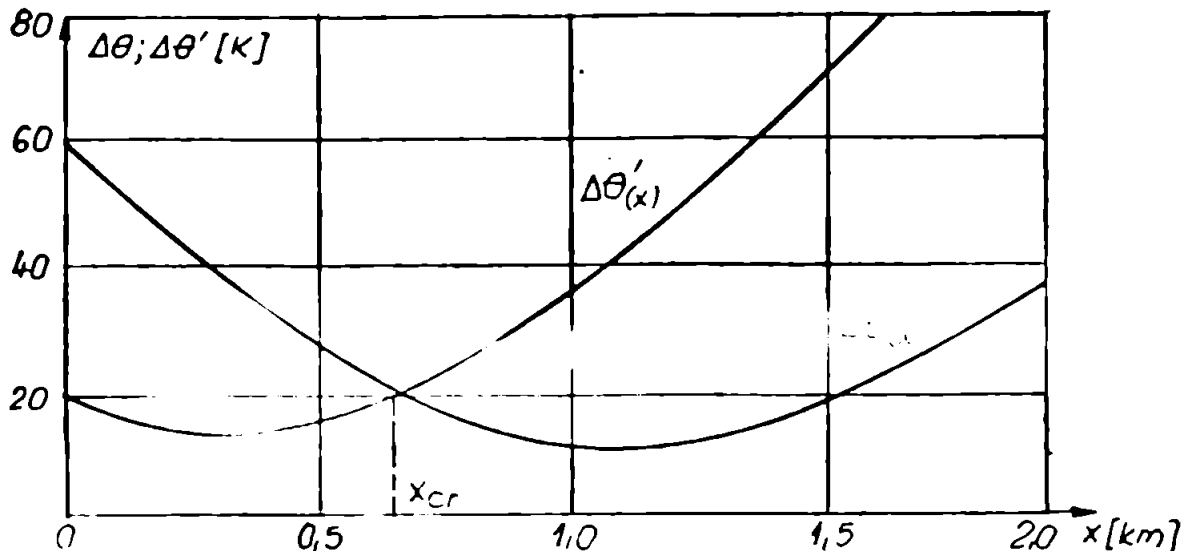


Fig.2.14. Eficiența răcirii în lungul canalizării.

Pentru cazul modelat, în situația unui tronson de 1 km de cablu, este necesară montarea unui schimbător de căldură și la capătul opus originii sistemului de axe, care să asigure o răcire a uleiului cu 18K. În cazul unui tronson de cablu mai scurt decât lungimea critică $l \ll x_{cr}$, al doilea schimbător de căldură nu mai este necesar. Debitul de fluid de răcire considerat, se situează în domeniul debitelor mici ($0,4 \div 1,4 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), soluție adoptată în cazul unor tronsoane de cablu cu lungimi scurte [29].

În figura 2.15 se prezintă variante de calcul pentru condițiile inițiale: a. $\Delta\theta(0) = 67 \text{ K}$ și $\Delta\theta'(0) = 20 \text{ K}$,
b. $\Delta\theta(0) = 40 \text{ K}$ și $\Delta\theta'(0) = 10 \text{ K}$.

Se verifică faptul că acceptând o răcire mai puțin eficientă, lungimea tronsonului de cablu prevăzut cu un singur schimbător de căldură este mai mare ($x_{cr.b} > x_{cr.a}$).

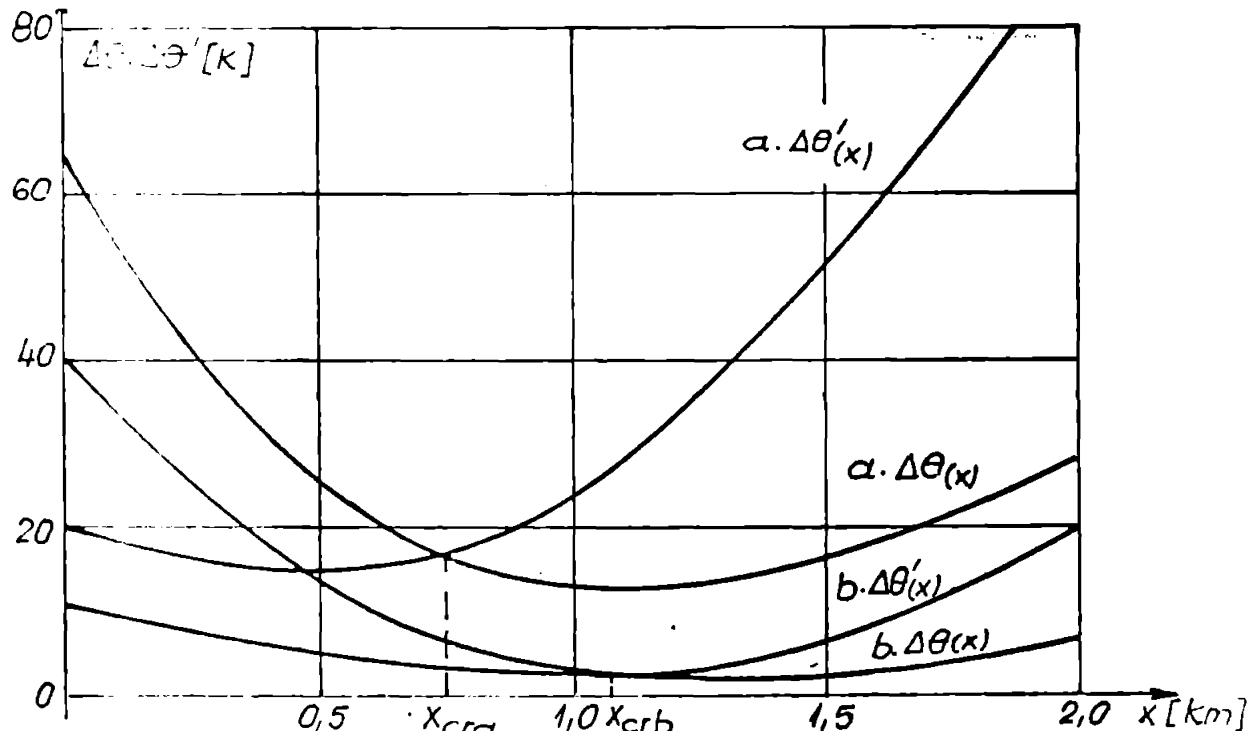


Fig.2.15. Variante de calcul.

Metoda permite localizarea punctului în care răcirea este minimă, iar calculul se poate repeta rapid pentru diferite valori ale parametrilor.

2.3.2.2. Modelarea pe calculator numeric a răcirii forțate a unui cablu de mare putere [145].

Integrarea sistemului (2.128) s-a efectuat prin metoda Runge-Kutta-Gill. Autorul a folosit programul SRKG din bibliotecă matematică a calculatorului FELIX C-256.

Programul de integrare numerică a necesitat trei subprograme:

FCT (X,Y,DERI)

OUT (X,Y,DERI,NBER,NDIM,PARA)

CALL SRKG (PARA,DERI,Y,NDIM,NBER,ERROR,TAB) (2.131)

Domeniul de integrare adoptat a fost $x=0\dots 2000$ m, valoarea inițială a pasului de integrare 40 și valoarea maximă a erorii 0,02. S-au considerat parametrii $\{2\theta\}$: $R = 0,77 \text{ m.K.W}^{-1}$; $R' = 1,14 \text{ m.K.W}^{-1}$; $A = 0,4 \text{ m.K.W}^{-1}$; $n = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $c = 1922 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\rho = 970 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

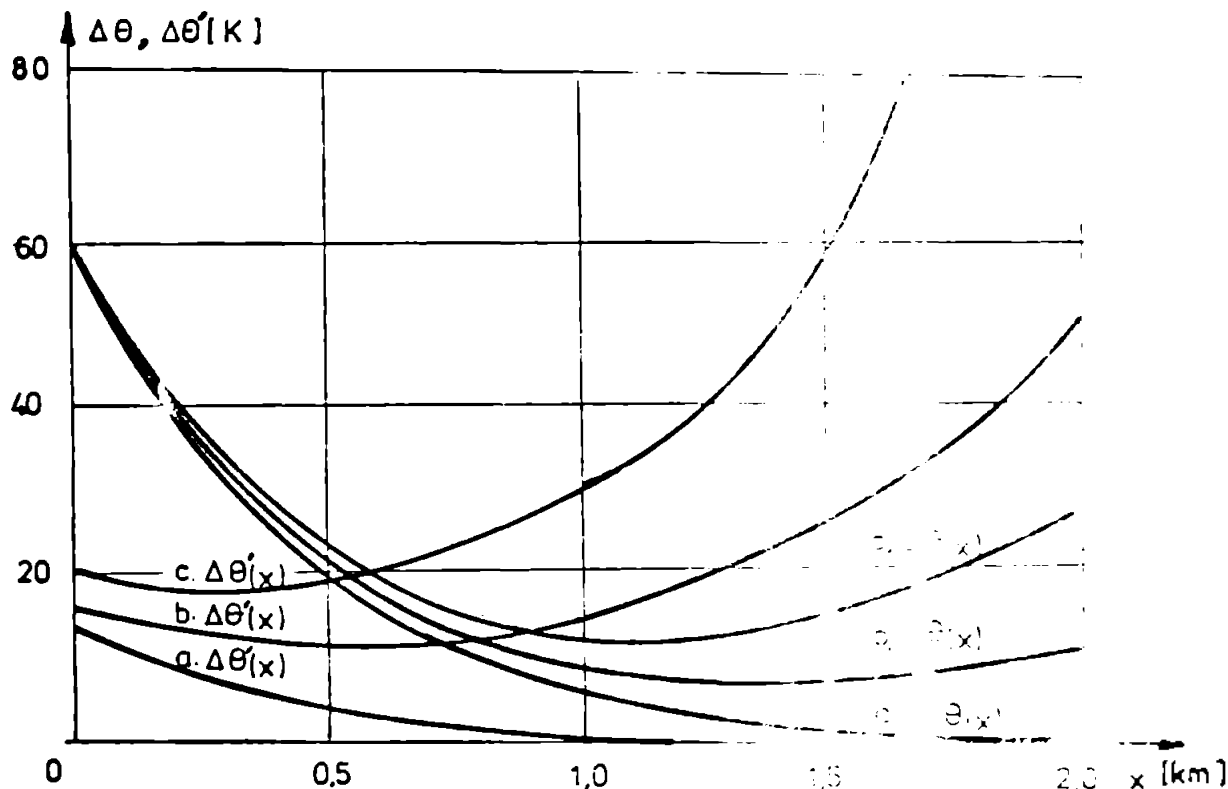


Fig.2.16. Rezultatele obținute pe calculatorul C-256.

În figura 2.16 se prezintă $\Delta\theta(x)$ și $\Delta\theta'(x)$ pentru diferite valori impuse scăderii de temperatură pentru cele două canalizări - în punctul de origine al abscisei (condițiile inițiale):

- | | | | |
|----|----------------------------------|----|-----------------------------------|
| a. | $\Delta\theta(0) = 60 \text{ K}$ | și | $\Delta\theta'(0) = 13 \text{ K}$ |
| b. | $\Delta\theta(0) = 60 \text{ K}$ | și | $\Delta\theta'(0) = 16 \text{ K}$ |
| c. | $\Delta\theta(0) = 60 \text{ K}$ | și | $\Delta\theta'(0) = 20 \text{ K}$ |

În cazurile b și c, curbele se intersectează la 750 m de origine și respectiv la 560 m. Dacă c blul de energie este mai scurt decât distanța până la punctul de intersecție, este suficient un singur schimbător de căldură montat la o extremitate a canalizării. Prin modificarea condițiilor inițiale, în sensul de a asigura cu un singur schimbător de căldură o răcire mai eficientă, rezultă o posibilitate de creștere a lungimii canalizării. De asemenea, din grafic rezultă o limită peste care nu ar fi economică utilizarea unui schimbător de căldură care să asigure condiții inițiale cu valori care diferă mult (cazul a.).

În figura 2.17 se prezintă o comparație între rezultatele obținute pe calculator numeric (C-256) și rezultatele obținute pe calculator analogic (MEDA - 42TA) $\{144\}$ pentru condițiile inițiale: $\Delta\theta(0) = 60 \text{ K}$ și $\Delta\theta'(0) = 20 \text{ K}$. S-a obținut o bună concordanță.

Calculatorul numeric oferă o precizie mai ridicată în compa-

ție cu calculatorul analogic, unde rezultatele obținute sînt influențate și de precizia reglajului din potențiometre a coeficienților de transfer și a condițiilor inițiale. În schimb calculatorul analo-

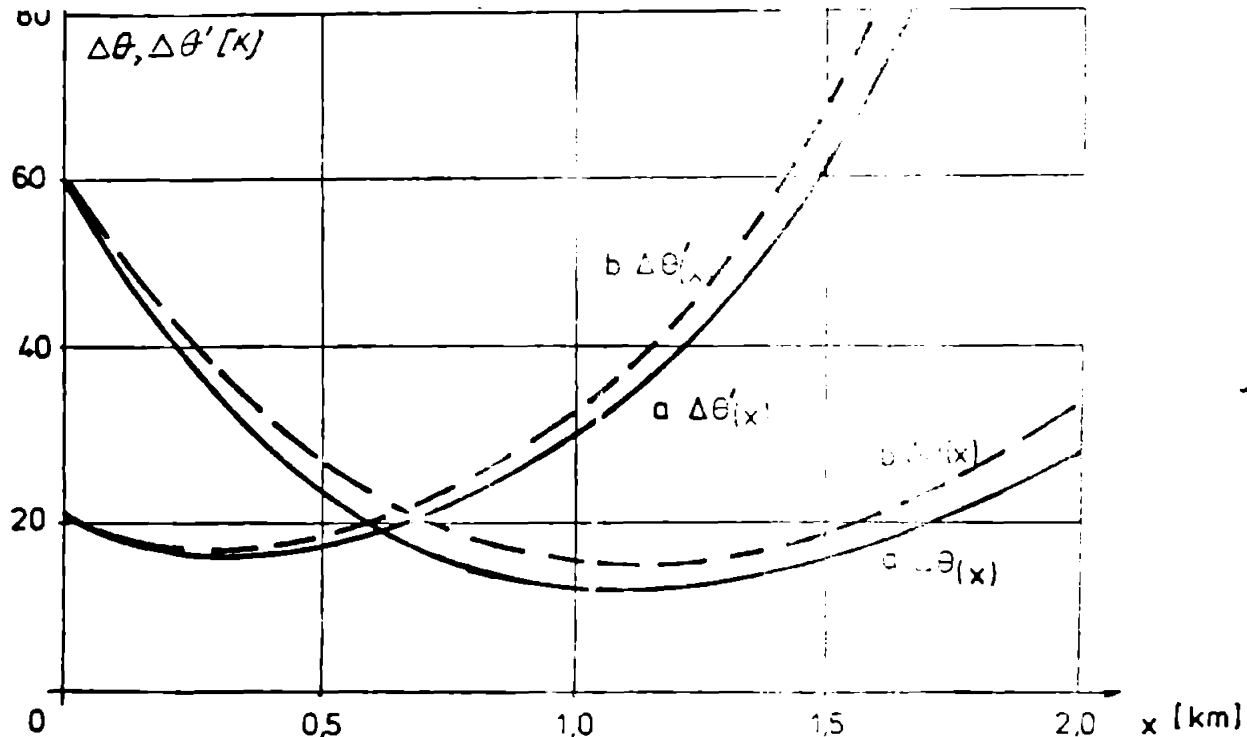


Fig.2.17. Comparație între rezultatele obținute pe calculator numeric (a) și pe calculator analogic (b).

gic a prezentat avantajul unor repetări mai simple și rapide a calculului în diverse variante cu obținerea grafică a rezultatelor, ceea ce a permis o stabilire ușoară a diferitelor corelații între mărimile de calcul.

Ambele metode de modelare prezintă un avantaj incontestabil față de încercările pe un cablu real cu răcire forțată, în special sub aspectul investițiilor necesare și al volumului de muncă pentru organizarea și efectuarea încercărilor. Autorul tezei nu a avut posibilitatea să participe la încercări "in situ" pe cabluri de mare putere cu răcire forțată, care sînt organizate în mari laboratoare pe plan mondial și cu o colaborare între mari firme producătoare de cabluri [26], [135]. Din acest motiv, modelarea pe calculatoare efectuată de autor, i-a permis obținerea unor rezultate în concordanță cu datele publicate în literatura de specialitate [144], [145].

2.3.2.7. Soluții analitice pentru sistemul de ecuații diferențiale (2.127) [28].

Aplicînd metoda transformării Laplace rezultă expresiile de calcul $\Delta\theta(x)$ și $\Delta\theta'(x)$ în funcție de condițiile impuse în originea sistemului de axe $\Delta\theta(0)$ și $\Delta\theta'(0)$:

$$\Delta\theta(x) = \frac{\Delta\theta(0) \cdot \operatorname{sh} \gamma \left(l_0 - \frac{l \cdot x}{L} \right) + \Delta\theta'(0) \cdot \operatorname{sh} \frac{\gamma \cdot l \cdot x}{L}}{\exp \left(- \frac{u \cdot l \cdot x}{L} \right) \cdot \operatorname{sh} \gamma l_0} \quad (2.132)$$

$$\Delta\theta'(x) = \frac{\theta'(0) \cdot \operatorname{sh} \gamma \left(l_0 + \frac{l \cdot x}{L} \right) - \Delta\theta(0) \cdot \operatorname{sh} \frac{\gamma \cdot l \cdot x}{L}}{\exp \left(+ \frac{u \cdot l \cdot x}{L} \right) \cdot \operatorname{sh} \gamma l_0}$$

in care:

$$K = \frac{A}{R} ; K' = \frac{A}{R'} ; \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{2KK'}{K+K'} \right)^2} ;$$

$$\gamma = \frac{(K + K') \cdot \alpha}{2K(1 - KK')} ; \lambda = n R \Omega c \rho ; l = \frac{L}{\lambda} ; \gamma \cdot l_0 = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\alpha}{1-\alpha} ;$$

$$u = \frac{K - K'}{2K(1 - KK')} .$$

Soluția sistemului (2.127) poate fi calculată și în funcție de valorile scăderilor

de temperatură corespunzătoare efectului de răcire de la capătul canalizării:

$$\theta(x=L) = \theta(L) \quad \text{și} \quad \theta'(x=L) = \theta'(L) ;$$

$$\Delta\theta(x) = \frac{\Delta\theta(L) \cdot \operatorname{sh} \gamma \left[l_0 + \left(1 - \frac{x}{L} \right) l \right] - \Delta\theta'(L) \operatorname{sh} \gamma l \left(1 - \frac{x}{L} \right)}{\exp \left[- u l \left(1 - \frac{x}{L} \right) \right] \cdot \operatorname{sh} \gamma l_0} \quad (2.133)$$

$$\Delta\theta'(x) = \frac{\Delta\theta'(L) \cdot \operatorname{sh} \gamma \left[l_0 - \left(1 - \frac{x}{L} \right) l \right] + \Delta\theta(L) \cdot \operatorname{sh} \gamma l \left(1 - \frac{x}{L} \right)}{\exp \left[+ u l \left(1 - \frac{x}{L} \right) \right] \cdot \operatorname{sh} \gamma l_0}$$

În cazul particular $R=R'$, relațiile se simplifică [28]:

$$\Delta\theta(x) = \frac{\Delta\theta(0)}{\operatorname{ch} \frac{\gamma}{2} (l_0 + l)} \cdot \operatorname{ch} \frac{\gamma}{2} \left[l_0 + l \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \quad (2.134)$$

sau

$$\Delta\theta(x) = \frac{\Delta\theta(L)}{\operatorname{ch} \frac{\gamma}{2} (l_0 - l)} \cdot \operatorname{ch} \frac{\gamma}{2} \left[l_0 + l \left(1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \quad (2.135)$$

Relația (2.134) reprezintă variația scăderii temperaturii în lungul canalizării în funcție de valoarea asigurată de schimbătorul de căldură amplasat la începutul canalizării, iar relația (2.135) reprezintă variația scăderii temperaturii pentru cazul în care schimbătorul de căldură este amplasat la capătul canalizării ($x=L$).

Regrupind rezistențele termice prin cîteva parametri ca $u, \gamma l_0$, s-au obținut expresii de calcul compacte. Pentru aplicațiile numerice și în acest caz - este oportună utilizarea unui calculator numeric.

Metodele de calcul prezentate permit determinarea eficienței răcirii forțate a cablurilor prin calculul scăderilor de temperatură datorită circulației fluidului de răcire. Scăderile de temperatură reprezintă diferența între temperaturile maxime care se obțin în fie-

Care punct al canalizării în situația în care fluidul de răcire nu circulează (având loc doar o răcire naturală) și temperaturile din aceleași puncte ale canalizării, în situația răcirii forțate.

În condiții de răcire naturală, pentru o anumită temperatură admisibilă - rezultă un anumit curent admisibil pentru cablu. Scăderea de temperatură asigurată de răcirea forțată reprezintă valoarea cu care se poate majora în calcul temperatura admisibilă pentru a se calcula - tot în condiții de răcire naturală - o a doua valoare - mai mare - a curentului prin cablu și care reprezintă curentul admisibil în condiții de răcire forțată.

2.4. INCERCĂRI EXPERIMENTALE ÎN IIT-ICPE BUCUREȘTI - IPTV TIMIȘOARA ȘI REZULTATE OBTINUTE PRIN CALCUL PRIVIND INCĂLZIREA CABLURILOR.

Încercarea cablurilor cu impuls de tensiune se execută numai după încălzirea cablului la temperatura de încercare, conform standardului sau normei tehnice de produs [47], [48], [72]. Temperatura se ridică progresiv pînă ce temperatura conductorului atinge temperatura prevăzută, cu o abatere de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Cu generatorul de impuls de tensiune etalonat - pentru a produce impulsuri cu amplitudinea egală cu nivelul de tinere la impuls prevăzut în standardul sau norma tehnică de produs - se aplică o primă serie de zece impulsuri pozitive, urmate de a doua serie de zece impulsuri negative [71].

Determinarea și stabilirea precisă a temperaturii conductorului cablurilor de energie este deosebit de importantă, deoarece rigiditatea dielectrică la impuls a izolației cablurilor depinde substanțial de temperatură. Aceeași problemă privind stabilirea precisă a temperaturii apare și la determinarea variației tangentei unghiului de pierderi dielectrice cu temperatura [71], [79], [94], [99], [118].

Măsurarea directă a temperaturii conductorului cablului cu un termocuplu sau cu un alt aparat specializat pentru măsurarea temperaturii implică străpungerea izolației de fază a cablului. Metoda se aplică în cazul utilizării a două eșantioane identice de cablu și care se încălzesc simultan: un cablu a cărui izolație se încearcă cu tensiune de impuls și un cablu martor a cărui izolație este străpunsă pentru a permite măsurarea directă a temperaturii conductorului. Metoda este precisă, dar mai costisitoare atât prin faptul că necesită lungimi duble pentru epruvetele de cablu încercate, cât și printr-un consum dublu de energie electrică pentru încălzirea lor.

În cadrul unui contract de cercetare între IPTV Timișoara și ICPE București [152], autorul tezei a aplicat mai multe metode teoretice de calcul al temperaturii cablurilor trifazate și monofazate, a

efectuat determinări experimentale "in situ", cât și prin modelare pe calculator analogic și a stabilit metode practice de determinare a temperaturii conductoarelor cablurilor pornind de la măsurarea temperaturii pe armături metalice sau a ecranului metalic sau a ecranului metalic și adăugarea căderilor de temperatură pe straturile de izolație ale cablurilor.

După o documentare privind dotarea existentă în LIT - ICPE București și Laboratorul de Rețele Electrice în cablu din IP București pentru încălzirea cablurilor de energie, autorul tezei a amenajat un stand de încercări la încălzire și în cadrul Laboratorului de Modele pentru T T I din IPTV Timișoara (152)/(154).

2.4.1. Laboratorul de înaltă tensiune al ICPE-București(152).

Standul pentru încălzirea cablurilor în vederea încercării cu tensiune de impuls, este dotat cu trei transformatoare tip tunel - alimentate în paralel de la un autotransformator tip TUR-Dresda (R.D.G.). Simultan se încălzesc două eșantioane de cablu identice : un cablu a cărui izolație se încercă cu tensiune de impuls și un cablu martor a cărui izolație este străpunsă pentru introducerea sondelor de măsură a temperaturii conductorului cablului. Aparatele de măsură a temperaturii sînt de tipul: Ultrakunst Thermophil și PU 391. Pentru asigurarea unui contact cât mai bun între sonda de măsură și conductorul cablului - în orificiul realizat în izolația cablului cu un burghiu cu diametrul corespunzător, se introduce ulei de transformator sau vaselină siliconică.

Măsurarea curentului de încălzire pe fiecare fază a cablului legată în scurtcircuit se efectuează cu un clește ampermetric. Ecranele metalice și armăturile metalice nu se scurtcircuitează. Acest procedeu va permite o simplificare în calculul încălzirii cablului.

Autorul tezei a analizat în cadrul contractului de cercetare (152), posibilități de perfecționare privind determinarea temperaturii conductoarelor cablurilor și de reducere a consumului de energie electrică necesar încălzirii acestora - în vederea încercării cu impuls de tensiune.

O parte din verificările experimentale privind repartiția cîmpului termic în izolația cablurilor de energie, în diferite regimuri de încălzire, au fost efectuate de autor în acest laborator. Rezultatele măsurătorilor experimentale vor fi prezentate la pct. 2.4.4.

2.4.2. Laboratorul de Rețele electrice în cablu - din Institutul politehnic București (113).

Autorul tezei s-a documentat în acest laborator, în special asupra sistemului de măsură a temperaturii cu termocuple.

Cablul încercat este de tipul AC YHSY 1 x 150 mm² - 12/20 kV. Lungimea epruvetei este de 10 m - pentru a se elimina influența capetelor asupra punctelor de măsură a temperaturii diverselor învelișuri ale cablului.

Schema electrică a instalației de încercare conține (fig. 2.18): cablul electric supus încercării; - transformator de încălzire tip tunel, alimentat prin autotransformator ATR-50; - pupitru de comandă și circuitele de comandă și control; - înregistrator de temperatură - tip FFA-1976 (înregistrator electronic compensator automat cu două domenii de temperatură comutabile: 0 ÷ 100°C și 100 ÷ 300°C și cu trei viteze de derulare a hîrtiei de înregistrare: 20, 60 și 120 mm/oră).

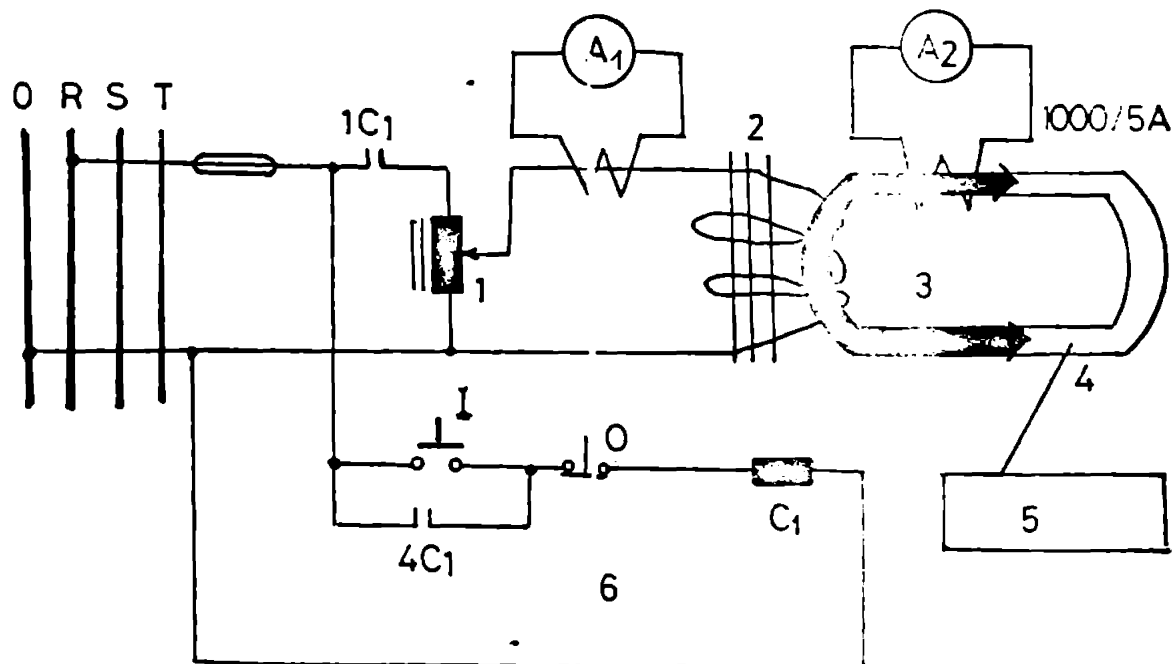


Fig.2.18. Schema electrică a instalației de încercare a cablului.

1 - autotransformator ATR-50; 2 - transformator de încălzire tunel; 3 - cablul electric supus încercării; 4 - termocuplu Fe-Constantan; 5 - înregistrator de temperatură; 6 - circuite de comandă și control.

Traductoarele de temperatură sînt termocuple fier-constantan, fixate pe cablu prin procedeul de altoire. Teaca traductorului se izolează pentru a evita contactul cu conductorul cablului, cu ecranele și cu bandajul de armare - pentru eliminarea circuitelor parazite de curent care falsifică măsurătorile prin încălziri locale suplimentare.

Punctele de măsură sînt situate pe următoarele izoterme ale secțiunii cablului: - conductor; - oceanul metalic al izolației; man-

taus cablului.

Cu un termocuplu se măsoară și temperatura mediului ambiant, pentru a fi înregistrată. Instalația de încercare este utilizată atât pentru lucrări de cercetare, cât și în procesul didactic cu studenții.

4.3. Laboratorul de Modele pentru TTI din IPTV Timișoara /152/, a fost dotat prin autoutilare cu un transformator toroidal de încălzire cu 6 x 400 spire în primar, alimentat printr-un autotransformator cu plajă de reglaj între 0600 V (fig.2.19).

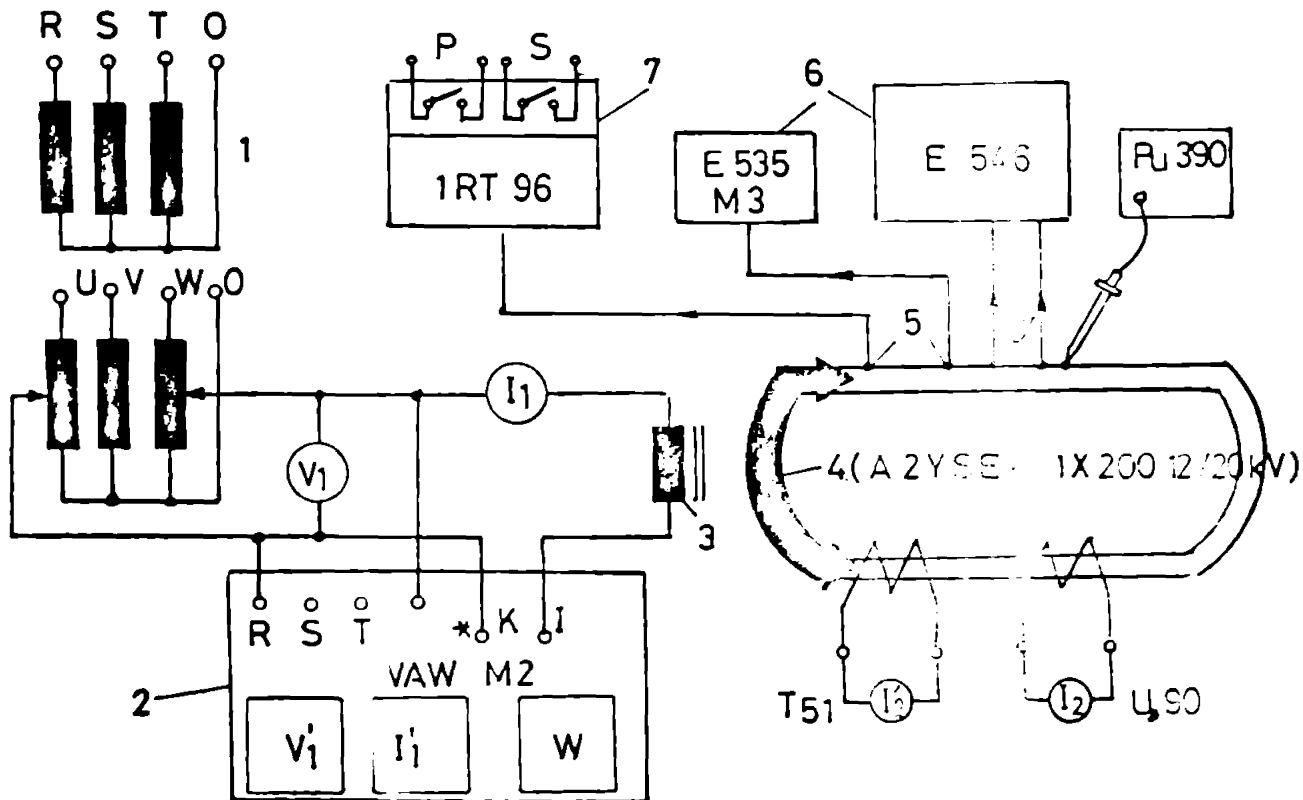


Fig.2.19. Schemă electrică pentru încercări în LM-IPTV.

1 - autotransformator trifazat cu reglaj; 2 - trusă de măsură U, I, P; 3 - transformator toroidal de încălzire; 4 - cablul încercat; 5 - termocuplu Fe-Ko; 6 - înregistratoare de temperatură; 7 - regulator electronic de temperatură.

Acest stand amenajat de autorul tezei, a fost utilizat atât la încercări în cadrul contractului de cercetare științifică cu ICPE-București, cât și în procesul didactic cu studenții.

Pe baza experienței obținute în urma încercărilor efectuate pe acest stand, autorul tezei a înaintat o propunere de invenție elaborată în colectiv, referitoare la determinarea temperaturii cablurilor fără străpungerea izolației acestora, cu aplicare în LIT-ICPE-București /159/.

2.4.4. Rezultate obținute prin măsurători experimentale /152/.

Au fost încercate atât cabluri trifazate, cât și cabluri mono-fazate fabricate în țară, la ICME București. Eșantioanele de cablu au avut lungimi de $l_0 = 15$ m.

În tabelul 2.1, tabelul 2.2 și tabelul 2.3 sunt prezentate măsurătorile experimentale efectuate la LIT-ICPE.

Tabelul 2.1. Cablu ACYSABY 3x150 mm² 5,8/10 kV ($I_{fază} = 300$ A).

Nr. crt.	Timp		Thermophyl		PU 391 - A/B		1 RT 96
	Ora min.	Minute	θ_{Al}	θ_{Ol}	$\theta_{Aluminiu}$	θ_{Otel}	θ_{Al}
1	2	3	4	5	7	8	9
1	9.10	0	28	28	25/24.9	25/24.9	25
2	9.20	10	34	32	31.5/31.5	30/30	33
3	9.30	20	40	38	35/35	31.5/31.5	38
4	9.40	30	42	38	38.5/38.5	32/32	40
5	9.50	40	44	40	41/41	35/35	41
6	10.00	50	48	42	45/46	37/37	45
7	10.10	60	52	46	47/47	40.8	48
8	10.25	75	54	48	49.7/49.7	43.2/43.2	50
9	10.45	95	58	51.5	54/54	45.5/45.5	53

Condițiile climatice din laborator: $\theta_0 = 24,6^\circ\text{C}$; $\varphi = 72\%$, $p = 759$ mm Hg. În figura 2.20 a fost reprezentată variația temperaturilor măsurate cu aparatele PU 391.

Tabelul 2.2. Cablu ACYSABY 3x150 mm² 5,8/10 kV, cu extinderea domeniului de timp; $I_{\text{mediu aplicat fază}} = \frac{846}{3} = 282$ A.

Nr. crt.	Timp		Thermophyl	PU 391 - A/B		1 RT 96
	Ora minut	minute	θ_{Al} în zone izolată termic uplim.	$\theta_{Aluminiu}$	θ_{Otel}	θ_{Al}
1	2	3	4	5	6	7
1	10.30	0	26	25,8/21,5	21,5/21,5	-
2	10.40	10	30	27/27	25,5/25,1	-
3	10.50	20	32	31/31	28,6/28,1	35
4	11.00	30	36	34,9/35	30,9/30,5	36
5	11.30	60	47	44,8/44,2	39/38,5	44
6	12.00	90	54	49,4/56	43/42,6	48
7	12.30	120	61,5	55,5/56	47,4/46	53
8	13.20	170	72	61,5/62	52,5/50	55

Tabelul 2.3. Cablu A2YSEY 1x150 mm² 12/20 kV; $I_{\text{aplicat}} = 300\text{A}; 600\text{A}; 165\text{A}$.

Nr. crt.	Timp		$I_{\text{aplic.}}$ [A]	Thermophyl θ_{Al}	PU 391 - A/B		1 RT 96
	Ora min.	minute			θ_{Al}	θ_{Otel}	θ_{Al}
1	2	3	4	5	6	7	8
1	10.40	0	300	28	23,1/23,1	22,9/22,9	-
2	11.10	30	300	38	38,8/39,2	33/33,8	39
3	11.40	60	300	50	44/44	37,6/38,9	45
4	12.15	95	600	58,5	47/47,9	40,2/41,5	48
5	12.20	100	600	61,5	59,4/59,4	46,6/44	58
6	12.25	105	600	70	69,8/70	50/52,8	65
7	12.35	115	165	87,5	85,6/85	62/61,5	70
8	12.45	125	165	89,5	71/70,5	61,58	65
9	12.55	135	165	86	62/61,8	50,5/53,5	60

Tabelul 2.3 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8
10	13.05	145	165	82	53/53	44.7/47.5	53
11	13.15	155	165	77	46.2/46.4	40.5/43	50
12	13.25	165	165	73	42.5/40.9	37.5/40.2	47
13	13.35	175	0	69	40/40.5	35/37.9	44
14	13.45	185	0	64	36/36	32.5/35.6	-
15	13.55	195	0	59	32.2	30/32.5	-

Condițiile climatice din laborator: $\theta_0 = 22,2^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 71\%$; $p = 758 \text{ mm Hg}$. În figura 2.22 a fost reprezentată variația temperaturilor măsurate. În zona de măsură a aparatului Thermophyl - cablul a fost bandajat cu o izolație termică suplimentară (bumbac, azbest și folie argintată SIRIUS).

În tabelul 2.4 este prezentată o încercare la încălzire efectuată în Laboratorul de Modele TTI din IPTV Timișoara pe un eșantion de cablu A2YsY 1x120 mm² 12/20 kV.

Tabelul 2.4. Cablu A2YsY 1x120 mm² 12/20kV.

Nr. crt	t [min.]	I [A]	$\theta_{Al} [^{\circ}\text{C}]$	$\theta_{Cu} [^{\circ}\text{C}]$	Nr. crt	t [min.]	I [A]	$\theta_{Al} [^{\circ}\text{C}]$	$\theta_{Cu} [^{\circ}\text{C}]$
1	1	600	28	20	16	16	0	40,5	40,2
2	2	600	32	21	17	17	0	39	39,5
3	3	600	36	22,8	18	18	0	38	39
4	4	600	39	23,5	19	19	0	37,6	38
5	5	600	41,8	26,8	20	20	0	37,2	36,5
6	6	600	44,3	28,6	21	22,5	0	36	36
7	7	600	46,6	31	22	25	0	34,8	34,8
8	8	600	49	33,2	23	27,5	0	33,6	33,6
9	9	600	51,5	35,5	24	30	0	32,9	32,9
10	10	0	54,5	37,5	25	35	0	31	31
11	11	0	48,5	39,5	26	40	0	29,5	29,5
12	12	0	45,5	40,8	27	45	0	28,1	28,1
13	13	0	47,5	41,3	28	50	0	37	37
14	14	0	42,2	41	29	55	0	36	36
15	15	0	41,2	40,5	30	60	0	24,9	24,9

Condițiile climatice din laborator în timpul încercării: $\theta_0 = 20^{\circ}\text{C}$; $\varphi = 60\%$; $p = 758 \text{ mm Hg}$. Aparat de măsură a temperaturii: PU 390 (Nr. 0479036).

În figura 2.23 a fost reprezentată variația temperaturilor măsurate.

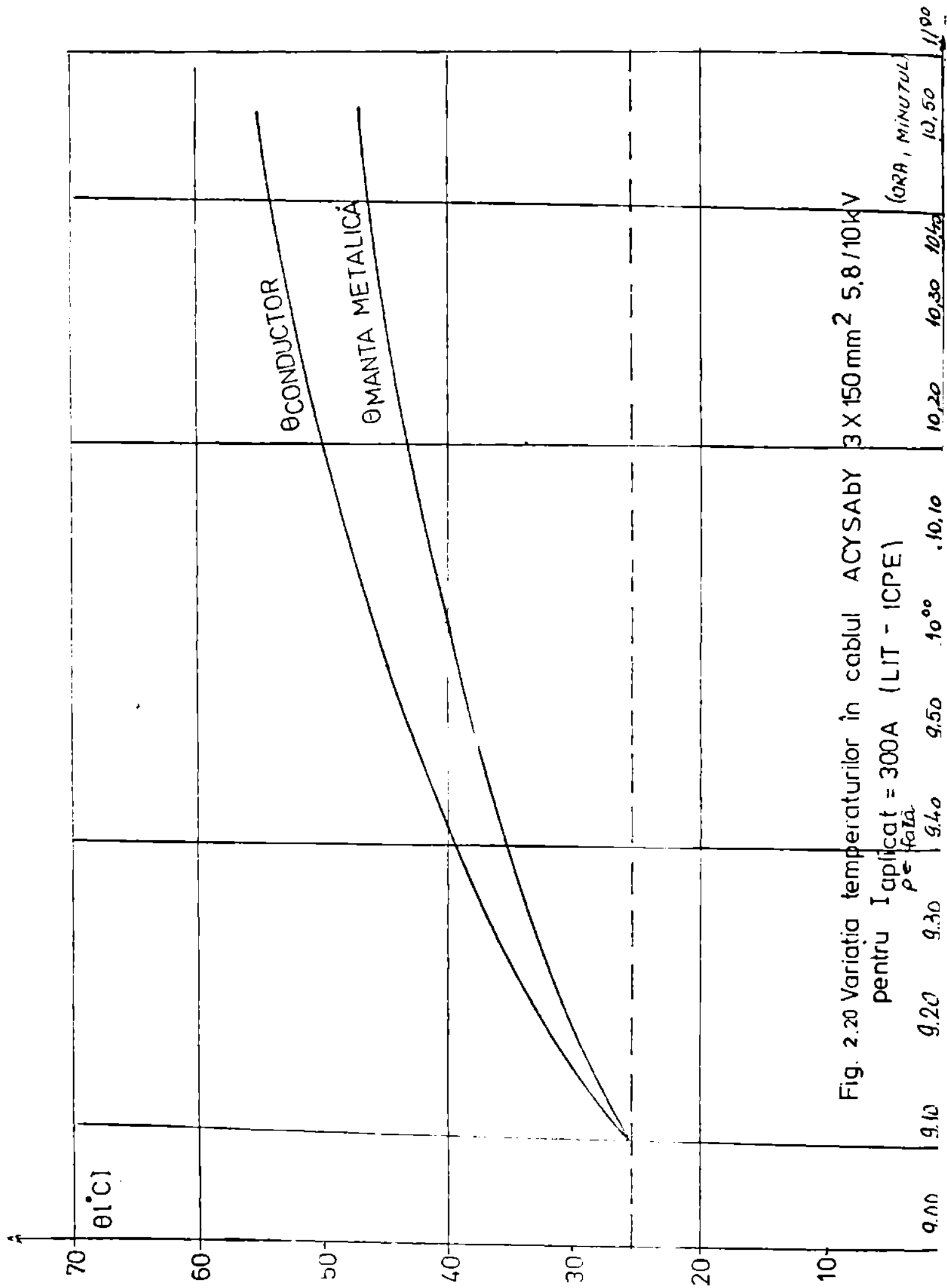


Fig. 2.20 Variația temperaturilor în cablul ACYSABY 3 X 150 mm² 5,8/10kV pentru I aplicat = 300A (LIT - ICPE) pe fază. (ORA, MINUTUL)

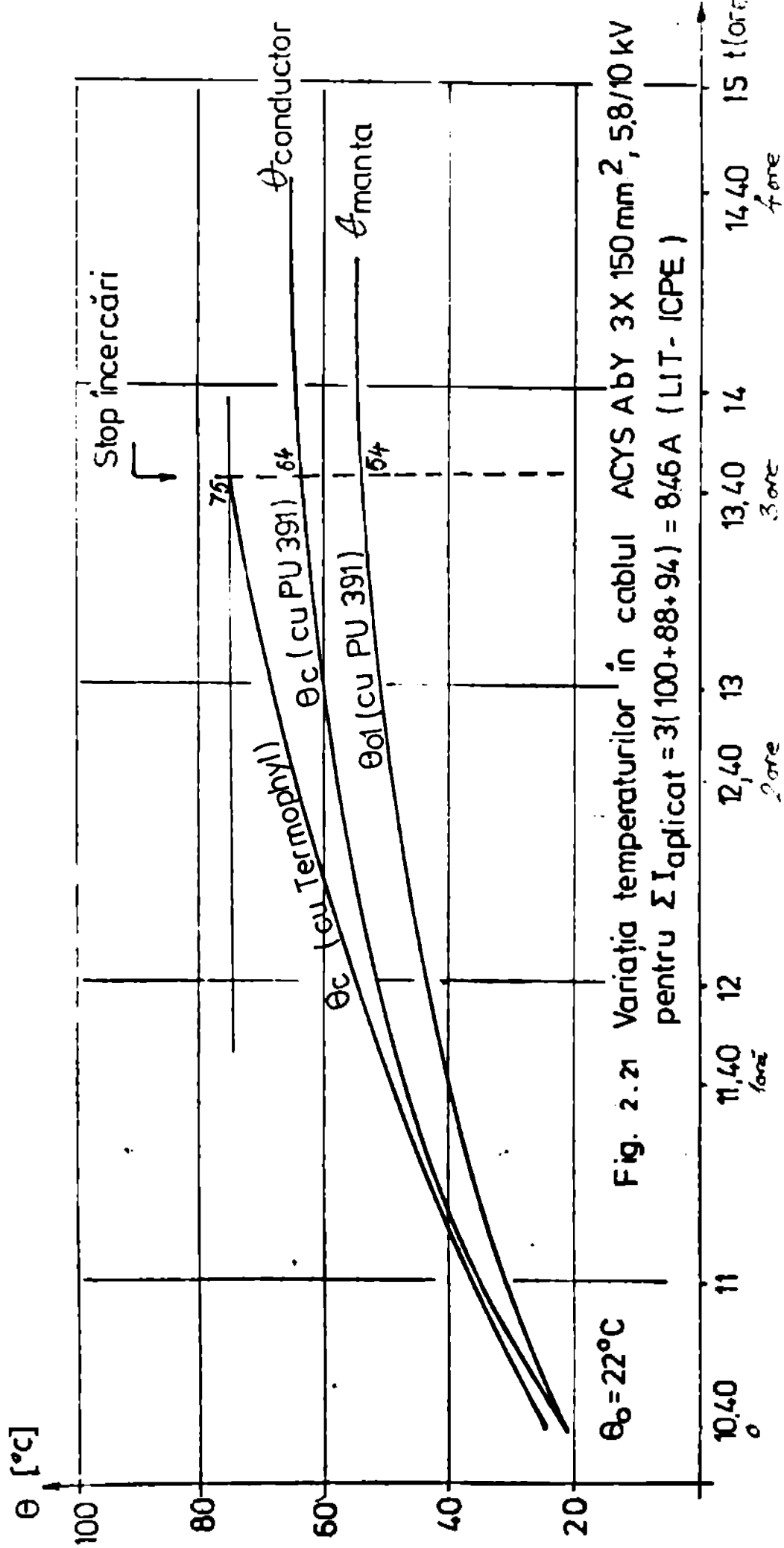


Fig. 2.21 Variația temperaturilor în cablul ACYS AbY 3X 150mm², 5,8/10 kV
 pentru $\Sigma I_{\text{aplicat}} = 3(100+88+94) = 846 \text{ A}$ (LIT- ICPE)

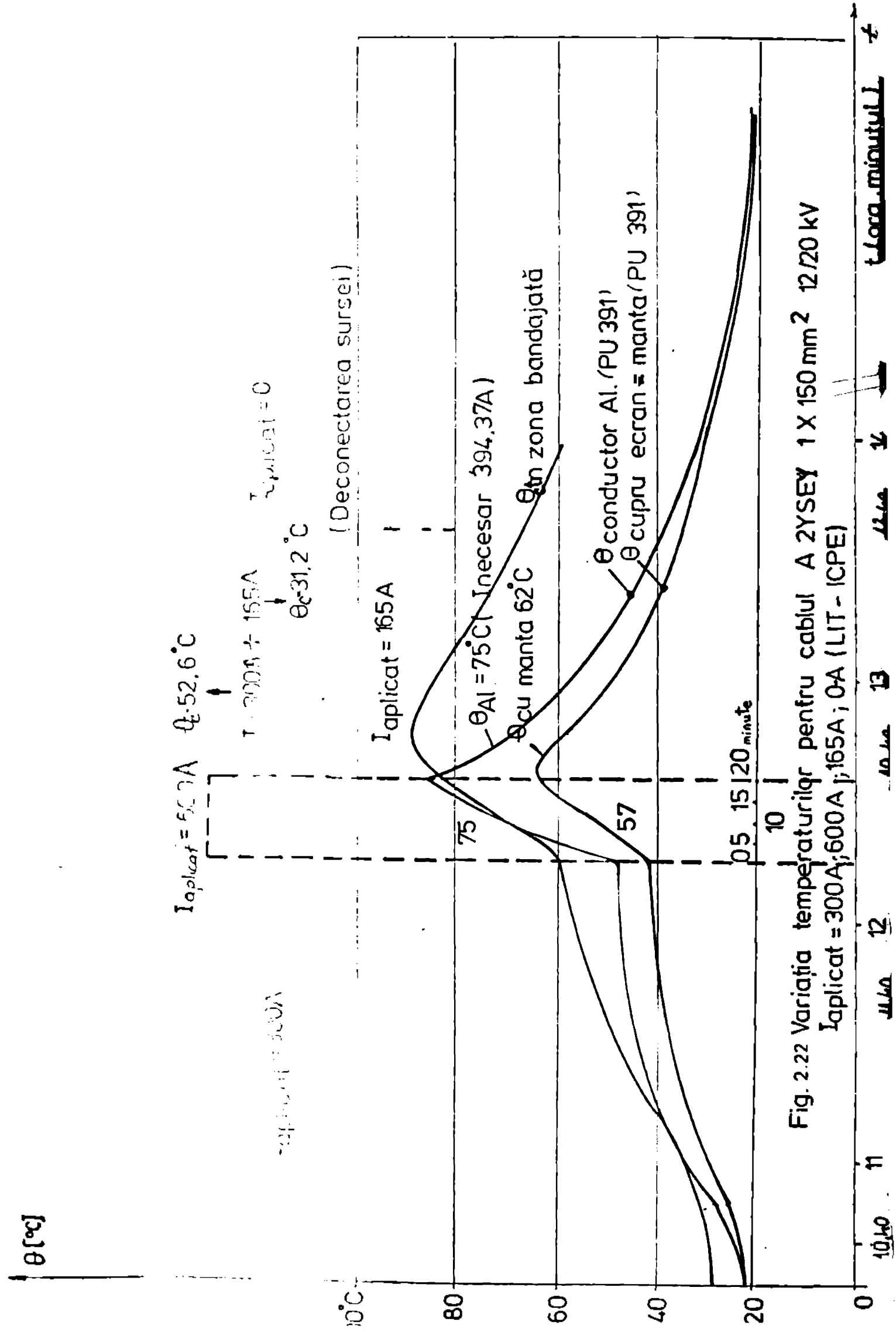


Fig. 2.22 Variația temperaturilor pentru cablul A 2YSEY 1 X 150 mm² 12/20 kV
 $I_{aplicat} = 300\text{A}; 600\text{A}; 165\text{A}; 0\text{A}$ (LIT - ICPE)

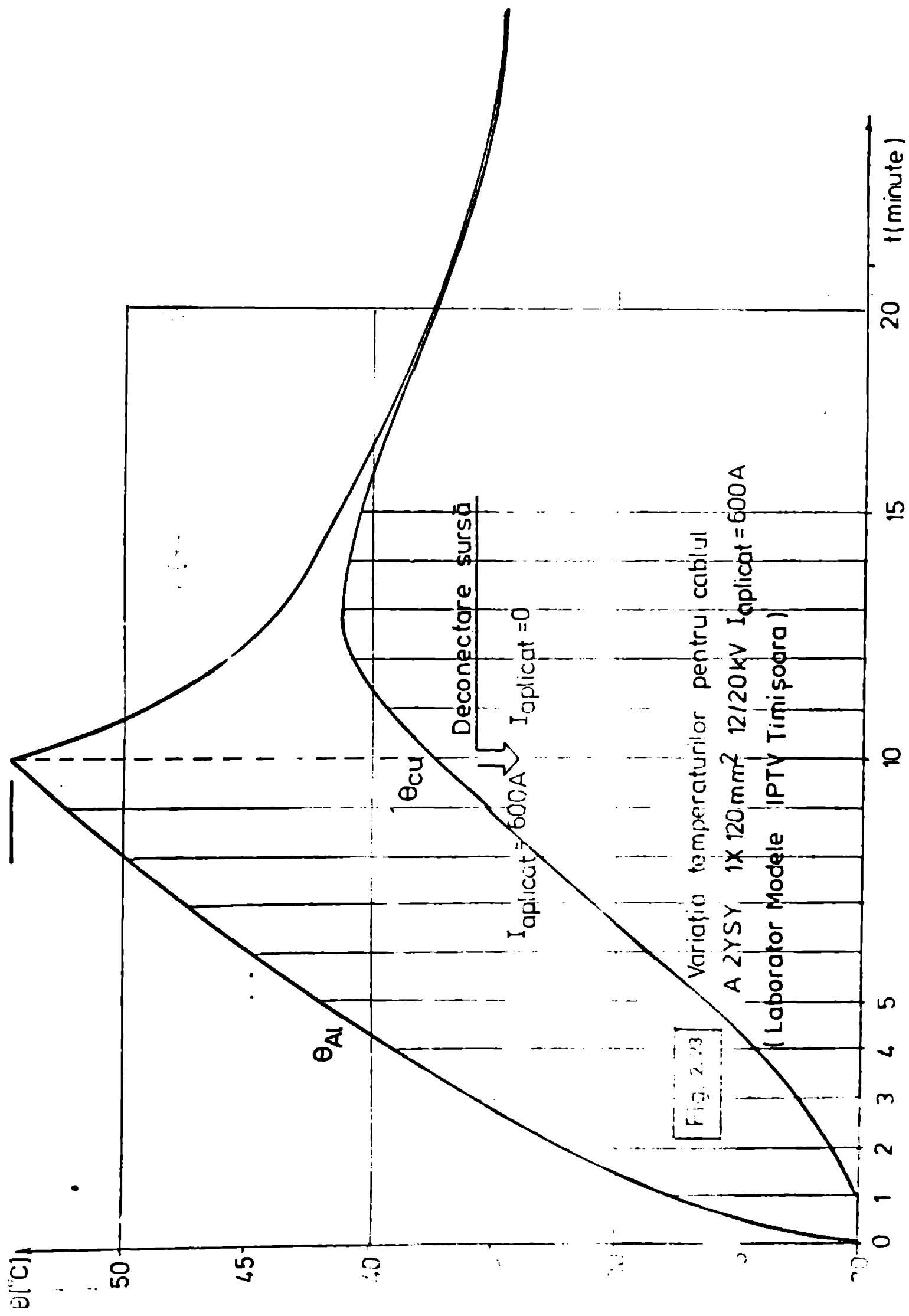


Fig. 2.23

Variația temperaturilor pentru cablul
 A 2YSY 1X 120 mm² 12/20 kV $I_{aplicat} = 600A$
 (Laborator Modele IPTV Timișoara)

2.4.5. Rezultate obținute prin calcul. /152/ :

Calculule au fost efectuate pentru următoarele cazuri:

- Determinarea variației căderilor de temperatură pe straturile de izolație, aplicând metoda funcțiilor Green;
- Simularea pe calculator analogic a regimului de lungă durată, cât și a regimului de scurtă durată;
- Calculul regimului de lungă durată pentru cabluri trifazate;
- Calculul regimului de lungă durată pentru cabluri monofazate.

2.4.5.1. Aplicarea metodei funcțiilor Green /152/ :

Pentru cablul AZSY 1x150 mm² 12/20 kV au fost calculate căderile de temperatură pe izolația de fază din polietilenă (PE) și pe învelișul de protecție exterior din PVC, cu relațiile:

$$\Delta\theta_{PE}(t) = \frac{\rho_{PE} \cdot W}{4\pi} \left\{ \left[-E_1(-\alpha_{11}) \right] - \left[-E_1(-\alpha_{12}) \right] \right\} \quad (2.136)$$

$$\Delta\theta_{PVC}(t) = \frac{\rho_{PVC} \cdot W}{4\pi} \left\{ \left[-E_1(-\alpha_{21}) \right] - \left[-E_1(-\alpha_{22}) \right] \right\} \quad (2.137)$$

unde: $\alpha_{11} \dots \alpha_{22}$ depind de timp și au valorile calculate în tabelul 2.5 și tabelul 2.6.

$$\begin{aligned} \alpha_{11} &= \rho_{PE} \cdot C_{PE} \cdot R_C^2 / (4 \cdot t) \quad , \\ \alpha_{12} &= \rho_{PE} \cdot C_{PE} \cdot R_{12}^2 / (4 \cdot t) \quad , \\ \alpha_{21} &= \rho_{PVC} \cdot C_{PVC} \cdot R_{INT}^2 / (4 \cdot t) \quad , \\ \alpha_{22} &= \rho_{PVC} \cdot C_{PVC} \cdot R_{EXT}^2 / (4 \cdot t) \quad . \end{aligned} \quad (2.138)$$

Valori numerice:

$$\begin{aligned} \rho_{PE} &= 3,5 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{m}}{\text{W}} \quad , \quad K_{PE} = 2,4 \cdot 10^6 \frac{\text{W} \cdot \text{sec}}{^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3} \quad , \\ \rho_{PVC} &= 6 \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{m}}{\text{W}} \quad , \quad K_{PVC} = 1,7 \cdot 10^5 \frac{\text{W} \cdot \text{sec}}{^\circ\text{C} \cdot \text{m}^3} \quad , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_C &= 7,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad , \quad R_{INT} = 15,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad , \\ R_{12} &= 15,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad , \quad R_{EXT} = 18,1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad , \end{aligned}$$

$$W = 20,7 \frac{\text{W}}{\text{m}} \quad , \quad \text{pentru } I_{100} = 300 \text{ A} \quad ,$$

$$W = 36,3 \frac{\text{W}}{\text{m}} \quad , \quad \text{pentru } I_{200} = 400 \text{ A} \quad ,$$

$$(W = R I_{\infty}^2 \quad ; \quad R = 0,00023 \frac{\Omega}{\text{m}}) \quad .$$

Căderile de temperatură în regim staționar ($t \rightarrow \infty$) au valorile:

$$\Delta\theta_{PE \infty} = \frac{\rho_{PE}}{2\pi} \cdot W \cdot \ln \frac{R_{12}}{R_C} \quad , \quad (2.139)$$

$$\Delta\theta_{PVC\infty} = \frac{P_{PVC}}{2\pi} \cdot \dots \cdot \ln \frac{R_{EXT}}{R_{INT}} \quad (2.140)$$

In Anexa 2 se prezintă valorile tabelate ale funcției integral exponențiale $\{103\}$, argumentele funcției fiind calculate pe calculatorul numeric tip ATARI 600XL, în limbaj BASIC, după programul prezentat în Anexa 3.

Valorile calculate pentru curenții $I = 300 \text{ A}$ și 400 A , sînt centralizate în tabelul 4.1 și tabelul 4.2.

Tabelul 2.5. Căderea de temperatură pe izolația din PE.

Nr. crt.	t [sec]	α_{11}	α_{12}	$-E_1(-\alpha_{11})$	$-E_1(-\alpha_{12})$	$\Delta\theta_{PE, 4\pi}$	$\Delta\theta_{PE}$ [°C]	
						$\int_{PE} \dots$	300 A	400 A
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5	26,21	99,500	-	-	-	-	-
2	10	13,10	49,80	-	-	-	-	-
3	30	4,368	16,60	0,0025	0	0,0025	0,014	0,025
4	60	2,184	8,30	0,0037	0,00303	0,0037	0,021	0,037
5	120	1,092	4,15	0,190	0,003	0,19	1,095	1,97
6	300	0,475	1,66	0,65	0,08	0,57	3,23	5,24
7	600	0,218	0,83	1,15	0,294	0,856	4,93	9,77
8	1200	0,109	0,415	1,75	0,675	1,075	6,19	11,01
9	1800	0,0727	0,276	2,14	0,96	1,18	6,80	11,09
10	3600	0,0363	0,138	2,8	1,54	1,26	7,26	12,01
11	7200	0,0181	0,069	3,55	2,16	1,34	7,72	13,7
12	10800	0,0121	0,046	4,0	2,61	1,39	(8,01)	(14,2)
In regim staționar: $\Delta\theta_{PE\infty} =$							7,65	12,51

Tabelul 2.6. Căderea de temperatură pe mantaua din PVC.

Nr. crt.	t [sec]	α_{21}	α_{22}	$-E_1(-\alpha_{21})$	$-E_1(-\alpha_{22})$	$\Delta\theta_{PVC, 4\pi}$	$\Delta\theta_{PVC}$ [°C]	
						$\int_{PVC} \dots$	300 A	400 A
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5	125	167	-	-	-	-	-
2	10	62	83	-	-	-	-	-
3	30	20	28	-	-	-	-	-
4	60	10,4	14	-	-	-	-	-
5	120	5,23	5,96	-	-	-	-	-
6	300	2,09	2,78	0,043	0,017	0,026	0,24	0,45
7	600	1,04	1,39	0,20	0,12	0,08	0,80	1,4
8	1200	0,52	0,69	0,53	0,38	0,15	1,48	2,6
9	1800	0,35	0,46	0,81	0,60	0,21	2,07	3,7
10	3600	0,17	0,23	1,33	1,10	0,23	3,27	4,04
11	7200	0,087	0,116	1,94	1,68	0,26	2,56	4,56
12	10800	0,058	0,077	2,32	2,05	0,27	2,6	4,67
13	14400	0,043	0,058	2,65	2,32	0,33	(3,26)	(5,79)
14	18000	0,035	0,046	2,85	2,50	0,35	(3,40)	(5,14)
In regim staționar: $\Delta\theta_{PVC\infty} =$							2,91	5,01

In tabelul 2.5 se observă că pînă la cel puțin 2 ore se poate considera că s-a atins regimul staționar.

În tabelul 2.6 se observă o încadrare în timp decalată a variației căderilor de temperatură pe stratul din PVC. Decalajul se explică prin dimensiuni geometrice, capacități și rezistivități termice diferite ale celor două straturi - pentru stratul de PVC - valorile căderilor de temperatură sînt neesențiale pînă la timpi de cca 600 secunde, iar regiul staționar se atinge după cca 3 ore de încălzire.

2.4.5.2. Simularea pe calculatorul analogic MEDA 42TA [152].

Pentru cablul AZYSY 1x150 mm² 12/20 kV, valorile numerice sînt:

$$\begin{aligned} r_{\text{int.PE}} &= 7,9 \text{ mm} & , & & r_{\text{int.PVC}} &= 15,7 \text{ mm} & , \\ R_{\text{ext.PE}} &= 15,4 \text{ mm} & , & & R_{\text{ext.PVC}} &= 18,1 \text{ mm} & , \end{aligned}$$

$$r_{\text{PE}} = \sqrt{r_{\text{int.PE}} \cdot R_{\text{ext.PE}}} = 11,03 \text{ mm} ,$$

$$p_1 = 0,445 & , & p_2 = 0,46 & ,$$

$$2R_1 = R_{\text{PE}} = \frac{\rho_{\text{PE}}}{2} \ln \frac{R_{\text{ext.PE}}}{r_{\text{int.PE}}} = \frac{R_{\text{PE}}}{2} + \frac{R_{\text{PE}}}{2} = (0,1851 + 0,1851) \frac{\text{m}^\circ\text{C}}{\text{W}} ,$$

$$R_3 = R_{\text{PVC}} = 0,1361 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{W} & , & (R_1 = R_2 = \frac{R_{\text{PE}}}{2}) & ,$$

$$R_4 = R_{\text{ext}} = 0,9752 \text{ m}^\circ\text{C}/\text{W} & ,$$

$$K_{\text{Al}} = 375 \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^\circ\text{C}} & , & K_{\text{PE}} = K_{\text{PE1}} + K_{\text{PE2}} = 870,8 + 446,7 & ,$$

$$K_{\text{Cu}} = 102 \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^\circ\text{C}} & , & K_{\text{PVC}} = 433 \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^\circ\text{C}} & ,$$

$$K_1 = K_{\text{Al}} + p_1 \cdot K_{\text{PE1}} = 762,52 \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^\circ\text{C}} & , & \theta_1 = \theta_{\text{Al}} & ,$$

$$K_2 = (1-p_1) \cdot K_{\text{PE1}} + p_1 \cdot K_{\text{PE2}} = 682,11 \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^\circ\text{C}} & , & \theta_2 = \theta_{\text{PE}} & ,$$

$$K_3 = (1-p_1) \cdot K_{\text{PE2}} + K_{\text{Cu}} + p_2 \cdot K_{\text{PVC}} = 549,21 \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^\circ\text{C}} & , & \theta_3 = \theta_{\text{Cu}} & ,$$

$$K_4 = (1-p_2) \cdot K_{\text{PVC}} = 233,93 \frac{\text{W} \cdot \text{m}}{\text{m}^\circ\text{C}} & , & \theta_4 = \theta_{\text{supraf.cablu}} & .$$

Sistemul de ecuații diferențiale (2.72) a fost transformat în formă:

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{W}{K_1} - \frac{1}{R_1 K_1} \cdot \theta_1 + \frac{1}{R_1 K_1} \theta_2 ,$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = \frac{1}{R_1 K_2} \theta_1 - \left(\frac{1}{R_1 K_2} + \frac{1}{R_2 K_2} \right) \theta_2 + \frac{1}{R_2 K_2} \theta_3 ,$$

$$\frac{d\theta_3}{dt} = \frac{1}{R_2 K_3} \theta_2 - \left(\frac{1}{R_2 K_3} + \frac{1}{R_3 K_3} \right) \theta_3 + \frac{1}{R_3 K_3} \theta_4 ,$$

$$\frac{d\theta_4}{dt} = \frac{1}{R_3 K_4} \theta_3 - \left(\frac{1}{R_3 K_4} + \frac{1}{R_4 K_4} \right) \theta_4 . \quad (2.141)$$

Schema de cablaj pe calculator analogic pentru rezolvarea sistemului (2.141) este prezentată în figura 2.24:

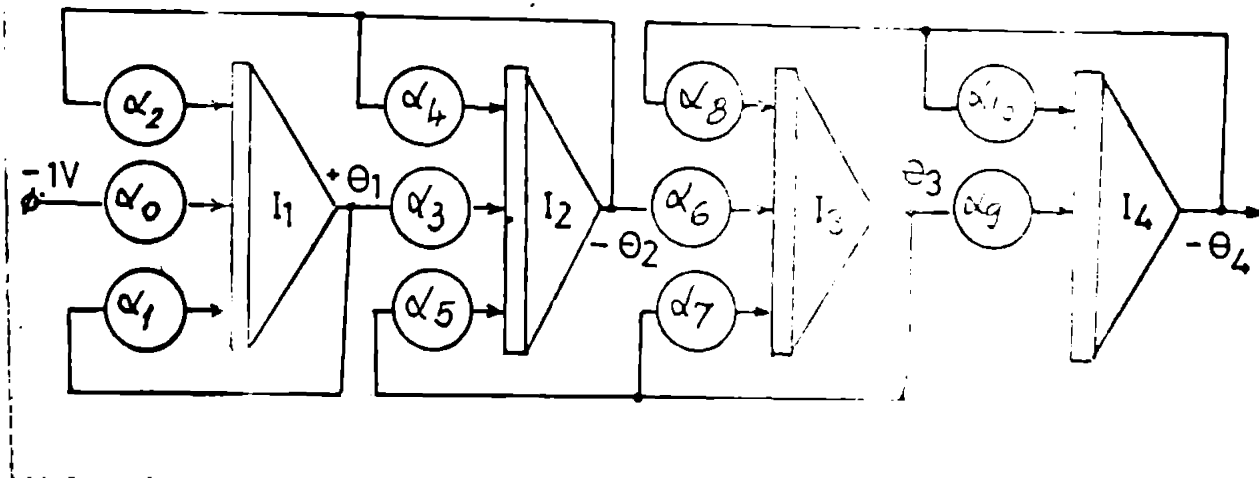


Fig. 2.24. Schema de cablaj pe calculator analogic.

Coeficienții de transfer utilizați sînt:

$$\alpha_1 = \frac{1}{R_1 K_1} = 0,0070 ,$$

$$\alpha_6 = \frac{1}{R_2 K_3} = 0,0093 ,$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{R_2 K_1} = 0,0070 ,$$

$$\alpha_7 = \frac{1}{R_2 K_3} + \frac{1}{R_3 K_3} = 0,0272 ,$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{R_1 K_2} = 0,0079 ,$$

$$\alpha_8 = \frac{1}{R_3 K_3} = 0,0134 ,$$

$$\alpha_4 = \frac{1}{R_1 K_2} + \frac{1}{R_2 K_2} = 0,0158 ,$$

$$\alpha_9 = \frac{1}{R_3 K_4} = 0,0314 ,$$

$$\alpha_5 = \frac{1}{R_2 K_2} = 0,0079 ,$$

$$\alpha_{10} = \frac{1}{R_3 K_4} + \frac{1}{R_4 K_4} = 0,0358 ,$$

Pentru un curent de încălzire reglat la $I = 300 \text{ A}$:

$$W = R \cdot I^2 = 20,7 \frac{\text{W}}{\text{m}} ,$$

$$R = 0,00023 \frac{\Omega}{\text{m}} ,$$

$$\alpha_0 = \frac{W}{K_1} = 0,0271 ,$$

$$(\alpha_0 = 0,0482 \text{ pt. } I = 400 \text{ A}) ,$$

$$(\alpha_0 = 0,1085 \text{ pt. } I = 600 \text{ A}) .$$

(2.142)

a) Adoptînd următoarele scări de modelare:

$$10 \text{ V} \dot{=} 400^\circ\text{C} ,$$

$$1 \text{ model} \dot{=} 1000 \text{ s real} ,$$

(2.143)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{sec. real}} \right] = \frac{1}{40} \cdot \frac{1000}{1} \frac{\partial (40 \cdot \theta)}{\partial (1000 t)_{\text{real}}} = 25 \frac{\partial U}{\partial t_{\text{model}}} \left[\frac{\text{V/sec. model}}{\partial t_{\text{model}}} \right]$$

rezultă înmulțirea coeficienților de transfer cu constanta 25.

b) Adoptînd scările: $10 \text{ V} \dot{=} 100^\circ\text{C}$

$$1 \text{ model} = 100 \text{ A real} ,$$

(2.144)

rezultă, în mod similar, înmulțirea coeficienților de transfer cu 10.

În figura 2.25 se prezintă procesul de încălzire timp de 8000 s, pentru curenții de 300 A și 400 A, ureat de un proces de ră-

cire prin anularea curentilor.

In figura 2.26 se prezintă procesul de încălzire timp de 1000 s pentru un curent 600 A, urmat de o răcire prin reducerea curentului la jumătate ($I = 300$ A).

In figura 2.27 se prezintă procesul de încălzire timp de 800 s pentru un curent de 600 A, urmat de o reducere a curentului la valoarea $I = 400$ A.

In figura 2.28 se prezintă un proces de încălzire timp de 1100 s pentru un curent de 400 A, urmat de o reducere a curentului la valoarea $I = 300$ A.

In figura 2.29 se prezintă un proces de încălzire timp de 5400 sec pentru un curent de 300 A, urmat de o supra sarcină de 600 A timp de 1000 s, după care curentul de încălzire a fost anulat.

Rezultatele obținute pe calculatorul analogic deși nu au o precizie prea ridicată, au permis investigarea unui număr mare de regimuri termice în timp scurt și care ar fi necesitat o manoperă și o durată foarte mare în cercetarea experimentală pe cabluri reale. Inregistrările privind variația temperaturilor în diverse puncte, obținute cu ajutorul calculatorului analogic - au permis observarea modului în care se ajunge în regim de echilibru staționar termic, a modului de variație a temperaturilor la trecerea de la un anumit curent de încălzire, la altul.

S-a verificat posibilitatea de reducere a timpului pentru atingerea regimului staționar corespunzător unor temperaturi prescrise - prin injectarea, în perioada inițială a încălzirii, a unor curenti mai mari, după care să se reducă valoarea acestora - la valoarea curentului admisibil pentru regimul de echilibru staționar prescris.

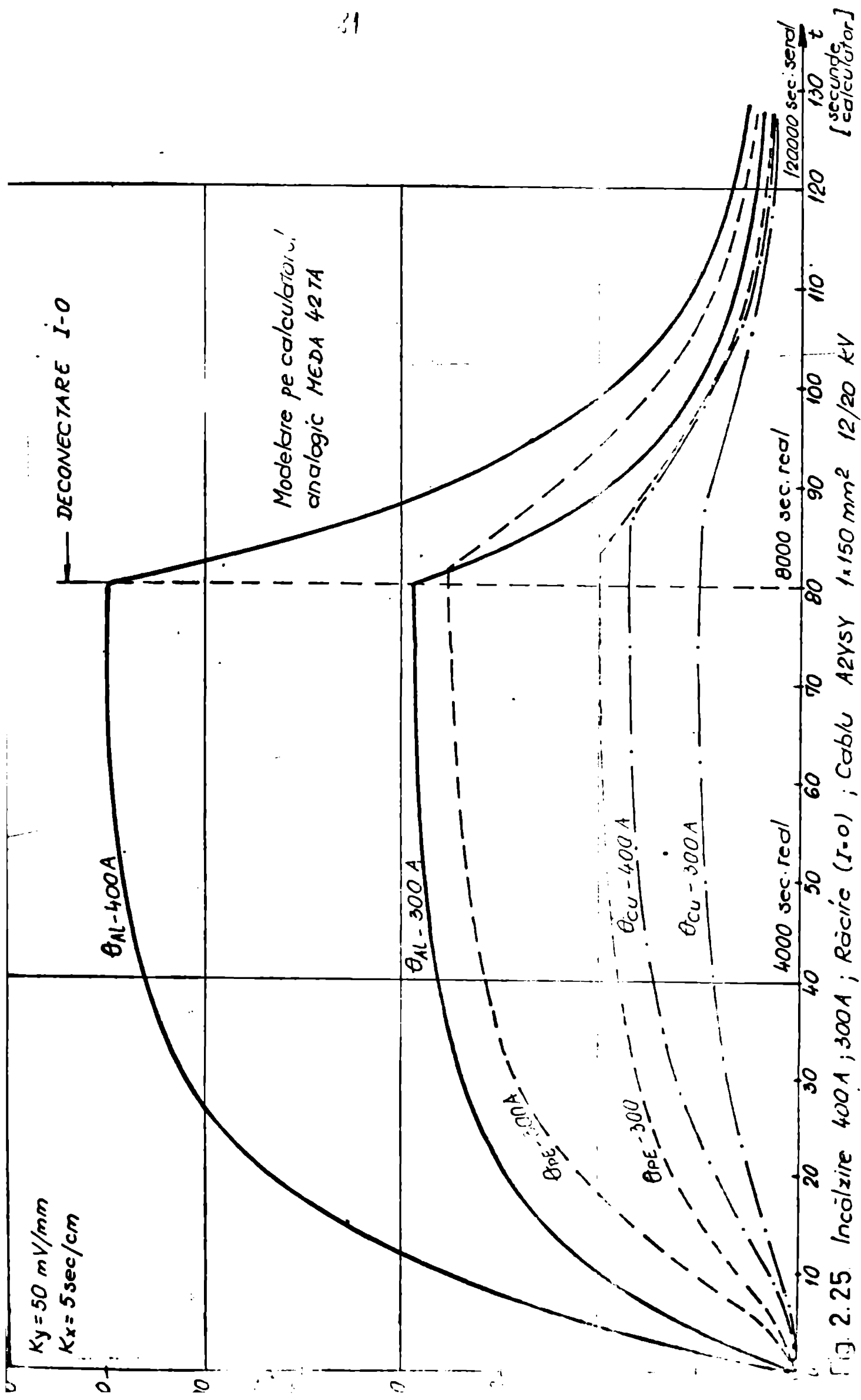


Fig. 2.25 Incalzire 400A ; 300A ; Racire (I=0) ; Cablu A2YSY 1x150 mm² 12/20 kV

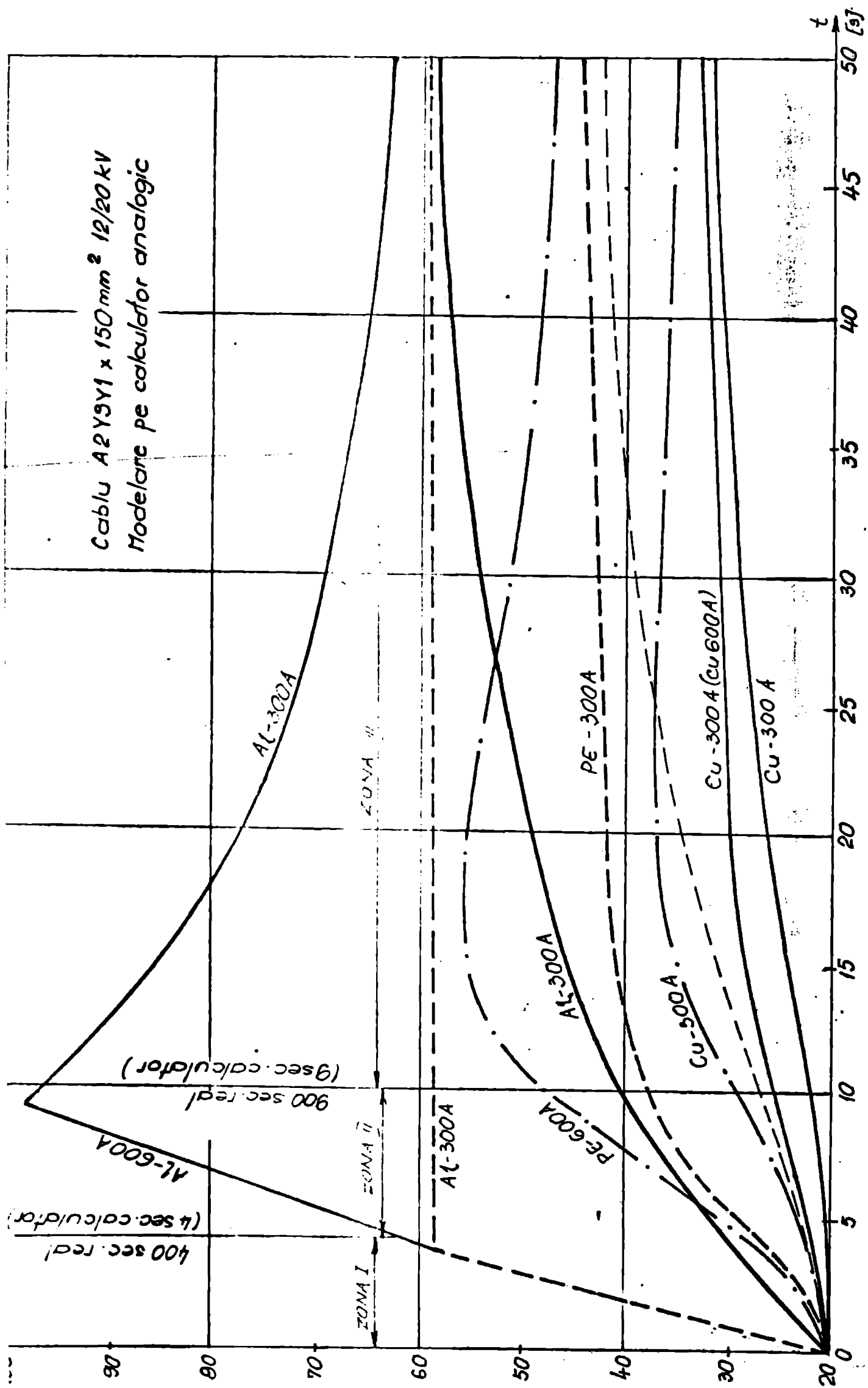


Fig. 2.26. Incălzire inițială (zona I sau zona I+II) $I_0 = 600A$; regim de durată $I_{\infty} = 300A$ t [s] calculator

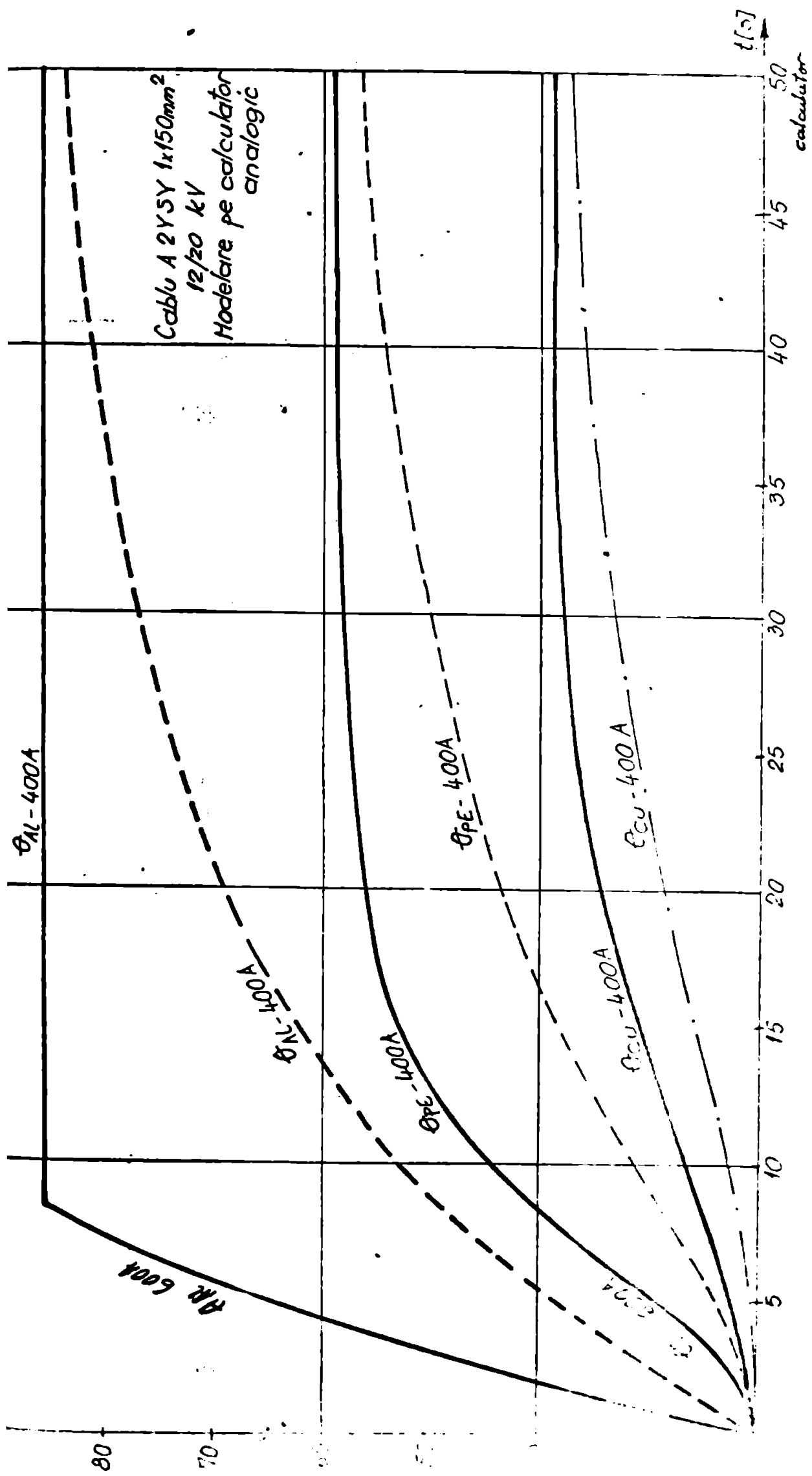


Fig. 2.27. Încălzire inițială $I_0 = 600 A$; regim de durată $I_\infty = 400 A$.

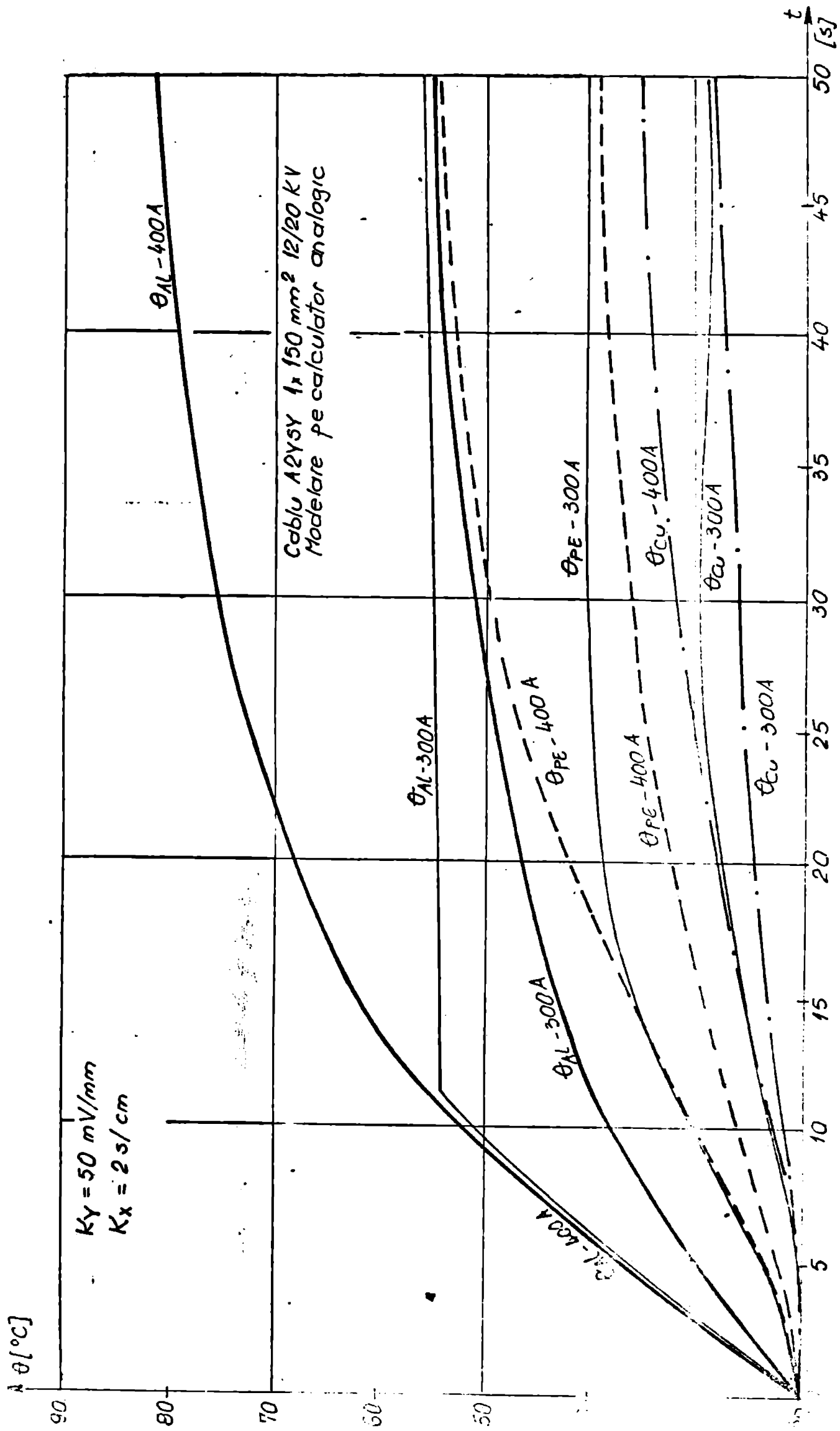


Fig. 2.28. Incalzire initiala $I_0 = 400A$; regim de durata $I_\infty = 300A$.

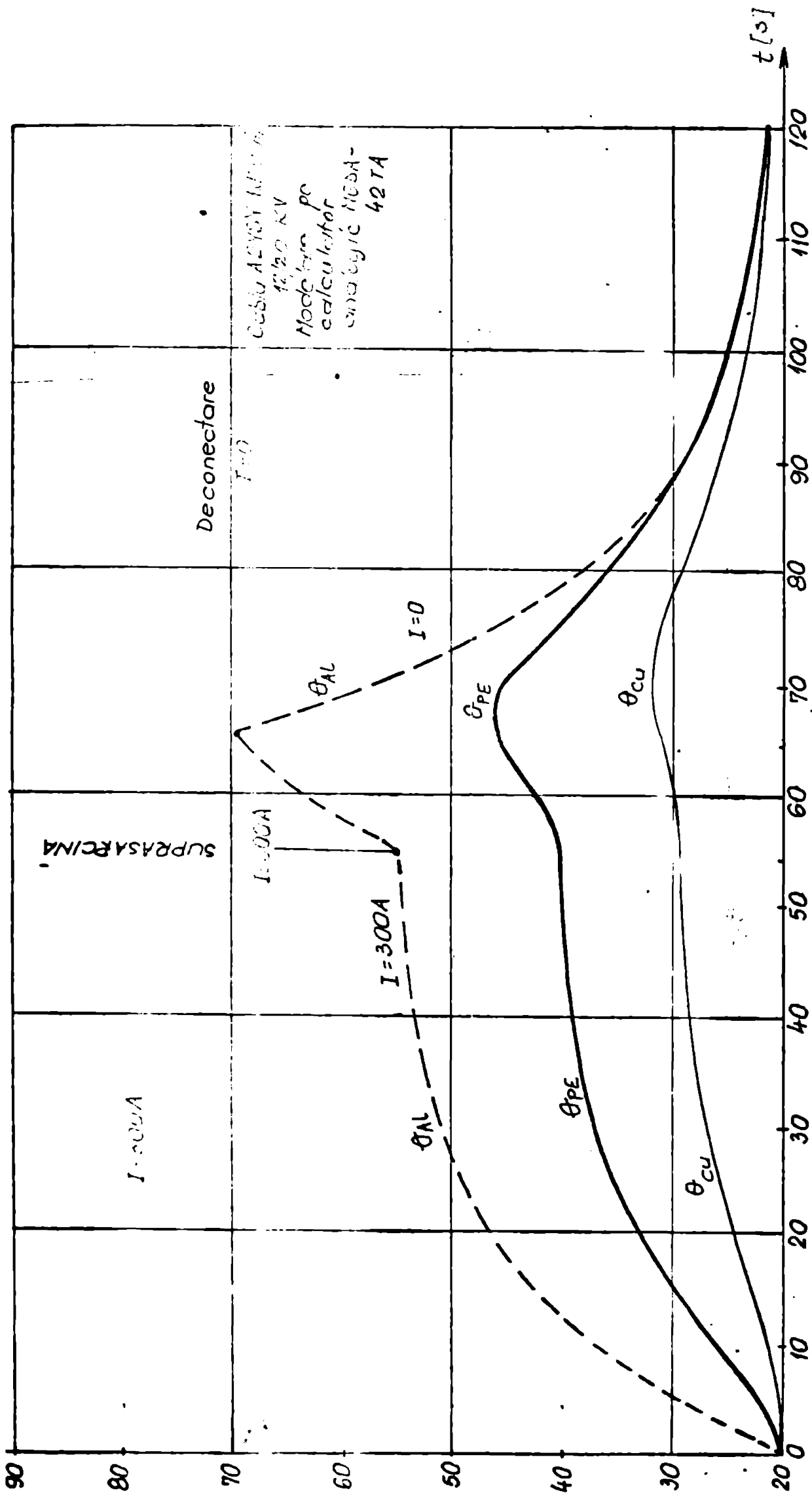


Fig.2.29 Incălzire inițială, suprasarcină, deconectare.

2.4.5.3. Calculul regimului de durată pentru cabluri trifazate (152):

Calculul a fost efectuat în limbaj BASIC pe calculatorul numeric tip ATARI 600XL, conform metodei prevăzute în STAS 10955-83 (72), care corespunde CEI 287-1969 (82). În Anexa 4 se prezintă programul de calcul care conține următoarele etape:

- introducerea mărimilor geometrice și a constantelor de material;
- calculul rezistenței electrice a conductorului și al rezistențelor termice;

T_1 - rezistența termică între conductor și manta; T_2 - rezistența termică între manta și armătură; T_3 - rezistența termică între armătură și suprafața exterioară a cablului (inveliș de protecție exterior) T_4 - rezistența termică externă între suprafața cablului și aer (calcul prin 10 iterații):

- calculul curentului de încălzire în regim de durată care asigură încălzirea conductorului cablului la valoarea prescrisă θ_c , pentru diferite valori ale temperaturii mediului ambiant $\theta_0 = 10^\circ\text{C} \dots 30^\circ\text{C}$;
- calculul temperaturii armăturii metalice din Ol, pentru diferite valori ale θ_0 .

În tabelul 2.7 sînt prezentate mărimile geometrice pentru cabluri de tipul ACHPABI,

În figura 2.30 o secțiune prin cablu, în figura 2.31 - factorul geometric G (72), iar în figura 2.32 - coeficientul de disipare h pentru cablurile pozate în aer (72).

Tabelul 2.7. Mărimi geometrice pentru cabluri tip ACHPABI.

Nr. crt.	Cablu Mărimile	3x150 mm ² 3,5/6 kV	3x150 mm ² 5,8/10 kV	3x185 mm ² 5,9/10 kV
1	S [mm ²]	1500	150	185
2	d_c [mm]	15,9	15,9	17,7
3	t_1 [mm]	3,14	3,74	3,84
4	t [mm]	5,28	6,48	6,48
5	$D_{\text{infuniera}}$ [mm]	39,4	42	44,5
6	$D_{\text{inv.comun}}$ [mm]	40,4	43	45,7
7	D_1 [mm]	43,8	46,4	49,1
8	D_2 [mm]	47,4	50,4	52,7
9	D_3 [mm]	49,4	52,4	54,7
10	D_4 [mm]	52,4	55,4	57,5
11	θ_{cc} [°C]	30	65	65
12	G_c	0,8	0,9	0,89
13	h [W/cm(°C) ^{5/4}]	0,000473	0,000468	0,000466

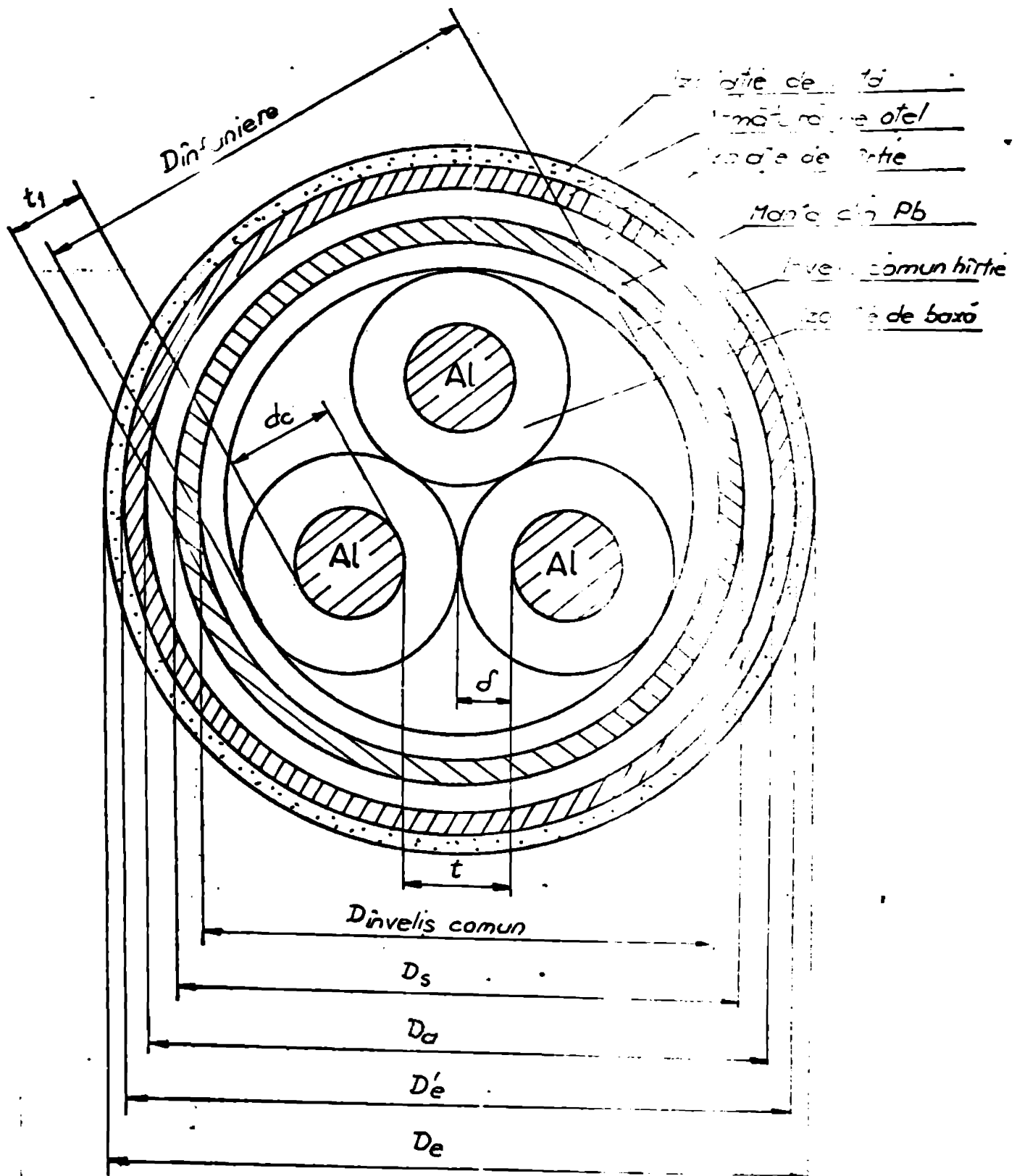


Fig.2.30. Date constructive pentru cablul de tip A C H P A b I.

Constante de material utilizate in calcul [72]: $\rho = 2,8264 \cdot 10^{-5} \Omega \text{cm}$ rezistivitatea electrică pentru Al; $\alpha = 0,00403 \text{ l}^\circ\text{C}$ coeficientul de variație a rezistivității electrice cu temperatura pentru Al; $\rho_T = 6 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{W}$ rezistivitatea termică pentru izolație de hartie, PVC sau iută; $\rho_T = 350 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{cm} / \text{W}$ rezistivitatea termică pentru polietilenă (PE).

Valorile calculate sînt prezentate in tabelul 2.8, tabelul 2.9 și tabelul 2.10 [152].

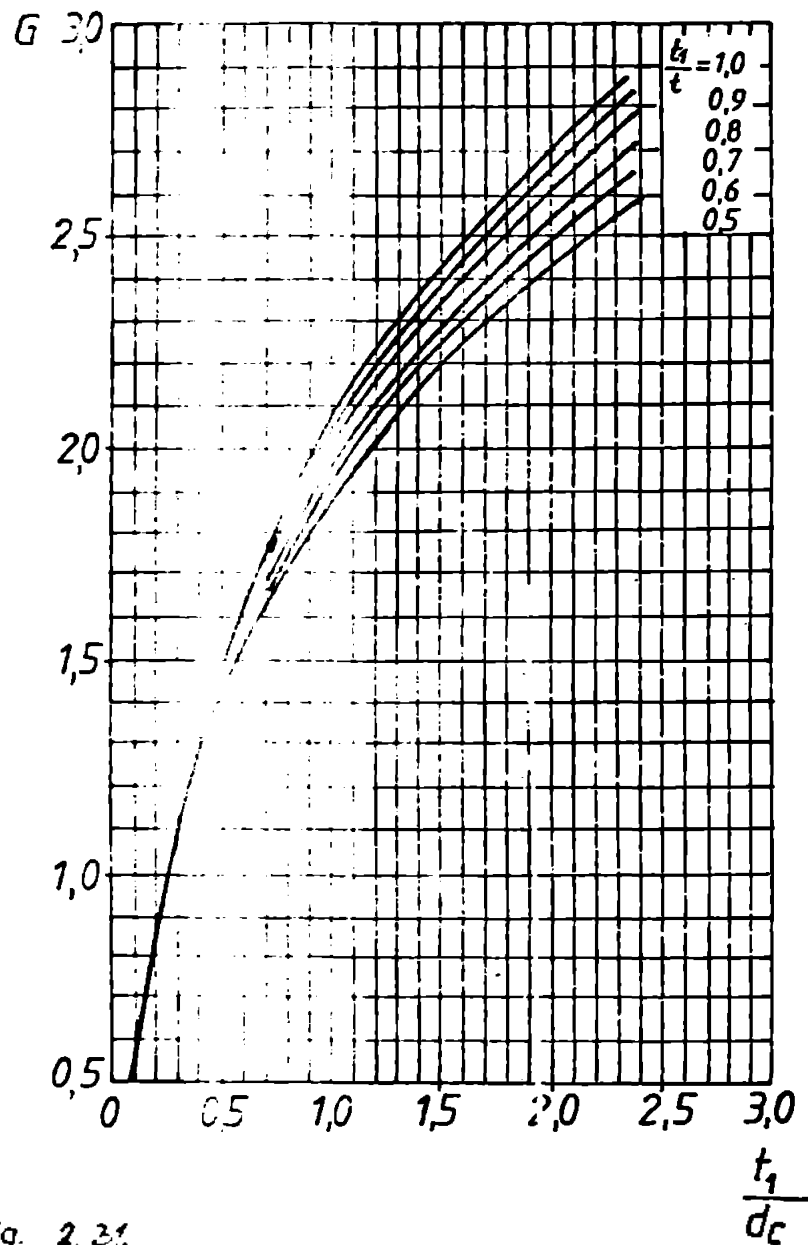


Fig. 2.31.

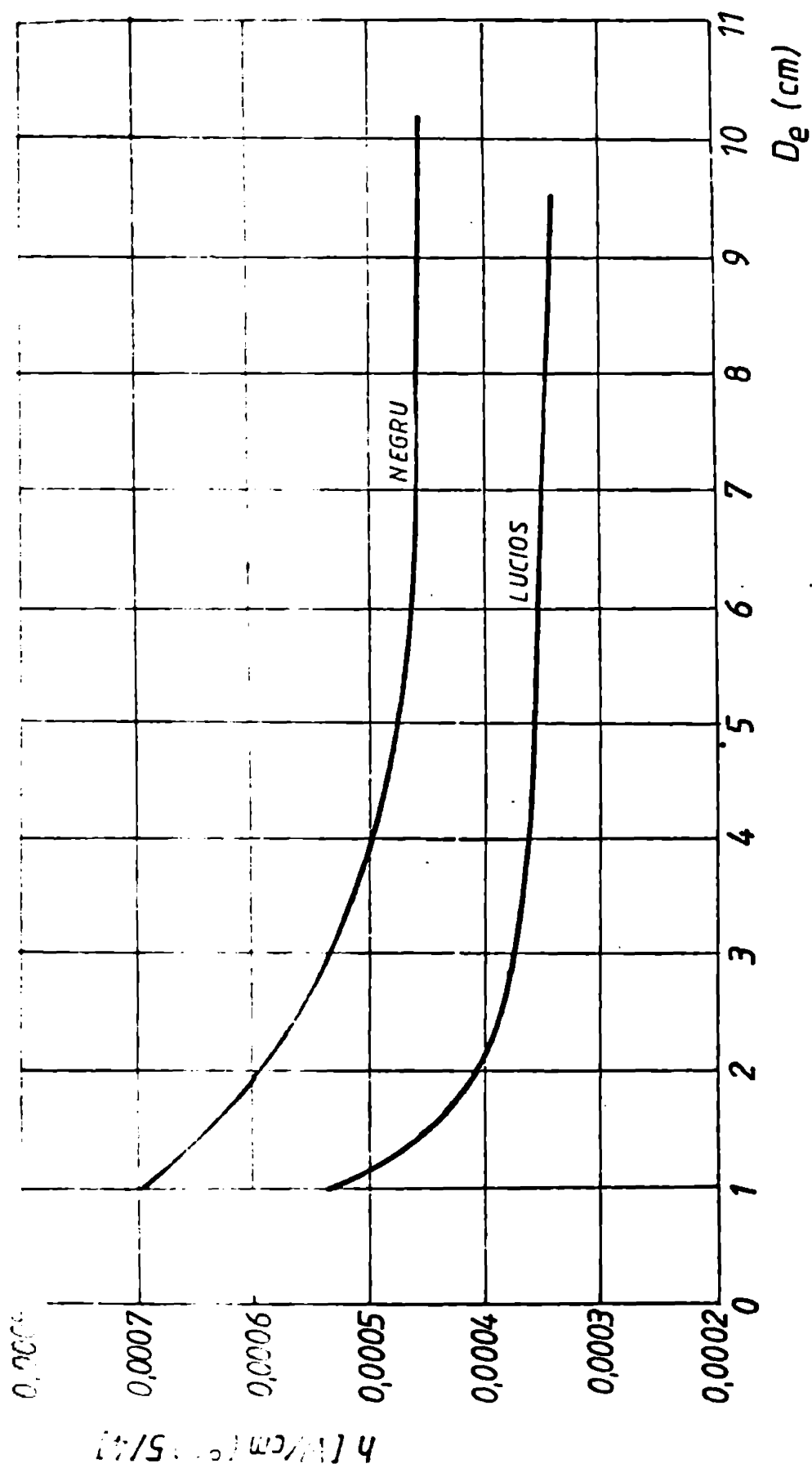
t - GROSIMEA IZOLATIEI INTRE CONDUCTOARE.

t_1 - GROSIMEA IZOLATIEI INTRE CONDUCTOR SI MANTA.

d_c - DIAMETRUL UNUI CONDUCTOR ROTUND

Factorul geometric G pentru cablurile cu trei conductoare rotunde, cu izolație comună.

Fig. 2.31.



D_e - DIAMETRUL EXTERIOR AL UNUI CABLU

Fig. 2.32 COEFICIENTUL DE DISIPARE h PENTRU CABLURILE POZATE IN AER.

Fig. 2.32.

Tabelul 2.8. Cablu ACHPABI 3x150 mm² 3,5/6 kV.

1	θ_0 [°C]	10	15	20	25	30
2	R [$\frac{\Omega}{cm}$]	2,3398 · 10 ⁻⁶	→	→	→	→
3	T ₁ [$\frac{cm^{\circ}C}{W}$]	76,3944	→	→	→	→
4	T ₂ --	7,5332	→	→	→	→
5	T ₃ --	5,6227	→	→	→	→
6	T ₄ --	70,776 1	71,8670	73,0650	74,3906	75,8709
7	I _∞ (A)	301,91	289,4 9	276,642	263,307	249,475
8	θ_{OL} [°C]	58,88	60,58	62,27	63,94	65,58

Tabelul 2.9. Cablu ACHPABI 3x150 mm² 5,8/10 kV

1	θ_0 [°C]	10	15	20	25	30
2	R [$\frac{\Omega}{cm}$]	2,225 · 10 ⁻⁶	→	→	→	→
3	T ₁ [$\frac{cm^{\circ}C}{W}$]	85,943	→	→	→	→
4	T ₂ --	7,886	→	→	→	→
5	T ₃ --	5,3095	→	→	→	→
6	T ₄ --	72,684	74,126	75,755	77,619	79,789
7	I _∞ (A)	268,165	255,091	239,377	223,91	207,38
8	θ_{OL} [°C]	47,45	49,24	51,01	52,76	54,48

Tabelul 2.10. Cablu ACHPABI 3x185 mm² 5,8/10 kV.

1	θ_0 [°C]	10	15	20	25	30
2	R [$\frac{\Omega}{cm}$]	1,804 · 10 ⁻⁶	→	→	→	→
3	T ₁ [$\frac{cm^{\circ}C}{W}$]	84,988	→	→	→	→
4	T ₂ --	6,748	→	→	→	→
5	T ₃ --	4,7610	→	→	→	→
6	T ₄ --	70,131	71,523	73,095	74,894	76,989
7	I _∞ (A)	303,923	287,962	271,277	252,277	235,022
8	θ_{OL} [°C]	47,45	49,25	51,02	52,77	54,49

In contractul de cercetare [152] s-au efectuat calcule și pentru cabluri de tip ACYSEABY, CYSEABY, ACYHSABY, CYABY-K.

2.4.5.4. Calculul regimului de durată pentru cabluri monofazate [152]:

Calculul s-a efectuat pe calculator numeric, iar programul de calcul este prezentat în Anexa 5.

Valorile numerice inițiale sînt prezentate în tabelul 2.11.

Tabelul 2.11. Cabluri monofazate.

Nr. crt.	Tip cablu	A2YSY 12/20 kV	A2YeY 12/20	A2YSY 12/20 kV	A2YSEY 35,8/10	A2YSY 35/60	A2YSEY EF 111
1	Secțiunea [mm ²]	1 x 120	1 x 150	1 x 185	1 x 120	1 x 150	1 x 70
2	ρ_{20} [$\Omega \cdot \text{cm}$]	$\rho_{20} = 2,8264 \cdot 10^{-6} \frac{\Omega \cdot \text{cm}}{\rho, \text{cm}}$; $\alpha_{20} = 4,03 \cdot 10^{-3} (1/^\circ\text{C})$					
3	θ_c [$^\circ\text{C}$]	75	75	75	75	90	75
4	T_1 [$^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$]	350	350	350	350	350	350
5	d_c [cm]	1,42	1,58	1,77	1,42	1,50	1,07
6	ϕ_{izol} [cm]	2,92	3,08	3,27	2,62	4,6	3,67
7	ρ_{T2}	600	600	600	600	600*	600
8	θ_2 INT	2,98	3,14	3,33	2,68	4,6*	3,72
9	θ_2 EXT	3,46	3,62	3,81	3,12	4,7*	4,23
10	ρ_{T3}	-	-	-	-	600	-
11	θ_3 INT	-	-	-	-	4,8	-
12	θ_3 EXT	-	-	-	-	5,4	-
13	h	0,000374	0,000372	0,000370	0,000377	0,000363	0,000368

Valorile calculate sînt prezentate în tabelul 2.12 → 2.17.

Tabelul 2.12. Cablu tip A2YSY 1x120 12/20 kV

Nr. crt.	θ_0 [$^\circ\text{C}$]	10	15	20	25	30
1	R [Ω/cm]	$2,877 \cdot 10^{-6}$	→	→	→	→
2	T_1 [$^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$]	40,107	→	→	→	→
3	T_2 [—]	14,243	→	→	→	→
4	T_4 [$^\circ\text{C} \cdot \text{cm}/\text{W}$]	96,837	98,632	100,62	102,85	105,37
5	I_{∞} [A]	386,54	369,19	351,197	332,47	312,90
6	θ_{Cu} [$^\circ\text{C}$]	57,75	59,26	60,766	62,243	63,70
7	θ_s [$^\circ\text{C}$]	51,633	53,68	55,71	57,713	59,68

Tabelul 2.13. Cablu tip A2YSY 1x150 12/20 kV.

Nr. crt.	θ_0 (°C)	10	15	20	25	30
1	R	$2,301 \cdot 10^{-6}$	→	→	→	→
2	T ₁	37,135	→	→	→	→
3	T ₂	13,566	→	→	→	→
4	T ₄	92,839	98,55	96,46	98,60	101,03
5	I _∞	443,5	423,60	402,93	381,41	358,94
6	θ_{Cu}	58,18	59,66	61,12	62,56	63,98
7	θ_s	52,03	54,05	56,05	58,02	59,96

Tabelul 2.14. Cablu tip A2YSY 1x185 12/20 kV.

Nr. crt.	θ_0 (°C)	10	15	20	25	30
1	R	$1,866 \cdot 10^{-6}$	→	→	→	→
2	T ₁	34,148	→	→	→	→
3	T ₂	12,842	→	→	→	→
4	T ₄	88,46	90,106	91,93	93,97	96,28
5	I _∞	507,06	484,23	460,56	435,93	410,21
6	θ_{Cu}	58,61	60,05	61,48	62,88	63,274
7	θ_s	52,45	54,43	56,39	58,33	60,241

Tabelul 2.15. Cablu tip A2YSEY 1x120 5,8/10 kV.

Nr. crt.	θ_0 (°C)	10	15	20	25	30
1	R	$2,877 \cdot 10^{-6}$	→	→	→	→
2	T ₁	34,076	→	→	→	→
3	T ₂	14,497	→	→	→	→
4	T ₄	104,825	106,78	108,96	111,40	114,16
5	I _∞	393,7	366,35	348,32	329,57	309,99
6	θ_{Cu}	60,56	61,83	63,10	64,34	65,57
7	θ_s	54,41	56,24	58,04	59,81	61,56

Tabelul 2.16. Cablu tip A2YSY 1x150 35/60 kV.

Nr. crt.	θ_0 (°C)	10	15	20	25	30
1	R	$2,415 \cdot 10^{-6}$	→	→	→	→
2	T ₁	64,393	64,393	→	→	→
3	T _{1A}	62,34	62,34	→	→	→
4	T _{1B}	2,05	2,05	→	→	→
5	T ₂	11,23	11,23	→	→	→
6	T ₄	65,68	66,62	67,65	68,76	69,99
7	I _∞	484,08	467,16	449,70	431,66	412,98
8	θ_{Cu}	53,54	56,05	58,55	61,01	63,46
9	θ_s	47,18	50,12	53,05	55,95	58,84

Tabelul 2.17. Cablu tip A2YSEY EF 70 mm² 111 kV.

Nr. crt.	θ_0 (°C)	10	15	20	25	30
1	R	$4,932 \cdot 10^{-6}$	→	→	→	→
2	T ₁	68,56	→	→	→	→
3	T ₂	12,05	→	→	→	→
4	T ₄	85,09	86,63	88,33	90,23	92,38
5	I _∞	231,81	269,51	256,74	243,43	229,49
6	θ_{Cu}	48,13	50,43	52,70	54,95	57,18
7	θ_s	43,33	46,04	48,72	51,37	54,00

θ_{Cu} - este temperatura ecenului de cupru al cablului;

θ_s - este temperatura pe suprafața exterioră a cablului.

Rezultatele obținute prin calcul prezintă următoarele avantaje:

- Permite stabilirea precisă a curentului de încălzire I_{∞} în vederea încercării la impuls, curent care asigură încălzirea conductorului la valoarea prescrisă Θ_c ;

- Pentru controlul temperaturii este suficient să se măsoare temperatura armăturii metalice Θ_{aj} , sau a ecranului metalic Θ_{Cu} , fără să fie necesară străpungerea izolației de fază a cablului;

- Modelările pe calculator analogic au confirmat posibilitatea de a se scurta timpul de încălzire prin injectarea unui curent inițial dublu față de valoarea calculată pentru o durată de maxim 10 minute, după care se reduce curentul de încălzire la valoarea calculată pentru regimul de durată I_{∞} (152);

- Obținerea unei economii de energie electrică, de cablu necesar pentru încercări și de manoperă pentru pregătirea încercării, rezultând o eficiență economică de 100.000 lei/an.

Cercetarea efectuată de autorul tezei prin mai multe metode de calcul numeric, prin modelare analogică și prin măsurători directe pentru cabluri fabricate la ICME-București, cât și modelările privind regimul termic al unor cabluri cu răcire forțată, care deocamdată nu se fabrică în țară, a permis obținerea următoarelor rezultate:

- Determinarea rezistențelor termice pentru un număr mare de cabluri fabricate la ICME-București;

- Determinarea temperaturilor în diferite straturi ale cablurilor, pentru diferite valori ale curenților prin cablu;

- Posibilitatea stabilirii precise a temperaturii conductorului, prin metode care nu necesită străpungerea izolației de fază;

- Ridicarea calității și preciziei încercării la nivelul la care procedează și alte laboratoare și firme constructoare de cabluri (Pirelli-Italia, BICC-Anglia, EDF-Franța, KEMA-Ulanda) - pentru elaborarea de buletine de încercare aliniate la normele internaționale, ceea ce este absolut necesar pentru cablurile destinate exportului;

- Realizarea unui model analogic pentru studiul răcirii forțate a unui cablu de mare putere, care încă nu a fost lansat în fabricație și care necesită studii complexe;

- Posibilitatea punerii în evidență a influenței reciproce între circuitele de răcire forțată ale cablului de mare putere, precum și a eficienței răcirii în lungul canalizării - în funcție de condițiile de răcire asigurate la capete - de către schimbătoarele de căldură;

- Utilizarea standului de încercări amenajat la IPTV și a modelelor analogice nu numai la lucrările de cercetare pe bază de contract, ci și în procesul didactic cu studenții.

* * *

C a p i t o l u l 3.

CALCULUL REPARTIȚIEI CIMPULUI ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA COMPUSĂ DIN MĂI MULTE STRATURI, ÎN ZONA CILINDRICĂ A CABLURILOR.

În construcția cablurilor de înaltă tensiune se acordă o atenție deosebită pentru realizarea sistemului de izolație în concordanță cu o repartitie optimă a cimpului electric, situație în care se evită o supradimensionare a izolației, contribuind în acest mod la scăderea prețului de cost al cablurilor. Încercările de a se mări tensiunea nominală a cablurilor doar prin mărirea grosimii izolației, fără a se mai lua și o serie de măsuri speciale - nu a dat rezultate pozitive [24]. [54]. [106]. Într-un sistem de electrozi cilindrici coaxiali, sistem caracteristic și pentru izolația cablurilor, repartitia radială a intensității cimpului electric este cu atât mai neuniformă cu cât grosimea izolației este mai mare [3]. [18]. [24]. [54]. [62]. [106].

La cablurile cu izolație de hirtie, uniformizarea repartitiei cimpului electric se obține prin gradarea izolației - adică executarea ei din benzi de hirtie cu diferite densități, grosimi și permittivități dielectrice [106]. Prin gradarea izolației se obține o reducere relativă a intensității cimpului electric în primele straturi din apropierea conductorului central, în schimb unei creșteri a intensității cimpului electric în ultimele straturi ale izolației - spre exterior.

În scopul de a îndepărta neuniformitățile și creșterile locale ale intensității cimpului electric pe suprafața conductorului central și de a exclude formarea unor incluziuni, cavități, porozități, vacuole - între conductor și izolația cablului se intercalează un ecran semiconductor. Prezența ecranului semiconductor anulează sau cel puțin micșorează solicitările electrice din această zonă - și nu permite apariția descărcărilor parțiale. Un al doilea ecran semiconductor se intercalează între izolația de fază și ecranul sau manta metalică a cablului. Unele cercetări [127] au studiat rolul unui ecran anti-efluvii, amplasat între primul ecran semiconductor și izolația de fază.

Prin uniformizarea repartitiei cimpului electric și reducerea

grosimii izolației la o valoare optimă, rezultă nu numai o reducere a prețului de cost al cablului, ci și o posibilitate de creștere a capacității de transport, prin asigurarea unei răcirii naturale mai bune. Răcirea naturală este mai eficientă când rezistența termică a izolației este mai mică.

Calculul repartiției cimpului electric în izolația stratificată a cablurilor reprezintă o problemă deosebit de importantă pentru determinarea solicitării acestora în vederea optimizării și va fi tratat în cadrul tezei atât pentru zona cilindrică cât și pentru zone manșonelelor de jonctiune și a cutiilor terminale ale cablurilor - zona profilului deflector.

Metodele analitice de calcul a intensității cimpului electric în izolația cablurilor prezentate în literatura de specialitate [24], [40], [54], [56], [60], [61], [62], [98], [99] nu conțin detalii privind variația cimpului electric în ecranele semiconductoare și alegerea optimă a acestora. În cataloage [70], [77], producătorii de benzi electroizolante și benzi semiconductoare indică doar unele caracteristici ale acestora (tab.3.1; tab.3.2).

Tabelul 3.1. Set de materiale pentru cablu de 20 kV din PE [70].

Nr. crt.	Denumirea materialului	Norma de fabricație	Caracteristici
1	Bandă de polietilenă (PE) de joasă densitate.	CS 5014-97	- grosime 0,25 mm - lățime 25 mm - lungime rolă: 15 m
2	Bandă de pinză semi-conductoare.	CS 4037-74	- grosime 0,30 mm - lățime 25 mm - lungime rolă: 5 m
3	Bandă PVC termocontractibilă tip J1.	M.I.Ch. N.I.6418-74	- grosime 0,15 mm - lățime 25 mm - lungime rolă: 20 m

Tabelul 3.2. Benzi SCOTCH - Elveția [77].

Nr. crt.	Tipul	ρ [Ωcm]	F _{str.} [kV/mm]	grosime [mm]	lățime x lungime [mm] x [m]
1	Scotch Nr. 88 (PVC, negru)	10^{12}	65	0,18	19 x 6 19 x 20
2	Scotch Nr. 88 (PVC, negru)	10^{12}	60	0,22	19 x 6 19 x 20
3	Scotch Nr. 82 (PVC, negru)	10^{12}	65	0,25	12 x 33 19 x 33
4	Scotch Nr. 99 (PVC, negru)	10^{12}	55	0,22	19 x 20

Tabelul 3.2. (continuare)

1	2	3	4	5	6
5	Scotch Nr.35 (PVC, diverse, culori)	10^{12}	45	0,18	19 x 6 19 x 20
6	Scotch Nr.27 (Etilen propilen negru) $\epsilon_r = 2,5$ la $20^\circ C$	10^{16}	50	0,75	19 x 9
7	Scotch Nr.13 (Semiconductor, cauciuc sintetic EPR)	60	-	0,75	19 x 4,5
8	Scotch Nr.70 (Cauciuc sili- conic)	10^{13}	45	0,38	25 x 9
9	Scotch Nr.45 (Poliester, transparent)	10^{15}	45	0,15	9 x 55 12 x 55 15 x 55 19 x 20 19 x 55 25 x 55

Utilizarea unor ecrane semiconductoare de mare rezistivitate are ca efect uniformizarea cimpului electric, creșterea nivelului de ionizare, dar și o diminuare a rigidității la impuls. De aceea, a apărut opinia că sînt de preferat materiale semiconductoare cu rezistivitate mai mică, care nu depășește valoarea $\rho \leq 10^4 \Omega \text{cm}$. Dacă în locul unor materiale semiconductoare cu rezistivitate mare ($\rho > 10^7 \Omega \text{cm}$), se utilizează materiale semiconductoare cu rezistivitate mai mică, se obține o reducere a descărcărilor parțiale între izolație și ecranele semiconductoare [15].

La cîșturi de înaltă tensiune cu izolație din polietilenă se extrudează peste conductorul central - primul strat semiconductor din polietilenă cu conținut de grafit foarte fin, peste care se extrudează izolația de fază și ulterior - al doilea ecran semiconductor. De exemplu, pentru un cablu de 110 kV cu izolație din polietilenă reticulată chistic XLPE, producătorul a prevăzut ecrane semiconductoare cu rezistivitate $\rho = 5000 \Omega \text{cm}$, iar în zone de îmbinare a două tronsoane de cablu a prevăzut refacerea ecranului semiconductor din benzi semiconductoră tip Scotch Nr.13 cu rezistivitatea $\rho = 60 \Omega \text{cm}$ [55], [75].

Pentru a determina nivelul solicitării electrice a materialelor electrotehnice utilizate în construcția cablurilor, autorul tezei s-a preocupat să stabilească metode generale de calcul și repartiției în spațiu și a variației în timp a intensității cimpului electric la aplicații carea tensiunii înalte de impuls, a tensiunii înalte alternative sau a tensiunii înalte continue [142], [146], [147], [151], [160].

În cazul unui cablu cu "n" straturi dielectrice, supus la o ten-

siune U , intensitatea cimpului electric $E(r)$ in stratul cu permitivitatea dielectrică ϵ_K , figura 3.1, se calculează cu relația:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \epsilon_K \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \dots + \frac{1}{\epsilon_K} \ln \frac{r_K}{r_{K-1}} + \dots + \frac{1}{\epsilon_n} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} \right)} \quad (3.1)$$

pentru $r_{K-1} \leq r \leq r_K$.

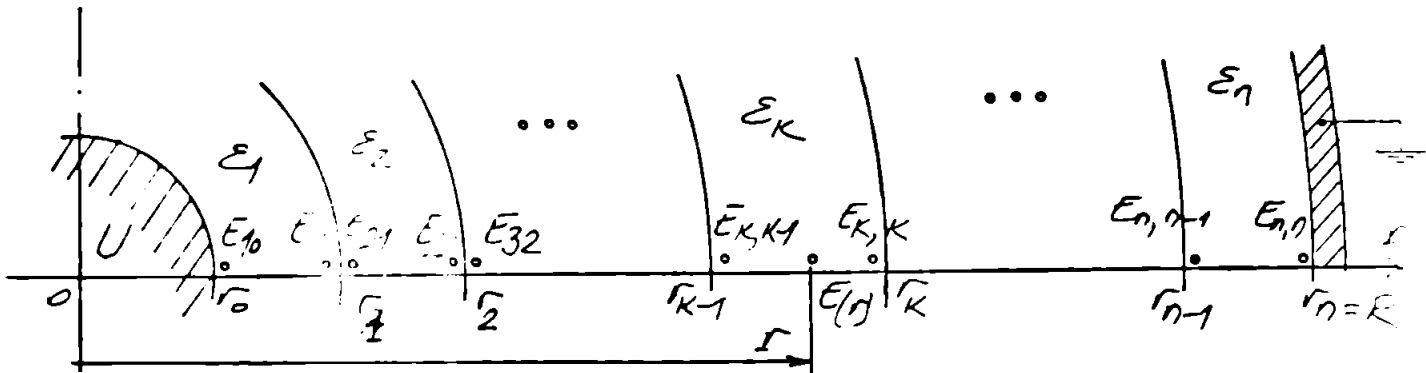


Fig.3.1. Notății utilizate pentru un cablu cu "n" straturi dielectrice.

Relația (3.1) prezentă în majoritatea lucrărilor de specialitate poate fi utilizată numai în cazul aplicării tensiunii alternative sau pentru primul moment - în cazul aplicării unui impuls de tensiune. Calculul intensității cimpului în regim de echilibru staționar - după aplicarea unui impuls de tensiune, sau în cazul aplicării tensiunii continue - nu se mai poate efectua cu relația (3.1) deoarece nu permitivitățile, ci conductivitățile electrice ale straturilor dielectrice vor interveni în calcul.

Particularizind relația (3.1) în cazul unui cablu cu izolația compusă dintr-un singur strat și fără a lua în considerare prezența ecranelor semiconductoare, rezultă că intensitatea maximă a cimpului electric apare în vecinătatea suprafeței conductorului central (fig. 3.2), valoarea ei fiind:

$$E_{max} = \frac{U}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}} \quad (3.2)$$

Menținind constantă raza mantalei metalice $R=ct$, intensitatea maximă variază cu raza r_0 și trece printr-un minim $E_{max,optim}$ pentru

$$r_0, optim = \frac{R}{e} = \frac{R}{2,72} \quad (fig.3.3):$$

$$\frac{dE_{max}}{dr_0} = \frac{-U \left[\ln \frac{R}{r_0} - r_0 \frac{R/r_0^2}{R/r_0} \right]}{\left[r_0 \cdot \ln \frac{R}{r_0} \right]^2} = \frac{-U \left[\ln \frac{R}{r_0} - 1 \right]}{\left[r_0 \cdot \ln \frac{R}{r_0} \right]^2} = 0, \quad (3.3)$$

rezultă:

$$\ln \frac{R}{r_{0 \text{ optim}}} = 1 \quad \text{și} \quad \frac{R}{r_{0 \text{ optim}}} = e \quad (3.4)$$

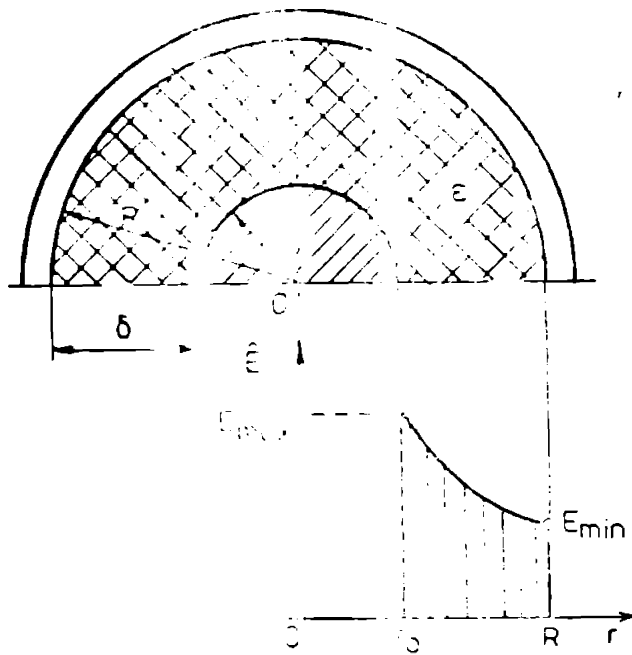


Fig. 3.2. Variația radială a intensității câmpului la un cablu cu un singur strat.

Definind ca o mărime de calcul η - coeficientul de utilizare a izolației (24), (60):

$$\eta = \frac{E_{\text{med}}}{E_{\text{max}}} = \frac{\frac{U}{R - r_0}}{\frac{U}{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}} = \frac{r_0 \ln \frac{R}{r_0}}{R - r_0} \quad (3.5)$$

pentru $r_0 = r_{0 \text{ optim}}$, rezultă:

$$\eta_{\text{optim}} = \frac{r_0}{R - r_0} = 0.58 \quad (3.6)$$

Intensitatea maximă - optimă are valoarea:

$$E_{\text{max optim}} = \frac{U}{r_0} \quad (3.7)$$

Relația (3.7) permite o dimensionare optimă și simplă a cablului, impunând:

$$E_{\text{max optim}} \leq E_{\text{adm izolație}} \quad (3.8)$$

Intensitatea admisibilă în izolație depinde atât de tipul materialului de izolație, de tensiunea nominală a cablului, de tipul cablului și de rezerva de izolație pe care constructorul vrea să o asigure. În tabelul 3.3 se fac exemplificări în acest sens (40), (89):

Raza conductorului de fază r_0 și raza mantălei metalice R se determină:

$$r_0 = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot E_{\text{adm izol.}}} \quad (3.9)$$

$$R = e \cdot r_0 \quad (3.10)$$

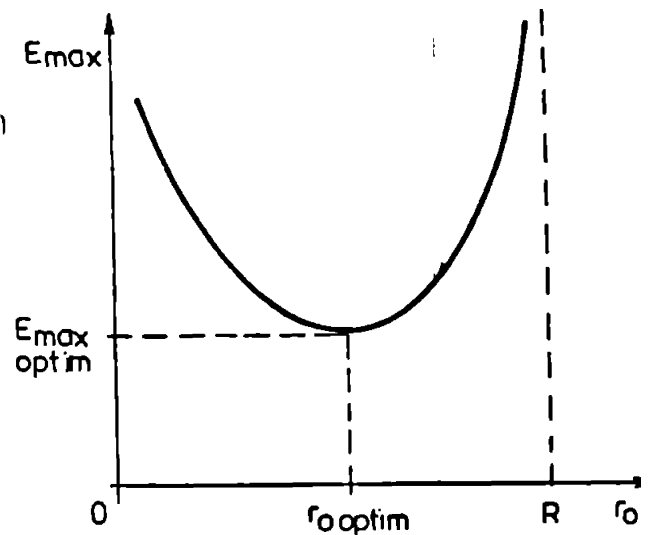


Fig. 3.3. Variația intensității $E_{\text{max}} = f(r_0)$ pentru $R = \text{const.}$

Tabelul 3.3. Valori admisibile ale intensității câmpului electric.

Nr. crt.	U_n (kV)	$E_{adm.iz}$ ($\frac{kV \cdot ef}{mm}$)	Observații
1	35/65	3,5 ... 4,5	- izolație din polietilenă reticulată chimic $\delta = 14$ mm.
2	52/90	4 ... 5	- " $\delta = 17$ mm
3	130/225	8 ... 10	- " $\delta = 22$ mm
4	245/420	12 ... 15	- " $\delta = 27$ mm - cablu cu ulei sau gaz.

Iar grosimea izolației δ :

$$\delta = R - r_0 = (e-1) \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot E_{adm.iz.}} \quad (3.11)$$

Din considerente economice, în funcție de puterea necesară a fi transportată, cablul care are o secțiune dată și o rază r_0 care poate fi diferită de raza calculată cu relația (3.9). Se preferă o rază r_0 cât mai mare, pentru a se micșora intensitatea câmpului electric. În această situație, acceptând în relația (3.2):

$$E_{max} = E_{adm.iz} \quad (3.12)$$

rezultă grosimea izolației pentru r_0 - precizat:

$$\delta = r_0 \left[\exp \left(\frac{U}{r_0 \cdot E_{adm.iz}} \right) - 1 \right] \quad (3.13)$$

Raza metalică și coeficientul de utilizare al izolației se calculează cu relațiile:

$$R = r_0 + \delta \cdot \frac{\delta}{r_0 \ln \left(1 + \frac{\delta}{r_0} \right)} \quad (3.14)$$

$$\eta = \frac{\delta}{R} \quad (3.15)$$

Coeficientul de utilizare a izolației - calculat cu relația (3.15) are o valoare mai mică decât cel calculat cu relația (3.6). Pentru o utilizare mai eficientă a izolației, aceasta poate fi formată din mai multe straturi cu dielectrice având proprietăți de material diferite.

În cazul unui cablu cu izolație compusă din trei dielectrice, repartiția intensității câmpului electric poate avea diferite forme - în funcție de valorile permittivităților dielectricilor (fig.3.4).

O repartiție optimă rezultă în situația din figura 3.4.d. în care: $E(r=r_1) = E(r=r_2) = E(r=r_3) =$

$$= \frac{U}{r_0 \cdot \epsilon_1 \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (3.16)$$

$$r_0 \cdot \epsilon_1 \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\epsilon_3} \ln \frac{r_3}{r_2} \right)$$

$$\text{sau } r_0 \cdot \epsilon_1 = r_1 \cdot \epsilon_2 = r_2 \cdot \epsilon_3 \quad (3.17)$$

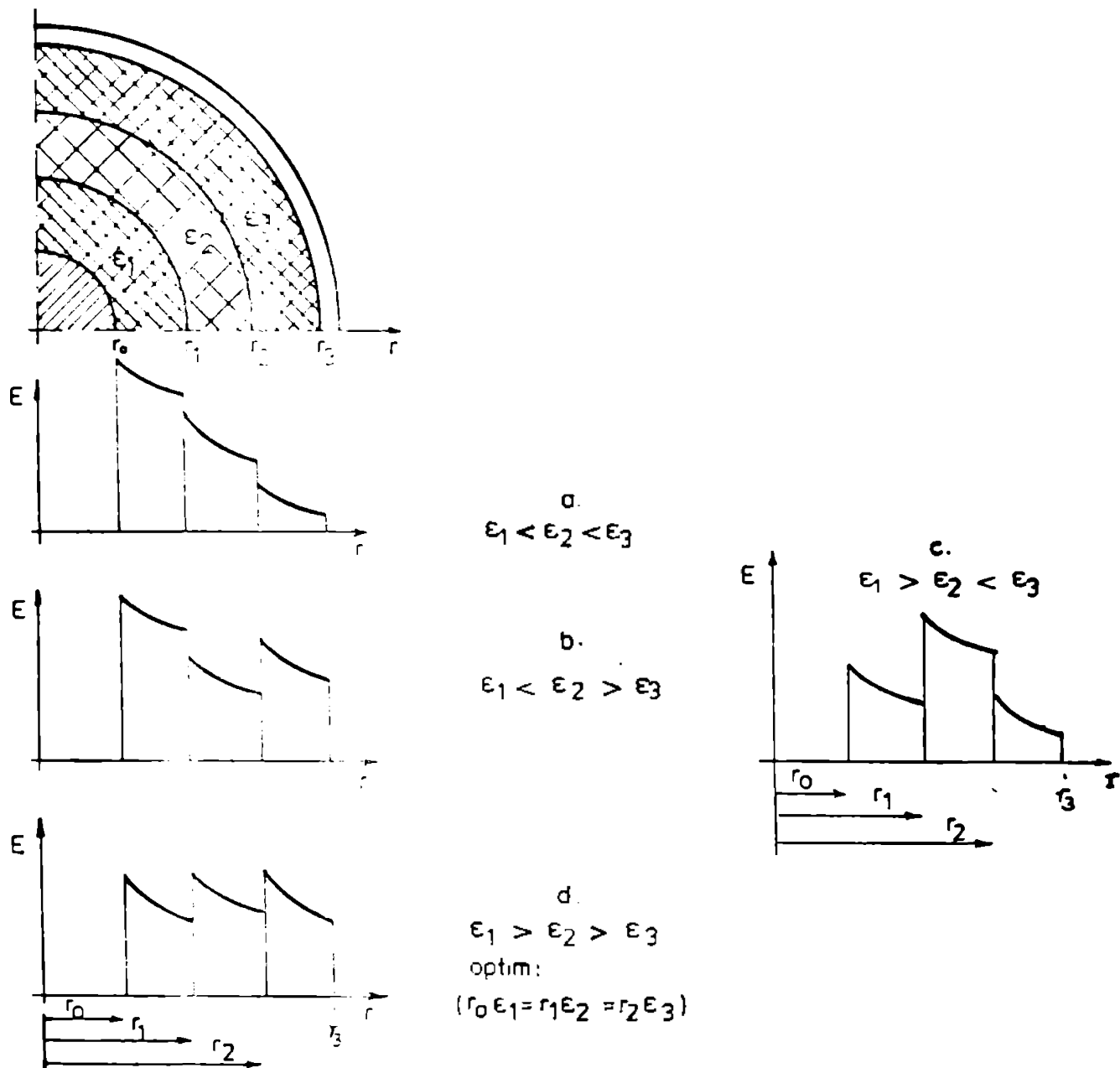


Fig.3.4. Repartiția radială a intensității câmpului electric în cablu - variante: a, b, c, d.

Generalizând condiția (3.17) pentru un dielectric cu n - straturi, condiția de repartiție optimă rezultă:

$$\epsilon_{10} = \epsilon_{21} = \epsilon_{32} = \dots = \epsilon_{k,k-1} = \dots = \epsilon_{n,n-1} \quad (3.18)$$

sau

$$r_0 \cdot \epsilon_1 = r_1 \cdot \epsilon_2 = r_2 \cdot \epsilon_3 = \dots = r_k \cdot \epsilon_{k-1} = \dots = r_{n-1} \cdot \epsilon_n \quad (3.19)$$

Relația (3.19) este aplicată în cazul cablurilor cu izolație de hirtie și cu izolație executată gradat: primele straturi din apropierea conductorului sînt din hirtie foarte subțire și cu o permitivitate mai ridicată, spre deosebire de straturile de hirtie din exterior care au o grosime mai mare și o permitivitate mai mică.

În cazul aplicării unei tensiuni continue, sau în cazul aplicării unui impuls - în regimul tranzitoriu și în regimul de echilibru staționar care urmează, repartiția intensității câmpului electric depinde nu numai de permitivitățile dielectrice ϵ_k ale straturilor, ci și de conductivitățile σ_k , sau de rezistivitățile ρ_k ale acestor straturi.

Tratarea problemei va începe cu calculul repartiției intensității câmpului electric, pentru un cablu cu un sistem de izolație compus din două straturi, la aplicarea unui impuls dreptunghiular lungă durată și în cazul aplicării tensiunii alternative.

3.1. CÂMPUL ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA UNUI CABLU CU DOUA STRATURI LA APLICAREA UNUI IMPULS DREPTUNGHILAR.

Considerând o izolație amplasată între doi electrozi plani compuși din două straturi cu permitivitățile ϵ_1, ϵ_2 și conductivitățile σ_1 și σ_2 (fig.3.5) se poate demonstra că există trei etape caracteristice privind repartiția tensiunii și variația intensității câmpului în timp [56], [57], [58], [61]:

- regimul inițial, în care intensitățile depind doar de permitivități: $\frac{E_1(0)}{E_2(0)} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$.

- regimul tranzitoriu, cu variații diferite în timp pentru câmpul din fiecare dielectric: $E_1(t) \neq E_2(t)$.

- regimul staționar, în care intensitățile câmpului depind de conductivități: $\frac{E_1(\infty)}{E_2(\infty)} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \neq \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$.

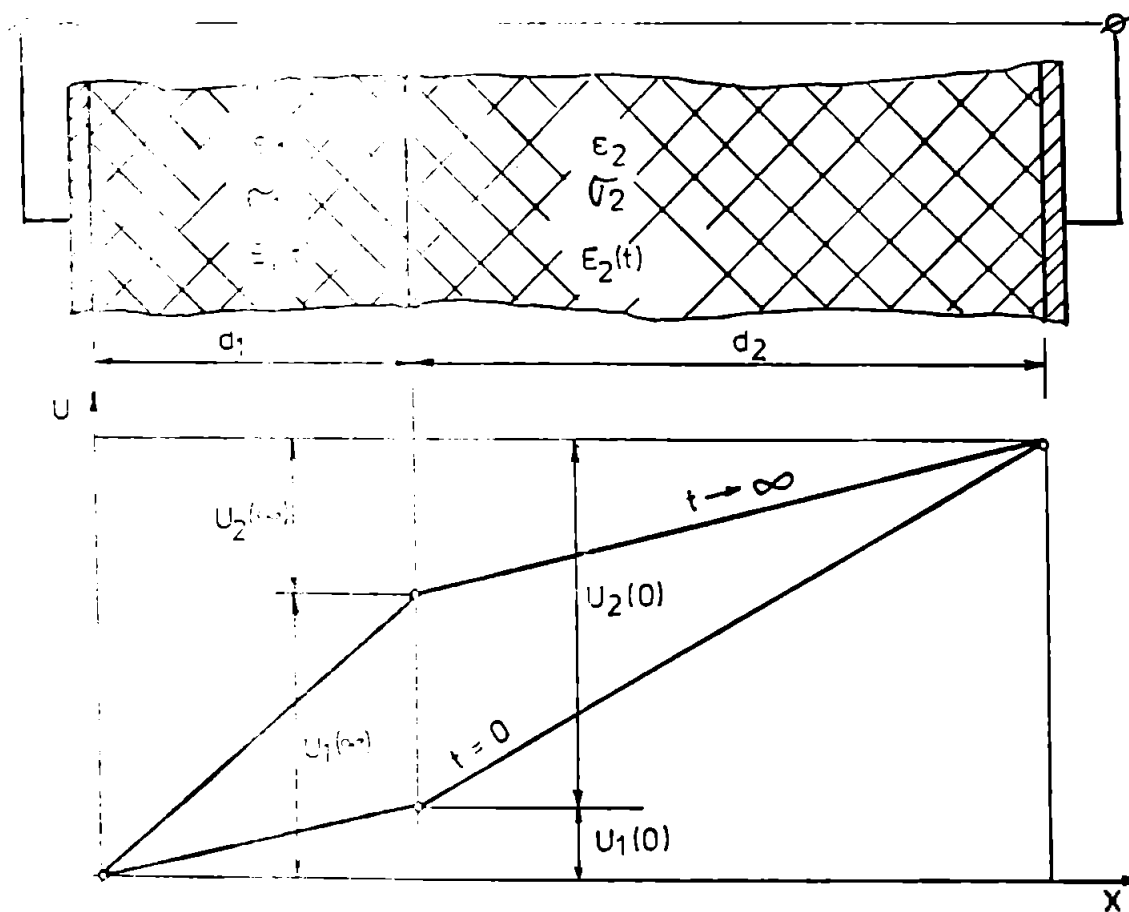


Fig.3.5. Dielectric din două straturi în câmp uniform; repartiția $U(x)$ în dielectric la momentele $t=0$ și $t \rightarrow \infty$.

În traterea regimului tranzitoriu se pleacă de la expresia căderii de tensiune pe cele două straturi și de la condiția de continuitate a densității curentului total care trece prin suprafața de separare celor două straturi (58):

$$U = U_1 + U_2 = E_1 d_1 + E_2 d_2 \quad (3.20)$$

$$J(t) = \sigma_1 E_1(t) + \varepsilon_1 \frac{dE_1(t)}{dt} = \sigma_2 E_2(t) + \varepsilon_2 \frac{dE_2(t)}{dt} \quad (3.21)$$

Intensitățile cimpului $E_1(t)$ și $E_2(t)$ rezultă ca soluții ale ecuației diferențiale (3.21):

$$E_1(t) = \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2) \cdot U}{(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)(\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} + \frac{\sigma_2 U}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \quad (3.22)$$

$$E_2(t) = \frac{(\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1) \cdot U}{(\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1)(\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} + \frac{\sigma_1 U}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \quad (3.24)$$

Constanta de timp a procesului tranzitoriu (3.25)

$$\theta = \frac{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}$$

În figura 3.5 se prezintă repartiția tensiunii $U(x)$ în dielectric la momentul inițial ($t=0$) și în regim staționar ($t \rightarrow \infty$).

Autorul tezei a propus metode de calcul a intensității cimpului electric în izolația stratificată a cablurilor având ca punct de plecare metode de calcul pentru dielectrice amplasate între electrozi liniari (58), (142). Exprimiind tensiunea aplicată în funcție de intensitățile cimpului electric în straturile componente ale izolației și impunind două prin etapă de calcul condiția de continuitate a densității curentului total care trece radial prin izolație, rezultă un sistem de ecuații diferențiale. Soluțiile acestui sistem de ecuații diferențiale reprezintă expresii generale ale variației intensităților cimpului electric în izolația stratificată în regim tranzitoriu și se verifică prin particularizări, atât regimul inițial, cât și regimul de echilibru staționar.

În cazul cablurilor, electrozii fiind cilindrici coaxiali - intensitatea cimpului electric variază cu raza:

$$E_1(r,t) = \frac{U_1(t)}{r \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad \text{pentru } r_0 \leq r \leq r_1 \quad (3.26)$$

$$E_2(r,t) = \frac{U_2(t)}{r \ln \frac{R}{r_1}} \quad \text{pentru } r_1 \leq r \leq R \quad (3.27)$$

Tensiunea aplicată U_0 se repartizează pe cele două straturi:

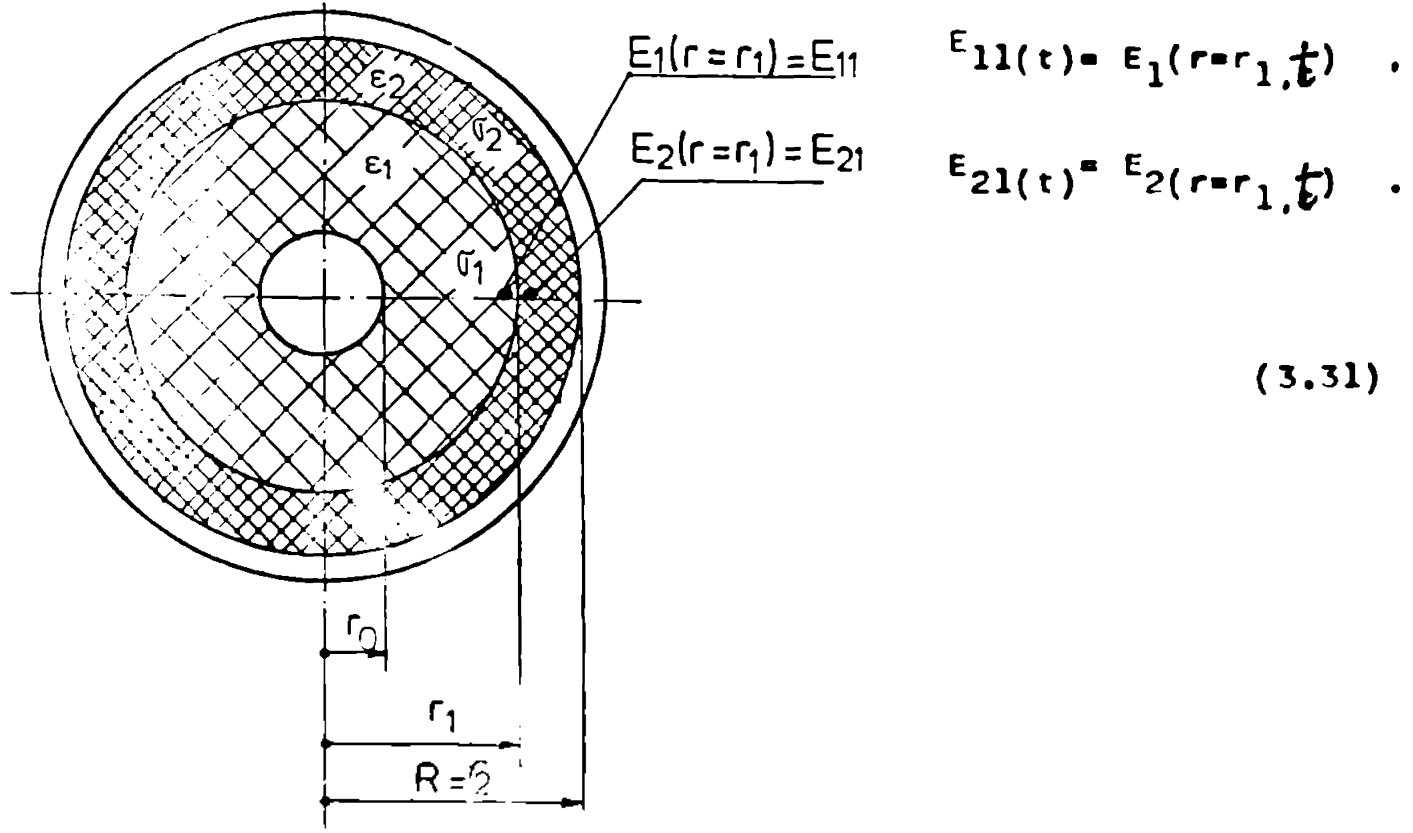
$$U_0 = \text{const.} = U_1(t) + U_2(t) = \int_{r_0}^{r_1} E_1(r,t) \cdot dr + \int_{r_1}^R E_2(r,t) \cdot dr \quad (3.28)$$

unde:

$$U_1(t) = \int_{r_0}^{r_1} E_1(r,t) \cdot dr \quad (3.29)$$

$$U_2(t) = \int_{r_1}^R E_2(r,t) \cdot dr \quad (3.30)$$

Intensitățile câmpului electric de-o parte și de alta a suprafeței de separare dintre cele două straturi (fig.3.6) sînt notate prin:



$$(3.31)$$

Fig.3.6. Dielectric stratificat între electrozi cilindrici coaxiali.

Din expresia tensiunii aplicate:

$$U_0 = E_{11}(t) \cdot r_1 \ln \frac{r_1}{r_0} + E_{21}(t) \cdot r_1 \cdot \ln \frac{R}{r_1} \quad (3.32)$$

rezultă pentru intensitatea $E_{21}(t)$ relația:

$$E_{21}(t) = \frac{U_0}{r_1 \ln \frac{R}{r_1}} - E_{11}(t) \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_1}} \quad (3.33)$$

Impunind condiția de continuitate a densității curentului total prin suprafața de separare dintre cele două straturi,

$$J = \sqrt{1} \cdot E_{11}(t) + \epsilon_1 \frac{d E_{11}(t)}{dt} = \sigma_2 E_{21}(t) + \epsilon_2 \frac{d E_{21}(t)}{dt} \quad (3.34)$$

Rezolvarea ecuației diferențiale (3.34) se poate face aplicând calculul operațional:

$$\frac{d E_{K1}(t)}{dt} = p \cdot E_{K1}(t) - E_{K1}(t=0) \quad \text{pentru } K=1 \text{ și } 2. \quad (3.35)$$

Intensitățile câmpului $E_{K1}(t=0)$ la momentul inițial, rezultă din condiția de flux electric constant:

$$D(r=r_1) \cdot 2\pi \cdot r_1 \cdot l = \epsilon_1 E_1(r,0) \cdot 2\pi r \cdot l = \epsilon_2 E_2(r,0) \cdot 2\pi r l. \quad (3.36)$$

Integrând:

$$\begin{aligned} U_0 &= \int_{r_0}^{r_1} E_1(r,0) \cdot dr + \int_{r_1}^R E_2(r,0) \cdot dr = \frac{D \cdot r_1}{1} \left[\int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r} + \int_{r_1}^R \frac{dr}{r_1} \right] = \\ &= \epsilon_1 \cdot E_1(r,0) \cdot r \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right] = \\ &= \epsilon_1 \cdot E_{11}(0) \cdot r_1 \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right] = \\ &= \epsilon_2 \cdot E_{21}(0) \cdot r_1 \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right]. \end{aligned} \quad (3.37)$$

rezultă:

$$E_{11}(0) = \frac{U_0}{r_1 \epsilon_1 \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right]} \quad (3.38)$$

$$E_{21}(0) = \frac{U_0}{r_1 \epsilon_2 \left[\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right]} \quad (3.39)$$

Tensiunea aplicată fiind constantă:

$$\mathcal{L} [U_0] = \frac{U_0}{p} \quad (3.40)$$

condiția de continuitate (3.34) se exprimă în operațional:

$$\begin{aligned} \sqrt{1} E_{11}(p) + \epsilon_1 \left\{ p E_{11}(p) - \frac{1}{r_1 \epsilon_1 \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} \cdot \frac{U_0}{p} \right\} = \\ = \sqrt{2} E_{21}(p) + \epsilon_2 \left\{ p E_{21}(p) - \frac{1}{r_1 \epsilon_2 \left(\frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)} \cdot \frac{U_0}{p} \right\}. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Pentru o scriere mai compactă se introduc notațiile:

$$D_1 = r_1 \ln \frac{r_1}{r_0}, \quad D_2 = r_1 \ln \frac{R}{r_1}. \quad (3.42)$$

Rezultă:

$$\begin{aligned} \sigma_1 E_{11}(p) + \varepsilon_1 \left[p \cdot E_{11}(p) - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1} \cdot \frac{U_0}{p} \right] = \\ \sigma_2 E_{21}(p) + \varepsilon_2 \left[p \cdot E_{21}(p) - \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1} \cdot \frac{U_0}{p} \right]. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Expresia (3.33) scrisă în operațional devine:

$$E_{21}(p) = \frac{U}{p} \cdot \frac{1}{D_2} - E_{11}(p) \cdot \frac{D_1}{D_2}. \quad (3.44)$$

Înlocuind (3.44) în (3.43) rezultă:

$$(\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1) E_{11}(p) + p E_{11}(p) [\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1] = (\sigma_2 + p \varepsilon_2) \cdot \frac{U_0}{p}. \quad (3.45)$$

sau:

$$E_{11}(p) = \frac{U}{p} \cdot \frac{\sigma_2 + p \varepsilon_2}{p(\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1) + (\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1)}. \quad (3.46)$$

Pentru a reveni în domeniul timpului se utilizează transformările inverse (10):

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{p(p+a)} \right] = \frac{1}{a} \left[1 - e^{-at} \right]. \quad (3.47)$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{p+a} \right] = e^{-at}. \quad (3.48)$$

Descompunem expresia (3.46) în fracții simple:

$$\begin{aligned} E_{11}(p) = \frac{U}{p} \cdot \frac{1}{p + \frac{\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1}} \cdot \frac{\sigma_2}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1} + \\ + U \cdot \left[\frac{1}{p + \frac{\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1}} \right] \cdot \frac{\sigma_2}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Obținem pentru $U E_{11}(t)$:

$$\begin{aligned} E_{11}(t) = U_0 \cdot \frac{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1}{\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1} \cdot \frac{\sigma_2}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta_c}} \right) + \\ + U_0 \cdot \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}}. \end{aligned} \quad (3.50)$$

Constanta de timp a procesului tranzitoriu este:

$$\theta_c = \frac{1}{a} = \frac{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1}{\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1}. \quad (3.51)$$

Expresia (3.50) se transformă în:

$$E_{11}(t) = \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2) \cdot D_2 \cdot U_0}{(\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1) (\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + \frac{\sigma_2 \cdot U_0}{\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1} \quad (3.52)$$

Dacă în relația (3.43) se va înlocui $E_{11}(p)$ în funcție de $E_{21}(p)$, va rezulta o ecuație în operațional, pentru care aplicând transformările inverse - rezultă o soluție de o formă similară cu (3.52):

$$E_{21}(t) = \frac{(\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1) \cdot D_1 \cdot U_0}{(\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1) (\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + \frac{\sigma_1 \cdot U_0}{\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1} \quad (3.53)$$

Expresiile (3.52) și (3.53) sînt similare cu (3.22) și (3.24) cu remarcă că D_1 , D_2 și θ_c reprezintă alte mărimi.

Expresiile pentru calculul cîmpurilor și densității de curent se pot scrie:

$$E_{11}(t) = \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2) \cdot \ln \frac{R}{r_1}}{(\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0}) (\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \frac{U_0}{r_1} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + \frac{\sigma_2}{r_1 (\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \frac{U_0}{r_1} \quad (3.54)$$

$$E_{21}(t) = \frac{(\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1) \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}}{(\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0}) (\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \frac{U_0}{r_1} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + \frac{\sigma_1}{(\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \frac{U_0}{r_1} \quad (3.55)$$

$$J_{(r=r_1, t)} = \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2)^2 D_1 D_2 \cdot U_0}{(\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1)^2 (\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + \frac{\sigma_1 \sigma_2 \cdot U_0}{\sigma_1 D_2 + \sigma_2 D_1}$$

$$= \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2)^2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} \cdot \ln \frac{R}{r_1}}{(\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0}) (\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \frac{U_0}{r_1} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0}} \cdot \frac{U_0}{r_1} \quad (3.56)$$

Constanta de timp a procesului tranzitoriu depinde atât de proprietățile de material cât și de dimensiunile geometrice ale sistemului de izolație analizat. Relația (3.51) devine:

$$\rho_c = \frac{\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0}}{\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (3.57)$$

Expresiile (3.54), (3.55) și (3.56) pot primi forme particulare:

a) la momentul inițial ($t=0$):

$$E_{11}(0) = \frac{\varepsilon_2 \cdot U_0}{r_1 (\varepsilon_1 \ln \frac{r_1}{r_0} + \varepsilon_2 \ln \frac{R}{r_1})} \quad (3.58)$$

$$E_{21}(0) = \frac{\varepsilon_1 \cdot U_0}{r_1 (\varepsilon_1 \ln \frac{r_1}{r_0} + \varepsilon_2 \ln \frac{R}{r_1})} \quad (3.59)$$

$$J(r_1, t=0) = \frac{\varepsilon_1^2 \sigma_2 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2^2 \sigma_1 \ln \frac{r_1}{r_0}}{(\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0})^2} \cdot \frac{U_0}{r_1} \quad (3.60)$$

b) în regim staționar ($t \rightarrow \infty$):

$$E_{11}(\infty) = \frac{\sigma_2 \cdot U_0}{r_1 (\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \quad (3.61)$$

$$E_{21}(\infty) = \frac{\sigma_1 \cdot U_0}{r_1 (\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \quad (3.62)$$

$$J(r_1, t \rightarrow \infty) = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1 \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \ln \frac{r_1}{r_0}} \cdot \frac{U_0}{r_1} \quad (3.63)$$

Într-un punct de rază r , situat în unul din cele două straturi, câmpul electric se calculează cu relația:

$$E_1(r, t) = \frac{E_{11}(t) \cdot r_1}{r} \quad \text{pentru } r_0 \leq r \leq r_1 \quad (3.64)$$

respectiv:

$$E_2(r, t) = \frac{E_{21}(t) \cdot r_1}{r} \quad \text{pentru } r_1 \leq r \leq R \quad (3.65)$$

Pentru a pune în evidență raporturi cantitative, se consideră că între permitivități și respectiv între conductivități sînt următoarele inegalități:

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_2 \quad \text{și} \quad \sigma_1 < \sigma_2 \quad (3.66)$$

Rezultă:

$$E_{11}(0) < E_{21}(0) ; E_{11}(\infty) > E_{21}(\infty) ; J_{(t=0)} > J_{(t \rightarrow \infty)} \quad (3.67)$$

In figura 3.7 se prezintă variația intensităților câmpului $E_{11}(t)$ și $E_{21}(t)$ pentru condițiile precizate în (3.64), iar în figura 3.8 se prezintă variația în timp a densității de curent $J(t)$:

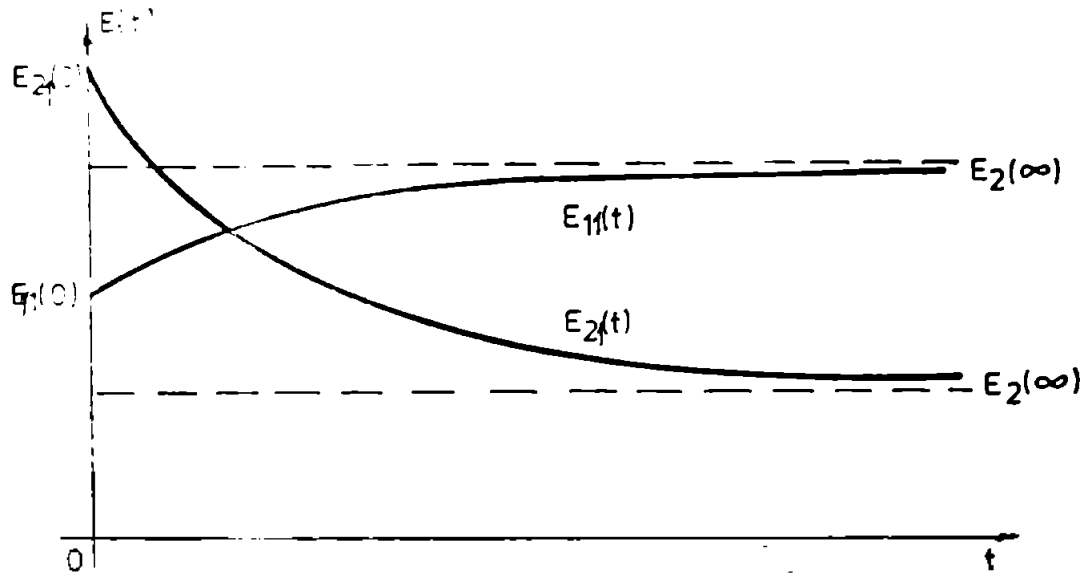


Fig.3.7. Variația intensităților câmpului $E_{11}(t)$ și $E_{21}(t)$ pentru $\epsilon_1 > \epsilon_2$ și $\sigma_1 < \sigma_2$.

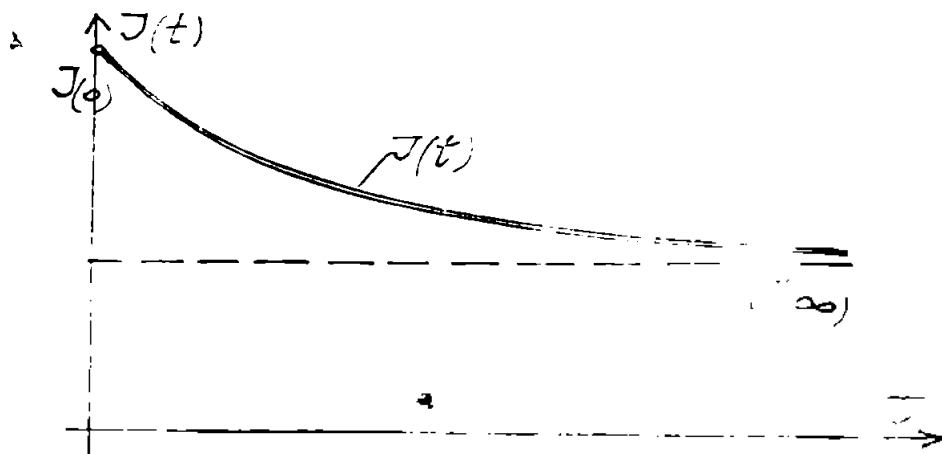


Fig.3.8. Variația densității de curent în timp $J(t)$.

Metoda de calcul propusă de autorul tezei prezintă un grad de generalitate prin faptul că expresiile stabilite (3.54), (3.55) și (3.56) descriu în mod continuu variația intensităților câmpului electric și a densității de curent, în întreg intervalul de timp de la momentul inițial și până în regimul de echilibru staționar. În literatura de specialitate sînt prezentate doar relațiile de calcul pentru momentul inițial în regimul staționar. Relațiile stabilite în lucrare pot să fie particularizate (3.58)...(3.63) și verifică relațiile clasice din literatura de specialitate.

3.2. CIMPUL ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA UNUI CABLU CU DOUA STRATURI, LA APLICAREA TENSIUNII ALTERNATIVE [142].

Autorul tezei a continuat analiza variației intensității câmpului electric în izolația stratificată a cablurilor cu conductivitate electrică diferită de zero, la aplicarea tensiunii alternative. În li-

teratura de specialitate, analiza a fost făcută doar pentru cazul electrozilor plani [58], [61], [99], [99]. Prin metoda de calcul propusă în teză, se va putea analiza variația câmpului la un cablu cu două straturi cu permittivități și conductivități electrice diferite, sau analiza variației câmpului în stratul semiconductor al cablului și în izolație.

Metoda de calcul prezentată în paragraful anterior este completată cu particularități care decurg din faptul că tensiunea aplicată în acest caz fiind sinusoidală, poate fi reprezentată în complex sau i se poate asocia un fazor.

Considerăm tensiunea aplicată exprimată prin relația:

$$\underline{U} = U_m \cdot e^{j\omega t}, \quad (3.68)$$

ω - este pulsația, iar f - frecvența.

$$\omega = 2\pi f \quad (3.69)$$

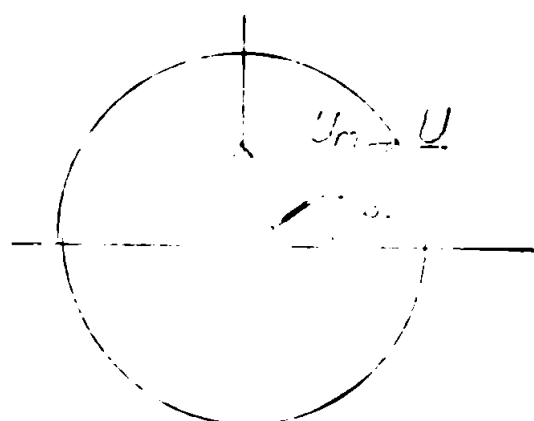


Fig.3.9. Fazorul \underline{U} .

Intensitățile câmpului la suprafața de separare a celor doi dielectrici (fig.3.6) vor fi de formă [58], [112]:

$$\begin{aligned} \underline{E}_1(r=r_1) &= \underline{E}_{11} = E_{11m} \cdot e^{j\omega t}, \\ \underline{E}_2(r=r_1) &= \underline{E}_{21} = E_{21m} \cdot e^{j\omega t}. \end{aligned} \quad (3.70)$$

Impunând aceeași condiție de continuitate a densității curentului total prin suprafața de separare dintre cei doi dielectrici ($r=r_1$) se obține:

$$\underline{J} = \sigma_1 \cdot \underline{E}_{11} + \epsilon_1 \frac{d \underline{E}_{11}}{dt} = \sigma_2 \underline{E}_{21} + \epsilon_2 \frac{d \underline{E}_{21}}{dt}. \quad (3.71)$$

Înlocuind (3.70) în (3.71) rezultă:

$$\begin{aligned} \sigma_1 \cdot E_{11m}(t) \cdot e^{j\omega t} + j\omega \epsilon_1 \cdot E_{11m}(t) \cdot e^{j\omega t} + \epsilon_1 \cdot e^{j\omega t} \frac{dE_{11m}(t)}{dt} = \\ = \sigma_2 \cdot E_{21m}(t) \cdot e^{j\omega t} + j\omega \epsilon_2 \cdot E_{21m}(t) \cdot e^{j\omega t} + \epsilon_2 \cdot e^{j\omega t} \frac{dE_{21m}(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (3.72)$$

sau prin simplificare cu $e^{j\omega t}$, se obține:

$$\begin{aligned} (\sigma_1 + j\omega \cdot \epsilon_1) \cdot E_{11m}(t) + \epsilon_1 \frac{dE_{11m}(t)}{dt} = \\ = (\sigma_2 + j\omega \cdot \epsilon_2) \cdot E_{21m}(t) + \epsilon_2 \cdot \frac{dE_{21m}(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (3.73)$$

Relația (3.73) este similară cu relația (3.34), cu deosebirea că aici se introduc conductivități complexe $\overline{\sigma}_1$ și $\overline{\sigma}_2$.

$$\overline{\sigma}_1 = \sigma_1 + j\omega \cdot \epsilon_1 \quad ; \quad \overline{\sigma}_2 = \sigma_2 + j\omega \cdot \epsilon_2. \quad (3.74)$$

$$\bar{\sigma}_1 \cdot E_{11m}(t) + \varepsilon_1 \frac{dE_{11m}(t)}{dt} = \bar{\sigma}_2 \cdot E_{21m}(t) + \varepsilon_2 \frac{dE_{21m}(t)}{dt}. \quad (3.75)$$

Intensitățile câmpului la momentul inițial sînt similare cu (3.38) și (3.39):

$$E_{11m}(0) = \frac{U_m}{r_1 \varepsilon_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)}. \quad (3.76)$$

$$E_{21m}(0) = \frac{U_m}{r_1 \varepsilon_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{R}{r_1} \right)}. \quad (3.77)$$

Rezolvarea ecuației diferențiale (3.75) în operațional, conduce

$$\begin{aligned} \frac{1}{\bar{\sigma}_1} \cdot E_{11m}(p) + \varepsilon_1 \left[p \cdot E_{11m}(p) - \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1} \cdot \frac{U_m}{p} \right] = \\ = \bar{\sigma}_2 \cdot E_{21m}(p) + \varepsilon_2 \left[p \cdot E_{21m}(p) - \frac{1}{\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1} \cdot \frac{U_m}{p} \right]. \end{aligned} \quad (3.78)$$

În expresia (3.78) s-au utilizat notațiile (3.42) pentru o scriere mai compactă. Din expresia tensiunii aplicate se obține:

$$E_{21m}(p) = \frac{U_m}{p} \cdot \frac{1}{D_2} + E_{11m}(p) \cdot \frac{D_1}{D_2}. \quad (3.79)$$

Înlocuind (3.79) în (3.78) rezultă:

$$E_{11m}(p) = \frac{U_m}{p} \cdot \frac{\bar{\sigma}_2 + p \cdot \varepsilon_2}{p(\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1) + (\bar{\sigma}_1 D_2 + \bar{\sigma}_2 D_1)}. \quad (3.80)$$

Pentru a reveni în domeniul timpului, se descompune expresia (3.80) în fracții simple și utilizînd transformările inverse (3.47) și (3.48) rezultă:

$$\begin{aligned} E_{11m}(t) = \frac{(\varepsilon_2 \bar{\sigma}_1 - \varepsilon_1 \bar{\sigma}_2) D_2 \cdot U_m}{(\varepsilon_1 D_2 + \varepsilon_2 D_1)(\bar{\sigma}_1 D_2 + \bar{\sigma}_2 D_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_{cj}}} + \\ + \frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_1 D_2 + \bar{\sigma}_2 D_1} \cdot U_m. \end{aligned} \quad (3.81)$$

Constanta de timp a procesului tranzitoriu descris prin (3.81)

$$\theta_{cj} = \frac{\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0}}{(\bar{\sigma}_1 + j\omega \varepsilon_1) \ln \frac{R}{r_1} + (\bar{\sigma}_2 + j\omega \varepsilon_2) \ln \frac{r_1}{r_0}}. \quad (3.82)$$

În expresia (3.81) se poate efectua simplificarea

$$\varepsilon_2 \bar{\sigma}_1 - \varepsilon_1 \bar{\sigma}_2 = \varepsilon_2 (\bar{\sigma}_1 + j\omega \varepsilon_1) - \varepsilon_1 (\bar{\sigma}_2 + j\omega \varepsilon_2) = \varepsilon_2 \bar{\sigma}_1 - \varepsilon_1 \bar{\sigma}_2. \quad (3.83)$$

Calculînd $E_{11} = E_{11m} \cdot e^{j\omega t}$ se poate simplifica argumentul exponențialei:

$$-\frac{t}{\theta_{cj}} + j\omega t = -\frac{t}{\theta_c}. \quad (3.84)$$

θ_c - fiind aceeași constantă de timp care a fost exprimată prin (3.51) sau (3.57).

Înlocuind (3.81) în (3.70) rezultă final (se ține seama și de simplificările (3.83) și (3.84):

$$E_{11} = \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2) \ln \frac{R}{r_1} \cdot \left(\frac{U_m}{r_1}\right) \cdot e^{-t/\theta_c}}{(\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0}) (\bar{\sigma}_1 + j\omega \varepsilon_1) \ln \frac{R}{r_1} + (\bar{\sigma}_2 + j\omega \varepsilon_2) \ln \frac{r_1}{r_0}} + \frac{(\bar{\sigma}_2 + j\omega \varepsilon_2) \ln \frac{r_1}{r_0}}{(\bar{\sigma}_1 + j\omega \varepsilon_1) \ln \frac{R}{r_1} + (\bar{\sigma}_2 + j\omega \varepsilon_2) \ln \frac{r_1}{r_0}} \cdot \left(\frac{U_m}{r_1}\right) \cdot e^{j\omega t} \quad (3.85)$$

Similar se obține și:

$$E_{21} = \frac{(\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1) \ln \frac{r_1}{r_0}}{(\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0}) (\bar{\sigma}_1 \ln \frac{R}{r_1} + \bar{\sigma}_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \left(\frac{U_m}{r_1}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + \frac{1}{(\bar{\sigma}_1 \ln \frac{R}{r_1} + \bar{\sigma}_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \left(\frac{U_m}{r_1}\right) \cdot e^{j\omega t} \quad (3.86)$$

Densitatea de curent rezultă:

$$r_1) \quad j = \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2)^2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} \cdot \ln \frac{R}{r_1}}{(\varepsilon_1 \ln \frac{R}{r_1} + \varepsilon_2 \ln \frac{r_1}{r_0}) (\bar{\sigma}_1 \ln \frac{R}{r_1} + \bar{\sigma}_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \frac{U_m}{r} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + \frac{\bar{\sigma}_1 \cdot \bar{\sigma}_2}{(\bar{\sigma}_1 \ln \frac{R}{r_1} + \bar{\sigma}_2 \ln \frac{r_1}{r_0})} \cdot \frac{U_m}{r} \cdot e^{j\omega t} \quad (3.87)$$

După separarea termenilor reali și imaginari, expresiile intensităților celor două cimpuri (3.85) și (3.86) - se pot aduce la forma:

$$E_{K1} = C_1 \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + C_2 \cdot e^{j\omega t} + j \left[C_3 \cdot e^{-\frac{t}{\theta_c}} + C_4 \cdot e^{j\omega t} \right] \quad (3.88)$$

Reprezentînd grafic în figura 3.10 fiecare termen din expresie (3.88) și însumînd termenii, se poate obține variația intensității cimpului electric în timp. Primii doi termeni (variația exponențială și sinusoidală) constituie o componentă activă, iar ultimii doi termeni - termenii imaginari, care sînt defazați cu 90° față de primii doi, constituie o componentă reactivă a cimpului.

Valoarea în regim de echilibru staționar a amplitudinilor se obține pentru $t \rightarrow \infty$:

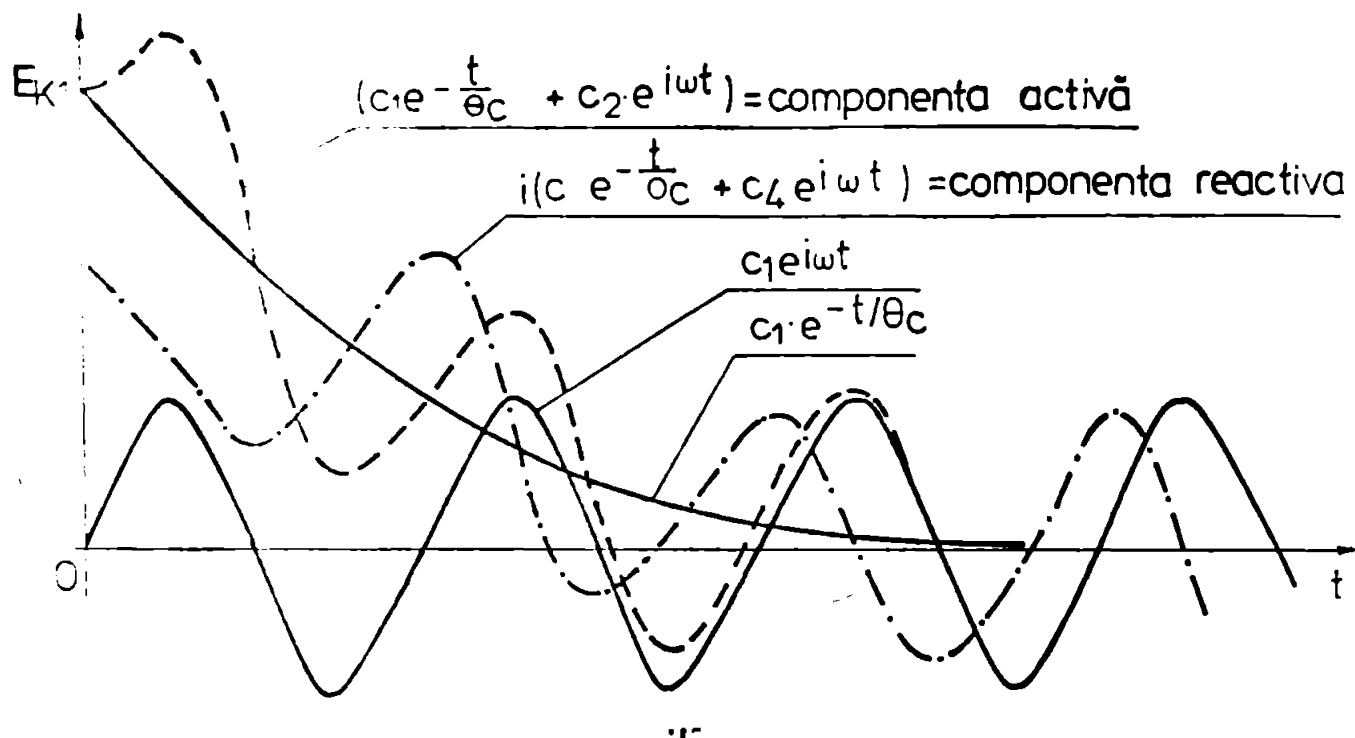


Fig.3.10. Componentele cîmpului electric variabil în timp.

$$E_{11m(\infty)} = \frac{\bar{\sigma}_2 U_m}{\bar{\sigma}_1 \rho_2 + \bar{\sigma}_2 \rho_1} \quad (3.89)$$

$$E_{21m(\infty)} = \frac{\bar{\sigma}_1 U_m}{\bar{\sigma}_1 \rho_2 + \bar{\sigma}_2 \rho_1} \quad (3.90)$$

ier raportul amplitudinilor devine:

$$\frac{E_{11m(\infty)}}{E_{21m(\infty)}} = \frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_1} = \frac{\sigma_2 + j\omega \epsilon_2}{\sigma_1 + j\omega \epsilon_1} \quad (3.91)$$

În ipoteza unor dielectrice cu conductivitate ohmică scăzută (rezistivitate ridicată), conductivitatea capacitivă este cu mai multe ordine de mărime mai mare decât cea ohmică, chiar la frecvența de 50 Hz, de aceea:

$$\sigma_2 \ll 2\pi f \cdot \epsilon_2 \quad , \quad \sigma_1 \ll 2\pi f \cdot \epsilon_1 \quad (3.92)$$

rezultînd:

$$\frac{E_{11m(\infty)}}{E_{21m(\infty)}} = \frac{2}{1} \quad (3.93)$$

deci distribuția cîmpului în regim de echilibru staționar coincide cu distribuția de la momentul inițial ($t=0$).

În cazul unor dielectrice cu conductivitate ohmică mai ridicată (rezistivitate mai scăzută), inegalitățile (3.92) sînt îndeplinite doar în cazul unor frecvențe ridicate. Astfel că în cazul unor solicitări cu tensiuni rapid variabile în timp (frecvențe ridicate) distribuția cîmpului în dielectrice reali este similară cu distribuția cîmpului care apare la aplicarea unei tensiuni continue într-un dielectric ideal (dielectric cu conductivitate redusă). Deci un dielectric real (cu pierderi) și stratificat - se comportă la frecvențe înalte, din punct de ve-

dera a distribuției cîmpului - ca un dielectric ideal la aplicarea unei tensiuni continue.

Constanta de timp a procesului tranzitoriu Θ_c este de o formă asemănătoare cu timpul de relaxație $\tau = \frac{\epsilon}{\sigma}$. Valorile timpului de relaxație se încadrează în: $\tau = (10^{-5} \dots 10^{-2})$ s pentru semiconductori, $\tau = (10^{-3} \dots 10^7)$ s pentru dielectrice tehnici (61).

Metoda de calcul propusă de autorul tezei a condus la relațiile (3.81), (3.85), (3.86), (3.87) prin care se pot calcula în orice moment valorile intensităților cîmpului electric și ale densității de curent, avînd în vedere că aceste mărimi nu sînt neapărat în fază cu tensiunea sinusoidală aplicată. Particularizînd aceste relații pentru regimul de echilibru staționar, se verifică teoria clasică - distribuția cîmpului în dielectrice stratificate cu rezistivitate ridicată este o distribuție care depinde doar de permitivitățile electrice. În schimb - în cazul dielectricilor cu rezistivități mai mici, aceste rezistivități influențează distribuția intensităților cîmpului electric în izolația cablurilor, iar calculul se efectuează cu relațiile prezentate.

3.3. CIMPUL ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA DIN TREI STRATURI A UNUI CABLU, LA APLICAREA TENSIUNII CONTINUE /142/.

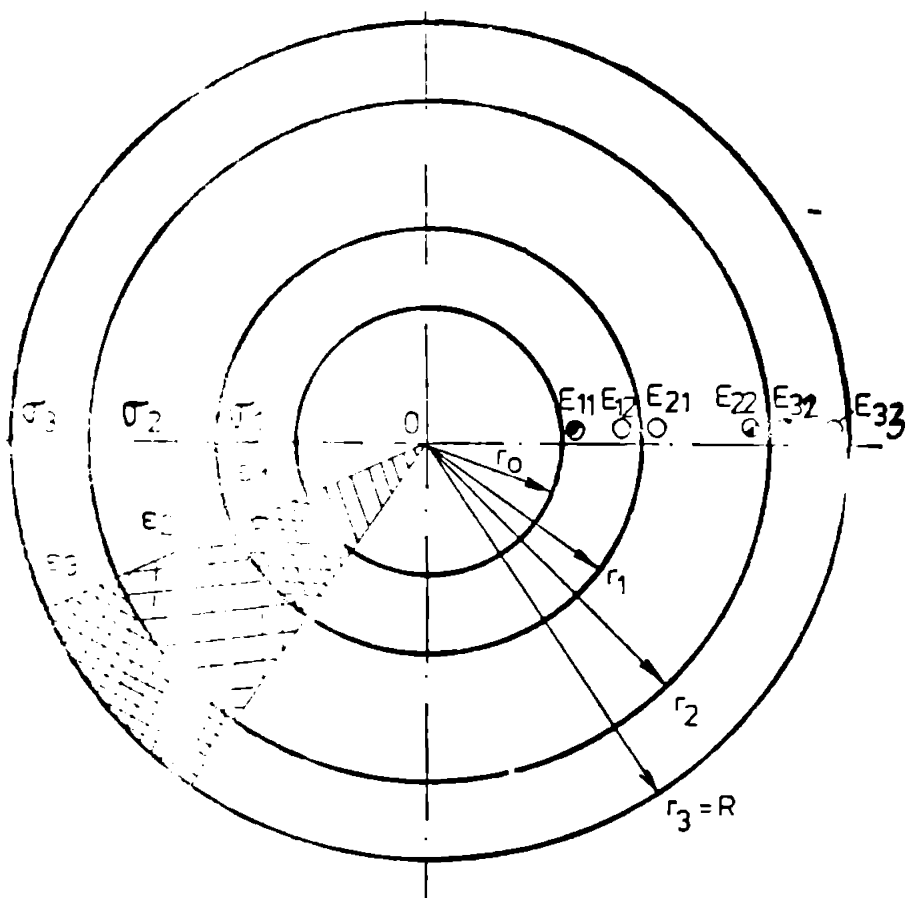
Metodele de calcul prezentate în paragrafele precedente pot fi aplicate în cazul analizei cîmpului în ecranul semiconductor depeș pe conductorul central al unui cablu și în izolația de fază a acestuia. Pentru a analiza cîmpul electric într-un cablu cu trei straturi: două ecrane semiconductoare și izolația de fază - autorul tezei a dezvoltat metodele de calcul, pentru rezolvarea cărora se poate recurge la un calculator analogic (146), sau numeric (147). Pentru rezolvarea pe calculator numeric, autorul a utilizat o metodă de integrare numerică cu un subprogram din biblioteca matematică a calculatorului FELIX-C-256, iar pentru rezolvarea pe calculator analogic - a elaborat programe originale.

Se consideră precizate dimensiunile geometrice $r_0, r_1, r_2, r_3 = R$ (fig.3.11), permitivitățile dielectrice $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ și conductivitățile electrice $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ale straturilor. Se calculează intensitățile cîmpului în trei puncte:

$$E_{11}(t) = E(t, r=r_0); E_{22}(t) = E(t, r=r_2); E_{32}(t) = E(t, r=r_2). \quad (3.94)$$

Intensitatea cîmpului E_{22} aparține stratului cu permitivitatea ϵ_2 , iar E_{32} - stratului cu permitivitatea ϵ_3 .

La momentul $t=0$, valorile intensităților cîmpurilor se calculează cu relațiile:



$$E_{22}(t=0) = \frac{U_0}{r_2 \varepsilon_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R}{r_2} \right)}$$

$$E_{32}(t=0) = \frac{U_0}{r_2 \varepsilon_3 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R}{r_2} \right)}$$

$$+ \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} \ln \frac{R}{r_2})$$

(3.95)

Fig.3.11 Cablu cu trei straturi.

Condiția de continuitate - corespunde egalității între curenții de pierderi pe unitatea de lungime a cablului:

$$I_{11} = I_{22} = I_{32} \quad (3.96)$$

Curenții se exprimă prin intermediul densităților de curent:

$$I_{11} = J_{11} \cdot 2\pi r_0 = 2\pi r_0 \left(E_{11} \cdot \sigma_1 + \varepsilon_1 \cdot \frac{dE_{11}}{dt} \right) \quad (3.97)$$

$$I_{22} = J_{22} \cdot 2\pi r_1 = 2\pi r_1 \left(E_{22} \cdot \sigma_2 + \varepsilon_2 \cdot \frac{dE_{22}}{dt} \right) \quad (3.98)$$

$$I_{32} = J_{32} \cdot 2\pi r_2 = 2\pi r_2 \left(E_{32} \cdot \sigma_3 + \varepsilon_3 \cdot \frac{dE_{32}}{dt} \right) \quad (3.99)$$

Tensiunea aplicată cablului (fig.3.11) se poate scrie:

$$U_0 = \int_{r_0}^{r_1} E(r) \cdot dr + \int_{r_1}^{r_2} E(r) \cdot dr + \int_{r_2}^R E(r) \cdot dr \quad \text{Cu notațiile:} \quad (3.100)$$

$$d_1 = r_0 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0} \quad , \quad d_2 = r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad , \quad d_3 = r_2 \cdot \ln \frac{R}{r_2} \quad (3.101)$$

tensiunea aplicată permite stabilirea unei relații între cele trei intensități ale câmpului:

$$U_0 = E_{11} \cdot d_1 + E_{22} \cdot d_2 + E_{32} \cdot d_3 \quad (3.102)$$

Sistemul de ecuații diferențiale (3.97), (3.98), (3.99) și (3.100)

se aduce prin transformări - la forma:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{22}}{dt} &= U_0 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{K_1}{K_4} - E_{22} \left[\frac{\sqrt{2}}{\mathcal{E}_2} - \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} \cdot \frac{K_2}{K_4} \right] + E_{32} \left[\frac{\sqrt{3}}{\mathcal{E}_2} - \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} \cdot \frac{K_3}{K_4} \right] \\ \frac{dE_{32}}{dt} &= U_0 \cdot \frac{K_1}{K_4} + E_{22} \frac{K_2}{K_4} - E_{32} \cdot \frac{K_3}{K_4} \\ E_{11}(t) &= \frac{U_0 - E_{22}(t) \cdot d_2 - E_{32}(t) \cdot d_3}{d_1} \end{aligned} \quad (3.103)$$

În sistemul (3.103) s-au folosit notațiile:

$$\begin{aligned} K_1 &= \sqrt{1} \mathcal{E}_2 \cdot \frac{1}{d_1} \cdot \frac{r_0}{r_2} \\ K_2 &= \sqrt{2} \mathcal{E}_1 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{r_0}{r_2} - \sqrt{1} \mathcal{E}_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{r_0}{r_2} \\ K_3 &= \sqrt{1} \mathcal{E}_2 \cdot \frac{d_3}{d_1} \cdot \frac{r_0}{r_2} + \sqrt{3} \mathcal{E}_1 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{r_0}{r_2} + \sqrt{3} \mathcal{E}_2 \\ K_4 &= \mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2 \cdot \frac{d_3}{d_1} \cdot \frac{r_0}{r_2} + \mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2 \cdot \frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{r_0}{r_2} + \mathcal{E}_2 \mathcal{E}_3 \end{aligned} \quad (3.104)$$

Sistemul de ecuații diferențiale (3.103) se rezolvă pe calculator analogic - schema de cablaj prezentată în figura 3.12 [146], a fost întocmită de autorul tezei:

Cu un înregistrator în coordonate, se obține grafic variația în timp a intensității câmpurilor $E_{11}(t)$, $E_{22}(t)$ și $E_{32}(t)$.

Pentru rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale (3.103) pe calculator numeric [147], sistemul a fost adus prin transformări la forma:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{11}}{dt} &= \left[\frac{d_2}{d_1} \left(\frac{\sqrt{2}}{\mathcal{E}_2} - \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} \cdot \frac{K_2}{K_4} \right) - \frac{d_3}{d_1} \cdot \frac{K_2}{K_4} \right] \cdot E_{22} - \\ &= \left[\frac{d_2}{d_1} \left(\frac{\sqrt{3}}{\mathcal{E}_2} - \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} \cdot \frac{K_3}{K_4} \right) - \frac{d_3}{d_1} \cdot \frac{K_3}{K_4} \right] \cdot E_{32} - \\ &= \left(\frac{d_2}{d_1} \cdot \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} + \frac{d_3}{d_1} \right) \cdot \frac{K_1}{K_4} \cdot U_0 \\ \frac{dE_{22}}{dt} &= - \left(\frac{\sqrt{2}}{\mathcal{E}_2} - \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} \cdot \frac{K_2}{K_4} \right) \cdot E_{22} + \left(\frac{\sqrt{3}}{\mathcal{E}_2} - \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} \cdot \frac{K_3}{K_4} \right) \cdot E_{32} + \frac{\mathcal{E}_3}{\mathcal{E}_2} \cdot \frac{K_1}{K_4} \cdot U_0 \\ \frac{dE_{32}}{dt} &= \frac{K_2}{K_4} \cdot E_{22} - \frac{K_3}{K_4} \cdot E_{32} + \frac{K_1}{K_4} \cdot U_0 \end{aligned} \quad (3.104)$$

Sistemul (3.104) a fost rezolvat de autor prin integrare nu-

merică. In Anexa 6 a tezei se prezintă acest program, în care s-a utilizat și subprogramul SRKG (metoda Runge-Kutte-Gill) din biblioteca matematică a calculatorului FELIX C-256. In paragraful 3.5.2 se vor prezenta rezultatele calculate pentru un cablu de 110 kV cu izolație din polietilenă reticulată chimic.

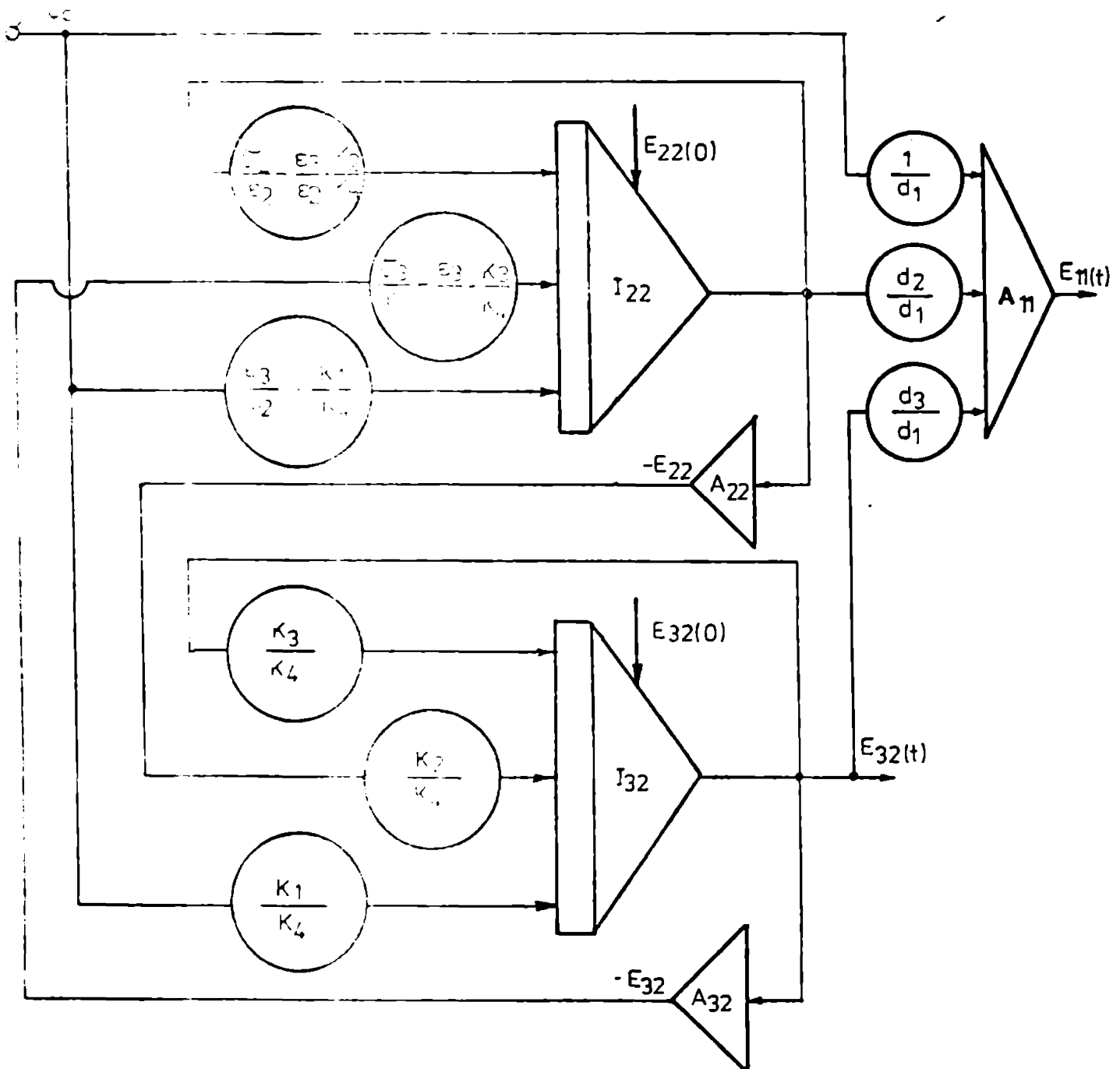


Fig.3.12. Schema de cablaj în cazul solicitării cu tensiune continuă.

3.4. CIMPUL ELECTRIC IN IZOLATIA DIN TREI STRATURI A UNUI CABLU, LA APLICAREA TENSIUNII ALTERNATIVE.

Autorul tezei a elaborat o metodă originală de rezolvare pe calculator analogic [142]. In sistemul de ecuații diferențiale care caracterizează acest regim - intervine tensiunea aplicată sinusoidală. Calculatorul analogic poate genera o tensiune sinusoidală printr-un bloc de

calcul compus din două integroare și un amplificator operațional inversor (fig.3.13).

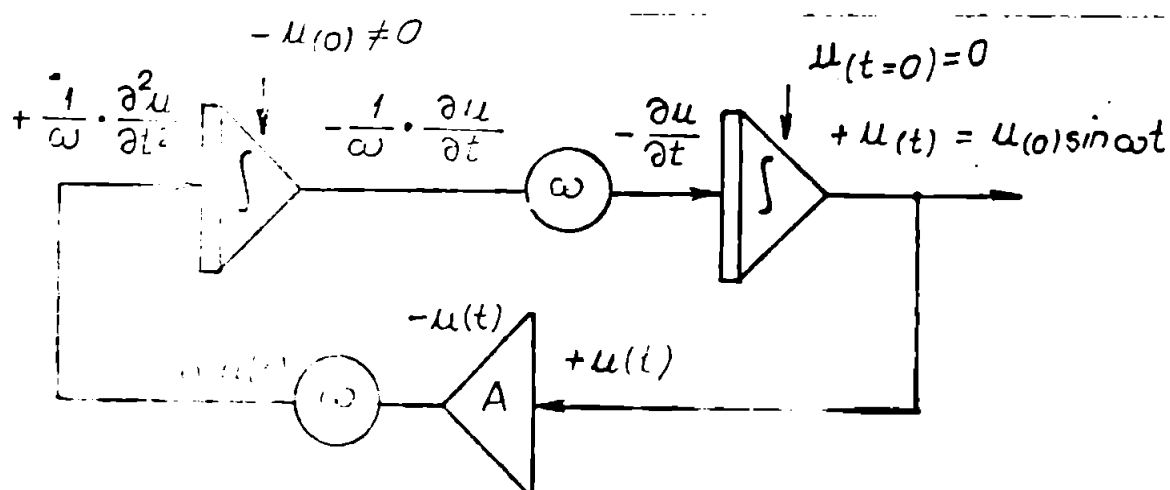


Fig.3.13. Generator de semnal sinusoidal $u(t)$.

Generatorul de semnal funcționează pe baza ecuației diferențiale cunoscute:

$$\frac{1}{\omega^2} = \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} + u(t) = 0 \quad (3.105)$$

a cărei soluție este: $u(t) = U_0 \cdot \sin t$. (3.106)

Deoarece (3.105) se poate scrie:

$$\frac{1}{\omega} \cdot \frac{\partial^2 U(t)}{\partial t^2} = -\omega \cdot u(t) \quad (3.107)$$

În schema de cablaj din figura 3.13 s-a urmărit integrarea acestei ecuații. Integratorul din stînga are condiții inițiale diferite de zero, iar integratorul din dreapta are condiții inițiale zero deoarece pentru $t=0$, $\sin \omega t = 0$.

Considerînd tensiunea aplicată pe cablu de forma:

$$u(t) = U_m \sin t \quad (3.108)$$

și cu notație suplimentară:

$$K_5 = \epsilon_1 \epsilon_2 \frac{1}{d_1} \cdot \frac{r_0}{r_2} \quad (3.109)$$

sistemul de ecuații diferențiale (3.103) descrie variația în timp a intensității câmpului în cele trei straturi ale izolației cablului devine:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{22}}{dt} &= \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \cdot \frac{K_1}{K_4} \cdot U_m \cdot \sin \omega t + \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \cdot \frac{K_5}{K_4} \cdot \omega \cdot U_m \cdot \cos \omega t - \\ &- \left(\frac{\sigma_2}{\epsilon_2} - \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \cdot \frac{K_2}{K_4} \right) E_{22} + \left(\frac{\sigma_3}{\epsilon_2} - \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \cdot \frac{K_3}{K_4} \right) E_{32} \end{aligned}$$

$$\frac{dE_{32}}{dt} = \frac{K_1}{K_4} U_m \cdot \sin \omega t + \frac{K_5}{K_4} \cdot \omega \cdot U_m \cdot \cos \omega t + \frac{K_2}{K_4} \cdot E_{22} - \frac{K_3}{K_4} \cdot E_{32}$$

$$E_{11}(t) = \frac{1}{d_1} \cdot U_m \cdot \sin \omega t - \frac{d_2}{d_1} \cdot E_{22}(t) - \frac{d_3}{d_1} \cdot E_{32}(t) \quad (3.110)$$

În figura 3.14 se prezintă schema de cablaj elaborată de autor pentru rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale (3.110) pe calculator analogic. Generatorul de semnal format din integratoarele I_{10} , I_{11} și inversoarele A_2 și A_3 , furnizează atât semnal $\sin \omega t$ cât și $\cos \omega t$ cu pulsația ω și amplitudinea U_m - reglabile la valoarea dorită prin coeficienții de transfer și valoarea impusă condițiilor inițiale.

Mărimile calculate $E_{11}(t)$, $E_{22}(t)$ și $E_{32}(t)$ pot să fie înregistrate grafic cu un înregistrator în coordonate.

Valorile intensității câmpului electric în alte puncte de rază r pot să fie calculate cu relațiile:

$$E_1(r,t) = \frac{E_{11}(t) \cdot r_1}{r} \quad \text{pentru} \quad r_0 \leq r \leq r_1 \quad (3.111)$$

$$E_2(r,t) = \frac{E_{22}(t) \cdot r_2}{r} \quad \text{pentru} \quad r_1 \leq r \leq r_2 \quad (3.112)$$

$$E_3(r,t) = \frac{E_{32}(t) \cdot r_2}{r} \quad \text{pentru} \quad r_2 \leq r \leq R \quad (3.113)$$

Intensitățile câmpului exprimate prin relațiile (3.111), (3.112) și (3.113) se pot obține din mărimile calculate pe calculatorul analogic cu ajutorul a trei amplificatoare operaționale la care se reglează în mod corespunzător coeficienții de transfer. În figura 3.15 se exemplifică această posibilitate pentru $E_1(r,t)$ și $\frac{r_1}{r} = 1,65$:

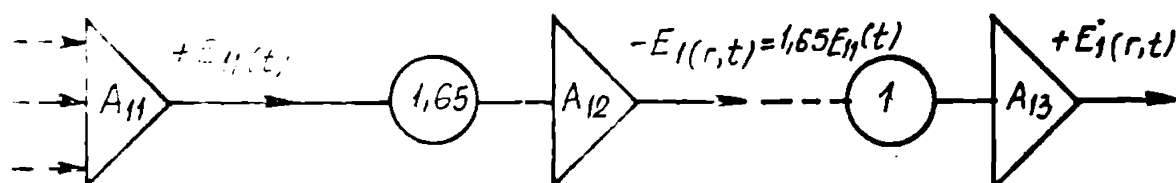


Fig.3.15. Calculul intensității $E_1(r,t)$.

Astfel mărimile cu semn pozitiv, cât și mărimile cu semn negativ, pot să fie înregistrate grafic. Înregistratorul în coordonate BAK 4T, al calculatorului analogic MEDA 42TA oferă posibilitatea de a schimba - în funcție de opțiuni, semnul mărimii înregistrate.

3.5. APLICAȚII NUMERICE ȘI ÎNCERCĂRI ÎN LABORATORUL DE ÎNALTĂ TENSIUNE DIN I. P. T. V. TIMISOARA.

Pentru verificarea metodelor de calcul propuse, autorul tezei a efectuat încercări pe un cablu de 20 kV prevăzut cu un ecran suplimentar din bandă de cupru și a simulat pe calculator analogic și numeric solicitarea izolației unui cablu de 110 kV de fabricație NOKIA-Finlanda.

3.5.1. Încercarea cablului tip АРУСЕУ 1 x 120 mm² 12/20 kV fabricat la ICME București /161/:

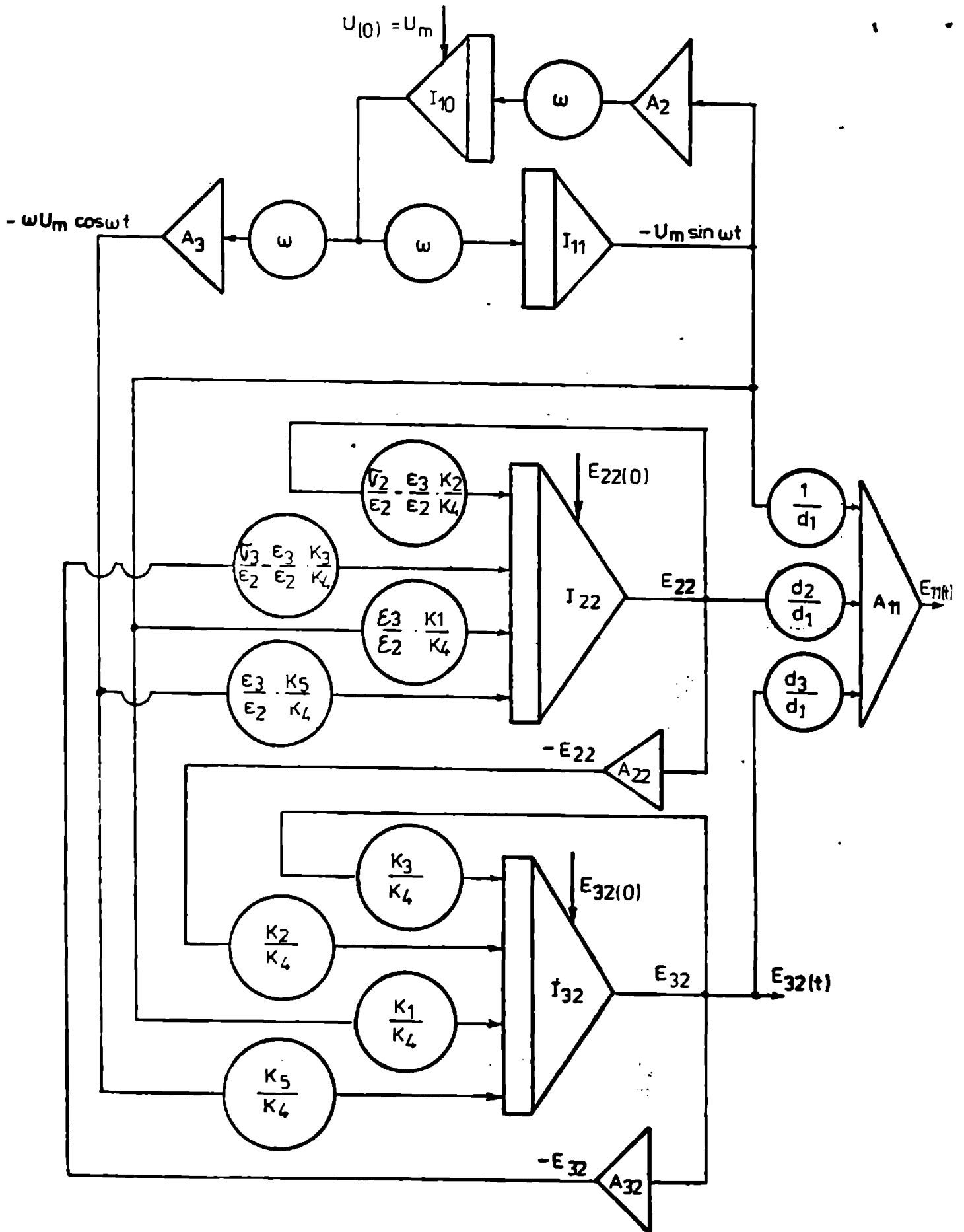


Fig. 3.14. Schemă de cablu în cazul solicitării cu tensiune alternativă ($\omega = 2\pi \cdot f$).

Un eșantion de cablu de 20 kV cu conductor din aluminiu, izolație din polietilenă, ecran de cupru și mantă de protecție anticorozivă din PVC - cu lungimea de 25 m, a fost prevăzut cu un ecran suplimentar din bandă de cupru înfășurată peste mantaua din PVC. Al doilea ecran de cupru (ecranul exterior), a fost legat la pământ, în timp ce primul ecran de cupru a rămas izolat și a servit ca suprafață echipotențială pentru măsurarea căderilor de tensiune ΔU_1 , stratul din polietilenă (PE) și a căderii de tensiune ΔU_2 pe stratul din PVC (fig.3.16).

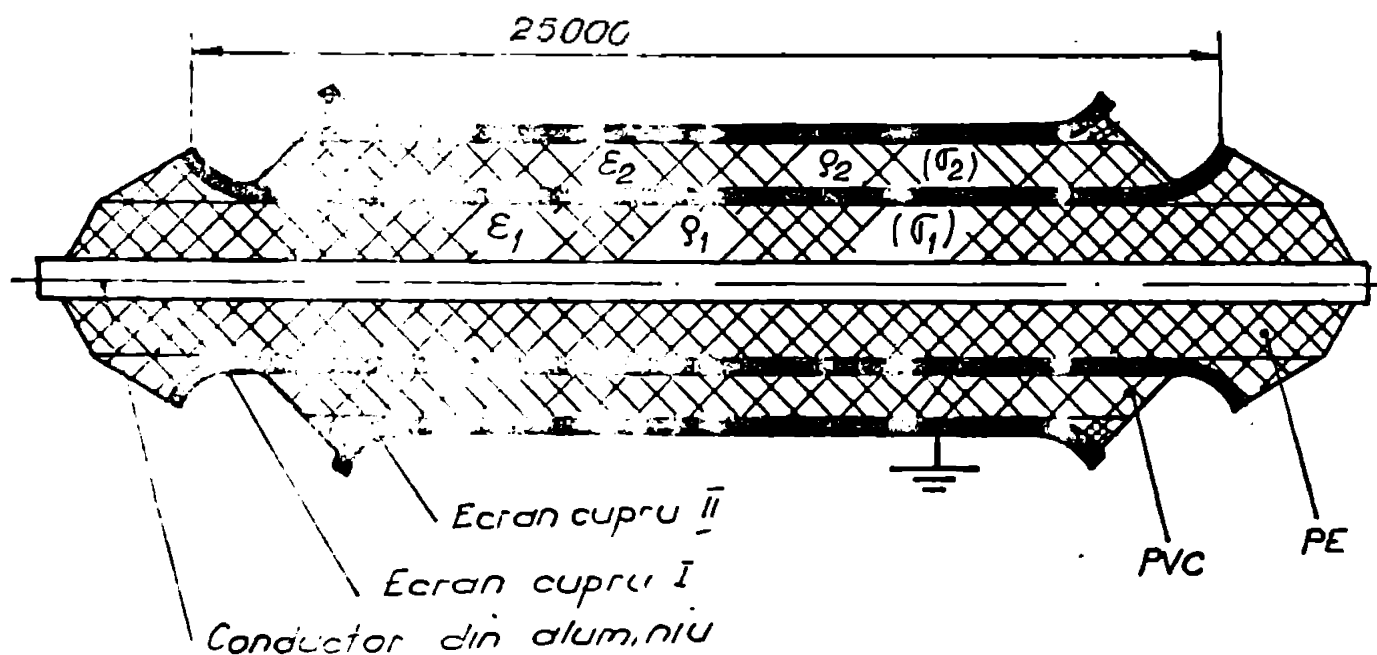


Fig.3.16. Secțiune în cablul încercat.

Cablul a fost prevăzut cu profile deflectoare, atât pentru zonele de capăt ale izolației din PE, cât și pentru zonele de capăt ale izolației din PVC. Profilele deflectoare asigură o dispersie progresivă a cimpului electric. Calculul acestor profile va fi prezentat în capitolul 4 al tezei.

Astfel permitivitatea, cât și conductivitatea (rezistivitatea) stratului de polietilenă diferă de permitivitatea și respectiv conductivitatea (rezistivitatea) stratului de PVC. Acest mod de pregătire a eșantionului de cablu pentru încercări nu reprezintă o dispunere stratificată optimă din punct de vedere a solicitării electrice, ci o soluție mai economică și mai simplă de realizare a unei izolații stratificate pentru verificarea metodelor de calcul propuse de autor și care poate fi utilizată în procesul didactic din LIT.

O solicitare optimă a izolației stratificate ar fi posibilă prin amplasarea stratului din PVC în jurul conductorului central și al stratului din PE spre exterior - pentru a fi îndeplinită condiția $\epsilon_1 > \epsilon_2$ (sau $r_0 \epsilon_1 = r_1 \epsilon_2$). Un astfel de eșantion se poate realiza numai într-o fabrică constructoare de cabluri - unde să se depună prin

extrudare un al doilea strat din polietilenă peste un cablu cu izolația din PVC. Câmpul electric este mai intens în jurul conductorului central și prin emplasarea stratului din PVC (dielectric cu o permittivitate mai mare) în această zonă se obține o reducere a intensității câmpului și o intensificare a câmpului în exterior, în stratul de PE (dielectric cu o permittivitate mai mică).

Constantele de material au fost obținute în urma măsurării capacităților și rezistențelor de izolație a celor două straturi. S-a utilizat o punte Schering de 10 kV - tip P595 (URSS) și un megohmmetru de 5 kV - tip XS-1 (RPU).

Permittivitățile și rezistivitățile s-au determinat cu relațiile:

$$\epsilon_{r PE} = \frac{C_{PE} \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot R_{iz PE}} \quad (3.114); \quad \epsilon_{r PVC} = \frac{C_{PVC} \cdot \ln \frac{R}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot R_{iz PVC}} \quad (3.115)$$

$$\rho_{PE} = \frac{2 \pi \cdot l \cdot R_{iz PE}}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (3.116); \quad \rho_{PVC} = \frac{2 \pi \cdot l \cdot R_{iz PVC}}{\ln \frac{R}{r_1}} \quad (3.117)$$

În figura 3.17 se prezintă schema electrică echivalentă cablului cu izolație stratificată, iar tabelul 3.4 conține mărimile geometrice pentru cablul încercat. S-a considerat că cele două ecrane semiconductoare ale stratului din polietilenă sînt incluse în acesta, ecranele avînd o grosime mult mai mică în comparație cu grosimea stratului din polietilenă.

Tabelul 3.4. Mărimi geometrice.

Nr. crt	Simbol	Valoarea /mm/
1	r_0	7,2
2	r_1	14
3	R	18
4	l	25000

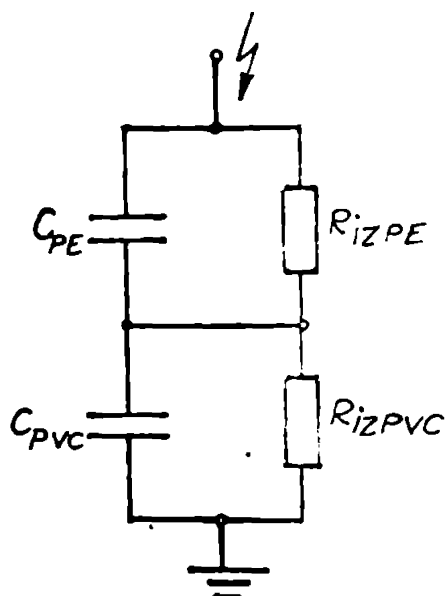


Fig. 3.17. Schema electrică echivalentă.

În tabelul 3.5 sînt centralizate valorile măsurate și valorile calculate pentru cablul încercat.

Constanta de timp a procesului tranzitoriu în cazul eșantionului de cablu este de 135,44 s.

$$\tau_c = \frac{\epsilon_1 \cdot \ln \frac{R}{r_1} + \epsilon_2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}}{\sigma_1 \cdot \ln \frac{R}{r_1} + \sigma_2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_0}} = 135,44 \text{ s.} \quad (3.118)$$

Tabelul 3.5. Cablu AZYSFY 10 kV.

Nr. crt.	Dielectric Mărimea	Stratul 1 din PE	Stratul 2 din PVC
1	C [pF]	5820	28820
2	R_{iz} [$M\Omega$]	60000	4200
3	ϵ_r	2,78	5,25
4	E [V/m]	$24,58 \cdot 10^{-12}$	$46,42 \cdot 10^{-12}$
5	ρ [Ω/m]	$14,16 \cdot 10^{12}$	$2,60 \cdot 10^{12}$
6	σ [S/m]	$7,06 \cdot 10^{-14}$	$38,46 \cdot 10^{-14}$

Valoarea constantei de timp este mult mai mare decît durata unei unde de supratensiune atmosfericã ($Z_0 = 50 \mu s$), astfel cã la aplicarea unui impuls de tensiune tip STA 1,2/50 solicitarea izolației stratificate a cablului va fi de tip capacitiv, echivalentã momentului inițial al procesului tranzitoriu. Pentru a se putea pune în evidență prin mãsurãtori și regiimul de echilibru staționar - s-a aplicat o tensiune practic dreptunghiularã și de lungã duratã de la o instalație de tensiune continuã tip GPT 3/80 (Tur-Dresden, RDG). Variația în timp a cãderilor de tensiune pe cele douã straturi a fost mãsuratã prin intermediul unui divizor ohmic (DT) și al unui voltmetru electrostatic (VE) (fig.3.18).

Montajul experimental din figura 3.18 a fost conceput de autorul tezei și experimentat în Laboratorul de înaltã tensiune din Institutul politehnic "Traian Vuia" Timișoara.

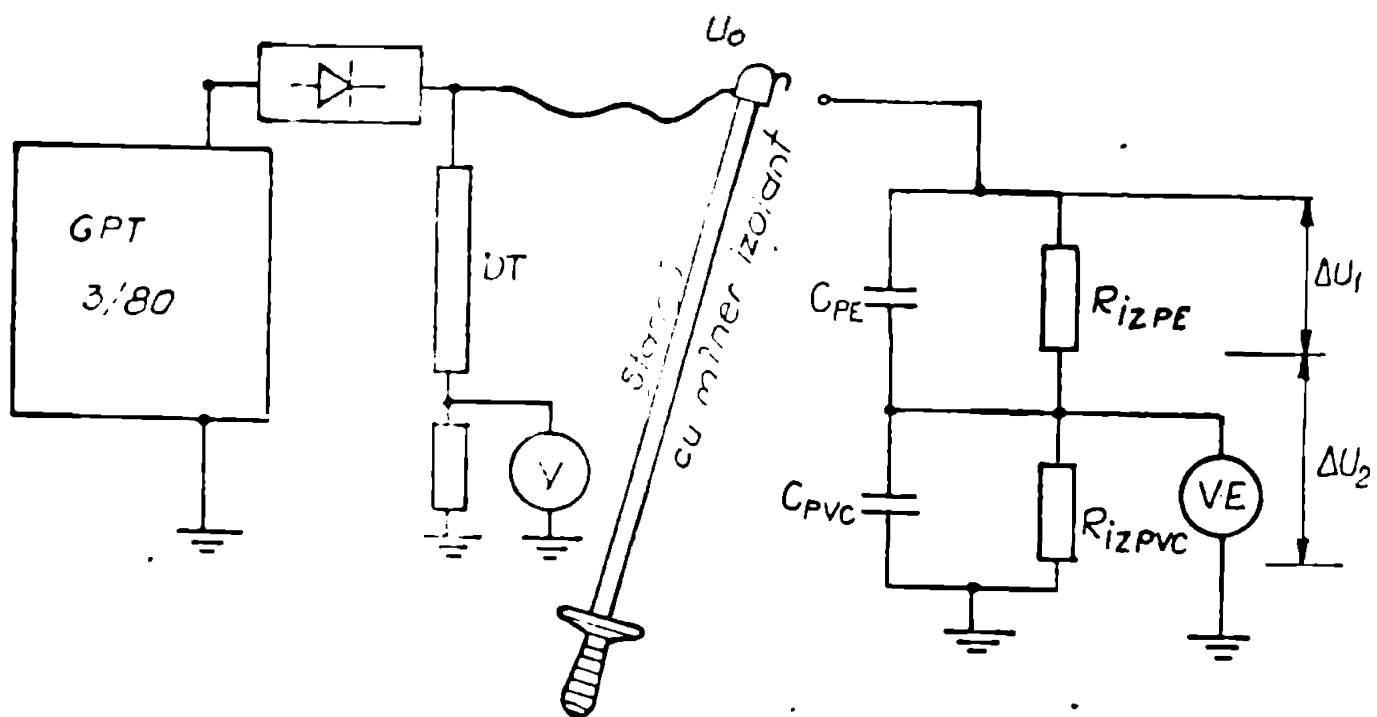


Fig.3.18. Montajul experimental în LIT - I.P.T.

Tensiunea $U_0 = 80 \text{ kV}$ a fost aplicată cablului cu o ștangă cu miner electroizolant, iar căderea de tensiune $\Delta U_2(t)$ pe stratul din PE fost obținută prin diferența: $\Delta U_2(t) = U_0 - \Delta U_1(t)$.

În tabelul 3.6 se prezintă variația în timp a căderilor de tensiune măsurate în LIT.

Tabelul 3.6. Căderi de tensiuni măsurate.

Nr. Srf.	t (min)	ΔU_1 (kV)	ΔU_2 (kV)	U_0 (kV)
1	0	13,2	66,8	80
2	2	8,3	71,7	80
3	4	6,4	73,6	80
4	6	5,7	74,3	80
5	8	5,4	74,6	80
6	10	5,3	74,7	80
7	12	5,2	74,8	80

În Anexa 7 se prezintă programul de calcul scris în limbaj BASIC pentru calculatorul AMIC, care a fost elaborat și utilizat de autorul tezei - pentru calculul variației în timp a intensității câmpului electric în cele două straturi și a căderilor de tensiune pe cele două straturi. Căderile de tensiune se calculează cu relațiile:

$$\Delta U_1(t) = E_{11}(t) \cdot r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.119)$$

$$\Delta U_2(t) = E_{21}(t) \cdot r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3.120)$$

Valorile calculate sînt prezentate în tabelul 3.7 și sînt redate grafic în figura 3.19.

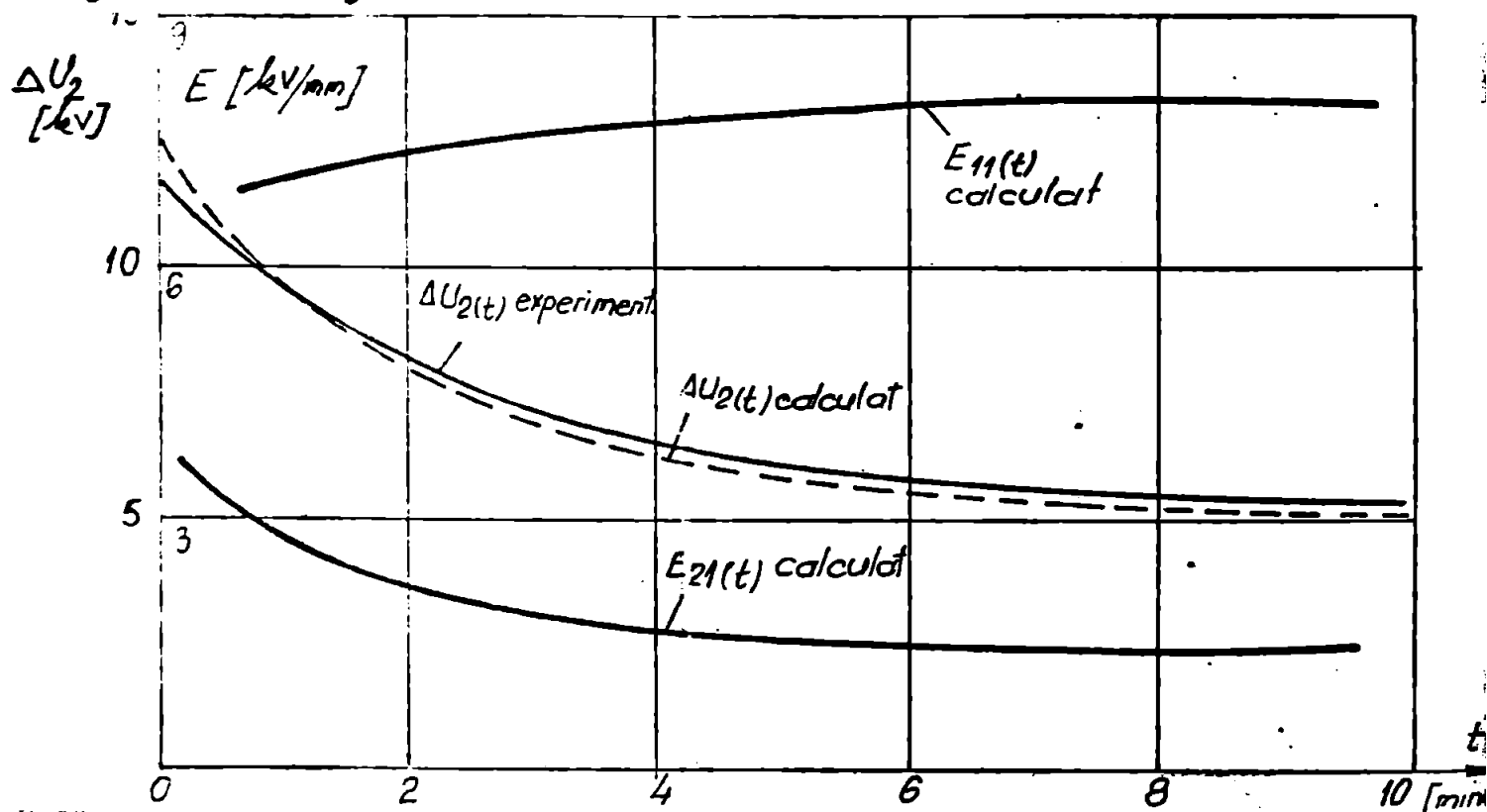


Fig. 3.19. Variația căderii de tensiune pe stratul de PVC (ΔU_2 : experimental și calculat) și variațiile $E_{11}(t)$, $E_{21}(t)$ calculate.

Tabelul 3.7. Valori obținute pe calculstor.

Nr. crt	t (min)	$\frac{t}{T}$	(kV/mm) $E_{11}(t)$	(kV/mm) $E_{21}(t)$	(kV) ΔU_1	(kV) ΔU_2	(kV) U
1	0	0	7,160	3,791	66,660	13,339	80
2	2,35	1	7,713	3,327	71,811	8,188	80
3	4,5	2	7,917	1,788	73,705	6,294	80
4	6,8	3	7,992	1,590	74,403	5,596	80
5	9,0	4	8,019	1,517	74,659	5,340	80
6	11,3	5	8,029	1,491	74,753	5,246	80
7	13,5	6	8,033	1,481	74,788	5,211	80
8	15,8	7	8,034	1,477	74,801	5,198	80
9	18,0	8	8,035	1,476	74,805	5,194	80
10	20,3	9	8,035	1,475	74,807	5,192	80
11	22,5	10	8,035	1,475	74,808	5,191	80
12	24,8	11	8,035	1,475	74,808	5,191	80

Rezultatele obținute atât prin calcul, cât și prin măsurători experimentale sînt în bună concordanță, ceea ce justifică faptul că metoda de calcul elaborată de autorul tezei descrie corect fenomenul fizic din izolația stratificată a unui cablu. Metoda prezintă următoarele avantaje:

- descrie în mod continuu variația intensității cîmpului electric de la momentul inițial pînă în regimul de echilibru staționar ;
- o încadrare unitară și sintetică a aspectelor care intervin și cu posibilități de particularizare;
- repetarea ușoară, prin rulare pe calculstor, a calculelor în diferite variante.

Determinarea atât prin calcul, cât și experimental a căderilor de tensiune pe izolația stratificată a cablului în procesul tranzitoriu, reprezintă un alt criteriu - tot așa de important ca și determinarea intensității cîmpului electric pentru a caracteriza nivelul de solicitare a dielectricilor utilizați în sistemul de izolație al cablurilor. Căderile de tensiune se pot măsura direct și pe baza lor rezultă intensitățile cîmpului electric, după cum există și posibilitatea ca să se determine căderile de tensiune plecînd de la variația în timp cunoscută prin calcul - pentru intensitățile cîmpului electric.

3.5.2. Modelarea pe calculstor a solicitării izolației cablului tip АННАОМХ 1x500 мм² 110 kV fabricat de firma NOKIA - Finlanda.

Autorul tezei a participat la lucrările de montaj și a efectuat unele încercări pe un cablu de 110 kV cu izolație din polietilenă reticulată chimic [153]. Cu valorile numerice pentru acest cablu, s-a modelat atât pe calculstor analogic, cât și pe calculstor numeric, solicitarea electrică care apare în izolația de fază și în

ecranele semiconductor la aplicarea unei tensiuni de incarcare $U_0 = 220 \text{ kV}$ [146], [147].

Folosind notațiile din figura 3.11 și valorile numerice: $r_0 = 13 \text{ mm}$; $r_1 = 14 \text{ mm}$; $r_2 = 27 \text{ mm}$; $R = 28 \text{ mm}$; $\sigma_1 = \sigma_3 = 0,02 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$; $\sigma_2 = 47,62 \cdot 10^{-12} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$; $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 20,3 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$, au rezultat pentru coeficienții calculați cu relațiile (3.104) următoarele valori: $K_1 = 220 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$; $K_2 = -3,88 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; $K_3 = 4,5 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$; $K_4 = 4561 \cdot 10^{-12} \text{ F}^2 \cdot \text{m}^{-2}$.

Pentru modelarea pe calculator analogic a fost utilizată schema de cablaj prezentată în figura 3.12. Au rezultat următoarele valori pentru coeficienții de transfer:

$$\frac{K_1}{K_4} = 48,3 \cdot 10^9 (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}; \quad \frac{K_2}{K_4} = -0,851 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}; \quad \frac{K_3}{K_4} = 0,985 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1};$$

$$\left(\frac{\sigma_2}{\epsilon_2} - \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \cdot \frac{K_2}{K_4} \right) = 0,851 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}; \quad \left(\frac{\sigma_3}{\epsilon_2} - \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \cdot \frac{K_3}{K_4} \right) = 0,001 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}.$$

(3.121)

Valorile inițiale pentru intensitățile câmpului electric au fost calculate cu relația (3.95):

$$E_{22}(0) = E_{32}(0) = 10,73 \text{ kV/mm}.$$

(3.122)

Deoarece procesul tranzitoriu se încadrează în domeniul nano-sekundelor, au fost utilizate următoarele scări de modelare:

$$10 \text{ kV/mm} \dot{=} 1 \text{ V}_{\text{calculator}}; \quad 1 \cdot 10^{-9} \text{ s}_{\text{real}} \dot{=} 1 \text{ s}_{\text{calculator}}$$

(3.123)

În figura 3.20 se prezintă rezultatele care au fost obținute pe calculatorul analogic MEDA 42TA din dotarea Catedrei Electroenergetice din IPTV Timișoara.

Se observă o solicitare foarte mare a ecranului semiconductor interior $E_{11}(t=0)$ la primul moment, după care intensitatea câmpului electric scade. În schimb izolația de fază este mai puțin solicitată în primul moment, după care solicitarea tinde în regim de echilibru staționar la valoarea 12,3 kV/mm. Se confirmă că restricția de a nu aplica brusc tensiunea de incarcare și de a crește progresiv această tensiune, are ca scop o solicitare progresivă a sistemului de izolație.

Modelarea pe calculator numeric a solicitării izolației cablului de 110 kV a fost efectuată cu ajutorul programului în limbaj FORTRAN întocmit de autorul tezei și prezentat în Anexa 6.

Calculul s-a efectuat cu aceleași valori numerice folosite și pentru modelarea analogică, în intervalul de timp 0...10 ns, cu pasul de integrare 0,2 ns, iar rezultatele obținute au fost prezentate în figura 3.21. Rezultatele obținute pe calculator numeric sînt în concordanță cu rezultatele obținute pe calculator analogic.

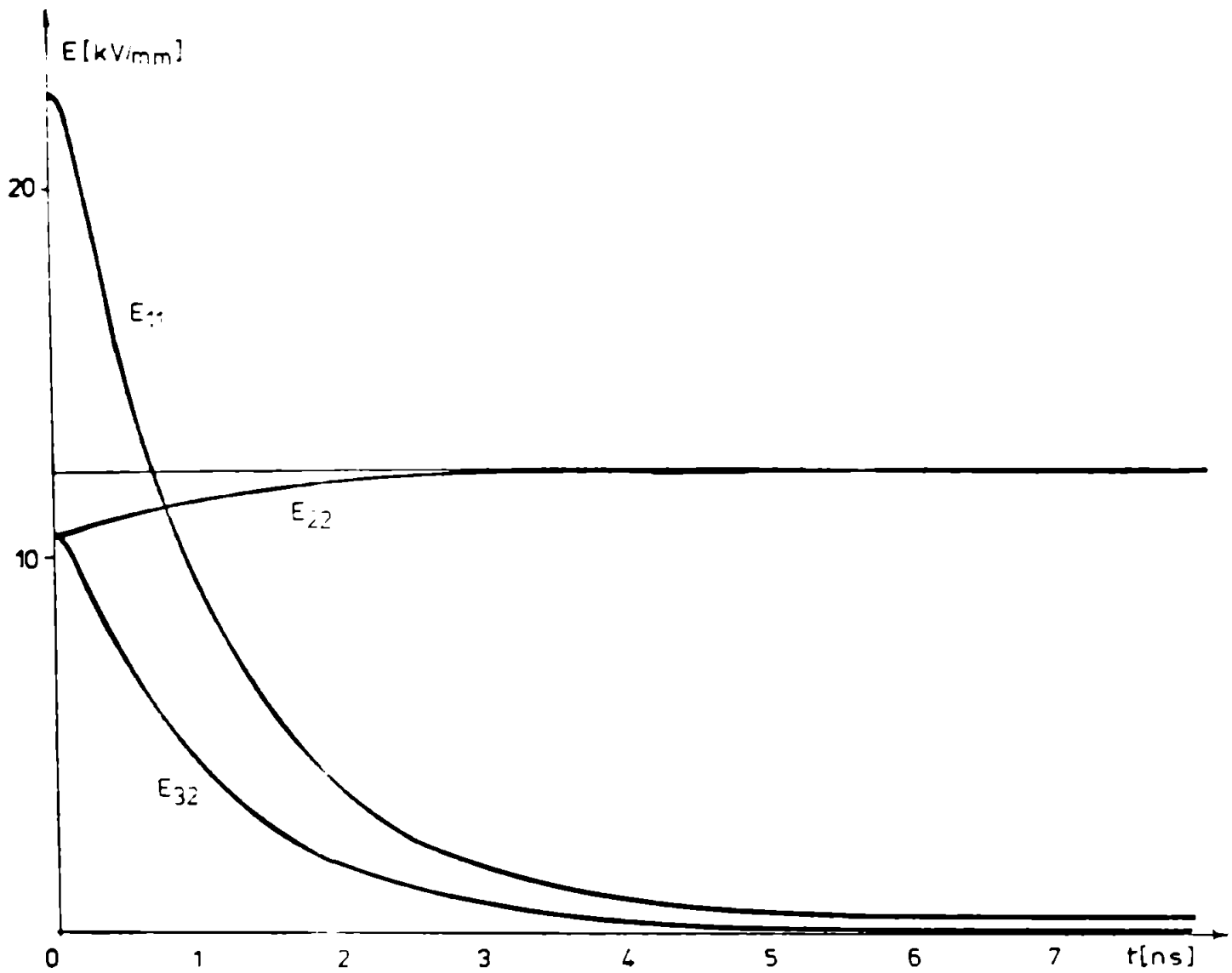


Fig.3.20. Variația în timp a intensităților câmpului electric pentru cablul de 110 kV.

În tabelul 3.8 s-au centralizat valorile intensităților câmpului electric determinate pentru diferite puncte și la diferite momente pentru cablul de 110 kV, la aplicarea tensiunii de încercare $U_0 = 220$ kV. Această tensiune de încercare a fost aplicată și pe cablul montat în orașul Brad, înainte de punerea în funcțiune a acestuia (55).

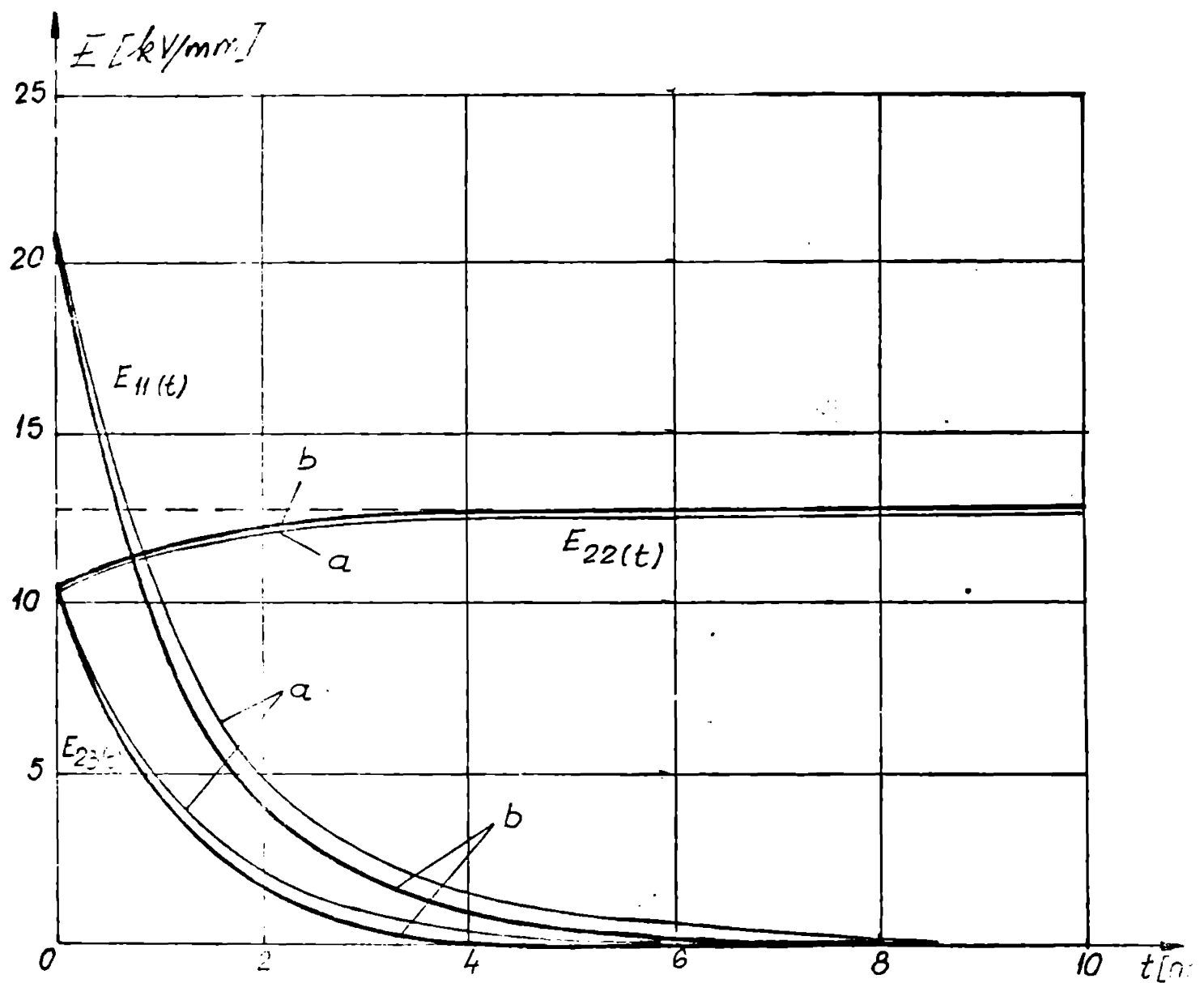


Fig.3.21. Rezultate obținute pe calculator numeric (a) și pe calculator analogic (b).

Tabelul 3.8. Intensitatea câmpului la $t=0$ și $t \rightarrow \infty$.

E simbolizare	E_{11}	E_{12}	E_{21}	E_{22}	E_{32}	E_{33}
r (mm)	13	14	14	27	27	28
Material	semiconductor (interior)		polietilenă		semiconductor (exterior)	
E (kV/mm) la $t=0$	22,30	20,7	20,7	10,73	10,73	10,35
E (kV/mm) $t \rightarrow \infty$ prin modelare	≈ 0	≈ 0	23,6	12,2	≈ 0	≈ 0
E (kV/mm) $t \rightarrow \infty$ analitic	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$5,7 \cdot 10^{-8}$	23,97	12,43	$2,9 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$

La primul moment solicitarea cea mai mare apare în ecranul semiconductor, unde intensitatea câmpului electric atinge 22,3 kV/mm. Se precizează că numai în cazul modelării pe calculatoare s-a considerat aplicarea bruscă a tensiunii de încercare, iar în cazul încercării cablului real - tensiunea s-a aplicat progresiv.

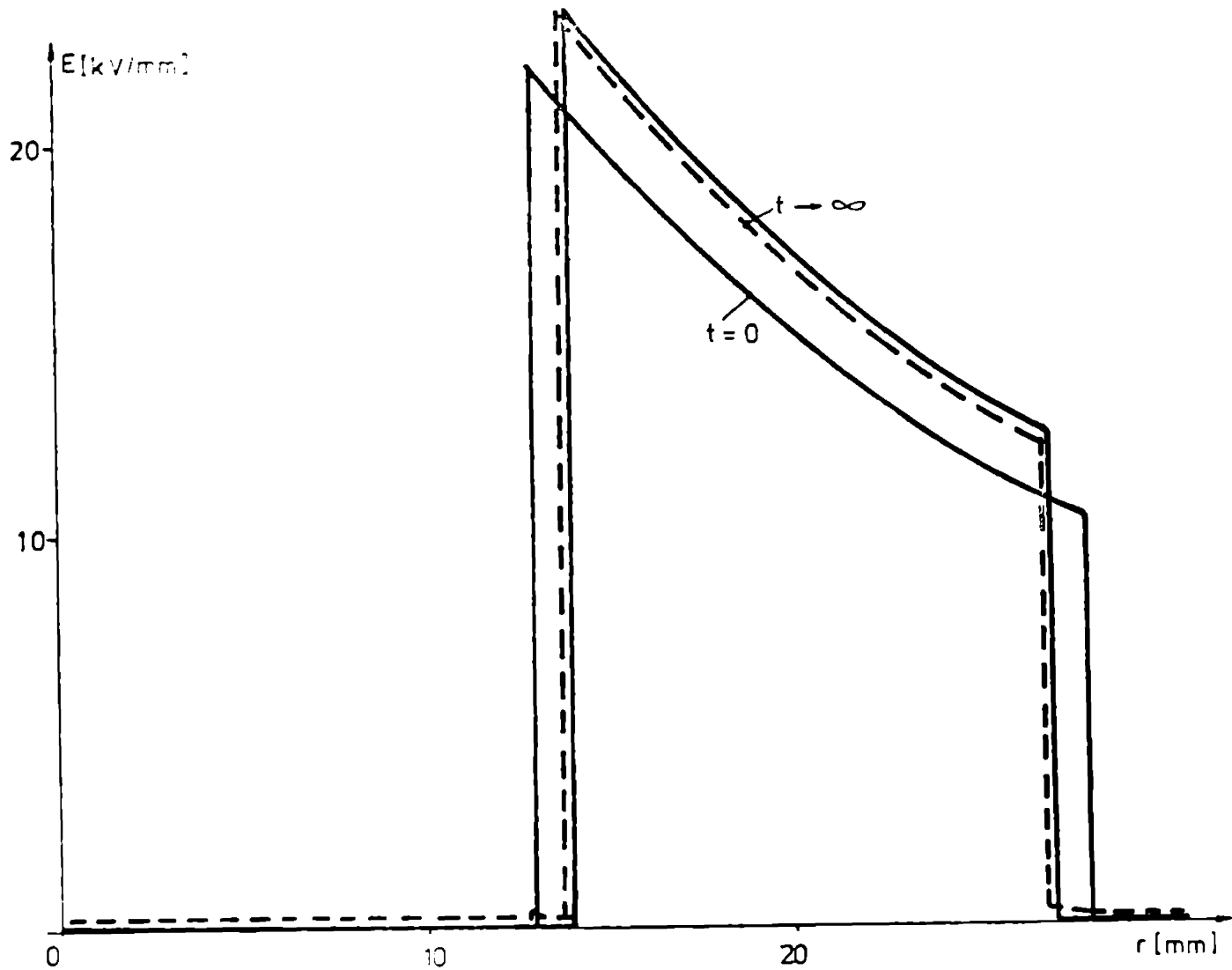


Fig.3.22. Repartiția în spațiu a intensității câmpului electric la $t=0$ și $t \rightarrow \infty$.

În regiile de echilibru staționar intensitățile câmpului electric în ecranele semiconductoră au valori foarte apropiate de zero și practic întreaga scădere de tensiune este preluată de izolația de fază. În figura 3.22 a fost reprezentată repartiția în spațiu a intensității câmpului electric, pe baza valorilor centralizate în tabelul 3.8. Rezultă că față de momentul inițial aplicării tensiunii de încercare, în regimul de echilibru staționar - izolația de fază a cablului este mult mai sollicitată.

Regimul tranzitoriu are o constantă de timp foarte mică ($\Theta_c = 1,133 \cdot 10^{-9}$ s) în comparație cu constanta de timp (3.118) determinată pentru cablul experimental de 20 kV. Cauza o constituie valoarea relativ mare a conductivității electrice a ecranului semiconductor pentru cablul de 110 kV. Dacă ecranul semiconductor ar avea o conductivitate de 1000 de ori mai mică ($\hat{\sigma}_1 = 0,02 \cdot 10^{-3} (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$, constanta de timp ar crește de 1000 de ori și s-ar încadra în domeniul microsecundelor ($\Theta_c = 1,133 \cdot 10^{-6}$ s), la o valoare apropiată de durata frontului

pentru o undă de supratensiune atmosferică standardizată (STA 1,2/
/50 μ s).

Un alt aspect important care se poate pune în evidență constă în faptul că dacă conductivitățile electrice ale ecranului semiconductor au valori diferite pentru diverse tronsoane de cablu, procesul tranzitoriu se va desfășura cu constante de timp diferite și ca atare, în porțiunile de joncțiune ale tronsoanelor de cablu pot să apară diferențe de potențial mari. Rezultă necesitatea realizării ecranului semiconductor cu aceeași conductivitate electrică la toate tronsoanele de cablu.

Aplicațiile efectuate atât pentru cablul de 20 kV cu izolația din două straturi, cât și pentru cablul de 110 kV pentru care s-a determinat variația intensităților câmpului electric în trei straturi, a scos în evidență posibilitatea determinării prin calcul a solicitării electrice din izolația stratificată în procesul tranzitoriu, după metodele propuse de autorul tezei.

Metodele de calcul elaborate permit o încadrare unitară a fenomenului fizic și o evaluare precisă a nivelului de solicitare electrică pentru dielectrice stratificate reale, cu conductivități electrice diferite de zero. Prin alegerea adecvată a materialelor utilizate în sistemul de izolație a cablurilor se poate obține o uniformizare a solicitării atât la primul moment al aplicării tensiunii, cât și în regimul de echilibru staționar.

C a p i t o l u l 4.

CALCULUL REPARTITIEI CIMPULUI ELECTRIC IN ZONA PROFILULUI DEFLECTOR AL CABLURILOR DE INALTA TENSIUNE.

Execuția manșonelor de joncțiune și a cutiilor terminale pentru cabluri de înaltă tensiune ridică probleme deosebit de importante din punct de vedere al obținerii unei repartiții corespunzătoare a cimpului electric, de evitare a unor puncte de discontinuitate și de asigurare a unei dispersii cât mai uniforme a cimpului - prin reducerea efectului de margine. Statistica defectelor în cabluri [23], [89], [95], [124], [132] arată că aici pot să apară punctele slabe ale izolației cablurilor, datorită execuției sau materialelor de calitate necorespunzătoare, sau datorită unor tehnologii simplificate sau subdimensionării.

Tehnologiile de execuție a manșonelor de joncțiune și a cutiilor terminale sînt cu atât mai complexe, cu cît tensiunea nominală a cablului este mai mare [23], [55], [66], [69], [70], [73], [78], [95], [96], [109], [110], [115].

În țara noastră primul cablu de 110 kV a fost montat în București în anul 1959 și pînă în 1972 toate lucrările de montaj și reparații se executau numai cu asistență tehnică din partea furnizorilor externi (Pirelli-Italia, BICC-Anglia). Ulterior, în urma specializării personalului tehnic românesc la firmele constructoare de cabluri, a obținerii unei experiențe în exploatarea, întreținerea și repararea cablurilor de înaltă tensiune, furnizorii de cabluri au acceptat menținerea garanției asupra cablurilor la care lucrările de montaj și reparații au fost executate de formațiile românești specializate [124].

În prezent, în țara noastră sînt în funcțiune cca 130 circuite cu cabluri de înaltă tensiune provenind de la firmele: Pirelli-Italia, BICC-Anglia, Fulten-Guilleaume (RFG, Austria, Franța), FIAT-Italia, Showa Nitsubischi Co și Sumitomo-Japonia, Nokia-Finlanda. Diversitatea variantelor constructive a furniturilor specifice, a sculelor, aparatelor și agregatelor de montaj, a stocului de securitate necesar - au condus la cheltuieli de exploatare mai ridicate, în comparație cu situația în care s-ar fi adoptat achiziționarea cablurilor de la un număr mai restrîns de furnizori [124].

Problema asimilării în țară a materialelor și tehnologiilor pentru manșonatele de cabluri reprezintă un salt calitativ care este condiționat atât de capacitatea întreprinderilor de profil în a

produce materialele electroizolante necesare, cit și utilizarea lor cit mai eficientă prin perfecționarea metodelor de calcul a nivelului de solicitare electrică. Elaborarea unor tehnologii optime de manșonare nu este eficientă fără aprofundarea metodelor de calcul a solicitării materialelor. Autorul tezei va dezvolta, cu particularitățile specifice - metodele de calcul a solicitării izolației stratificate din zona profilului deflector.

Variația intensității câmpului electric în lungul unui cablu poate prezenta discontinuități în zonele manșonelor de joncțiune sau cutiilor terminale - prin modificarea grosimii izolației. Din acest motiv în aceste zone se va executa fie un con deflector, fie un profil deflector care să asigure o variație cit mai uniformă a intensității câmpului. Metodele de calcul pentru conul deflector sau profilul deflector - nu sînt prezentate suficient de detaliat în literatura de specialitate [24], [40], [54], [60], [95], [98], [99]. În general, se efectuează calculele în ipoteza înlocuirii profilului deflector real cu o variație în trepte infinitezimale a profilului (fig.4.1) și efectuînd calculul pentru fiecare treaptă ca și pentru electrozii cilindrici coaxiali, cu neglijarea efectului de capăt între aceste trepte.

În figura 4.1, pe baza unui astfel de calcul s-a reprezentat variația în lungul cablului a intensității câmpului electric la suprafața conductorului central, presupunînd o îngroșare liniară a izolației:

$$r_{\text{ext}} = r_0 + \delta_0 + \delta(x) \quad (4.1)$$

$$\delta(x) = K \cdot x \quad (4.2)$$

$$E(x) = \frac{U}{r_0 \ln \frac{r_{\text{ext}}}{r_0}} \quad (4.3)$$

Pentru o variație liniară a grosimii izolației (4.2), a rezultat o variație neliniară a intensității câmpului (4.3).

Inversînd datele problemei și impunînd o scădere liniară a intensității câmpului electric după axa longitudinală a cablului (fig. 4.2), rezultă prin efectuarea calculelor în aceleași ipoteze - profilul deflector $\delta(x)$:

$$E(x) = E_{\text{max}} - K \cdot x \quad , \quad \text{unde} \quad K = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{x_{\text{max}}} \quad (4.4)$$

$$E(x) = \frac{U}{r_0 \ln \frac{r_0 + \delta_0 + \delta(x)}{r_0}} = E_{\text{max}} - K \cdot x \quad (4.5)$$

$$\delta(x) = r_0 \cdot e^{\frac{U}{r_0 (E_{max} - k \cdot x)}} - (r_0 + \delta_0) \quad (4.6)$$

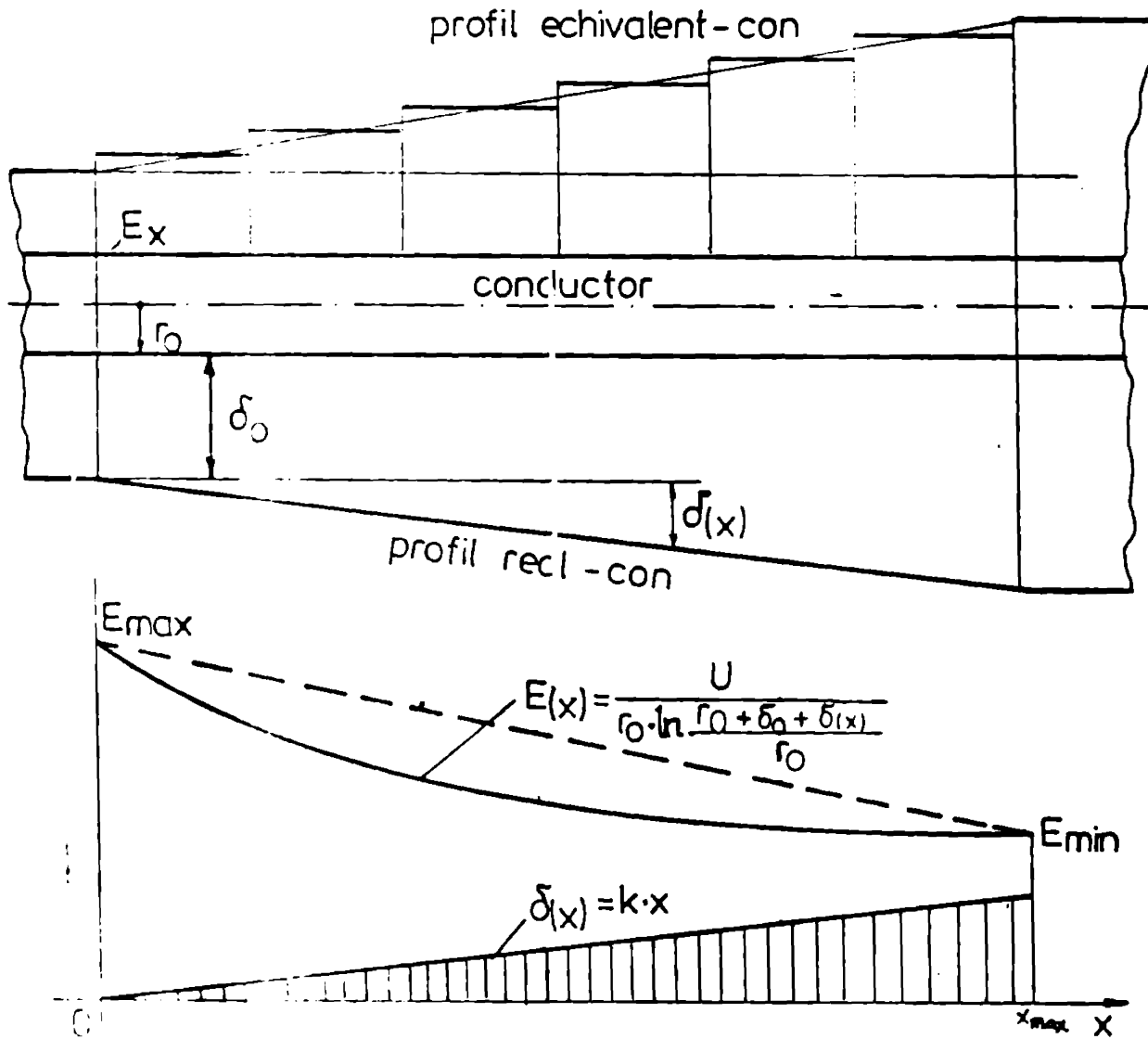


Fig.4.1. Variația intensității câmpului electric în con, după axa longitudinală (ox).

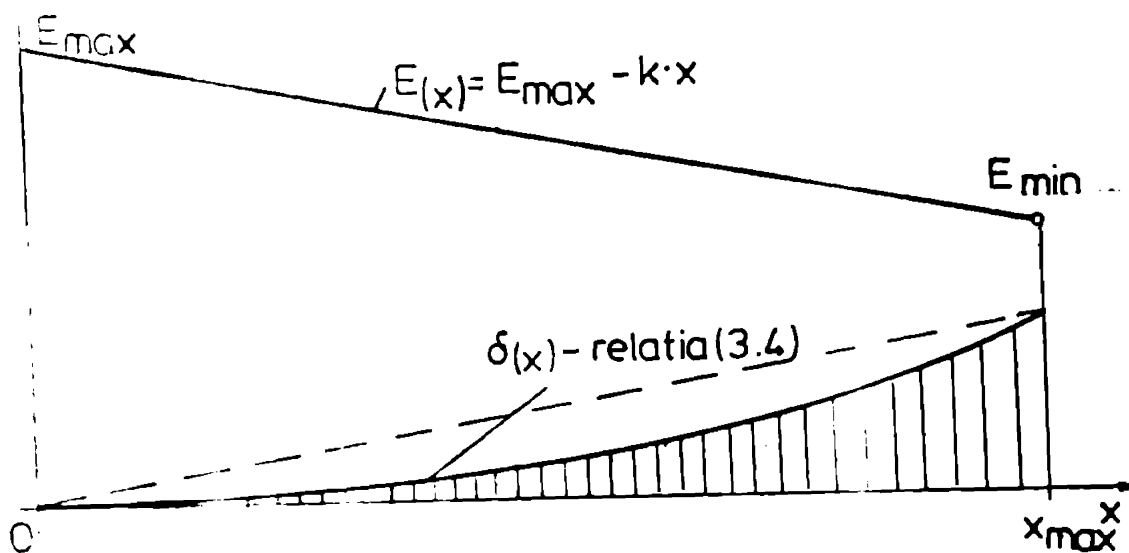


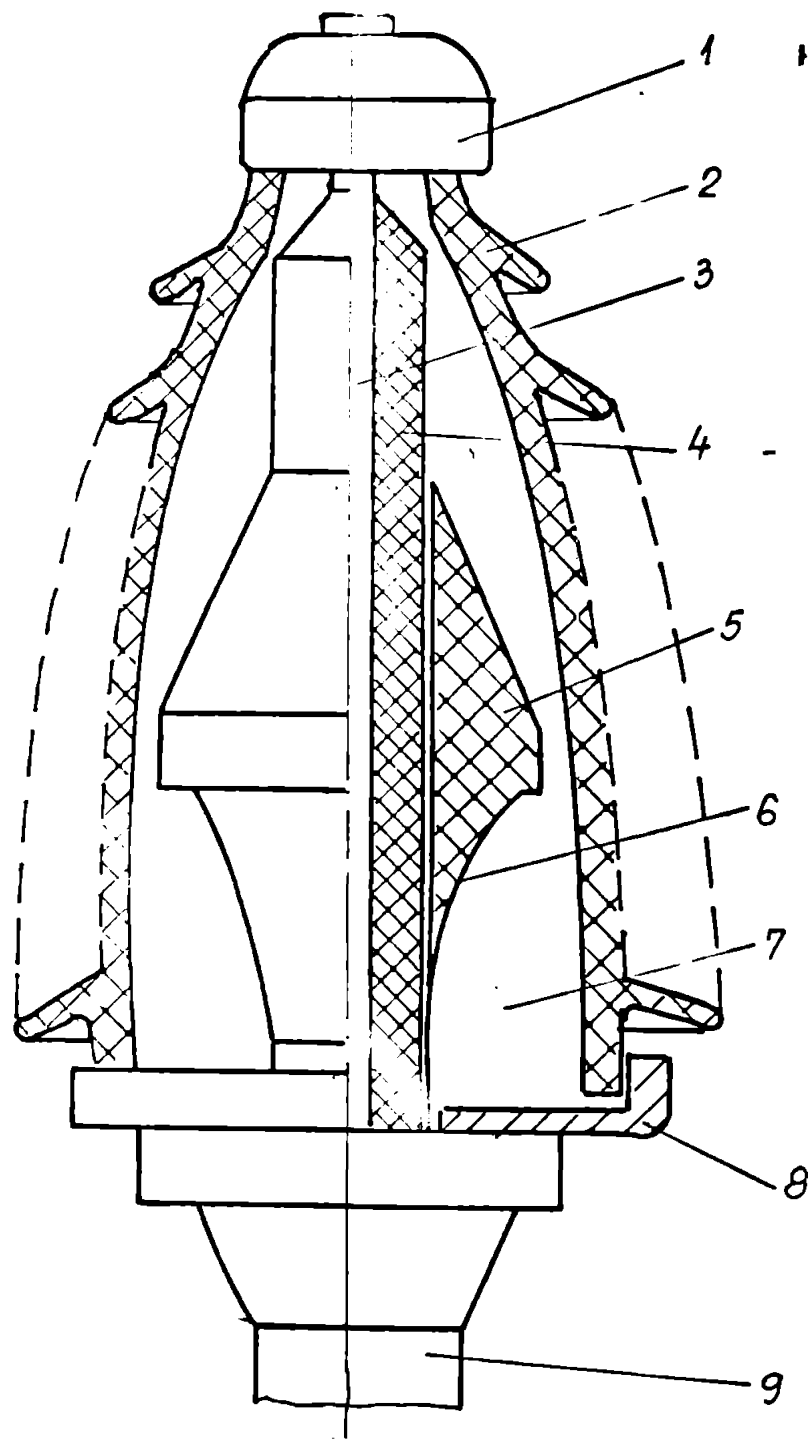
Fig.4.2. Profilul conului - $\delta(x)$ la variația liniară impusă $E(x)$ pentru intensitatea câmpului după axa longitudinală.

Raza electrodului metalic exterior în fiecare punct de abscisă x al acestui profil deflector este:

$$r(x) = r_0 + \delta_0 + \delta(x) \quad (4.7)$$

Firmele constructoare de cabluri și accesorii indică doar modul de execuție a profilului deflector, sau livrează aceste profile defletoare - ca elemente prefabricate din rășini epoxidice și care se introduc peste izolația cablurilor (fig.4.3) [78].

Fig.4.3. Cutie terminală pentru cablu de 110 kV.



- 1 - borna de înaltă tensiune; 2 - izolator din porțelan;
- 3 - conductorul central al cablului;
- 4 - izolația de fază din PE;
- 5 - profil deflector din rășină epoxidică;
- 6 - partea metalizată și legată la pământ a profilului;
- 7 - lichid electroizolant (polybutene);
- 8 - armături metalice pentru etanșare;
- 9 - zona cilindrică a cablului.

Prețul de cost al unei cutii terminale este foarte ridicat (54.000 lei/buc) [75], [142] și necesită materiale din import. În scopul înlocuirii importului și executarea acestor cutii cu materiale din țară este necesar să se determine cât mai exact - prin calcul - nivelul solicitării în orice punct din izolația cutiei terminale.

Autorul tezei a plecat de la analiza spectrului optim al liniilor de cîmp în zona profilului deflector și a stabilit

noi relații și metode de calcul a solicitării electrice a izolației din această zonă.

Un prim obiectiv a constat în determinarea unor expresii de calcul al intensității cîmpului electric pentru profilul deflector executat dintr-un singur material dielectric, sau din mai mulți dielectrics

- în ipoteza unor materiale izolante perfecte - fără conductibilitate electrică. În următoarele etape de calcul, autorul tezei a dezvoltat metode originale de analiză a repartiției în spațiu și a variației în timp a intensității câmpului electric în ecranele semiconductoră și în izolația stratificată cu conductibilitate electrică diferită de zero. Metodele de calcul au fost întocmite pentru mai multe situații privind construcția și geometria profilelor deflectoră. Varianta cea mai simplă o constituie un profil deflector liniarizat - un con deflector.

4.1. CIMPUL ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA CONULUI DEFLECTOR CU UN SINGUR DIELECTRIC, FARA PIERDERI DIELECTRICE.

Dacă în zona cilindrică a cablului, spectrul liniilor de câmp este uniform și îl constituie liniile perpendiculare pe axa longitudinală a cablului, în zona conului deflector - liniile de câmp primesc o curbura - care le apropie de un arc de cerc (fig.4.4). Autorul tezei a propus (148) echivalarea acestor linii de câmp cu arce de cerc cu centrul în intersecția dintre suprafața conductorului central al cablului și prelungirea generatoarei conului. În acest mod de echivalare, liniile de câmp sînt perpendiculare atât pe suprafața conductorului central, cît și pe suprafața conului deflector.

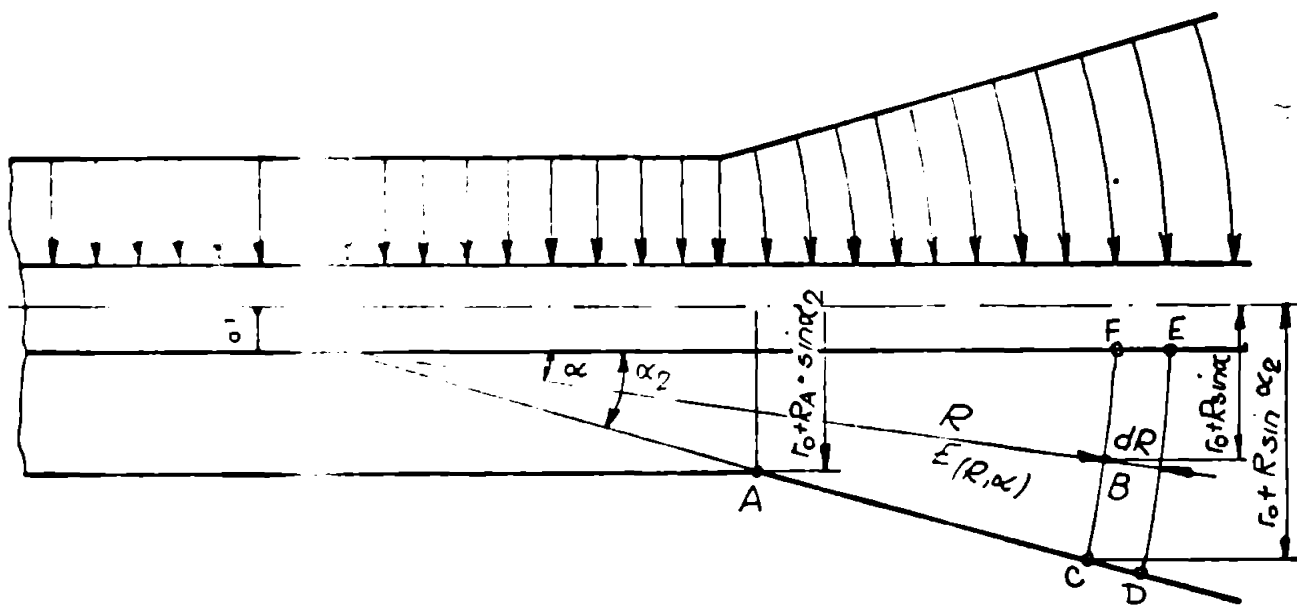


Fig.4.4. Spectrul câmpului electric în conul deflector cu un singur dielectric.

Trecerea de la zona cilindrică a cablului, la zona conului deflector - trebuie executată înrijit, cu o rază de curbură cît mai mare evitînd muchiile ascuțite în care se pot concentra liniile de câmp. Zona terminală a conului deflector o poate constitui - un inel de ecranare (inel de gardă) sau dacă sînt posibilități de execuție - să se realizeze o formă apropiată de un profil Rogowski.

Pentru calculul intensității cîmpului în izolația conului deflector, se calculează fluxul electric pe o suprafață închisă generată de rotirea elementului infinitezimal CDEF în jurul axei longitudinale a cablului (fig.4.4). Se observă că fluxul electric este diferit de zero pe două suprafețe extreme: pe electrodul interior (zona segmentului FE) și pe electrodul exterior (zona segmentului CD). Ariile generate de rotirea celor două segmente în jurul axei longitudinale a cablului se pot calcula cu relațiile:

$$A_1 = A_{FE} = 2\pi r_0 \cdot dR, \quad (4.8)$$

$$A_2 = A_{CD} = 2\pi (r_0 + R \cdot \sin \alpha_2) dR. \quad (4.9)$$

Aplicînd legea fluxului electric pentru suprafața închisă - de revoluție, rezultă:

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \varepsilon \cdot E_2(R, \alpha_2) \cdot A_2 - \varepsilon \cdot E_1(R, 0) \cdot A_1 = 0. \quad (4.10)$$

Σ prin rotație CDEF

Intensitatea cîmpului pe electrodul exterior $E_2(R, \alpha_2)$ se poate exprima în funcție de intensitatea cîmpului pe conductorul central al cablului $E_1(R, 0)$:

$$E_2(R, \alpha_2) = E_1(R, 0) \frac{r_0}{r_0 + R \cdot \sin \alpha_2}. \quad (4.11)$$

Într-un punct oarecare B, caracterizat prin coordonatele R și α - cîmpul electric este $E(R, \alpha)$. Segmentul infinitezimal "dR" generează prin rotirea sa - o arie laterală:

$$A_B = 2\pi (r_0 + R \sin \alpha) \cdot dR. \quad (4.12)$$

Aplicînd legea fluxului electric, rezultă:

$$\varepsilon \cdot E_2(R, \alpha_2) \cdot 2\pi \cdot (r_0 + R \sin \alpha_2) dR = \varepsilon \cdot E(R, \alpha) \cdot 2\pi (r_0 + R \sin \alpha) dR, \quad (4.13)$$

sau

$$E(R, \alpha) = E_2(R, \alpha_2) \frac{r_0 + R \sin \alpha_2}{r_0 + R \sin \alpha}. \quad (4.14)$$

O linie de cîmp electric este parcursă atunci cînd unghiul α ia valori între zero și α_2 . Integrala intensității cîmpului electric în lungul unei linii de cîmp este egală cu diferența de potențial la care este supusă izolația cablului U:

$$U = \int_0^{\alpha_2} E(R, \alpha) \cdot R \cdot d\alpha = E_2(R) \cdot R \cdot (r_0 + R \sin \alpha_2) \int_0^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{r_0 + R \sin \alpha}. \quad (4.15)$$

Integrale din relația (4.15) fiind de formă [33]:

$$\int \frac{d\alpha}{r_0 + R \sin \alpha} = \frac{(-1)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \ln C \cdot \frac{R + r_0 \sin \alpha + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cdot \cos \alpha}{r_0 + R \sin \alpha}, \quad (4.16)$$

Rezultă:

$$U = E_2(R) \cdot R \cdot (r_0 + R \sin \alpha_2) \frac{(-1)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \ln \frac{\frac{R + r_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_2}{r_0 + R \sin \alpha_2}}{\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0}} \quad (4.17)$$

Din relația (4.17) rezultă intensitatea câmpului electric pe electrodul exterior ($\alpha = \alpha_2$), la distanța R de originea conului:

$$E_2(R) = \frac{U}{R(r_0 + R \sin \alpha_2) \sqrt{R^2 - r_0^2}} \cdot \ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_2}{r_0 + R \sin \alpha_2}} \quad (4.18)$$

Înlocuind (4.18) în (4.11) și (4.14) rezultă intensitatea câmpului pe conductorul central la distanța R de vârful conului:

$$E_1(R) = \frac{U}{R \cdot r_0 \sqrt{R^2 - r_0^2}} \cdot \ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_2}{r_0 + R \sin \alpha_2}} \quad (4.19)$$

și intensitatea câmpului într-un punct oarecare din izolația conului deflector $E_{(R, \alpha)}$:

$$E_{(R, \alpha)} = \frac{U}{R(r_0 + R \sin \alpha) \sqrt{R^2 - r_0^2}} \cdot \ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_2}{r_0 + R \sin \alpha_2}} \quad (4.20)$$

În figura 4.5 se prezintă un calcul comparativ al intensității câmpului electric: în punctele P_1, P_2 și P_3 cu relația (4.18), iar în punctele Q_1, Q_2 și Q_3 cu relația corespunzătoare echivalenței conului cu o variație în trepte cilindrice (cu neglijarea efectului de margine):

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{R_0}{r_0}} \quad (4.21)$$

Valori numerice:

$$U = 100 \text{ kV}; OP_1 = 4,5 \text{ cm}; OP_2 = 8 \text{ cm}; OP_3 = 11,5 \text{ cm}; \alpha = 26^\circ 40'; \\ r_0 = 2 \text{ cm}; R_0 = 4 \text{ cm}; O_2Q_2 = 5,5 \text{ cm}; O_3Q_3 = 7 \text{ cm}. \quad (4.22)$$

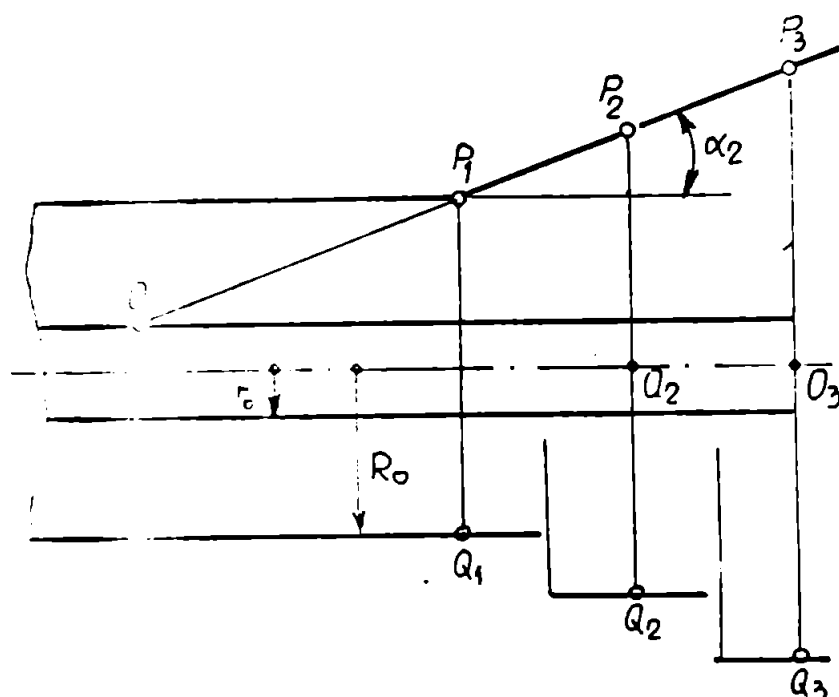


Fig.4.5 . Calculul cimpului in punctele \$P_1\$ și \$Q_1\$.

Rezultatele sînt prezentate in tabelul 4.1.

Tabelul 4.1. Valorile intensității cimpului /kV.cm⁻¹.

Punctul	i = 1	i = 2	i = 3
\$P_1\$ (rel. 4.18)	34,90	19,20	10,78
\$Q_1\$ (rel. 4.21)	36,23	17,96	11,41

Observație: Prin trecere la limită $\angle \alpha_2 \rightarrow 0$ (cu condiția $R \gg r_0$), dispare conul și se obține o prelungire a izolației cilindrice inițiale:

$$\lim (r_0 + R \sin \alpha) = r \text{ pentru } r \in [r_0, R_0]. \quad (4.23)$$

$$\lim (r_0 + R \sin \alpha_2) = R_0. \quad (4.24)$$

$$\sqrt{R^2 - r_0^2} \approx R. \quad (4.25)$$

Relația (4.20) devine:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} (R, \alpha) = \frac{U}{\frac{R+r}{R} \ln \frac{r_0}{R_0}} = \frac{U}{r \ln \frac{R_0}{r_0}} = E(r). \quad (4.26)$$

Particularizarea relației (4.20) conduce la o expresie identică cu relația (4.21) care se referă la calculul cimpului in zona cilindrică, relație cunoscută in literatura de specialitate.

Relația de calcul (4.20) stabilită de autorul tezei, reprezintă o expresie generală de calcul a intensității cimpului electric in sisteme de izolație conice și care poate fi particularizată, rezultind expresia clasică pentru sisteme de izolație cilindrice.

4.2. CIMPUL ELECTRIC IN IZOLATIA CONULUI DEFLECTOR CU "n" STRATURI DIELECTRICE, FARA PIERDERI DIELECTRICE.

La un con deflector cu un singur dielectric liniile echipotentiale sînt drepte care trec prin virful conului. Pentru a obține un spectru al liniilor de cîmp asemănător, în cazul unui con deflector cu mai multe straturi - se recomandă executia acestuia conform figura 4.6 - în care suprafețele de separare dintre straturi să corespundă drepte-

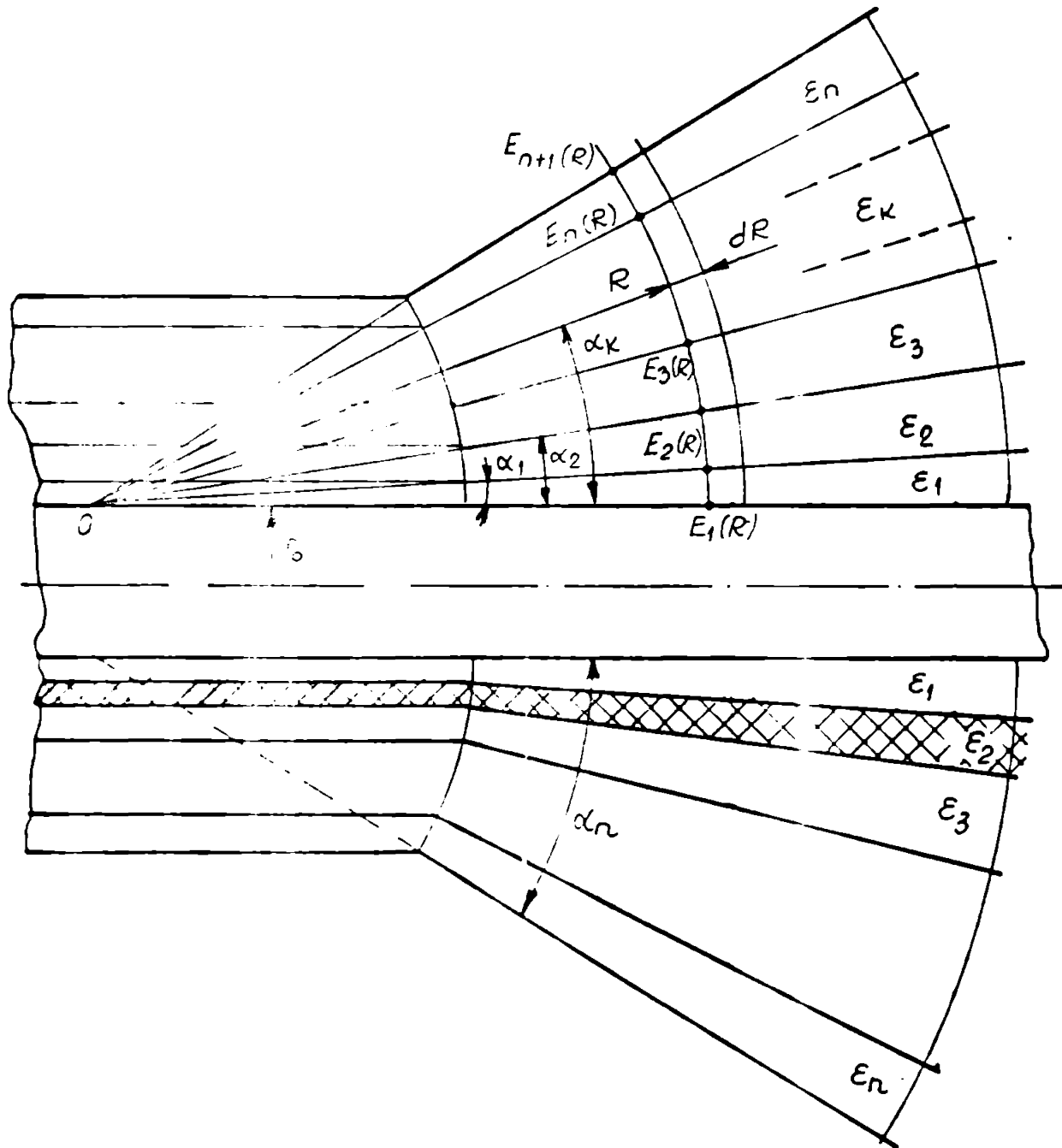


Fig.4 .6. Con deflector din "n" dielectricei.

lor care trec prin virful conului. În acest mod, liniile de cîmp electric vor fi arce de cerc cu centrul în virful conului și nu vor apărea componente tangențiale ale intensității cîmpului în suprafețele de separare dintre straturile cu dielectrice diferite. Prezența unor componente tangențiale ale intensității cîmpului electric favorizează dezvoltarea unor descărcări electrice în cazul unor suprasolicitări.

Autorul propune o metodă de calcul a intensității câmpului electric calculând fluxul electric pe suprafețe de revoluție închise, generate de un contur format din două arce de cerc și două segmente infinitesimale dR (fig.4.6) [148].

Aplicând legea fluxului electric, rezultă:

$$\oint_{\Sigma} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oint_{\Sigma} \epsilon_k \vec{E}_k \cdot d\vec{s} = \text{const.} \quad (4.27)$$

În zona dielectricului cu permitivitatea ϵ_1 , unghiul $\alpha \in (0, \alpha_1)$, iar intensitatea câmpului electric într-un punct de coordonate precizate $E(R, \alpha)$ se va putea exprima în funcție de intensitatea câmpului la suprafața de separare între electrod și dielectric $E_1(R) = E(R, \alpha=0)$:

$$\oint_{\Sigma} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \epsilon_1 \cdot E_1(R) \cdot 2\pi r_0 \cdot dR - \epsilon_1 E(R, \alpha) \cdot 2\pi (r_0 + R \sin \alpha) \cdot dR = 0 \quad (4.28)$$

În zona dielectricului cu permitivitatea ϵ_2 , unghiul $\alpha \in (\alpha_1, \alpha_2)$ și se obține:

$$\oint_{\Sigma} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \epsilon_2 \cdot E(R, \alpha) \cdot 2\pi (r_0 + R \sin \alpha) \cdot dR - \epsilon_1 E_1(R) \cdot 2\pi r_0 \cdot dR = 0 \quad (4.29)$$

Similar, pentru dielectricul cu permitivitatea ϵ_k pentru care unghiul $\alpha \in (\alpha_{k-1}, \alpha_k)$ rezultă:

$$\oint_{\Sigma} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \epsilon_k \cdot E(R, \alpha) \cdot 2\pi (r_0 + R \sin \alpha) \cdot dR - \epsilon_1 E_1(R) \cdot 2\pi r_0 \cdot dR = 0 \quad (4.30)$$

$$E(R, \alpha) = \frac{\epsilon_1 \cdot E_1(R) \cdot r_0}{\epsilon_k \cdot (r_0 + R \sin \alpha)} \quad (4.31)$$

Diferența de potențial între electrozi U este egală cu integrala de linie a intensității câmpului electric:

$$U = \int_0^{\alpha_1} E(R, \alpha) \cdot R \cdot d\alpha + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E(R, \alpha) \cdot R \cdot d\alpha + \dots + \int_{\alpha_{k-1}}^{\alpha_k} E(R, \alpha) \cdot R \cdot d\alpha + \dots + \int_{\alpha_{n-1}}^{\alpha_n} E(R, \alpha) \cdot R \cdot d\alpha \quad (4.32)$$

Exprimând intensitățile câmpului electric în funcție de $E_1(R)$, rezultă:

$$U = \epsilon_1 E_1(R) \cdot r_0 \cdot R \left[\frac{1}{\epsilon_1} \int_0^{\alpha_1} \frac{d\alpha}{r_0 + R \sin \alpha} + \dots + \frac{1}{\epsilon_k} \int_{\alpha_{k-1}}^{\alpha_k} \frac{d\alpha}{r_0 + R \sin \alpha} + \dots + \frac{1}{\epsilon_n} \int_{\alpha_{n-1}}^{\alpha_n} \frac{d\alpha}{r_0 + R \sin \alpha} \right] \quad (4.33)$$

Integralele din relația (4.33) fiind de formă (4.16) rezultă prin rezolvare:

$$U = \frac{\varepsilon_1 \cdot E_1(R) \cdot r_0 \cdot R}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \left[\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_1 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_1}{r_0 + R \sin \alpha_1}} + \dots \right. \\ \left. + \frac{1}{\varepsilon_n} \ln \frac{\frac{R + r_0 \sin \alpha_{n-1} + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_{n-1}}{r_0 + R \sin \alpha_{n-1}}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_n + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_n}{r_0 + R \sin \alpha_n}} \right] \quad (4.34)$$

Pentru simplificarea scrierii se introduc următoarele notații:

$$\Delta_1 = \ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_1 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_1}{r_0 + R \sin \alpha_1}} \\ \Delta_k = \ln \frac{\frac{R + r_0 \sin \alpha_{k-1} + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_{k-1}}{r_0 + R \sin \alpha_{k-1}}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_k + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_k}{r_0 + R \sin \alpha_k}} \\ \Delta_n = \ln \frac{\frac{R + r_0 \sin \alpha_{n-1} + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_{n-1}}{r_0 + R \sin \alpha_{n-1}}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_n + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_n}{r_0 + R \sin \alpha_n}} \quad (4.35)$$

Intensitatea câmpului la suprafața de separare între conductorul central al cablului și primul dielectric devine:

$$E_1(R) = \frac{\varepsilon_1 \cdot R \cdot r_0}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \left(\frac{\Delta_1}{\varepsilon_1} + \dots + \frac{\Delta_k}{\varepsilon_k} + \dots + \frac{\Delta_n}{\varepsilon_n} \right) \quad (4.36)$$

Înlocuind expresia obținută în (4.31), rezultă expresia pentru calculul intensității câmpului electric în conul deflector într-un punct oarecare (fie dielectricul cu permittivitatea ε_k):

$$E_{(R, \alpha)} = \frac{U}{\frac{\varepsilon_k \cdot R \cdot (r_0 + R \sin \alpha)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \left(\frac{\Delta_1}{\varepsilon_1} + \dots + \frac{\Delta_k}{\varepsilon_k} + \dots + \frac{\Delta_n}{\varepsilon_n} \right)} \quad (4.37)$$

Expresia obținută se poate verifica printr-un procedeu de trecere la limită prin care unghiurile $\alpha_k \rightarrow 0$; $k \in (1, n)$, iar conul deflector din mai multe straturi se transformă într-o prelungire a izolației cilindrice din mai multe straturi:

$$R \gg r_0,$$

$$\sqrt{R^2 - r_0^2} \approx R,$$

$$\lim (r_0 + R \sin \alpha_1) = r_1,$$

⋮

$$\lim (r_0 + R \sin \alpha_k) = r_k,$$

⋮

$$\lim (r_0 + R \sin \alpha_n) = r_n,$$

⋮

$$\lim (r_0 + R \sin \alpha) = r. \quad (4.38)$$

Expresiile din relația (4.35) devin prin trecerea la limită:

$$\lim \Delta_1 = \ln \left(\frac{R + R}{r_0} \right) = \ln \frac{r_1}{r_0}$$

⋮

$$\lim \Delta_n = \ln \frac{R + R}{r_n} = \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}. \quad (4.39)$$

Expresia generală de calcul a intensității câmpului electric în conul deflector din mai multe straturi, se transformă în expresia de calcul a intensității câmpului electric în izolația cilindrică din mai multe straturi:

$$\lim_{\substack{\alpha_k \rightarrow 0 \\ R \gg r_0}} E(R, \alpha) = \frac{U}{\varepsilon_k \cdot r \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \dots + \frac{1}{\varepsilon_k} \ln \frac{r_k}{r_{k-1}} + \dots + \frac{1}{\varepsilon_n} \ln \frac{r_n}{r_{n-1}} \right)} \quad (4.40)$$

4.3. METODA DIFERENTELOR FINITE PENTRU CALCULUL CÂMPULUI ELECTRIC ÎN PROFILUL DEFLECTOR.

Un profil deflector cu contur precizat, poate fi aproximat prin segmente de dreaptă tangente la contur (fig.4.7) și calculat conform metodelor prezentate anterior.

Precizia aproximării este mai bună cu cât numărul total al segmentelor este mai mare, iar variația unghiului α_1 este mai mică.

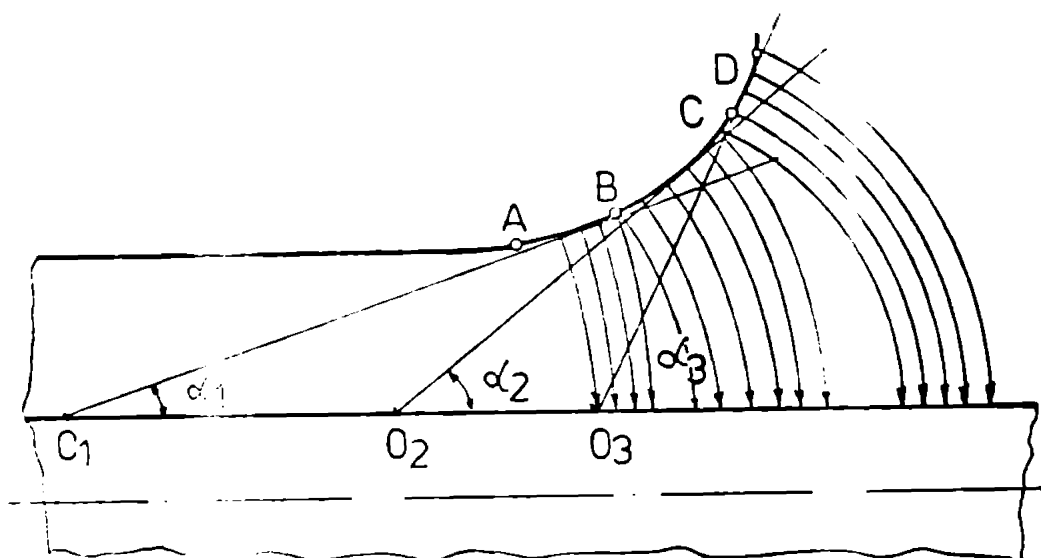


Fig.4.7. Profil deflector aproxiat prin segmente.

In punctele de discontinuitate dintre segmentele de aproximare - calculul cimpului se poate efectua printr-o metodă numerică [62], [63], [64], [65].

Metoda diferențelor finite aproximează ecuațiile cu derivate parțiale prin ecuații cu diferențe finite și permite determinarea soluției - nu ca funcție continuă, ci valorile funcției în nodurile rețelei în care a fost divizat domeniul [64].

La metoda elementelor finite intervine aproximarea funcției potențiale pentru un element finit, iar soluția se obține și aici prin rezolvarea unui sistem de ecuații algebrice în care intervin ca necunoscute potențialele din punctele nodale.

Aplicând metoda diferențelor finite pentru un cimp plan meridian, cu simetrie cilindrică în jurul axei oz (fig.4.8), considerând planul zor discretizat prin rețele pătratice cu pas constant ($h_r = h_z = h$), laplacianul funcției potențial electrostatic $V(r, z)$ este de forma [63]:

$$\begin{aligned} \Delta V(r, z) &= \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \\ &= \frac{1}{h^2} \left[\left(1 + \frac{h}{2r_1}\right) V_{1+1, j} + \left(1 - \frac{h}{2r_1}\right) V_{1-1, j} + V_{1, j+1} + \right. \\ &\quad \left. + V_{1, j-1} - 4 V_{1, j} \right] + \frac{\epsilon_{1r}}{r_1} + \epsilon_{2r} + \epsilon_{2z} \end{aligned} \quad (4.41)$$

unde ϵ_{1r} , ϵ_{2r} și ϵ_{2z} sînt erori care însumează termenii care se neglijează la dezvoltările în serii Taylor a derivatelor din expresia laplacianului:

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{1}{2h_r} (V_{1+1, j} - V_{1-1, j}) + \epsilon_{1r}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{1}{h_r^2} (v_{i+1,j} - 2v_{i,j} + v_{i-1,j}) + e_{2r}$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{h_z^2} (v_{i,j+1} - 2v_{i,j} + v_{i,j-1}) + e_{2z} \quad (4.42)$$

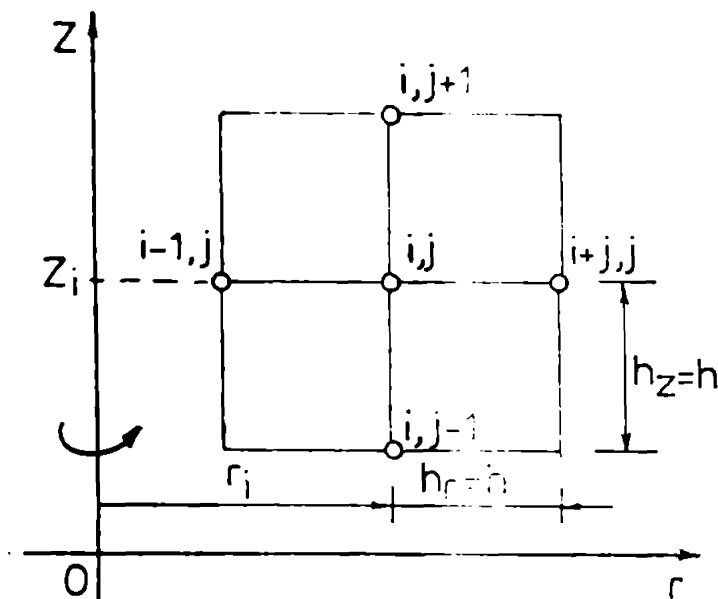


Fig.4.8. Discretizarea planului „zor” prin rețea pătratică cu pas h.

Potențialele din noduri se calculează prin metode iterative. In cazul metodei Jacobi, potențialul din nodul (i,j), la iterația (n+1) este:

$$v_{i,j}^{(n+1)} = \frac{1}{4} \left[\left(1 - \frac{h}{2r_1}\right) v_{i+1,j}^{(n)} + \left(1 - \frac{h}{2r_1}\right) v_{i-1,j}^{(n)} + v_{i,j-1}^{(n)} + v_{i,j+1}^{(n)} \right] \quad (4.43)$$

Aplicind metoda Gauss-Seidel, viteza de convergență crește de două ori față de metoda Jacobi. Dacă ordinea de calcul a potențialelor din noduri este ordonată de la stînga la dreapta și de jos în sus, potențialul din nodul (i,j) calculat prin metoda Gauss-Seidel este:

$$v_{i,j}^{(n+1)} = \frac{1}{4} \left[\left(1 - \frac{h}{2r_1}\right) v_{i-1,j}^{(n+1)} + v_{i,j-1}^{(n+1)} + v_{i,j+1}^{(n)} + \left(1 + \frac{h}{2r_1}\right) v_{i+1,j}^{(n)} \right] \quad (4.44)$$

In cazul împărțirii planului „zor” într-o rețea rectangulară oarecare - in care laturile rețelei sînt diferite unele față de altele - figure 4.9, potențialul v_0 rezultă din ecuația [62]:

$$\left[\frac{2R_0}{h_1 h_3} + \frac{2R_0 + (h_4 - h_2)}{h \cdot h_4} \right] v_0 = \frac{2R_0}{h_1 (h_1 + h_3)} \cdot v_1 + \frac{2R_0}{h_3 (h_1 + h_3)} v_3 + \frac{2R_0 + h_4}{h_2 (h_2 + h_4)} v_2 + \frac{2R_0 - h_3}{h_4 (h_2 + h_4)} v_4 \quad (4.45)$$

Un caz și mai general, in care rețeaua de discretizare are nu numai laturi diferite, ci este compusă din opt medii dielectrice cu per-

permiuități diferite (fig.4.10), potențialul V_0 rezultă din ecuație [45]:

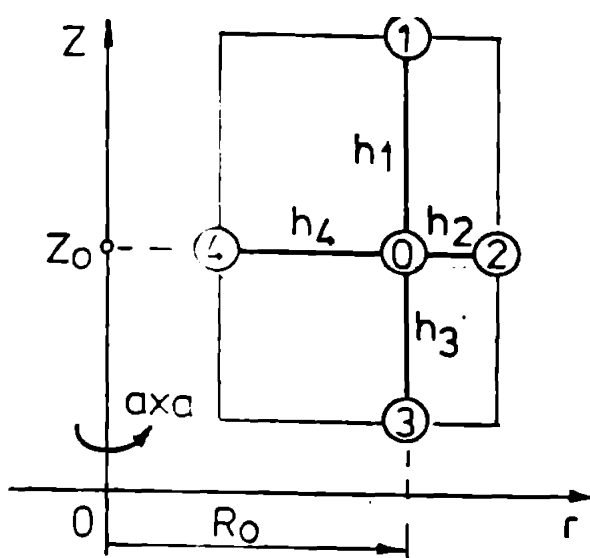


Fig.4.9. Cîmp plan meridian discretizat într-o rețea cu laturi diferite $h_1 \neq \dots \neq h_4$.

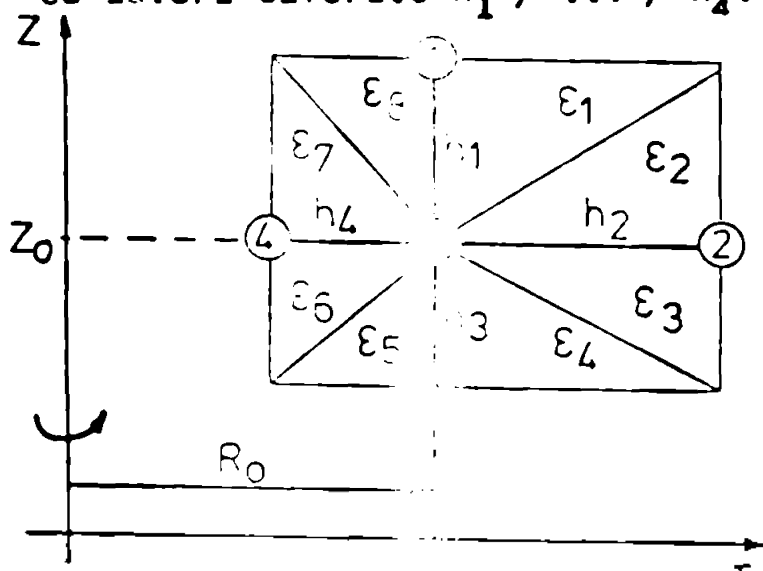


Fig.4.10. Cîmp plan-meridian, cu opt medii dielectrice cu permittivități diferite.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \left[h_4 \left(\frac{\epsilon_8}{h_1} + \frac{\epsilon_5}{h_3} \right) + \frac{1}{h_4} (h_3 \epsilon_6 + h_1 \epsilon_7) \right] \cdot \left(1 - \frac{h_4}{2R_0} \right) + \right. \\
 & \left. \left[h_2 \left(\frac{\epsilon_1}{h_1} + \frac{\epsilon_4}{h_3} \right) + \frac{1}{h_2} (h_3 \epsilon_3 + h_1 \epsilon_2) \right] \cdot \left(1 + \frac{h_2}{2R_0} \right) \right\} \cdot V_0 = \\
 & = \left\{ \left[h_4 \epsilon_8 \left(1 - \frac{h_4}{2R_0} \right) + h_2 \epsilon_1 \left(1 + \frac{h_2}{2R_0} \right) \right] \frac{V_1}{h_1} + (h_3 \epsilon_3 + h_1 \epsilon_2) \left(1 + \frac{h_2}{2R_0} \right) \frac{V_2}{h_2} + \right. \\
 & \left. + (h_3 \epsilon_6 + h_1 \epsilon_7) \left(1 - \frac{h_4}{2R_0} \right) \frac{V_4}{h_4} + \right. \\
 & \left. + \left\{ h_4 \epsilon_5 \left(1 - \frac{h_4}{2R_0} \right) + h_2 \epsilon_4 \left(1 + \frac{h_2}{2R_0} \right) \right\} \cdot \frac{V_3}{h_3} \right. \quad (4.46)
 \end{aligned}$$

După ce se calculează potențialele din nodurile rețelei prin iterații succesive (pînă cînd diferența dintre valorile calculate succesiv scade sub eroarea maximă admisă), se pot trasa liniile echipotențiale și se poate obține prin calcul și repartiția intensității câmpului electric:

$$E_r = - \frac{\partial V}{\partial r} \approx - \frac{V_{1,1+1} - V_{1,1}}{2 \cdot h_r} \quad (4.47)$$

$$E_z = - \frac{\partial V}{\partial z} \approx - \frac{V_{1,1+1} - V_{1,1-1}}{2 \cdot h_z} \quad (4.48)$$

$$|E| = \sqrt{E_r^2 + E_z^2} \quad (4.49)$$

$$\varphi \alpha = \text{arctg} \frac{E_z}{E_r} \quad (4.50)$$

Metodele numerice prezentate în acest subcapitol au fost aplicate în cadrul unui proiect de diplomă [125], iar rezultatele obținute au confirmat posibilitatea aproximării prin segmente de dreaptă a profilului deflector.

4.4 . CALCULUL PROFILULUI DEFLECTOR DE REDUCERE SI RESPECTIV DE INTARIRE A IZOLATIEI.

Izolația profilului deflector trebuie astfel dimensionată încît intensitatea câmpului electric să fie cît mai uniform repartizată, fără puncte de discontinuitate. Dimensionarea poate fi obținută din condiția ca să nu se depășească o valoare limită precizată pentru componenta orientată longitudinal a câmpului electric (se poate adopta o valoare de zece ori mai mică decît componenta radială care soliciță izolația [114], [115]).

Calculul se efectuează în două situații:

- pentru profilul de reducere a izolației, care apare la fiecare capăt terminal al cablului;

- pentru profilul de întărire a izolației, care apare atât la manșoanele de joncțiune, cît și în zone de terminare a ecranului - în cutiile terminale ale cablului.

a) Calculul profilului de reducere a izolației (fig.4.11).

Fie $R(x)$ un anumit profil de reducere a izolației pentru care rezultă o variație a diferenței de potențial între conductorul central al cablului și fiecare punct de pe suprafața profilului U_x (fig.4.11.b).

În zone cilindrică a izolației - de rază R_1 , diferența de potențial devine constantă - U_1 . Conductorul central are raza r_0 . Din condiția de sarcină lineică constantă - în orice punct în jurul conductorului rezultă:

$$U(x) = U_1 \cdot \frac{\ln \frac{R(x)}{r_0}}{\ln \frac{R_1}{r_0}} \quad (4.51)$$

$$U(x + \Delta x) = U_1 \frac{\ln \frac{R + \Delta R}{r_0}}{\ln \frac{R_1}{r_0}} \quad (4.52)$$

Definim gradientul longitudinal g_t :

$$g_t = \frac{U(x + \Delta x) - U(x)}{\Delta x} \quad , \quad \text{se obține:} \quad (4.53)$$

$$g_t \cdot \Delta x = \frac{U_1}{\ln \frac{R_1}{r_0}} \cdot \ln \frac{R + \Delta R}{R} \quad (4.54)$$

Deoarece pentru elementul de interval Δx se obține prin trecere la limită:

$$\int_x^{x + \Delta x} dx = \Delta x \quad , \quad (4.55)$$

$$\int_R^{R + \Delta R} \frac{dR}{R} = \ln \frac{R + \Delta R}{R} \quad (4.56)$$

Impunem $g_t = \text{ct}$ și extindem limitele de integrare în domeniul $0 \dots x$; expresia (4.54) devine:

$$g_t \cdot \int_0^x dx = \frac{U_1}{\ln \frac{R_1}{r_0}} \int_{r_0}^{R(x)} \frac{dR}{R} \quad (4.57)$$

$$g_t \cdot x = \frac{U_1}{\ln \frac{R_1}{r_0}} \cdot \ln \frac{R(x)}{r_0} \quad (4.58)$$

sau:

$$R(x) = r_0 \cdot \exp \left[\frac{x \cdot g_t \cdot \ln \frac{R_1}{r_0}}{U_1} \right] \quad (4.59)$$

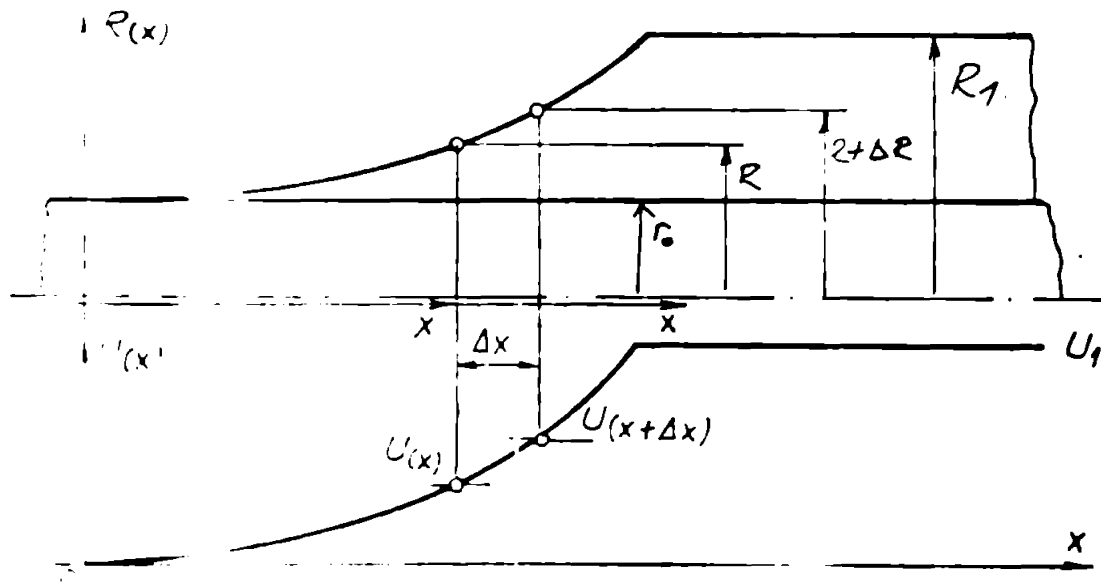


Fig.4.11. Profilul de reducere a izolației (a) și variația diferenței de potențial $U(x)$ (b).

Relație (4.59) reprezintă profilul de reducere a izolației din condiția de gradient longitudinal constant.

b) Calculul profilului de întărire a izolației ca o suprafață echipotențială.

În figura 4.12 se consideră trecerea de la o zonă cilindrică R_0 , la o zonă cilindrică mai mare R_1 , printr-un profil de întărire a izolației $R(x)$, dintr-un material cu aceeași permitivitate dielectrică ($\epsilon_1 = \epsilon_2$). Punctul A se găsește pe suprafața exterioară a profilului (suprafața echipotențială U_1), iar punctele P și P' pe suprafața echipotențială U_P . Diferența de potențial dintre cele două suprafețe este:

$$U_2 = U_1 - U_P \quad (4.60)$$

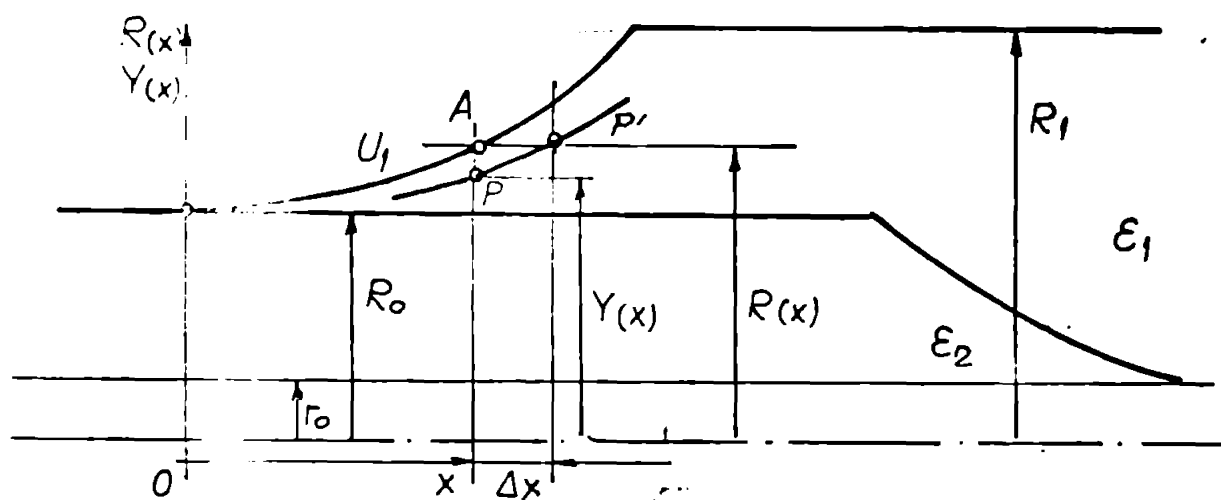


Fig.4.12. Profil de întărire a izolației.

Deoarece în punctul P :

$$U_P = \frac{U_1}{\ln \frac{R(x)}{r_0}} \cdot \ln \frac{Y(x)}{r_0} \quad (4.61)$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{\ln \frac{R(x)}{Y(x)}}{\ln \frac{R(x)}{r_0}} \quad (4.62)$$

Definim un gradient longitudinal g_t între punctele A și P' (admitînd $Y(x) \approx R(x)$ și o deplasare a lui P în P'):

$$g_t = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{U_1 - U_P}{x} = \frac{\partial U_2}{\partial x} \quad (4.63)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial x} = \frac{\partial U_2}{\partial R(x)} \cdot \frac{\partial R(x)}{\partial x} = U_1 \frac{\frac{1}{R} \ln \frac{R}{r_0} - \frac{1}{R} \ln \frac{R}{Y}}{(\ln \frac{R}{r_0})^2} \cdot \frac{\partial R}{\partial x} \quad (4.64)$$

$$g_t \cdot dx = U_1 \cdot \frac{\ln \frac{Y}{r_0}}{R \left(\ln \frac{R}{r_0} \right)^2} \cdot dR \quad (4.65)$$

Aproximind $Y \approx R$ și integrind (4.65) :

$$g_t \int_0^x dx = U_1 \int_{R_0}^R \frac{dR}{R \cdot \ln \frac{R}{r_0} \cdot \ln \frac{R(x)}{r_0}} \quad (4.66)$$

$$g_t \cdot x = U_1 \cdot \ln \left(\frac{\ln \frac{R_0}{r_0}}{\ln \frac{R(x)}{r_0}} \right) \quad (4.67)$$

sau:

$$R(x) = r_0 \cdot \exp \left[\left(\ln \frac{R_0}{r_0} \right) \cdot \exp \left(\frac{x \cdot g_t}{U_1} \right) \right] \quad (4.68)$$

Relația (4.68) reprezintă profilul de întărire a izolației din condiția de gradient longitudinal constant și suprafața profilului să constituie o suprafață echipotențială.

Metodele de calcul prezentate în acest subcapitol au fost elaborate în cadrul unei colaborări a autorului tezei cu colectivul de cercetare condus de prof.dr.ing. Arie A.Arie de la I. P. București, iar o parte din rezultate au fost publicate în lucrarea [150].

4.5. CIMPUL ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA PROFILULUI DEFLECTOR LINIARIZAT CU DOUA STRATURI CU PIERDERI DIELECTRICE, LA APLICAREA TENSIUNII CONTINUE.

Solicitarea electrică a izolației stratificate depinde de tipul tensiunii aplicate.

Pentru o analiză variația în spațiu și timp, intensității cimpului electric în izolația profilului deflector la aplicarea tensiunii înalte continue - autorul tezei propune două variante de profile liniarizate (fig.4.13 și 4.14) pentru care în prima etapă de calcul - repartițiile intensității cimpului electric au fost determinate numai în funcție de permitivități [149], [158].

În calcul se va preciza și modul în care conductivitățile dielectricilor vor influența atât regimul tranzitoriu, cât și regimul de echilibru staționar.

În figura 4.13 se consideră ambele straturi cu o structură conică, iar în figura 4.14 un sistem de izolație stratificată compusă dintr-o zonă cilindrică și o zonă conică.

Pentru prima variantă (fig.4.13), valorile intensității cimpului electric la momentul $t=0$ se calculează conform metodei prezentate în subcapitolul 4.2.

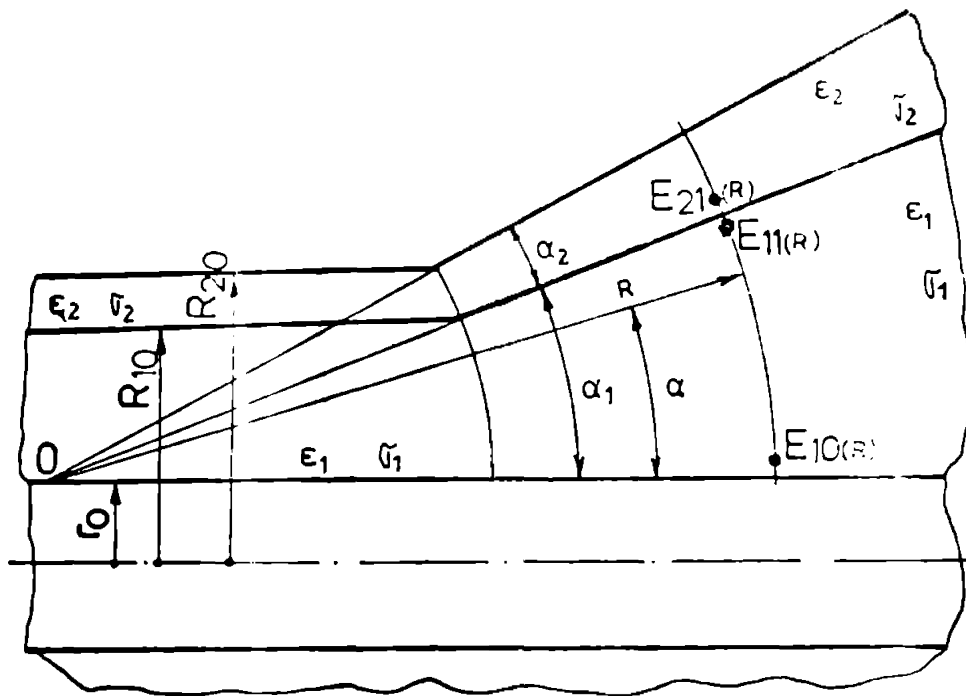


Fig.4.13. Profil liniarizat din doi dielectrics - cu pierderi dielectrice.

Se analizează intensitatea câmpului electric în con, la distanța R de centrul O , de-o parte și de alta a suprafeței de separare a dielectricilor ($\alpha = \alpha_1$).

$$E_{11}(R, t=0) = \frac{U_0}{\frac{\epsilon_1 \cdot R(r_0 + R \cdot \sin \alpha_1)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \left(\frac{1}{\epsilon_1} \Delta_1 + \frac{1}{\epsilon_2} \Delta_2 \right)} \quad (4.69)$$

$$E_{21}(R, t=0) = \left(\frac{U_0}{\frac{\epsilon_2 \cdot R(r_0 + R \sin \alpha_1)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \left(\frac{1}{\epsilon_1} \Delta_1 + \frac{1}{\epsilon_2} \Delta_2 \right)} \right) \quad (4.70)$$

S-au folosit notațiile:

$$\Delta_1 = \ln \frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0} \cdot \frac{R + r_0 \sin \alpha_1 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_1}{r_0 + R \sin \alpha_1} \quad (4.71)$$

$$\Delta_2 = \ln \frac{R + r_0 \sin \alpha_1 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_1}{R + r_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_2} \cdot \frac{R + r_0 \sin \alpha_1 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_1}{r_0 + R \sin \alpha_2} \quad (4.72)$$

Din condiția de continuitate a densității curentului pierderi dielectrice rezultă:

$$E_{11}(R,t) \cdot \sqrt{1} + \mathcal{E}_1 \cdot \frac{dE_{11}(R,t)}{dt} = E_{21}(R,t) \cdot \sqrt{2} + \mathcal{E}_2 \cdot \frac{dE_{21}(R,t)}{dt} \quad (4.73)$$

Tensiunea aplicată între electrozi este:

$$U_0 = \int_0^{\alpha_1} E(R,t,\alpha) \cdot R \cdot d\alpha + \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} E(R,t,\alpha) \cdot R \cdot d\alpha \quad (4.74)$$

Deoarece:

$$E(R,\alpha) = \frac{E_{11}(R) \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1)}{(r_0 + R \sin \alpha)} \quad \text{pentru } \alpha \in (0, \alpha_1) \quad (4.75)$$

$$E(R,\alpha) = \frac{E_{21}(R) \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1)}{(r_0 + R \sin \alpha)} \quad \text{pentru } \alpha \in (\alpha_1, \alpha_2) \quad (4.76)$$

Rezultă:

$$\begin{aligned} U_0 &= E_{11}(R,t) \cdot R \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1) \int_0^{\alpha_1} \frac{d\alpha}{r_0 + R \sin \alpha} + \\ &+ E_{21}(R,t) \cdot R \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1) \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{r_0 + R \sin \alpha} = \\ &= E_{11}(R,t) \cdot R \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1) \cdot \frac{\Delta_1}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} + \\ &+ E_{21}(R,t) \cdot R \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1) \cdot \frac{\Delta_2}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \quad (4.77) \end{aligned}$$

Intensitatea $E_{21}(R,t)$ devine:

$$E_{21}(R,t) = \frac{U_0}{S_2} = E_{11}(R,t) \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad (4.78)$$

În relația (4.78) s-au introdus notațiile: $\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0}$ (4.79)

$$\begin{aligned} S_1 &= \frac{R(r_0 + R \sin \alpha_1)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \cdot \Delta_1 = \frac{R(r_0 + R \sin \alpha_1)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_1 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_1}{r_0 + R \sin \alpha_2}} \\ S_2 &= \frac{R(r_0 + R \sin \alpha_1)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \cdot \Delta_2 = \frac{R(r_0 + R \sin \alpha_1)}{\sqrt{R^2 - r_0^2}} \ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - r_0^2}}{r_0 + R \sin \alpha_1}}{\frac{R + r_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - r_0^2} \cos \alpha_2}{r_0 + R \sin \alpha_2}} \quad (4.80) \end{aligned}$$

Ecuațiile (4.73) și (4.78) formează un sistem asemănător sistemului de ecuații (3.34) și (3.44), în care s-au făcut substituțiile:

$$D_1 \rightarrow S_1 \quad , \quad D_2 \rightarrow S_2 \quad (4.81)$$

Notațiile D_1 și D_2 au fost definite prin (3.42). Rezolvarea sistemului de ecuații (4.73) și (4.78) se poate face aplicând calculul

operational și introducând valorile câmpului în momentul inițial - precizate prin (4.69) și (4.72).

Soluțiile obținute sînt de formă similară cu (3.51), (3.52) și (3.53), rezultînd:

- constanta de timp a procesului tranzitoriu:

$$\theta_s = \frac{\epsilon_1 s_2 + \epsilon_2 s_1}{\sigma_1 s_2 + \sigma_2 s_1} \quad (4.82)$$

- variația în timp a intensității câmpului electric de o parte și de alta a suprafeței de separare a dielectricilor:

$$E_{11}(R,t) = \frac{(\epsilon_2 \sigma_1 - \epsilon_1 \sigma_2) \cdot s_2 \cdot U_0}{(\epsilon_1 s_2 + \epsilon_2 s_1)(\sigma_1 s_2 + \sigma_2 s_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_s}} + \frac{\sigma_2 \cdot U_0}{\sigma_1 s_2 + \sigma_2 s_1} \quad (4.83)$$

$$E_{21}(R,t) = \frac{(\epsilon_1 \sigma_2 - \epsilon_2 \sigma_1) \cdot s_1 \cdot U_0}{(\epsilon_1 s_2 + \epsilon_2 s_1)(\sigma_1 s_2 + \sigma_2 s_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_s}} + \frac{\sigma_1 \cdot U_0}{\sigma_1 s_2 + \sigma_2 s_1} \quad (4.84)$$

Intr-un punct oarecare din izolația conului deflector stratificat, câmpul electric se calculează cu relația:

$$E_1(R,t,\alpha) = \frac{E_{11}(R,t) \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1)}{(r_0 + R \sin \alpha)} \text{ pentru } \alpha \in (0, \alpha_1) \quad (4.85)$$

respectiv:

$$E_2(R,t,\alpha) = \frac{E_{21}(R,t) \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1)}{(r_0 + R \sin \alpha)} \text{ pentru } \alpha \in (\alpha_1, \alpha_2) \quad (4.85)$$

In varianta a doua a conului deflector (fig.4.14) compus dintr-o zonă cilindrică cu constantele de material ϵ_1 și σ_1 și o zonă conică caracterizată prin ϵ_2 și σ_2 .

Autorul tezei propune în calcul o reprezentare a spectrului liniilor de câmp electric prin arce de cerc cu centrul în O (fig.4.14) pentru dielectricul cu permitivitatea ϵ_2 și care se continuă prin linii drepte perpendiculare pe axa longitudinală a cablului în zona dielectricului cu permitivitatea ϵ_1 .

Suprafața de separare dintre cei doi dielectrici este o suprafață echipotențială. Un punct analizat în zona cilindrică poate fi localizat prin coordonatele R și α , iar un punct din zona cilindrică poate fi precizat prin coordonatele R și r.

Calculul începe cu determinarea intensităților câmpului electric de-o parte și de alta a suprafeței de separare a dielectricilor, la momentul inițial $t=0$.

Pentru un element infinitezimal "dR" care descrie o suprafață laterală de revoluție prin care fluxul electric este constant, rezultă:

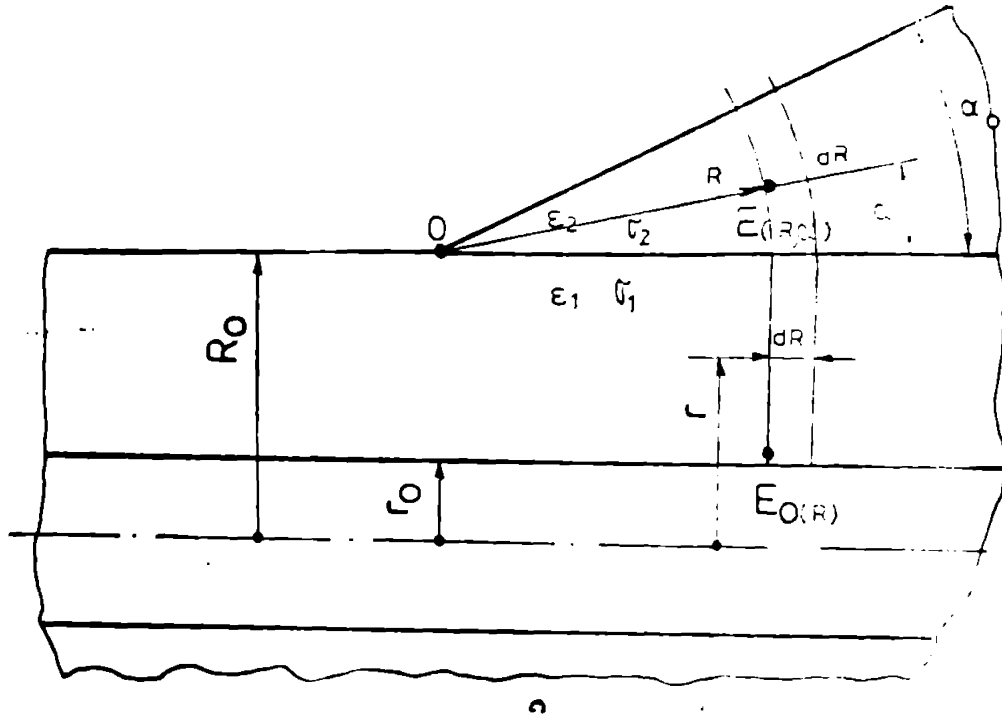


Fig.4.14. Con deflector din doi dielectrics în varianta a doua.

$$\oint_{\Sigma} \vec{D} \cdot d\vec{s} = \varepsilon_1 \cdot E_0(R) \cdot 2\pi r_0 \, dR - \varepsilon_1 \cdot E_{11}(R) \cdot 2\pi R_0 \, dR =$$

$$= \varepsilon_1 E_{11}(R) \cdot 2\pi R_0 \, dR - \varepsilon_2 \cdot E_2(R) \cdot 2\pi (R_0 + R \cdot \sin \alpha) \, dR = 0 \quad (4.87)$$

Rezultă:

- în dielectricul cu permitivitatea ε_1 :

$$E(r, R) = \frac{E_0(R) \cdot r_0}{r} = \frac{E_{11}(R) \cdot R_0}{r} \quad (4.98)$$

- în dielectricul cu permitivitatea ε_2 :

$$E(R, \alpha) = \frac{\varepsilon_1 E_{11}(R) \cdot R_0}{\varepsilon_2 (R_0 + R \sin \alpha)} = \frac{E_{21}(R) \cdot R_0}{(R_0 + R \sin \alpha)} \quad (4.99)$$

Diferența de potențial aplicată între electrozi este egală cu integrala de linie a intensității câmpului electric:

$$U_0 = \int_{r_0}^{R_0} E(r, r) \cdot dr + \int_0^{\alpha_2} E(R, \alpha) \cdot R \cdot d\alpha =$$

$$= E_0(R) \cdot r_0 \int_{r_0}^{R_0} \frac{dr}{r} + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} E_0(R) \cdot r_0 \cdot R \int_0^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{R_0 + R \sin \alpha} \quad (4.90)$$

În rezolvarea integralei din relația (4.90) pot să apară următoarele situații [93]:

- pentru $R < R_0$

$$\int_0^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{R_0 + R \sin \alpha} = \frac{2}{\sqrt{R_0^2 - R^2}} \left\{ \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R_0 - R}{R_0 + R}} - \operatorname{arctg} \left[\sqrt{\frac{R_0 - R}{R_0 + R}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_2}{2} \right) \right] \right\} \quad (4.91)$$

- pentru $R \geq R_0$:

$$\int_0^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{R_0 + R \sin \alpha} = \frac{2}{2\sqrt{R^2 - R_0^2}} \ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - R_0^2}}{R_0}}{R + R_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - R_0^2} \cos \alpha_2} \cdot \frac{R_0 + R \sin \alpha_2}{R_0 + R \sin \alpha_2} \quad (4.92)$$

Rezultă - pentru $R < R_0$:

$$E_0(R) = \frac{U_0}{r_0 \ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{2R \cdot r_0}{\sqrt{R_0^2 - R^2}} \left\{ \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R_0 - R}{R_0 + R}} - \operatorname{arctg} \left[\sqrt{\frac{R_0 - R}{R_0 + R}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_2}{2} \right) \right] \right\}} \quad (4.93)$$

și respectiv pentru $R > R_0$:

$$E_0(R) = \frac{U_0}{r_0 \ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \cdot \frac{R \cdot r_0}{\sqrt{R^2 - R_0^2}} \left(\ln \frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - R_0^2}}{R_0}}{R + R_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - R_0^2} \cos \alpha_2} \right) \frac{R_0 + R \sin \alpha_2}{R_0 + R \sin \alpha_2}} \quad (4.94)$$

intensitatea câmpului în dielectricul cu permitivitatea ϵ_1 la momentul $t=0$ se calculează cu relațiile: U_0 - pentru $R < R_0$:

$$E(R, r) = \epsilon_1 \left\{ \frac{1}{\epsilon_1} r \ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \frac{2R \cdot r}{\sqrt{R_0^2 - R^2}} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R_0 - R}{R_0 + R}} - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R_0 - R}{R_0 + R}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_2}{2} \right) \right] \right\} \quad (4.95)$$

- pentru $R > R_0$:

$$E(R, r) = \epsilon_1 \left\{ \frac{1}{\epsilon_1} r \ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \frac{R \cdot r}{\sqrt{R^2 - R_0^2}} \ln \left(\frac{\frac{R + \sqrt{R^2 - R_0^2}}{R_0}}{R + R_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - R_0^2} \cos \alpha_2} \right) \right\} \quad (4.96)$$

Intensitatea câmpului în dielectricul cu permitivitatea ϵ_2 , la momentul $t=0$, se calculează cu relațiile:

- pentru $R < R_0$:

$$E(R, \alpha) = \frac{U_0}{\epsilon_2 \left\{ \frac{1}{\epsilon_1} (R_0 + R \sin \alpha) \ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \frac{2R(R_0 + R \sin \alpha)}{\sqrt{R_0^2 - R^2}} \left[\operatorname{arctg} \dots \right] \right\}} \quad (4.97)$$

- pentru $R > R_0$:

$$E(R, \alpha) = \frac{U_0}{\epsilon_2 \left\{ \frac{1}{\epsilon_1} (R_0 + R \sin \alpha) \ln \frac{R_0}{r_0} + \frac{1}{\epsilon_2} \frac{R \cdot (R_0 + R \sin \alpha)}{\sqrt{R^2 - R_0^2}} \ln \dots \right\}} \quad (4.98)$$

Pentru o scriere mai compactă, se introduc notațiile (referitor la figura 4.14):

- pentru $R < R_0$:

$$T_1 = R_0 \ln \frac{R_0}{r} \quad (4.99)$$

$$T_2 = \frac{2 \cdot R \cdot R_0}{\sqrt{R_0^2 - R^2}} \left\{ \arctg \sqrt{\frac{R_0 - R}{R_0 + R}} - \arctg \left(\sqrt{\frac{R_0 - R}{R_0 + R}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_2}{2} \right) \right) \right\} \quad (4.100)$$

- pentru $R \geq R_0$:

$$W_1 = T_1 = R_0 \ln \frac{R_0}{r} \quad , \quad \frac{R + \sqrt{R^2 - R_0^2}}{R_0} \quad (4.101)$$

$$W_2 = \frac{R \cdot R_0}{\sqrt{R^2 - R_0^2}} \ln \frac{R_0}{R_0 + R_0 \sin \alpha_2 + \sqrt{R^2 - R_0^2} \cos \alpha_2} \quad (4.102)$$

Rezultă intensitățile câmpului la suprafața de separare a dielectricilor ($r=R_0$ și $\alpha=0$), la momentul inițial: - pentru $R < R_0$:

$$E_{11}(R) = \frac{U_0}{\varepsilon_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{T_2}{T_1} \right)} \quad (4.103)$$

$$E_{21}(R) = \frac{U_0}{\varepsilon_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{T_2}{T_1} \right)} \quad (4.104)$$

- pentru $R \geq R_0$:

$$E_{11}(R) = \frac{U_0}{\varepsilon_1 \left(\frac{W_1}{\varepsilon_1} + \frac{W_2}{\varepsilon_2} \right)} \quad (4.105)$$

$$E_{21}(R) = \frac{U_0}{\varepsilon_2 \left(\frac{W_1}{\varepsilon_1} + \frac{W_2}{\varepsilon_2} \right)} \quad (4.106)$$

Pentru a continua calculul cu determinarea variației în timp a intensităților câmpului de-o parte și de alta a suprafeței de separare a dielectricilor se impune condiția de continuitate a densității curentului de pierderi dielectrice:

$$E_{11}(R,t) \cdot \sigma_1 + \varepsilon_1 \frac{dE_{11}(R,t)}{dt} = E_{21}(R,t) \cdot \sigma_2 + \varepsilon_2 \frac{dE_{21}(R,t)}{dt} \quad (4.107)$$

Tensiunea aplicată între electrozi se poate exprima similar cu (4.74), rezultând: - pentru $R < R_0$:

$$U_0 = E_{11}(R,t) \cdot T_1 + E_{21}(R,t) \cdot T_2 \quad (4.108)$$

pentru $R \geq R_0$:

$$U_0 = E_{11}(R,t) \cdot W_1 + E_{21}(R,t) \cdot W_2 \quad (4.109)$$

Aplicând rezolvarea prin calcul operațional, rezultă soluțiile sistemului de ecuații diferențiale de o formă similară cu (3.51), (3.52) și (3.53):

$$\Theta_T = \frac{\varepsilon_1 T_2 + \varepsilon_2 T_1}{\sigma_1 T_2 + \sigma_2 T_1} \quad \text{- pentru } R < R_0; \quad (4.110)$$

$$E_{11}(R,t) = \frac{(\sigma_1 \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sigma_2) \cdot T_2 \cdot U_0}{(\varepsilon_1 T_2 + \varepsilon_2 T_1)(\sigma_1 T_2 + \sigma_2 T_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\Theta_T}} + \frac{\sigma_2 \cdot U_0}{\sigma_1 T_2 + \sigma_2 T_1} \quad (4.111)$$

$$E_{21}(R,t) = \frac{(\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1) \cdot T_1 \cdot U_0}{(\varepsilon_1 T_2 + \varepsilon_2 T_1)(\sigma_1 T_2 + \sigma_2 T_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\Theta_T}} + \frac{\sigma_1 \cdot U_0}{\sigma_1 T_2 + \sigma_2 T_1} \quad (4.112)$$

$$\Theta_W = \frac{\varepsilon_1 W_2 + \varepsilon_2 W_1}{\sigma_1 W_2 + \sigma_2 W_1} \quad \text{- pentru } R \gg R_0; \quad (4.113)$$

$$E_{11}(R,t) = \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2) \cdot W_2 \cdot U_0}{(\varepsilon_1 W_2 + \varepsilon_2 W_1)(\sigma_1 W_2 + \sigma_2 W_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\Theta_W}} + \frac{\sigma_2 \cdot U_0}{\sigma_1 W_2 + \sigma_2 W_1} \quad (4.114)$$

$$E_{21}(R,t) = \frac{(\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1) \cdot W_1 \cdot U_0}{(\varepsilon_1 W_2 + \varepsilon_2 W_1)(\sigma_1 W_2 + \sigma_2 W_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\Theta_W}} + \frac{\sigma_1 \cdot U_0}{\sigma_1 W_2 + \sigma_2 W_1} \quad (4.115)$$

Observație: o variantă care poate fi întâlnită în execuția conului deflector stratificat o constituie figura 4.15, care se deosebește de figura 4.14 prin faptul că deși dielectricul cu constantele ε_1 și σ_1 rămâne în forma unui perete cilindric, dielectricul cu constantele de material ε_2 și σ_2 are o zonă cilindrică și o a doua zonă după un anumit profil care poate fi liniarizat prin segmente tangente la profil (fig. 4.15).

Spectrul liniilor de câmp propus pentru calcul de către autorul tezei - îl constituie arce de cerc cu centrul în O și care se continuă cu segmente de dreaptă perpendiculare pe axe longitudinală a cablului.

Metoda de calcul prezentată în cazurile anterioare se poate aplica și în această variantă - cu următoarele notații (referitor la figura 4.15):

$$M_1 = r_1 \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (4.116)$$

$$M_2 = r_1 \ln \left(\frac{R_1}{r_1} \right) + \frac{r_1 \cdot R}{\sqrt{R^2 - R_1^2}} \ln \frac{(R + \sqrt{R^2 - R_1^2})(R_1 + R \sin \alpha_2)}{R_1 (R + R_1 \sin \alpha_2) \sqrt{R^2 - R_1^2} \cos \alpha_2} \quad (4.117)$$

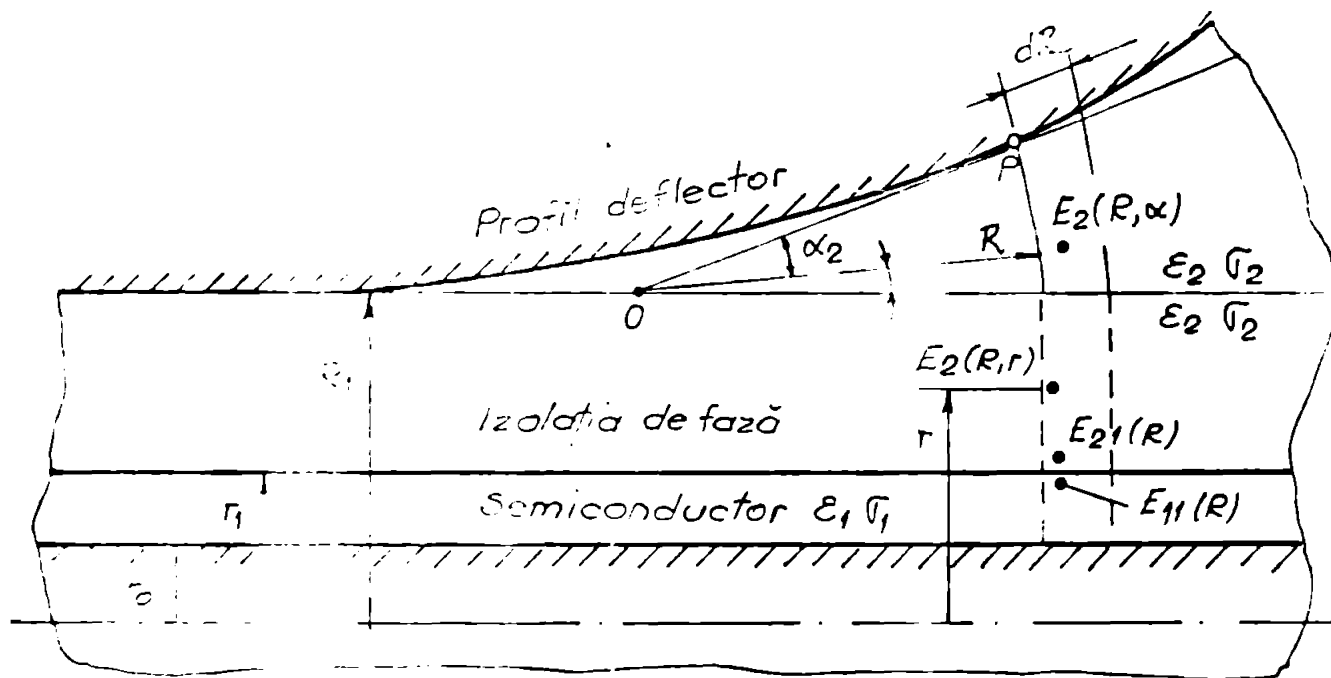


Fig.4.15. Profil deflector stratificat și liniarizat în punctul P (unghi α_2).

Notațiile (4.116) și (4.117) corespund cazului în care $R \gg R_1$. Cazul $R < R_1$ prezintă o importanță practică mai redusă, dar pentru care se pot introduce notațiile:

$$N_1 = r_1 \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (4.118)$$

$$N_2 = \frac{2 \cdot R \cdot r_1}{\sqrt{R_1^2 - R^2}} \left\{ \arctg \sqrt{\frac{R_1 - R}{R_1 + R}} - \arctg \left(\sqrt{\frac{R_1 - R}{R_1 + R}} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha_2}{2} \right) \right) \right\} \quad (4.119)$$

Valorile initiale ale câmpului electric de-o parte și de alta a suprafeței de separare rezultă (cazul $R > R_1$):

$$E_{11}(t=0, R) = \frac{U_0}{\epsilon_1 \left(\frac{M_1}{\epsilon_1} + \frac{M_2}{\epsilon_2} \right)} \quad (4.120)$$

$$E_{21}(t=0, R) = \frac{U_0}{\epsilon_2 \left(\frac{M_1}{\epsilon_1} + \frac{M_2}{\epsilon_2} \right)} \quad (4.123)$$

Variațiile în timp ale câmpului rezultă ca soluții ale sistemului de ecuații diferențiale scrise pentru condiția de continuitate a densității curentului de pierderi și din expresia diferenței de potențial între electrozi:

$$\theta_M = \frac{\epsilon_1 M_2 + \epsilon_2 M_1}{\sigma_1 M_2 + \sigma_2 M_1} \quad (4.124)$$

$$E_{11}(t, R) = \frac{(\epsilon_2 \sigma_1 - \epsilon_1 \sigma_2) M_2 \cdot U_0}{(\epsilon_1 M_2 + \epsilon_2 M_1)(\sigma_1 M_2 + \sigma_2 M_1)} \cdot \frac{1}{T_M} \cdot \frac{\sigma_2 \cdot U_0}{\sigma_1 M_2 + \sigma_2 M_1} \quad (4.125)$$

$$E_{21}(t,R) = \frac{(\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1) \cdot M_1 \cdot U_0}{(\varepsilon_1 M_2 + \varepsilon_2 M_1) (\sigma_1 M_2 + \sigma_2 M_1)} \cdot \frac{1}{T_M} + \frac{\sigma_1 \cdot U_0}{\sigma_1 M_2 + \sigma_2 M_1} \quad (4.126)$$

Câmpul electric dintr-un punct oarecare analizat poate fi calculat cu relațiile:

$$E_1(t,R,r) = \frac{E_{11}(t,R) \cdot r_1}{r} \quad \text{pentru } r \in [r_0, r_1] \quad (4.127)$$

$$E_2(t,R,r) = \frac{E_{21}(t,R) \cdot r_1}{(R_1 + R \sin \alpha)} \quad \text{pentru } r \in [r_1, R_2] \quad (4.128)$$

$$E_2(t,R,\alpha) = \frac{E_{21}(t,R) \cdot r_1}{(R_1 + R \sin \alpha)} \quad \text{pentru } \alpha \in [0, \alpha_2] \quad (4.129)$$

Relațiile (4.127) și (4.128) se referă la zona cilindrică, iar relație (4.129) - la zona profilului deflector liniarizat.

În concluzie a rezultat că aceeași metodă de calcul propusă de autorul tezei a putut fi aplicată în mai multe variante, făcând substituțiile:

D_1	-	notații introduse prin relațiile (3.42);	(4.130)
S_1	-	" " " " (4.79) și (4.80);	
T_1	-	" " " " (4.91) și (4.100);	
W_1	-	" " " " (4.101) și (4.102);	
M_1	-	" " " " (4.116) și (4.117);	
N_1	-	" " " " (4.118) și (4.119).	

4.6. CÂMPUL ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA PROFILULUI DEFLECTOR CU DOUA STRATURI DIELECTRICE, CU PIERDERI DIELECTRICE, LA APLICAREA TENSIUNII ALTERNATIVE.

Având ca punct de plecare metoda de calcul propusă de autorul tezei pentru izolație din zona cilindrică a cablului, la aplicarea tensiunii alternative subcapitolul 3.2 - se generalizează metoda și pentru izolație stratificată a profilului deflector liniarizat al cablului.

Principalele etape de calcul constau din: - precizarea tensiunii alternative aplicate și a intensităților câmpului la suprafața de separare a dielectricilor:

$$U = U_m \cdot e^{j\omega t} \quad (4.131)$$

$$E_{11}(R) = E_{11m}(R) \cdot e^{j\omega t} \quad (4.132)$$

$$E_{21}(R) = E_{21m}(R) \cdot e^{j\omega t} \quad (4.134)$$

- exprimarea, pe baza condiției de continuitate, a densității curentului de pierderi dielectrice la suprafața de separare dintre cei doi dielectrici:

$$(\sigma_1 + j\omega \epsilon_1) \cdot E_{1lm}(R) + \epsilon_1 \frac{dE_{1lm}(R)}{dt} = (\sigma_2 + j\omega \epsilon_2) \cdot E_{2lm}(R) + \epsilon_2 \frac{dE_{2lm}(R)}{dt} \quad (4.135)$$

- introducerea permitivităților și a expresiilor intensităților câmpului la momentul inițial (notațiile S_1 și S_2 se referă la figura 4.13):

$$\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 + j\omega \epsilon_1 \quad (4.136)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 + j\omega \epsilon_2 \quad (4.137)$$

$$E_{1lm}(R, t=0) = \frac{U_m}{\epsilon_1 \left(\frac{S_1}{\epsilon_1} + \frac{S_2}{\epsilon_2} \right)} \quad (4.138)$$

$$E_{2lm}(R, t=0) = \frac{U_m}{\epsilon_2 \left(\frac{S_1}{\epsilon_1} + \frac{S_2}{\epsilon_2} \right)} \quad (4.139)$$

- utilizarea calculului operațional în expresia tensiunii aplicate cablului:

$$E_{2lm}(R, p) = \frac{U_m}{p} \cdot \frac{1}{S_2} + E_{1lm}(R, p) \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad (4.140)$$

$$E_{1lm}(R, p) = \frac{U_m}{p} \cdot \frac{\bar{\sigma}_2 + p \cdot \epsilon_2}{p(\epsilon_1 S_2 + \epsilon_2 S_1)(\bar{\sigma}_1 S_2 + \bar{\sigma}_2 S_1)} \quad (4.141)$$

Prin descompunerea în fracții simple și aplicând transformările inverse calculului operațional rezultă soluțiile ca variații în timp ale intensității câmpului:

$$E_{1lm}(R, t) = \frac{(\epsilon_2 \bar{\sigma}_1 - \epsilon_1 \bar{\sigma}_2) \cdot S_2 \cdot U_m}{(\epsilon_1 S_2 + \epsilon_2 S_1)(\bar{\sigma}_1 S_2 + \bar{\sigma}_2 S_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_{01}}} + \frac{\bar{\sigma}_2}{\bar{\sigma}_1 S_2 + \bar{\sigma}_2 S_1} \cdot U_m \quad (4.142)$$

$$E_{2lm}(R, t) = \frac{(\epsilon_1 \bar{\sigma}_2 - \epsilon_2 \bar{\sigma}_1) \cdot S_1 \cdot U_m}{(\epsilon_1 S_2 + \epsilon_2 S_1)(\bar{\sigma}_1 S_2 + \bar{\sigma}_2 S_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_{01}}} + \frac{\bar{\sigma}_2 \cdot U_m}{\bar{\sigma}_1 S_2 + \bar{\sigma}_2 S_1} \quad (4.143)$$

$$\theta_{01} = \frac{\epsilon_1 S_2 + \epsilon_2 S_1}{\bar{\sigma}_1 S_2 + \bar{\sigma}_2 S_1} \quad (4.144)$$

Revenind la expresiile (4.133) și (4.134), se poate simplifica argumentul exponențialei:

$$-\frac{t}{\theta_{0j}} + j\omega t = -\frac{t}{\theta_0} \quad (4.145)$$

(θ_0 - exprimată prin relația 4.82).

$$E_{11}(R) = \frac{(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2) \cdot s_2 \cdot u_n}{(\varepsilon_1 s_2 + \varepsilon_2 s_1)(\bar{\sigma}_1 s_2 + \bar{\sigma}_2 s_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_0}} \cdot \frac{\bar{\sigma}_2 \cdot u_n \cdot e^{j\omega t}}{(\bar{\sigma}_1 s_2 + \bar{\sigma}_2 s_1)} \quad (4.146)$$

$$E_{21}(R) = \frac{(\varepsilon_1 \sigma_2 - \varepsilon_2 \sigma_1) \cdot s_1 \cdot u_n}{(\varepsilon_1 s_2 + \varepsilon_2 s_1)(\bar{\sigma}_1 s_2 + \bar{\sigma}_2 s_1)} \cdot e^{-\frac{t}{\theta_0}} \cdot \frac{\bar{\sigma}_1 \cdot u_n \cdot e^{j\omega t}}{(\bar{\sigma}_1 s_2 + \bar{\sigma}_2 s_1)} \quad (4.147)$$

Intensitățile câmpului nu variază în fază cu tensiunea aplicată, iar în expresiile (4.146) și (4.147) se pot separa termeni reali și termeni imaginari de forma prezentată în expresia (3.98) și figura 3.10.

Pentru alte variante în execuția profilului deflector se pot aplica substituțiile menționate în relația (4.130).

Intr-un punct oarecare analizat din izolația profilului deflector linearizat din figura 4.13, se poate calcula variația intensității câmpului electric cu relațiile:

$$E_1(R, \alpha) = \frac{E_{11}(R) \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1)}{(r_0 + R \sin \alpha)} \quad \text{pentru } \alpha_E(0, \alpha_1) \quad (4.148)$$

$$E_2(R, \alpha) = \frac{E_{21}(R) \cdot (r_0 + R \sin \alpha_1)}{r_0 + R \sin \alpha} \quad \text{pentru } \alpha_E(\alpha_1, \alpha_2) \quad (4.149)$$

4.7. REZULTATE OBTINUTE PRIN CALCUL ȘI VERIFICARI EXPERIMENTALE IN LABORATORUL DE ÎNALTA TENSIUNE DIN IPTV TIMISOARA.

Autorul tezei a calculat profilele deflectoare pentru un cablu criorezistiv experimental de 20 kV (150), pentru un cablu de 110 kV cu izolația din polietilenă reticulată chimic și pentru un cablu experimental de 20 kV cu izolație din polietilenă normală. Valorile calculate pentru al treilea cablu menționat au fost utilizate pentru execuția profilelor de întărire și de reducere a izolației în zonele de capăt ale cablului. Caracteristicile și o parte din încercările experimentale efectuate pe acest cablu de 20 kV au fost prezentate în paragraful 3.5.1 al tezei.

Calculul profilelor deflectoare a fost efectuat în limbaj BASIC pe un calculator tip AMIC, iar programele de calcul elaborate de autorul tezei sînt prezentate în Anexa 8. Profilul de reducere (Anexa 8.2) a fost calculat pe baza relației (4.68). În ambele programe - utilizatorul poate face opțiuni asupra pasului de calcul și pentru numărul de puncte calculate.

In tabelele 4.2 și 4.3 se prezintă rezele calculate pentru profilul de reducere și respectiv pentru profilul de întărire a izolației la o variantă de izolator terminal al unui cablu criogenic experimental studiat în cadrul ICPE (114), (150).

Tabelul 4.2. Profil de reducere a izolației din PE pentru cablul criogenic experimental de 20 kV ($r_0 = 0,88$ cm, $R_1 = 2,051$ cm, $U_1 = 12$ kV_{ef}).

x (cm)	$R(x)$ (cm)			
	$g_t = 0,8 \frac{kV}{cm}$ *	$g_t = 1 \frac{kV}{cm}$	$g_t = 1,2 \frac{kV}{cm}$	$g_t = 1,5 \frac{kV}{cm}$
1	0,931	0,944	0,957	0,978
2	0,985	1,113	1,042	1,087
3	1,042	1,087	1,134	1,208
4	1,102	1,166	1,234	1,343
5	1,166	1,251	1,343	1,493
6	1,234	1,343	1,462	1,659
7	1,306	1,441	1,591	1,845
8	1,381	1,546	1,731	2,050
9	1,462	1,659	1,884	2,279
10	1,546	1,781	2,050	2,534
11	1,636	1,911	2,232	2,816
12	1,731	2,050	2,429	3,131
13	1,832	2,200	2,643	3,480
14	1,938	2,361	2,877	3,868
15	2,050	2,534	3,131	4,300

Tabelul 4.3. Profil de întărire a izolației din PE pentru cablul criogenic experimental de 20 kV ($r_0 = 0,88$ cm, $R_0 = 2,051$ cm, $U_1 = 12$ kV_{ef}).

1	2 *	3	4	5
1	2,174	2,207	2,241	2,295
2	2,314	2,391	2,473	2,608
3	2,473	2,608	2,757	3,014
4	2,656	2,866	3,109	3,551
5	2,866	3,176	3,551	4,275
6	3,109	3,551	4,112	5,277
7	3,392	4,008	4,836	6,699
8	3,723	4,573	5,785	8,778
9	4,112	5,277	7,052	11,923
10	4,573	6,166	8,778	16,870

Valoarea gradientului longitudinal g_t trebuie să fie mai mică sau egală cu a zecea parte din intensitatea maximă a câmpului electric care apare la suprafața conductorului (114), (115):

$$g_t \ll \frac{E_{max}}{10} \quad (4.150)$$

$$E_{max} = 15,5 \frac{kV}{cm} \text{ pentru } U_1 = 20 \sqrt{3} \text{ kV.} \quad (4.151)$$

In figura 4.16 se prezintă capătul terminal pentru cablul criogenic experimental de 20 kV.

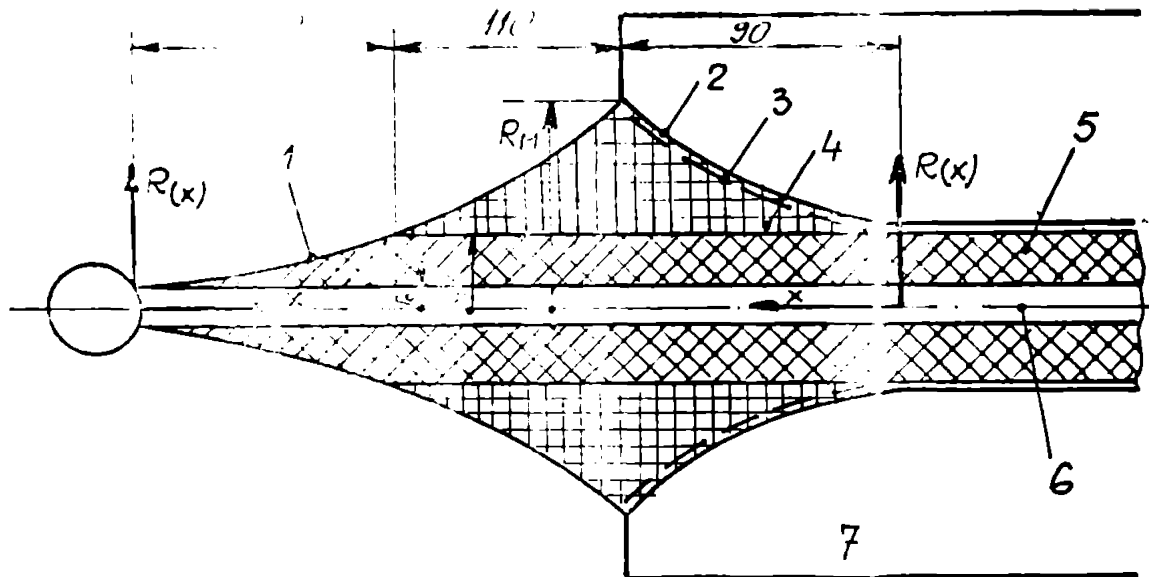


Fig.4.16. Cablu criorezistiv experimental de 20 kV:

- 1 - profilul de reducere a izolației; 2 - profilul de întărire a izolației (profil deflector acoperit cu ecran metalic);
- 3 - ecran semiconductor; 4 - izolația suplimentară; 5 - izolația de fază; 6 - conductorul central la înaltă tensiune;
- 7 - criostat.

Profilele calculate cu $g_t = 0.8$ și $U_1 = 12$ kV sînt identice cu profilele calculate cu $g_t = 3.3$ kV/cm și $U_1 = 50$ kV, din condiția rezultantă din relația (4.59):

$$\exp \left[\frac{x \cdot g_t \cdot \ln \frac{R_1}{r_0}}{U_1} \right] = \text{constant} \quad (4.152)$$

Acest caz corespunde încercării pentru verificarea securității dielectrice timp de 24 ore la tensiunea de încercare [79 pag.23]:

$$U_{inc} = 2.5 \cdot U_n = 50 \text{ kV}_{ef}. \quad (4.153)$$

Gradientul longitudinal corespunde intensității cîmpului de conturnare în stare ucată la 50 Hz [106 pag.93]:

$$g_t = 4.3 \div 3.3 \frac{\text{kV}}{\text{cm}} \quad (4.154)$$

Abscisa x_{max} rezultată din relația de calcul a profilului de reducere a izolației (4.59) are valoarea:

$$R_{x_{max}} = R_1 = r_0 \exp \left[\frac{x_{max} \cdot g_t \cdot \ln \frac{R_1}{r_0}}{U_{inc}} \right]. \quad (4.155)$$

$$\frac{x_{max} \cdot g_t}{U_{inc}} = \frac{\ln \frac{R_1}{r_0}}{\ln \frac{R_1}{r_0}} = 1.$$

$$x_{max} = 15.15 \text{ cm} \ll 26 \text{ cm (fig.4.16)}.$$

O verificare similară se poate efectua pentru tensiunea de încercare la impuls $U_{imp} = 125$ kV [80 pag.54] a cablului de 20 kV și pentru gradientul longitudinal g_t egal cu intensitatea minimă a cîmpului de conturnare la impuls $g_t = 7 \div 5.6$ kV/cm [106 pag.93]. Din (4.155) :

$$x_{\max} = \frac{U_{1\text{imp}}}{g_t} = 22,3 \text{ cm} < 26 \text{ cm (fig.4.15)} \quad (4.15')$$

Intensitatea cîmpului electric scade progresiv în profilul deflector de întărire a izolației. În figura 4.17 sînt precizate punctele O_A , B, C și D în care au fost calculate intensitățile cîmpului electric prin mai multe metode prezentate în cadrul acestui capitol.

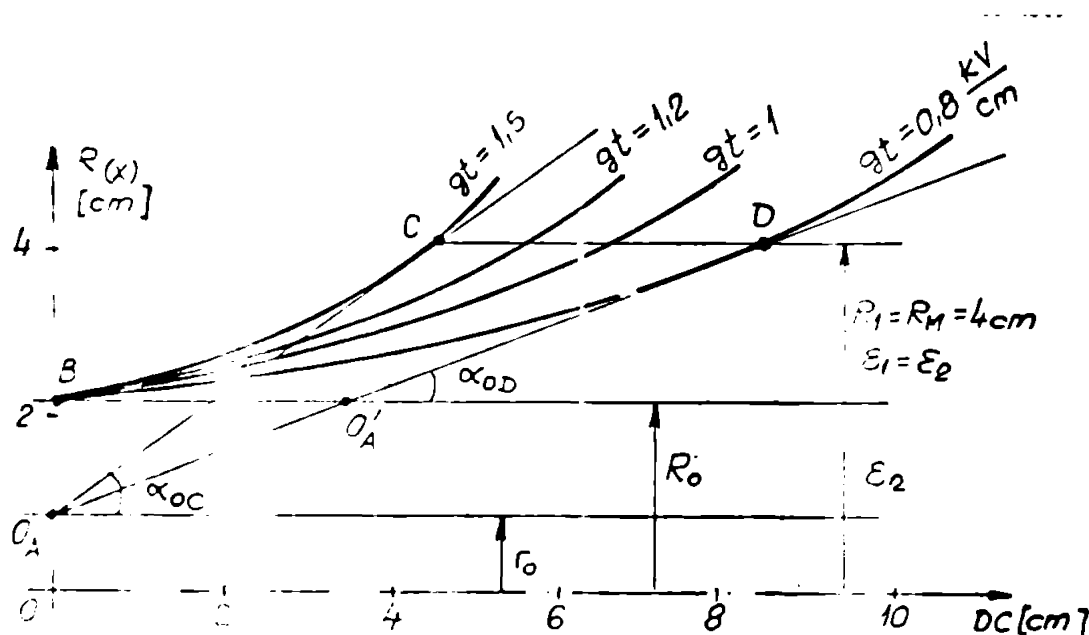


Fig.4.17. Profile deflectoare calculate.

Tabelul 4.4 conține valorile calculate ale intensității cîmpului electric pentru $U_1 = 20 / \sqrt{3} \text{ kV}_{\text{ef}}$, cu precizarea relațiilor de calcul utilizate (15 o):

Tabelul 4.4. Intensități ale cîmpului electric ($\text{kV}_{\text{ef}}/\text{cm}$).

Punctul	Relația de calcul			Alte valori
	(4.40)	(4.69)	(4.96)	
O_A	15,50	-	-	-
B	6,25	-	-	-
C	1,91	1,83	1,86	$E_1 = E_2$ $x = 4,5 \text{ cm}$, $R = 5,5 \text{ cm}$
D	1,91	1,98	1,89	$x = 8,4 \text{ cm}$, $R = 8,96 \text{ cm}$ $x = 5,25 \text{ cm}$, $R = 5,6 \text{ cm}$

Rezultatele obținute sînt apropiate, dar utilizarea noilor relații propuse (4.63) și (4.96) prezintă avantajul unei precizii mai bune prin faptul că spectrul liniilor de cîmp considerat este mai apropiat de situația reală, în comparație cu relația clasică (4.40) - în care se consideră spectrul radial și pentru profilul deflector.

Relațiile (4.69) și (4.96) permit și o tratare mai generală - pentru situația în care izolația ar fi realizată din straturi cu permittivități și conductivități electrice diferite.

Plecind de la dimensiunile constructive ale unui cablu de 110 kV cu izolația din polietilenă reticulată chimic XLPE (55), (75), autorul tezei a calculat profilele de reducere și de întărire a izolației pentru mai multe valori ale gradientilor longitudinali g_t . Valorile calculate sînt prezentate în tabelele 4.5 și 4.6.

Tabelul 4.5. Profil de reducere a izolației din XLPE pentru cablul de 110 kV ($r_0=1,4$ cm, $R_1=2,7$ cm, $U_1=64$ kV).

x [cm]	$R(x)$ [cm]				
	$g_t=1 \frac{kV}{cm}$	$g_t=3 \frac{kV}{cm}$	* $g_t=5 \frac{kV}{cm}$	$g_t=7 \frac{kV}{cm}$	$g_t=10 \frac{kV}{cm}$
1	2	3	4	5	6
1	1,414	1,443	1,473	1,504	1,550
2	1,429	1,488	1,551	1,616	1,718
3	1,443	1,453	1,632	1,736	1,904
4	1,458	1,583	1,718	1,866	2,110
5	1,473	1,632	1,809	2,005	2,338
6	1,488	1,684	1,904	2,154	2,591
7	1,504	1,736	2,005	2,314	2,871
8	1,519	1,790	2,110	2,487	3,181
9	1,535	1,846	2,221	2,672	3,525
10	1,551	1,904	2,338	2,871	3,906

Tabelul 4.6. Profil de întărire a izolației din XLPE pentru cablul de 110 kV ($r_0=1,4$ cm, $R_0=2,7$ cm, $g_{tadoptat}=5$ kV/cm).

1	2	3	* 4	5	6
1	2,728	2,786	2,848	2,912	3,017
2	2,756	2,880	3,017	3,170	3,435
3	2,786	2,981	3,211	3,484	3,998
4	2,816	3,091	3,435	3,871	4,775
5	2,848	3,211	3,695	4,354	5,876
6	2,880	3,341	3,998	4,965	7,490
7	2,912	3,484	4,354	5,747	9,946
8	2,946	3,640	4,775	6,766	13,857
9	2,981	3,811	5,276	8,118	20,420
10	3,017	3,998	5,876	9,946	32,129

Deoarece intensitatea maximă a câmpului electric pe suprafața conductorului la tensiunea de 64 kV_{ef} este $E_{max} = 69,603 \frac{kV}{cm}$, din condiția (4.150) rezultă:

$$g_t \leq \frac{E_{max}}{10} = 6,96 \frac{kV}{cm} \quad (4.157)$$

Valoarea gradientului longitudinal g_t trebuie să fie mai mică decît intensitățile minime ale câmpului care permite apariția fenomenului de conturare (tabelul 4.7) (106, pag.93):

Tabelul 4.7. Valori medii ale cimpului de conturnare.

Nr. crt.	$E_{\text{conturnare}}$	Obs.
1	2,6...2,3 $\frac{\text{kV}_{\text{ef}}}{\text{cm}}$	- conturnare in stare umedă la 50 Hz;
2	4,3...3,3 $\frac{\text{kV}_{\text{ef}}}{\text{cm}}$	- conturnare in stare uscată la 50 Hz;
3	7,0...5,6 $\frac{\text{kV}_{\text{max}}}{\text{cm}}$	- conturnare la impulsuri (+)
4	7,0...6,5 $\frac{\text{kV}_{\text{ef}}}{\text{cm}}$	- conturnare in ulei la 50 Hz;
5	11,0...9,4 $\frac{\text{kV}_{\text{max}}}{\text{cm}}$	- conturnare la undă de impuls tăiată (2 μs).

In scopul reducerii dimensiunilor de gabarit, zonele de capăt ale cablului se introduc in izolatoare pentru cutii terminale (fig. 4.18). In functie de natura fluidului dielectric cu care se umple izolatorul se pot adopta valori mai ridicate pentru gradientul longitudinal g_t . Cotele indicate in figura 4.18 corespund unui gradient $g_t = 5 \text{ kV/cm}$, cu intercalarea unei zone cilindrice de rezervă a izolației care asigură o linie de fugă mai mare pe suprafața izolației între electrodul la înaltă tensiune și ecranul de cupru legat la pământ.

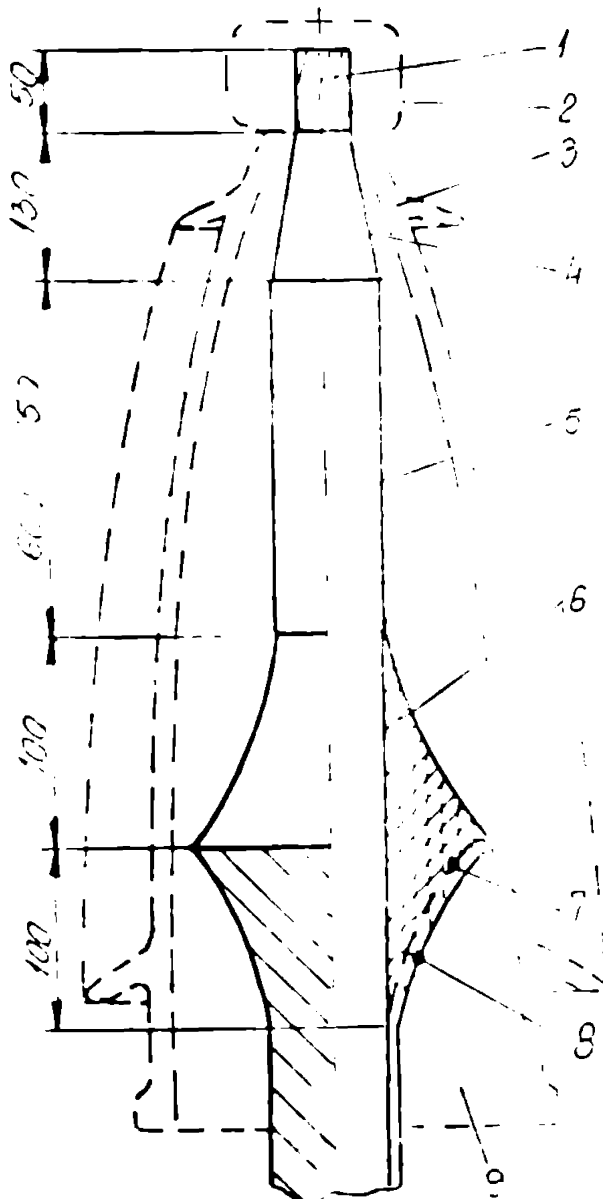


Fig.4.18. Cablu de 110 kV:

- 1 - conductorul din Al;
- 2 - electrod la înaltă tensiune;
- 3 - izolator;
- 4 - profil de reducere a izolației din XLPE;
- 5 - zonă cilindrică a izolației de fază din XLPE;
- 6 - profil de întărire necoperit cu ecran de cupru;
- 7 - ecran semiconductor între izolație și ecranul de cupru;
- 8 - ecran de cupru; în zonă profilului deflector;
- 9 - fluid dielectric de umplere a izolatorului.

Execuția profilelor defletoare prin înfășurarea manuală a benzilor din materiale electrotehnice implică o manoperă importantă și un consum ridicat de materiale. Pentru încercarea unui cablu cu tensiune înaltă este necesară execuția profilelor defletoare sau montarea unor cutii terminale la ambele capete ale cablului. În scopul creșterii operativității în pregătirea cablurilor pentru încercări, în laboratoarele firmei Pirelli-Italia [74] se practică introducerea capetelor de cablu în cutii terminale din tuburi de plexiglas prin care circulă apă demineralizată sub presiune. Un procedeu special a fost elaborat în laboratoarele ICPE-București [96], unde prin introducerea în cutia terminală conică din material electroizolant - a unui lichid cu o rezistivitate de o anumită valoare în funcție de tipul tensiunii aplicate (impuls, continuă sau alternativă) se obține o distribuție cât mai uniformă a intensității câmpului electric în cutia terminală a cablului.

Autorul tezei a executat profilele defletoare pentru un eșantion de cablu experimental de 20 kV, din setul de materiale pentru manșoane și cutii terminale la cabluri de 20 kV. Benzile electroizolante și benzile semiconductoare din setul de materiale utilizat cu caracteristicile prezentate în tabelul 3.1 din teză.

Pe parcursul execuției profilelor de reducere și de întărire a izolației, acestea au fost verificate cu ajutorul unor șabloane corespunzătoare curbilor calculate.

În tabelele 4.8, 4.9 și 4.10 se prezintă profilele calculate pentru cablul de 20 kV. Cablul are izolația stratificată: izolația principală din polietilenă normală PE și o manta din PVC - între cele două ecrane din bandă de cupru.

Raza maximă a profilelor de întărire a izolației a rezultat din condiția de scădere la jumătate a intensității maxime a câmpului electric din zona profilului deflector, în comparație cu intensitatea maximă a câmpului din zona cilindrică a cablului - considerând întreaga tensiune aplicată pe stratul analizat. A rezultat: $R_{MPE} = 2,7$ cm și respectiv $R_{M,PVC} = 2,3$ cm.

În scopul asigurării unei rezerve de izolații a fost intercalată o zonă cilindrică de 800 mm pentru izolația din PE (fig.4.19 - poziția 3) și o zonă cilindrică de 400 mm pentru mantaua din PE (fig.4.19 - poziția 7).

Prin încercări experimentale în LIT, autorul tezei a determinat valoarea intensității minime a câmpului electric pentru apariția fenomenului de conturare pe izolația din PE a cablului - în stare uscată în plaja de valori $E_c = 4...2$ kV_{ef}/cm, care depinde și de starea suprafeței izolației.

Tabelul 4.8. Profil de reducere a izolației din PE pentru cablul de 20 kV ($r_0=0,72$ cm, $R_1=1,4$ cm, $E_{\max} = \frac{25,063}{l_0} \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$).

x (cm)	$R(x)$ (cm)			
	$g_t = 1$ kV/cm	$g_t = 2$ kV/cm	* $g_t = 2,5$ kV/cm	$g_t = 3$ kV/cm
1	0,761	0,804	0,826	0,850
2	0,804	0,898	0,949	1,003
3	0,850	1,003	1,091	1,185
4	0,898	1,121	1,253	1,399
5	0,949	1,253	1,439	1,653
6	1,003	1,399	1,653	1,952
7	1,061	1,564	1,898	2,305
8	1,121	1,747	2,181	2,722
9	1,185	1,952	2,505	3,214
10	1,253	2,181	2,877	3,795
11	1,324	2,436	3,304	4,482
12	1,399	2,722	3,795	5,293
13	1,479	3,041	4,359	6,250
14	1,564	3,397	5,007	7,381
15	1,653	3,795	5,751	8,715

Tabelul 4.9. Profil de întărire a izolației din PE pentru cablul de 20 kV ($r_0=0,72$ cm, $R_0=1,4$ cm, $U_1=12$ kV).

x (cm)	$R(x)$ (cm)					
	$g_t=0,5$ kV/cm	* $g_t=0,6$ kV/cm	$g_t=1$ kV/cm	$g_t=2$ kV/cm	$g_t=2,5$ kV/cm	$g_t=3$ kV/cm
1	1,440	1,448	1,483	1,579	1,633	1,691
2	1,483	1,501	1,579	1,821	1,974	2,155
3	1,529	1,559	1,691	2,155	2,493	2,942
4	1,579	1,622	1,821	2,629	3,325	4,388
5	1,633	1,699	1,974	3,325	4,739	7,333
6	1,691	1,766	2,155	4,388	7,333	14,178
7	1,753	1,849	2,370	6,091	12,554	33,054
8	1,821	1,941	2,629	8,972	24,341	98,006
9	1,894	2,042	2,942	14,178	55,019	393,681
10	1,974	2,155	3,325	24,341	115,211	2374,520
11	2,060	2,279	3,798	-	-	-
12	2,155	2,418	4,388	-	-	-
13	2,258	2,573	5,135	-	-	-
14	2,370	2,747	6,091	-	-	-

În scopul asigurării unei rezerve mai mari pentru nivelul de izolație al cablului experimental fără a se folosi izolatoare pentru cutiile terminale, a fost mărită linia de fugă pe suprafața izolației între conductorul central și cele două ecrane de cupru. Astfel a fost intercalată o zonă cilindrică de 800 mm pentru izolația din PE (fig. 4.19 - poziția 3) și o zonă cilindrică de 400 mm pentru manta din PE (fig. 4.19 - poziția 7).

Fig. 4.10. Profil de întărire a mantalei din PVC pentru cablul de 20 kV ($r_0 = 1,4$ cm, $R_0 = 1,8$ cm, în varianta $U_1 = 12$ kV).

/ *	$R(x)$ (cm)			
	$g_t = 0,9 \frac{kV}{cm}$	$g_t = 1 \frac{kV}{cm}$	$g_t = 2 \frac{kV}{cm}$	$g_t = 4 \frac{kV}{cm}$
	1,835	1,839	1,883	1,988
	1,874	1,883	1,988	2,284
	1,917	1,933	2,118	2,772
	1,965	1,988	2,284	3,632
	2,018	2,049	2,496	5,296
	2,076	2,118	2,772	8,966
	2,141	2,196	3,137	18,691
	2,213	2,284	3,632	52,110
	2,293	2,383	4,317	217,946
	2,383	2,496	5,296	1605,520

În figura 4.19 se prezintă detalii privind execuția profilelor deflectoare pentru zonele de capăt ale cablului de 20 kV.

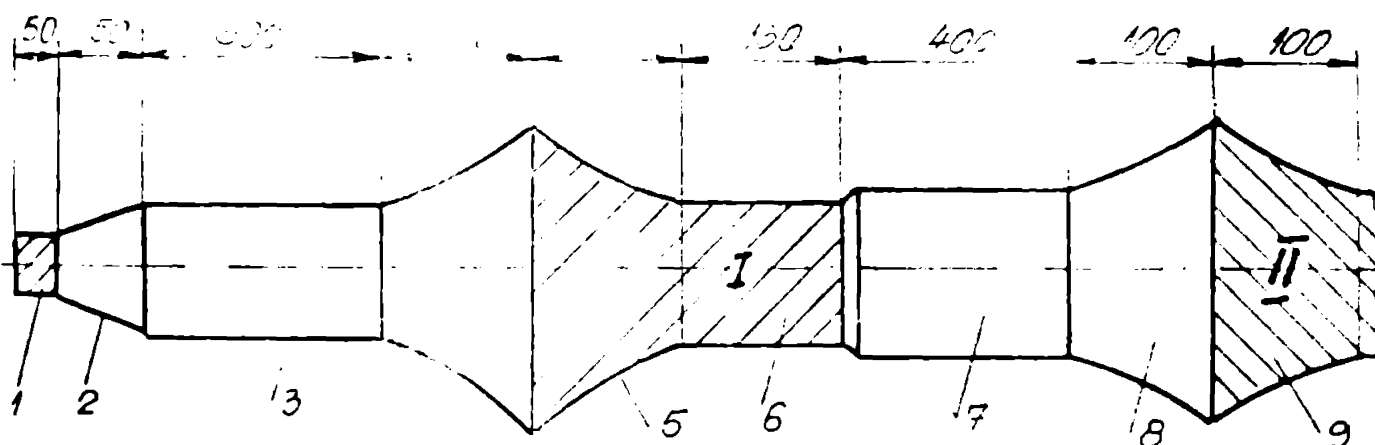


Fig. 4.19. Cablu de 20 kV: 1 - conductorul din Al; 2 - profil de reducere a izolației din PE; 3 - zona cilindrică a izolației de fază din PE; 4 - profil de întărire neacoperit cu ecran de cupru; 5 - profil de întărire a izolației din PE ecranat cu bandă de cupru (profilul deflector al primului ecran de cupru); 6 - zonă cilindrică ecranată; 7 - manta din PVC - zonă cilindrică; 8 - profil de întărire a mantalei din PVC neacoperit cu ecran de cupru; 9 - profil de întărire al mantalei din PVC ecranat cu bandă de cupru (profilul deflector al celui de-al doilea ecran de cupru legat la masă).

În zona ecranată a profilelor deflectoare de întărire a izolației, peste izolația din PE și respectiv din PVC, s-a înfășurat bandă în pinză semiconductoră cu suprapunere de 50%, peste care s-a înfășurat ecranul din bandă de cupru, consolidat prin spirale din sîrmă Cu $\varnothing 1,4$ mm - fixate prin cositorire. Dacă în locul benzilor din bandă de cupru se utilizează benzi din țesătura de alamă sau cupru, se obține o mulare mai bună a acestora pe suprafața profilului deflec-

tor care trebuie executat.

Eșantionul de cablu de 20 kV a fost încercat cu tensiune înaltă aplicându-se următoarele tensiuni de încercare [70], [71], [80]:

- tensiune continuă: 80 kV și 100 kV;
- tensiune alternativă: 50 kV_{ef};
- tensiune de impuls: 125 kV.

În timpul încercărilor cu tensiune înaltă nu s-au observat străpungeri sau conturnări, cablul a rezistat la solicitările electrice. Repartiția tensiunii pe stratul din PE și PVC a fost măsurată, iar rezultatele au fost prezentate în capitolul 3 al tezei.

În zonele pr_ofilelor deflectoare dimensionate corespunzător, intensitatea cîmpului electric scade progresiv, evitînd amorsarea unei străpungeri sau conturnări.

Metodele de calcul elaborate și prezentate în acest capitol permit atât o dimensionare optimă a profilelor deflectoare, cît și determinarea mai precisă a solicitării materialelor utilizate pentru execuția profilelor deflectoare.

În aplicațiile numerice efectuate se observă o apropiere a profilelor deflectoare de conuri deflectoare - pentru valori mici ale gradientilor longitudinali. Se justifică procedeul aplicat în cazul cablurilor de medie tensiune, pentru care normativele prevăd execuția de conuri deflectoare - care constituie varianta liniarizată a profilelor deflectoare. În cazul cablurilor de înaltă tensiune se utilizează valori mai ridicate pentru gradientii longitudinali, iar materialele utilizate pentru execuția acestora, trebuie să fie de calitate superioară și să reziste la aceste solicitări electrice mai mari. În fabricarea materialelor electrotehnice din țara noastră există preocupări pentru lărgirea gamei sortimentale cît și pentru continua ridicare a performanțelor acestora [57], [109], [110], [120]. În acest context, prin continuarea cercetărilor și încercărilor experimentale în domeniul cablurilor de înaltă tensiune și mare putere, se vor putea introduce în fabricație în țara noastră - cabluri cu tensiuni nominale tot mai mari, care să înlocuiască importurile.

C a p i t o l u l 5.

CONCLUZII GENERALE.

Tendențele actuale de dezvoltare a liniilor electrice în cablu impun studii și cercetări din ce în ce mai largi în vederea proiectării și exploatarea acestora. Obiectul tezei se referă la metode de calcul al solicitării izolației cablurilor de înaltă tensiune și mare putere, acordându-se o atenție deosebită atât solicitării termice, cât și solicitării electrice a cablurilor. În tratarea regiunii termice s-au evidențiat aspecte specifice atât pentru cablurile cu răcire naturală, cât și pentru cablurile cu răcire forțată. Solicitarea electrică a fost analizată amănunțit prin calculul repartiției cimpului electric atât pentru zona cilindrică, cât și pentru zona profilului deflector al cablurilor.

Studiile și cercetările efectuate de autorul tezei au condus la următoarele rezultate și contribuții originale:

a) Au fost analizate sintetic: evoluția, caracteristicile, problemele specifice, stadiul actual al cercetărilor și dotarea laboratoarelor de încercări în domeniul cablurilor;

b) Au fost studiate și prezentate într-o încadrare unitară și sintetică principalele metode de calcul ale regiunii termice al cablurilor;

c) S-au modelat pe calculator analogic diferite regimuri termice ale unor cabluri cu răcire naturală fabricate în țară;

d) S-au calculat cu ajutorul unor programe întocmite pentru calculator numeric rezistențele termice, căderile de temperatură pe diferite straturi ale cablurilor și curenții de încălzire în regim de durată pentru cablurile pregătite în vederea încercării la impuls în laboratorul de înaltă tensiune din ICPE-București - rezultatele fiind valorificate în cadrul unui contract de cercetare (152);

e) S-a amenajat un stand de încercări privind solicitarea termică a cablurilor în cadrul Laboratorului de Modele pentru TTI din IPTV Timișoara și s-a înaintat o propunere de invenție (159), privind o nouă metodă de determinare a temperaturii conductoarelor cablurilor fără străpungerea izolației acestora;

f) S-au dedus ecuațiile de bilanț termic și s-au modelat atât pe calculator analogic, cât și pe calculator numeric (144), (145), diferite regimuri termice pentru un cablu de înaltă tensiune și mare putere cu răcire forțată;

g) S-a elaborat o metodă generală de calcul a câmpului electric în izolație stratificată din zone cilindrică a cablurilor, în regim tranzitoriu [142] - relațiile noi de calcul s-au putut particulariza atât pentru regimul inițial, cât și pentru regimul de echilibru staționar și au verificat relațiile clasice din literatura de specialitate;

h) S-a conceput o metodă de calcul a câmpului electric în izolația din trei straturi a unui cablu, la aplicarea unei tensiuni continue sau alternative și care a fost rezolvată prin modelare, atât pe calculator analogic, cât și pe calculator numeric [146], [147];

i) S-au propus metode de calcul al câmpului electric în izolația conului deflector al cablurilor cu un singur dielectric sau cu mai mulți dielectrici, în ipoteza în care acești dielectrici sînt ideali, fără pierderi dielectrice [148];

j) S-au dedus relațiile de calcul pentru profilul de reducere a izolației și pentru profilul deflector de întărire a izolației pînă care se asigură o repartitie cât mai uniformă a intensității câmpului electric în manșoanele de joncțiune și în cutiile terminale ale cablurilor de înaltă tensiune [150];

k) S-au conceput metode generale pentru calculul intensității câmpului în proces tranzitoriu, în profilul deflector liniarizat al cablurilor, pentru mai multe variante de execuție, considerînd dielectricii reali - adică introducînd în calcul nu numai permitivitățile, ci și conductivitățile electrice ale acestora [142], [149], [158];

l) S-a executat un eșantion de cablu experimental cu izolația stratificată și cu profile deflectoare corespunzătoare, care a fost utilizat la încercările cu tensiune înaltă în Laboratorul de înaltă tensiune din I.P.T.V. Timișoara.

Încercările experimentale au fost efectuate pentru a verifica atât metodele de calcul privind solicitarea termică, cât și metodele de calcul privind solicitarea electrică a cablurilor, iar rezultatele obținute au fost în bună concordanță. Încercările au fost efectuate în Laboratorul de înaltă tensiune și în Laboratorul de Modele pentru TTI din Institutul politehnic "Traian Vuia" Timișoara.

Încercările cablurilor fiind foarte costisitoare, un rol important l-a avut posibilitatea de a modela pe calculator analogic și pe calculator numeric diversele regimuri privind atât solicitarea termică cât și solicitarea electrică a izolației cablurilor. S-au obținut rezultate privind: valorile temperaturilor în diferite puncte pentru cablurile din fabricația curentă a ICME București, răcirea forțată a unui cablu de 225 kV, variația intensității câmpului electric în izolația unui cablu de 110 kV și în izolația stratificată a eșantionului de cablu experimental.

Metodele de calcul elaborate în cadrul tezei contribuie la aprofundarea fenomenelor de solicitare termică și electrică în izolația stratificată a cablurilor, permit o analiză a nivelelor de solicitare pentru materialele electrotehnice cu caracteristici diferite în vederea optimizării dimensionării cablurilor și a joncțiunilor acestora și reprezintă o bază în continuarea cercetărilor în vederea introducerii în fabricație în țara noastră a cablurilor de mare putere și cu tensiuni nominale mai mari.

A n e x a 1 .

Tabelul A.1.1. Parametrii cablurilor de 10-60 kV [40].

Nr. crt	Mărimea	Tip de cablu			
		10 kV 1x150 mm ² N izolat	20 kV ² 3x150 mm ² N izolat	30 kV ² 3x150 mm ² N $\frac{1}{3}$	60 kV ² 3x150 mm ² N $\frac{1}{3}$
1	P transmisă [MVA]	6	11,5	17	34
2	I adm [A]	340	220	320	320
3	Rezistența la 50°C; [Ω/km]	0,13	0,13	0,13	0,13
4	Inductanța [mH/km]	0,27	0,30	0,39	0,44
5	Capacitatea [μF/km]	0,32	0,25	0,38	0,20
6	Pierderi în conductoare [kW/km]	44	40	41	41
7	Pierderi în armături [kW/km]	2	2	3	2,5
8	Pierderi în dielectric [kW/km]	0,1	0,3	1	2
9	Pierderi totale [kW/km]	46,1	42,3	45	45,5

Tabelul A.1.2. Parametrii cablurilor de 63 - 380 kV (40).

Nr. crt.	U_n (kV)	PI TERE (VA)			CONDUCTOR			IZOLATIE		ECRAN	
		P_n	VACA	IAENA	S [mm ²]	Mat.	θ_{max} [°C]	Gros. (mm)	Mat.	Gros. /mm/	Mat.
1	63	40	35	45	240	Al	65	13	PE	2,2	Pb
2	63	40	33	41	150	Cu	65	14	H	2,5	Pb
3	63	50	46	59	400	Al	65	13	PE	1,9	Pb
4	63	50	41	52	240	Cu	65	14	H	2,4	Pb
5	63	65	59	76	630	Al	65	13	PE	2	Pb
6	63	100	88	112	1300	Al	65	13	PE	2,6	Pb
7	90	85	84	106	630	Al	65	17	PE	2,2	Pb
8	225	100	165	206	400	Al	65	24	PE	3,2	Pb
9	225	100	161	207	236	Cu	80	21	H	3,5	Pb
10	225	200	208	260	630	Al	65	24	PE	3,2	Pb
11	225	200	181	228	375	Cu	80	17,5	H	4,5	OL
12	225	300	304	384	805	Cu	65	24	PE	3	Pb
13	225	300	256	333	805	Cu	80	17,5	H	5,4	OL
14	225	300	296	380	820	Cu	80	21	H	3,5	Pb
15	380	600	500	700	1007	u	85	25	H	3,8	Pb

Nr. crt.	$I_{sec. adp.}$ (A)			Pierderi (kW/km)	$\phi_{ext. cablu}$ (mm)
	Cond.	Ecran	Δt (sec.)		
1	12	7	2	47	63
2	12	7	2	41	54
3	20	7	2	47	69
4	19	7	2	42	58
5	28	7	2	51	78
6	30	7	2	56	95
7	30	10	1	52	85
8	30	30	0,5	50	94
9	30	30	0,5	62	83
10	30	30	0,5	55	101
11	30	30	0,5	87	63
12	30	30	0,5	55	106
13	30	30	0,5	103	77
14	30	30	0,5	71	101
15	40	40	0,5	136	118

PE - polietilenă ; H - hirtie impregnată.

Tabelul A.1.3. Cabluri de 230 kV cu ulei [74].

Nr. crt.	Parametrul și u.m.	Varianta	
		Canadiană	Engleză
1	2	3	4
1	Diametrul canalului central pentru ulei - mm	17,5	12,0
2	Diametrul exterior al conductorului-mm	33,7	39,4
3	Secțiunea conductorului - mm ²	575	750
4	Grosimea izolației - mm	21,2	17,6
5	Diametrul exterior al izolației - mm	76,2	74,7
6	Grosimea minimă a mantalei - mm	3,3	3,0
7	Material sante metalică	Al	Pb
8	Diametrul exterior al santei - mm	83,8	81,6
9	Material sante sintetică	Neopren	PVC
10	Diametrul exterior al cablului - mm	91,5	90,7

Tabelul A.1.4. Cabluri de 275 kV cu ulei [24].

Nr. crt.	Parametrul și u.m.	Varianta		
		1	2	3
1	Secțiunea conductorului - mm ²	200	500	850
2	Puterea (MVA)	133	300	400
3	Grosimea izolației - mm	21	21	22
4	E _{max} (kV/mm)	13	12	11
5	Grosimea santei de Pb - mm	3,6	3,7	4,7
6	Diametrul exterior - mm	93	95	112
7	Presiunea uleiului - Kgf/cm ²	3-15	1-3	3-15
8	M a s a - Kg/m	24	23,6	39
9	Rezistența conductorului Ω/km	0,0852	0,0354	0,0121
10	Capacitatea - nF/km	224	249	293
11	Tg δ - la U = 83 kV	0,00263	-	-
12	160 kV	-	-	0,00285
13	162 kV	-	0,0027	-
14	220 kV	0,00278	-	-
15	280 kV	-	0,0030	-
16	332 kV	-	-	0,00303

Tabelul A.1.5. Cablu de 330 kV, 6 00 MVA, Sydney [97].

Nr. crt.	Parametrul	Valoarea
1	Rezistența conductorului c.a. 85°C.	0,0197 Ω/km
2	Reactanța inductivă/fază; 50 Hz	0,197 Ω/km
3	Capacitatea/fază	0,37 μF/km
4	Curent capacitiv 50 Hz la U _n	22,1 A /km
5	Pierderi în conductor	27 kW/km
6	Pierderi în ecran	3,04 kW/km
7	Pierderi dielectrice	68,2 kW/km
8	Pierderi totale	98,24 kW/km
9	Curentul maxim de durată (la temperatura solului 25°C și adâncimea de pozare 90 cm).	1063 A

Tabelul A.1.6 . Cabluri de 345 kV [24].

Nr. crt.	Parametrul și u.m.	Valoarea
0	1	2
1	Secțiunea conductorului - mm ²	850 - 1000
2	Diametrul canalului central pentru ulei - mm	17,5
3	Presiunea uleiului - Kgf/mm ²	14
4	Grosimea izolației - mm	25,4
5	Grosimea mantalei - mm	4,3 Pb sau 5,6 AL
6	Manta din polietilenă - mm	3 - 4,45
7	Diametrul exterior - mm	105 - 110
8	tg δ la 75°C	0,0025
9	Masa - Kg/m	17,8 - 20,8
10	Puterea transportată - MVA	450 - 500

Tabelul A.1.7. Cabluri de 425 kV [40].

0	1	2
1	Diametrul canalului central pt.ulei-mm	6,1
2	Secțiunea conductorului - mm ²	1096
3	Diametrul exterior al conductorului-mm	44
4	Grosimea izolației de hirtie - mm	22
5	Diametrul exterior al izolației - mm	88,6
6	Grosimea mantalei din Pb - mm	5,5
7	Diametrul exterior al cablului - mm	112
8	Presiunea uleiului - Kgf/cm ²	10
9	E _{max} - kV/mm	16,1

Tabelul A.1.8. Cablu de 138 kV din Vancouver [24].

0	1	2
1	Rezistența unitară [Ω/Km], la 20°C	0,0775
2	Capacitatea [μF/Km]	0,212
3	Curentul capacitiv [A/Km], la 60 Hz	6,37
4	Permitivitatea relativă ε _r	2,9
5	Grosimea izolației de hirtie - mm	14,6
6	Intensitatea maximă a câmpului -kV/mm	8,5
7	Tensiunea de încercare - impuls [kV]	675
8	Tensiunea de încercare - kV c.c. 15 min.	300
9	tg δ 60 Hz 20°C	0,0039
10	tg δ 60 Hz 50°C	0,0033
11	tg δ 60 Hz 85°C	0,0030
12	Curentul maxim [A]	500
13	Pierderi în conductor [kW/Km]	66,5
14	Pierderi în armătură [kW/Km]	60,5
15	Pierderi în dielectric [kW/Km]	3,85

Tabelul A.1.9. Cablu de 535 kV din Vancouver [130]

0	1	2
1	Diametrul canalului central de ulei - mm	24
2	Secțiunea conductorului de cupru - mm ²	1600
3	Grosimea izolației de hirtie - mm	24,4
4	Grosimea mantalei de plumb - mm	4
5	Benzi de consolidare din bronz	4 straturi
6	Manta anticorozivă din polietilenă	1
7	Două benzi de armare din cupru - mm	3x12
8	Protecție externă - polipropilenă	1
9	Greutatea specifică [Kg/m]	68,3
10	Curentul de ecc. - 0,5 s [kA]	20

0	1	2
11	Tensiunea de incercare - impuls [kV]	1675
12	Gradientul maxim la 1675 kV [kV/mm]	94
13	Gradientul maxim la 525 kV [kV/mm]	17
14	Tensiunea de incercare c.c. 30 min. [kV]	860

A n e x a 2.

FUNCTIA INTEGRAL-EXPONENTIALA [log] (extras).

x	-E ₁ (-x)	x	-E ₁ (-x)
0,00		0,90	0,2602
0,01	4,0379	0,95	0,2387
0,02	3,3547	1,00	0,2194
0,03	2,9591	1,10	0,1860
0,04	2,6813	1,20	0,1584
0,05	2,4679	1,30	0,1355
0,10	1,8229	1,40	0,1162
0,15	1,4645	1,50	0,1000
0,20	1,2227	2,00	0,0489
0,25	1,0443	2,50	0,0249
0,30	0,9057	3,00	0,0130
0,35	0,7942	3,50	0,0069
0,40	0,7024	4,00	0,0037
0,45	0,6253	4,50	0,0020
0,50	0,5599	5,00	0,0011
0,55	0,5034	6	0,0003
0,60	0,4544	7	0,0001
0,65	0,4115	8	0,0000
0,70	0,3738	9	0,0000
0,75	0,3403	10	0,0000
0,80	0,3106	12	0,0000
0,85	0,2840	14	0,000000055

A N E X A 3.

Calculul argumentelor pentru functia integral exponentială.

```

5 PRINT "ARGUMENT INTEGRAL EXPO"
10 INPUT RO, CPVC, RINT, REX
20 FOR x=1 TO 14
30 INPUT T
40 B= RO * CPVC / (4 * T)
50 ALPHA 1 = B * RINT ^ 2
60 ALPHA 2 = B * REXT ^ 2
70 PRINT "B = "; B; " ALPHA 1 = "; ALPHA 1
80 PRINT " ALPHA 2 = "; ALPHA 2; " X = "; X
90 NEXT X
100 END

```

Symbolizare:

- RO = rezistivitatea termică [$^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$];
- CPVC = capacitatea termică [$(1/10^{-6}) \cdot (\text{W}\cdot\text{sec}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^3)$];
- RINT = raza interioară [mm];
- REXT = raza exterioară [mm];
- T = t timpul [secunde];
- ALPHA1 = α_{x1}
- ALPHA2 = α_{x2}

A n e x a 4.

Programul de calcul pentru încălzirea cablurilor trifazate.

```
6 DIM V (10)
7 DIM E (10)
10 INPUT S, DS, DA, DAP, DEC, G, H, TETAC
11 RO = 0.0000028264
12 ROT = 600
13 ALFA = 0.00403
14 INPUT TETAC
20 R = (C RO * 100)/S*(1+ALFA * (TETAC - 20))
25 PRINT "R = " ; R
29 PI = 3.14159
30 TUNU = (ROT * G)/(2 * PI)
35 PRINT "TI = " ; TUNU
40 TDOI = 0.366 * ROT * CLOG(DA/DS)
45 PRINT "T2 = " ; TDOI
50 TTREI = 0.366 * ROT * CLOG(DEC/DAP)
55 PRINT " T3 = " ; TTREI
61 INPUT A
63 CA = PI * DEC * H * (TUNU/3 + TDOI + TTREI)
64 V(1) = 2
65 P(1) = 0
66 FOR K = 2 TO 10
70 E(K) = SQR ((TETAC - TETAO)/(1 + CA * V(K-1)))
72 V(K) = SQR (E(K))
75 PRINT "V = " ; V(K)
76 NEXT K
80 TPATRU = 1/(PI * DEC * H * V(10))
81 PRINT "T4 = " ; TPATRU
82 INPUT B
83 CURENT = SQR ((TETAC - TETAO)/(R * (TUNU + 3 * (TDOI + TTREI + TPATRU)))
84 PRINT "CURENT I = " ; CURENT
86 TETAOL = TETAO + (TETAC - TETAO) * (TTREI + TPATRU)/(TUNU/3 + TDOI +
+ TTREI + TPATRU)
90 PRINT "TETA OTEL = " ; TETAOL
91 FOR K = 1 TO 10
92 E (K) = 0
93 NEXT K
95 GOTO 14
```

In program s-au folosit urmatoarele variabile alfanumerice:

S = s - secțiunea (mm²);
DS = D - diametrul exterior al mantalei metalice;
DA = D_i - diametrul interior al armăturii;
DAP = D_e - diametrul exterior al armăturii;
DEC = diametrul exterior al cablului;
G = factor geometric;
H = h - coeficient de disipare;
TETAC = θ - temperatura conductorului;
TETAO = θ^c - temperatura mediului;
RO = ρ - rezistivitatea electrică a conductorului;
ROT = ρ_t - rezistivitatea termică a izolației;
ALFA = α - coeficient de temperatură al rezistivității;
R - rezistența electrică a conductorului;
TUNU = T₁ rezistența termică între conductor și manta;
TDOI = T₂ rezistența termică între manta și armătură;
TTREI = T₃ rezistența termică a învelișului exterior;
TPATRU = T₄ - rezistența termică externă;
CURENT = I - curent maxim admisibil;
TETAOL = θ_o - temperatura pe mantaua de oțel.

A n e x a 5.

Program de calcul pentru încălzirea cablurilor monofazate.

```

10 INPUT S, TC, DC, FI, FDI, FDE, H
11 RE = 2.8264E - 06
12 ROV = 350
13 ROW = 600
15 ALFA = 4.03E - 03
20 R = (RE/S) * (1 + ALFA * (70))
25 PRINT "R="; R
27 INPUT FSI, FSE
29 PI = 3.14159
30 TZNU = 0.366 * ROV * CLOG(FI/DC)
31 TS = 0.366 * ROW * CLOG(FI/DC)
32 TUNU = TZNU + TS
33 PRINT "T1A = "; TZNU
34 PRINT "T1B = "; TS
35 PRINT "T1 = "; TUNU
40 TDOI = 0.366 * ROW * CLOG(FDE/FDI)
45 PRINT "T2 = "; TDOI
46 TETAC = TC
47 DIM E(10)
48 DIM V(10)
60 INPUT TETAO
61 DEL = TETAC - TETAO
63 CA = PI * FDE * H * (TUNU + TDOI)
64 V(1) = 2
65 E(1) = 0
66 FOR K=2 TO 10
70 E(K) = SQR(DEL / (1 + CA * V(K-1)))
72 V(K) = SQR(E(K))
76 NEXT K
80 TPATRU = 1 / (PI * FDE * H * V(10))
81 PRINT "T4="; TPATRU
83 CURENT = SQR(DEL / (R * (TUNU + TDOI + TPATRU)))
84 PRINT "CURENT I = "; CURENT
85 SUMA = TUNU + TDOI + TPATRU
86 TCU = TETAO + DEL * (TDOI + TPATRU) / SUMA
87 PRINT "T CUPRU = "; TCU
88 M = TPATRU / SUMA
90 TEXT = TETAO + DEL * M
91 PRINT " " TEXT = "; TEXT
95 FOR K=1 TO 10
96 E(K) = 0
97 V(K) = 0
98 NEXT K
100 GOTO 60

```

Simboluri utilizate:

S - secțiunea conductorului [cm²];

DC = ρ_{izol}

FDI = $\rho_{int PVC}$

FDE = $\rho_{ext PVC}$

FSI = $\rho_{int hirtie}$

FSE = $\rho_{ext hirtie}$

H = L

ROV = $\rho_{th PE}$

ROW = ρ_{20}

ALFA = α_{20}

R - rezistența electrică;

TUNU = T₁

TDOI = T₂

TPATRU = T₄

TC = θ_c [°C]

CURENT = I [A]

TETAO = θ_{aer} [°C]

DEL = $(\theta_c - \theta_{aer})$.

A n e x e 6.

Program pentru calculul intensităților cîmpului electric.

```
11
  COMPILE FORTRAN
CALCULUL CIMPULUI ELECTRIC IN CABLUL CU
7   TREI STRATURI - INTEGRARE NUMERICA
REAL PARA (5),DERI(4),Y(4),ERROR (4),TAB(7,4)
DATA PARA /0.,10.,0.2,0.02,0./
DATA NDIM,ERROR(1),ERROR(2),ERROR(3),
1 ERROR (4)/4, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1/
Y(1) = 2.23
Y(2) = 1.073
Y(3) = 1.073
Y(4) = 2.20
CALL SRKG (PARA,DER1,Y,NDIM, NBER, ERROR, 1 TAB)
STOP
END
SUBROUTINE FCT (X,Y,DER1)
DIMENSION Y(4),DER1(4)
DER1(1) = 0.*X + 0.*Y(1)+ 16.64 * Y(2) + 1 1.02 *Y(3) -10.4*Y(4)
DER1(2) = 0.*X + 0.*Y(1)- 0.8*Y(2)-0.002 *Y(3)+ 1 0.5 *Y(4)
DER1(3) = 0.*X + 0.*Y(1)- 0.8*Y(2)-0.98*Y(3)+ 1 0.5 * Y(4)
DER1(4) = 0.0
RETURN
END
SUBROUTINE OUT (X,Y,DER1,NBER,NDIM,PARA)
DIMENSION Y(4), DER(4), PARA(5)
WRITE (108,20) X,Y(1),Y(2),Y(3),Y(4),DER1(1), 1 DER1(2),
DER1(3),DER1(4)
20 FORMAT (' ', 1 p 9 E 8.4)
RETURN
END
  FETCHB DV : ADO,LM : MATHLIB,
1 GN : 1,VN : 1, FN : SR K G
  LINK
  RUN AD : 0, 0, NL : 1000, TIME : 2
  EOJ
```

N o t e ț i i :

PARA - vector cu 5 elemente;
PARA(1) bornă inferioară a intervalului de integrare;
PARA(2) bornă superioară a intervalului de integrare;
PARA(3) valoarea inițială a pasului de integrare;
PARA(4) valoarea maximă a erorii;
PARA(5) parametru de ieșire (uzual 0).

$$\begin{aligned} \text{DER1}(1) &= \frac{\partial y_1}{\partial t} \\ &\vdots \\ \text{DER1}(4) &= \frac{\partial y_4}{\partial t} \end{aligned}$$

ERROR(1)....(4) - coeficienți de pondere în calculul de testare a erorii;

NBER - numărul de bisecțiuni al pasului de integrare;

NDIM - numărul de ecuații diferențiale ale sistemului studiat (aici NDIM = 4).

A n e x a 7.

Calculul intensităților câmpului și al căderilor de tensiune în izolația din două straturi a unui cablu.

```
10 PRINT "CABLU 20 KV PE+PVC
20 INPUT U,X1,X2,ε1,ε2,R0,R1,R2
25 D1 = R1 * LOG (R1/R0)
26 D2 = R1 * LOG (R2/R1)
30 T0 = (X1 * D2 + X2 * D1) (2/ε1 + D1/ε2)
40 PRINT " T0 = ", T0
48 Z = (X1 * D2 + X2 * D1) * (D2/ε1 + D1/ε2)
50 W1 = (X2/ε1 - X1/ε2) * D2 * U/Z
60 W2 = (X1/ε2 - X2/ε1) * D1 * U/Z
70 FOR T = 0 TO 3
      4      7
      9      11
80 P = 1/ EXP(T)
90 E1 = W1 * P + ε1 * U/ε1 * D1 + ε2 * D2)
100 E2 = W2 * P + ε2 * U/ε1 * D1 + ε2 * D2)
109 PRINT " T/T0 = ", T
110 PRINT " E1=", E1, " E2 =", E2
120 U1 = E1 * D1
130 U2 = E2 * D2
140 V = U1 + U2
150 PRINT " U1 =", U1, " U2=", U2
160 PRINT " V =", V
170 NEXT T
180 "PROBLEMA REZOLVATA"
190 STOP
```

A n e x a 8.

a) Program de calcul al profilului de reducere a izolației:

```
10 PRINT "CALCULUL PROFILULUI DE REDUCERE"
20 INPUT U
30 INPUT R0
40 INPUT R1
50 PRINT "INTRODUCETI GRADIENTUL G = "
55 INPUT G
60 FOR Y=1 TO 100 STEP 5
65 X = Y/10
70 T = G/U * X * LOG (R1/R0)
75 R7 = R0 * EXP (T)
80 PRINT " X = " ; X ; " R(x) = " ; R7
85 NEXT Y
90 STOP
```

Simboluri folosite: U = U1
R0 = r
R1 = R1
G = g1
X = x1
R7 = R(x)

./.

b) Program de calcul al profilului de întărire a izolației:

```
10 PRINT"CALCULUL PROFILULUI DE INTARIRE"  
20 INPUT U  
30 INPUT R0  
40 INPUT R1  
50 PRINT"INTRODUCETI GRADIENTUL G=" "  
55 INPUT G  
60 FOR Y=1 TO 40 STEP 2  
65 X = Y  
70 T = LOG (R1/R0)  
75 V = T * EXP (X * G/U)  
80 R7= R0 * EXP(V)  
85 PRINT" X =";X;" R(x)=";R7  
90 NEXT Y  
95 PRINT "CALCUL TERMINAT"  
100 STOP
```

Observație: - simbolurile folosite sînt aceleași ca și în cazul anterior cu deosebirea:

$$R_1 = R_0 \quad (\text{vezi fig.4.12}).$$

BIBLIOGRAFIE

1. Ioan Novac - O nouă concepție în construcția de mașini electrice - criomașina electrică. In: Electrotehnica, nr.7, 1966, p.251-254.
2. R.Răduleț, A.Georgescu, I.S.Antoniu, M.Marineanu, P.Dimo, V.Nitu: "Perspective de dezvoltare a energiei". E.T.București, 1974.
3. M.Bercovici, Arie A.Arie, Al.Poată: "Rețele electrice - Calculul electric" E.T.București, 1974, 636 p.
4. Arie A.Arie, S.T.Hurdubețiu: "Cercetări privind supraîncărcarea pe durate limitate a cablurilor de energie cu izolație din PVC". Conferința energicienilor - secția VII, Nr.31, București, 18-19 oct.1975.
5. Al.Poată, Arie A.Arie, D.Crișan, M.Ereia, A.Buta, V.Alexandrescu: "Transportul și distribuția energiei electrice". E.D.P.București, 1981, 447 p.
6. Arie A.Arie, C.Cruceru, M.Ereia, S.Hurdubețiu, Fl.Popescu: "Contribuții la calculul regimurilor termice de funcționare a cablurilor de energie". In: E.E.A.Electrotehnica, 26, 1978, nr.5, p.174-185.
7. C.Cruceru "Supraconductibilitatea și aplicațiile ei". Ed. științifică și enciclopedică, București, 1985.
8. C.Cruceru "Cabluri și conductoare electrice". E.T.București, 1965, 433 p.
9. C.Cruceru "Tendințe actuale în construcția cablurilor electrice de forță și telecomunicații". In: Electrotehnica, nr.3, 1969, p.98-105.
10. C.Cruceru "Aspecte cu privire la construcția și utilizarea cablurilor criogenice în rețelele și sistemele electroenergetice". In: Electrotehnica, nr.12, 1973, p.458-464.
11. C.Cruceru "Criotehnica în perspectiva aplicării ei la construcția și utilizarea cablurilor de energie de înaltă și foarte înaltă tensiune". In: E.E.A.-Electrotehnica, nr.1, 1975, p.46-50.
12. C.Cruceru "Considerații teoretice și experimentale referitoare la cimpul termic generat de rețelele electrice de energie, subterane, care funcționează în regim tranzitoriu". In: E.E.A.-Electrotehnica, nr.7, 1976.
13. C.Cruceru C. "Contribuții la studiul regimului de funcționare al cablurilor electrice în gama de tensiuni 1-20 kV și dimensionarea lor". Teză de doctorat, I.P.București, 1974, 181 p.

14. D.F.Sămărescu, "Influența refulării cîmpului electromagnetic asupra încălzirii conductelor și cablurilor", Teză de doctorat. I.P. București, 1974, 181 p.
15. D.F.Sămărescu "Difuzia cîmpului electromagnetic și aplicații". Ed. Acad.RSR, 1983, 238 p.
16. B.Riot, A.I.Timotin, ș.a., Contribution à l'étude des pertes dans les tuyaux métalliques entourant les cables de transport d'énergie". In: Bull. de la Direction des études et recherches, B, 1972, nr.2, p.45-80.
17. D.Cristescu "Cîteva probleme experimentale actuale în utilizarea tensiunilor foarte înalte". In: Energetica, nr.9, 1973, p.405-407.
18. D.Cristescu, R.Olah: "Supratensiuni și izolația rețelelor electrice". E.D.P., 1983, 547 p.
19. V.Panaite "Perspective în tehnica transportului de energie electrică prin cabluri subterane". In: Energetica, nr.11, 1973, p.523-526.
20. V.Panaite "Calculul suprasarcinii de urgență pentru LEC". In: E.E.A. - Electrotehnica, nr.7, 1976, p.247-251.
21. V.Stănculescu "Crimpele electrice și alte aplicații". In: EEA - Electrotehnica, nr.3, 1976.
22. V.Nogali, G.Ioniță, N.Micles, C.Udrescu. "Tendințe privind dezvoltarea instalațiilor de distribuție în orașul București" Conferința energeticienilor - secția VII, nr.42, București, 17-19 oct.1975.
23. G.Ioniță, Gh.Bucea "Montarea și exploatarea cablurilor electrice de înaltă tensiune. Cabluri cu ulei sub presiune". E.T., 1979, 190 p.
24. C.Barnea "Silovii cabeli" Ed.Energhia, Moskva, 1971, 287 p.
25. G.Bezzi "Riduzione delle perdite nelle giunzioni metalliche dei cavi unipolari mediante transporzione incrociata". In: Estratto da "L'Elettrotecnica" Milano, vol.LVIII - Nr.4-1971.
26. * * * "Laboratoarele de încercări electrice ale centrului de cercetări al Societății - Electricité de France - de la Renardières" In: RGE, nr.10, 1972, p.649-676.
27. L.Donadieu, C.Dammann. "Studiul unei traversări de curent a unei incinte criogenice". In: RGE, nr.2, 1968, p.193-203.
28. C.A.Flamand, G.Terrasorei. "Studiul răcirii cablurilor de energie prin circulație forțată". In: RGE, nr.8, 1968, 415-429.

29. C.Bataille "Tehnica de transport al energiei prin cabluri subterane de F.I.T. - Răcirea cablurilor de energie prin circulație forțată". In: RGE, nr.1, 1974, p.37-45.
30. J.Rollin, J.Lepers, P.Renard. "Tehnica de transport al energiei prin cabluri subterane de F.I.T. - Probleme de exploatare a cablurilor cu răcire naturală". In: RGE, nr.1, 1974, p. 45-54.
31. R.Nisol "Răcirea conductorilor blindați - Precauții pentru dimensionarea termică". In: RGE, nr.5, 1976.
32. D.Paulin, D.Plurinage. "Aspecte particulare ale unei legături în cablu de IT - 225 kV". In: RGE, nr.4, 1976, p.323-331.
33. J.M.Oudin "Cablu submarin de c.c. Sardinia-Italia". In: R.G.E. nr.12, 1966, p.1391-1400.
34. E.F.Peschke, ș.a.: "Execuții de cabluri moderne. Limite ale tehnicii actuale și căi noi". In: Energie, R.F.G., nr.6, 1975, p. 162-166 și nr.7-8, 1975, p.188-193.
35. L.A.Killer "Engelhardt J.S." Care este limita cablului tip conductă". In: Electric Light and Power, aug. 1972, p.36-37.
36. E.D.Eich "Studiu privind răcirea forțată a cablurilor convenționale". In: Electric Light and Power, aug., 1972, p.38-39.
37. R.E.Perry, J.N.Piscioneri. "Primul cablu submarin cu izolație gazoasă". In: Electric Light and Power, aug., 1972, p.40-41.
38. S.Barrett "Studiu privind rezistența criogenică". In: Electric Light and Power, aug., 1972, p.42-43.
39. R.W.Meyerhoff "Superconductorii în curent alternativ". In: Electric Light and Power, aug., 1972, p.44-46.
40. R.Bonnefille "Techniques de l'ingénieur" DO...D6, Paris, 1972.
41. M.M.Lebedev "Funcțiuni speciale și aplicațiile lor". E.T. București, 1957.
42. D.Ivanenko, D.Socolov "Teoria clasică a câmpului". In: E.T. București, 1957.
43. N.Teodorescu "Ecuațiile fizicii matematice", 1970, 340 p.
44. B.Popa, C.Vintilă "Transfer de căldură în procesele industriale", Dacia-Cluj, 1975, 460 p.
45. N.Racoveanu, Gh.Dodescu, I.Mincu. "Metode numerice pentru ecuații privind derivate parțiale de tip parabolic". E.T. București, 1977, 270 p.

46. N.Leonăchescu, "Termotehnică" E.D.P.,1981, 525 p.
47. STAS 4481/1-78 "Cabluri de energie, cu izolație de hirtie impregnată în manta de plumb. Condiții tehnice generale de calitate.
48. STAS 8778/1-77 "Cabluri de energie cu izolație și manta de PVC. Condiții generale de calitate.
49. STAS 8778/2-80 "Cabluri de energie cu izolația și manta de PVC. Construcție și dimensiuni.
50. L'Electricien, Franța, 86, nr.2151, iun.1973, p.142-146 (Banca centrală de date și informații - Bibl.Electroputere Craiova).
51. Kerntechnik, R.F.G.,15,nr.8, aug.1973,p.365 (Banca centrală de date și informații - Bibl.Electroputere Craiova).
52. O.D.P.T. - M.I.C.M.C. Catalog - grupa principală 405: Cabluri electrice, Cod CO29, București, 1973.
53. T.Ingledeu, ș.a."British Columbia - Vancouver Island 138 kV Submarine Power Cablr, In: Proc.IEE, nr.18, dec.1957, p.485-504.
54. L.L.Alaton "High Voltage Technology" Oxford University, 1968, 400 p.
55. Gh.Pirvescu, V.Dumitru, A.Anghel. "Instrucțiuni tehnologice privind execuția manșoanelor și cutiilor terminale la cablurile de 110 kV cu izolație XLPE tip Nokia - Finlanda". Lucrarea 538/82 MEE Trustul Electromontaj - București.
56. D.Vaida "Isledovania povrejdenni izoliații". Ed.Energhia, Moskva, 1968, 400 p.
57. V.Chioresanu, "Materiale electrotehnice" Curs IPTV Timișoara, 1982, 250 p.(ediția a II-a).
58. Al.Niculescu, F.Pușcaș, "Dielectrici și feroelectrici". Ed.Scribul românesc, Craiova, 1982, 335 p.
59. T.Horvath., B.Mathe, E.Nemeth, V.Stanciu. "Incercarea izolației electrice". E.T.1982, 440 p.
60. V.Privezentsev, I.Grodnev, S.Kholodny, I.B.Ryazanov "Fundamentals of Cable Engineering" Ed.Mir, Moscow, 1973, 407 p.
61. A.R.Hippel "Les diélectriques et leur applications" Ed.Dunod, Paris, 1961.
62. E.Durand "Electrostatique et magnétostatique" Ed.Masson, Paris, 1953, 774 p.

63. Gh.Mindru, M.M.Rădulescu " Analiza numerică a câmpului electromagnetic" vol.I, Litografia Institutului politehnic Cluj-Napoca, 1983, 272 p.
64. A.Nicolaide "Bazele fizice ale electrotehnicii" vol.I, Ed.Scrierul românesc, Craiova, 1985, 630 p.
65. R.H.Golloway, H.Mc.L.Ryan, M.F.Scott "Calculation of electric fields by digital computer". In: Proc.I.E.E. vol.114, nr.6, 1967.
66. MEE-F.C.-2-76 "Montarea liniilor electrice în cabluri cu tensiune de 110 kV și subfluviale" ICEMENERG București, 1979 (resp.ing.C.Pantelimon).
67. MEE-1 LI - Ip 22-78 "Instrucțiuni de proiectare privind executarea trecerii din LEA 110 kV în LES 110 kV" ICEMENERG București, 1979 (resp.ing.A.Blechta).
68. MEE-3LI-I95-79 "Instrucțiuni de exploatare și întreținere a cablurilor de 110 kV" ICEMENERG București, 1980, (resp. ing. Gh.Bucea).
69. MEE-FC-5/76 "Montarea manșoanelor și cutiilor terminale pe cablu de 20-35 kV" ICEMENERG București, 1977 (resp.ing.R.E. Mateescu).
70. MEE-FC 11/79 "Montarea manșoanelor și a cutiilor terminale la cablurile de 20 kV monofazice izolate cu polietilenă normală, fabricate în R.S.R." ICEMENERG București, (resp. ing.C.Popescu).
71. STAS 11388/4-81 "Cabluri și conducte. Metode de încercare - încercări electrice".
72. STAS 10955-83 "Cabluri electrice. Calculul curentului maxim admisibil în cabluri, în regim permanent".
73. MEE-CIRE "Fișă tehnologică pentru execuția accesoriilor pentru cablul de 110 kV - 500 mm² tip AC 3HAE/110 kV/1978 - Pirelli - resp.de lucrare: ing.C.Mogoșanu, ing.Gh.Bucea, ing.V.Pandrea, ICEMENERG București, 1981.
74. MEE-CIRE "Raport de activitate - recepție furnitură de cabluri 110 kV Pirelli, 1983 - beneficiar CET Galați". Delegație: ing.I.Ciupitoiu, Ing.Emilia Vascom, ing.Gh.Bucea, ing. V. Pandrea, sing.Gh.Pârvescu. (Ord.MEE 535 și 721/1983).

75. M.E.E.-CIRE - NOKIA METAL INDUSTRIES "Certificat de calitate Nr. 6400/104/81 din 8 mai 1981 - Recepție furnitură de cabluri AHXADMK $1 \times 500 \text{ mm}^2$, 110 kV, 12561 m, Nokia-Finlanda" delegație: ing.I.Zeberca, ing. I. Ciupitoiu, ing.Gh.Bucea, ing.Gh.Ciurez (Contract Nr.819.150.222 - 2 oct.1981).
76. Intreprinderea de cabluri și materiale electroizolante ICME București". Date constructive pentru cabluri de energie electrică". Atelier de Cercetare Proiectare Cabluri (documentare - ing.V.Titișan, 04.07.1985).
77. Catalog "Elektroisolerbänder SCOTCH Nr.23, 13, 70, 24. Product-system für die elektromontage" 1976 Switzerland.
78. * * * "Installation Instructions 132:1E Cable Termination for XLPE Insulated Cable 84-170 kV" Kabeldon AB, Alingsås, Sweden, Nov.1978.
79. CEI 141-1/1976 "Essais de câbles à huile fluide à pression de gaz et leurs dispositifs accessoires - pour des tensions alternatives inférieures ou égales à 400 kV". Genève, Suisse, 1976.
80. CEI 502/1978 "Cables de transport d'énergie isolés par diélectriques massifs extrudés pour des tensions assignées de 1 kV à 30 kV". Genève, Suisse, 1978.
81. CEI 228/1978 "Armes des câbles isolés" Genève, Suisse, 1978.
82. CEI 287/1969 "Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent (facteur de charge 100%)". Bureau de la CEI, Genève, Suisse, 1969.
83. CEI 540/1976 "Méthodes d'essais pour les enveloppes isolantes et les gaines des câbles électriques rigides et souples (mélanges élastomères et thermoplastiques), Genève, Suisse, 1976.
84. CEI 540/1976-1979. Modification No.1 à la Octobre 1979", Genève, Suisse, 1979.
85. Priaroggia P.Gazzera "Rapport spécial du groupe 21 - Câbles à haute tension, CIGRE 27.08-04.09.1980, Paris, Séssion XXVIII, No 21-00, 7 pag.
86. C.A.Arkell, s.a." Première liaison de câbles de forte puissance en 380 kV avec refroidissement force lateral en Autriche" CIGRE XXVIII, 1980, No 21-09, 14 pag.

87. BcP.Mc Rae, ș.a. " Le premier réseau australien de câbles D'énergie de grande puissance à 330 kV".
CIGRE XXVIII, 1980, No 21-08, 11 pag.
88. E.M.Spencer, ș.a. " Recherche et développement concernant un câble de transport d'énergie 362 kV souple à isolation gazeuse". CIGRE XXVIII, 1980, No 21-02, 10 pag.
89. L.Deschamps ș.a., "Résultats d'essais et expérience en service, en France, des câbles haute tension à isolation synthétique". CIGRE XXVIII, 1980, No 21-06, 34 pag.
90. C.A. Arkell ș.a., "Développement de câbles isolés ou stratifiés polypropylène - papier (PPL) et à l'huile fluide pour réseaux à T.H.T." CIGRE XXVIII, 1980, No 21-04, 12 pag.
91. M.I.Mantrov "Electriceskii rascet visokovoltnih vvogob - rascet i konstruirovaniie electriceskoi izoliații" Tipografia M.E.I. Moskva 1962, 108 pag.
92. S.S.Solomonik " Elektrotehniceskie materialii, elektriceskie condensatori, nprovoda i kabeli - kabeli visokogonapriiienia c plastmassovoi izoliației" VINITI, Moskva, 1971, 70 p.
93. * * * Manualul inginerului - vol.I. Editura tehnică 1965 (pag. 285, rel.82).
94. K.Herstad, K.Bjorlow-Larsen, J.N.Johnsen, C.T.Jacobsen.
"Influența conductivității și a permitivității asupra ținerii dielectrice și metode de încercare a izolației cablurilor la înaltă tensiune continuă",
CIGRE XXVIII, 1980, Nr.15-03, 13 p.
95. O.Luspay "Influencing the Electric Field Strength Distribution of Mounting of Plastic-Insulated Cables". In: Elektrotehnika, R.P.U., vol.76, 1183, p.307-318.
96. Th.Vascan, V.Giurgiu, D.Rucinschi "Probleme legate de încercarea în laborator a cablurilor de înaltă tensiune". In: CNEE, vol.13, p.167-175, Craiova, 20-21 sept.1984.
97. R.Răduleț "Bazele teoretice ale electrotehnicii vol.I, Litografia Invățământului, I.P.București, 1955.
98. E.Durand "Electrostatique. Méthodes de calcul dielectrique". Vol.III. Ed.Masson Paris, 1966, 390 p.
99. L.I.Kranihfeld, I.B.Riazanov "Teoria, rascet i konstruirovaniie cablei i provodov" Ed.Vișșais școla, Moskva, 1972.

100. M.Fallou, "Analyse des procedés permettant de supprimer les pertes dans les gaines métalliques de câbles unipolaires à courant alternatif". In: RGE nr.6,1965, p.481.
101. A.Angot "Compléments de mathématiques pour ingénierie en électrotechnique et télécommunication" E.T., 1965.
102. E.Ianke, F.Emde "Tabliti funcții și formulami i crivimi", Moskva, 1959.
103. F.C.Van Wormer "An Improved Approximate Technique for Calculating Cable Temperature Transients". In: AIEE Trans., vol.74, III, 1955, p.277-281.
104. T.Laszlo, B.Făinaru, V.Barbu, C.I.Condurache. "Metode pentru determinarea încărcării admisibile a cablurilor de energie în regim permanent de scurtcircuit". In: Studii și cercetări în energetică, nr.1, 1974, p. 6 - 16.
105. E.Racoți "Calculul conductoarelor și cablurilor cu ajutorul tabelelor și nomogramelor" E.T., 1977.
106. L.I.Sirotinski, A.V.Almazov, P.V.Borisogleloski ș.a., "Tehnica tensiunilor înalte" vol.II., E.T., 1975, 475 p.
107. A.Ifrim, V.Fireșteanu "Calculul câmpului electric în izolația de polietilenă a cablurilor de înaltă tensiune în prezența impurităților". In: CNEE vol.8, p.111-118, Timișoara 17-18 sept. 1982.
108. A.Ifrim, V.Fireșteanu, C.Golovanov, P.Noșingher, V.Penaita, D.Stanciu "Cercetări privind rezistența la arborescență a polietilenei". In: CNEE vol.8, p.119-127, Timișoara 17-18 sept. 1982.
109. Al.Tănăsescu, V.Hagiu, M.Chitic "Tehnologii noi de realizare a capetelor terminale la cablurile de 20 kV de tipul AZYsY" In: SNRE, Secția a II-a, p.313-318, Timișoara 25-26 oct.1984.
110. V.Hagiu, M.Chitic "Tehnologii noi de realizare a manșoanelor de legătură la cablurile de 20 kV, de tipul AZYsY". In: SNRE, Secția a II-a, p.319-322, Timișoara, 25-26 oct.1984.
111. Arie A.Arie, M.Grigoriu, M.Eremie, T.Covaci " Analiza regimului termic al unui cablu criorezistiv. In: EEA Electrotehnica, p.86, nr.3, 1981.

112. S.Puşcaşu, I.Isar "Problemele constructive ale cablurilor electrice criogenice". In: *Lucrările colocviului de supraconductibilitate și crioelectrotehnică*, pag. 65-82, 14-16, dec.1977, Craiova.
113. M.Eremia "Regimul termic al cablurilor de energie" L-14, I.P.București, 1982.
114. Arie A.Arie, M.Ungureanu, M.Eremia, "Studiul proceselor termice, hidrotermice și electrice la temperaturi joase. Faza II - Calculul și dimensionarea izolațiilor terminali la temperatura azotului lichid pentru tensiunea de 20 kV". Contract de cercetare științifică Nr.41-2-11, 1982 (1984) I.P.București, beneficiar: ICPE București.
115. H.D.Short "Theoretical and Practical Approach to the Design of High-Voltage Cable Joints". In: *AIEE Transactions*, 1949, vol.68, p.1275-1283.
116. J.Lockau "Beanspruchung und Festigkeit von Masse Papier-Isolation für HGU Kabel" Darmstädter Dissertation, 1968, 75 p.
117. E.Boechnek "Studiu privind capacitatea de transport a cablurilor supraconductoare de c.c." Karlsruhe, Dissertation, 1978, 169 p.
118. N.V.Stukov "Noutăți în montarea liniilor în cablu". Ed.Energhia, Moskva; 1975, 64 p.
119. St.Ogrezeanu "Cabluri de înaltă tensiune capsulate în SF₆". In: *CNEE, Secția 11*, p.97-110, Craiova, 20-21 sept.1984.
120. F.T.Tănăsescu, R.Cramariuc, ș.a. "Caracteristicile tuburilor termocontractabile realizate prin iradiere cu electroni accelerați și aplicațiile acestora în industrie". In: *EEA Electrotehnica*, nr.8, 1984, p.311-316.
121. B.Mathe, S.Pispiris, V.Barbu "Metode de investigație operațională a fiabilității rețelelor electrice de cablu." In: *Ses. de comunic.tehn.șt. ICEMENERG*, 12-14 iunie 1980, București; Secția II, Ref.78.
122. B.Mathe, V.Panaite "Eficiența cercetării experimentale a fiabilității cablurilor de energie". In: *CNE, Secția 35*, p.125-134, 23-25 noiembrie, 1983.

123. A.Gorgon, "Cercetări privind oportunitatea precizării conținutului de umiditate din izolația transformatoarelor de putere prin coeficientul de absorbție".
In: EEA, nr.2, 1985.
124. Gh.Bucea, M.Măiereanu "Experiență în exploatarea, întreținerea și repararea cablurilor de energie de 110 kV. In: EEA, p.241-251, nr.6, 1985..
125. Al.B.Demi "Metode de determinare a repartiției cimpului electric pentru instalații de înaltă tensiune". Proiect diplomă Nr.143/1984 IPTV Timișoara - Catedra Electroenergetică - conducător P.D.- șef lucr.ing. V.Titihăzan.
126. B.R.Schmidt "Rapport spécial du Groupe 21-Câbles à haute tension" CIGRE, 21-00, Paris, 23 aug.-6 sept.1984, 5 p.
127. E.H.Ball, H.W.Holdup, D.J.Skipper, B.Vecellio "Développement de l'isolation au PRC pour câbles à haute tension, CIGRE, 21-01, Paris, 1984, 10 p.
128. W.Boone, E.F.Steenis, P.A.C.Bentvelsen, A.M.Laar "Développement et essais de câbles à T.H.T. au PRC aux Pays-Bas", CIGRE, 21-02, Paris, 1984, 8 p.
129. E.Dorison, A.Royere, H.Auclair, Y.Lecoq, J.Midoz "Evolution des spécifications de câble HT et THT liée aux conditions d'installation et d'exploitation", CIGRE, 21-03, Paris, 1984, 8 p.
130. R.G.Foxell, K.B.Larsen, G.Brazzi "Etudes, fabrications et pose d'une liaison par câbles sous-marins à 525 kV alternatif entre le continent canadien et l'île de Vancouver" CIGRE 21-04, Paris, 1984, 9 p.
131. K.Tanizawa, D.Mineguchi, Y.Honaga "Applications du câble de transport d'énergie à isolation gazeuse au Japon", CIGRE, 21-05, Paris, 1984, 6 p.
132. T.A.Holte, K.B.Larsen, P.B.Larsen, E.Ildstad "Expérience norvégienne dans le domaine des câbles d'énergie à haute tension isolés au PRC" CIGRE, 21-06, Paris, 1984, 7 p.
133. C.A.Arkell, B.Gregory "Etude de câbles à huile fluide pour le transport d'énergie en courant continu à très haute tension". CIGRE, 21-07, Paris 1984, 8 p.
134. J.H.KDniach "Câble de transport d'énergie de grande puissance, refroidi par le conducteur, résultat d'un essai de longue durée à Berlin-Ouest" CIGRE, 21-08, Paris, 1984, 5 p.

135. F.Farneti, F.Donezzi, G.Luoni, W.Moscu "Capacité de transport d'un système de câbles 1100 kV à huile fluide essais en vraie grandeur et critères de conception", CIGRE, 21-09, Paris, 1984, 8 p.
136. L.Rebuffat, G.M.Lanfranconi, F.Magnani, U.Arnaud, G.Monti: "Installation de câbles d'énergie sous-marine dans de conditions d'environnement difficiles, expérience de la liaison 400 kV de Messine" CIGRE, 21-10, Paris, 1984, 9 p.
137. E.Occhini, P.Metre, G.Portinari, B.Vecellio "Thermal, Mechanical and Electrical Properties of EPR Insulation in Power Cables". In: IEEE Transactions PAS-102, Nr.7, 1983, p. 1942-1953.
138. G.Bahder, M.Sosnowski, C.Katz, R.Eaton, K.Klein "Electrical Breakdown Characteristics and Testing of High Voltage XLPE and EPR Insulated Cables". In: IEEE Transactions PAS 102, Nr.7, 1983, p.2173-2185.
139. K.Ohata, H.Kojima, T.Shimomura, K.Asahi "Development of XLPE -Moulded Joint for High Voltage XLPE Insulated Cable. In: IEEE Transactions PAS-102, Nr.7, 1983, p.1935-1941.
140. M.Takaoka, M.Ono, I.Kaji. "Development of 275 kV XLPE Cable System and Prospect of 500 kV XLPE Cable". In: IEEE Transactions PAS 102, Nr.9, 1983 p.3254-3263.
141. V.Titihăzan "Posibilități de creștere a solicitărilor cablurilor electrice pentru puteri mari - regimul termic al cablurilor". Referat I, IPTVT 1980, 72 p.
142. V.Titihăzan "Cabluri de mare putere și înaltă tensiune - calculul solicitării electrice a izolației". Referat II, IPTVT 1984, 66 p.
143. V.Negru, V.Titihăzan "Solicitarea izolației mantalei metalice a cablurilor la aplicarea undelor de impuls". In: Bul.șt.și tehnic al IPTVT Tom 25/39) Fasc.1-1980, p. 141-143.
144. V.Titihăzan "Regimul termic al unui cablu de înaltă tensiune cu circulație forțată de ulei, modelat pe calculator analogic". In: Bul.șt.și tehnic al IPTVT Tom 25(39) Fasc. 1-1980, p.135-141.
145. V.Titihăzan, C.Hlușcu "Simularea pe calculator numeric a regimului termic pentru un cablu de înaltă tensiune cu răcire forțată. Sesiunea de comunicări tehnico-științifice, Secția XI.Electroenergetică, Fasc.17, 27-28, oct. 1979, IPTV Timișoara.

146. V.Titihăzan, M.Titihăzan, Gh.Eucea "Calculul câmpului electric în izolația stratificată cu pierderi dielectrice a cablurilor de înaltă tensiune. In: Conferința Națională de Energetică, vol.33, p.88-97, București, 23-25 noiembrie 1983.
147. V.Titihăzan, V.Negru "Model numeric pentru calculul câmpului electric în izolația cu pierderi dielectrice a cablurilor de înaltă tensiune". In: Conferința Națională de Electrotehnică și Electroenergetică, vol.13, p.147-152, Craiova, 20-21 sept. 1984.
148. V.Titihăzan "Calculul câmpului electric în conul deflector liniarizat și din mai multe straturi la un cablu de înaltă tensiune". In: Simpozionul Național de Rețele Electrice, Secția I, p.30-35, Timișoara, 25-26 oct. 1984.
149. V.Titihăzan, M.Titihăzan "Metodă de calcul al câmpului electric în conul deflector cu două straturi la un cablu de înaltă tensiune". In: Sesiunea de comunicări și referate tehnico-științifice, Secția I, Electroputere Craiova, 15 noiembrie 1984, 9 p.
150. Arie A.ARIE, M.Ungureanu, V.Titihăzan "Metodă de calcul a profilului deflector pentru cabluri de energie". In: Bul.șt.și tehnic al IPTV Timișoara, Tom 30(44), 1985.
151. V.Titihăzan, M.Titihăzan "Calculul câmpului electric în ecranul semiconductor și în izolația cablurilor de înaltă tensiune la aplicarea tensiunii de impuls". In: Sesiunea de comunicări tehnico-științifice Electrotehnica și problemele actuale ale progresului tehnic, Secția 6, ICPE București 19-20 sept.1985, 6 p.
152. Contract de cercetare Nr.97/1985 IPTV Timișoara "Metode teoretice de calcul și metode practice de determinare a temperaturii cablurilor de energie pregătite pentru încercări la tensiune de impuls". Beneficiar: ICPE București, responsabil de temă: șef lucr.ing.V.Titihăzan.
153. Buletin de încercare Nr.50/1982 "Măsurarea capacității electrice și a impulsurilor de sondaj pe fiecare fază a cablului AHXADMK, $1 \times 500 \text{ mm}^2$ 64/110 kV Nokia - pozat la Arad". IPTVT - Catedra Electroenergetică, 4.XII.1982. Buletin întocmit de ing.V.Titihăzan.
154. V.Titihăzan "Soluții privind amplasarea instalațiilor de încercare într-un laborator de înaltă tensiune". In: Bul.șt.de comunicări "Tehnic 2000".Ed.III, 13-14 apr. 1984, Electrotimiș-Timișoara, pag.168-178.

155. V.Titihăzan, M.Titihăzan, Chirleşen A., G.Ianc, M.Purice, N.Danciu, I.Bistriian "Soluție tehnologică pentru realizarea unor module de redresare a tensiunii înalte pentru instalația de vopsire electrostatică". Certificat de inovator nr. 1064/17.08.85. Inovație aplicată la întreprinderea Electrobanat Timișoara.
156. V.Titihăzan, M.Titihăzan, M.Purice, N.Danciu, N.Bistriian. "Module de redresare a tensiunii înalte pentru instalația de vopsire electrostatică". In: Buletinul șt. și tehnic al IPTV Timișoara, Tom 31(45), 1986.
157. Al.B.Dezei, V.Titihăzan, M.Dădălu "Cutii terminale pentru cablu de 110 kV cu ecrane cilindrice". In: Buletin ses.de comunicări "Tehnic 2000", Ed.V, 6-7 mai 86, Electrotimiș, Timișoara, pag.431-436.
158. M.Titihăzan, V.Titihăzan "Metodă analitică de calcul al câmpului electric în conul deflector liniarizat". Sesiunea științifică a Facultății de electrotehnică, 16-17 mai 1986, Iași.
159. M.Titihăzan, V.Titihăzan, M.Maricaru, D.Rucinschi "Metodă de determinare a temperaturii conductorului cablurilor de energie, în vederea încercării la impuls de înaltă tensiune". Propunere de invenție înregistrată la ICPE București Nr. ^{OSIM} 154.802/19.10.1986.
160. M.Titihăzan, M.Maricaru, D.Rucinschi, V.Titihăzan "Metode de determinare a repartiției câmpului termic în izolația cablurilor de înaltă tensiune". Simpozionul Național de Rețele Electrice, Pitești, sept.1986.
161. V.Titihăzan, V.Negru "Solicitarea izolației stratificate a liniilor electrice în cablu în regim tranzitoriu". Simpozionul Național de Rețele Electrice, Pitești, sept. 1986.
162. Arie A.Arie, N.Ungureanu, I.Grigoriu, V.Titihăzan "Determination of the deflecting profile for a cryorezistive cable of 20 kV; methods of calculation and experimental results". Seminarul tehnico-științific CAER de criogenicie, IPTVT, 6-11.X.1986, pag.9-11.
163. M.Titihăzan, V.Titihăzan "Analytical calculus method for electric fields in the sheet insulation of cryocables". Seminar CAER "Cercetări privind caracteristicile materialelor pentru cabluri criorezistive". IPTV Timișoara, 6-11.X.1986, pag.12-14.

METODE DE CALCUL A SOLICITĂRII IZOLAȚIEI CABLURILOR
DE ÎNALTĂ TENSIUNE ȘI MARE PUTERE.

C U P R I N S

	Pag.
INTRODUCERE	1
Cap.1. CARACTERISTICILE CABLURILOR DE Î.T. ȘI MARE PUTERE ȘI STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRIILOR ÎN DOMENIUL CABLURILOR.	3
1.1. Rolul și aspecte caracteristice utilizării ca- blurilor de înaltă tensiune și mare putere în- tr-un sistem electroenergetic	3
1.2. Evoluția, parametrii principali și exemple de cabluri de f.t. construite pe plan mondial.	6
1.3. Probleme specifice privind concepția, cons- truția și montarea cablurilor de f.t.	15
1.4. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul cablurilor.	20
1.4.1. Laboratoarele de încercări ale Societă- ții "Electricité de France" de la Renardières.	21
1.4.2. Stand de încercări cabluri în cadrul Laboratoarelor KEMA-Olanda	23
1.4.3. Stația experimentală de la Suvereto Foscane, a Societății ENEL-Italia.	24
Cap.2. METODE ÎN CALCULUL REGIMULUI TERMIC AL CABLURILOR.	26
2.1. Regimul termic tranzitoriu rezolvat prin fo- losirea funcțiilor Green.	28
2.1.1. Baza matematică a metodei.	28
2.1.2. Soluția ecuației transmisiei căldurii.	30
2.1.3. Modul de aplicare a rezultatelor stu- diului în diverse cazuri practice.	33
a) Calculul temperaturii la suprafața unui cable cu un singur înveliș omogen.	33
b) Calculul temperaturii la suprafața con- ductorului pentru un cable cu mai mul- te învelișuri concentrice.	34

	Pag.
c) Calculul temperaturii la suprafața unui singur cablu pozat în sol la adâncimea h	35
d) Cazul a trei cabluri pozate în sol.	36
2.2. Regimul termic al cablurilor cu răcire naturală	37
2.2.1. Ecuația bilanțului termic.	37
2.2.2. Calculul încălzirii în regim de lungă durată.	38
2.2.2.1. Regimul permanent - regim de lungă durată cu sarcină permanent constantă.	38
2.2.2.2. Regimul de lungă durată cu sar- cină variabilă în trepte.	40
2.2.2.3. Schema termică echivalentă pen- tru regimul de lungă durată cu sarcină variabilă	42
2.2.2.4. Regimul de lungă durată cu sar- cină variabilă ciclică - soluții numerice	46
2.2.3. Calculul încălzirii în regim de scurtă durată.	50
2.2.3.1. Încălzirea conductorului în ipo- teza adiabatică.	51
2.2.3.2. Schema termică echivalentă pentru regimul de scurtă durată	52
2.3. Regimul termic al cablurilor cu răcire forțată.	54
2.3.1. Ecuația de bilanț termic în cazul unui singur cablu.	55
2.3.2. Influența reciprocă între circuitul de dus și circuitul de întors al fluidului de răcire.	56
2.3.2.1. Modelarea pe calculator analogic a răcirii forțate a unui cablu de mare putere.	58
2.3.2.2. Modelarea pe calculator numeric a răcirii forțate a unui cablu de mare putere.	60
2.3.2.3. Soluții analitice pentru sistemul de ecuații diferențiale(2.127)	62

2.4. Incercări experimentale în LIT-ICPE Bucuresti, IPTV Timișoara și rezultate obținute prin calcul privind încălzirea cablurilor	64
2.4.1. Laboratorul de înaltă tensiune al ICPE București	65
2.4.2. Laboratorul de Rețele electric în cablu din I.P.București.	66
2.4.3. Laboratorul de Modele pentru TTI din IPTV Timișoara.	67
2.4.4. Rezultate obținute prin măsurători experimentale.	68
2.4.5. Rezultate obținute prin calcul	74
2.4.5.1. Aplicarea metodei funcțiilor Green	74
2.4.5.2. Simularea pe calculator analo- gic tip MEDA 42 TA.	78
2.4.5.3. Calculul regimului de durată pentru cabluri trifazate.	86
2.4.5.4. Calculul regimului de durată pentru cabluri monofazate	90
Cap.3. CALCULUL REPARTITIEI CIMPULUI ELECTRIC ÎN IZOLAȚIA COMPUSĂ DIN MAI MULTE STRATURI ÎN ZONA CILINDRICĂ A CABLURILOR	94
3.1. Cîmpul electric în izolația unui cablu cu două straturi, la aplicarea unui impuls dreptunghiular	101
3.2. Cîmpul electric în izolația unui cablu cu două straturi, la aplicarea tensiunii alternative.	108
3.3. Cîmpul electric în izolația din trei straturi a unui cablu, la aplicarea tensiunii continue	113
3.4. Cîmpul electric în izolația din trei straturi a unui cablu, la aplicarea tensiunii alternative.	116
3.5. Aplicații numerice și încercări în Laboratorul de înaltă tensiune din IPTV Timișoara	118
3.5.1. Încercarea cablului tip AZYSEY 1x120 mm ² 12/20 kV fabricat la ICPE București.	118
3.5.2. Modelarea pe calculatoare a solicitării izolației cablului tip AHXADMK 1x500 mm ² 110 kV fabricat de firmă NOKIA-Finlanda.	123

	Pag.
Cap.4. CALCULUL REPARTITIEI CIMPULUI ELECTRIC IN ZONA PROFILULUI DEFLECTOR AL CABLURILOR	129
4.1. Cimpul electric in izolație conului deflector cu un singur dielectric, fără pierderi dielectrice.	133
4.2. Cimpul electric in izolație conului deflector cu "n" straturi dielectrice, fără pierderi	137
4.3. Metoda diferențelor finite pentru calculul cimpului electric in profilul deflector	140
4.4. Calculul profilului deflector de întărire și respectiv de reducere a izolației.	144
4.5. Cimpul electric in izolație profilului deflector liniarizat, cu două straturi dielectrice, cu pierderi dielectrice, la aplicarea tensiunii continue.	147
4.6. Cimpul electric in izolație profilului deflector cu două straturi dielectrice - cu pierderi, la aplicarea tensiunii alternative.	156
4.7. Verificări experimentale și rezultate obținute prin calcul.	158
5. CONCLUZII	168
6. A N E X E	170
7. BIBLIOGRAFIE.	180