

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ ȘI
ELECTROENERGETICĂ**

ing. Adrian MARINCU

**CONTRIBUȚII LA CALCULUL ȘI ANALIZA
INFLUENȚEI LINIILOR ELECTRICE AERIENE DE
ÎNALTĂ TENSIUNE ASUPRA CIRCUITELOR
ELECTRICE ÎNVECINATE**

TEZĂ DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

641.054
369 Δ

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

Prof.dr.ing. Adrian BUTA

TIMIȘOARA - 2003

CUPRINS

1	Introducere	
2	Linii electrice compacte-soluție de viitor a transportului de energie electrică	
2.1.	Considerații generale	31
2.2.	Direcții de cercetare.....	32
2.3	Aspecte restrictive.....	40
2.4.	Concluzii.....	42
3	Influențe ale liniilor de înaltă tensiune	
3.1.	Probleme generale. Tipuri de influențe	44
3.1.1.	Geometria liniilor electrice aeriene.....	45
3.1.2.	Calculul capacităților parțiale.....	52
3.1.3.	Calculul inductivităților mutuale.....	54
3.1.4.	Calculul câmpului electric în puncte din vecinătatea LEA.....	56
3.1.4.1.	Linie electrică aeriană simplu circuit.....	60
3.1.4.2.	Linie electrică aeriană dublu circuit.....	75
3.1.5.	Câmpul magnetic în puncte din vecinătatea liniei electrice de înaltă tensiune.....	83
3.1.5.1.	LEA simplu circuit.....	84
3.1.5.2.	LEA dublu circuit.....	94
3.2.	Influența electrostatică a liniilor electrice de înaltă tensiune.....	107
3.2.1.	Regimul de funcționare al circuitului inductor este unul permanent.....	107
3.2.2.	Expresii de calcul pentru tensiunile induse electrostatic.....	119
3.2.3.	Circuitul inductor funcționează în regim de avarie.....	122
3.3.	Influența electromagnetică a liniilor electrice de înaltă tensiune	136
3.3.1.	Regimul de funcționare al circuitului inductor este unul permanent.....	136
3.3.2.	Circuitul inductor funcționează în regim de avarie.....	140
3.4.	Influența rezistivă.....	151
3.4.1.	Considerații asupra modului de calcul al tensiunilor determinate prin cuplaj rezistiv.....	151
3.4.2.	Limitarea tensiunilor induse prin cuplaj rezistiv.....	154
3.5.	Considerarea conductorului de gardă.....	155

3.5.1. Rolul conductorului de protecție.....	155
3.5.2. Efectul de ecranare al conductoarelor de protecție.....	156
3.5.3. Factorul de reducere al conductorului de protecție.....	158
3.6. Concluzii.....	162
4 Calculul tensiunilor induse de LEA de înaltă tensiune în domeniul numerelor fuzzy	
4.1. Probleme generale ale mulțimilor fuzzy.....	176
4.2. Numere fuzzy. Operații cu numere fuzzy. Defuzzyficare.....	179
4.3. O abordare fuzzy a calculului tensiunilor induse de liniile electrice aeriene în circuitele vecine.....	191
4.4. Concluzii și propuneri.....	194
5 Algoritm și program de calcul a tensiunilor induse de LEA	
5.1. Metodologia de calcul.....	196
5.2. Algoritmul programului.....	200
5.3. Aplicarea programului.....	209
5.5. Concluzii.....	235
6 Determinări experimentale	
6.1. Scopul determinărilor.....	236
6.2. Determinări în laborator.....	237
6.3. Determinări în instalații.....	238
6.4. Concluzii.....	243
7 Sistem pentru sesizarea influențelor periculoase produse de liniile electrice de înaltă tensiune	
7.1. Considerații generale. Critica soluțiilor existente.....	245
7.2. Soluția propusă. Principiul de funcționare, avantaje, dezavantaje.....	247
7.3. Încercări experimentale, verificări.....	252
7.4. Concluzii.....	253
8 Concluzii generale și contribuții	254
Bibliografie	

Cuvânt înainte

Această lucrare a fost elaborată după o perioadă îndelungată de grea suferință. Fără a se resemna în fața unei crunte boli, cum este cancerul, autorul a profitat de sprijinul necondiționat, competent și prietenos al conducătorului științific, pentru a desăvârși conținutul tezei, structurat în opt capitole.

Un mare cunoscător al științelor ingineresti spunea că dacă Egiptul antic a fost un dar al Nilului, societatea modernă este un dar al electricității, cel puțin sub două din aspectele ei esențiale: energia și informația. O împreunare fericită a celor două este realizarea, exploatarea și coordonarea sistemului electroenergetic. Puține elemente există în tehnica actuală care să ajungă la o complexitate, importanță și utilitate ca acest sistem electroenergetic. El a devenit elementul vital al vieții social economice pe Pământ. Dar dezvoltarea sistemului electroenergetic conduce și la aspecte cu implicații negative, care afectează defavorabil mediul ambiant, sistemele de telecomunicații, informatice etc., producând uneori în situații limită grave dezechilibre.

Creșterea puterilor electrice transportate de liniile sistemului poate fi realizată și prin creșterea tensiunii de transport, soluție care aplicată fără luarea unor măsuri specifice de reducere a impactului cu mediul ambiant poate să conducă la perturbarea echilibrului ecologic cu consecințe negative asupra sistemelor biologice faună, floră și chiar omenesc.

Liniile de înaltă tensiune prin câmpurile electromagnetice intense și descărcările electrice posibile reprezintă fără îndoială surse de poluare electromagnetică, sonoră și chimică. Compatibilitatea electromagnetică corespunde tocmai coexistenței neconflictuală a surselor de energie electromagnetică cu receptoarele aferente, printre acestea din urmă numărându-se și mediul ambiant. De fapt acțiunile sunt reciproce pe de o parte, adică și mediul acționează asupra elementelor de sistem (în primul rând asupra liniilor electrice aeriene expuse fenomenelor electromagnetice), iar pe de altă parte acțiunile se manifestă și între subsistemele și chiar componentele aceluiași subsistem al sistemului electroenergetic (de exemplu liniile de transport- linii de înaltă tensiune acționează asupra liniilor de distribuție situate în vecinătate- linii de joasă sau de medie tensiune).

Lucrarea de față își propune să contribuie la aprofundarea tocmai a acestor aspecte din urmă, încercând să sistematizeze pe de o parte cunoștințele legate de calculul câmpului electromagnetic din jurul conductoarelor, a tensiunilor induse, pe de altă parte să dea o nouă dimensiune acestor calcule apelând la numerele fuzzy. În plus lucrarea aduce în fața celor care exploatează liniile electrice și în general instalațiile de înaltă tensiune, un nou mijloc de prevenire (de avertizare) despre existența unor tensiuni induse care depășesc o limită impusă (de obicei admisibilă).

În primul capitol, autorul justifică necesitatea studiului efectuat asupra efectelor biologice pe care le determină câmpul electromagnetic al liniilor electrice de înaltă tensiune. Riscul posibil asupra sănătății pe care-l prezintă apropierea de liniile electrice aeriene de transport și distribuție a energiei electrice, funcționând în regim permanent sau de avarie, este pus în evidență printr-o mare varietate de studii.

În al doilea capitol al tezei este prezentată o soluție a viitorului, expresie a optimizării și compactizării liniilor electrice aeriene, impusă de necesitatea asigurării unei restricționări spațiale a construcției acestora, creșterea capacității de transport a energiei electrice, reducerea consumului material și nu în ultimul rând încadrarea estetică și ecologică a liniilor în ambianța mediului natural.

Capitolul trei, considerat de autor ca fiind fundamental, cuprinde o analiză numerică a câmpului electric și magnetic în punctele din vecinătatea liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune atunci când acestea funcționează atât în regim permanent cât și în regim de avarie. Modelarea numerică s-a făcut în mediul Mathcad 2001 Professional, pentru liniile electrice aeriene de 110 kV, 220 kV și 400 kV, simplu respectiv dublu circuit. S-au pus în evidență valorile potențialului electric față de pământ, ale intensității câmpului electric și ale inducției magnetice în diferite puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene de înaltă tensiune, atât pentru un regim permanent de funcționare cât și pentru regimul de avarie (scurtcircuit monofazat). Aceste valori au fost puse în evidență și în considerentul influențelor de natură electrostatică (cuplaj capacitiv), electromagnetică (cuplaj inductiv) și rezistivă (cuplaj galvanic).

Capitolul 4 conține o abordare fuzzy a calculului tensiunilor induse de liniile electrice aeriene în circuitele vecine prin influență electrostatică, punându-se bazele unui estimator fuzzy completat cu un sistem de reguli care se pretează unei memorii

fuzzy asociate. În evaluarea mărimilor fiind excluse simbolurile discrete și numerele, se apelează la termeni lingvistici, trecându-se de la conceptul de " probabilitate" la cel de " posibilitate" în gestionarea informațiilor incerte și inexacte.

În capitolul 5, determinarea câmpului electromagnetic în vecinătatea liniilor electrice aeriene se face printr-un pachet de programe MATLAB R12. Se pun în evidență valorile câmpului electric și magnetic atât în regim permanent de funcționare cât și pentru regimul de avarie al liniilor electrice. Cu același pachet de programe s-au calculat valorile câmpului electric și magnetic în puncte din vecinătatea unei linii electrice aeriene compacte de 110 kV.

Capitolul 6, corespunde unei incursiuni în domeniul măsurătorilor efectuate asupra mărimilor de stare ale câmpului electromagnetic în vecinătatea liniilor electrice aeriene atât într-un cadru de laborator cât și în puncte din mediul exterior, învecinat acestor linii electrice. Măsurătorile efectuate confirmă în bună măsură modelul numeric obținut atât pentru câmpul electric cât și pentru cel magnetic, dacă ținem seama de corecturile care se impun ca urmare a erorilor introduse de factorul subiect.

În capitolul 7 este prezentată funcționarea sistemului de avertizare al prezenței unui câmp electric periculos în zona de activitate. Soluția prezentată vine în sprijinul protejării indivizilor nu numai în situația lucrului "sub tensiune", ci și în cazul unei staționări de lungă durată în câmp electromagnetic. Realizarea aparatului în funcție de acest deziderat a contribuit la soluționarea mai multor aspecte aflate sub incidența protecției muncii în instalațiile electrice aflate sub tensiune.

Ultimul capitol al lucrării încumunează conținutul prezentat, prin sublinierea contribuției autorului în rezolvarea problemelor propuse.

Ca o mângâiere a sufletului trudit în realizare, mă cuprind gânduri calde de mulțumire față de îndrumătorul meu pe tărâm științific, domnul prof.dr.ing. Adrian Buta, care cu bunătate și profesionalism m-a acceptat pentru relativa mea desăvârșire profesională

Recunoștiința mea față de domnul prof.dr.ing. Ioan De Sabata, care mi-a dat girul pregătirii, prin examenele și referatele susținute în accepțiunea domniei sale, este nelimitată.

Excelenței Sale, domnului prof.dr.doc.ing. Constantin Șora, fără a cărui iluminare, drumul meu spre cunoaștere ar fi fost o incertitudine, calde mulțumiri.

Tuturor colegilor de la catedrele de Electrotehnică și Electroenergetică le mulțumesc pentru bunătatea necondiționată care-i caracterizează, pentru atmosfera de caldă prietenie pe care o determină în imediata lor vecinătate.

Cuvintele sunt de prisos în exprimarea sentimentelor mele față de cel care este un adevărat om prin înalta ținută a demnității, prin căldura sa sufletească și dragostea nelimitată față de semenii. Mulțumesc domnului prof.dr.ing.Dumitru Daba, pentru tot ceea ce a făcut pentru mine

Domnului prof.dr.ing. Ioan Vetreș, îi mulțumesc că m-a ajutat în momente grele să mă regăsesc.M-a încurajat cu blândețe și prietenie să susțin cumpăna vieții în fireasca dreptate.

Colegului și prietenului meu dr.ing.Marian Greconici, îi mulțumesc și-i sunt recunoscător pentru sprijinul nemijlocit pe care mi l-a acordat nu numai în efortul meu de a-mi elabora teza ci și în împrejurări în care prietenia își are rostul firesc.Același sentiment de recunoștință îl am și față de colega mea Daniela Vesa care m-a ajutat în mod necondiționat atunci când împrejurările o impuneau.

Mulțumesc din suflet domnului prof.dr.ing. Viorel Titihazan și doamnei Ana Nicolaescu pentru sprijinul profesional și colaborarea fructoasă asigurată în permanență.

Ar fi nefiresc ca-n aceste momente cruciale pentru soarta mea profesională, să mi-mi destăimui profunde sentimente pe care le nutresc față de familia mea, față de soția mea Angela, care mi-a fost și-mi este alături cu credința în mai bine. Cu dragoste și bunătate îmi stă alături ca sprijin permanent. Seva vieții mele se trage din dragostea profundă care mă încearcă față de fetele mele Carmen-Cristina, Gabriela-Lucia și feciorul meu Mihai-Vlad, cărora le mulțumesc că există.

Tuturor multă sănătate!

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

Prin conținutul său această lucrare își propune să pună în evidență limitele peste care expunerea organismului în câmp electromagnetic poate determina efecte nedorite asupra stării de sănătate. Definim mediul electromagnetic extern ca fiind totalitatea fenomenelor electromagnetice care înconjoară organismele vii, considerate ca și corpuri finite supuse acțiunii lor și în același timp surse de câmpuri electromagnetice proprii. Un efect nociv constă într-o alterare a stării de sănătate a persoanelor expuse sau a descendenților lor.

Ambianța naturală este realizată de câmpul electric de la nivelul solului a cărui intensitate poate fi , în anumite condiții de 100 – 200 Vm^{-1} , putând ajunge pe timp de furtună, până la 10 – 20 kVm^{-1} . În același timp pământul determină prin natura sa un câmp magnetic constant, a cărui inducție este determinată de condițiile geomagnetice, fiind estimată la aproximativ 40 μT , (latitudinea Europei).

Cele mai mari valori ale mărimilor de stare proprii câmpului electromagnetic se regăsesc în mediul profesional la care sunt expuși cei care asigură întreținerea liniilor și efectuează lucrări sub tensiune. Având în vedere valorile extreme ale mărimilor de stare, care pot apare atât în regim de avarie, cât și în cazul lucrărilor executate pe un circuit electric aflat sub influența electrostatică, electromagnetică și rezistivă a circuitelor electrice învecinate, se poate afirma că în aceste condiții, la nivelul liniilor aeriene de înaltă tensiune se regăsesc valori ale câmpului electric care depășesc 300 kVm^{-1} , iar în vecinătatea instalațiilor electrice cu o intensitate a curentului electric mare inducția magnetică este de ordinul mai multor militesla. Dacă în cazul câmpurilor electrice intense existența

unor structuri metalice sau lemnoase în domeniul învecinat liniei electrice asigură o ecranare eficientă, pentru câmpul magnetic ecranarea presupune din punct de vedere tehnic soluții complexe, deoarece materialele uzuale nu realizează o atenuare corespunzătoare.

În literatura de specialitate, din rațiuni fizice și biologice, se pun în evidență efectele câmpului electromagnetic pe termen lung și efectele puse în evidență într-un termen scurt (efecte acute) [70].

Numeroase studii sunt făcute asupra efectelor directe și indirecte ale câmpului electromagnetic [48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58]. Efectele directe sunt rezultatul unei interacțiuni nemijlocite între câmpul electromagnetic și organismul uman, iar cele indirecte constau în interacțiunea cu un obiect aflat sub un potențial electric diferit de cel al corpului omenesc. Sunt prezentate rezultatele unor studii epidemiologice și de laborator, ca principale criterii de stabilire a nivelelor de referință pentru evaluarea practică a riscurilor în cazul expunerilor în câmp electromagnetic.

Lucrarea prin prezentarea pe care o face în conținut se referă atât la expunerea personalului cât și a publicului.

IRPA (Asociația internațională de protecție contra radiațiilor) și INIRC (Comitetul internațional de radiații) au publicat în 1988 și 1990 un referat asupra expunerii în câmp electromagnetic de înaltă frecvență și de joasă frecvență 50/60 Hz.

Stabilirea unor valori limită pentru expunere impune numeroase acorduri. Trebuie apreciată validitatea rapoartelor științifice și extrapolarea la om a rezultatelor obținute pe animale. Valorile limită folosite în această lucrare sunt stabilite în exclusivitate pe baza datelor științifice consultate. Stadiul actual al cunoașterii indică un nivel garantat de protecție adecvată expunerii în câmp electromagnetic.

Sunt prezentate valorile limită ale expunerii în câmpuri electrice, magnetice sau electromagnetice, care sunt stabilite ca fiind în mod direct producătoare de efecte asupra sănătății, numite restricții de bază, care au în vedere următoarele mărimi fizice:

- densitatea de curent (J)
- debitul absorbției specifice (DAS)
- densitatea de putere (S).

Singura mărime măsurabilă în afara corpului este densitatea de putere în aer, în vecinătatea persoanelor expuse.

Nivele de referință sunt indicate în urma evaluării practice de expunere și depășire a restricțiilor de bază. Anumite nivele de referință sunt consecințe ale restricțiilor de bază corespunzătoare unor măsurători și (sau) calcule, altele sunt determinate de percepția unor efecte nocive indirecte expunerii în câmp electromagnetic. Mărimile considerate sunt:

- intensitatea câmpului electric (E); câmpul electric propriu organismului, este de $10^5 - 10^7$ ori mai slab decât cel aplicat din exterior.
- inducția magnetică (B) respectiv intensitatea câmpului magnetic (H)
- densitatea de putere (S)
- intensitatea curenților prin membre (I)

Mărimile considerate ca urmare a efectelor indirecte sunt:

- curentul de contact (I_c)
- absorbția specifică (AS).

Pentru anumite condiții de expunere valorile măsurate sau calculate a unei mărimi fizice oarecare pot fi comparate cu nivelele de referință corespunzătoare. Depășirea nivelelor de referință impune respectarea restricțiilor de bază impuse prin considerarea măsurilor de protecție complementare.

Lucrarea nu își propune ca necesară sublinierea posibilității de evitare a perturbațiilor suferite de dispozitivele medicale cu componente metalice, cum ar fi stimulatorul cardiac care este afectat de valori mult sub nivelul de referință.

Termenul generic de “efecte biologice” se referă atât la efectele benefice cât și la cele nocive pentru sănătatea organismului expus în câmp electromagnetic. Cuantificarea parametrilor de expunere conduce la aprecierea impactului pe care îl are câmpul electromagnetic asupra organismului, fiind puse în evidență efectele pe termen lung datorate unui proces cumulativ fără a avea în prezent un fundament biofizic și care apar după o perioadă de latență, respectiv efectele pe termen scurt care se manifestă în momentul imediat următor și dispăre în general imediat ce încetează acțiunea câmpului electromagnetic, fiind în majoritatea cazurilor un proces reversibil. Efectele biologice acute sunt în general stabile, reproductibile, recunoscute și fac obiectul recomandărilor de valori limită de expunere. În contrast cu acestea, efectele pe termen lung constituie încă obiectul cercetărilor, rezultatele prezentate în urma unor studii epidemiologice nefiind în prezent concludente.

Fundamentarea limitelor de expunere stabilite în urma consultării literaturii științifice publicate conduce la aplicarea acelor criterii de evaluare care se dovedesc credibile prin diferite raporturi de observație [48.49], fiind validate numai acele efecte care sunt confirmate.

Efectele cancerigene ne fiind confirmate, lucrarea se bazează numai pe efectele imediate asupra sănătății, cum ar fi stimularea musculară sau a nervilor periferici, șocuri și arsuri determinate de contactul cu obiecte conductoare, sau creșterea temperaturii țesuturilor sub efectul absorbției energiei ca urmare a expunerii în câmp electromagnetic. În privința eventualelor efectelor cu termen îndelungat,

(cum ar fi creșterea riscului de cancer) s-a ajuns la concluzia că datele disponibile sunt insuficiente pentru a stabili valorile limită ale expunerii; recente cercetări epidemiologice au adus elemente noi prin care se pune în evidență faptul că există o asociere între limitele de expunere (la inducții magnetice mult inferioare valorilor recomandate în prezent pentru frecvența 50 Hz) și efectele cancerigene.

Prin expunerea în vitro, în câmp electric sau electromagnetic de joasă frecvență s-au pus în evidență reacții tranzitorii ale celulelor și țesuturilor, dar fără relație expunere – răspuns net. Aceste studii au o valoare limitată în evaluarea efectelor asupra sănătății, deoarece numeroase observații făcute în vitro nu pot fi puse în evidență în viața reală. Rezultatele obținute în vitro nu pot fi considerate ca o bază suficientă în evaluarea efectelor asupra sănătății organismului expus în câmp electromagnetic.

Existența fenomenelor de interacțiune ionică la nivelul celulei și în macromoleculele membranelor, par să implice un cuplaj al interiorului celulei cu semnalele emise de neurotransmițători, hormoni, antigeni și anticorpi. Au fost semnalate deficiențe ale secrețiilor endocrine, ale răspunsului la stimuli normali, ale schimburilor cerebrale de ioni de calciu, ale imunoreactivității limfocitelor, ale excitabilității electrice a țesutului neuronal precum și a procentelor de creștere tisulară.

Câmpul electric sau magnetic variabil, interacționează cu materia vie prin influență electrostatică (cuplaj capacitiv), influență electromagnetică (cuplaj inductiv) și absorbția energiei de natură electromagnetică

Interacțiunea câmpului electric cu corpul uman provoacă:

- o scurgere de sarcini electrice (curent electric)
 - polarizarea sarcinilor legate (formarea dipolilor electrici)
-

- reorientarea dipolilor electrici existenți în țesuturi

Relativa importanță a acestor efecte depind de proprietățile electrice ale corpurilor, altfel spus conductivitatea electrică (care determină valoarea curentului electric) și de permitivitatea sa (care determină mărimea polarizației electrice).

Există în literatura de specialitate un mare număr de rapoarte asupra efectelor în vitro ale câmpurilor asupra proprietăților membranei celulare (transfer ionic și interacțiunea nitrogenelor cu receptorii de la suprafața celulei) și ale modificărilor de funcții celulare și de proprietăți legate de creștere (creșterea proliferării, alterarea metabolismului, expresia genelor, biosinteza proteinelor și activarea enzimatică) [48, 55]. Un mare interes prezintă efectele câmpurilor de joasă frecvență asupra trecerii ionilor de calciu (Ca^{2+}) prin membrana celulei și a concentrației intracelulare a acestor ioni [56], pentru modul de sinteză al proteinei [57] și asupra activității enzimelor, ca ornitina – decarboxilază, (ODC) care sunt legate de înmulțirea celulelor și de promovare tumorală [58]. Cu toate acestea, înainte de a putea utiliza aceste observații pentru definirea limitelor de expunere, este indispensabil de a stabili în același timp reproducerea lor și certitudinea lor în raport cu cancerul sau alte efecte nocive.

Dacă un mare număr de studii sunt consacrate determinării efectelor biologice ale câmpurilor electrice și magnetice, foarte puține studii vizează o definire sistematică a caracteristicilor câmpului care conduc la apariția perturbațiilor semnificative ale funcțiilor biologice. Este bine stabilit că un curent electric indus poate provoca în mod direct, stimularea țesuturilor nervoase și musculare atunci când densitatea curent indus depășește anumite valori de prag [48, 49]. Acele densități de curent care nu provoacă stimularea țesuturilor excitabile pot totuși perturba

activitatea electrică normală și o influență asupra excitabilității neuronale. Știm că activitatea sistemului nervos central este sensibilă la câmpuri electrice endogene produse prin acțiunea celulelor nervoase adiacente, la nivelele inferioare celor necesare la stimularea directă.

Mulți autori consideră că transmiterea semnalelor electrice slabe se face prin antrenarea interacțiunilor cu membrana celulară, de unde răspunsurile biochimice ale citoplasmei conduc la rândul lor la modificări ale stărilor funcționale și înmulțirea celulelor. Făcând apel la modelul simplificat al comportamentului celulelor izolate în câmpuri mici, s-a calculat că un semnal electric în câmpul extracelular trebuie să fie superior unei valori de ordinul $10 \div 100 \frac{mV}{m}$ (ceea ce corespunde la o densitate de curent indus de ordinul $2 \div 20 \frac{mA}{m^2}$) pentru depășirea nivelului zgomotului endogen fizic și biologic în membranele celulelor [50].

Datele existente arată că multe caracteristici structurale și funcționale ale membranelor se pot găsi modificate ca răspuns la câmpuri induse cu intensitate egală sau inferioară față de $100 \frac{mV}{m}$ [51]. Se semnalizează alterări neuroendocrine (suprimarea sintezei nocturne a melatoninei, de exemplu) ca răspuns la câmpuri electrice induse cu intensități $E < 10 \frac{mV}{m}$, ceea ce corespunde la densități de curent $J \leq 2 \frac{mA}{m^2}$ [49, 52].

Câmpurile și curenții electrici induși care depășesc nivelul semnalelor bioelectrice endogene în țesuturi antrenează un anumit număr de efecte psihologice de gravitate crescută pe măsura creșterii densității de curent indus [49]. În domeniul densității de curent cuprins între 10 și $100 \frac{mA}{m^2}$, au fost semnalate efecte asupra țesuturilor și modificări ale

641.054

369 Δ

funcțiilor cognitive cerebrale. Dacă densitatea de curent indus depășește $100 \frac{mA}{m^2}$, cu mai multe sute de $\frac{mA}{m^2}$ la frecvențe cuprinse între 10 Hz și 1 kHz, se depășesc pragurile de stimulare neuronală și neuromusculară. Densitățile inițiale de curent cresc progresiv de la frecvențele inferioare de câțiva Hz la cele superioare de 1 kHz. În fine, la valori ale densității de curent extrem de crescute, superioare valorii de $1 \frac{A}{m^2}$ pot apare efecte grave și potențial letale (extrasistole, fibrilații ventriculare, tetanie, insuficiență respiratorie). Gravitatea și probabilitatea inversabilității efectelor asupra țesuturilor se amplifică în cazul expunerii cronice la densități de curent indus care depășesc nivelul de $10 \div 100 \frac{mA}{m^2}$. Este deci justificată limitarea expunerii umane în câmpuri care induc densități de curent superioare valorii de $10 \frac{mA}{m^2}$ la nivelul capului, gâtului și trunghiului la frecvențe cuprinse între câțiva Hz și 1 kHz.

Am omis ipoteza că acțiunile ponderomotoare asupra particulelor de magnetită biogenă din țesutul cerebral, pot explica mecanismul de transmitere a semnalelor în prezența câmpului magnetic [54]. S-a propus un model în care câmpul magnetic acționează asupra particulelor de magnetită, astfel că ele produc deschiderea și închiderea canalelor ionice sensibile la presiune în membrane. Unul din neajunsurile acestui model constă în numărul mic al particulelor de magnetită în raport cu numărul celulelor din țesutul cerebral. Astfel, la om țesutul cerebral conține câteva milioane de particule de magnetită pe gram, repartizate în 105 legături discrete de 5 la 10 particule fiecare [53]. Numărul celulelor țesutului cerebral depășește de 100 de ori numărul particulelor de magnetită și este dificil de explicat cum interacțiunea magnetică a câmpului cu cristalele de

magnetită pot influența, în creier, un număr semnificativ de canale ionice sensibile la presiune. Sunt necesare noi studii, pentru a lămurii rolul biologic al magnetitei și eventual modul multumită căruia acest mineral poate juca un rol în transmiterea semnalelor magnetice.

În evaluarea efectelor câmpului electromagnetic, una din marile probleme este de a ști dacă este sau nu posibil ca acest câmp să aibă efecte asupra dezvoltării produsului de concepție. Din datele științifice publicate, este puțin probabil ca un câmp magnetic de joasă frecvență să aibă efecte defavorabile asupra dezvoltării embrionare și postnatale la manifere [49]. Mai mult, elementele disponibile indică că este puțin probabil ca expunerea în câmpurile electrice sau magnetice cu frecvențe inferioare valorii de 100 kHz să poată determina mutații somatice sau efecte genetice [55].

Expunerea la câmp electric sau magnetic de joasă frecvență, determină în general prin cantitatea de energie electromagnetică absorbită o creștere neglijabilă a temperaturii organismului. La frecvențe superioare valorii de 100 kHz, absorbția de energie și implicit creșterea temperaturii devin semnificative. În general, expunerea în câmp electromagnetic antrenează o distribuție de energie în punctele din interiorul organismului, care poate fi determinată atât prin calcul cât și experimental prin măsurători.

În țesuturi, absorbția specifică de energie electromagnetică este proporțională cu pătratul intensității câmpului electric interior. Absorbția specifică de energie electromagnetică depinde atât de mărimile de stare ale câmpului incident, frecvența, intensitatea, poziționarea sursei față de obiect, cât și de caracteristicile corpului expus: talie, geometrie, proprietățile dielectrice interne și externe. Aceasta mai poate fi influențată

de efectele solului și a altor obiecte reflectorizante din vecinătatea corpului expus în câmp

În modelarea câmpului electric trebuie avut în vedere și faptul că există o dependență de condițiile de expunere, înălțime, forma și orientarea corpului expus în câmp, astfel că densitatea de sarcină electrică pe suprafața corpului poate fi diferită, în funcție de domeniul considerat deci și distribuția curentului indus în interiorul corpului este neuniformă. Pentru câmpurile electrice sinusoidale de frecvență mai mică decât 10 MHz densitatea curentului indus în interiorul corpului crește cu frecvența. Distribuția densității de curent indus variază invers proporțional cu secțiunea transversală a corpului și poate fi relativ ridicată la nivelul capului și gâtului.

La un nivel al expunerii de 5 kV m^{-1} în cele mai nefavorabile condiții, corespunde o densitate a curentului indus de ordinul a $2 \frac{\text{mA}}{\text{m}^2}$ la nivelul gâtului și trunchiului dacă vectorul intensitate de câmp electric este paralel cu axa corpului. Fără îndoială că densitatea curentului indus de un câmp de $5 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$ rămâne în general, conformă cu restricțiile de bază, în condițiile unei expuneri nefavorabile reale.

Dacă convenim să punem în evidență separat și nu în mod cumulativ nivelele de referință, pentru câmpul electric și cel magnetic, din punct de vedere al prevenirii, curentul indus de câmpul electric și câmpul magnetic nu se cumulează.

Se afirmă posibilitatea afectării organismului uman la aproape toate nivelurile. În locurile cu câmpuri puternice de joasă frecvență se descriu următoarele tipuri de interacții biologice:

-producerea de senzații prin stimularea receptorilor superficiali ai organismului.

-inducerea în corp a unor curenți de mică intensitate: câmpul electric intern este de $10^5 - 10^7$ ori mai mic decât câmpul exterior aplicat.

-apariția de scântei la apropierea de obiecte cu potențiale sensibil diferite.

Mecanismele de interacțiune biologică sunt incomplet elucidate; studiile "in vitro" arată existența fenomenelor de interacție ionică în sânul celulei și în macromoleculele membranare, ce par să implice un cuplaj al interiorului celulei cu semnalele emise de neurotransmițători, hormoni, antigeni și anticorpi. Au fost raportate afectări ale secrețiilor endocrine, ale răspunsului la stimuli normali, ale schimburilor cerebrale de ioni de calciu, ale imunoreactivității limfocitelor, ale excitabilității electrice a țesutului neuronal și a procentelor de creștere tisulară (efectele s-au descris pentru anumite frecvențe și intensități ale câmpului).

S-au făcut studii de laborator și studii epidemiologice axate în principal pe sistemul nervos central, pe sistemele funcționale regulatorii, pe variațiile compoziției sanguine, pe efectul teratogen și pe efectul cancerigen.

Un studiu asupra speranței de viață la șoareci expuși în câmp electric arată că expunerea continuă pe termen lung în câmp electric de 10 kV m^{-1} poate scurta speranța de viață [70].

Expunerile la câmpuri electromagnetice pot influența negativ homeostazia calciului, micșorează activitatea sistemului imunitar, activitatea microglială putând iniția un proces de degenerare neuronală.

Efectele câmpurilor electromagnetice asupra organismelor vii apar datorită transformării energiei câmpurilor în alte forme de energie (termică, mecanică, electrică). Există însă un factor de susceptibilitate

individuală care face ca unele persoane să sesizeze efectele câmpurilor, mai ales în situații când expunerea se acompaniază cu alți factori nocivi ca de exemplu stress-ul psihic datorat condițiilor de muncă. Efectele fizice ale câmpurilor electrice (descărcări electrice, modificări ale concentrațiilor ionilor din aer și apariția efectului corona) asupra organismelor sunt percepute deci diferit. La frecvența rețelei (50-60Hz) câmpul electric natural este de aproximativ 10^{-4} V/m în timp ce în stațiile de înaltă tensiune și sub liniile de transport de înaltă tensiune acest câmp poate ajunge și depăși 10^4 V/m.

În organismul uman se induc curenți atât de câmpul electric (curenți deurnati) cât și de câmpul magnetic (curenții Foucault). În aprecierea efectelor biologice se iau în considerare:

-stimulare celulară – stimularea celulelor excitabile (legea “tot sau nimic”) datorită perturbării membranelor celulare cu apariția curenților induși. Există o strânsă relație între câmpul electric intern indus (dependent de conductivitatea țesutului) și intensitatea câmpului magnetic extern.

-percepția curenților în țesuturi: sensibilitatea cea mai mare se observă la frecvențe cuprinse între 10-500 Hz. Peste 1kHz sensibilitatea scade invers proporțional cu frecvența; cunoscând că există o proporționalitate a curenților induși cu frecvența, sensibilitatea la câmpurile externe este constantă între 1 kHz și 100 kHz. În termeni de densitate de curent pragul de stimulare al celulelor excitabile este de aproximativ 1000 mA/m^2 la frecvența industrială. Peste aceste valori apare fenomenul de “nedeslipire” de obiectul sub tensiune cu posibilitatea apariției fibrilației cardiace. Apariția fosfenelor (senzații luminoase difuze la nivelul retinei), se pare că se datorește pasajului curenților la nivelul

retinei; la frecvența de 50 Hz pragul de apariție al fosfenelor este de ordinul a 50 mA/m² iar câmpul magnetic corespunzător este de 10mT.

-efectele de suprafață induse de câmpurile electrice: apar la suprafața oricărui corp expus; la intensități mari ale câmpului ele sunt resimțite ca înțepături ale pielii, vibrații ale foliculilor piloși, descărcări slabe. Câmpurile magnetice nu produc efecte de suprafață.

-curenții de contact ce apar în cazul contactului cu alte obiecte situate în interiorul unui câmp electric, sunt percepuți diferit de la mici șocuri până la scurgeri de curent, intensitatea lor depinzând de mărimea și natura obiectului atins.

Efectele biologice acute apar odată cu depășirea unei valori critice a câmpului și dispar odată cu dispariția acestuia. Parametrul caracteristic în cazul expunerilor cu efecte biologice acute este densitatea curenților induși în organism de către câmpurile prezente în mediul ambiant.

Există o relație complexă între densitatea de curent indus și câmpul extern (electric sau magnetic). Relația depinde nu numai de câmpul în sine ci și de frecvența sa, orientarea în raport cu corpul, etc. și în particular, pentru câmpul magnetic, de conductivitatea țesuturilor, de variația ei în interiorul corpului.

Se utilizează modele simple de calculare a relației între densitatea de curent indus J (A/m²) și câmpul exterior electric E (V/m) sau magnetic B (T) ca de exemplu relațiile:

$$J_E = k \cdot f \cdot E$$

$$J_B = \pi \cdot f \cdot B \cdot r \cdot \sigma$$

În care f [Hz], k este un "factor de formă" dependent de mărimea, forma sau orientarea corpului, poziția corpului în interiorul câmpului și are valori de ordinul $5 \cdot 10^{-9}$ As/Vm, r - raza eficace în interiorul corpului,

σ –conductivitatea eficace a țesutului cu valori ce ating în general 0,2 S/m.

Fenomenele fizice care intervin în cazul expunerii organismelor vii în câmp electric pot fi:

- curenții induși (câmpul electric exterior face să apară sarcini electrice pe suprafața organismului și curenți electrici de slabă intensitate). Curenții induși circulă (în cazul unui om aflat în picioare sub o linie electrică) între extremitățile corpului în alternanțe pozitive.

S-au calculat valorile maxime pentru intensitatea câmpului electric ce trece prin organismul uman (pornind de la valoarea frecvenței de 50Hz la sol, pentru linia de 750 kV, corespunzător valorii maxime a câmpului în vecinătatea liniei de cca. 10kV/m la distanța de 20 m de axul liniei) și s – a obținut pentru intensitatea curentului electric care trece prin trunchi valoarea de $I = 100\mu\text{A}$.

În tabelul 1.1 se prezintă intensitățile curenților electrici I [μA]care trec prin anumite zone ale corpului omenesc, în vecinătatea liniilor de înaltă tensiune [9].

Tabelul 1.1

U_0 [kV]	E [kV/m ²]	Cap	Corp	Total prin brațe
220	2.5	11.3	23.6	34.9
400	5.5	25.6	54.4	80
750	10	46.5	98.9	145.4

Valoarea maximă admisibilă a curentului prin corpul omenesc depinde și de durata acestuia, t :

$$I = k \sqrt{t}$$

k fiind o constantă determinată experimental.

Astfel, la depășirea valorii maxime a curentului sau a duratei de acțiune a acestuia, se produce fibrilația inimii, în consecință decesul subiectului (tabelul 1.2).

Tabelul 1.2

I [mA]	10	60	90	110	160	250	350	500
t [s]	30	10	5	3	1	0.4	0.2	0.1

Curentul maxim admisibil depinde și de categoria persoanelor expuse: bărbați ($9 \div 10$ mA); femei ($5 \div 7$ mA); copii ($4 \div 5$ mA)

- efecte superficiale care apar la valori ale intensității câmpului electric mai mari de 10kV/m, resimțite ca furnicături ale pielii, vibrații ale foliculilor piloși, electrizarea îmbrăcămintii.

- descărcări electrice tranzitorii, resimțite ca înțepături fine până la mici zguduituri sau contracții musculare apărute la contactul corpului cu un obiect conductor (izolat față de sol).

Câmpul magnetic produs de instalațiile electroenergetice este un câmp variabil în timp (alternativ) pulsând cu frecvența rețelei, iar valoarea corespunzătoare inducției sale este mai mică de $20\mu\text{T}$ (câmpul magnetic terestru are caracter continuu și o valoare de 40-50 μT).

-curenții induși ca urmare a expunerii în câmp magnetic variabil determină apariția în organism a curenților cu trasee circulare în interiorul corpului, mai mari spre exterior și mai mici spre interior. Prin calcul s-a obținut următoarea valoare pentru densitatea medie de curent $J=1\text{mA}/\text{m}^2$, (limita impusă de CENELEC fiind egală cu $10\text{mA}/\text{m}^2$).

La frecvențe de 50Hz efectul cel mai evident este reducerea efectului de melatonină de către glanda pineală. O experiență pe organismele vegetale (mușchi) de structură foarte simplă desfășurată la Laboratoire de Réseaux d' Energie Electrique a Politehnicii din Laussane în colaborare cu Laboratorul de Phytogénétique Cellulaire al Universității din Laussane, a arătat că aproximativ 38% din celulele de mușchi de tip d'A.thaliana, expuse 2-3 săptămâni într-un câmp magnetic (50Hz) cu inducția $B = 1,2\text{mT}$ mor, iar 59% au o dezvoltare redusă. Proporțiile însă scad la 8% și respectiv 20% pentru un câmp magnetic cu inducția $B = 0,9\text{mT}$ [9].

Dacă există o relație de cauzalitate între expunerea la câmpuri electromagnetice și unele afecțiuni, trebuie să existe un drum care să permită înțelegerea mecanismelor de producere a acestor efecte.

În anul 1976 , în Germania a fost elaborat un normativ pentru efectuarea studiilor de capacitate și aptitudini aferente electricienilor care efectuează lucrări sub tensiune, de către Institutul Central de Medicina Muncii din Berlin. Experiența arată că activitatea desfășurată sub tensiune restricționează participarea personalului, fiind excluse persoanele cu defecte motorii, deficiențe ale organelor senzoriale sau ale sistemului cardio – vascular [9].

Un grup de medici de la Institutul de Cercetări și Proiectări Tehnologice în Transporturi, au elaborat “ Criteriile medico – psihologice de selecție a electricienilor din sectorul energetic, care lucrează sub tensiune în instalațiile electrice de joasă și înaltă tensiune” [71].

Riscul în expunerea profesională a personalului care efectuează lucrări sub tensiune, comportă ca necesară ecranarea electrostatică, asigurată prin costumul electroconductor (din bumbac inserat cu fire

flexibile diâe cupru formând o rețea co ochiuri de 5 x 5 mm), printr-o cască metalică, mănuși și încălțăminte cu proprietăți electroconductoare.

Limitele maxime admise privind intensitatea câmpului electric, E [kV m^{-1}] și inducția magnetică B [mT] au fost standardizate, pe plan internațional fiind abordate de IRPA (Asociația Internațională de Protecție Împotriva Radiațiilor), CENELEC (Comitetul European de standardizare în domeniul Electrotehnic), NRPB (Agenția Națională de protecție Radiologică din Marea Britanie), BFE (Asociația Profesională în domeniul Mecanicii Fine și Electrotehnicii din Germania), ACGIG (Agenția Guvernamentală Americană pentru Igiena Industrială a muncii), ICNIRP (Comisia Internațională de Protecție contra radiațiilor Neionizante).

În tabelul 1.3 sunt prezentate valorile limită permise ale intensității câmpului electric, E [kV m^{-1}], de frecvență industrială pentru expunerea umană.

Tabelul 1.3 Valorile limită permise ale intensității câmpului electric. E [kV m^{-1}]

Nr. Crt.	Organizația	Timp scurt [min.]	Timp lung [8÷24ore]
1	IRPA – Profesional - Public	30	10
		10	5
2	CENELEC–Profesional - Public	30	10
		-	10
3	NRPB	-	12
4	BFE – Profesional	3	21,3
5	ACGIG – Profesional	-	25
6	ICNIRP – Profesional - Public	-	10
		-	5

În tabelul 1.4 sunt prezentate valorile limită permise ale inducția magnetică B [mT], de frecvență industrială pentru expunerea umană.

Tabelul 1.4 Valorile limită permise ale inducției magnetice B [mT]

Nr. Crt.	Organizația	Timp scurt [min.]	Timp lung [8÷24ore]
1	IRPA – Profesional	5	0,5
	- Public	1	0,1
2	CENELEC – Profesional	-	1,6
	- Public	-	0,64
3	NRPB	-	1,6
4	BFE – Profesional	4,25	1,36
5	ACGI – Profesional	-	1
6	ICNIRP – Profesional	-	0,5
	- Public	-	0,1

Temerile legate de eventualele efecte nocive ale câmpurilor de joasă frecvență asupra sănătății s-au concentrat inițial asupra câmpurilor electrice asociate rețelelor electrice, astfel se explică numărul mare de norme referitoare la câmpurile electrice fixate în mod specific în contextul liniilor aeriene, fără a considera și alte surse de câmp. Au rezultat cu precădere norme de emisie, în detrimentul celor de expunere.

O sinteză a normelor privind expunerea la câmpurile electrice, E [kV m^{-1}], magnetice, B [mT], precum și densitățile de curent maxime admisibile, J [mA/m^2] după diferite organizații internaționale sunt prezentate în tabelul 1.5.

În cazul efectelor pe termen lung se poate defini o mărime caracteristică și anume, așa numita doză de expunere D , determinată de produsul dintre durata de expunere t și amplitudinea intensității câmpului magnetic H .

S-a estimat că doza anuală totală de expunere profesională este de 10-50 ori mai mare decât cea neprofesională, fiind primită în aproximativ 1600 ore.

Tabelul 1.5 Sinteza normelor de expunere în câmp electromagnetic

Nr. crt.	Organizația	J	Valori E	Echiv. B	Timp scurt E B	Timp lung E B		
1	IRPA – Profesional - Public	10	25	5	30	5	10	0,5
		2	5	1	10	1	5	0,1
2	CENELEC–Profesional - Public	10	30	1,6	30		10	1,6
		4	12	0,64			10	0,64
3	NRPB	10	21	1,6			12	1,6
4	BFE – Profesional	19	66,7	4,24	30	4,24	21,3	1,36
5	ACGIG – Profesional	10	25	0,71			25	1
6	ICNIRP – Profesional - Public	10	25	0,5			10	0,5
		2	5	0,1			5	0,1

Un aspect al influenței câmpului electromagnetic determinat de liniile electrice aeriene este remarcat în cazul persoanelor slab izolate în raport cu pământul, când contactul cu o structură metalică legată la pământ nu produce nici un efect, datorită unui potențial practic nul al celor două elemente aflate în contact.

Când o persoană slab izolată în raport cu pământul ajunge în contact cu o structură conductoare izolată față de pământ, corpul omenesc va fi parcurs de un curent electric a cărui intensitate este dependentă de mărimea mediului conductor cu care se află în contact nemijlocit, adică de capacitatea obiectului față de pământ.

Calculule și măsurătorile au pus în evidență pentru situațiile cele mai defavorabile, valori ale intensității curentului electric de descărcare de 0,05 mA corespunzătoare la 1 kV m^{-1} în cazul unui autoturism, 0,25 mA corespunzătoare unei intensități a câmpului electric de 1 kV m^{-1} în cazul unui camion și 0,65 mA corespunzătoare la 1 kV m^{-1} în cazul unui trailer. Experiența arată că pentru un vehicul aflat în vecinătatea imediată a unei linii electrice de înaltă tensiune intensitatea curentului electric poate ajunge la câțiva miliamperi și poate provoca o senzație neplăcută

subiectului aflat în contact direct cu acesta, senzație care nu se manifestă la o bună legătură a vehiculului la pământ [21].

Prin atingerea unui mediu conductor de volum mare și bine izolat față de pământ, situația subiectului aflat în contact poate deveni dramatică.

Concluzii

Scopul acestui capitol introductiv a fost acela de a evidenția importanța pe care o are analiza influenței liniilor electrice de înaltă tensiune asupra sistemelor învecinate și în primul rând asupra organismelor vii. Departe de a adopta o poziție pesimistă și cu atât mai mult una fatalistă cercetările efectuate în cazul de față, calculele și realizările experimentale trebuie să scoată în evidență influențele reale ale acestor elemente de sistem asupra mediului ambiental (fără exagerări) pe de o parte, pe de altă parte să conducă la elaborarea de normative și mijloace de prevenire a oricăror accidente sau boli profesionale, care ar putea afecta integritatea personalului din exploatarea liniilor electrice de transport.

**LINII ELECTRICE COMPACTE – SOLUȚIE DE VIITOR
A TRANSPORTULUI DE ENERGIE ELECTRICĂ**

2.1. Considerații generale [12],[24],[25]

În prezentul capitol vor fi trecute în evidență problemele pe care le ridică liniile electrice aeriene de transport viitoare, linii compacte, care prin performanțele lor vor constitui și sub aspectul influențelor asupra sistemelor învecinate soluția de viitor a transportului energiei electrice.

Analiza efectelor ecologice ale câmpului electromagnetic al liniilor electrice aeriene asupra organismelor și culturilor agricole, îngrijorarea față de scoaterea din uz a unor suprafețe utile, impactul estetic al liniei și încadrarea acestora în peisaj au condus la realizarea liniilor compacte. Linia compactă este caracterizată prin dimensiuni reduse ale stâlpilor și în mod deosebit a coronamentelor, inferioare celor clasice. Această compactizare este însoțită însă și de creșterea capacității de transport, fapt ce îmbunătățește condițiile de transport a energiei electrice [23].

În prezent, pentru tensiuni nominale utilizate în țara noastră (între 20 și 400 kV) traseele liniilor electrice aeriene necesită culoare cu lățimi între 3 și 22m, în funcție de tensiunea nominală, tipul stâlpului, numărul de circuite, iar prin înălțimea stâlpilor utilizați (10 și 34m) pentru liniile electrice aeriene, este perturbat peisajul zonelor de trecere [24].

Încă de la sfârșitul anilor 1970, pe plan mondial s-au manifestat preocupări privind dezvoltarea intensivă a sistemelor energetice, care la nivelul rețelelor electrice de transport și distribuție presupune creșterea capacității lor de transport.

Efectele ecologice ale câmpului electromagnetic determinat de liniilor electrice aeriene asupra organismelor și impactul estetic al liniei și încadrarea în peisaj, au condus la dezvoltarea conceptului de linie

compactă, caracterizată prin dimensiuni reduse ale stâlpilor, coronamentelor și la o creștere a capacității de transport.

Literatura de specialitate definește liniile compacte ca fiind atât liniile cu dimensiuni geometrice reduse cât și liniile cu capacitate sporită de transport.

În legătură cu compactizarea se pun câteva probleme și anume: direcțiile de cercetare în domeniu, elementele restrictive, metodele de calcul ale liniilor compacte.

2.2. Direcții de cercetare [25],[79], [89]

Referitor la direcțiile de cercetare, actualmente se constată în lume preocupări sporite privind creșterea capacității de transport a liniilor. În acest sens se acționează prin: creșterea tensiunii nominale, creșterea curenților maximi admisibili, creșterea numărului de circuite în paralel, simultan cu micșorarea dimensiunilor stâlpilor. Există patru direcții majore către care s-a orientat în ultimul deceniu atenția cercetătorilor în domeniul liniilor electrice aeriene compacte și anume: utilizarea noilor tipuri de izolatoare sintetice, construcția fazei, reducerea distanțelor dintre faze și realizarea de linii autocompensate sau autocompensate comandate.

Este necesar însă să se țină seama de respectarea unor distanțe minime de izolare atât între conductoarele liniei, înclinate sub acțiunea vântului și structura stâlpului de susținere cât și între conductoarele de fază însăși ale liniei ca urmare a efectului electrodinamic determinat de posibilele scurtcircuite sau ca urmare a descărcării acestora de chiciură, a balansului și a înclinării asincrone a acestora. Un alt aspect foarte important care impune respectarea unor distanțe minime de izolare face referire la protecția personalului de întreținere și reparație care lucrează sub tensiune prin metoda “la potențial” sau “la distanță” [25].

Pentru dimensionarea și alegerea geometriei stâlpilor liniilor electrice aeriene în vederea compactizării acestora se iau în considerare următoarele criterii de comparație și selectare [25], [79], [89], [90], [91], [93]:

- lățimea culoarului de trecere a liniilor electrice aeriene;
- puterea naturală, ca un criteriu de creștere a capacității de transport a liniilor electrice aeriene;
- pierderile prin efect corona;
- greutatea stâlpului;
- gradul de simetrizare a liniei (X_-/X_+);
- intensitatea câmpului electric la sol;
- nivelul perturbațiilor radio și audio;
- numărul de declanșări ale liniei, datorate “defectului de ecran” al conductoarelor de protecție.

Criteriile enunțate sunt satisfăcute de structura “delta” în comparație cu structurile PAS, Y și TURN ale stâlpilor[25]. Prin poziționarea celor trei faze ale liniilor electrice aeriene în triunghi, structura “delta”, reduce lățimea culoarului de trecere, simetrizează linia (raportul dintre reactanța de secvență negativă și aceea pozitivă X_-/X_+ a liniei, se apropie de unitate) și micșorează influențele electromagnetice și pierderile corona, deci favorizează compactizarea liniilor electrice aeriene.

Deoarece prin reducerea distanțelor între fazele liniei cresc pierderile corona și se limitează posibilitatea lucrului sub tensiune, se impune optimizarea structurii “delta” prin realizarea de linii cu pierderi corona echivalente cu ale liniilor electrice aeriene construite pe stâlpul tip Y și realizarea unor structuri de stâlpi maxim compactizați. Totodată se consideră raportul între puterea naturală a liniei și lățimea culoarului de

trecere ca unul dintre criteriile principale de analiză a eficienței măsurilor de reducere a suprafeței de teren afectate de trecerea liniilor electrice aeriene și de reușită a compactizării acesteia.

În analiza optimizării componenței fazei se are în vedere posibilitatea utilizării a două, trei sau patru conductoare pe fază, situate la o distanță între ele cuprinsă între 30 – 60 cm. Nu este exclusă nici folosirea a 6 conductoare [92], [93].

Structura de stâlp RODELTA, elaborată, dimensionată și proiectată la Institutul de Studii și Proiectări Energetice București, este considerată ca optimă din punct de vedere al cerințelor impuse [25]. Linia electrică aeriană de 400 kV Slatina – Drăgănești Olt este construită integral pe stâlpi RODELTA.

Un rol important în alegerea izolațiilor liniilor electrice aeriene îl are tipul de izolator folosit în alcătuirea lanțului de izolatoare, precum și gradul de poluare al zonei prin care trece linia. S-a constatat că în majoritatea cazurilor nivelul de poluare al zonei prin care trece linia va determina tipul și numărul de izolatoare din alcătuirea lanțului de izolatoare, influențând lungimea acestuia și implicit celelalte distanțe. Noile tipuri de izolatoare sintetice (compozite) sunt realizate din mase plastice armate cu fibre de sticlă și se caracterizează prin proprietăți electrice și mecanice deosebite. Principalul impediment care îngrădește însă în prezent generalizarea acestor izolatoare este prețul relativ ridicat în comparație cu acela al izolatoarelor tradiționale. Desigur pentru liniile electrice aeriene de transport interes deosebit prezintă izolatoarele de tip tijă. Acestea sunt formate principial dintr-o inimă din fibră de sticlă înglobată într-o rășină, care constituie partea de rezistență mecanică și dintr-un înveliș cu fuste din material izolant organic sau semiorganic

(cauciuc siliconic) care uneori pot fi separate de inimă printr-un strat intermediar. Aceste izolatoare prezintă câteva avantaje semnificative față de izolatoarele tijă clasice. Astfel rezistența mecanică a inimii este de ordinul 700N/mm^2 , fapt ce permite o reducere de greutate de ordinul 1:10. Proprietățile izolante sunt mult îmbunătățite chiar și în condiții de poluare accentuată. Mai mult este foarte rezistent la șocuri mecanice și termice făcându-le practic "imune" la gloanțele trase cu arme de foc.

Conceptiile noi privind construcția fazei urmăresc în principal utilizarea la maximum a suprafeței conductoarelor din punct de vedere al câmpului electric (limita maximă fiind impusă de amorsarea descărcării corona). În acest sens se manifestă două tendințe:

- scindarea accentuată a fazei, care asigură creșterea capacității de transport și compactizarea liniilor electrice aeriene pe seama creșterii numărului de conductoare pe fază și a razei de scindare până la valori stabilite în urma unui calcul de optimizare. Deși soluția de scindare accentuată asigură creșteri importante ale capacității de transport a liniei electrice aeriene de până la 3÷4 ori, principala critică adusă acestei soluții se referă la dimensiunile importante la care ajunge faza (de ordinul metrilor) și la dificultăți de natură mecanică pe care această construcție le poate genera,
- optimizarea construcției fazei, care are drept scop uniformizarea repartiției câmpului electric pe suprafața conductoarelor în cazul utilizării unui număr mare de conductoare pe fază și are ca efect obținerea unei construcții speciale a fazei și anume de formă eliptică.

Reducerea distanțelor dintre fazele liniei se efectuează până la limita impusă de condițiile de izolație și imobilizare relativă a acestora împotriva apropierii lor sub acțiunea vântului prin montarea unor

distanțiere izolante. Pe această cale se asigură simultan îmbunătățirea parametrilor electrici ai liniei și reducerea culoarului acesteia. Pentru aplicarea acestei soluții se impune analiza separată a liniilor electrice aeriene cu simplu și dublu circuit:

- pentru linia electrică aeriană cu simplu circuit se utilizează lanțurile duble de izolatoare în V sau izolatoarele support sintetice și a distanțierelor între faze (110, 220 kV) sau a distanțierelor în stea (figura 2.1 a,b).

- pentru linia electrică aeriană cu dublu circuit se apelează la apropierea fazelor din același circuit sau din circuite diferite (figura 2.2 a,b). Prima dintre căi necesită modificarea radicală a construcției stâlpilor în vederea asigurării unei separări vizibile a circuitelor; a doua variantă reclamă ca fazele ce se apropie să fie distincte, în caz contrar efectul compactizării este invers

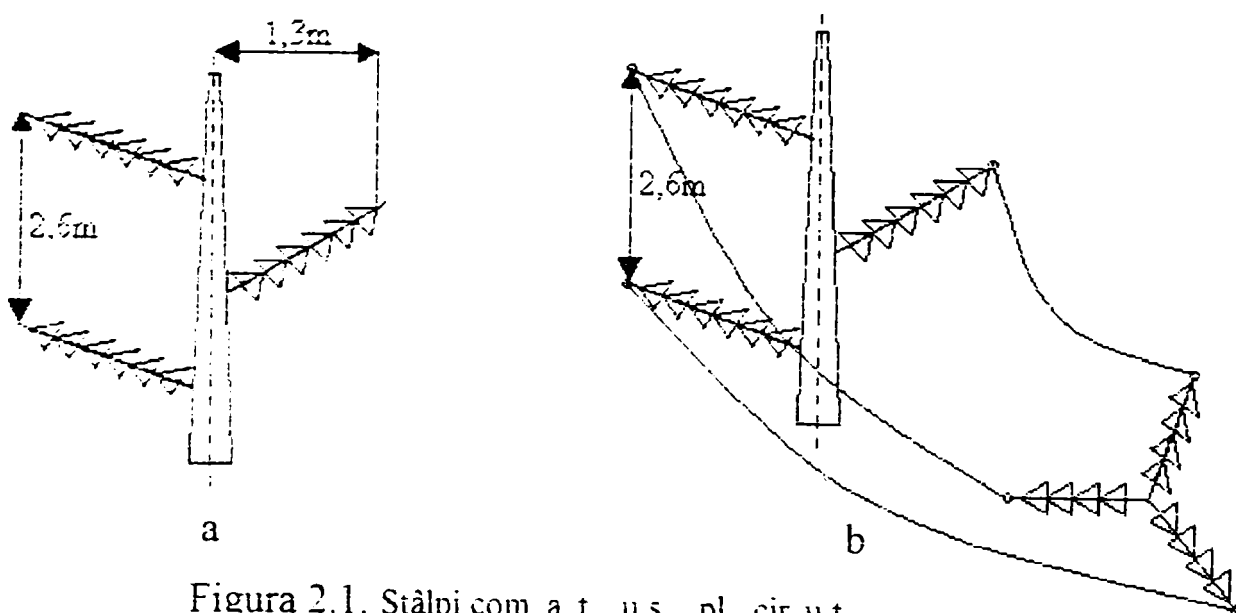


Figura 2.1. Stâlpi comi a ț u simplu circuit

O soluție foarte interesantă de reducere a distanțelor dintre fazele liniei este prezentată în [87], soluție care apelează la așa numita “buclă cu pantă ridicată” (figura 2.3), unde pe parcursul liniei distanțele sunt

micșorate, doar în dreptul stâlpului sunt asigurate distanțele de izolație necesare și acestea prin intermediul unor izolatoare rigide.

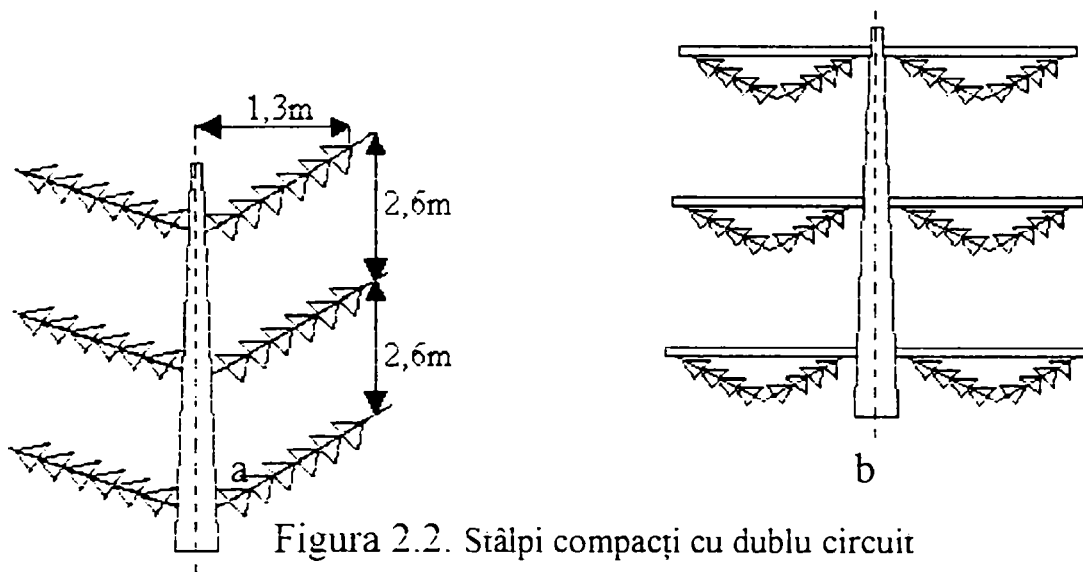


Figura 2.2. Stâlpi compacți cu dublu circuit

Realizarea de linii autocompensate și autocompensate comandate reprezintă o soluție aplicată în cazul liniilor cu dublu circuit și care îmbină apropierea conductoarelor din circuite diferite cu introducerea unui defazaj fix (linii compensate), sau reglabil (linii autocompensate comandate) între mărimile electrice: tensiuni și curenți ale acestor conductoare .

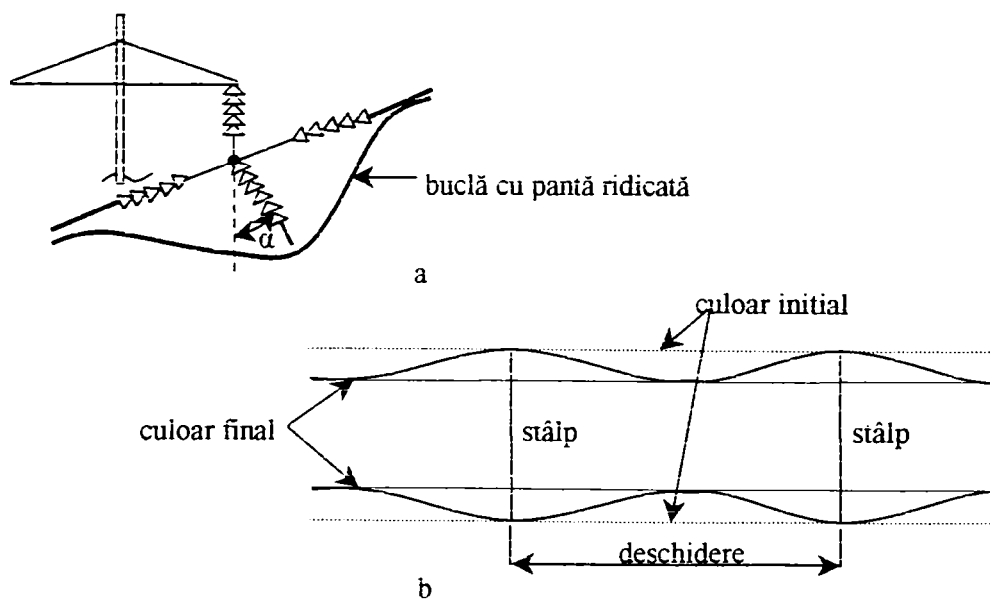


Figura 2.3. Folosirea buclei cu pantă ridicată la LEA cu dublu circuit: a) vedere în spațiu, b) reducerea culoarului LEA prin folosirea buclei.

Aplicată la linia electrică aeriană de 138 kV a permis sub aspectul influenței electromagnetice, obținerea următoarelor valori la distanțe de 50 m față de axul liniei:

- Inducția magnetică B [mG] s-a redus de la 69 la 26;
- Intensitatea câmpului electric E[kV/m] s-a redus de la 0,29 la 0,2;
- Zgomotul [dB] de la 51 la aproximativ zero;
- Influența radio [dB] de la cca 71 la aproximativ zero.

De menționat că defazajul fix sau reglabil se poate asigura prin simpla așezare în apropiere a fazelor omoloage a două circuite, realizându-se un defazaj fix, de 120° . În cazul decalajului reglabil este necesară existența reguletoarelor de fază. Acestea se intercalează pe ambele circuite, sau numai pe un circuit la ambele capete ale liniei. Funcționarea liniei cu defazaj variabil în domeniul $0\div 180^{\circ}$, permite încărcarea permanentă a liniei la o putere egală cu puterea naturală, ceea ce desigur este un avantaj sensibil. Acesta este însă diminuat de costul ridicat al instalațiilor reguletoare de fază.

O altă posibilitate de compactizare a liniilor electrice aeriene, actualmente în fază de cercetare, este folosirea sistemelor polifazate: hexafazate sau dodecafazate. Comparativ cu liniile electrice aeriene trifazate acestea prezintă capacități de transport sporite în condițiile unor pierderi de putere reduse. În figura 2.4 se prezintă schematic modul de realizare a unei linii hexafazate pe stâlpi autoportanți. Avantajul liniei hexafazate derivă din faptul că tensiunea dintre faze este de $\sqrt{3}$ ori mai redusă față de aceea a liniilor trifazate, fapt ce permite reducerea apreciabilă a lungimii izolatoarelor dintre faze.

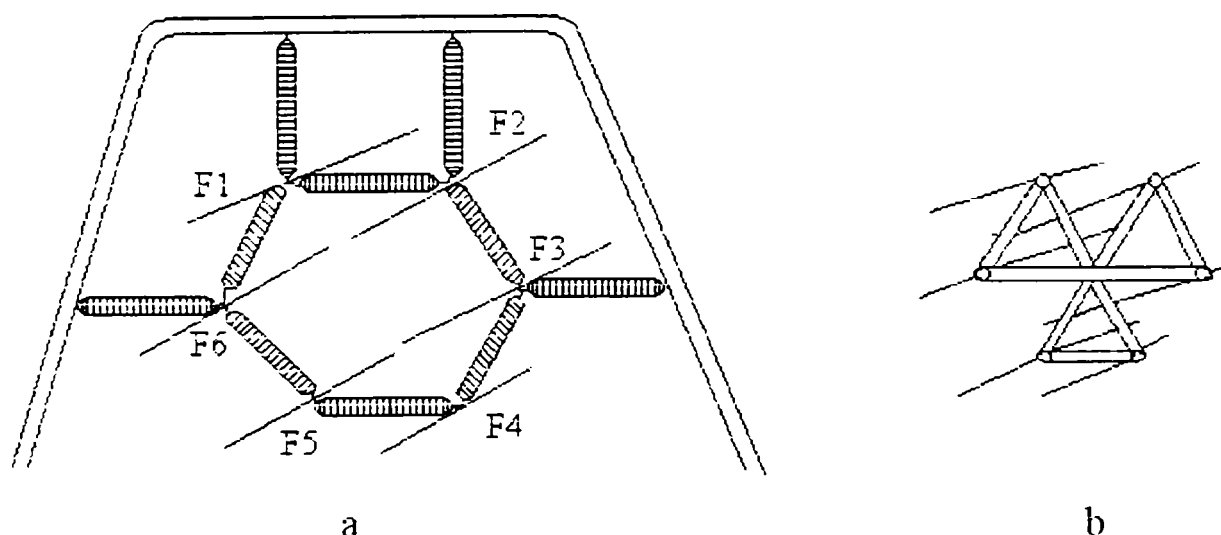


Figura 2.4. Linie hexafazătă construită pe stâlpi autoportanți: a) vedere de ansamblu; b) variantă de asigurare a distanțelor dintre faze.

În cazul liniilor electrice aeriene polifazate se obțin reduceri importante ale câmpului electric la suprafața conductoarelor. Astfel intensitatea maximă se poate reduce cu 15÷20%, fapt ce determină reducerea sensibilă a efectelor descărcării corona. La liniilor electrice aeriene dodecafazate câmpul electric la suprafața conductoarelor este cuprins între 8 – 9kV/cm, fapt ce elimină situația apariției descărcării corona.

Tabelul 2.1 Caracteristicile unor izolatoare de susținere

Tensiune nominală [kV]	Izolatoare din porțelan			Izolatoare de tip "Hi-Lite"		
	Număr elemente în lanț	Greutatea totală a izolației pe stâlp [kg] Lanț		Număr de rile ale izolatorului tijă	Greutatea totală a izolației pe stâlp [kg] Lanț	
		"I"	"V"		"I"	"V"
230	12	203.85	407.71	42	15.85	31.71
345	18	305.77	611.55	73	27.18	54.36
500	25	425.82	849.37	89	49.83	99.66

Deoarece problema esențială în realizarea liniilor electrice aeriene compacte este asigurarea corespunzătoare a izolației, în particular a izolatoarelor compozite (“Hi-Lite” cum sunt denumite în SUA), s-a considerat util ca în tabelul 2.1 să se prezinte caracteristicile unor izolatoare “Hi-Lite” comparativ cu lanțurile de izolatoare din porțelan.

Un alt aspect urmărit în compactizarea liniilor electrice aeriene și firește în realizarea coronamentului fazei este dispunerea conductoarelor de fază în vârfurile unui triunghi echilateral (figura 2.5), [85]. Studii și realizări efectuate în Suedia au permis reducerea sensibilă a inducției câmpului magnetic (figura 2.6)

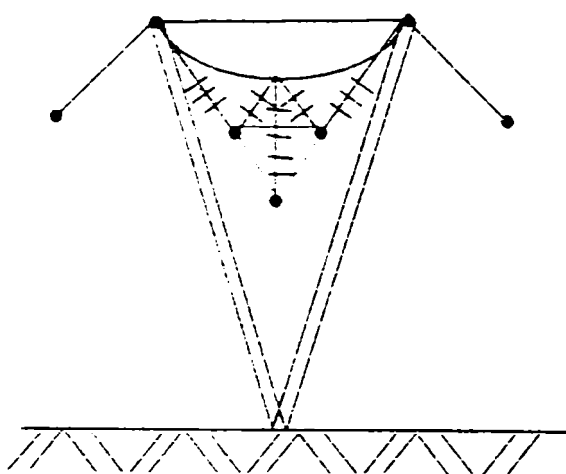


Figura 2.5. Linie compactă cu dispunerea conductoarelor de fază în triunghi.

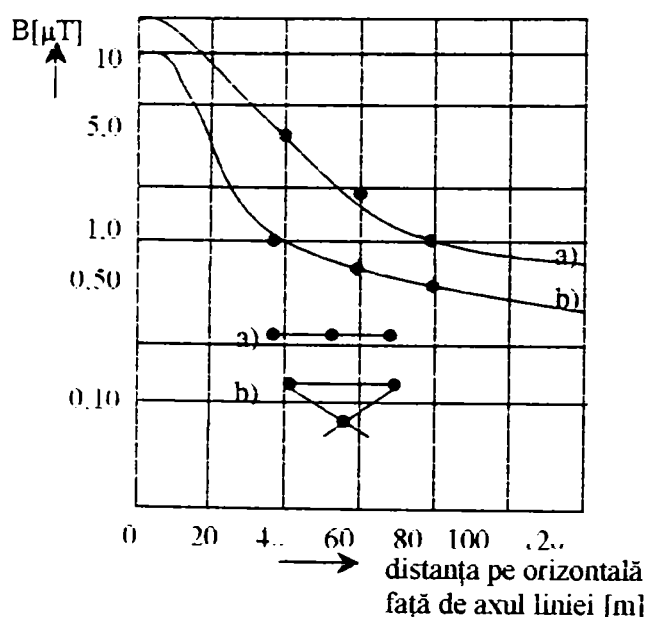


Figura 2.6. Variația inducției magnetice la 1.5m deasupra pământului.curentul de sarcină 1.2 kA pentru dispunerea fazelor: a) orizontală; b) în triunghi echilateral

2.3 Aspecte restrictive [12],[24],[25]

Restricțiile în compactizarea liniilor electrice aeriene constau în condițiile de izolație datorită caracteristicilor disruptive ale intervalului de aer dintre conductoarele liniei electrice aeriene și ale solicitărilor la supratensiuni de comutație (STC) între faze.

Datorită influențelor mutuale între faze, prin compactizare, supratensiunile atmosferice (STA) conduc la solicitări reduse ale intervalului fază-fază. Reducerea nivelului STC în sistemul electroenergetic favorizează compactizarea liniilor electrice aeriene, prin faptul că la un factor de supratensiuni cu valoarea de 1,5, distanțele minime impuse de STC se micșorează de 2 ori.

Distanța minimă de izolație în aer între conductoarele de fază și structura stâlpului este de 2,5 ÷ 2,6 m. Reducerea nivelurilor de supratensiuni de comutație și de protecție a echipamentelor împotriva acestor supratensiuni prin utilizarea descărcătoarelor pe bază de oxizi metalici, a întreruptoarelor rapide cu controlul comutațiilor etc., s-a ajuns la concluzia că este posibil ca supratensiunile de comutație să fie reduse în rețelele electrice de 400 kV până la o valoare de 1,9 ÷ 2 u.r. Aceasta ar conduce la reducerea distanței minime de izolație în aer între conductoarele de fază și structura stâlpului până la 1,6 ÷ 1,7 m. Calculele de dimensionare a izolațiilor electrice efectuate pentru o valoare de 2,8 u.r. a supratensiunii statice de comutație au condus la un nivel de ținere la comutație a izolațiilor de 1050 kV_{max}.

Amorsarea descărcării corona este un factor de restricționare în compactizarea liniilor electrice aeriene. Creșterea capacității în serviciu și implicit a intensității câmpului electric pe suprafața conductorului prin compactizare conduce, în anumite condiții la amorsarea efectului corona. Dacă se impune condiția ca pe suprafața conductoarelor intensitatea câmpului electric să nu depășească valoarea admisibilă E_{adm} , rezultă expresia distanței minime dintre conductoare pentru care nu se produce amorsarea descărcării corona:

$$D_{\min} = r \cdot e^{\frac{V}{r \cdot F_{adm}}},$$

unde mărimile care intervin au semnificația consacrată [25].

Posibilitatea lucrului sub tensiune “la potențial” conduce la creșterea distanțelor de izolare cu până la 0,6 m, în funcție de metoda de lucru adoptată și de operațiile necesare a fi efectuate de personalul de întreținere și reparație.

Utilizarea modelului “electrogeometric” pentru analiza protecției liniilor electrice aeriene împotriva loviturilor directe de trăsnet, precum și reducerea valorilor rezistențelor prizelor de pământ ale stâlpilor au permis îmbunătățirea protecției liniilor electrice aeriene la supratensiuni de trăsnet. Astfel o poziționare corespunzătoare a conductoarelor de protecție ale liniilor electrice aeriene a determinat o reducere substanțială a numărului de declanșări ale liniilor în cazul utilizării noilor soluții de linii electrice aeriene compactizate. Nivelul de ținere la supratensiuni de trăsnet pentru izolația liniilor electrice aeriene este de 1550 kV_{max}.

2.4. Concluzii

Scopul acestui capitol a fost acela de a evidenția problemele care se pun în legătură cu realizarea constructivă și calculul liniilor de transport ale viitorului. Deși se preconizează o producere cât mai distribuită a energiei electrice aceasta nu va reuși să asigure consumul de energie electrică decât în mică măsură. Marile centre de consum vor fi alimentate de la centrale puternice, majoritatea nucleare situate la distanțe apreciabile, transportul efectuându-se cu linii de transport de înaltă și foarte înaltă tensiune. Pentru reducerea impactului acestor linii asupra mediului o soluție eficientă este adoptarea liniilor compacte. Acestea permit micșorarea sensibilă a culoarului de trecere, micșorează influența

electromagnetică și pierderile prin efect corona precum și a supratensiunilor de comutație și de protecție. În plus aceste linii pun în evidență utilitatea izolatoarelor compozite – realizare remarcabilă a ultimei perioade a secolului trecut. Totuși în acest sens există o serie de restricții impuse de distanțele de izolație ce trebuie asigurate.

Contribuțiile aduse de autor în cadrul acestui capitol sunt cele referitoare la sistematizarea cunoștințelor despre problematica liniilor compacte și evidențierea rolului adoptării acestora sub aspectul influenței electromagnetice a liniilor de transport aeriene asupra mediului învecinat.

INFLUENȚE ALE LINIILOR DE ÎNALTĂ TENSIUNE

3.1. Probleme generale. Tipuri de influențe

Liniile electrice aeriene de transport și distribuție, prin câmpul electromagnetic cvasistaționar pe care-l determină în vecinătatea lor, pot afecta buna funcționare a unor echipamente, dispozitive și pot produce efecte defavorabile asupra sistemelor biologice.

Influențele pe care le exercită asupra liniilor electrice învecinate, prin natura lor, pot fi [7], [9], [10], [12], [19], [21], [22], [23]:

electrostatice (electrice) prin cuplajul capacitiv realizat între conductoarele de fază ale liniilor electrice atât în regim normal de funcționare (sarcină) cât și în regim de avarie (gol sau scurtcircuit mono și bifazat) ;

magnetice (electromagnetice), atunci când cuplajul este inductiv și realizat cu bucle de conductoare aflate în proximitatea liniei electrice de înaltă tensiune (acest tip de influență este caracteristic cu precădere regimurilor nesimetrice de funcționare);

rezistive, realizate prin cuplajele galvanice la nivelul solului, caracterizate prin treceri ale curentului prin prizele de pământ ale instalațiilor electrice.

În principal, problemele puse de aceste influențe sunt legate de mărimea tensiunilor induse în circuitele învecinate, determinarea câmpului electromagnetic (potențialul electric față de pământ, intensitatea câmpului electric \vec{E} și inducția magnetică \vec{B}) în puncte din mediul înconjurător liniei electrice și impunerea unor măsuri pentru

reducerea efectelor nedorite produse de acestea și asigurarea protecției personalului din exploatare.

Mărimea tensiunilor induse depinde de geometria liniei, nivelul tensiunii și nu în ultimul rând de mărimea sarcinii.

3.1.1. Geometria liniilor electrice aeriene

.Determinarea câmpului electromagnetic în puncte din vecinătatea liniilor electrice, presupune printre altele și cunoașterea geometriei acestora . Spre exemplu dacă pentru liniile electrice cu un singur circuit se consideră două forme de configurații ale coronamentelor ([33], [34]): în triunghi (figura 3.1.1.a) și în plan paralel cu solul, adică portal (figura 3.1.1.b) se poate proceda după cum urmează

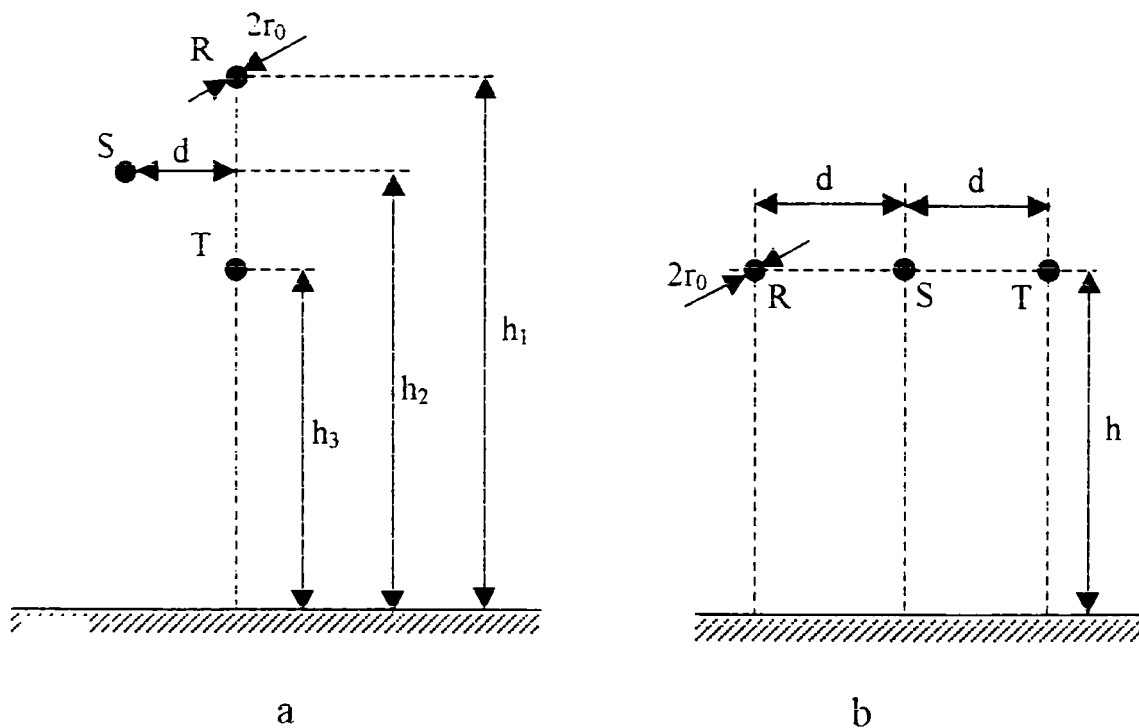


Figura 3.1.1. Stâlpi cu simplu circuit cu coronament: a) triunghi; b) portal

Pentru determinarea înălțimii conductorului de fază s-a folosit următoarea expresie:

$$h_k = H_{\max_k} - \lambda_{iz} - \frac{2}{3} \cdot f_{\max}$$

unde:

H_{\max} este înălțimea consolei;

λ_{iz} – lungimea izolatorului;

f_{\max} – săgeata maximă.

Calculul distanțelor dintre conductoarele fazelor s-a făcut cu relația:

$$D_{ij} = \sqrt{d_{ij}^2 + h_{ij}^2} \quad (3.1.1.)$$

unde i, j au semnificația fazelor R, S, T, cu care se identifică, iar pentru $i=j$,

$$D_{ii} = r_o$$

$h_{ij} = h_i - h_j$ reprezintă distanța dintre fazele i și j după direcția verticală,

$d_{ij} = d_i - d_j$ reprezintă distanța dintre fazele i și j după direcția orizontală,

r_o este raza conductorului de fază.

Calculul distanțelor dintre conductoarele de fază și imaginea lor față de suprafața solului s-a făcut cu relația:

$$D'_{ij} = \sqrt{d'_{ij}{}^2 + h'_{ij}{}^2} \quad (3.1.2.)$$

unde d'_{ij} reprezintă distanța pe direcția orizontală dintre faza i și imaginea fazei j , iar $h'_{ij} = h_i + h_j$ este distanța pe direcția verticală a locului, dintre faza i și imaginea fazei j .

În cazul particular, când $i=j$,

$$D'_{ii} = 2 \cdot h_i$$

Valorile distanțelor dintre conductoarele fazelor pentru LEA 110 kV simplu circuit, cu stâlpi de tipul Sn 110.102 (c.a. 3x185/32 mm² Al-Ol; c.p. 95/55 mm² Al-Ol; $f_{\max} = 9,2$ m; $\lambda_{iz} = 1,8$ m) și următoarele date de poziționare a conductorilor de fază: $h_1 = 20$ m; $h_2 = 16$ m; $h_3 = 12$ m și $d = 3$ m, sunt date în tabelul 3.1.1.a, iar cele dintre conductoarele de fază și

imaginea lor în raport cu suprafața pământului sunt date în tabelul 3.1.1.b.[34]

În tabelul 3.1.2.a și 3.1.2.b sunt date valorile distanțelor pentru LEA 110 kV simplu circuit, cu stâlpi portal de tipul ICS 110.143 și $h=10\text{m}$, $d=3\text{m}$.

Tabelul 3.1.1.a Distanțele dintre conductoarele de fază, 110 kV, stâlp fig.3.1.1a

	R	S	T
R	0.0095	5	8
S	5	0.0095	5
T	8	5	0.0095

Tabelul3.1.1.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor,110 kV

	R'	S'	T'
R	40	36.125	32
S	36.125	32	28.16
T	32	28.16	24

Tabelul 3.1.2.a Distanțele dintre conductoarele de fază ,110 kV, stâlp fig.3.1.1b

	R	S	T
R	0.0095	3	6
S	3	0.0095	3
T	6	3	0.0095

Tabelul3.1.2.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor, 110 kV

	R'	S'	T'
R	20	20.224	20.881
S	20.224	20	20.224
T	20.881	20.224	20

Pentru geometria liniei electrice aeriene de 220 kV, simplu circuit, cu stâlpi de tipul Sn 220.202 (c.a. $3 \times 450/75 \text{ mm}^2$ Al-Ol-N; c.p. $1 \times 160/95 \text{ mm}^2$ Al-Ol-S; $f_{\max} = 12 \text{ m}$; $\lambda_{iz} = 3 \text{ m}$) și următoarele date de poziționare a conductorilor de fază: $h_1 = 25 \text{ m}$; $h_2 = 18,5 \text{ m}$; $h_3 = 12 \text{ m}$; $d = 3 \text{ m}$, valorile distanțelor dintre faze sunt date în tabelul 3.1.3.a, iar valorile distanțelor dintre faze și imaginile lor sunt date în tabelul 3.1.3.b. Valorile din tabelul 3.1.4.a și cele din tabelul 3.1.4.b corespund LEA 220 kV, simplu circuit, cu stâlpi portali de tipul SNY 220.109 (c.a. $3 \times 450/75 \text{ mm}^2$ Al-Ol-N; c.p. $2 \times 70 \text{ mm}^2$ Ol; $f_{\max} = 12 \text{ m}$; $\lambda_{iz} = 3 \text{ m}$) și $h = 21 \text{ m}$; $d = 8 \text{ m}$

Tabelul 3.1.3.a Distanțele dintre conductoarele de fază, 220 kV, stâlp fig.3.1.1.a

	R	S	T
R	0.015	7.159	13
S	7.159	0.015	7.159
T	13	7.159	0.015

Tabelul 3.1.3.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor, 220 kV

	R'	S'	T'
R	50	43.603	37
S	43.603	37	30.647
T	37	30.647	24

Tabelul 3.1.4.a Distanțele dintre conductoarele de fază, 220 kV, stâlp fig.3.1.1b

	R	S	T
R	0.015	8	16
S	8	0.015	8
T	16	8	0.015

Tabelul 3.1.4.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor, 220 kV

	R'	S'	T'
R	42	42.755	44.944
S	42.755	42	42.755
T	44.944	42.755	42

Geometria liniei electrice aeriene de 400 kV, simplu circuit, cu coronament în configurație triunghi și stâlpi de tipul Sn 400.272 (c.a. $3 \times 9 \times 3.227 \text{ mm}^2$ Al-OI-N; c.p. $160/95 \text{ mm}^2$ Al-OI-S; $f_{\max} = 13,2 \text{ m}$; $\lambda_{\text{iz}} = 4,8 \text{ m}$) implică valori ale distanțelor prezentate în tabelul 3.1.5.a și tabelul 3.1.5.b, ($h_1 = 26 \text{ m}$; $h_2 = 16,25 \text{ m}$; $h_3 = 8 \text{ m}$; $d = 4 \text{ m}$); iar pentru coronament în plan orizontal, cu stâlpi portali de tipul 400.133 (c.a. $3 \times (3 \times 450/75 \text{ mm}^2)$ Al-OI-N; c.p. $2 \times 160/95 \text{ mm}^2$ Al-OI-S; $f_{\max} = 13,2 \text{ m}$; $\lambda_{\text{iz}} = 4,8 \text{ m}$) și $h = 21 \text{ m}$, $d = 9,75 \text{ m}$, valorile distanțelor dintre fazele liniei se găsesc în tabelul 3.1.6.a și 3.1.6.b.

Tabelul 3.1.5.a Distanțele dintre conductoarele de fază, 400 kV, stâlp fig.3.1.1a

	R	S	T
R	0.0925	10.5	18
S	10.5	0.0925	9.17
T	18	9.17	0.0925

Tabelul 3.1.5.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor, 400 kV

	R'	S'	T'
R	52	42.4	34
S	42.4	32.5	24.6
T	34	24.6	16

Tabelul 3.1.6.a Distanțele dintre conductoarele de fază, 400 kV, stâlp fig.3.1.1b

	R	S	T
R	0.0925	9.75	19.5
S	9.75	0.0925	9.75
T	19.5	9.75	0.0925

Tabelul 3.1.6.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor, 400 kV

	R'	S'	T'
R	42	43.1	46.3
S	43.1	42	43.1
T	46.3	43.1	42

Pentru liniile electrice , dublu circuit, se consideră configurația coronamentului conformă cu prezentarea făcută în figura 3.1.2.a și 3.1.2.b.

Calculul distanțelor dintre faze s-a făcut cu relația (3.1.1) iar a distanțelor dintre fazele propriu-zise și imaginile lor în raport cu suprafața solului am folosit relația (3.1.2). Astfel, pentru linia electrică de 110 kV cu stâlpi de tipul Sn 110.252 (c.a. $2 \times 3 \times 240/40 \text{ mm}^2$ Al-Ol-N; c.p. $160/95 \text{ mm}^2$ Al-Ol-S; $f_{\max} = 9,2 \text{ m}$; $\lambda_{iz} = 1,8 \text{ m}$) și următoarele date de poziționare a conductorilor de fază : $h_1 = 20\text{m}$; $h_2 = 16\text{m}$; $h_3 = 12\text{m}$; $d_1 = 6,1\text{m}$; $d_2 = 7,65\text{m}$; $d_3 = 6,1\text{m}$, s-au obținut pentru distanțele dintre faze valorile prezentate în tabelul 3.1.7.a, iar pentru distanțele dintre faze și imaginile lor, în tabelul 3.1.7.b.

Când coronamentul liniei electrice corespunde configurației în plan paralel cu suprafața pământului, adică stâlpi portali tip ICS 110.143 și $h = 10\text{m}$, $d = 3\text{m}$, distanțele corespunzătoare sunt cele din tabelele 3.1.8.a și b.

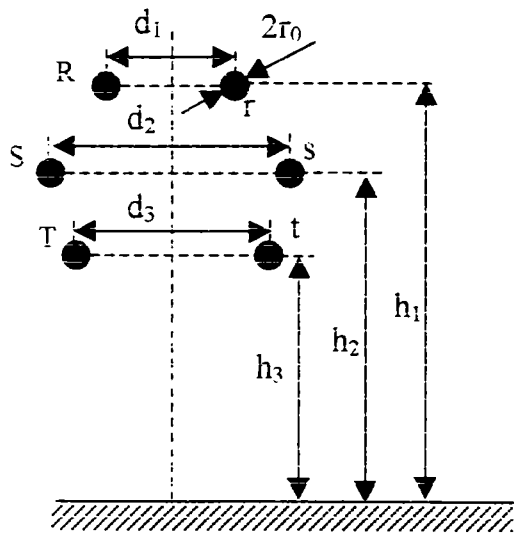


Figura 3.1.2.a Coronament în hexagon
pentru LEA dublu circuit

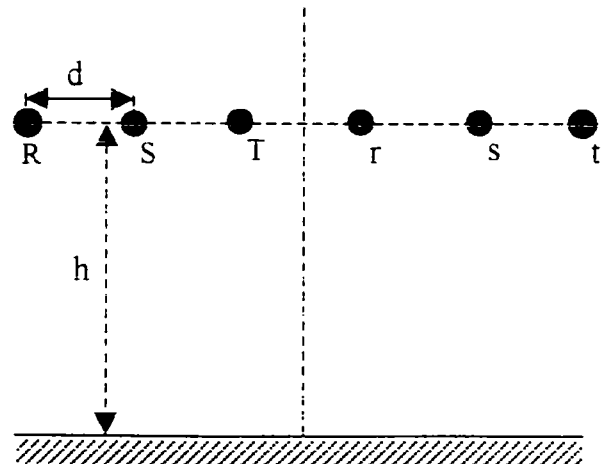


Figura 3.1.2.b Coronament pe
stâlp portal pentru LEA dublu circuit

Tabelul 3.1.7.a Distanțele dintre conductoarele de fază . 110 kV, d.c., stâlp fig.3.1.2a

[m]	R	S	T	R	S	T
R	0.0095	4.074	8	6.1	7.954	10.06
S	4.074	0.0095	4.074	7.954	7.65	7.954
T	8	4.074	0.0095	10.06	7.954	6.1
r	6.1	7.954	10.06	0.0095	4.074	8
s	7.954	7.65	7.954	4.074	0.0095	4.074
t	10.06	7.954	6.1	8	4.074	0.0095

Tabelul 3.1.7.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor . 110 kV, d.c., stâlp

fig.3.1.2a

[m]	R	S	T	r	s	T
R	40	36.008	32	40.462	36.651	32.576
S	36.008	32	28.011	36.651	32.902	28.832
T	32	28.011	24	32.576	28.832	24.763
R	40.462	36.651	32.576	40	36.008	32
S	36.651	32.902	28.832	36.008	32	28.011
T	32.576	28.832	24.763	32	28.011	24

Tabelul 3.1.8.a Distanțele dintre conductoarele de fază . 110 kV, d.c., stâlp fig.3.1.2b

[m]	R	S	T	R	s	T
R	0.0095	3	6	9	12	15
S	3	0.0095	3	6	9	12
T	6	3	0.0095	3	6	9
R	9	6	3	0.0095	3	6
S	12	9	6	3	0.0095	3
T	15	12	9	6	3	0.0095

Tabelul 3.1.8.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor . 110 kV, d.c., stâlp

fig.3.1.2b

[m]	R	S	T	r	s	T
R	20	3.606	20.881	21.932	23.324	25
S	3.606	20	3.606	20.881	21.932	23.324
T	20.881	3.606	20	3.606	20.881	21.932
r	21.932	20.881	3.606	20	3.606	20.881
s	23.324	21.932	20.881	3.606	20	3.606
t	25	23.324	21.932	20.881	3.606	20

În cazul liniei electrice de 220 kV, dublu circuit, cu stâlpi de tipul Sn 220.202 (c.a. $2 \times 3 \times 450/75 \text{ mm}^2$ Al-Ol-N; c.p. $1 \times 160/95 \text{ mm}^2$ Al-Ol-S; $f_{\max} = 12 \text{ m}$; $\lambda_{iz} = 3 \text{ m}$) și următoarele date de poziționare a conductorilor

de fază: $h_1 = 25\text{m}$; $h_2 = 18,5\text{ m}$; $h_3 = 12\text{m}$; $d_1=9\text{m}$; $d_2=16\text{m}$; $d_3=10\text{m}$, valorile pentru distanțele calculate sunt prezentate în tabelele 3.1.9.a și 3.1.9.b.

Tabelul 3.1.9.a Distanțele dintre conductoarele de fază , 220 kV, d.c., stâlp fig.3.1.2a

[m]	R	S	T	R	s	T
R	0.015	7.382	13.01	9	14.089	16.101
S	7.382	0.015	7.159	14.089	16	14.534
T	13.01	7.159	0.015	16.101	14.534	10
R	9	14.089	16.101	0.015	7.382	13.01
S	14.089	16	14.534	7.382	0.015	7.159
T	16.101	14.534	10	13.01	7.159	0.015

Tabelul 3.1.9.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor , 220 kV, d.c. stâlp fig.3.1.2a

[m]	R	S	T	r	s	T
R	50	43.641	37.003	50.804	45.26	38.2
S	43.641	37	30.647	45.26	40.311	33.155
T	37.003	30.647	24	38.2	33.155	26
R	50.804	45.26	38.2	50	43.641	37.003
S	45.26	40.311	33.155	43.641	37	30.647
T	38.2	33.155	26	37.003	30.647	24

Geometria liniei electrice de 400 kV, dublu circuit, stâlp tip Sn 400.272 presupune că: $h_1 = 25\text{m}$; $h_2 = 18,5\text{ m}$; $h_3 = 12\text{m}$; $d_1=9\text{m}$; $d_2=16\text{m}$; $d_3=10\text{m}$, iar valorile numerice ale distanțelor sunt cele din tabelele 3.1.10.a și 3.1.10.b.

Tabelul 3.1.10.a Distanțele dintre conductoarele de fază , 400 kV, d.c., stâlp fig.3.1.2a

[m]	R	S	T	r	s	T
R	0.093	10.539	18	14	20.471	22.804
S	10.539	0.093	9.169	20.471	22	19.801
T	18	9.169	0.093	22.804	19.801	14
R	14	20.471	22.804	0.093	10.539	18
S	20.471	22	19.801	10.539	0.093	9.169
T	22.804	19.801	14	18	9.169	0.093

Tabelul 3.1.10.b Distanțele dintre conductoarele de fază și imaginile lor , 400 kV, d.c.,

stâlp fig.3.1.2a

[m]	R	S	T	r	s	T
R	52	42.439	34	53.852	45.925	36.77
S	42.439	32.5	24.578	45.925	39.246	30.2
T	34	24.578	16	36.77	30.2	21.26
R	53.852	45.925	36.77	52	42.439	34
S	45.925	39.246	30.2	42.439	32.5	24.578
T	36.77	30.2	21.26	34	24.578	16

3.1.2. Calculul capacităților parțiale

Fiind cunoscută geometria liniei electrice aeriene, considerată ca sistem de n conductoare într-un mediu liniar și omogen, cu permitivitatea

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ F/m, relațiile lui Maxwell cu referire la coeficienții de}$$

influență se scriu în forma matricială astfel [3],[7]:

$$[q]=[\gamma] [V] \quad (3.1.3)$$

în care:

[q] este matricea sarcinilor electrice de pe suprafața conductoarelor;

[γ]- matricea coeficienților de influență, cu γ_{jk} egal cu sarcina electrică indusă pe suprafața conductorului j de potențialul pozitiv egal cu unitatea al conductorului k, potențialele celorlalte conductoare fiind nule. γ_{jj} - egal cu raportul dintre sarcina electrică q_j și potențialul V_j al conductorului j, potențialele celorlalte conductoare fiind nule;

[V]-matricea potențialelor electrice ale conductoarelor din sistemul fizic considerat.

Pentru capacitățile parțiale, relațiile lui Maxwell în formă matricială sunt:

$$[q]=[C] [U] \quad (3.1.4)$$

unde elementul matricei [C],

$$C_{jk} = - \gamma_{jk} > 0 \quad (3.1.5)$$

este capacitatea parțială între conductoarele j și k.

Sarcina q_j care încarcă conductorul j este egală cu suma sarcinilor parțiale $C_{jk} (V_j - V_k)$ proporționale cu diferența de potențial $V_j - V_k$ dintre el și celelalte conductoare.

Pentru calculul capacităților parțiale, expresii ale relațiilor capacitive dintre fazele circuitului 1 al liniei electrice dublu circuit considerat, notate cu R, S, T și fazele r,s,t ale circuitului electric 2, se are în vedere următoarea expresie [10]:

$$C_{jk} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln \frac{D_{jk}}{r_0}} \quad [\text{F}] \quad (3.1.6)$$

unde indicele j reprezintă succesiv fazele circuitului 2, (r,s,t), iar D_{jk} sunt distanțele dintre fazele circuitului 1 și fazele circuitului 2.

Relațiile lui Maxwell sunt valabile și în cazul când unul sau mai multe conductoare se extind la infinit. Astfel se definesc capacitățile parțiale în prezența pământului, acesta fiind considerat conductor infinit extins de potențial electric nul.

Pentru calculul capacităților parțiale, față de pământ, ale fazelor, se folosește relația [10]:

$$C_{ok} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln \frac{2 \cdot h_k}{r_0}} \quad [\text{F}] \quad (3.1.7)$$

unde k reprezintă în mod succesiv fazele R, S și T; iar L reprezintă lungimea liniei electrice; h_k înălțimea fazelor față de suprafața solului, iar r_0 este raza conductorului de fază.

Valorile capacităților parțiale față de pământ, ale fiecărei faze aparținătoare liniilor electrice aeriene de 110 kV, 220 kV și 400 kV, sunt prezentate în tabelul 3.1.11.

Tabelul 3.1.11 Valorile capacităților parțiale ale LEA, față de sol (L=1km)

U_n [kV]	C_{OR} [nF]	C_{OS} [nF]	C_{OT} [nF]
110	6.656	6.84	7.09
220	7.23	7.68	8.45
400	8.77	9.47	10.78

Capacitățile parțiale ale liniilor duble de 110 kV, 220 kV și 400 kV, calculate cu relația (3.1.4), sunt prezentate în tabelul 3.1.12

Tabelul 3.1.12 Capacitățile parțiale ale LEA, d.c. (L=1km)

[nF]	110kV			220kV			400kV		
C_k	r	s	t	r	s	t	r	S	t
R	8.59	8.23	7.92	8.64	8.08	7.93	11.07	10.29	10.09
S	8.23	8.23	8.23	8.08	7.93	8.04	10.29	10.15	10.35
T	7.92	8.23	8.59	7.93	8.04	8.51	10.09	10.35	11.07

3.1.3. Calculul inductivităților mutuale

Inductivitatea mutuală între două conductoare filiforme, paralele, se determină cu formula lui Neumann pentru inductivități mutuale [3]:

$$L_{12} = \frac{\mu_0 \cdot N_1 \cdot N_2}{4 \cdot \pi} \cdot \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} \frac{dl_1 \cdot dl_2}{D_{12}} \quad (3.1.8)$$

în care inductivitatea mutuală L_{12} , ca mărime de calcul, (inductivitatea propriu-zisă se referă la circuite închise) se determină între două porțiuni deschise, aparținând circuitelor închise Γ_1 și Γ_2 .

Se consideră două fire conductoare cilindrice circulare de rază r și lungime l dispuse paralel la distanța D în mediu de permeabilitate constantă $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Inductivitatea mutuală L_{12} se calculează cu formula (3.1.8) luând $N_1 = N_2 = 1$,

$$L_{12} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \int_0^l \int_0^l \frac{dl_1 \cdot dl_2}{\sqrt{(l_1 - l_2)^2 + D^2}} \quad (3.1.9)$$

~~Inductivitatea mutuală~~ considerată în continuare, este realizată între fazele celor două circuite ale liniei electrice aeriene. Pentru calculul acesteia se folosește următoarea expresie, care rezultată din (3.1.9) prin dezvoltarea în serie a radicalilor și neglijarea termenilor de rang superior:

$$L_{jk} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{R_{cp}}{D_{jk}} \quad [\text{H/m}] \quad (3.1.10)$$

unde R_{cp} este distanța dintre conductor și calea de întoarcere echivalentă prin pământ și se calculează de regulă cu relația [23]:

$$R_{cp} = 550 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

în care ρ este rezistivitatea solului în Ωm iar f este frecvența de lucru în Hz.

Valorile inductivităților mutuale calculate sunt prezentate în tabelul 3.1.13.

Tabelul 3.1.13 Valorile inductivităților mutuale ale LEA, calculate [$\mu\text{H}/\text{km}$]

$\mu\text{H}/\text{km}$	110kV			220kV			400kV		
L_k	r	s	T	r	s	t	r	S	t
R	0.9	0.847	0.8	0.822	0.733	0.707	0.734	0.658	0.636
S	0.847	0.855	0.847	0.733	0.707	0.727	0.658	0.644	0.665
T	0.8	0.847	0.9	0.71	0.727	0.8	0.636	0.665	0.734

3.1.4. Calculul câmpului electric în puncte din vecinătatea liniilor electrice aeriene

Pentru determinarea intensității câmpului electric \vec{E} și a potențialului electric V față de pământ, în puncte din vecinătatea unei linii electrice aeriene, simplu circuit, figura 3.1.3, se aplică metoda imaginilor electrice. Regimul de funcționare al liniei, se consideră unul permanent, cu sistemul trifazat simetric de tensiuni,

$$\underline{U}_R = U_f; \quad \underline{U}_S = U_f e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}; \quad \underline{U}_T = U_f e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}},$$

și de curenți,

$$\underline{I}_R = \underline{I}; \quad \underline{I}_S = I e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}; \quad \underline{I}_T = I e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}.$$

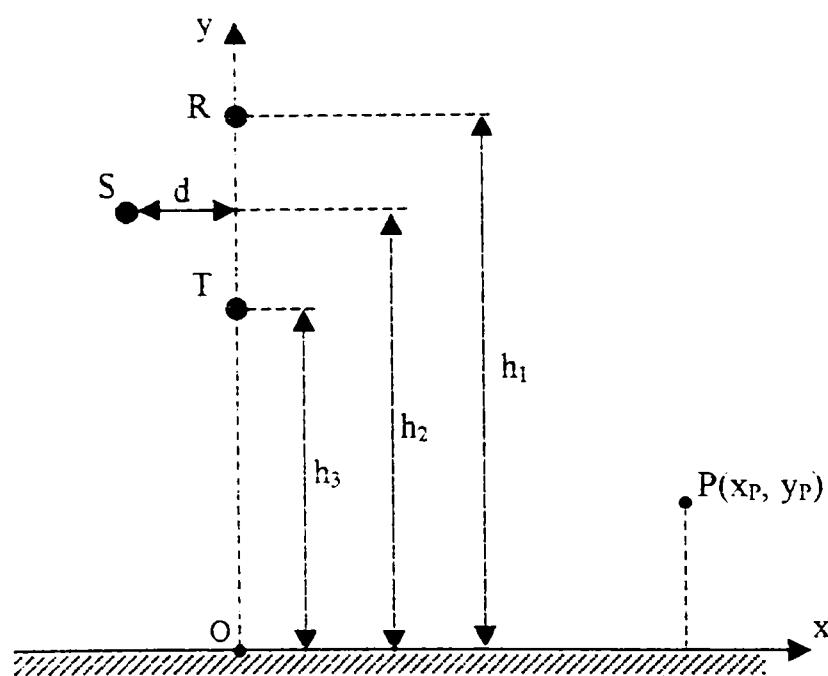


Figura 3.1.3 Coronament stâlp cu simplu circuit

Luând în considerare aportul fiecărei faze a liniei electrice considerate, valoarea mărimii rezultante se obține prin aplicarea principiului superpoziției.

Calculul componentelor intensității câmpului electric într-un punct $P(x_p, y_p)$ din spațiu se face cu următoarele relații:

$$E_{px_i} = \alpha \cdot \sum_{k=1}^n q_k \cdot x_{p_k} \cdot F_{p_{ki}} \quad (3.1.6)$$

$$E_{py_i} = \alpha \cdot \sum_{k=1}^n q_k \cdot y_{p_{ki}} \cdot F_{p_{ki}} \quad (3.1.7)$$

în care

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}$$

iar

$$F_{p_{ki}} = \frac{1}{r_{p_{ki}}^2} - \frac{1}{r_{\bar{p}_{ki}}^2}$$

unde $r_{p_{ki}}$ este distanța de la conductorul k la punctul P în care se face calculul, $r_{\bar{p}_{ki}}$ este distanța de la punctul de calcul P la imaginea electrică a conductorului fază k ; n reprezintă numărul de conductoare care-și aduc aportul la valoarea mărimii calculate; q_k este sarcina electrică a conductorului de fază, distribuită liniar.

Intensitatea câmpului electric, se exprimă în funcție de componentele sale, astfel:

$$E_p = \sqrt{E_{px}^2 + E_{py}^2} \quad (3.1.8)$$

Expresia de calcul a potențialului electric V față de pământ este:

$$V_{p_i} = \alpha \cdot \sum_{k=1}^n q_k \cdot \ln \frac{r_{\bar{p}_{ki}}}{r_{p_{ki}}} \quad (3.1.9)$$

unde

$$r_{p_{ki}} = \sqrt{x_{p_k}^2 + y_{p_{ki}}^2}$$

și

$$r'_{p_{ki}} = \sqrt{x'_{p_k}{}^2 + y'_{p_{ki}}{}^2}$$

cu:

$$x'_{p_k} = x_k - x_p ; \quad x'_{p_k} = x'_k - x_p ;$$

$$y'_{p_{ki}} = y_k - y_{p_i} ; \quad y'_{p_{ki}} = y'_k - y_{p_i}$$

Apostroful ' se referă la imaginea electrică a conductorului k.

Sarcina electrică distribuită liniar pe conductoarele de fază se determină pe baza relațiilor lui Maxwell referitoare la capacități, scrise matricial astfel:

$$[U] = [p] \cdot [q] \quad (3.1.10)$$

unde $[U]$ este matricea potențialelor față de pământ ale conductoarelor de fază, iar $[p]$ este matricea coeficienților de potențial alcătuită cu elemente de forma:

$$p_{ij} = \alpha \cdot \ln \frac{D_{ij}'}{D_{ij}} ; \quad p_{ii} = \alpha \cdot \ln \frac{D_{ii}'}{r_{oi}} \quad (3.1.11)$$

cu D_{ij} distanța între conductorul i și j; D_{ij}' distanța între conductorul i și imaginea conductorului j față de pământ, iar r_{oi} este raza conductorului i.

Calcululele au fost efectuate în mediu **Mathcad 2001 Professional**.

3.1.4.1. Linii electrice aeriene simplu circuit

Valorile potențialului electric V și ale intensității câmpului electric E în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene de 110kV, simplu circuit, cu configurația coronamentului în triunghi pe stâlp tip Sn 110.102, sunt prezentate în tabelele 3.1.14.a, b și 3.1.15.a, b. Imaginea grafică a acestor valori se regăsește în figurile 3.1.4; 3.1.5; 3.1.6 și 3.1.7.

Tabelul 3.1.14.a Valorile potențialului electric, LEA 110kV

[m]	V [kV]			
Y_p/X_p	0	10	20	50
2	1.1	0.394	0.163	0.0784
1.5	0.818	0.297	0.122	0.0588
1	0.542	0.198	0.0814	0.0392
0.5	0.27	0.996	0.0406	0.0196

Tabelul 3.1.15.a Valorile intensității câmpului electric, LEA 110kV

[m]	E [V/m]			
Y_p/X_p	0	10	20	50
2	246.019	88.677	6.34	2.912
1.5	189.839	68.219	4.019	2.196
1	131.151	46.708	2.124	1.472
0.5	68.437	24.013	0.884	0.74

Tabelul 3.1.14.b Valorile potențialului electric, LEA 110kV

[m]	V [kV]			
Y_p/X_p	0	3	10	20
21	20.16	10.73	4.026	2.082
19.25	20.62	9.404	3.535	1.91
17.5	7.238	5.665	2.933	1.721
15.75	2.095	2.539	2.37	1.525
14	8.084	4.993	2.019	1.328
12.25	30.66	8.029	1.981	1.138
10.5	14.86	8.236	1.91	0.957
8.75	8.808	6.659	1.833	0.787

Tabelul 3.1.15.b Valorile intensității câmpului electric, LEA 110kV

[m]	E [kV/m]			
Y_p/X_p	0	3	10	20
21	8.373	2.257	0.438	0.115
19.25	14.3	2.742	0.467	0.111
17.5	5.045	2.625	0.482	0.104
15.75	2.43	2.538	0.482	0.0956
14	6.22	2.739	0.468	0.0848
12.25	41.21	2.791	0.441	0.0728
10.5	5.52	2.163	0.402	0.0605
8.75	2.115	1.431	0.353	0.0489

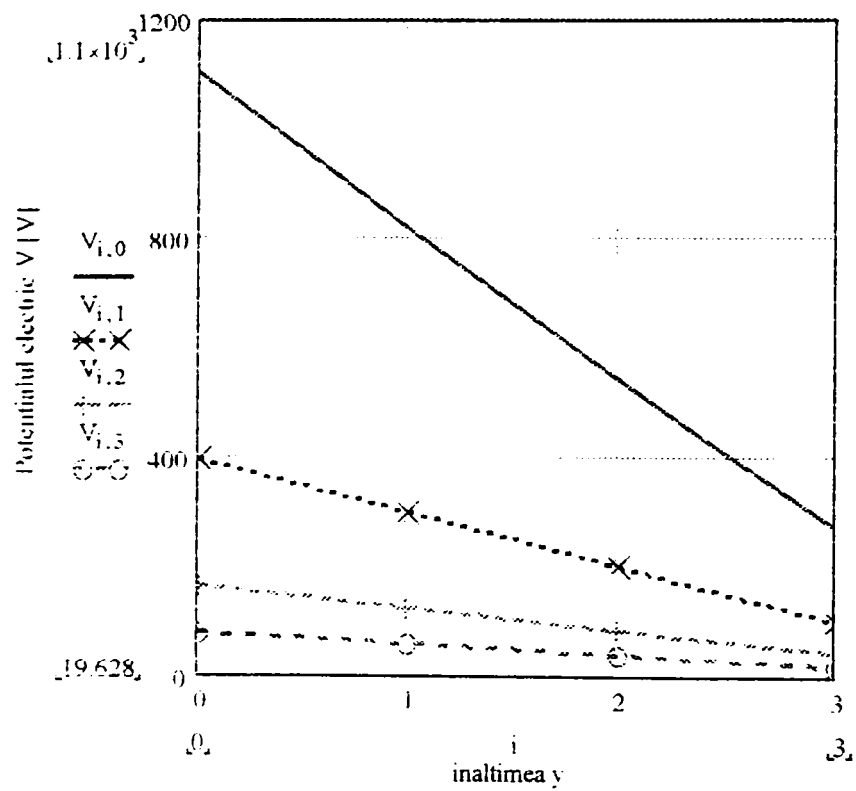


Figura 3.1.4.; Variația potențialului electric V în funcție de y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10; 20; 50m), coordonatele lui P

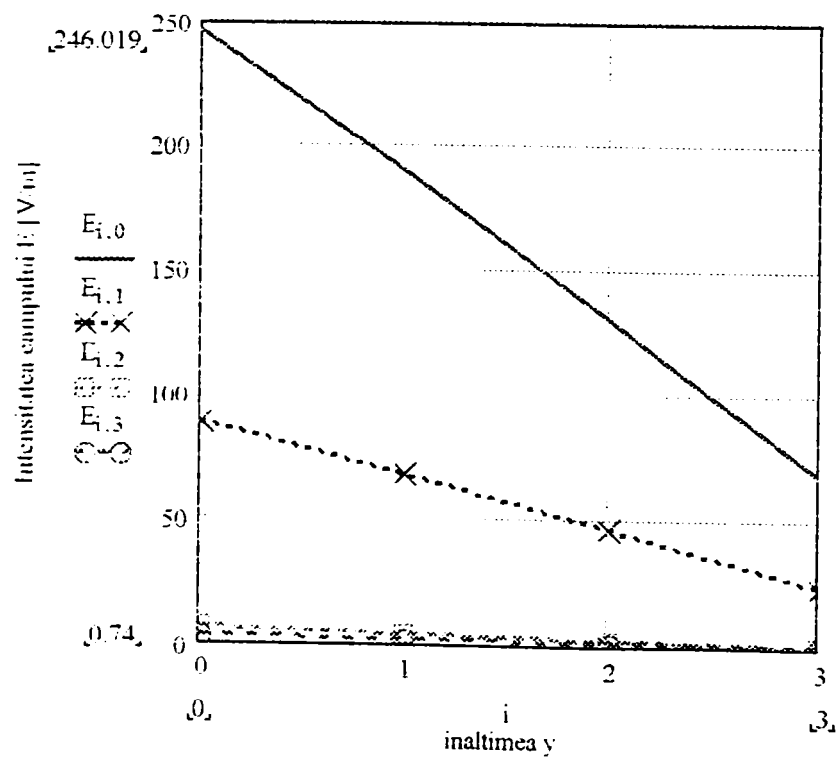


Figura 3.1.5.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10; 20; 50m), coordonatele lui P

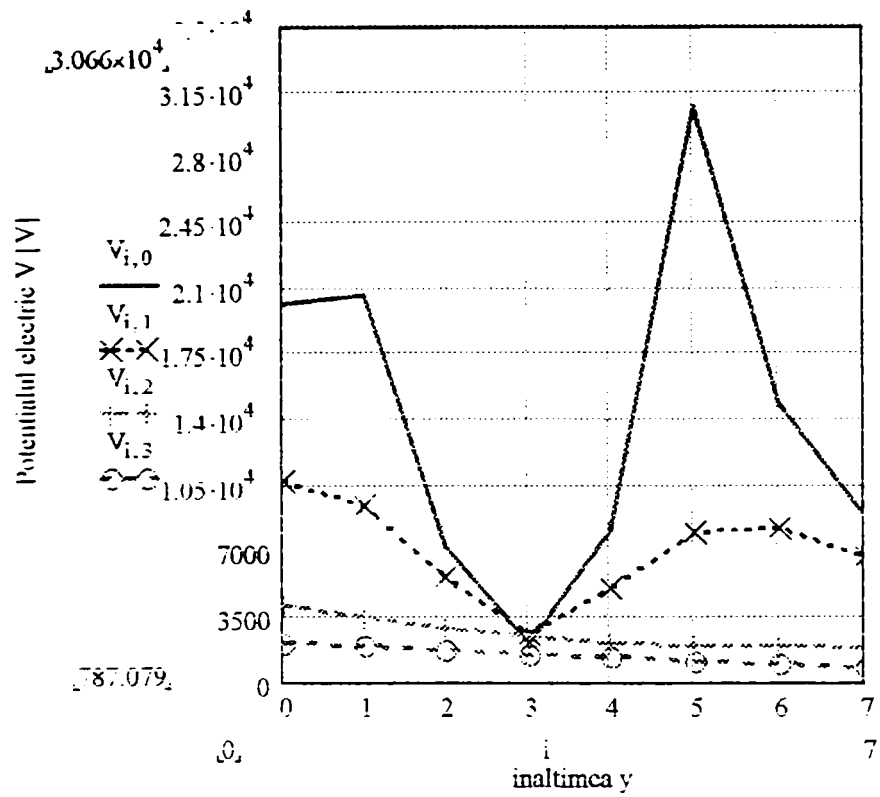


Figura 3.1.6.: Variația potențialului electric V în funcție de y (21: 19.25; 17.5; 15.75; 14; 12.25; 10.5; 8.75 m) și x (0; 3; 10; 20m), coordonatele lui P

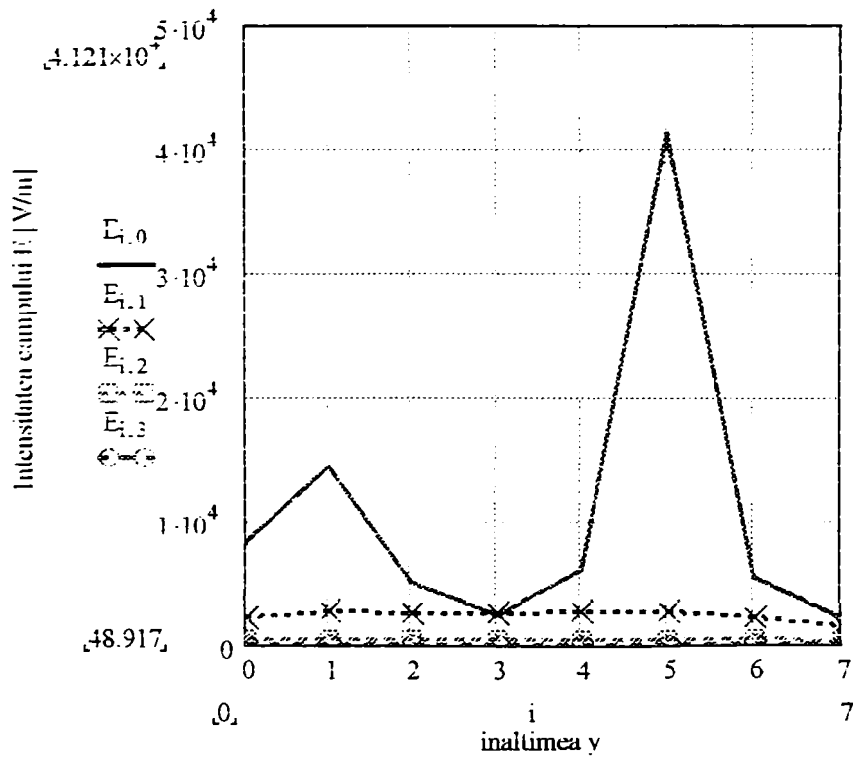


Figura 3.1.7. Variația intensității câmpului electric E în funcție de y= (21; 19.25; 17.5; 15.75; 14; 12.25; 10.5; 8.75 m) la x= (0; 3; 10; 20m), coordonatele lui P

Din analiza datelor prezentate, se observă că cele mai mari valori ale potențialului față de pământ și ale intensității câmpului electric se obțin în vecinătatea conductorului fazei 3, punctul de coordonate $x=0\text{m}$, $y=12,25\text{m}$, unde $U=30,66\text{kV}$ și $E=41,21\text{kV/m}$, respectiv în punctul situat sub conductorul fazei 1, ($x=0\text{m}$, $y=19,25\text{m}$), unde $U=20,62\text{kV}$, $E=14,3\text{kV/m}$. În punctul situat peste conductorul fazei 1, ($x=0\text{m}$, $y=21\text{m}$), acestea scad la $U=20,16\text{kV}$ și $E=8,373\text{kV/m}$. O reducere a acestor valori se observă la distanța $x=3\text{m}$, față de axa liniei, când devin: $U=\{8,029\text{kV}; 9,404\text{kV}; 10,73\text{kV}\}$ și $E=\{2,791\text{kV/m}; 2,742\text{kV/m}; 2,257\text{kV/m}\}$.

La înălțimea $y=2\text{m}$, în axa de referință considerată $x=0\text{m}$, valorile calculate sunt mult mai mici față de cele din imediata vecinătate a conductorilor faze, $U=1,1\text{kV}$ și $E=246,019\text{V/m}$. Cele mai mici valori, calculate, $U=19\text{V}$ și $E=0,74\text{V/m}$ se află în punctul de coordonate $x=50\text{m}$, $y=0,5\text{m}$.

Pentru configurația coronamentului în plan orizontal, paralel cu suprafața solului, stâlp portal tip ICS 110.143 valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric sunt consemnate în tabelele 3.1.16, respectiv 3.1.17 și reprezentările grafice din figurile 3.1.8; 3.1.9; 3.1.10; 3.1.11.

Tabelul 3.1.16 Valorile potențialului electric, LEA 110kV (portal)

[m]	V [kV]			
y_0/x_0	0	3	13	23
15	0.645	2.241	1.11	0.438
13.5	1.888	3.5	1.189	0.436
12	5.293	5.157	1.232	0.425
10.5	18.93	6.489	1.229	0.403
2	0.145	0.656	0.329	0.0994
1.5	0.1	0.479	0.248	0.0748
1	0.0628	0.314	0.165	0.05
0.5	0.0302	0.155	0.0831	0.025

Tabelul 3.1.17 Valorile intensității câmpului electric, LEA 110kV

[m]	E [kV/m]			
$x_p \backslash x_p$	0	3	13	23
15	1.118	0.691	0.13	0.041
13.5	2.055	1.005	0.141	0.0417
12	4.658	1.437	0.149	0.0416
10.5	22.25	1.812	0.153	0.0406
2	0.275	0.233	0.0668	0.0122
1.5	0.2	0.176	0.0439	0.00936
1	0.131	0.119	0.0302	0.00635
0.5	0.065	0.0615	0.0155	0.00322

Valorile maxime ale potențialului electric față de pământ și ale intensității câmpului electric se obțin în vecinătatea conductorului fazei 2, pentru punctele cu coordonatele $\{(0, 10,5), (0, 12)\}$, unde $U=\{18,93\text{kV}; 5,293\text{kV}\}$ și $E=\{22,25 \text{ kV/m}; 4,658 \text{ kV/m}\}$.

În punctele situate peste conductorul fazei 3, $\{(3, 10,5), (3, 12)\}$, valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric se reduc astfel că ele devin: $U=\{6,489\text{kV}; 5,157\text{kV}\}$ și $E=\{1,812 \text{ kV/m}; 1,437 \text{ kV/m}\}$.

Cele mai mici valori, $U=25\text{V}$ și $E=3,22 \text{ V/m}$, fiind calculate în punctul $(23, 0,5)$.

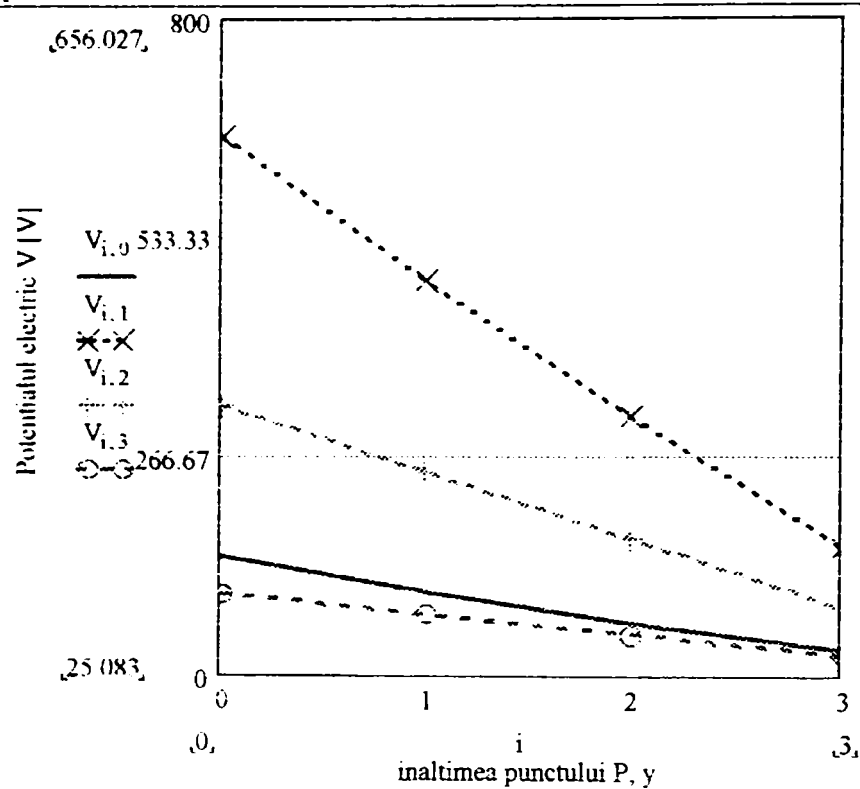


Figura 3.1.8.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P y (2: 1.5: 1; 0.5m) și x (0: 10; 20; 50m)

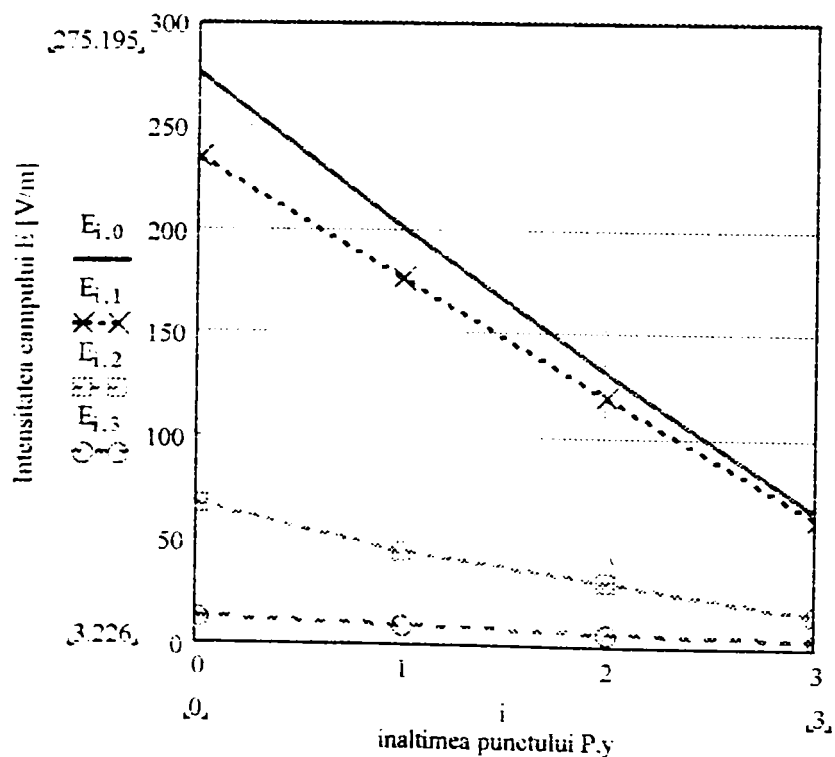


Figura 3.1.9.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P y (2: 1.5: 1; 0.5m) și x (0: 10; 20; 50m)

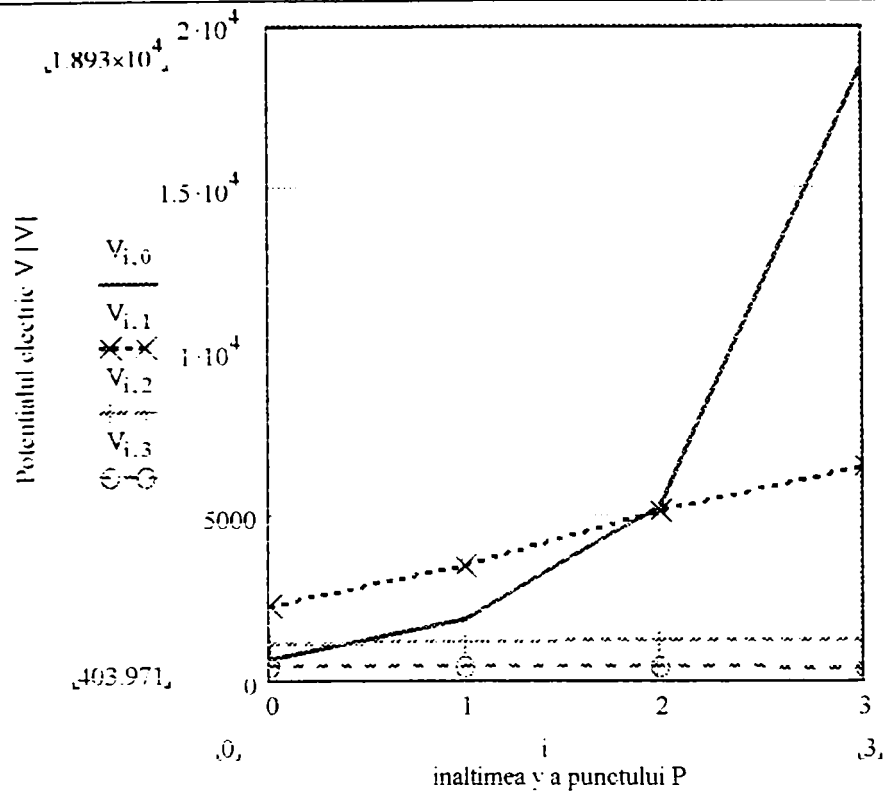


Figura 3.1.10.; Variația potentialului electric V în funcție de poziția punctului P y (15: 13.5; 12;1 0.5m) și x (0; 3; 13; 23m)

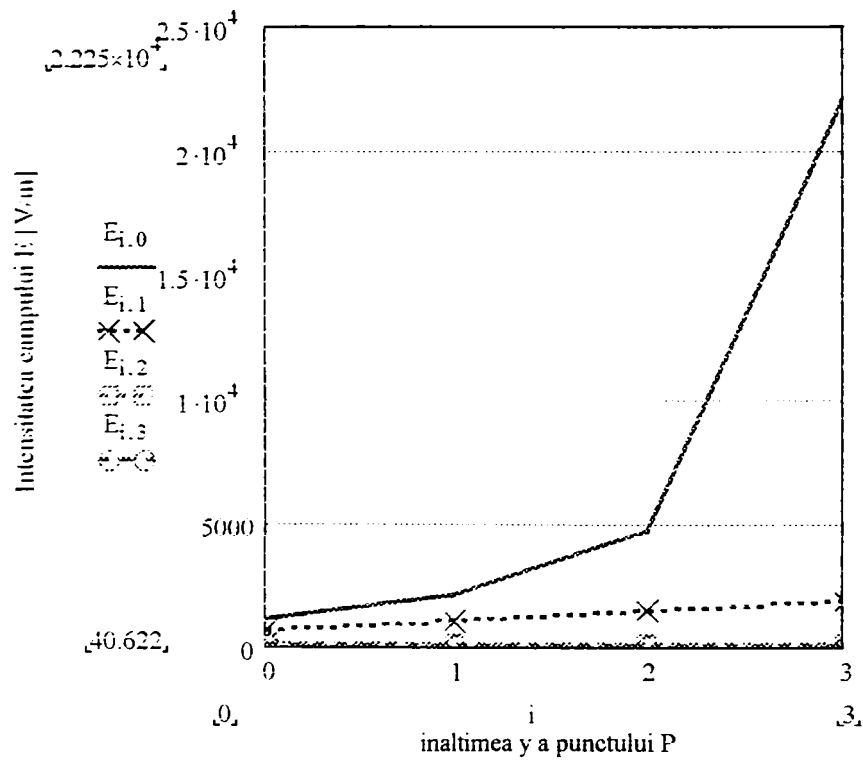


Figura 3.1.11.: Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P, y (15: 13.5; 12; 10.5m) și x (0; 3; 13; 23m)

În cazul liniei electrice aeriene, simplu circuit, de 220 kV, cu configurația coronamentului în triunghi, pe stâlp tip Sn 220.202, prin calculele efectuate s-au obținut pentru potențialul electric și intensitatea câmpului electric valorile prezentate în tabelele 3.1.18 și 3.1.19, cu ilustrarea grafică din figurile 3.1.12 și 3.1.13

Tabelul 3.1.18 Valorile potențialului electric, LEA 220 kV

[m]	V [kV]			
$V_p \times X_p$	0	10	20	50
2	2.803	0.99	0.23	0.11
1.5	2.087	0.747	0.171	0.082
1	1.384	0.5	0.114	0.055
0.5	0.69	0.25	0.057	0.028

Tabelul 3.1.19 Valorile intensității câmpului electric, LEA 220kV

[m]	E [V/m]			
$V_p \times X_p$	0	10	20	50
2	599	232	41.7	7.71
1.5	461	178	31.1	5.81
1	318	122	20.5	3.9
0.5	165	62.3	10.1	1.96

Linia electrică aeriană de 400 kV, Mintia – Timișoara, are configurația coronamentului în plan paralel cu suprafața solului, portal tip SnY 400.133. Valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric sunt prezentate în tabelele 3.1.20 și 3.1.21. Prezentarea grafică ale acestor valori se face în figurile 3.1.14; 3.1.15; 3.1.17 și 3.1.18.

În tabelul 3.1.22 și figura 3.1.16 sunt prezentate valorile potențialului și ale intensității câmpului electric din puncte aparținătoare planului de secțiune transversală la săgeata maximă.

Din datele prezentate, se observă cele mai mari valori în puncte din vecinătatea conductorului fazei 2, $\{(0, 20), (0, 22)\}$, unde $U = \{40,35\text{kV}; 40,33\text{kV}\}$ și $E = \{20,36 \text{ kV/m}; 20,37 \text{ kV/m}\}$.

Tabelul 3.1.20 Valorile potențialului electric, LEA 400 kV

[m]	V [kV]			
$y_p \setminus x_p$	0	4	8	18
26	10,67	12,34	9,63	4,95
24	19,02	16,34	11	5,124
22	40,33	19,71	11,83	5,179
20	40,35	19,7	11,79	5,103
2	0,297	0,657	0,798	0,617
1,5	0,22	0,49	0,596	0,463
1	0,146	0,325	0,396	0,308
0,5	0,072	0,162	0,198	0,154

Tabelul 3.1.21 Valorile intensității câmpului electric. LEA 400kV

[m]	E [kV/m]			
$y_p \setminus x_p$	0	4	8	18
26	3,444	1,935	1,021	0,331
24	6,381	2,627	1,173	0,347
22	20,37	3,292	1,273	0,356
20	20,36	3,299	1,279	0,358
2	0,134	0,13	0,117	0,064
1,5	0,1	0,098	0,089	0,048
1	0,067	0,066	0,06	0,033
0,5	0,033	0,033	0,03	0,016

Tabelul 3.1.22 Valorile potențialului și ale intensității câmpului electric. LEA 400kV (săgeata maximă)

[m]	V[kV]	E[kV/m]
$y_p \setminus x_p$	0	0
2	5,105	1,813
1,5	3,735	1,365
1	2,446	0,926
0,5	1,21	0,478

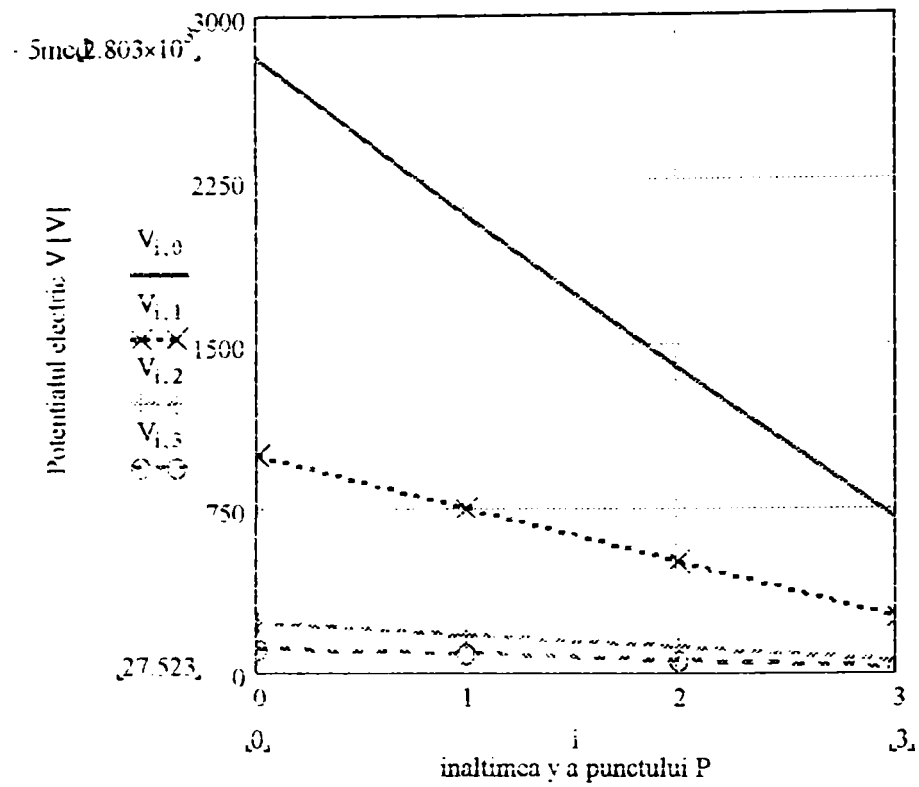


Figura 3.1.12.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P , y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10; 20; 50m)

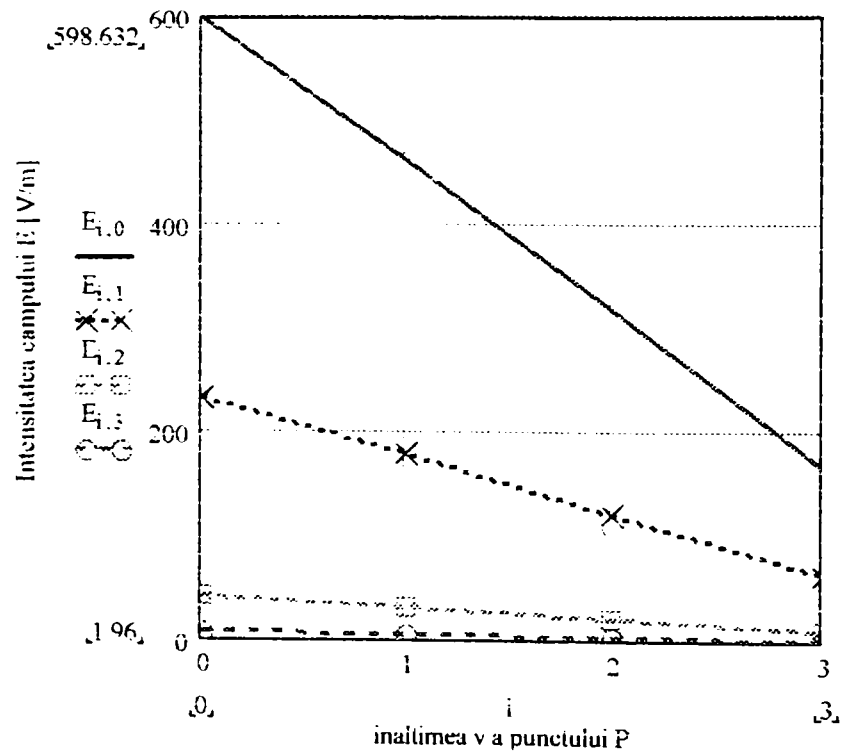


Figura 3.1.13.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P , y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10; 20; 50m)

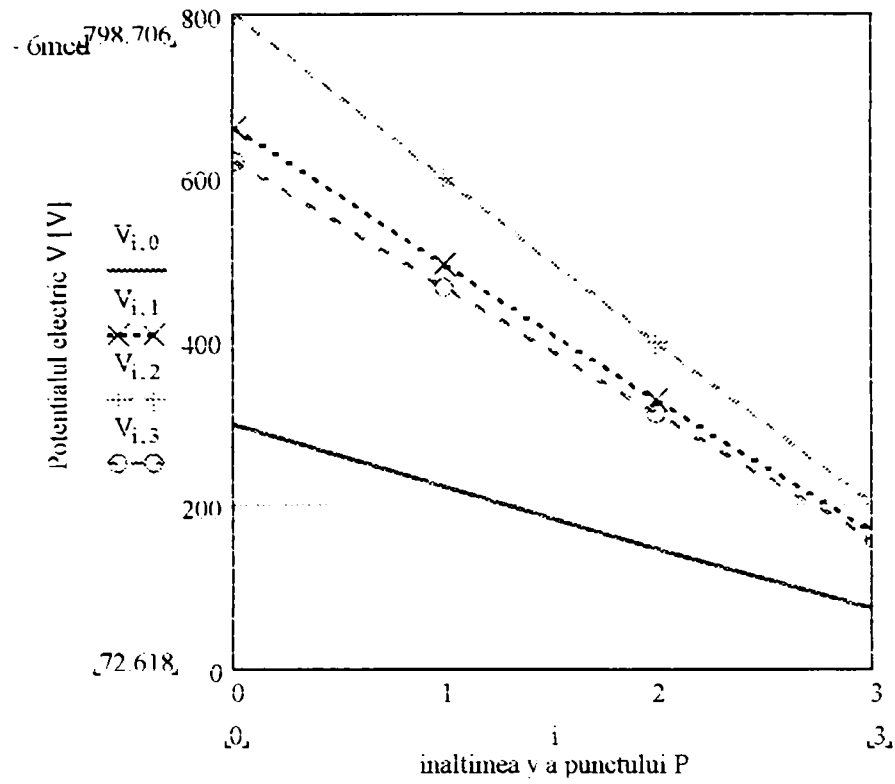


Figura 3.1.14.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P : y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 4; 8; 18m)

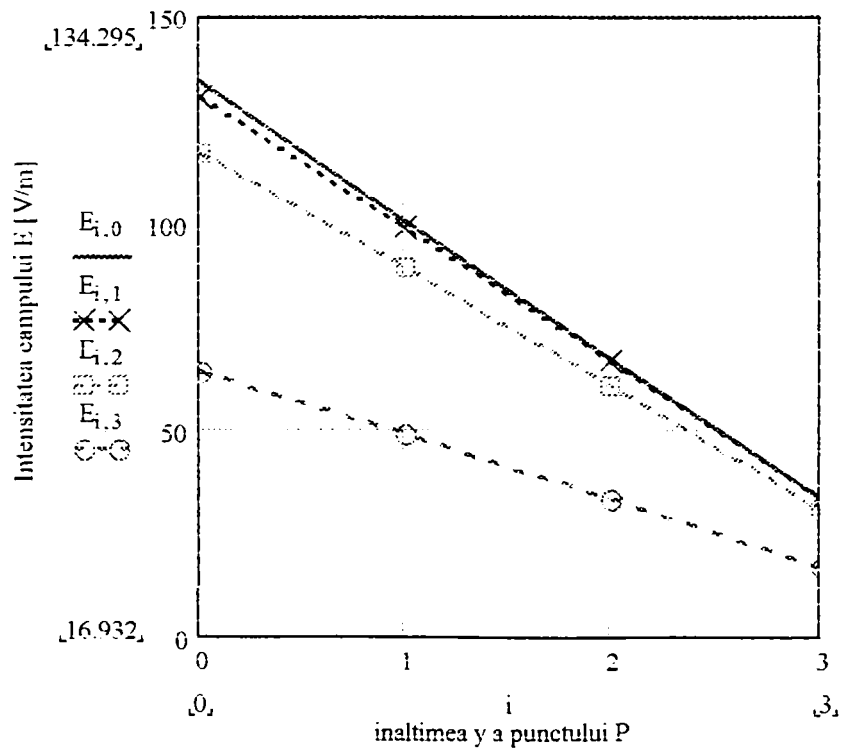


Figura 3.1.15.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P , y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 4; 8; 18m)

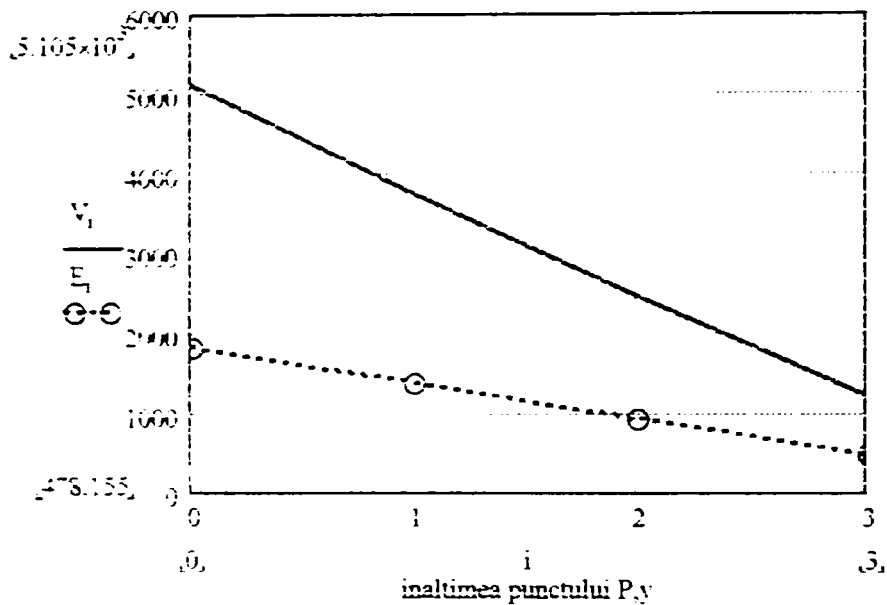


Figura 3.1.16: Variația potențialului V și ale intensității câmpului electric E, funcție de poziția punctului P. (x=0m; y=2; 1.5; 1; 0.5m)

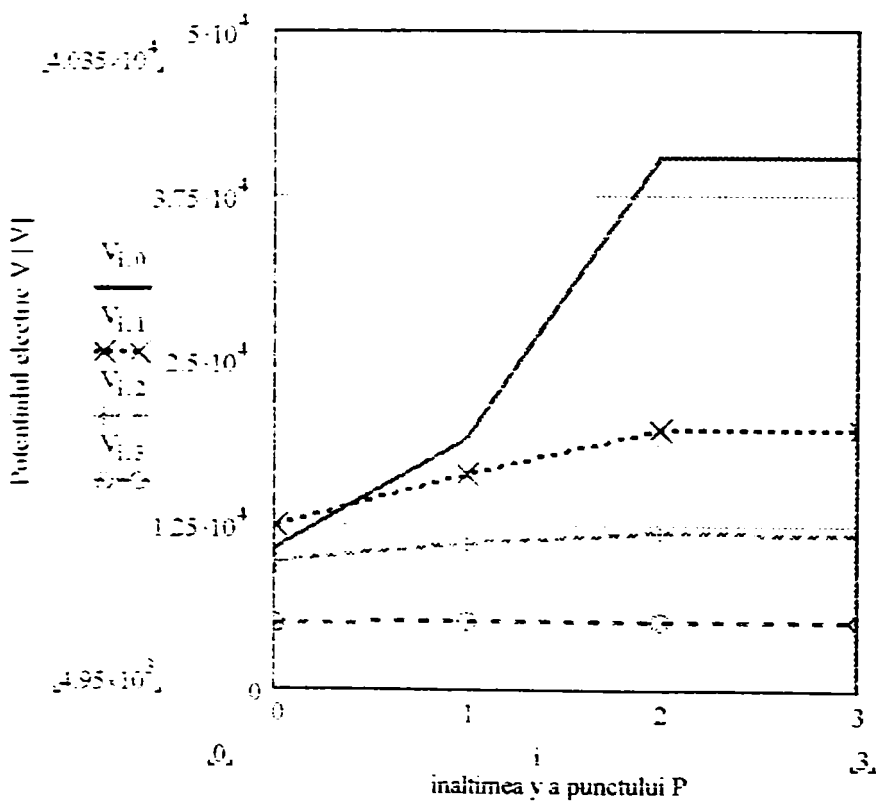


Figura 3.1.17.: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P y (26; 24; 22; 20m) și x (0; 4; 8; 18m)

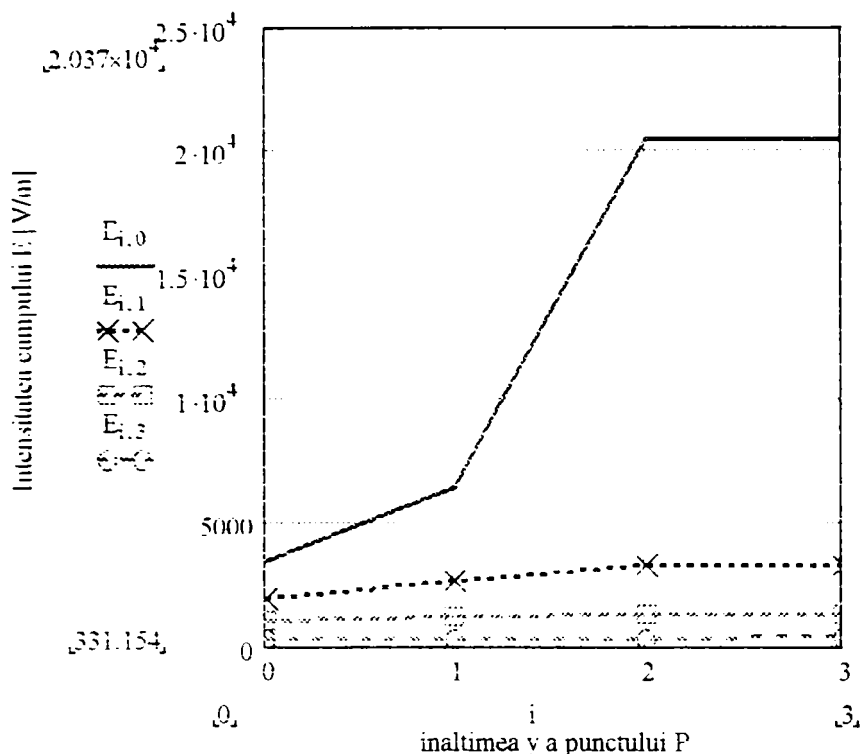


Figura 3.1.18.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P. y (26: 24: 22: 20m) și x (0: 4: 8: 18m)

În punctele din vecinătatea conductorului fazei 3, $\{(4, 20), (4, 22)\}$, valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric scad la $U=\{19,7\text{kV} ; 19,71\text{kV}\}$ și $E=\{3,299\text{kV/m} ; 3,292 \text{ kV/m}\}$. Minimul este calculat în punctul cu coordonatele $(18, 0,5)$: $U=154 \text{ V}$ și $E=16 \text{ V/m}$. Dacă punctele aparțin planului de secționare a liniei unde săgeata este maximă, $\{(0, 2), (0, 0,5)\}$, valorile potențialului față de pământ și ale intensității câmpului electric sunt: $U=\{5,105\text{kV}; 1,21\text{kV}\}$ și $E=\{1,813\text{kV/m} ; 478\text{V/m}\}$.

Pentru linia electrică aeriană, simplu circuit, de 400 kV, cu configurația coronamentului în triunghi, pe stâlp tip Sn 400.272, prin calculele efectuate s-au obținut pentru potențialul electric față de pământ și intensitatea câmpului electric, următoarele valori: tabelele 3.1.23, 3.1.24, cu reprezentările din figurile 3.1.19 și 3.1.20.

În cazul liniei electrice aeriene de 400 kV, Mintia – Arad, care are configurația coronamentului în plan paralel cu suprafața solului, portal tip SnY 400.133, valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric obținute prin calcul sunt prezentate în tabelele 3.1.25 și 3.1.26. Prezentarea grafică ale acestor valori se face în figurile 3.1.21; 3.1.22; 3.1.25 și 3.1.26.

În punctele corespunzătoare planului transversal din zona cu săgeată maximă valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric sunt cele din tabelele 3.1.27 și 3.1.28 cărora le corespund reprezentările grafice din figurile 3.1.23 și 3.1.24.

Tabelul 3.1.23 Valorile potențialului electric, LEA 400 kV

[m]	V [kV]			
Y_p, X_p	0	10	20	50
2	18.13	4.136	0.771	0.649
1.5	13.42	3.14	0.576	0.487
1	8.864	2.111	0.383	0.325
0.5	4.408	1.061	0.191	0.163

Tabelul 3.1.24 Valorile intensității câmpului electric, LEA 400 kV

[m]	E[kV/m]			
Y_p, X_p	0	10	20	50
2	4.725	1.023	0.143	0.023
1.5	3.626	0.787	0.106	0.017
1	2.506	0.538	0.07	0.012
0.5	1.315	0.275	0.035	0.006

Tabelul 3.1.25 Valorile potențialului electric, LEA 400 kV

[m]	V[kV]	
Y_p, X_p	0	10
26	98.12	61.8
24	114.6	62.07
22	161.5	61.46
20	159.8	59.63
2	1.16	2.401
1.5	0.862	1.796
1	0.571	1.196
0.5	0.285	0.597

Tabelul 3.1.26 Valorile intensității câmpului electric, LEA 400 kV

[m]	E[kV/m]	
Y_p, X_p	0	10
26	8.685	3.665
24	15.97	3.88
22	50.7	4.007
20	50.7	3.991
2	0.396	0.31
1.5	0.297	0.237
1	0.198	0.161
0.5	0.1	0.082

Tabelul 3.1.27 Valorile potențialului electric LEA 400 kV (săgeata maximă)

[m]	V[kV]	
$y_p \backslash x_p$	0	10
2	5.068	4.77
1.5	3.751	3.578
1	2.477	2.386
0.5	1.232	1.193

Tabelul 3.1.28 Valorile intensității câmpului electric, LEA 400 kV (săgeata maximă)

[m]	E[kV/m]	
$y_p \backslash x_p$	0	10
2	1.477	0.723
1.5	1.115	0.556
1	0.752	0.381
0.5	0.383	0.196

Din datele obținute se impune cu prioritate observarea valorilor ridicate ale potențialului față de pământ și ale intensității câmpului electric, în puncte din axa stâlpului $\{(0, 1,5), (0, 2)\}$: $U=\{13,42\text{kV}; 18,13\text{kV}\}$, $E=\{3,626\text{kV/m}; 4,725\text{kV/m}\}$ și scăderea lor semnificativă până la $U=\{3,14\text{kV}; 4,136\text{kV}\}$, $E=\{787\text{V/m}; 1,023\text{kV/m}\}$, atunci când distanța față de axa stâlpului devine $x=10\text{m}$. Valorile minime calculate corespund punctului cu coordonatele $(50, 0,5)$: $U=163\text{ V}$ și $E=6\text{ V/m}$.

Calcululele efectuate cu referire la linia electrică aeriană de 400 kV, Mintia-Arad, scot în evidență valori mari ale potențialului electric față de suprafața solului, respectiv ale intensității câmpului electric, în puncte din vecinătatea conductorului fazei 2, $\{(0, 20), (0, 22), (0, 24), (0, 26)\}$: $U=\{159,8\text{kV}; 161,5\text{kV}; 114,6\text{kV}; 98,12\text{kV}\}$ și $E=\{50,7\text{kV/m}; 50,7\text{kV/m}; 15,97\text{kV/m}; 8,685\text{kV/m}\}$, care scad în punctele din vecinătatea conductorului fazei 3 ($x=10\text{m}$): $U=\{59,63\text{kV}; 61,46\text{kV}; 62,07\text{kV}; 61,8\text{kV}\}$ și $E=\{3,991\text{kV/m}; 4,007\text{kV/m}; 3,88\text{kV/m}; 3,665\text{kV/m}\}$.

În punctele cu săgeata maximă, valorile lui $U=\{5,068\text{kV}; 3,751\text{kV}\}$ și $E=\{1,115\text{kV/m}; 1,477\text{kV/m}\}$, sunt mai mici decât cele corespunzătoare aceluiași puncte în cazul liniei cu coronamentul în triunghi.

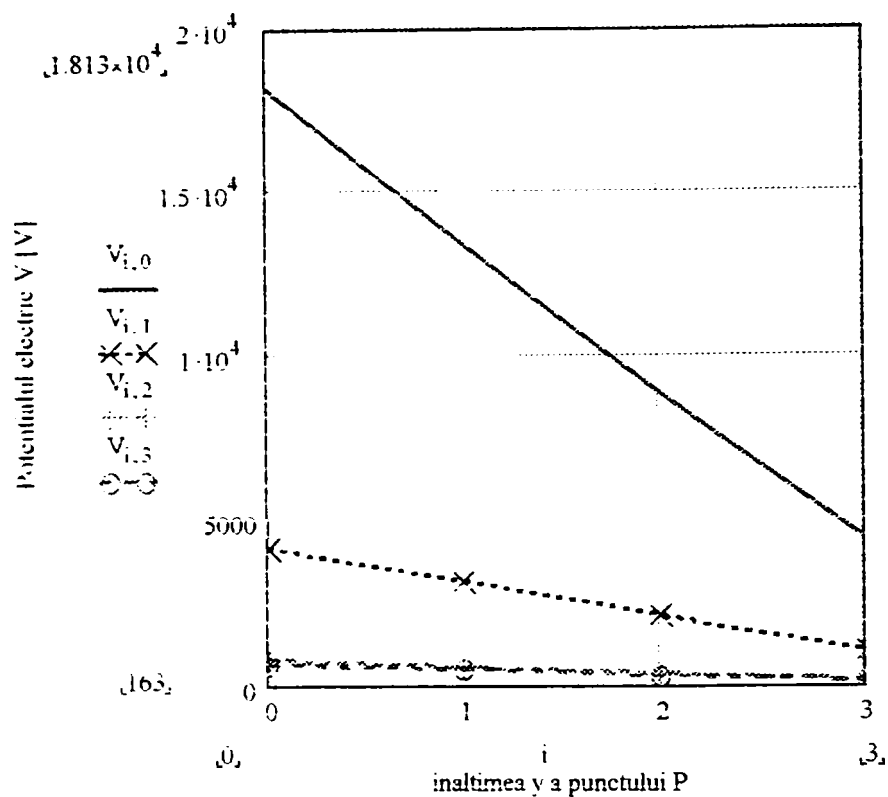


Figura 3.1.19.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10; 20; 50m)

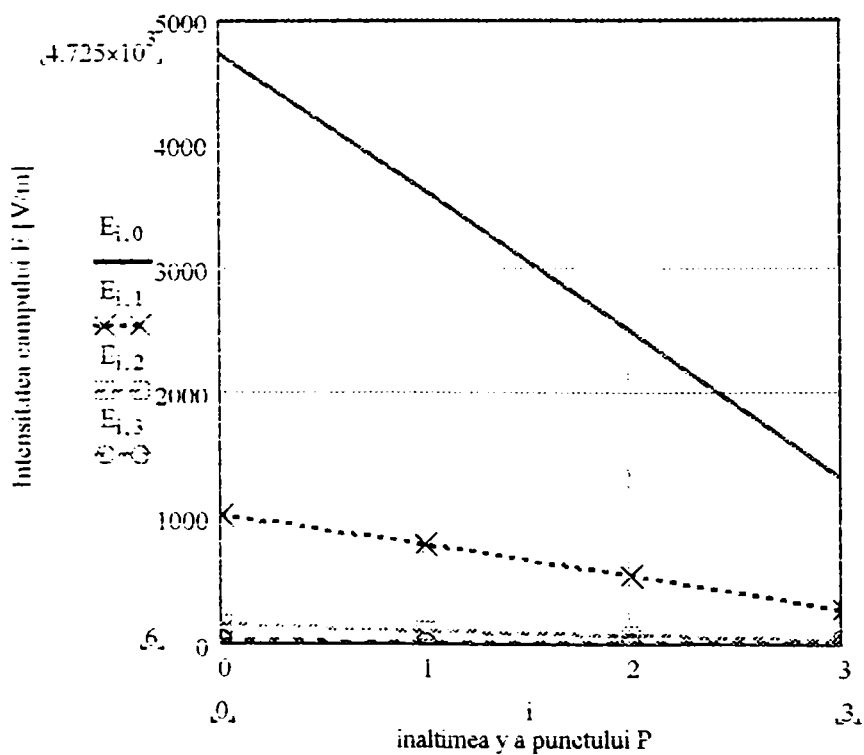


Figura 3.1.20.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P . y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10; 20; 50m)

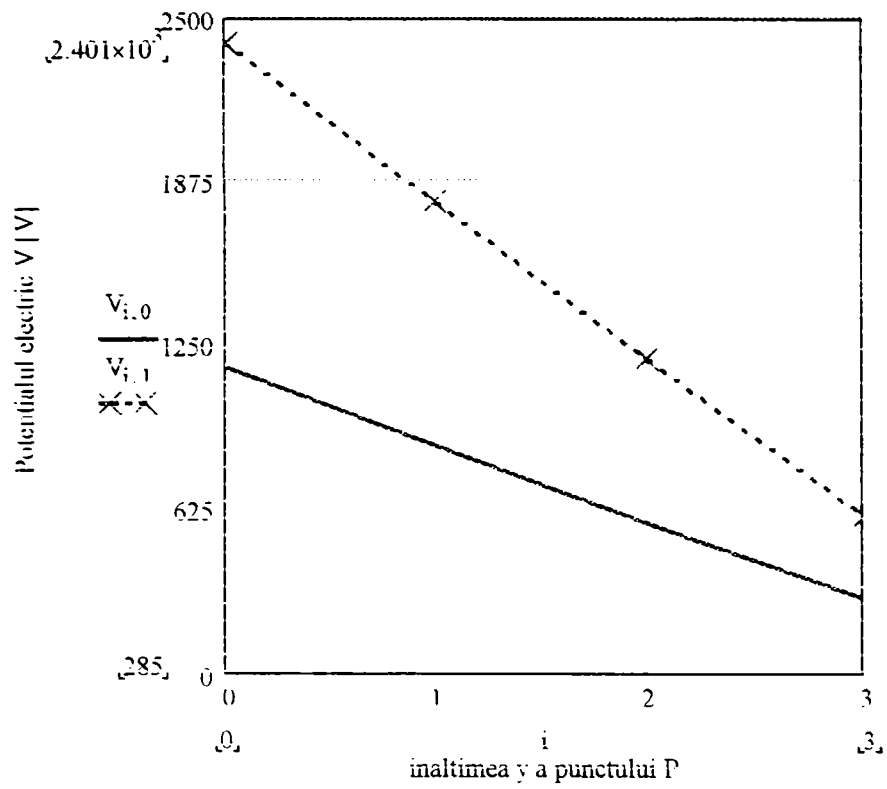


Figura 3.1.21.; Variația potentialului electric V în funcție de poziția punctului P y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 10 m)

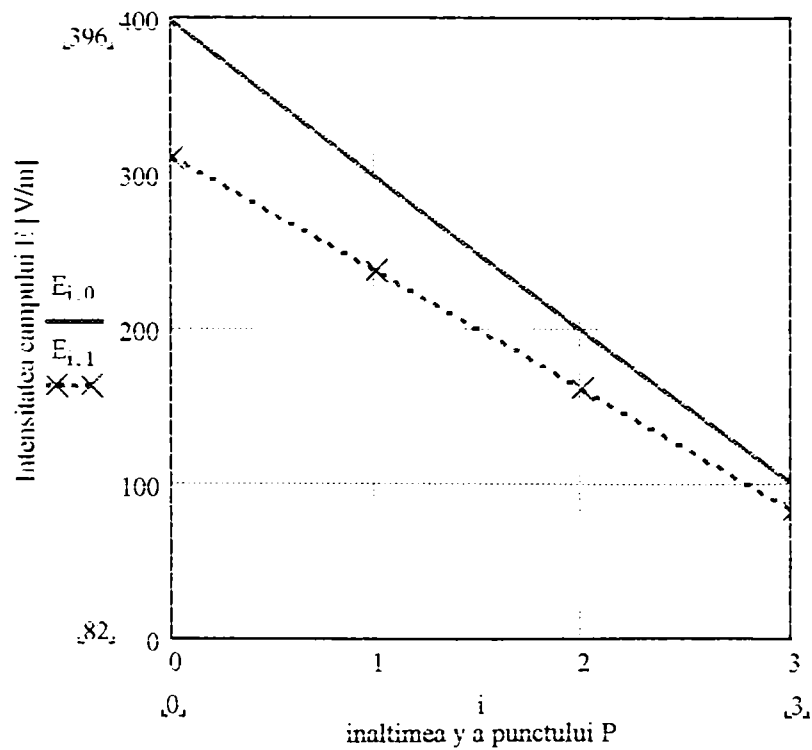


Figura 3.1.22.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P , y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 10 m)

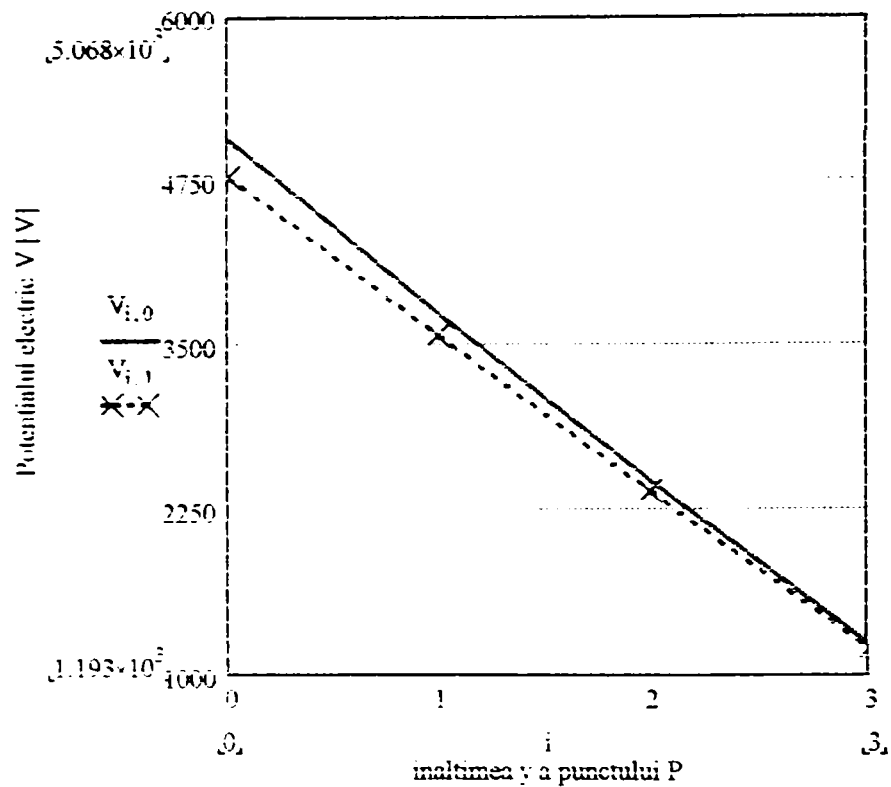


Figura 3.1.23.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P , $y(2; 1,5; 1; 0,5\text{m})$ și $x(0; 10\text{m})$

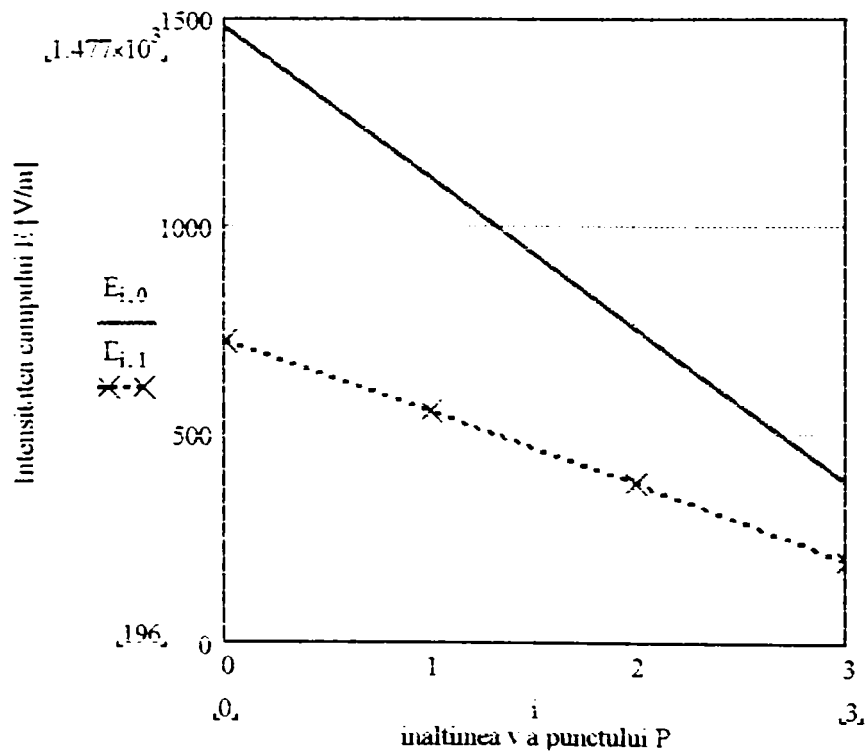


Figura 3.1.24.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P , $y(2; 1,5; 1; 0,5\text{m})$ și $x(0; 10\text{m})$

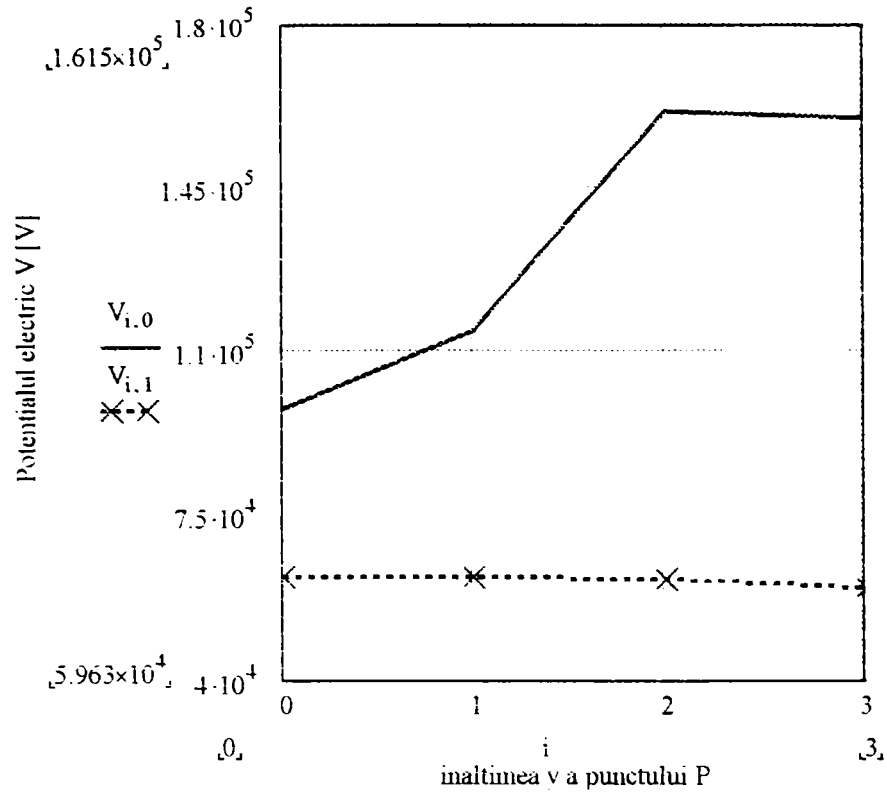


Figura 3.1.25.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P y (26; 24; 22; 20 m) și x (0; 10 m)

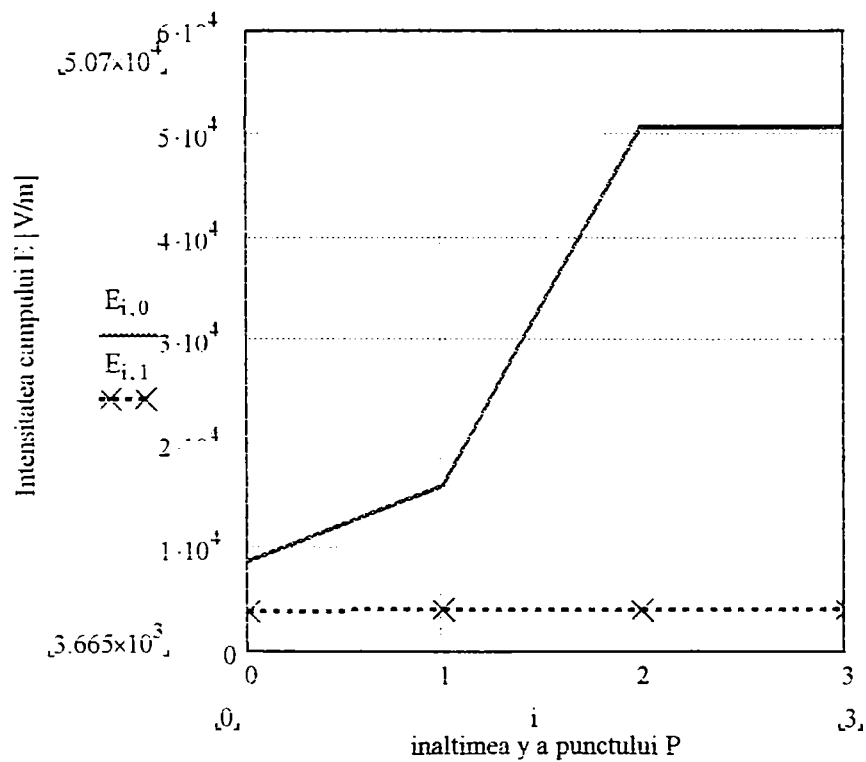


Figura 3.1.26.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P , y (26; 24; 22; 20 m) și x (0; 10 m)

3.1.4.2. Linii electrice aeriene dublu circuit

Valorile potențialului electric V și ale intensității câmpului electric E în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, dublu circuit, de 110 kV, cu configurația coronamentului în hexagon pe stâlp tip Sn 110.252, figura 3.1.27.a, sunt prezentate în tabelele 3.1.29 și 3.1.30. Imaginea grafică a acestor valori se regăsește în figurile 3.1.28 și 3.1.29.

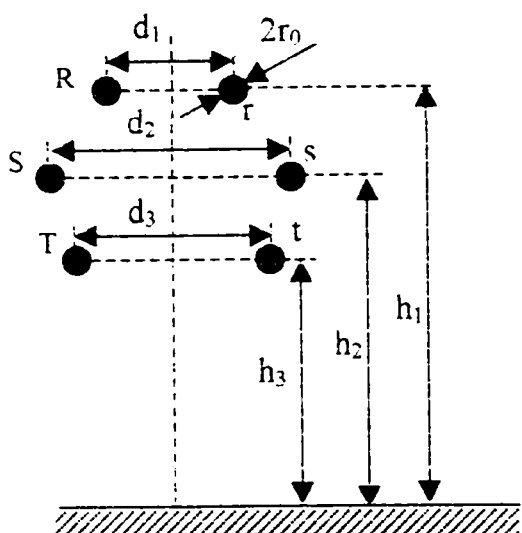


Figura 3.1.27.a Coronament hexagonal, linie dublu circuit

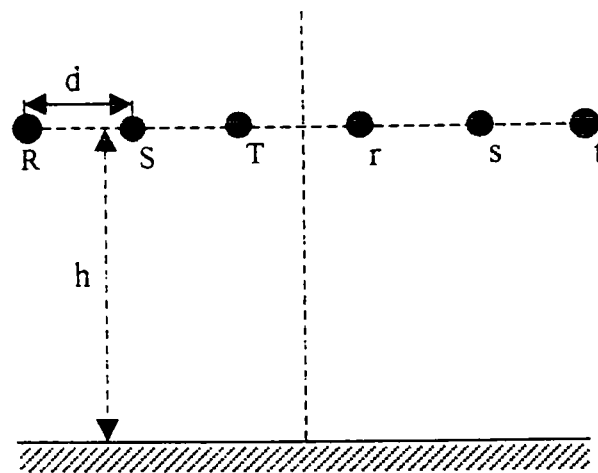


Figura 3.1.27.b Coronament pe stâlp portal, linie dublu circuit

Tabelul 3.1.29 Valorile potențialului electric, LEA 110kV, stâlp fig.3.1.27

[m]	V [kV]			
$y_p \setminus x_p$	0	3.825	13.825	23.825
2	1.771	1.522	0.199	0.112
1.5	1.321	1.136	0.151	0.083
1	0.876	0.755	0.102	0.055
0.5	0.437	0.376	0.051	0.027

Tabelul 3.1.30 Valorile intensității câmpului electric, LEA110 kV

[m]	E [V/m]			
$y_p \setminus x_p$	0	3.825	13.825	23.825
2	380	338	85.4	17.3
1.5	295	261	64.9	12.8
1	205	181	43.8	8.46
0.5	107	94.3	22.2	4.17

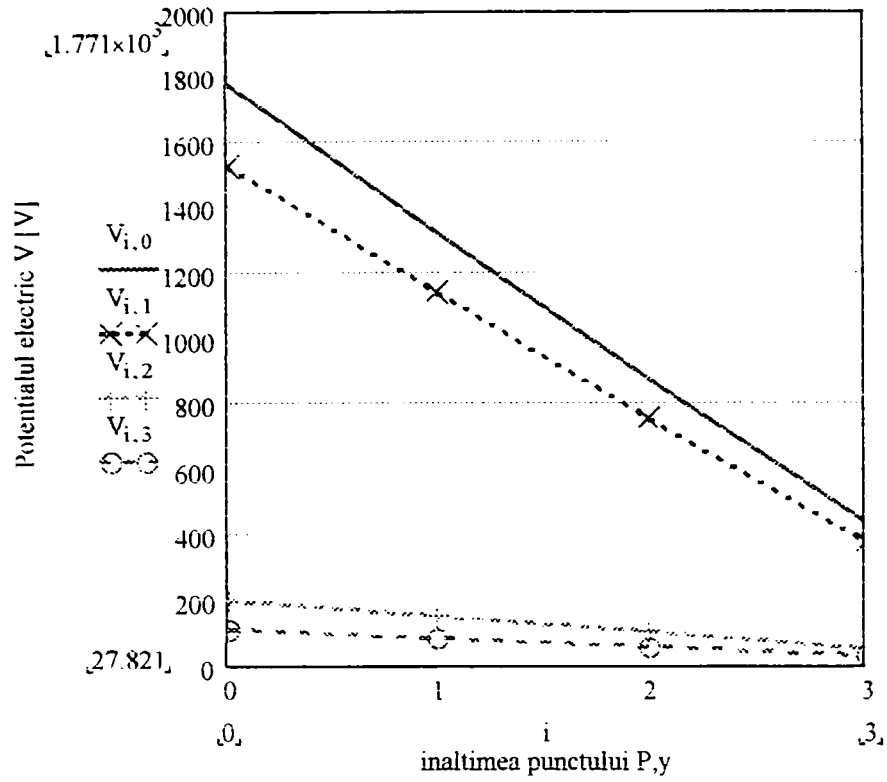


Figura 3.1.28.: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P: y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 3,825; 13,825; 23,825m)

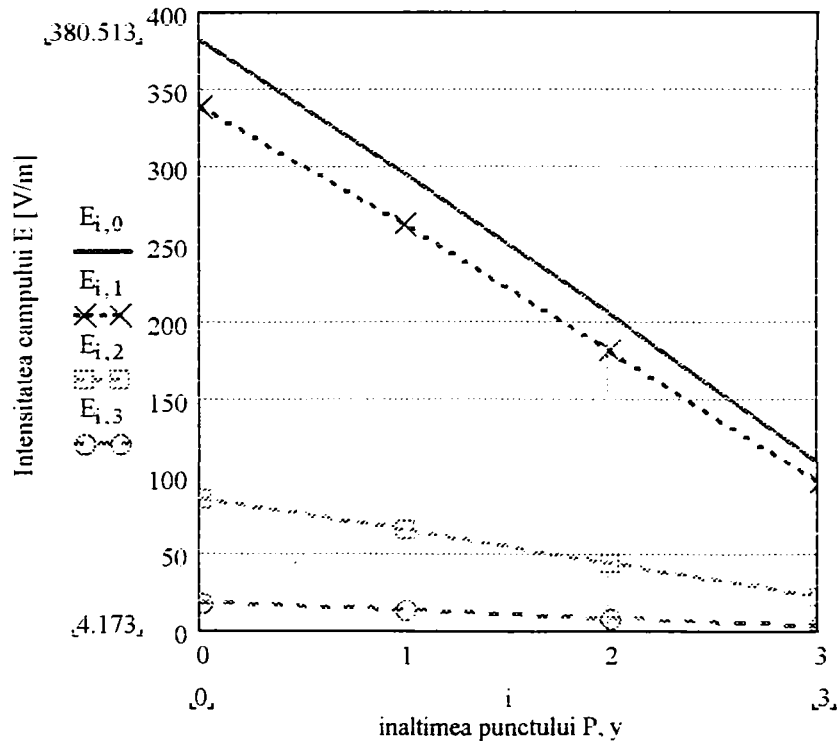


Figura 3.1.29.: Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P: y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 3,825; 13,825; 23,825m)

Pentru configurația coronamentului în plan orizontal, paralel cu suprafața solului, adică stâlp portal tip ICS 110.143, figura 3.1.27.b, valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric sunt consemnate în tabelele 3.1.31, respectiv 3.1.32 și reprezentările grafice din figurile 3.1.30 și 3.1.31.

Tabelul 3.1.31 Valorile potențialului electric, LEA 110 kV, stâlp fig.3.1.27.b

[m]	V [kV]						
$v_p \times x_p$	0	1.5	4.5	7.5	17.5	27.5	57.5
2	4.511	3.976	2.555	1.247	0.277	0.207	0.092
1.5	3.368	2.968	1.916	0.946	0.209	0.155	0.069
1	2.238	1.972	1.277	0.636	0.139	0.103	0.046
0.5	1.117	0.984	0.638	0.319	0.07	0.051	0.023

Tabelul 3.1.32 Valorile intensității câmpului electric, LEA 110 kV, stâlp fig.3.1.27.b

[m]	E [V/m]						
$v_p \times x_p$	0	1.5	4.5	7.5	17.5	27.5	57.5
2	799	750	572	375	68.3	7.4	2.44
1.5	614	571	427	276	53.8	5.62	1.83
1	422	389	284	181	37.7	3.81	1.22
0.5	218	200	143	89.8	19.7	1.94	0.61

Din analiza datelor obținute pentru linia electrică aeriană de 110 kV, dublu circuit, se observă valori mai mari în punctele cu coordonatele $\{(0, 1.5), (0, 2)\}$, în cazul coronamentului portal $U=\{3.368\text{kV} ; 4.511\text{kV}\}$, $E=\{614 \text{ V/m} ; 799 \text{ V/m}\}$, decât în cel cu coronament în hexagon $U=\{1.321\text{kV} ; 1.771\text{kV}\}$ și $E=\{295 \text{ V/m} ; 380\text{V/m}\}$.

În cazul liniei electrice aeriene, dublu circuit, de 220 kV, cu configurația coronamentului în hexagon, stâlp tip Sn 220.202, prin calculele efectuate s-au obținut pentru potențialul electric și intensitatea câmpului electric valorile prezentate în tabelele 3.1.33 și 3.1.34, cu ilustrarea grafică din figurile 3.1.32 și 3.1.33

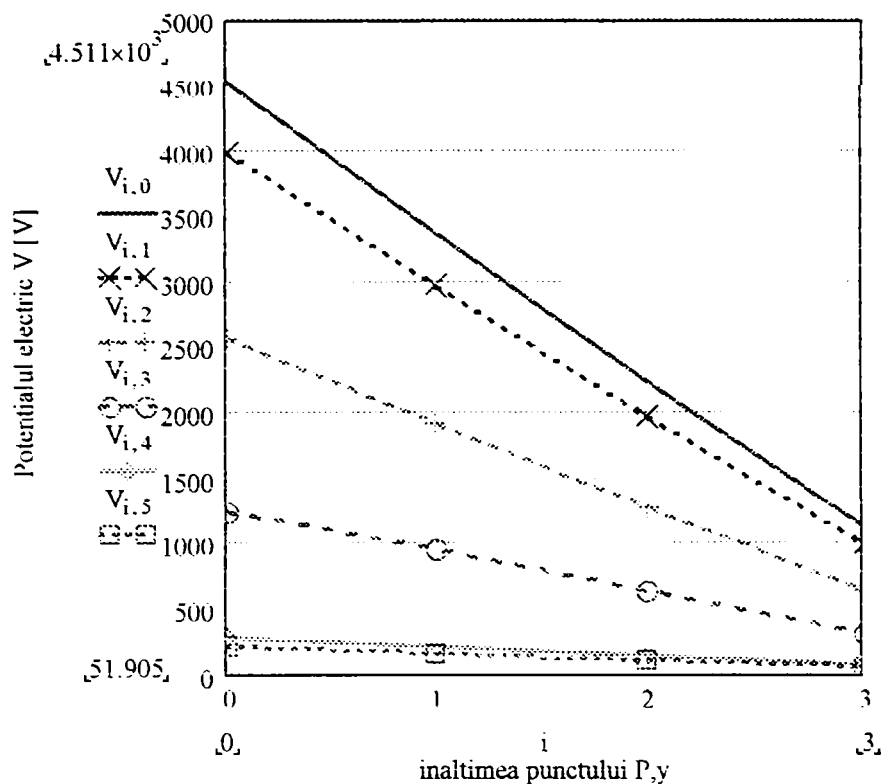


Figura 3.1.30.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului $P:y$ (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 1,5; 4,5; 7,5;17,5;27,5;57,5 m)

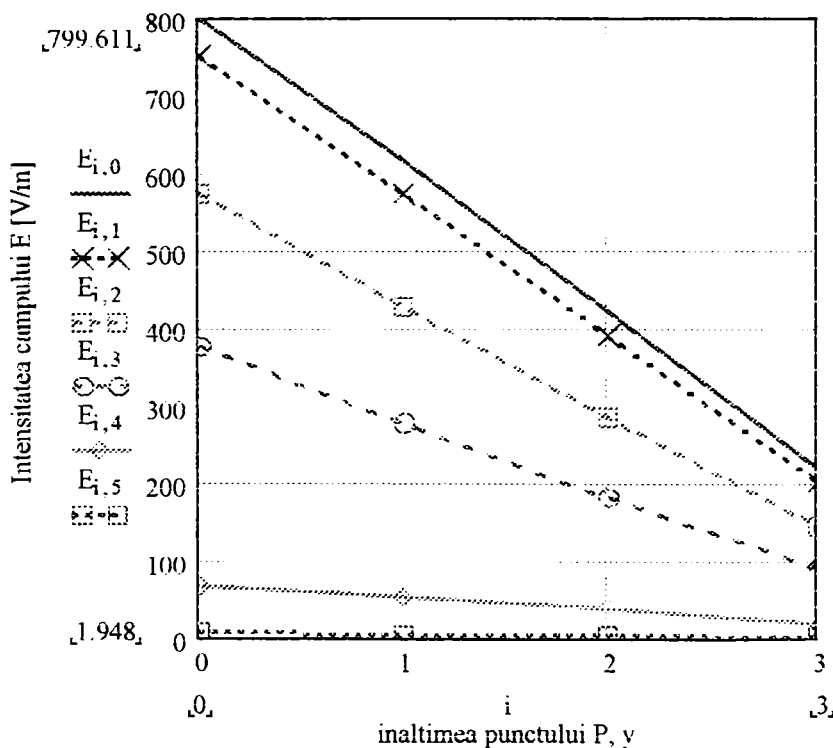


Figura 3.1.31.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului $P:y$ (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 1,5;4,5;7,5;17,5;27,5;57,5 m)

Tabelul 3.1.33 Valorile potențialului electric, LEA 220 kV, stâlp fig.3.1.27.a

[m]	V [kV]				
$Y_p \setminus X_p$	0	8	18	28	58
2	3.943	2.676	0.492	0.299	0.162
1.5	2.95	2	0.368	0,223	0,122
1	1.963	1.333	0.244	0.149	0.081
0.5	0.98	0.665	0.122	0.074	0.04

Tabelul 3.1.34 Valorile intensității câmpului electric, LEA 220 kV, stâlp fig.3.1.27.a

[m]	E [V/m]				
$Y_p \setminus X_p$	0	8	18	28	58
2	734	588	117	33,2	10
1.5	574	453	88,7	25,1	7,6
1	400	312	59,5	17	5
0.5	210	161	30	8,62	2,55

Pentru linia electrică aeriană, dublu circuit, de 400 kV, cu configurația coronamentului hexagon, stâlp Tip Sn 400.202, prin calculele efectuate s-au obținut următoarele valori pentru potențialul electric față de pământ și intensitatea câmpului electric: tabelele 3.1.35, 3.1.36, cu reprezentările din figurile 3.1.34 și 3.1.35.

Tabelul 3.1.35 Valorile potențialului electric, LEA 400 kV, stâlp fig.3.1.27a

[m]	V [kV]			
$Y_p \setminus X_p$	0	11	21	31
2	9.574	7.378	2.87	2.358
1.5	7.247	5.534	2.14	1.768
1	4.862	3.689	1.42	1.178
0.5	2.44	1.844	0.708	0.589

Tabelul 3.1.36 Valorile intensității câmpului electric, LEA 400 kV

[m]	E [kV/m]			
$Y_p \setminus X_p$	0	11	21	31
2	1.484	2.347	0.268	0.155
1.5	1.238	1.808	0.204	0.118
1	0.907	1.247	0.14	0.08
0.5	0.495	0.649	0.072	0.041

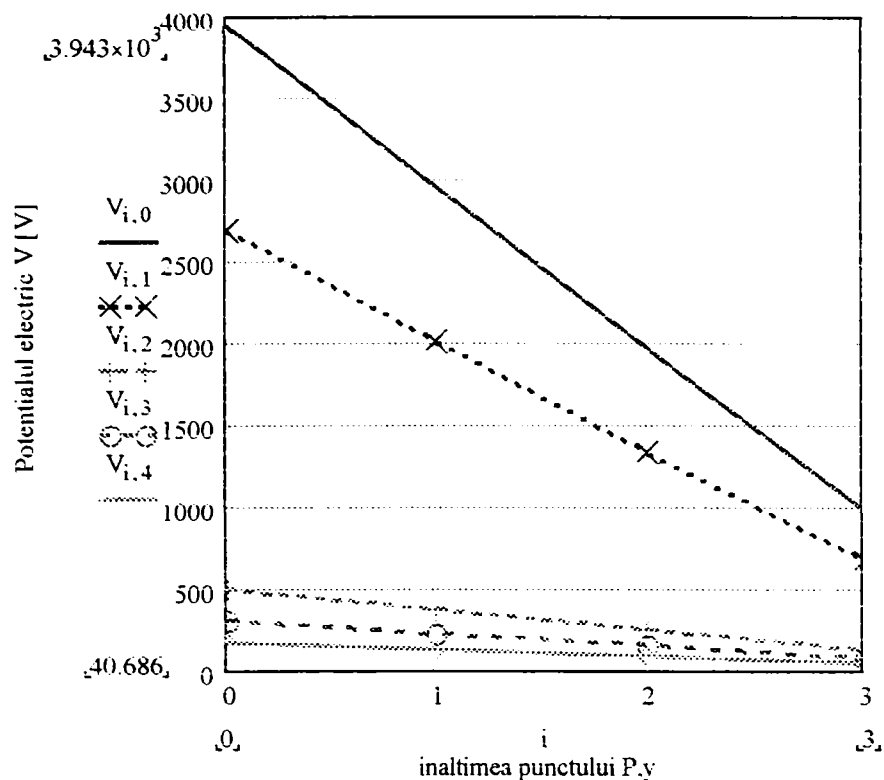


Figura 3.1.32.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 8; 18; 28; 58 m)

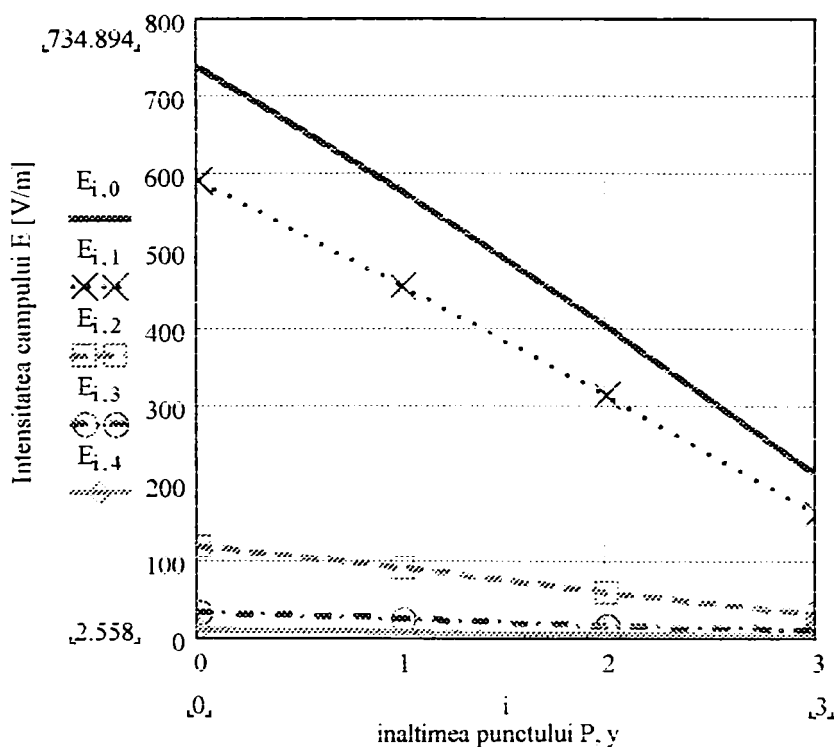


Figura 3.1.33.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 8; 18; 28; 58 m)

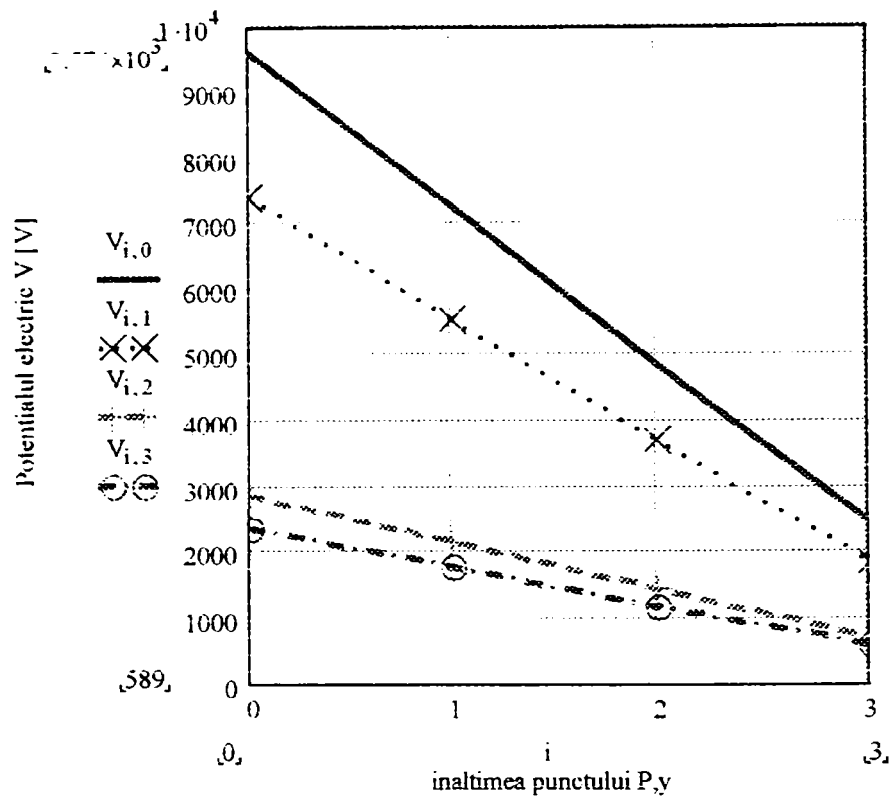


Figura 3.1.34.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P: y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 11; 21; 31 m)

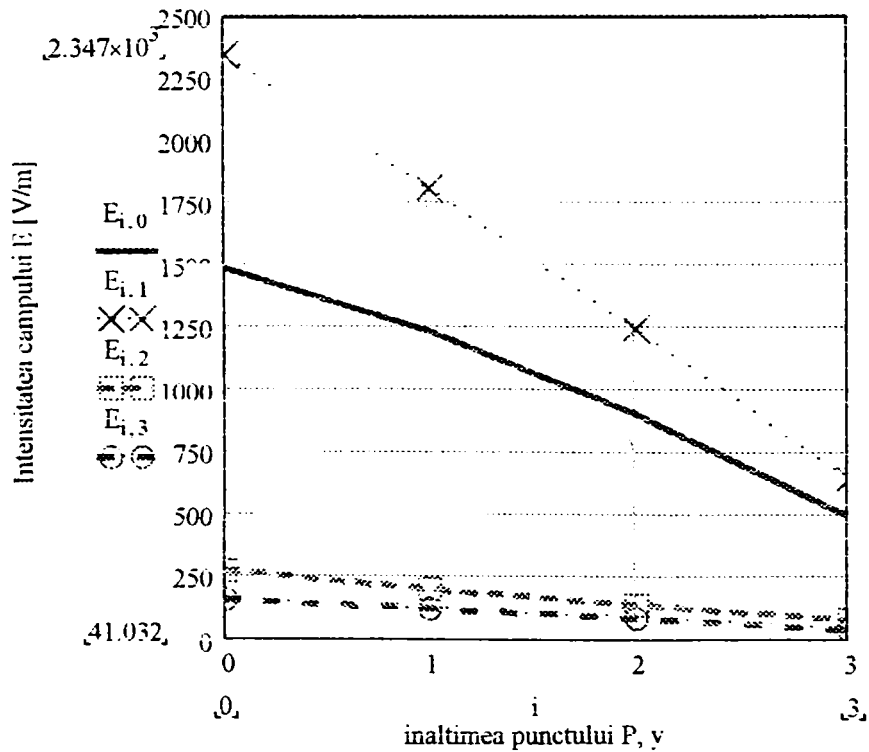


Figura 3.1.35.; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P: y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 11; 21; 31 m)

Referitor la linia electrică aeriană, dublu circuit, de 220 kV, se remarcă pentru potențialul electric față de pământ și pentru intensitatea câmpului electric valorile : $U=\{2.95\text{kV} ; 3.943\text{kV}\}$ și $E=\{574 \text{ V/m} ; 734\text{V/m}\}$, în punctele cu coordonatele $\{(0, 1.5), (0, 2)\}$.

Comparând valorile obținute pentru liniile electrice aeriene, dublu circuit, cu cele pentru simplu circuit, se observă o reducere semnificativă a acestora în cazul liniei electrice de 400 kV, dublu circuit, $U=\{7.247\text{kV} ; 9.574\text{kV}\}$ și $E=\{1.238 \text{ kV/m} ; 1.484 \text{ kV/m}\}$, în punctele cu coordonatele $\{(0, 1.5), (0, 2)\}$ față de cele calculate în aceleași puncte pentru linia de 400 kV, simplu circuit.

3.1.5. Câmpul magnetic în puncte din vecinătatea liniilor electrice de înaltă tensiune

Inducția magnetică \vec{B} , într-un punct oarecare P din spațiu, depinde atât de valoarea intensității curentului electric din conductorul în vecinătatea căruia se consideră câmpul magnetic determinat de acesta, cât și de distanța la care se află punctele în care se calculează inducția magnetică față de conductor. Mediul este presupus omogen, cu permeabilitatea μ_0 .

În figura 3.1.36 se prezintă, într-un sistem de coordonate x, y, z, o linie electrică trifazată, ale cărei conductoare de fază sunt parcurse după direcția axei z de următorul sistem simetric de curenți electrici:

$$\underline{I}_R = I; \quad \underline{I}_S = I \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}; \quad \underline{I}_T = I \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}}$$

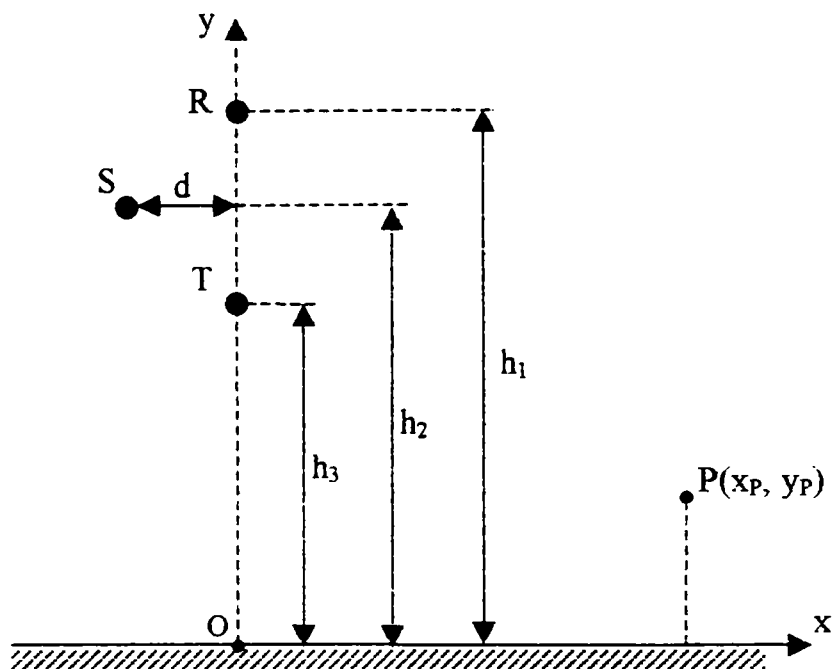


Figura 3.1.36 Coronament stâlp simplu circuit

pentru care inducția magnetică în punctul de coordonate (x_p, y_p) este [1],[3],[6],[9]:

$$B_{p_i} = \sqrt{B_{px_i}^2 + B_{py_i}^2}$$

iar, componentele inducției magnetice sunt:

$$B_{px_i} = -\beta \cdot \sum_k \underline{I}_k \cdot \frac{y_{p_{ki}}}{r_{p_{ki}}^2} \quad (3.1.12)$$

$$B_{py_i} = \beta \cdot \sum_k \underline{I}_k \cdot \frac{x_{p_{ki}}}{r_{p_{ki}}^2} \quad (3.1.13)$$

unde k reprezintă în mod succesiv fazele R, S și T; $r_{p_{ki}} = \sqrt{x_{p_{ki}}^2 + y_{p_{ki}}^2}$

exprimă distanța de la conductorul fazei k la punctul p în care se calculează inducția magnetică ; $\beta = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi}$ unde $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m, este

permeabilitatea magnetică a vidului.

Pentru calcule s-a folosit pachetul de programe **Mathcad 2001 Professional**.

3.1.5.1. Linii electrice aeriene simplu circuit

Valorile inducției magnetice B [μT] în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, simplu circuit, de 110 kV, cu configurația coronamentului în triunghi și stâlpi de tipul Sn 110.102, cu $I_0 = 100$ A, sunt prezentate în tabelele 3.1.37; 3.1.38; 3.1.39 ; 3.1.40 și graficele din figurile 3.1.37; 3.1.38; 3.1.39 ; 3.1.40.

Tabelul 3.1.37 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 110 kV. simplu circuit

[m]	$B[\mu\text{T}]$	
$y_p \backslash x_p$	0	10
2	0.744	0.459
1,5	0.687	0.438
1	0.636	0.417
0,5	0.591	0.398

Tabelul 3.1.38 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 110 kV. simplu circuit

[m]	$B_x[\mu\text{T}]$	
$y_p \backslash x_p$	0	10
2	0.572	0.0345
1,5	0.533	0.0451
1	0.497	0.0542
0,5	0.466	0.0618

Tabelul 3.1.39 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 110 kV. simplu circuit

[m]	$B[\mu\text{T}]$	
$y_p \backslash x_p$	0	10
21	17.38	1.011
19,25	29.64	1.105
17,5	10.47	1.163
15,75	5.871	1.18
14	12.81	1.151
12,25	82.9	1.081
10,5	10.83	0.979
8,75	4.039	0.86

Tabelul 3.1.40 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 110 kV. simplu circuit

[m]	$B_x[\mu\text{T}]$	
$y_p \backslash x_p$	0	10
21	17.42	-0.5569
19,25	-29.71	-0.8054
17,5	-11.15	-0.9804
15,75	-7.097	-1.034
14	-6.795	-0.9591
12,25	-40.95	-0.7885
10,5	5.963	-0.576
8,75	2.477	-0.3719

Din cele prezentate în tabelele de mai sus, se constată că cele mai mari valori ale inducției magnetice se obțin pe axa de simetrie a stâlpului, în punctele situate în vecinătatea fazelor 1 și 3. Valorile $B = 29,64 \mu\text{T}$ și $B = 82,9 \mu\text{T}$ pot fi periculoase pentru organismul uman. Componenta după x , B_x , a inducției magnetice este preponderentă în aceleași puncte de valori mari dobândite de inducția magnetică rezultantă.

Valorile inducției magnetice B [μT] și ale componentei sale B_x [μT] în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, simplu circuit, de 220 kV, cu configurația coronamentului în triunghi pe stâlpi de tip Sn 220.252 și $I_0 = 200$ A, sunt prezentate în tabelele 3.1.41; 3.1.42; 3.1.43; 3.1.44 și graficele din figurile 3.1.41; 3.1.42; 3.1.43; 3.1.44.

Tabelul 3.1.41 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 220 kV, simplu circuit

[m]	$B[\mu\text{T}]$		
y_p/x_p	0	10	20
2	1.988	1.278	0.6577
1,5	1.848	1.223	0.6429
1	1.723	1.17	0.6282
0,5	1.611	1.121	0.6138

Tabelul 3.1.42 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 220 kV, simplu circuit

[m]	$B_x[\mu\text{T}]$		
y_p/x_p	0	10	20
2	1.434	0.2852	-0.1785
1,5	1.344	0.3	-0.1599
1	1.262	0.3118	-0.1423
0,5	1.188	0.321	-0.1256

Din calculele făcute în punctele situate în vecinătatea liniei electrice aeriene de 220 kV, așa după cum este firesc, valorile maxime pentru inducția magnetică se obțin în proximitatea conductorilor de fază. Astfel, în vecinătatea fazei 1, $B = 15,29 \mu\text{T}$ iar în vecinătatea fazei 2, $B = 10,92 \mu\text{T}$. Cea mai mare valoare a inducției magnetice se obține în punctul învecinat fazei 3, $B = 164,2 \mu\text{T}$, valoare care depășește nivelul de referință admis pentru expunerea organismului uman în câmp magnetic alternativ, la frecvența de 50 Hz, ($B = 100 \mu\text{T}$). Un asemenea câmp magnetic determină la periferia organismului, într-o ipoteză simplificată, prin care organismul uman este presupus omogen din punct de vedere

electric, cu o conductivitate $\sigma = 0,2 \text{ S m}^{-1}$ un curent electric indus cu densitatea $J = 0,2 \div 2 \text{ mA.m}^{-2}$ [31].

Prin calcule mult mai realiste, bazate pe modele mai elaborate din punct de vedere anatomic și electric, efectuate pentru determinarea curenților induși în învelișul cutanat al organismului de câmp magnetic la frecvența de 50 Hz, [41], se obțin valori ale densității de curent electric mult mai mari de 2 mA.m^{-2} pentru un câmp magnetic cu inducția de $100 \mu\text{T}$, chiar de două ori. Explicația acestei diferențe față de modelul simplificat este dată de prezența celulelor care modifică geometria și implicit distribuția spațială a câmpului electric indus deci și a curentului electric indus.

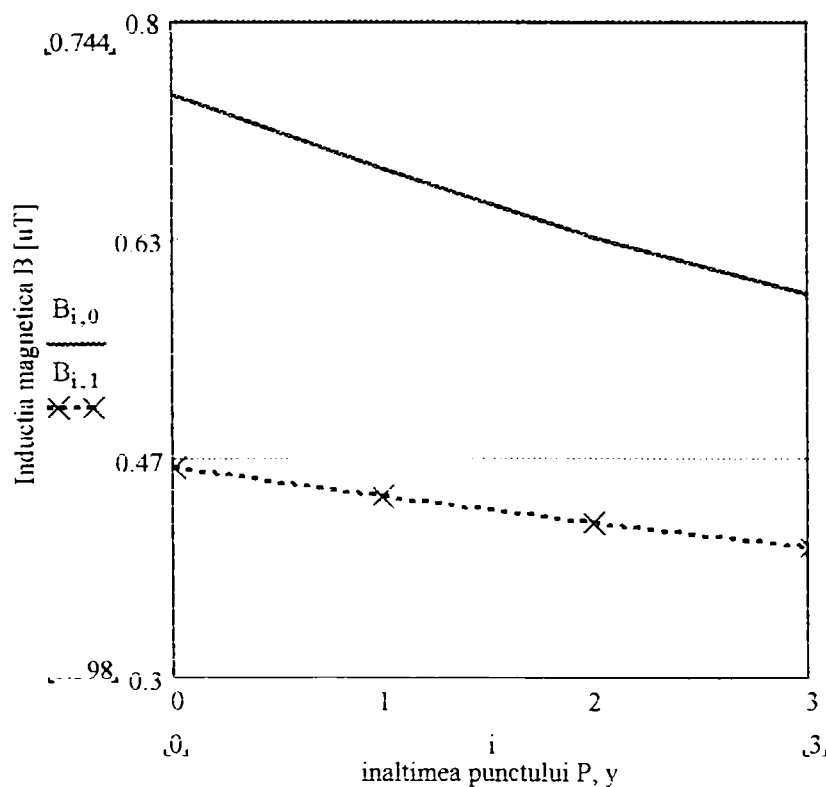


Figura 3.1.37.; Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P ; y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 10m)

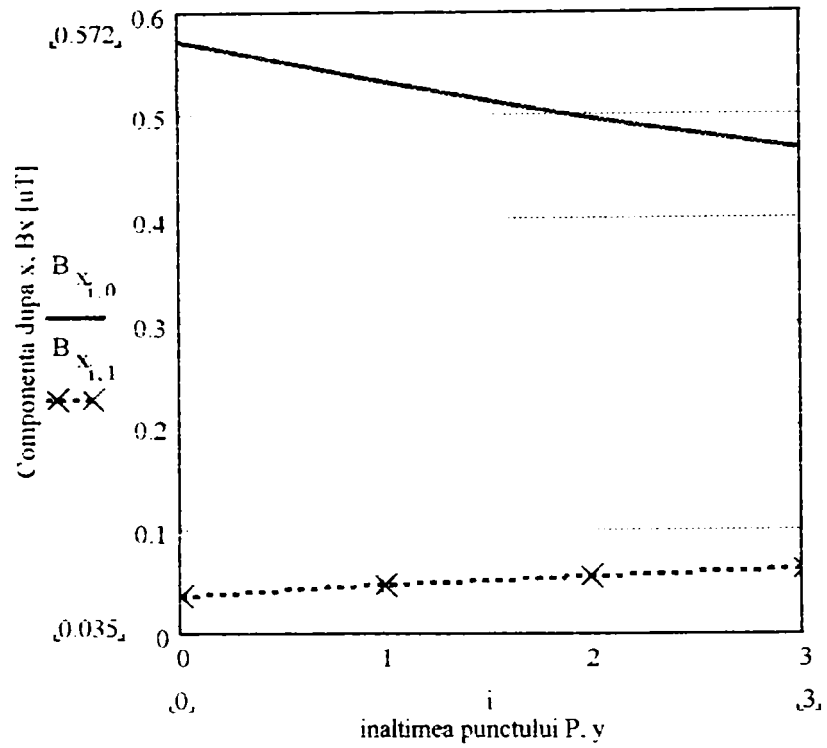


Figura 3.1.38.; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P: y (2: 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10m)

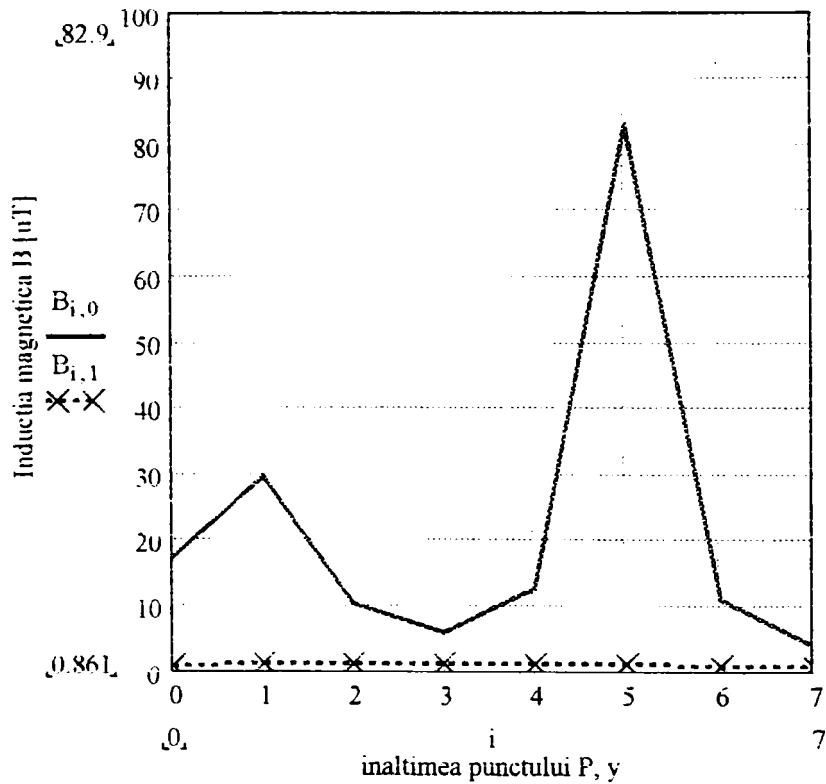


Figura 3.1.39.; Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P: y (21:19.25; 17.5; 15.75; 14; 12.25; 10.5; 8.75m) și x (0; 10m)

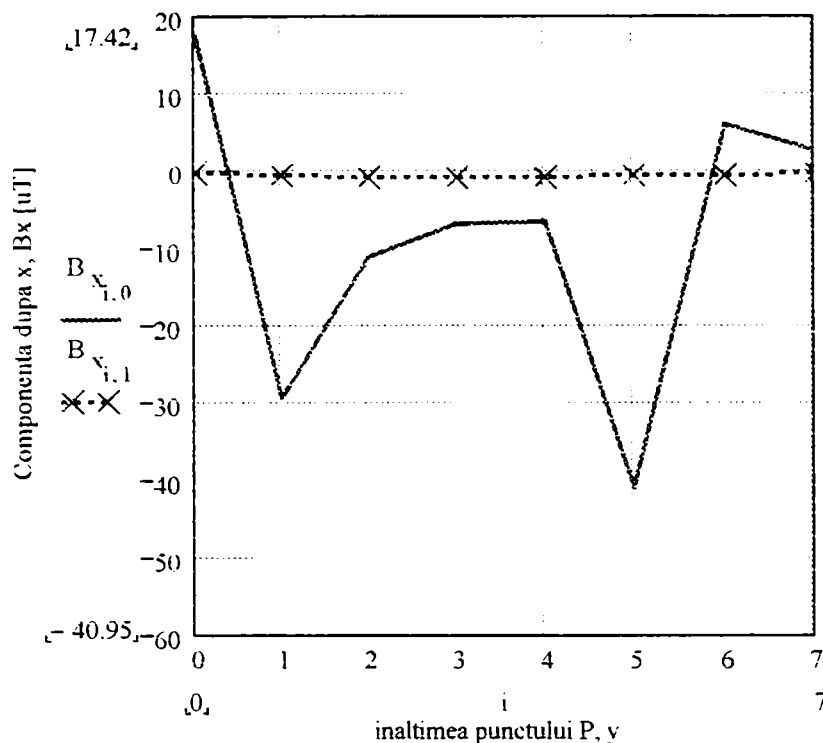


Figura 3.1.40.; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P; y (21;19,25;17,5;15,75;14;12,25;10,5;8,75m) și x (0; 10m)

Tabelul 3.1.43 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 220 kV, simplu circuit

[m]	B[μT]		
	0	10	20
$Y_p \setminus x_p$			
21	15.29	3.107	1.004
19,25	10.01	3.151	1.015
17,5	10.92	3.147	1.014
15,75	15.99	3.096	1.002
14	24.88	2.985	0.9794
12,25	164.2	2.804	0.9473
10,5	23.1	2.559	0.907
8,75	9.221	2.274	0.8605

Valorile inducției magnetice B [μT] și ale componentei sale B_x [μT] în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, simplu circuit, de 400 kV, cu configurația coronamentului în triunghi pe stâlpi tip Sn 400.272 și $I_0 = 200$ A , sunt prezentate în tabelele 3.1.45; 3.1.46; 3.1.47 ; 3.1.48 și graficele din figurile 3.1.45; 3.1.46; 3.1.47 ; 3.1.48.

Tabelul 3.1.44 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 220 kV, simplu circuit

[m]	$B_x[\mu T]$		
	0	10	20
$Y_p \backslash x_p$			
21	-15.5	-2.659	-0.8523
19,25	-11.28	-2.767	-0.8798
17,5	-6.97	-2.647	-0.8755
15,75	-6.337	-2.34	-0.8406
14	-10.56	-1.9	-0.7797
12,25	-80.54	-1.392	-0.699
10,5	12.77	-0.8894	-0.606
8,75	5.566	-0.459	-0.508

Cea mai mare valoare a inducției magnetice, $B = 37,32 \mu T$, se obține, din calculele efectuate în **Mathcad Professional**, în vecinătatea conductorului fazei 1.

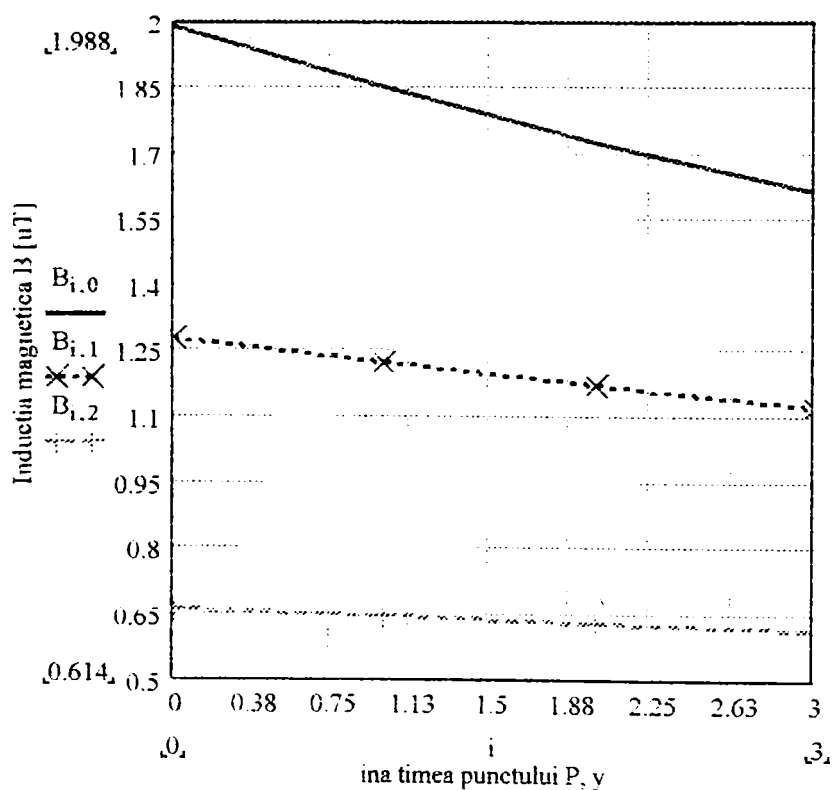


Figura 3.1.41.: Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P : y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 10; 20m)

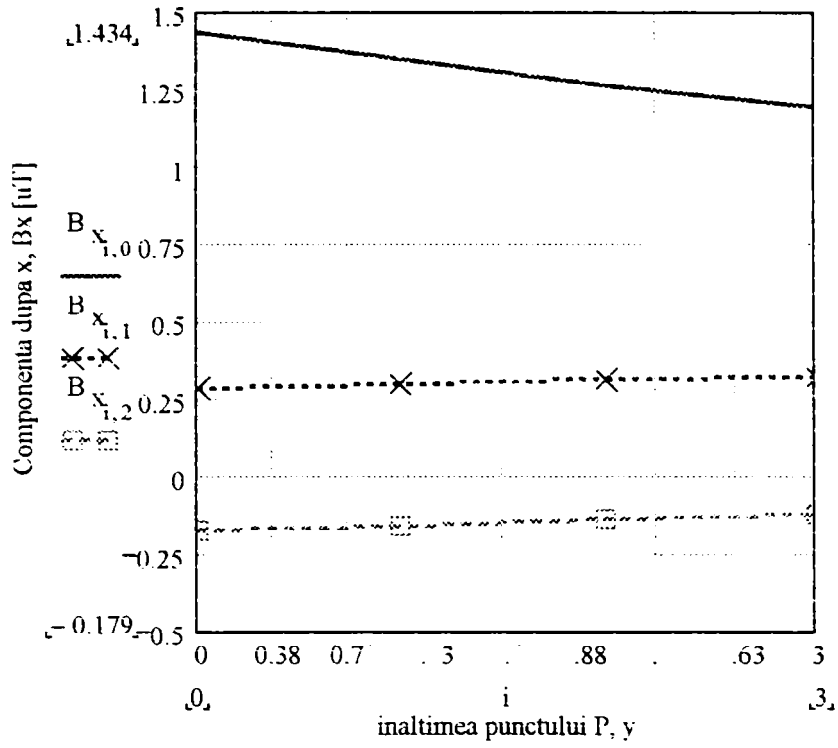


Figura 3.1.42.; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P: y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10; 20m)

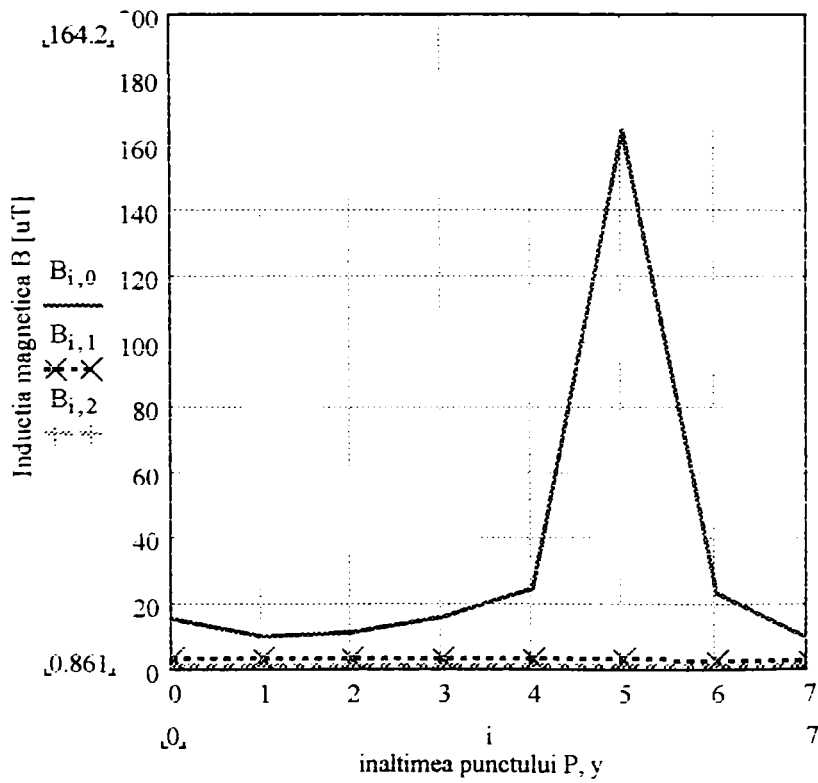


Figura 3.1.43.; Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P: y (21; 19,25; 17,5; 15,75; 14; 12,25; 10,5; 8,75m) și x (0; 10; 20m)

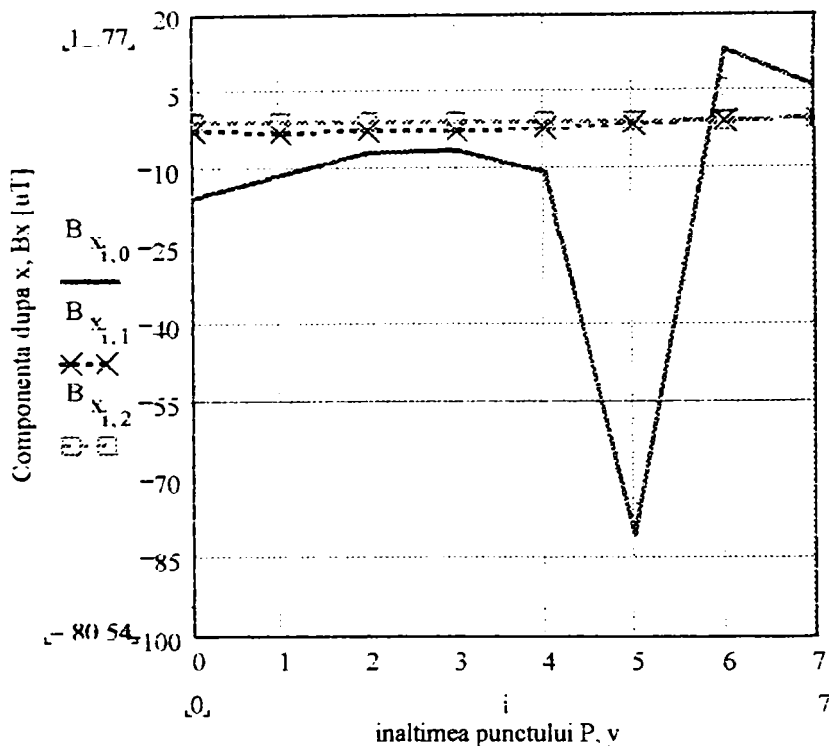


Figura 3.1.44.; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P; y (21;19,25;17,5;15,75;14;12,25;10,5;8,75m) și x (0;10;20m)

Tabelul 3.1.45 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 400 kV, simplu circuit

[m]	B[μT]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
2	4.56	2.089	0.9562
1.5	4.103	2.006	0.9377
1	3.717	1.925	0.9192
0,5	3.387	1.847	0.9006

Tabelul 3.1.46 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 400 kV, simplu circuit

[m]	B_x [μT]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
2	2.968	0.1764	-0.3426
1,5	2.707	0.2277	-0.3141
1	2.484	0.272	-0.2866
0.5	2.291	0.3098	-0.2602

Tabelul 3.1.47 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 400 kV, simplu circuit

[m]	B[μ T]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
27	37.32	2.973	1.138
22	13.76	3.392	1.257
17	6.827	3.389	1.297
12	13.89	3.349	1.252
7	37.13	2.931	1.13

Tabelul 3.1.48 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 400 kV, simplu circuit

[m]	B_x [μ T]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
27	37.31	-1.118	-0.7105
22	-13.77	-2.827	-1.043
17	-7.572	-3.06	-1.149
12	-5.362	-2.184	-0.9888
7	19.72	-0.7935	-0.6692

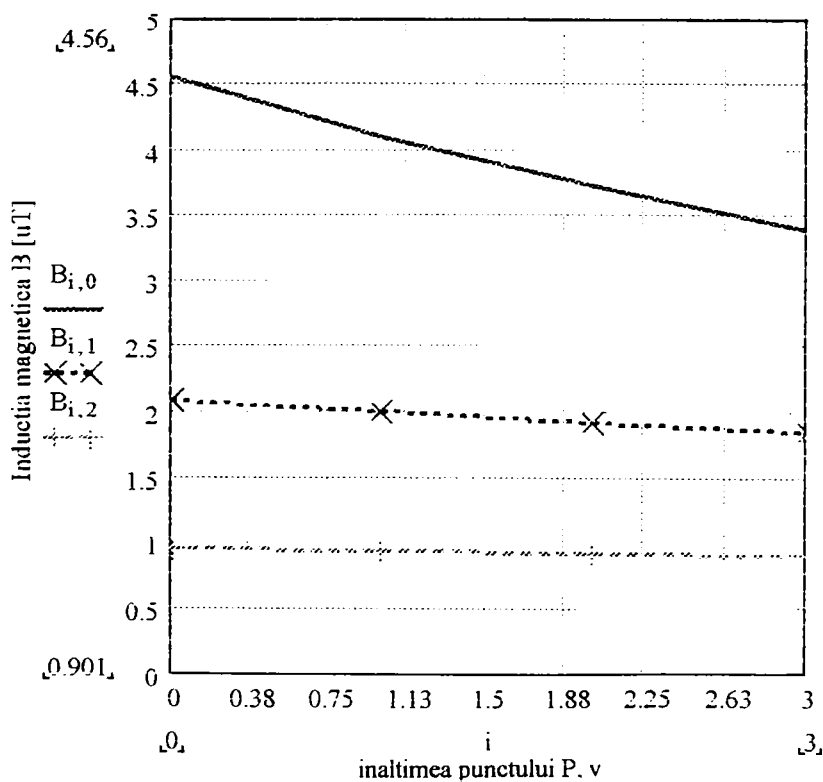


Figura 3.1.45.; Variația inducției magnetice B [μ T] în funcție de poziția punctului P ; y (2; 1,5; 1; 0,5 m) și x (0; 10; 20m)

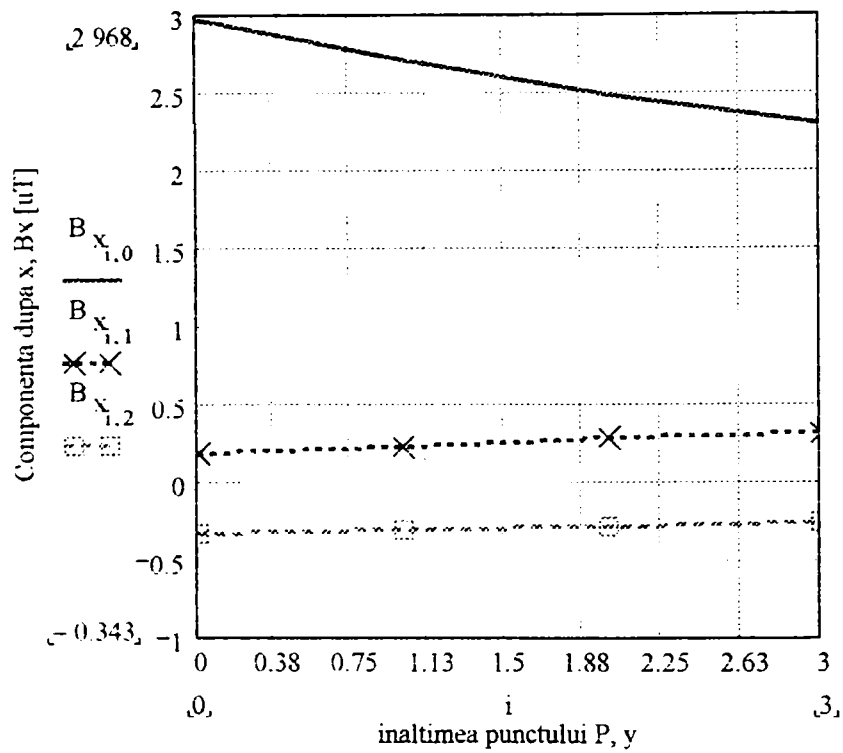


Figura 3.1.46.; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P; y (2; 1,5; 1; 0,5 m) și x (0; 10; 20m)

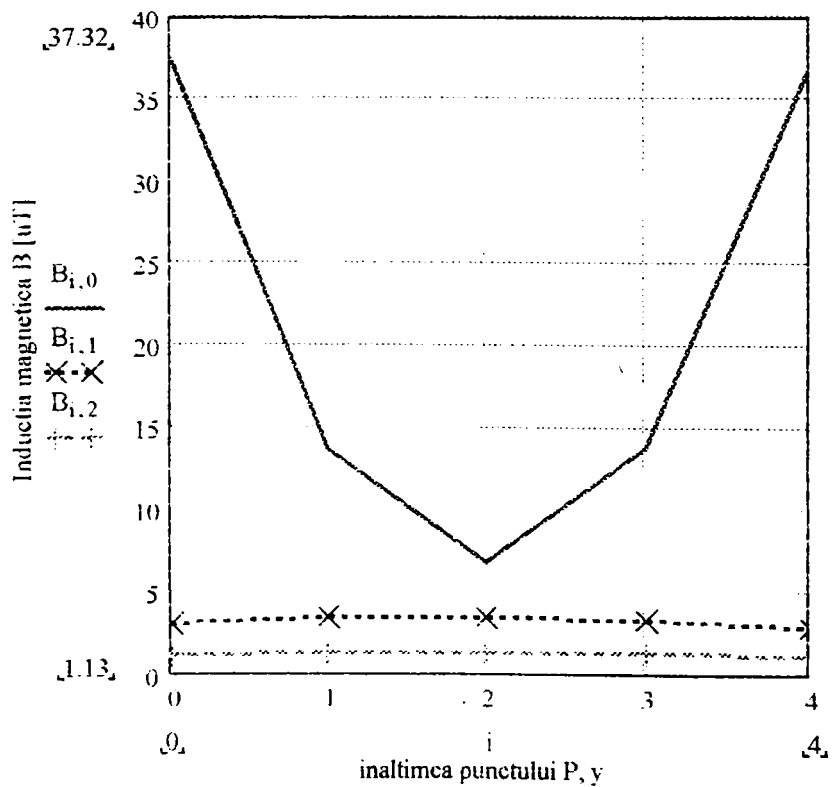


Figura 3.1.47.; Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P; y (27;22;17;12;7 m) și x (0;10;20m)

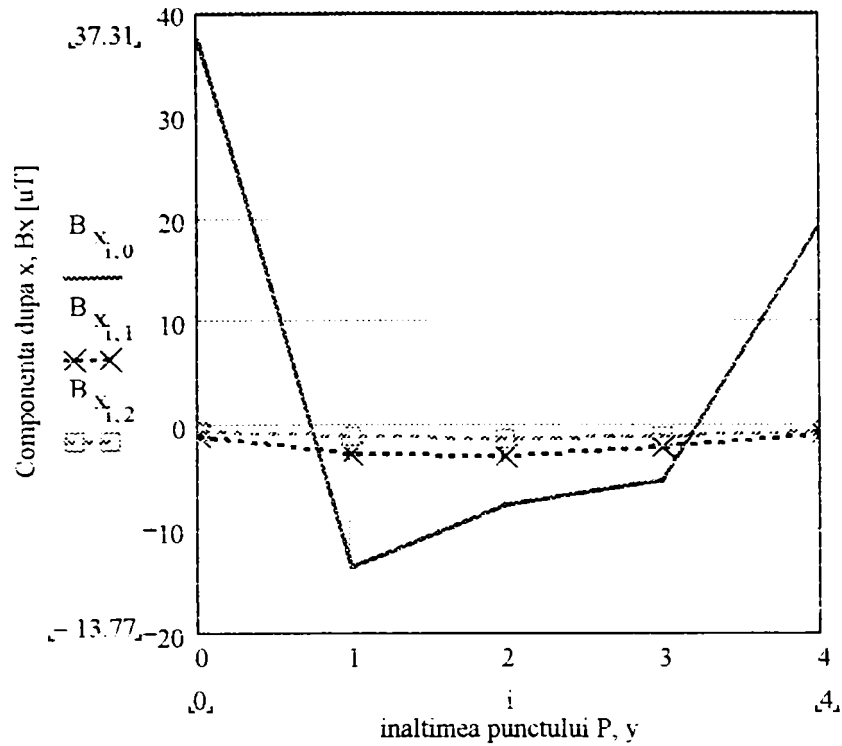


Figura 3.1.48.; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P; y (27; 22; 17; 12; 7m) și x (0; 10; 20m)

3.1.5.2. Linii electrice aeriene dublu circuit

Valorile inducției magnetice B [μT] și ale componentei sale B_x [μT] în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, dublu circuit, de 110 kV, cu configurația coronamentului în hexagon pe stâlpi tip Sn 110.252 și $I_0 = 100 A$, sunt prezentate în tabelele 3.1.49; 3.1.50; 3.1.51 ; 3.1.52 și graficele din figurile 3.1.49; 3.1.50; 3.1.51 ; 3.1.52

Tabelul 3.1.49 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 110 kV, dublu circuit

[m]	B[μT]		
	0	10	20
$y_p \backslash x_p$			
2	1.323	0.939	0.468
1,5	1.241	0.894	0.457
1	1.166	0.852	0.446
0.5	1.097	0.813	0.435

Tabelul 3.1.50 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 110 kV, dublu circuit

[m]	$B_x[\mu T]$		
$Y_p \backslash X_p$	0	10	20
2	1.323	0.342	0.163
1.5	1.241	0.35	0.145
1	1.166	0.36	0.128
0,5	1.097	0.36	0.112

Tabelul 3.1.51 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 110 kV, dublu circuit

[m]	$B[\mu T]$		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
21	1.116	2.335	0.659
19	8.826	2.59	0.685
17	11.12	2.669	0.698
15	11.12	2.669	0.698
13	8.826	2.59	0.685
11	1.116	2.335	0.659
9	2.811	1.961	0.624
7	2.596	1.589	0.582

Valorile maxime ale inducției magnetice sunt realizate în punctele din vecinătatea conductorului de fază 2, $B = 11,12 \mu T$

Tabelul 3.1.52 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 110 kV, dublu circuit

[m]	$B_x[\mu T]$		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
21	1.116	1.556	0.59
19	8.826	2.388	0.664
17	11.12	2.845	0.705
15	11.12	2.845	0.705
13	8.826	2.388	0.664
11	1.116	1.556	0.59
9	2.811	0.75	0.494
7	2.596	0.264	0.391

Valorile inducției magnetice $B [\mu T]$ și ale componentei sale $B_x[\mu T]$ în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, dublu circuit, de 220 kV,

cu configurația coronamentului în hexagon, pe stâlpi tip Sn 220.202 și $I_0 = 200 \text{ A}$, calculate în Mathcad 2001 Professional, sunt prezentate în tabelele 3.1.53; 3.1.54; 3.1.55 ; 3.1.56 și grafic în figurile 3.1.53; 3.1.54; 3.1.55 ; 3.1.56.

Tabelul 3.1.53 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 220 kV, dublu circuit

[m]	B[μT]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
2	2.807	2.479	1.361
1.5	2.688	2.357	1.327
1	2.573	2.246	1.293
0,5	2.462	2.142	1.26

Tabelul 3.1.54 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 220 kV, dublu circuit

[m]	B_x [μT]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
2	2.807	1.345	0.371
1,5	2.688	1.32	0.329
1	2.573	1.295	0.293
0,5	2.462	1.268	0.26

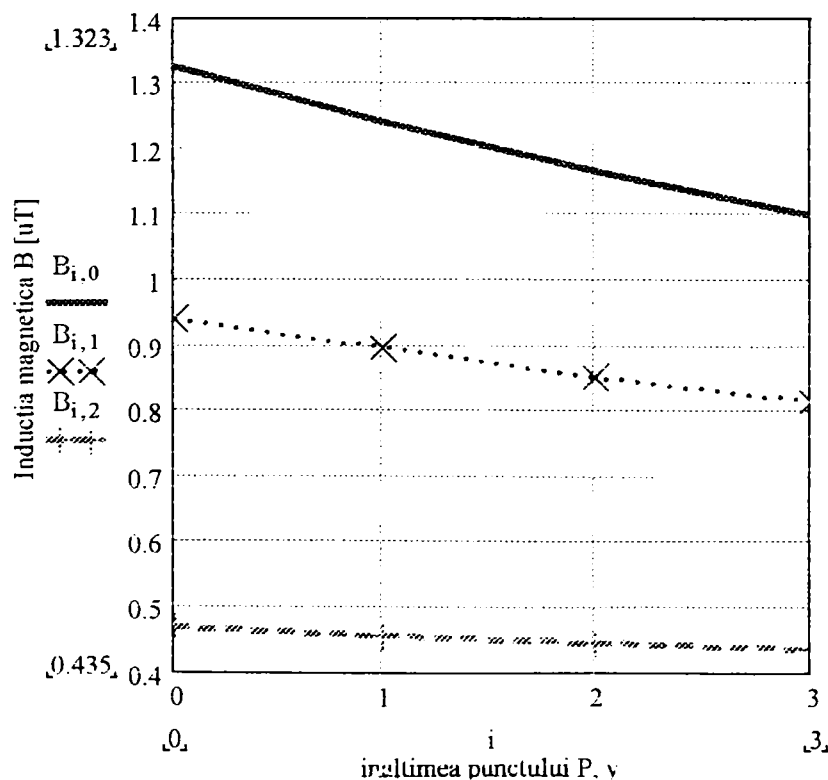


Figura 3.1.49.; Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P ; y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 10; 20m)

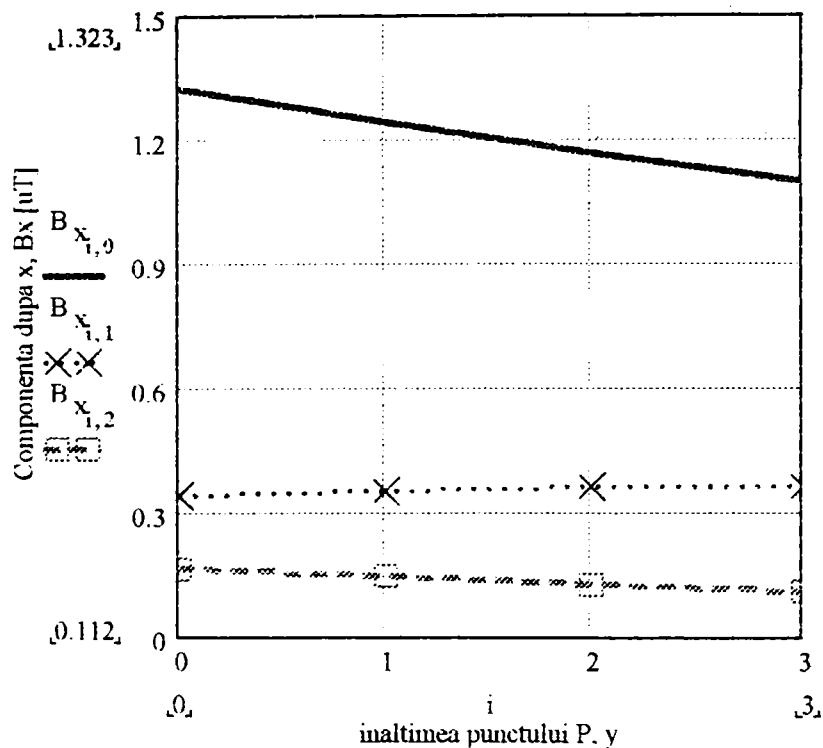


Figura 3.1.50; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P; y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 10; 20m)

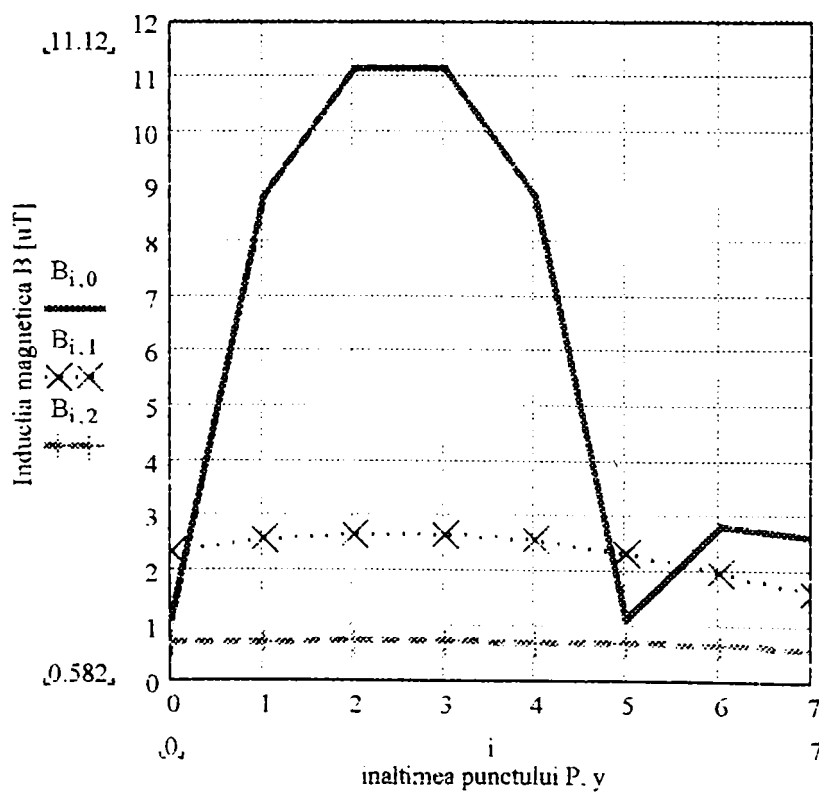


Figura 3.1.51.; Variațiile inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P;y (21;19;17;15; 13;11;9;7m) și x (0;10;20m)

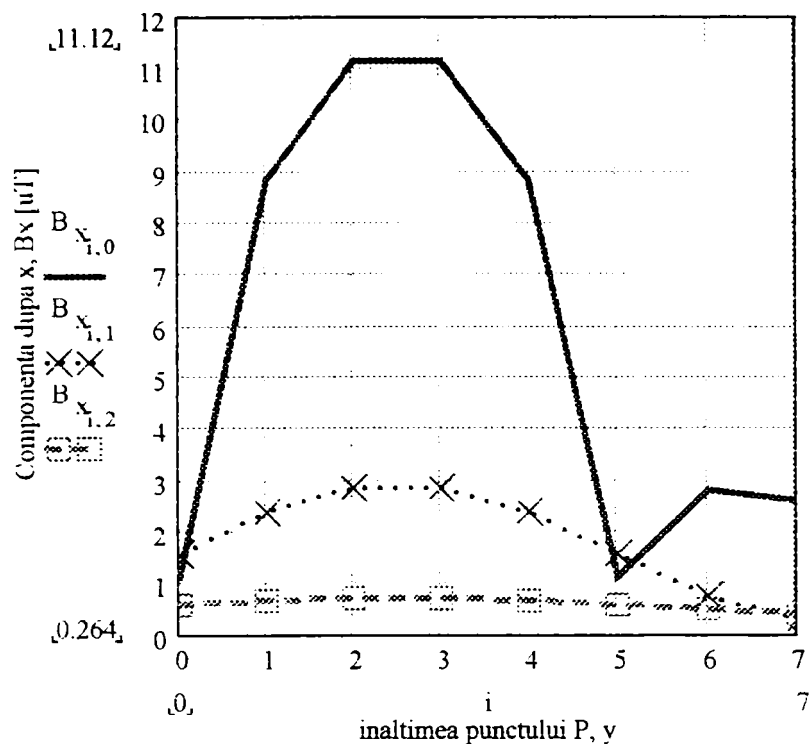


Figura 3.1.52.; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P: y (21;19;17;15;13;11;9;7m) și x (0;10;20m)

Tabelul 3.1.55 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 220 kV, dublu circuit

[m]	B[μT]		
	0	10	20
$y_p \backslash x_p$			
27	1.711	6.716	1.909
25,5	3.14	7.958	1.98
24	8.982	9.072	2.032
22,5	12.8	10.11	2.064
21	14.07	11.51	2.079
19,5	14.07	13.8	2.085
18	13.83	14.64	2.088
16,5	13.52	12.55	2.088
15	12.49	10.98	2.08
13,5	9.759	9.949	2.056

Valorile inducției magnetice B [μT] și ale componentei sale B_x [μT] în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, dublu circuit, de 400 kV, cu configurația coronamentului în hexagon pe stâlpi tip Sn 400.272 și $I_0 = 200$ A, calculate în **Mathcad 2001 Professional**, sunt prezentate în

tabelele 3.1.57; 3.1.58; 3.1.59 ; 3.1.60 și grafic în figurile 3.1.57; 3.1.58; 3.1.59 ; 3.1.60.

Tabelul 3.1.56 Valorile inducției magnetice B_c pentru LEA 220 kV. dublu circuit

[m]	$B_c[\mu T]$		
y_p/x_p	0	10	20
27	1.711	2.276	1.546
25.5	3.14	4.607	1.784
24	8.982	7.496	1.99
22.5	12.8	10.25	2.152
21	14.07	12.43	2.26
19.5	14.07	11.37	2.317
18	13.83	9.545	2.325
16.5	13.52	13.07	2.285
15	12.49	11.48	2.191
13.5	9.759	8.765	2.041

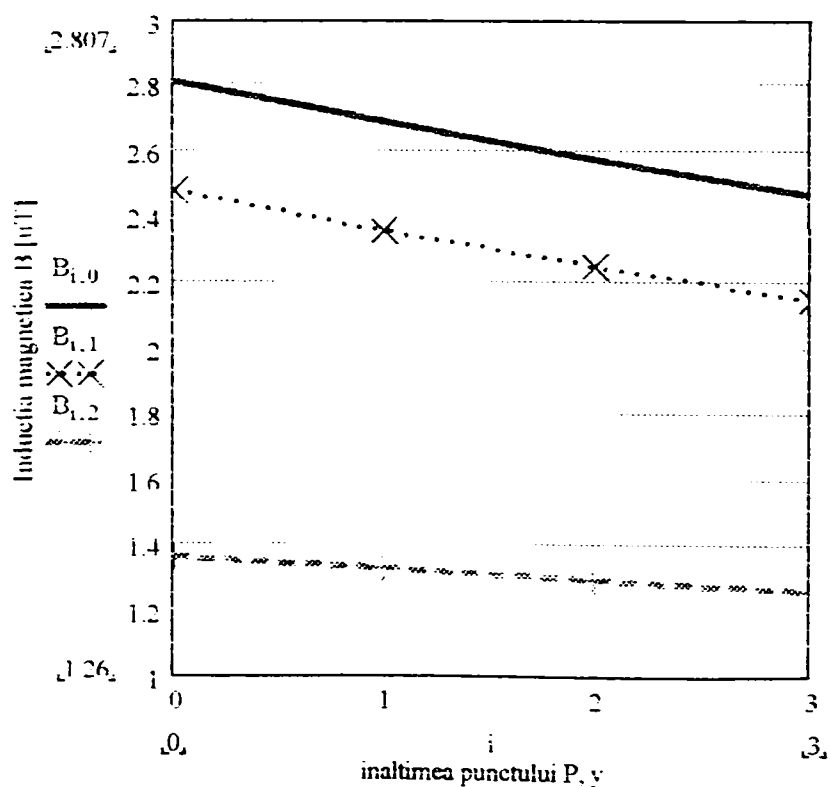


Figura 3.1.53: Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P ; y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 10; 20m)

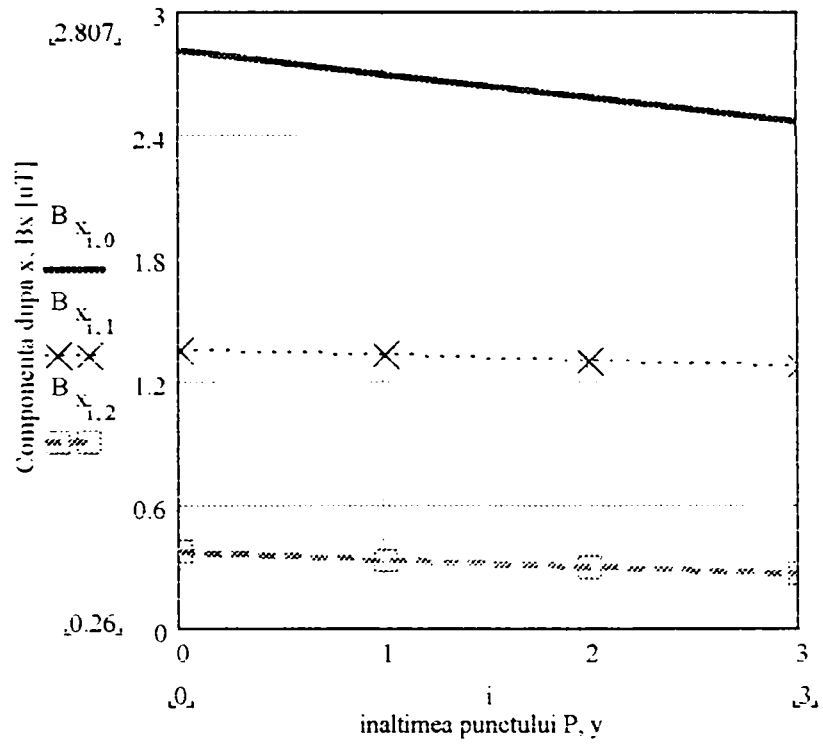


Figura 3.1.54; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P: y (2: 1.5: 1; 0.5m) și x (0: 10: 20m)

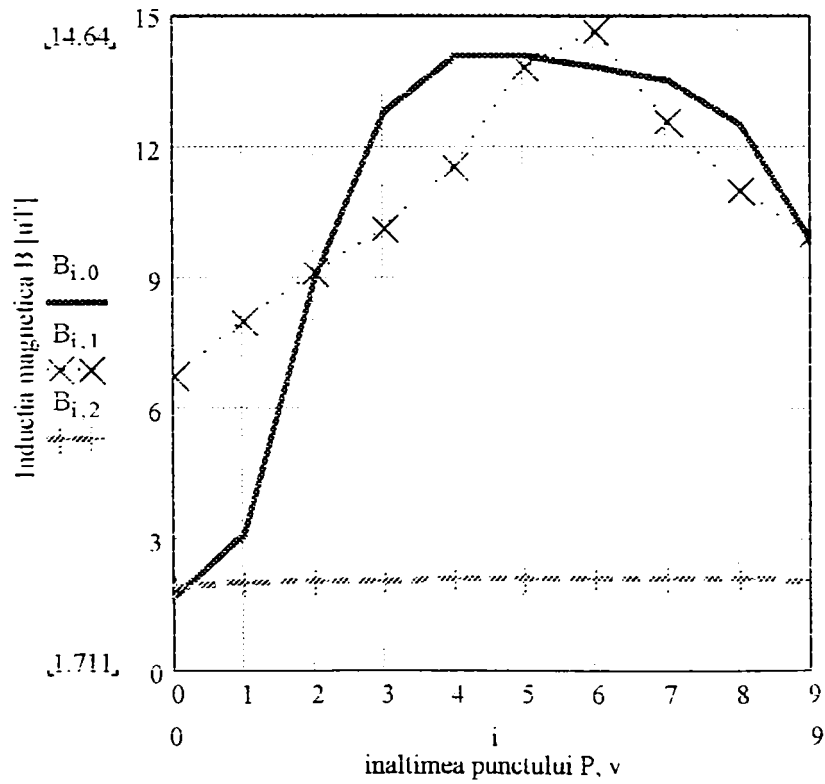


Figura 3.1.55; Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P: y (27; 25.5; 24; 22.5; 21; 19.5; 18; 16.5; 15; 13.5m) și x (0: 10: 20m)

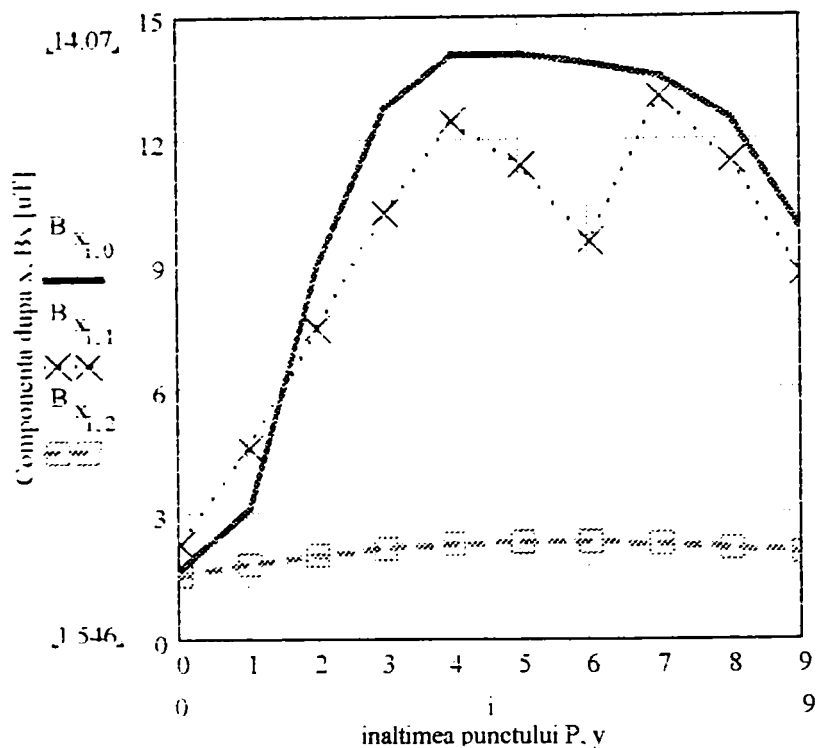


Figura 3.1.56; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P: $y(27;25,5;24;22,5;21;19,5;18;16,5;15;13,5m)$ și $x(0;10;20m)$

Tabelul 3.1.57 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 400 kV, dublu circuit

[m]	B[μT]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
2	4.56	2.089	0.956
1.5	4.103	2.006	0.938
1	3.717	1.925	0.919
0.5	3.387	1.847	0.9

Tabelul 3.1.58 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 400 kV, dublu circuit

[m]	B_x [μT]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
2	2.968	0.176	-0.343
1.5	2.707	0.228	-0.314
1	2.484	0.272	-0.287
0.5	2.291	0.31	-0.26

Tabelul 3.1.59 Valorile inducției magnetice B pentru LEA 400 kV, dublu circuit

[m]	B[μ T]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
27	37.32	2.973	1.138
22	13.76	3.392	1.257
17	6.827	3.389	1.297
12	13.89	3.349	1.252
7	37.13	2.931	1.13

Tabelul 3.1.60 Valorile inducției magnetice B_x pentru LEA 4000 kV, dublu circuit

[m]	B_x [μ T]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
27	37.31	-1.118	-0.71
22	-13.77	-2.827	-1.043
17	-7.572	-3.06	-1.149
12	-5.362	-2.184	-0.989
7	19.72	-0.794	-0.669

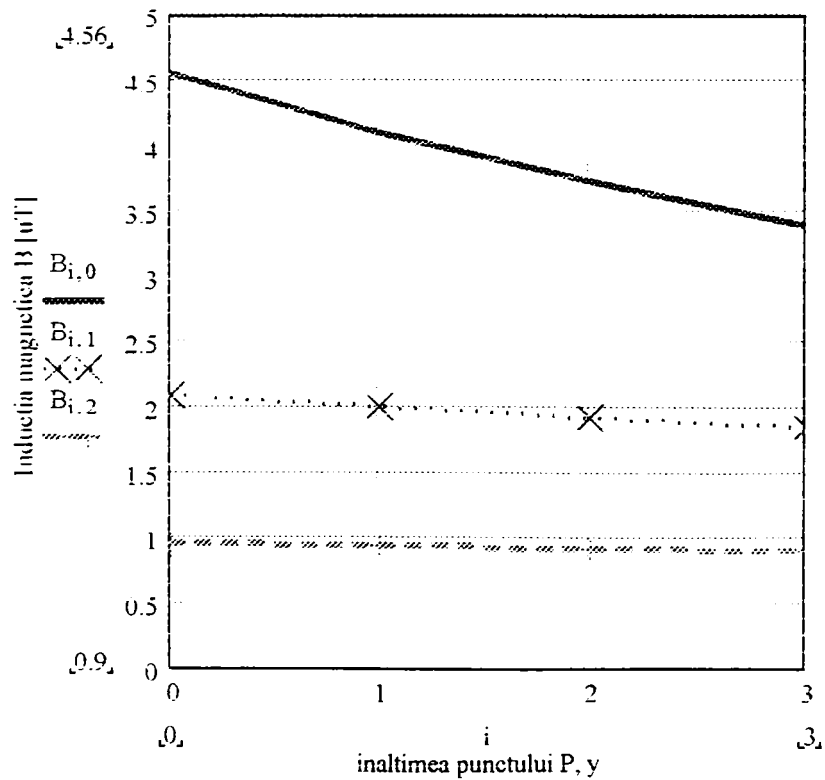


Figura 3.1.57; Variația inducției magnetice B [μ T] în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0,5m) și x (0; 10; 20m)

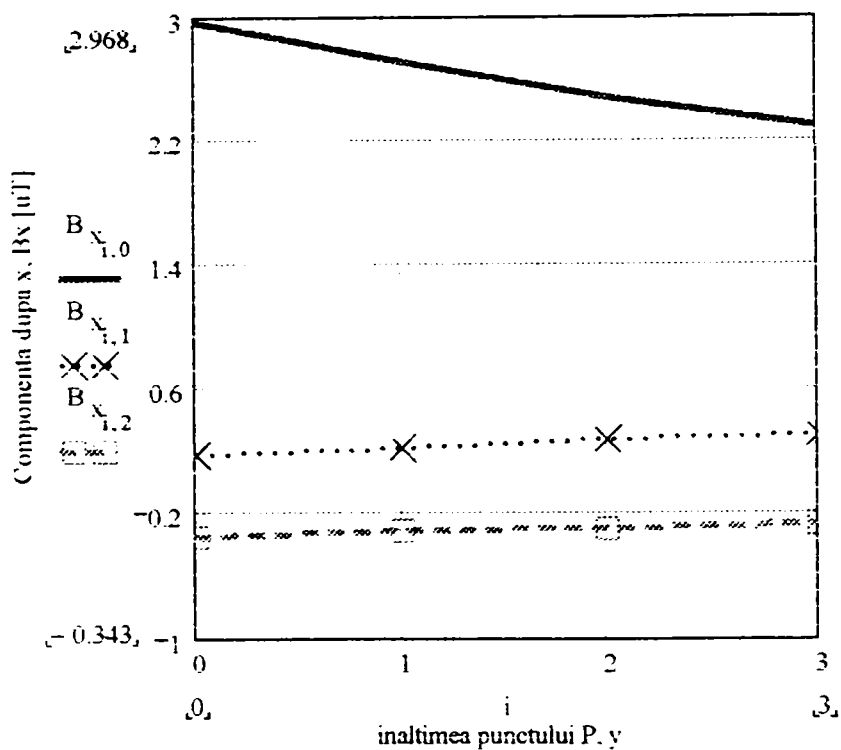


Figura 3.1.58; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P: y (2; 1.5; 1; 0,5m) și x (0; 10; 20m)

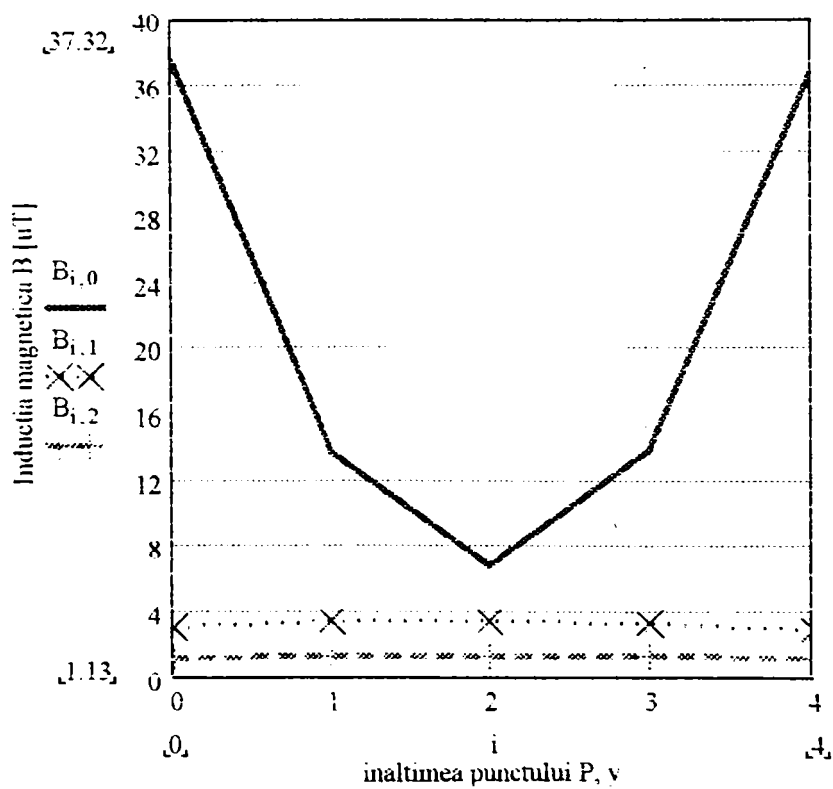


Figura 3.1.59; Variația inducției magnetice B [μT] în funcție de poziția punctului P: y (27; 22; 17; 12; 7m) și x (0; 10; 20m)

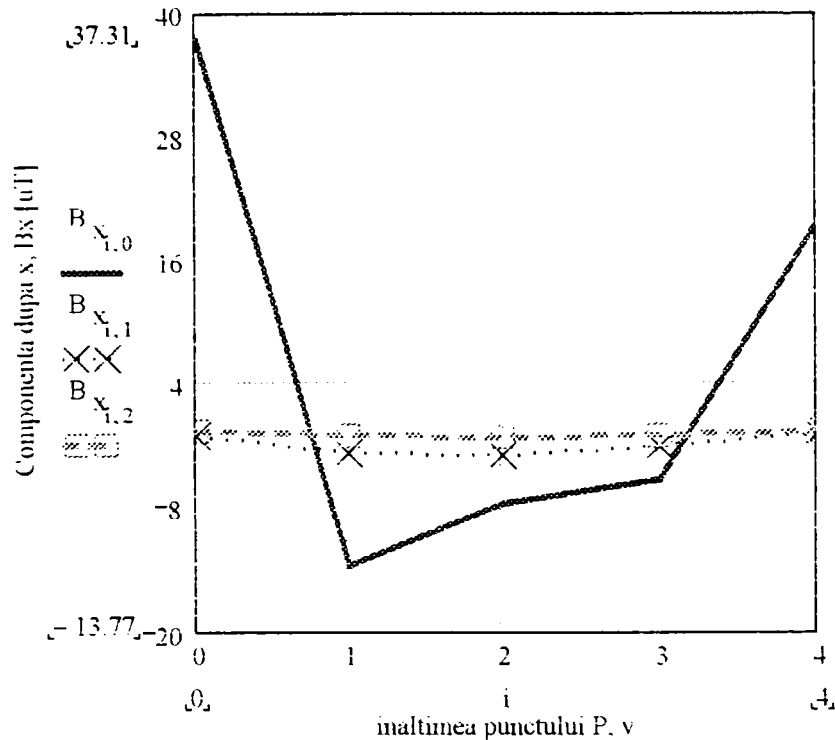


Figura 3.1.60; Variația componentei B_x [μT] în funcție de poziția punctului P: y (27; 22; 17; 12; 7m) și x (0; 10; 20m)

Valorile maxime ale inducției magnetice sunt calculate pentru linia electrică de 220 kV, în punctele situate în axa de simetrie a stâlpului, în domeniul de influență a conductorului de fază 2, $B = 14,07 \mu T$, iar pentru linia electrică de 400 kV în domeniul de influență a conductorului de fază 1, $B = 37,32 \mu T$.

Așa după cum se poate observa din cele anterior prezentate valorile inducției magnetice sunt determinate atât de configurația geometrică a circuitului electric trifazat, cât și de valoarea intensității curentului electric prin fazele circuitului.

Cunoașterea acestor valori, în cazul liniile electrice care au o funcționare în regim permanent, permite folosirea lor ca și termeni de comparație cu valorile inducției magnetice rezultate în urma funcționării acestora în regim de avarie

3.2. Influența electrostatică a liniilor electrice

3.2.1. Regimul de funcționare al circuitului inductor este unul permanent

Pentru linia electrică aeriană, dublu circuit, figura 3.2.1, se consideră unul din circuite (r,s,t) scos de sub tensiune, devenind astfel pasiv și cuplat capacitiv cu circuitul activ învecinat (R,S,T) care se află într-o stare de funcționare normală (la parametri nominali).

Calculul analitic al tensiunilor induse prin cuplaj capacitiv în fazele (r,s,t) se face prin calculul circulației curenților capacitivi [10]:

$$\omega \cdot C_{Rr} \cdot (U_f - U_r) + \omega \cdot C_{Sr} \cdot \left(-\frac{U_f}{2} - U_r \right) + \omega \cdot C_{Tr} \cdot \left(-\frac{U_f}{2} - U_r \right) = \omega \cdot C_{or} \cdot U_r$$

adică,

$$U_r = U_f \cdot \frac{C_{Rr} - \frac{C_{Sr} + C_{Tr}}{2}}{C_{Rr} + C_{Sr} + C_{Tr} + C_{or}}$$

unde U_f este tensiunea de fază.

Cu :

$$C_{nk} = \sum_{i=1}^3 C_{ik} + C_{ok}$$

și

$$C_{er} = C_{Rr} - \frac{C_{Sr} + C_{Tr}}{2}$$

$$C_{es} = C_{Ss} - \frac{C_{Rs} + C_{Ts}}{2}$$

$$C_{et} = C_{Tt} - \frac{C_{St} + C_{Rt}}{2}$$

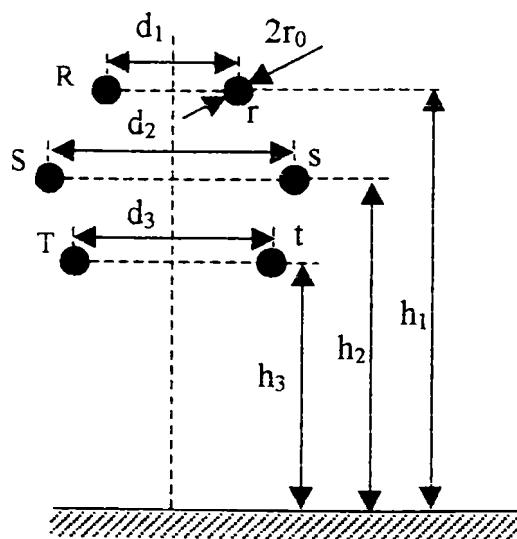


Figura 3.2.1. Coronament linie dublu circuit

tensiunile induse prin cuplaj capacitiv în fazele (r,s,t) sunt:

$$U_k = U_f \cdot \frac{C_{ek}}{C_{nk}} \tag{3.2.1}$$

Capacitățile mutuale se calculează cu relația (3.1.4):

$$C_{ik} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln \frac{D_{ik}}{r_0}}$$

iar capacitățile proprii ale fiecărei faze cu relația (3.1.3):

$$C_{ok} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln \frac{2 \cdot h_k}{r_0}}$$

Indicele i, reprezintă în mod succesiv fazele circuitului activ R, S și T, iar k reprezintă succesiv fazele circuitului pasiv r, s și t. D_{ik} este distanța dintre fazele i și k, iar L este lungimea liniei.

Valorile numerice pentru tensiunile induse prin cuplaj capacitiv, de circuitul activ, cu sistemul simetric de tensiuni

$$\underline{U}_R = U_f; \quad \underline{U}_S = U_f e^{j\frac{2\pi}{3}}; \quad \underline{U}_T = U_f e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

în fazele r, s, t calculate cu relația (3.2.1), folosind pentru capacitățile proprii și mutuale valorile din tabelele 3.1.11 și 3.1.12, sunt date în tabelul 3.2.1..

Pentru sarcinile electrice liniar distribuite pe fazele liniei electrice se obțin cu relația (3.1.10) valorile din tabelul 3.2.2.

Tabelul 3.2.1 Valorile tensiunilor induse prin cuplaj capacitiv

[kV]	Ur	Us	Ut
110	4.522 10 ³	443.272	4.011 10 ³
220	1.091 10 ⁴	-2.349 10 ³	8.229 10 ³
400	2.104 10 ⁴	-4.151 10 ³	1.684 10 ⁴

Tabelul 3.2.2 Valorile sarcinilor electrice distribuite pe conductoarele de fază ale liniei electrice

q [nC/m]	R	S	T	r	s	T
110 kV	542+47.71I	-306.8-509.7i	-250.7+507.7i	-7.458+13.19i	-13.22+2.616i	46.99-17.13I
220 kV	1065+84.91I	-596.6-985.7i	-512.4+1009i	-8.83+20.68i	-64.63-1.153i	83.95-33.03I
400 kV	2492+257.8I	-1465-2397i	-1271+2580i	-46.38+58.88i	-171.3+8.974i	212.1-45.77I

Valorile potențialului electric V și ale intensității câmpului electric E , în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene dublu circuit de 110 kV, cu configurația coronamentului în hexagon pe stâlpi tip Sn 110.252 ($h_1=20\text{m}$; $h_2=16\text{m}$; $h_3=12\text{m}$ și $d_1=6,1\text{m}$; $d_2=7,65\text{m}$; $d_3=6,1\text{m}$), atunci când unul din circuite este scos de sub tensiune, deci devine un circuit pasiv și este cuplat capacitiv cu circuitul învecinat aflat în stare normală de funcționare (activ), sunt prezentate în tabelele 3.2.3 și 3.2.4, cu reprezentări grafice corespondente din figurile 3.2.2; 3.2.3; 3.2.4 și 3.2.5.

Tabelul 3.2.3 Valorile potențialului electric. LEA 110kV

[m]	V [kV]		
$y_0 \backslash x_0$	0	3.825	13.825
20	8.671	2.915	1.621
18	5.329	2.204	1.339
16	2.113	0.858	1.053
14	3.841	0.289	0.786
12	6.974	0.956	0.454
2	1.121	0.694	0.077
1.5	0.836	0.522	0.058
1	0.555	0.348	0.039
0.5	0.277	0.174	0.019

Tabelul 3.2.4 Valorile intensității câmpului electric. LEA110 kV

[m]	E [kV/m]		
$y_0 \backslash x_0$	0	3.825	13.825
20	2.772	0.554	0.145
18	2.488	0.622	0.142
16	1.911	1.02	0.137
14	2.457	0.571	0.129
12	2.794	0.33	0.12
2	0.241	0.153	0.025
1.5	0.185	0.117	0.019
1	0.127	0.08	0.012
0.5	0.066	0.041	0.006

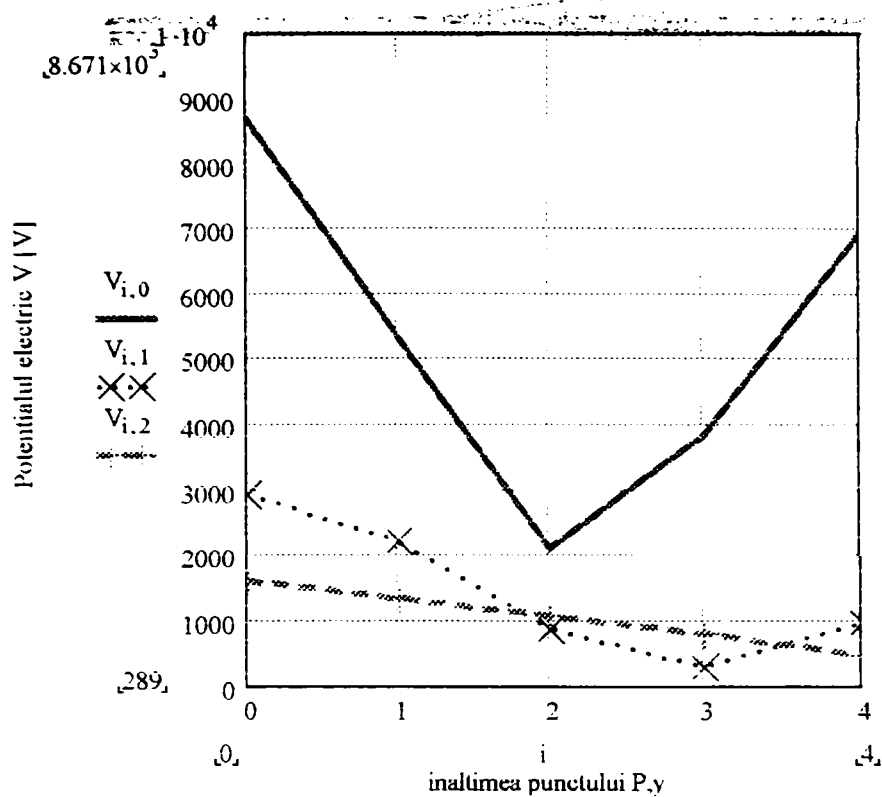


Figura 3.2.2.; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P: y (20; 18; 16; 14; 12 m) și x (0; 3,825; 13,825 m)

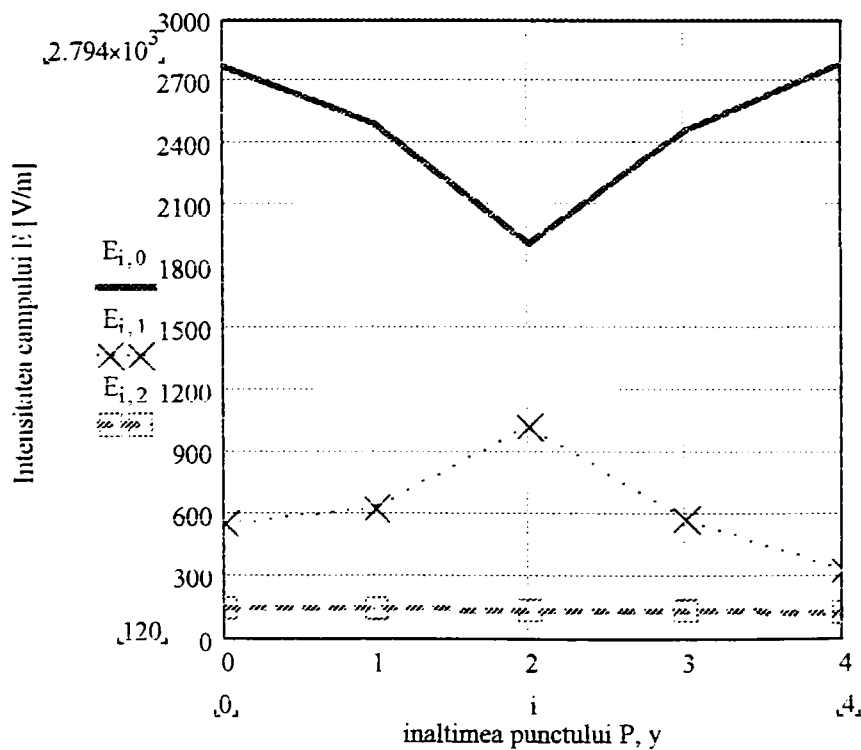


Figura 3.2.3; Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P: y (20; 18; 16; 14; 12 m) și x (0; 3,825; 13,825 m)

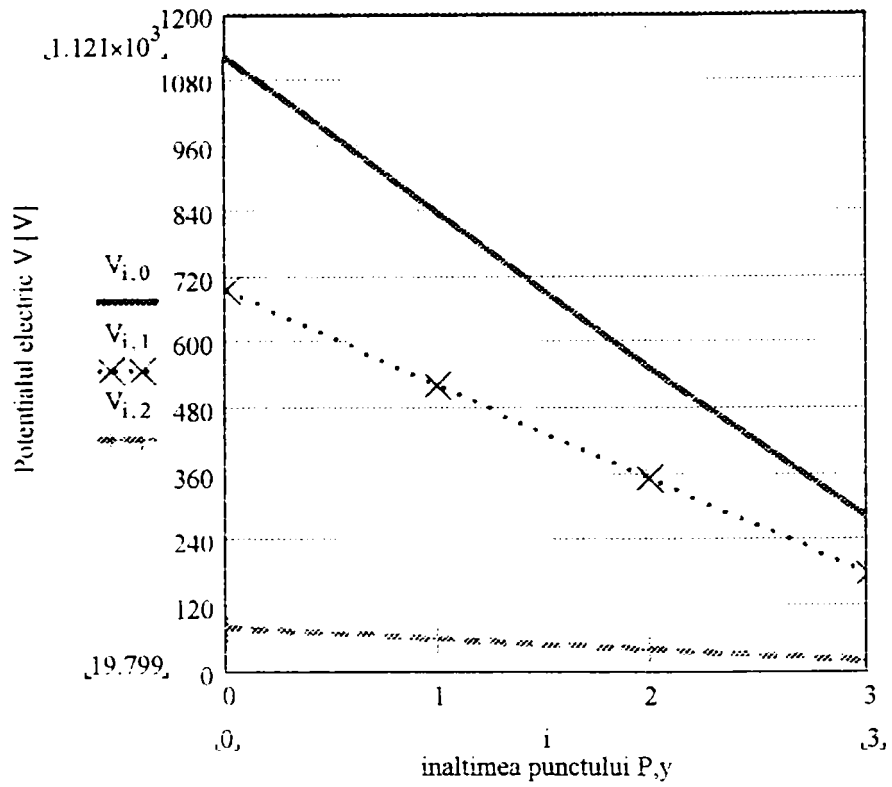


Figura 3.2.4; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 3,825; 13,825 m)

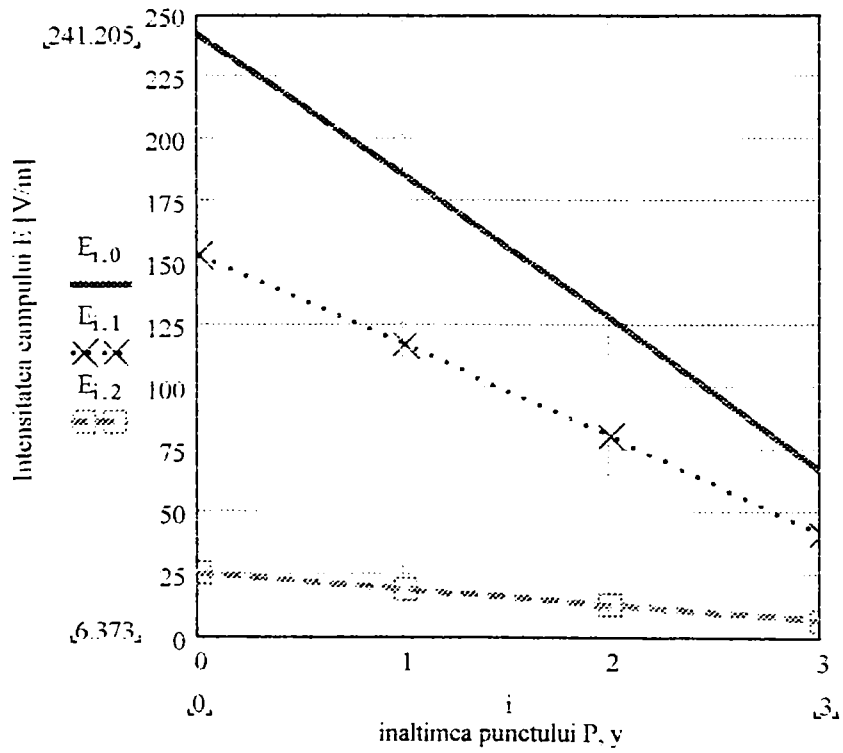


Figura 3.2.5 Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 3,825; 13,825 m)

Se observă că pentru linia electrică de 110 kV, cele mai mari valori ale potențialului electric față de potențialul pământului considerat ca referință de valoare zero și ale intensității câmpului electric, se obțin în punctele aflate pe axa de simetrie a stâlpului la înălțimea corespunzătoare conductorilor de fază 1 respectiv 3; $U = \{8,671 \text{ kV}; 6,974 \text{ kV}\}$ și $E = \{2,772 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}; 2,794 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}\}$.

Pentru linia electrică aeriană de 220 kV, dublu circuit, cu configurația coronamentului în hexagon pe stâlpi tip Sn 220. 202, ($h_1=25\text{m}$; $h_2= 18,5\text{m}$; $h_3=12\text{m}$ și $d_1=9\text{m}$; $d_2=16\text{m}$; $d_3=10\text{m}$), valorile potențialului electric V și ale intensității câmpului electric E , în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, atunci când unul din circuite este scos de sub tensiune, devenind astfel pasiv și este cuplat capacitiv cu circuitul învecinat (activ), aflat în stare normală de funcționare, sunt prezentate în tabelele 3.2.5 și 3.2.6, cu reprezentări grafice corespondente din figurile 3.2.6; 3.2.7; 3.2.8 și 3.2.9.

Tabelul 3.2.5 Valorile potențialului electric, LEA 220kV

[m]	V [kV]		
$x_p \setminus x_n$	0	8	18
25	42.05	32.61	14.37
20	19.04	34.57	11.32
15	7.315	13.71	7.263
10	19.04	14.67	3.419
2	3.943	2.676	0.492
1.5	2.95	2.002	0.368
1	1.963	1.333	0.245
0.5	0.98	0.665	0.122

Tabelul 3.2.6 Valorile intensității câmpului electric. LEA220 kV

[m]	E [kV/m]		
$y_p \backslash x_p$	0	8	18
25	2.073	6.135	0.797
20	5.638	15.09	0.553
15	4.898	8.24	0.617
10	1.48	4.252	0.523
2	0.734	0.588	0.117
1.5	0.574	0.453	0.088
1	0.4	0.312	0.059
0.5	0.21	0.161	0.03

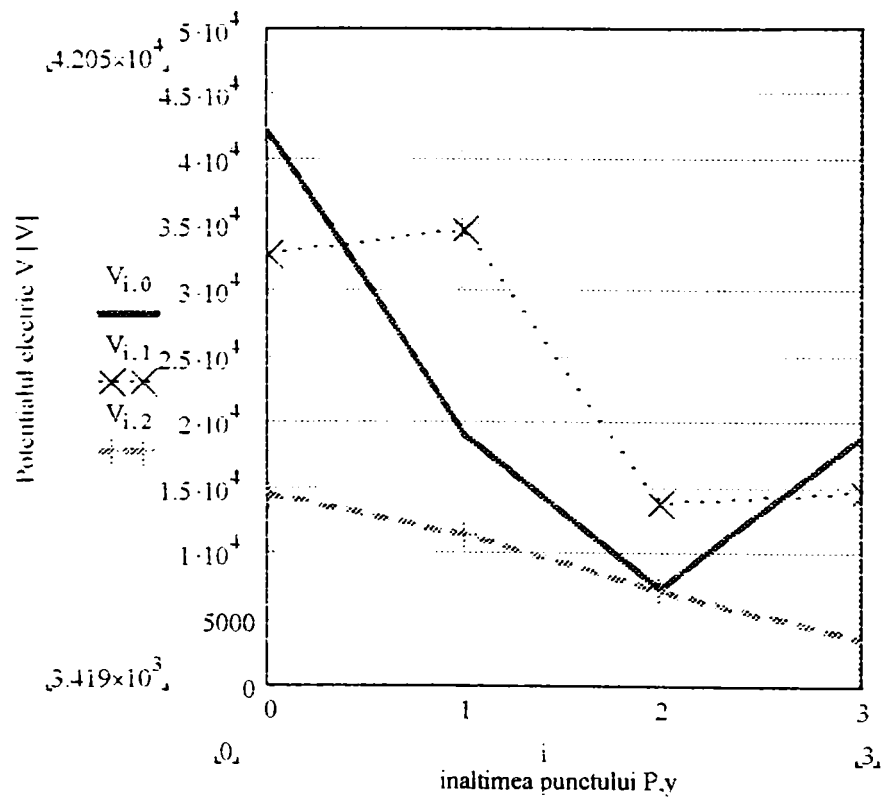


Figura 3.2.6; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P: y (25; 20; 15; 10m) și x (0; 8; 18 m)

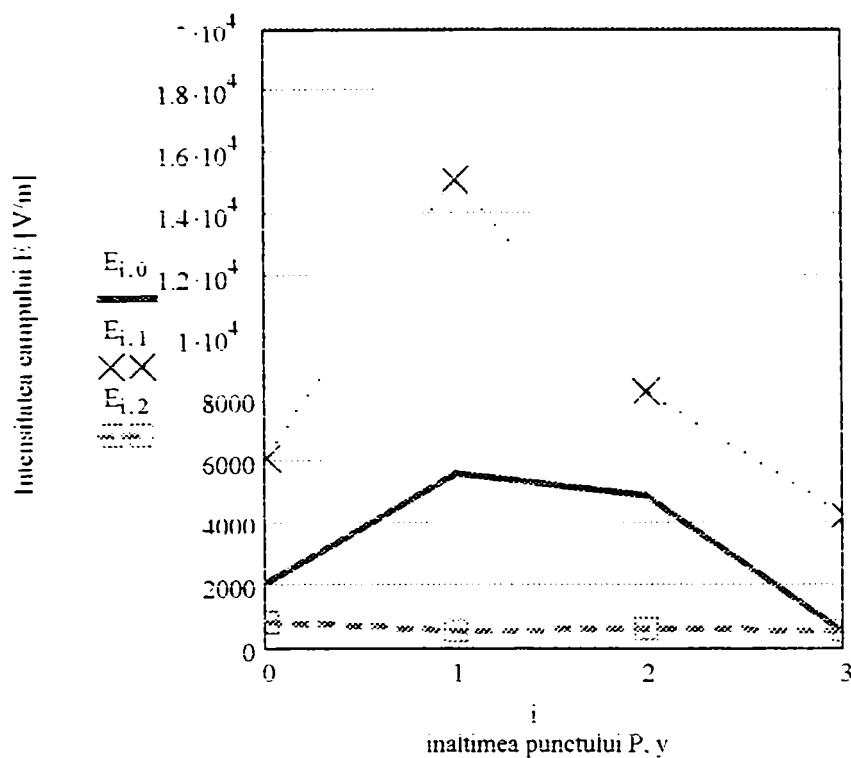


Figura 3.2.7 Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P : y (25; 20; 15; 10 m) și x (0; 8; 18 m)

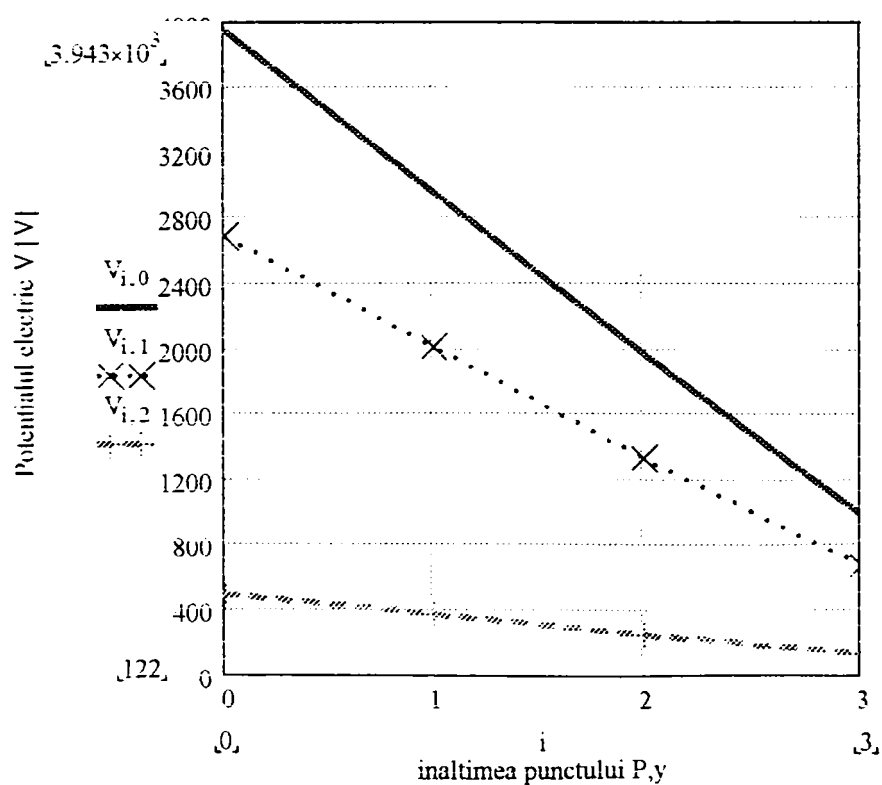


Figura 3.2.8; Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P : y (2; 1,5; 1; 0,5m) și x (0; 8; 18 m)

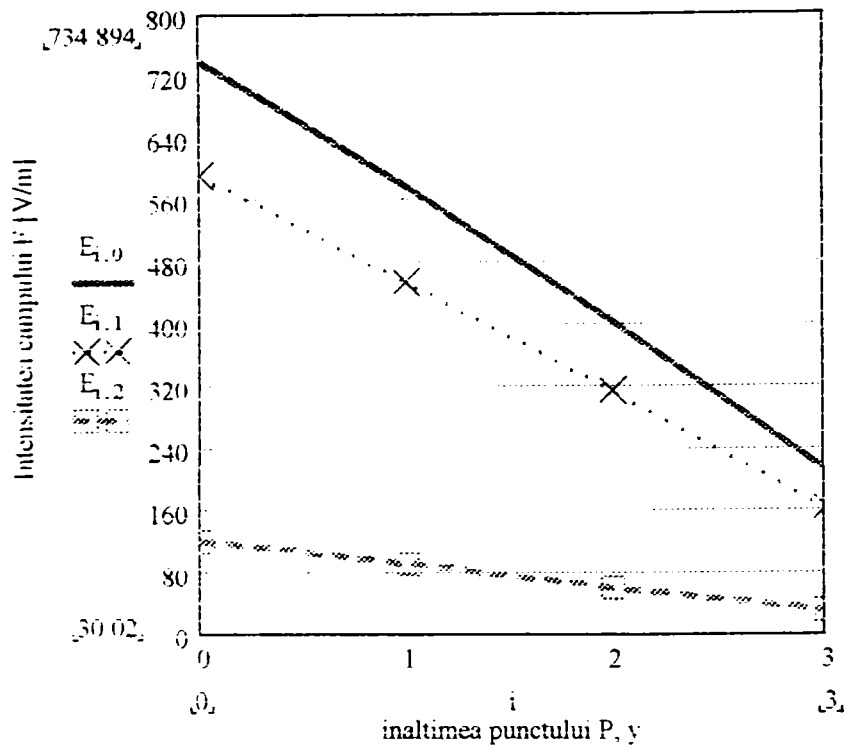


Figura 3.2.9 Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0,5m) și x (0; 8; 18 m)

Cele mai mari valori ale potențialului electric față de potențialul pământului sunt puse în evidență în axa de simetrie a stâlpului, la nivelul corespunzător conductorului de fază 1, $U = 42,05$ kV și în vecinătatea fazei 2, $U = \{13,71$ kV; $34,57$ kV $\}$.

Intensitatea câmpului electric are valorile cele mai mari, calculate, în vecinătatea conductorului de fază 2, $E = \{8,24$ kV.m $^{-1}$; $15,09$ kV.m $^{-1}$ $\}$.

Pentru linia electrică aeriană de 400 kV, dublu circuit, cu configurația coronamentului în hexagon pe stâlpi tip Sn 400.272 ($h_1=26$ m : $h_2= 16,25$ m : $h_3=8$ m și $d_1=14$ m ; $d_2=22$ m ; $d_3=14$ m), valorile potențialului electric V și ale intensității câmpului electric E , în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, atunci când unul din circuite (r ; s ; t) este pasiv și este cuplat capacitiv cu circuitul învecinat , aflat în stare normală de funcționare, sunt prezentate în tabelele 3.2.7 și

3.2.8, cu reprezentări grafice corespondente din figurile 3.2.10; 3.2.11; 3.2.12 și 3.2.13.

Așa după cum se observă din acestea, valorile maxime pentru tensiunea electrică și intensitatea câmpului electric se obțin în axa stâlpului la un nivel față de suprafața pământului corespunzătoare zonei de influență a conductorilor de fază $U = \{47,62 \text{ kV}; 18,99 \text{ kV}; 14,81 \text{ kV}\}$, respectiv $E = \{5,142 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}; 5,446 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}; 5,473 \text{ kV}\cdot\text{m}^{-1}\}$.

Tabelul 3.2.7 Valorile potențialului electric, LEA 400kV

[m]	V [kV]			
$y_2 - x_2$	0	7	11	21
27	47.62	24.26	19.51	12.84
24	40.91	21.02	16.43	11.24
21	28.56	16.41	12.43	9.505
18	14.81	10.73	6.539	7.773
15	1.87	6.443	2.864	6.204
12	10.78	5.304	4.71	4.847
9	18.99	8.377	4.944	3.626
6	18.84	5.22	3.795	2.437
2	7.519	1.45	1.221	0.821
1.5	5.681	1.09	0.912	0.616
1	3.807	0.728	0.606	0.411
0.5	1.909	0.365	0.303	0.205

Tabelul 3.2.8 Valorile intensității câmpului electric, LEA400 kV

[m]	E [kV/m]			
$y_2 - x_2$	0	7	11	21
27	5.142	2.059	1.352	1.014
24	5.446	3.807	3.577	3.491
21	4.943	4.795	4.682	4.639
18	4.353	4.677	4.6	4.585
15	4.302	4.401	4.403	4.406
12	4.919	4.049	3.993	4
9	5.473	2.412	2.134	2.193
6	4.736	1.111	0.283	0.372
2	1.929	1.123	1.041	1.04
1.5	1.487	0.918	0.861	0.86
1	1.02	0.663	0.628	0.627
0.5	0.526	0.357	0.341	0.34

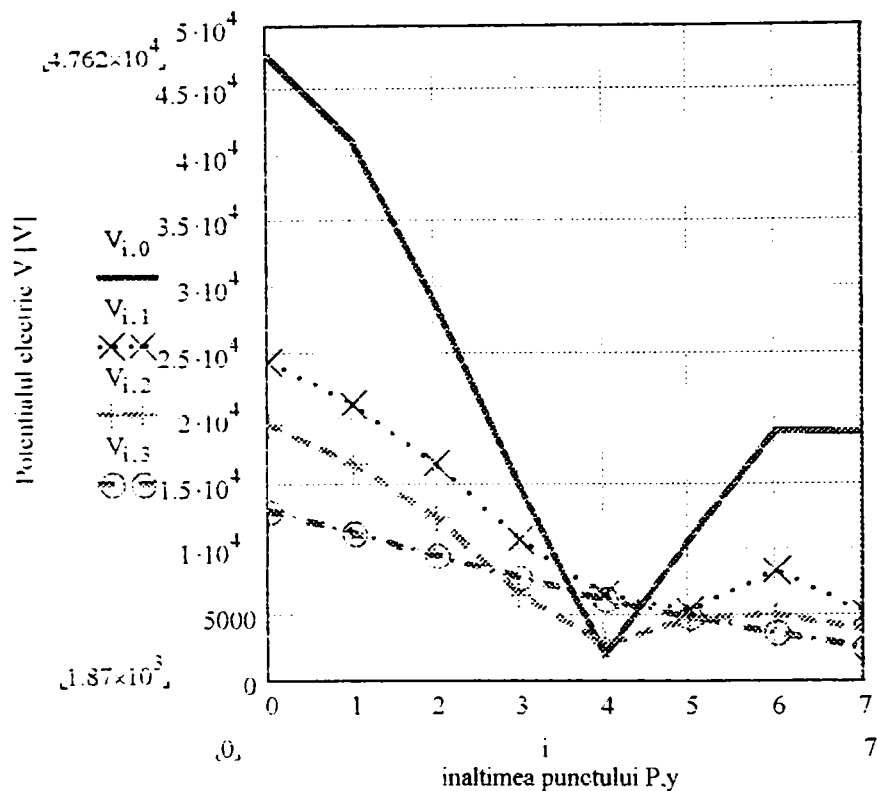


Figura 3.2.10.: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P: y (27; 24; 21; 18; 15; 12; 9; 6 m) și x (0; 7; 11; 21 m)

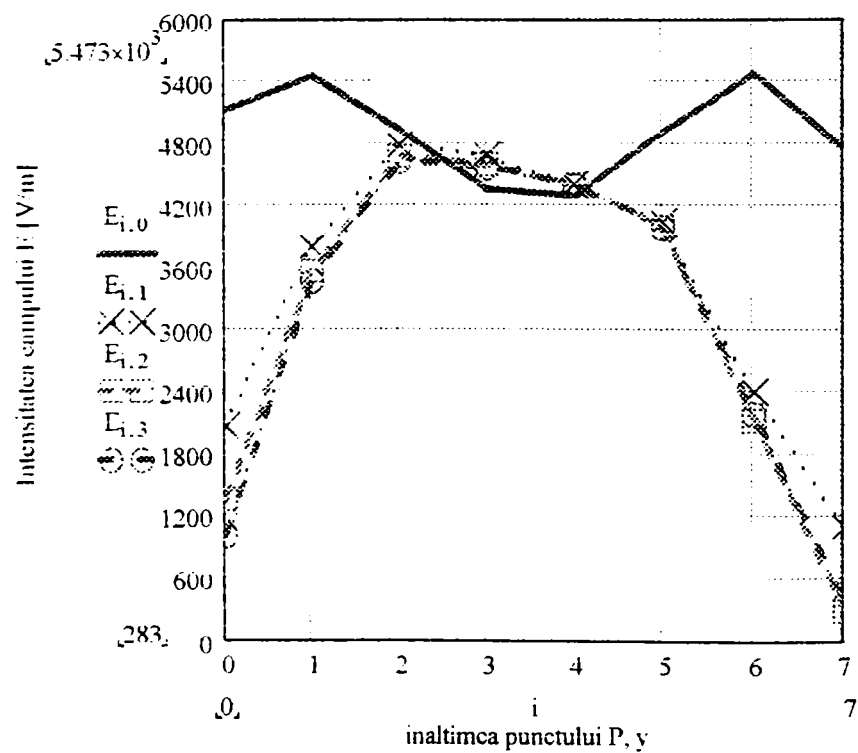


Figura 3.2.11 Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P: y (27; 24; 21; 18; 15; 12; 9; 6 m) și x (0; 7; 11; 21 m)

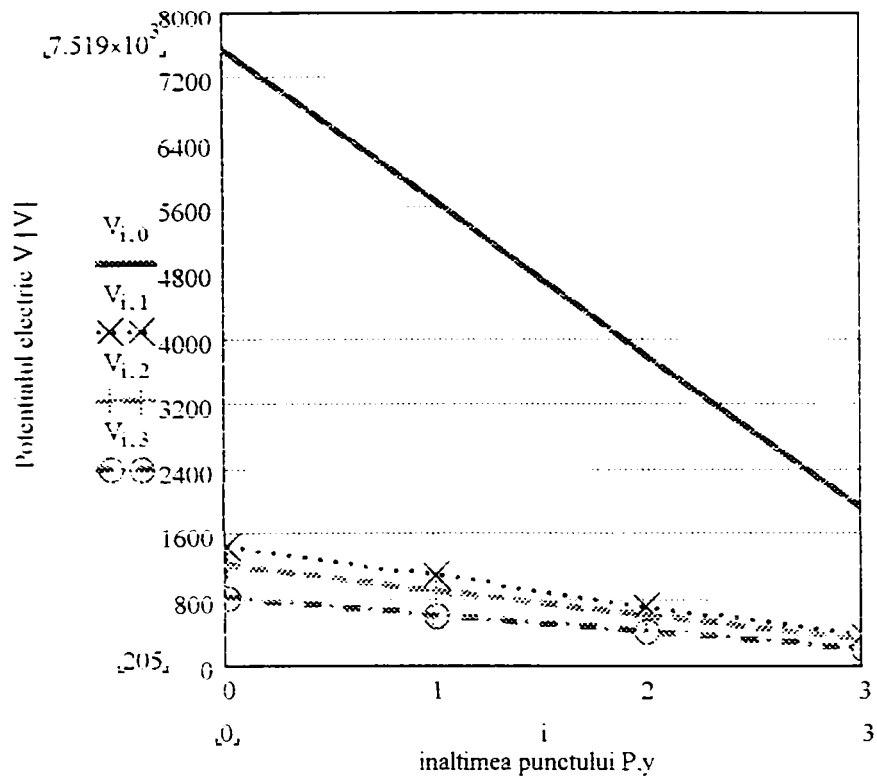


Figura 3.2.12.: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 7; 11; 21 m)

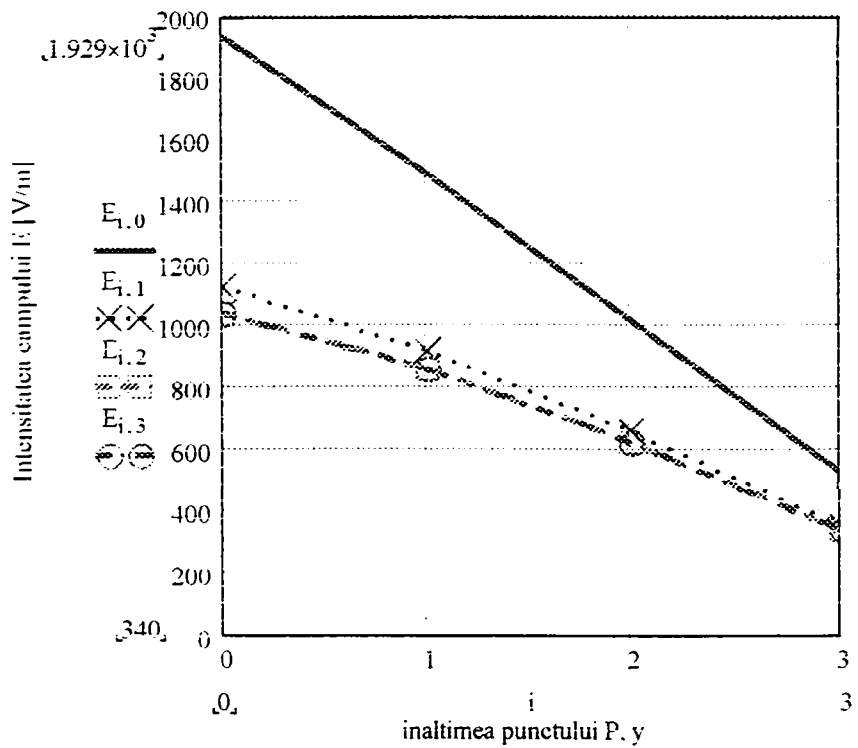


Figura 3.2.13 Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 7; 11; 21 m)

3.2.2. Expresii de calcul pentru tensiunile induse electrostatic

Pentru determinarea valorilor tensiunilor induse, în literatura de specialitate [22], [23] se consideră o situație idealizată, prin care linia electrică trifazată (inductoare) are conductoarele cu raza r_0 dispuse paralel cu solul în vârfurile unui triunghi echilateral de latură $d \ll h$, în care h este înălțimea deasupra solului a centrului triunghiului, figura 3.2.14.

Tensiunea indusă electrostatic se calculează cu relația dată în [22] și [23]:

$$U_p = U_f \cdot \frac{d \cdot h_p}{a^2 \cdot \ln \frac{d}{r_0}} \quad (3.2.2)$$

U_f reprezintă tensiunea de fază, iar a este distanța dintre circuitul electric inductor și cel indus. În relația de calcul a tensiunii induse (3.2.2), absența înălțimii conductorului de fază h , a circuitului electric inductor, se explică prin poziționarea acestuia la mare depărtare de sol. Se observă că tensiunea indusă crește cu mărirea distanței între conductoarele de fază ale circuitului principal și cu înălțimea față de pământ a circuitului indus.

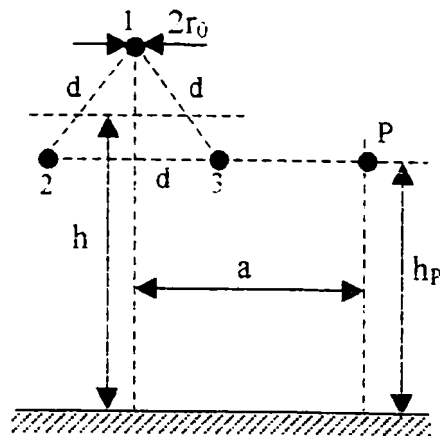


Figura 3.2.14 Calculul tensiunii induse electrostatic de o linie trifazată-coronament triunghi

În cazul real (nesimplificat) al circuitelor electrice trifazate inductoare relația de calcul a tensiunii induse electrostatic (3.2.1) este dată și în [9],[10].

Corectarea valorilor obținute pentru tensiunile induse electrostatic cu relația (3.2.2) se face prin introducerea unui coeficient:

$$\beta = \frac{a \cdot (h + h_p) - d \cdot h_p}{h \cdot h_p} \quad (3.2.3)$$

care depinde atât de geometria circuitului inductor (h – înălțimea conductorului de fază față de sol; d – distanța între conductori), cât și de geometria circuitului indus (a – distanța față de circuitul inductor; h_p – înălțimea conductorului din circuitul indus).

Erorile stabilite în calculul tensiunilor induse electrostatic cu relația (3.2.2) se pun în evidență considerând ca și circuit electric inductor linia electrică aeriană de 110 kV, pe stâlpi portalți, tip ICS 110.143, figura 3.2.15

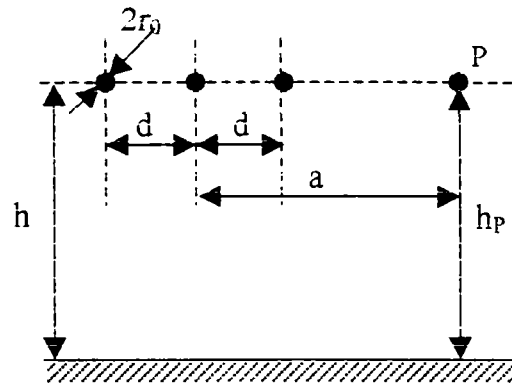


Figura 3.2.15 Calculul tensiunii induse electrostatic de o linie trifazată-coronament portal

Folosind expresia spline de interpolare a erorilor de calcul în mediul de programare **Mathcad Professional**,

$$vsk = \text{pspline}(h_p, e_{rk})$$

$$erk_{(x)} = \text{interp}(vsk, h_p, e_{rk}, x)$$

se obțin pentru erorile procentuale:

$$e_{rk} = \frac{U_k - U_{pk}}{U_k} \cdot 10^2 \quad [\%]$$

valorile înscrise în tabelul 3.2.9, respectiv graficele de variație din figura 3.2.16, în funcție de poziția indusului (a , h_p):

Tabelul 3.2.9 Valorile erorilor de calcul ale tensiunilor induse electrostatic

h_p	$a=6$	$a=9$	$a=12$
5	17	3	3
6	16	5	2
7	15	3	2
8	14	3	2
9	13	2	2
10	11	1	3
11	10	0.6	3
12	8	0.3	4
13	7	1	5
14	5	2	6
15	3	4	6

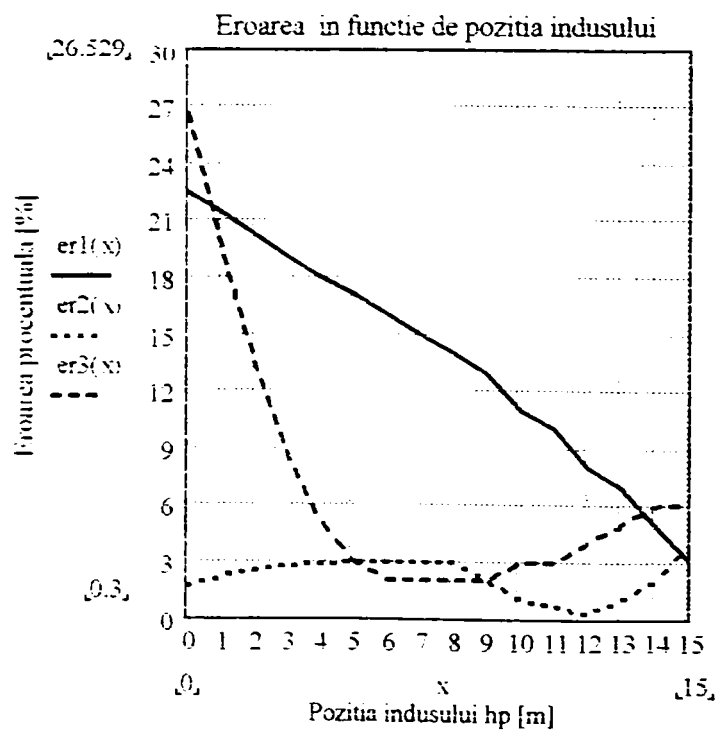


Figura 3.2.16 Variația erorilor de calcul ale tensiunilor induse cu poziția circuitului indus pentru LEA 110kV

Din analiza celor prezentate se constată că relațiile simplificate propuse în literatură nu pot fi aplicate practic pentru distanțe mai mici decât $2d$ (d este distanța între faze).

Relația (3.2.2) conduce la valori mult mai mari pentru tensiunile induse electrostatic decât relația (3.2.1) care conduce la valori apropiate de realitate.

Se observă o eroare procentuală relativă mare în determinarea tensiunii induse prin cuplaj capacitiv cu formula (3.2.2), atunci când circuitul indus se află într-o poziție relativ apropiată de circuitul inductor ($a = 6\text{ m}$ și $h_p < h$). Eroarea procentuală de calcul obține o valoare minimă pentru poziții ale circuitului indus cu $a \geq 3d$.

3.2.3. Circuitul inductor funcționează în regim de avarie

Considerăm un regim de funcționare de avarie pe linia inductoare, figura 3.2.17, (R, S, T). Presupunem ca sursă de nesimetrie în funcționarea liniei electrice active un scurtcircuit monofazat, adică una din faze este pusă la pământ. Tensiunea pe faza avariata devine nulă.

Expresiile analitice ale tensiunilor pe cele trei faze, când pe linie a apărut un scurtcircuit monofazat (R, figura 3.2.17), sunt [34]:

$$\begin{aligned} \underline{U}_R &= 0 \\ \underline{U}_S &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{U}_f \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_+ + \underline{Z}_-} + j \right) \\ \underline{U}_T &= -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \underline{U}_f \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_0}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_+ + \underline{Z}_-} + j \right) \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

iar expresia de calcul a curentului de scurtcircuit este:

$$\underline{I}_{sc} = \frac{3 \cdot \underline{U}_f}{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_+ + \underline{Z}_-} \quad (3.2.4)$$

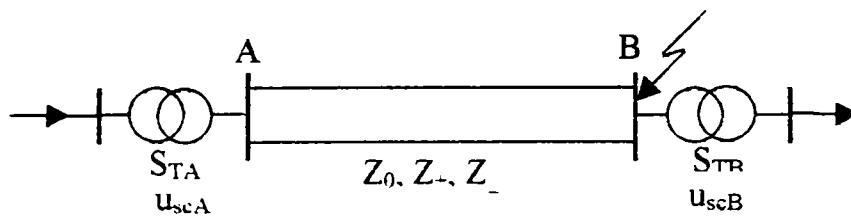


Figura 3.2.17 Rețea electrică cu un scurtcircuit monofazat pe barele B

Dacă pe fazele liniei electrice rezistențele $R_+ = R_- = R_0 = 0$ [11] expresiile tensiunilor (3.2.3), devin:

$$U_S = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot \frac{\sqrt{x_0^2 + x_0 \cdot x_+ + x_+^2}}{x_0 + x_+ + x_-}$$

$$U_T = U_S \quad (3.2.5)$$

$$U_R = 0$$

Indicii +; -; 0 se referă la secvența directă, inversă și homopolară din schemele de calcul ale rețelelor electrice.

În cazul scurtcircuitelor nesimetrice (monofazat sau bifazat) ca urmare a fenomenului de rezonanță dintre circuitele reactanțelor de secvență directă, inversă și homopolară, pot apărea pe fazele sănătoase supratensiuni, calculate cu relațiile [11]:

$$\underline{U}_R = \underline{U}_f \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot x_0}{x_0 + 2 \cdot x_+} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$\underline{U}_S = \underline{U}_f \cdot \left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot x_0}{x_0 + 2 \cdot x_+} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \quad (3.2.6)$$

pentru defectul monofazat și

$$\underline{U}_R = \underline{U}_f \cdot \frac{3 \cdot x_0}{2 \cdot x_0 + x_+} \quad (3.2.7)$$

pentru un defect bifazat cu punere la pământ.

x_0 și x_+ sunt reactanțele de secvență homopolară și directă, reduse la locul de defect, iar \underline{U}_f este tensiunea fazei afectate de defect, înainte de apariția acestuia

Condiția de rezonanță, în cazul defectului monofazat este $\frac{x_0}{x_+} = -2$,

iar în cazul celui bifazat cu punere la pământ este $\frac{x_0}{x_+} = -\frac{1}{2}$.

Pentru scurtcircuitul monofazat, pe faza R a liniei active, tensiunile sunt calculate cu relația (3.2.3) iar curentul de scurtcircuit la momentul $t = 0$ cu relația (3.2.4). Valorile corespunzătoare liniilor electrice de 110 kV, 220 kV și 400 kV sunt prezentate în tabelul 3.2.10. Referitor la tensiunile induse electrostatic pe fazele r,s,t, acestea sunt calculate cu relația (3.2.1) și sunt prezentate în tabelul 3.2.11.

Pentru sarcinile electrice liniar distribuite pe fazele liniei electrice se obțin cu relația (3.1.10) valorile din tabelul 3.2.12

Tabelul 3.2.10 Valorile curenților de scc. Și tensiunile pe fazele sănătoase în funcție de tensiunea nominală

U_n [kV]	I_{sc} [kA]	U_s [kV]	U_T [kV]
110	2.686-5.984i	-52.5-64.31i	-52.5+45.69i
220	0.4415-2.525i	-114.3-110i	-114.3+110i
400	3.601-17.64i	-174.9-190.7i	-174.9+209.3i

Tabelul 3.2.11 Valorile tensiunilor induse electrostatic pe fazele r,s,t, la un scc. monofazat în funcție de U_n

[kV]	U_r	U_s	U_t
110	0	-0.366-0.448i	-3.316+2.886i
220	0	2.114-2.035i	-7.406+7.127i
400	0	3.144-3.428i	-12.75+15.26i

Tabelul 3.2.12 Valorile sarcinilor electrice pe conductoarele unei linii. d. c., în funcție de U_n

q[nC]	R	S	T	r	s	t
110	112.7-125.3i	-339.7-443i	-336.8+267.8i	59.37-62.82i	63.01-72.21i	49.65-52.58i
220	216.9-81.03i	-752.7-989.5i	-774.7-1003i	110.5-14.02i	115.9-6.282i	64.57+21.55i
400	439.1-495i	-1525-1629i	-1683+2041i	183.2-220.5i	193.5-149.2i	23.54-32.77i

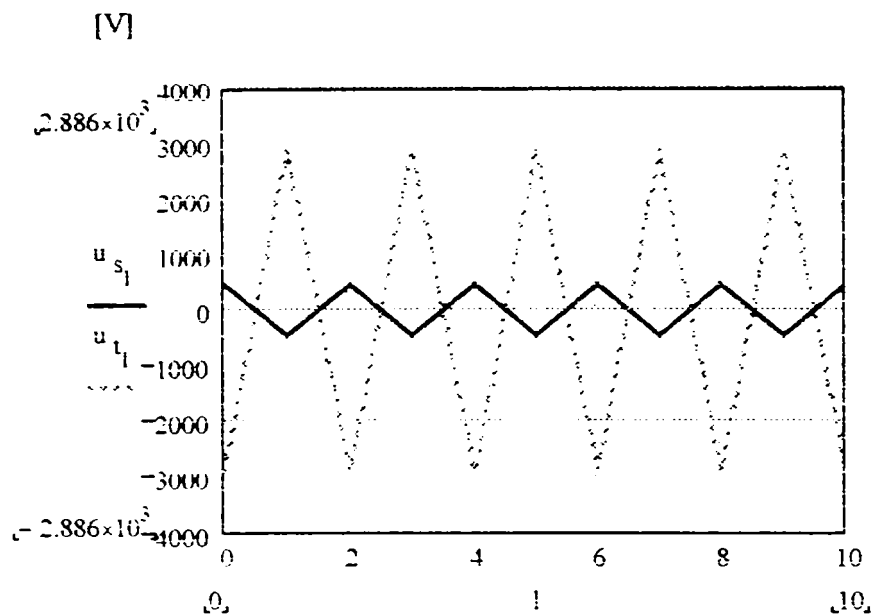


Figura 3.2.18. Variația tensiunilor induse electrostatic pentru $\Delta t = 0.1s$ [ms/10] în cazul LEA 110kV, dublu circuit

Urmărind variația în timp a tensiunilor induse electrostatic în fazele circuitului electric pasiv pentru linia electrică de 110 kV, dublu circuit, (figura 3.2.18) atunci când pe faza R a circuitului activ se produce un scurtcircuit, se observă că tensiunea indusă pe faza t este defazată cu $\varphi \approx \pi \cdot 2^{-1}$, ($\varphi = 0,51 \cdot \pi$), față de tensiune indusă pe faza s.

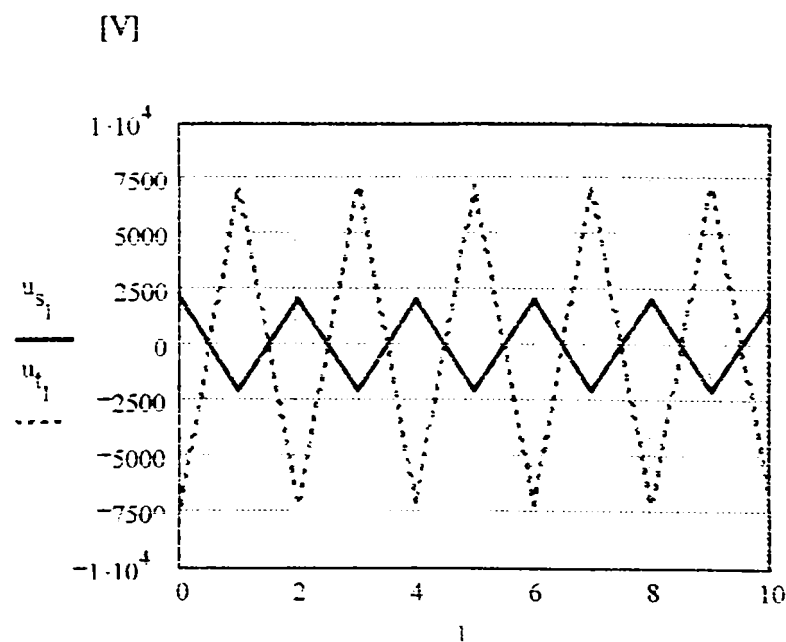


Figura 3.2.19. Variația tensiunilor induse electrostatic pentru $\Delta t = 0.1s$, în cazul LEA 220 kV, dublu circuit.

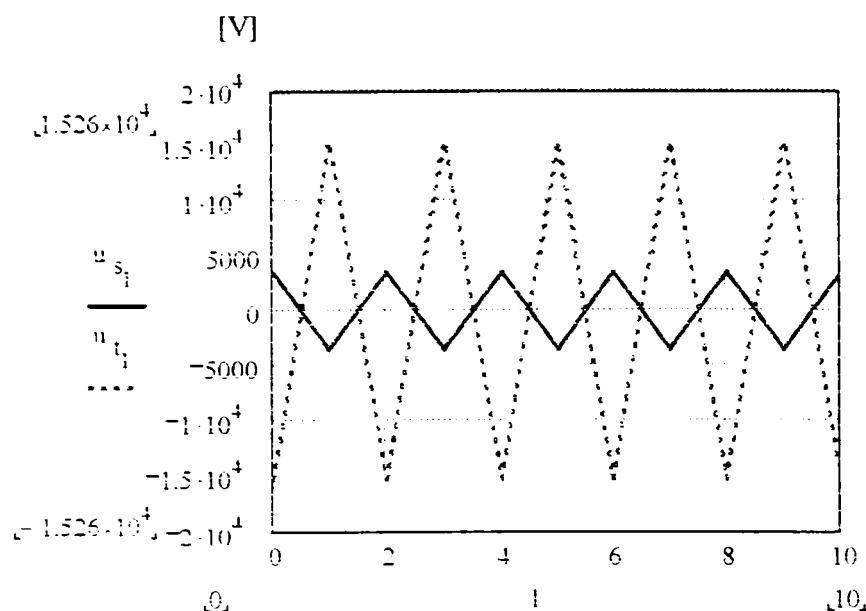


Figura 3.2.20. Variația tensiunilor induse electrostatic pentru $\Delta t = 0.1s$.
în cazul LEA 400kV. . dublu circuit

În cazul liniei electrice de 220 kV, dublu circuit, acest defazaj este $\varphi = 0,488.\pi$, (figura 3.2. 19), iar pentru linia electrice de 400 kV, dublu circuit, defazajul dintre tensiune indusă pe faza t și cea indusă pe faza s este $\varphi = 0,542.\pi$, (figura 3.2.20).

Diferența de valoare între cele două tensiuni induse, poate fi explicată prin geometria coronamentului în hexagon a liniei considerate și poziționarea celor două faze în contextul studiat.

Variația în timp a tensiunilor de pe fazele sănătoase și a curentului de scurtcircuit de pe faza R, prezentată grafic în figura 3.2. 21, pune în evidență opoziția de fază între cele două tensiuni, adică $\varphi_s = \pi.4^{-1}$ și $\varphi_T = -\pi.4^{-1}$, iar $\varphi_{sc} = -0,445.\pi$

Valorile potențialului electric V și ale intensității câmpului electric E, în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene dublu circuit de 110 kV, cu configurația coronamentului în hexagon ($h_1=20m$; $h_2= 16m$; $h_3=12m$ și $d_1=6,1m$; $d_2=7,65m$; $d_3=6,1m$), atunci când unul din

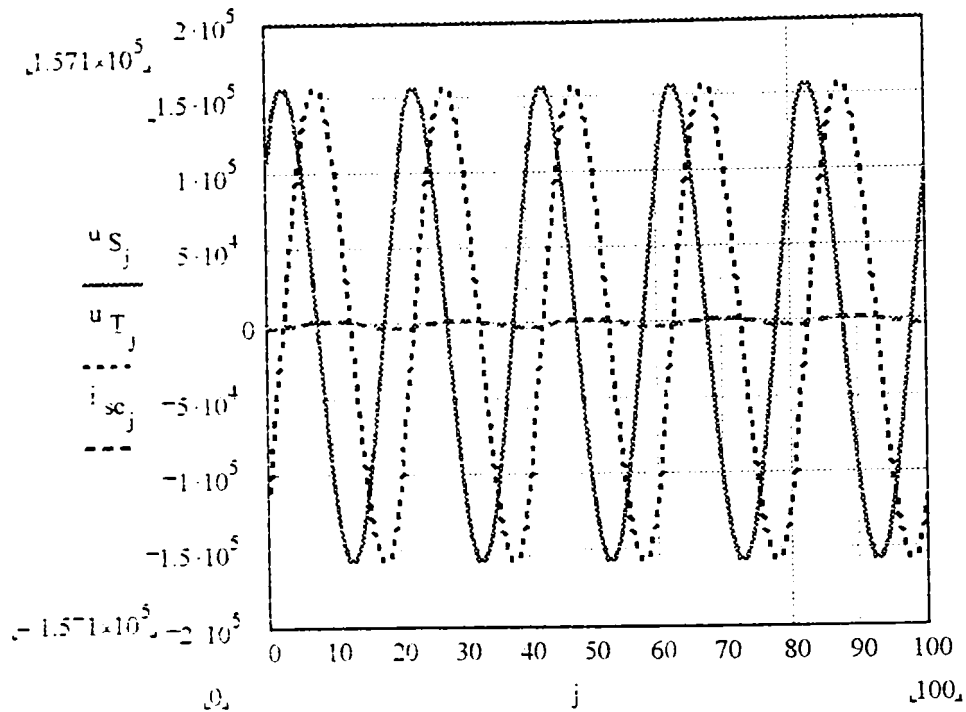


Figura 3.2.21. Variația în intervalul de timp $\Delta t = 0.1$ s. a tensiunilor de pe fazele sănătoase și a curentului de scurtcircuit, pentru LEA 220 kV, d.c.

circuite este scos de sub tensiune (r,s,t), deci devine un circuit pasiv și este cuplat capacitiv cu circuitul învecinat (R,S,T), pe care are loc un regim de scurtcircuit monofazat, sunt prezentate în tabelele 3.2.13 și 3.2.14, cu reprezentări grafice corespondente din figurile 3.2.15; 3.2.16; 3.2.17 și 3.2.18.

Tabelul 3.2.13 Valorile potențialului electric în vecinătatea LEA 110kV d.c., coronament hexagon, cu un circuit scos de sub tensiune

[m]	V [kV]		
$V_E X_0$	0	3.825	13.825
20	12.14	6.069	4.715
18	15.49	7.525	4.613
16	18.95	6.183	4.479
14	20.93	8.716	4.298
12	21.17	9.003	4.056
2	3.892	3.106	1.383
1.5	2.911	2.33	1.04
1	1.937	1.553	0.694
0.5	0.967	0.776	0.347

Tabelul 3.2.14 Valorile intensității câmpului electric în vecinătatea LEA 110kV d.c., coronament hexagon. cu un circuit scos de sub tensiune

[m]	E [kV/m]		
$y_p \backslash x_p$	0	3.825	13.825
20	2.137	1.138	0.245
18	3.4	1.185	0.255
16	4.162	3.788	0.266
14	4.304	2.157	0.275
12	4.386	1.043	0.278
2	0.525	0.387	0.124
1.5	0.403	0.297	0.094
1	0.276	0.203	0.064
0.5	0.142	0.104	0.032

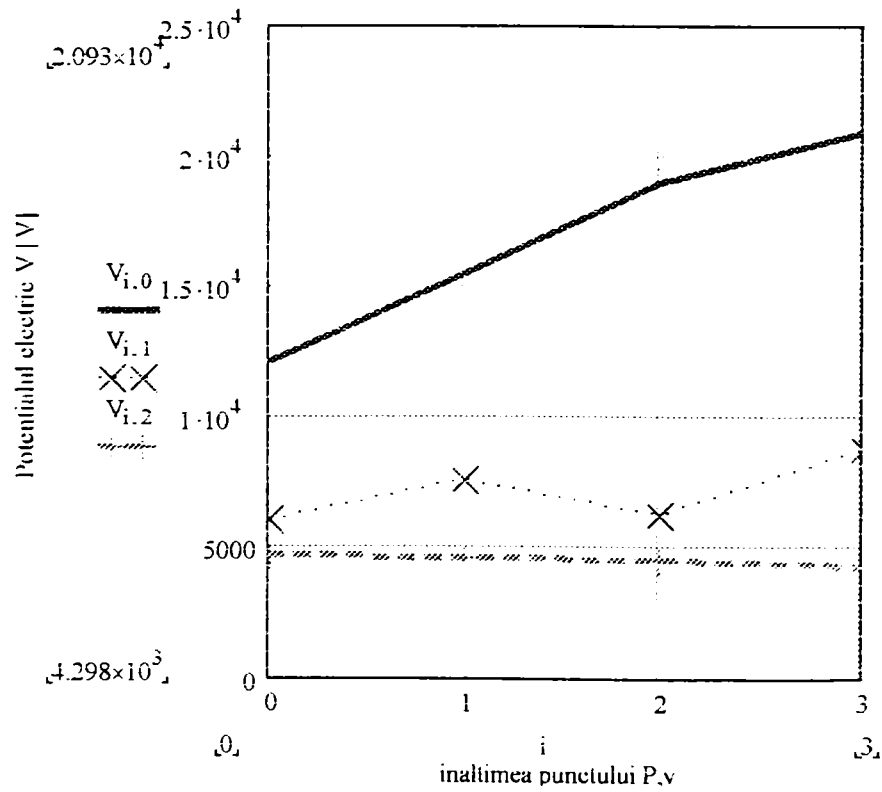


Figura 3.2.15.; Variația potentialului electric V în funcție de poziția punctului P: y (20; 18; 16; 14; 12 m) și x (0; 3.825; 13.825 m)

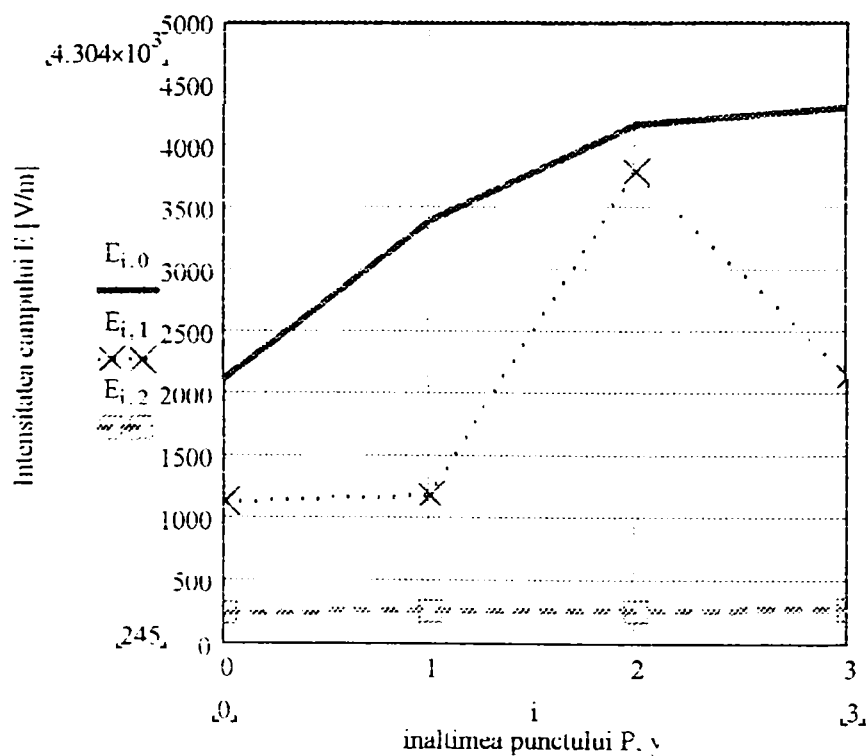


Figura 3.2.16.: Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P : y (20; 18; 16; 14; 12 m) și x (0; 3.825; 13.825 m)

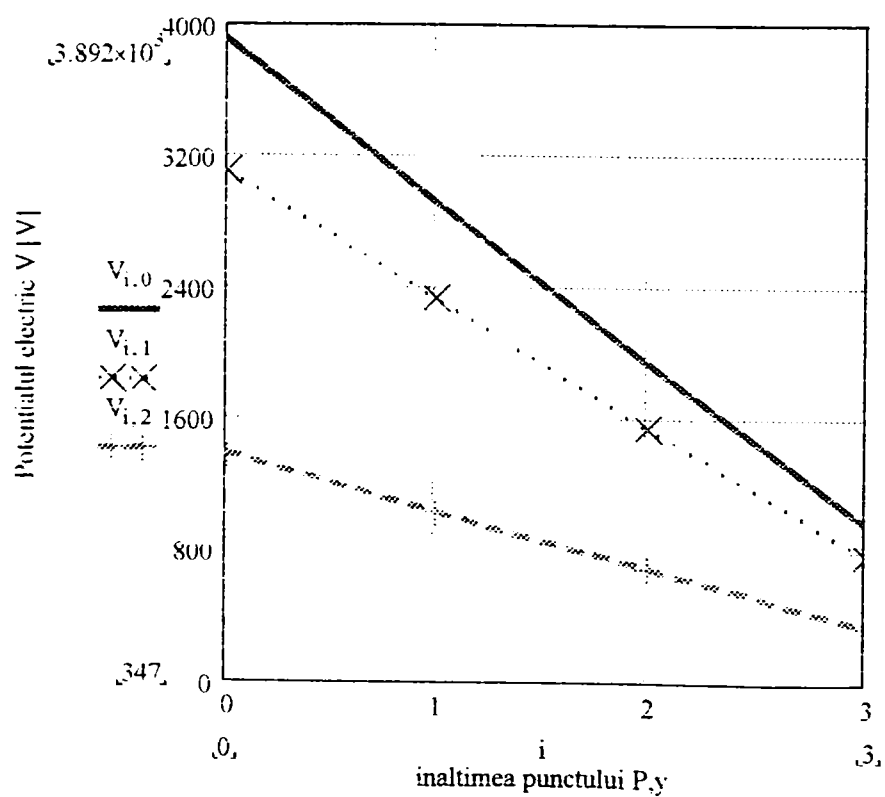


Figura 3.2.17.: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 3.825; 13.825 m)

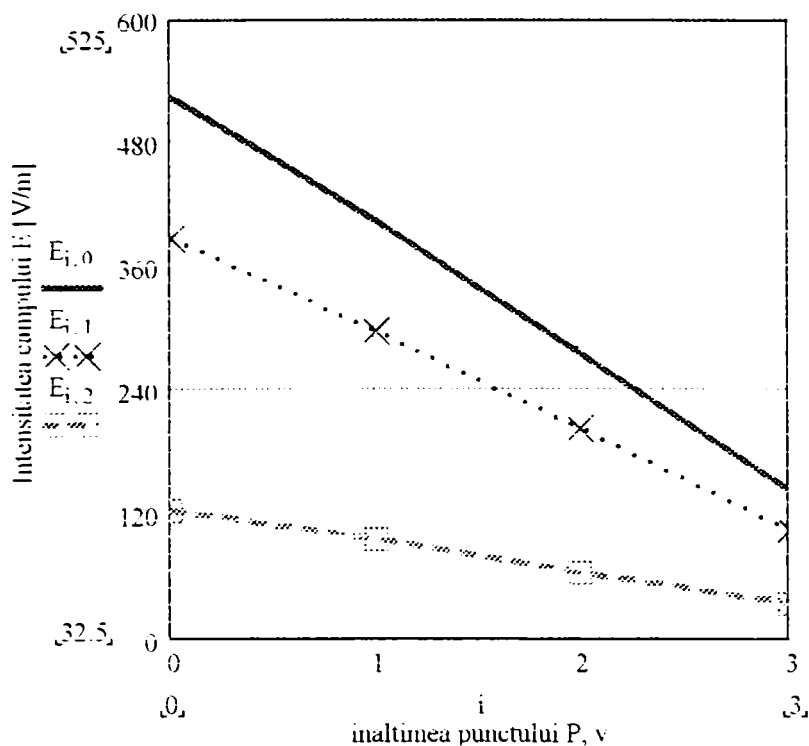


Figura 3.2.18.: Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P : y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 3.825; 13.825 m)

Valorile potențialului electric V și ale intensității câmpului electric E , în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene dublu circuit de 220 kV, cu configurația coronamentului în hexagon pe stâlpi tip Sn 220.202 ($h_1=25m$; $h_2= 18,5m$; $h_3=12m$ și $d_1=9m$; $d_2=16m$; $d_3=10m$), atunci când unul din circuite este scos de sub tensiune (r,s,t), deci devine un circuit pasiv și este cuplat capacitiv cu circuitul învecinat (R,S,T), pe care are loc un regim de scurtcircuit monofazat, sunt prezentate în tabelele 3.2.15 și 3.2.16, cu reprezentări grafice corespondente din figurile 3.2.19; 3.2.20; 3.2.21 și 3.2.22.

Tabelul 3.2.15 Valorile potențialului electric în vecinătatea
LEA 220kV d.c., coronament hexagon. cu un circuit scos de sub tensiune

[m]	V [kV]		
$Y_p \setminus X_p$	0	8	18
25	15.48	7.98	5.826
20	22.67	7.222	5.355
15	28.62	9.5	4.786
10	26.72	9.147	3.797
2	5.335	2.359	0.885
1.5	3.996	1.776	0.665
1	2.661	1.187	0.444
0,5	1.33	0.594	0.222

Tabelul 3.2.16 Valorile intensității câmpului electric în vecinătatea
LEA 220kV d.c., coronament hexagon. cu un circuit scos de sub tensiune

[m]	E [kV/m]		
$Y_p \setminus X_p$	0	8	18
25	1.695	0.342	0.224
20	2.761	1.096	0.27
15	3.635	1.38	0.312
10	3.94	1.02	0.285
2	0.788	0.284	0.072
1.5	0.604	0.216	0.054
1	0.413	0.146	0.036
0.5	0.213	0.073	0.018

Valorile potențialului electric V și ale intensității câmpului electric E , în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene dublu circuit de 400 kV, cu configurația coronamentului în hexagon pe stâlpi tip Sn 400.202 ($h_1=26\text{m}$; $h_2=16,25\text{m}$; $h_3=8\text{m}$ și $d_1=14\text{m}$; $d_2=22\text{m}$; $d_3=14\text{m}$), atunci când unul din circuite este scos de sub tensiune (r,s,t), deci devine un circuit pasiv și este cuplat capacitiv cu circuitul învecinat (R,S,T), pe care are loc un regim de scurtcircuit monofazat, sunt prezentate în tabelele 3.2.17 și 3.2.18, cu reprezentări grafice corespondente din figurile 3.2.23; 3.2.24; 3.2.25 și 3.2.26.

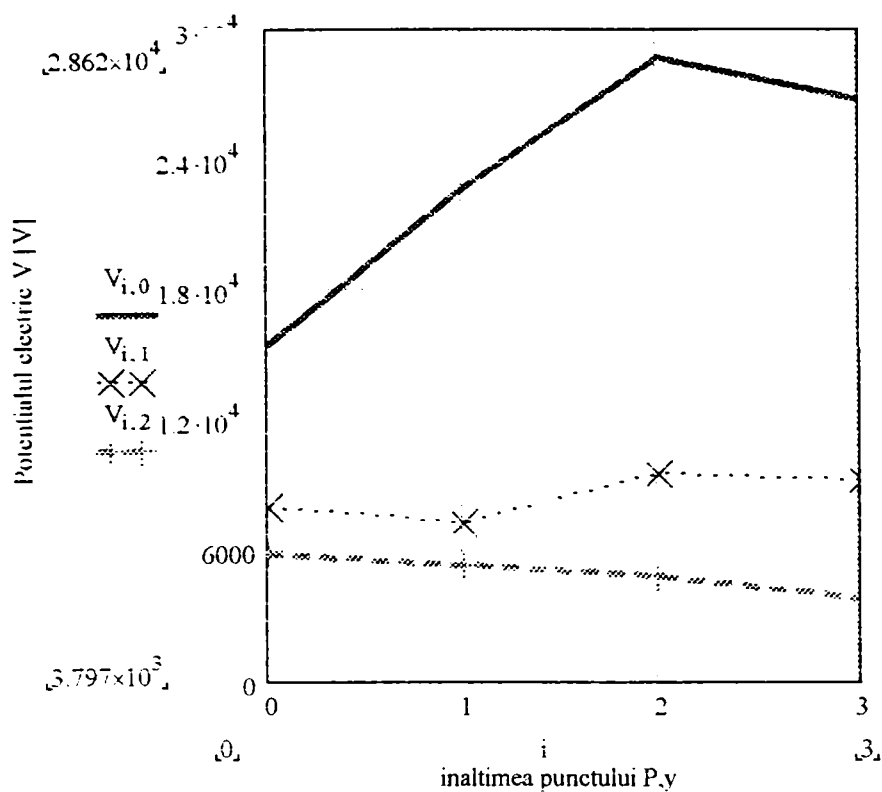


Figura 3.2.19: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P : y (25; 20; 15; 10 m) și x (0; 8; 18 m)

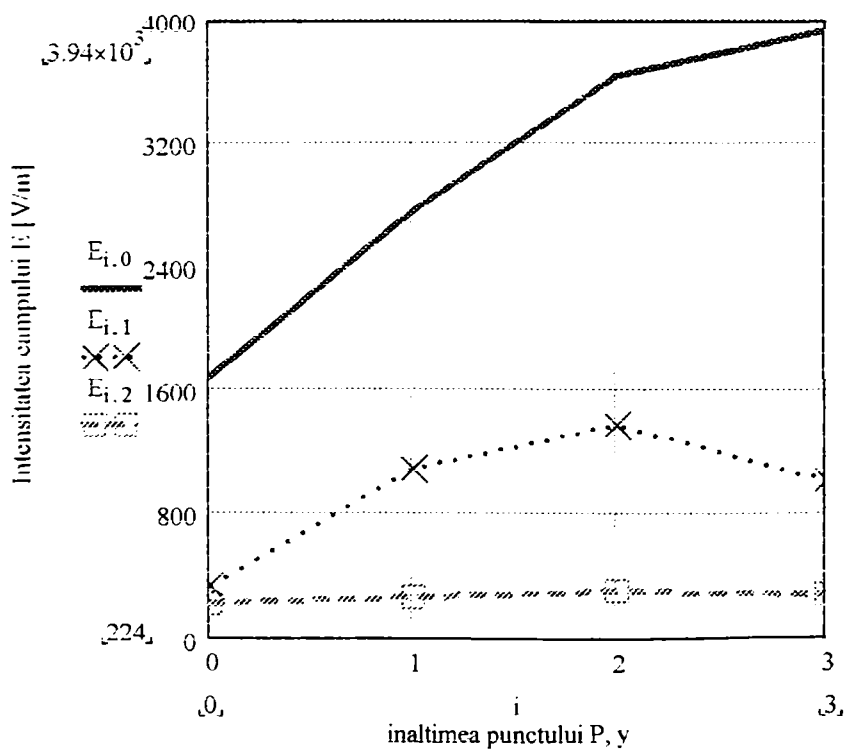


Figura 3.2.20: Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P : y (25; 20; 15; 10 m) și x (0; 8; 18 m)

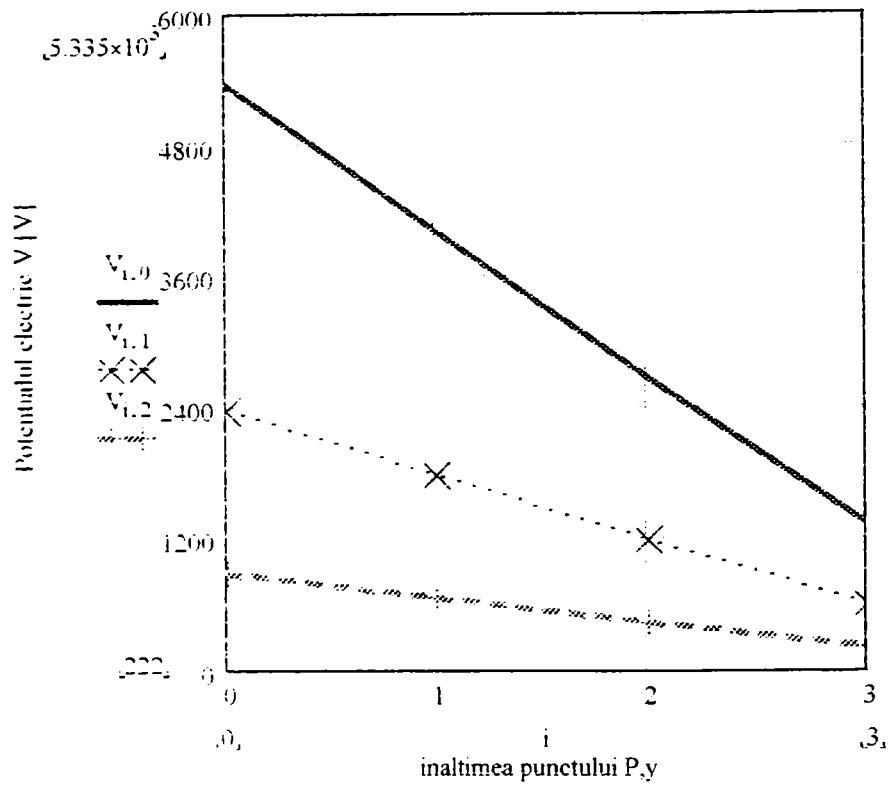


Figura 3.2.21.: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P: y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 8; 18 m)

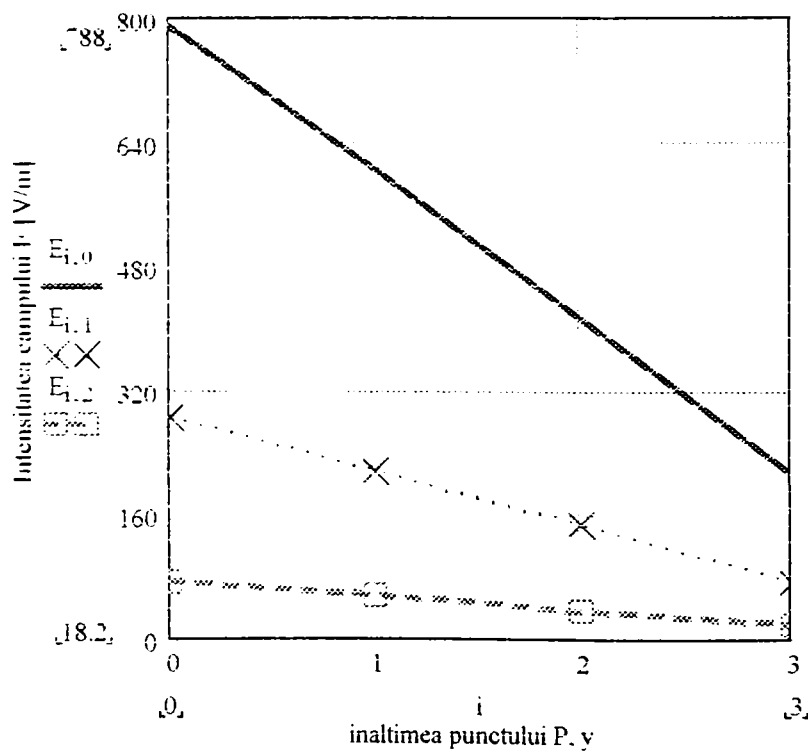


Figura 3.2.22.: Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P: y (2; 1.5; 1; 0.5m) și x (0; 8; 18 m)

Tabelul 3.2.17 Valorile potențialului electric în vecinătatea LEA 400kV d.c., coronament hexagon, cu un circuit scos de sub tensiune

[m]	V [kV]			
$V_p \backslash X_p$	0	7	11	21
27	30.21	11.67	13.77	10.91
24	36.97	16.97	14.36	10.39
21	45.94	22.82	15.2	9.772
18	54.63	25.34	12.96	9.055
15	61.07	26.71	11.92	8.236
12	63.71	26.78	15.5	7.243
9	59.89	23.23	14.36	5.939
6	46.41	17.79	10.91	4.249
2	16.75	6.635	4.004	1.493
1.5	12.6	5.004	3.019	1.123
1	8.422	3.35	2.02	0.75
0.5	4.217	1.679	1.012	0.375

Tabelul 3.2.18 Valorile intensității câmpului electric în vecinătatea LEA 400kV d.c., coronament hexagon, cu un circuit scos de sub tensiune

[m]	E [kV/m]			
$V_p \backslash X_p$	0	7	11	21
27	2.954	4.036	0.539	0.458
24	4.432	4.369	1.26	0.479
21	5.629	3.425	1.482	0.495
18	6.442	3.936	1.998	0.512
15	7.06	4.372	4.865	0.535
12	7.644	3.854	2.468	0.534
9	7.839	3.175	1.816	0.473
6	6.611	2.419	1.301	0.352
2	2.725	0.89	0.479	0.126
1.5	2.1	0.675	0.361	0.095
1	1.44	0.454	0.242	0.063
0.5	0.741	0.228	0.121	0.031

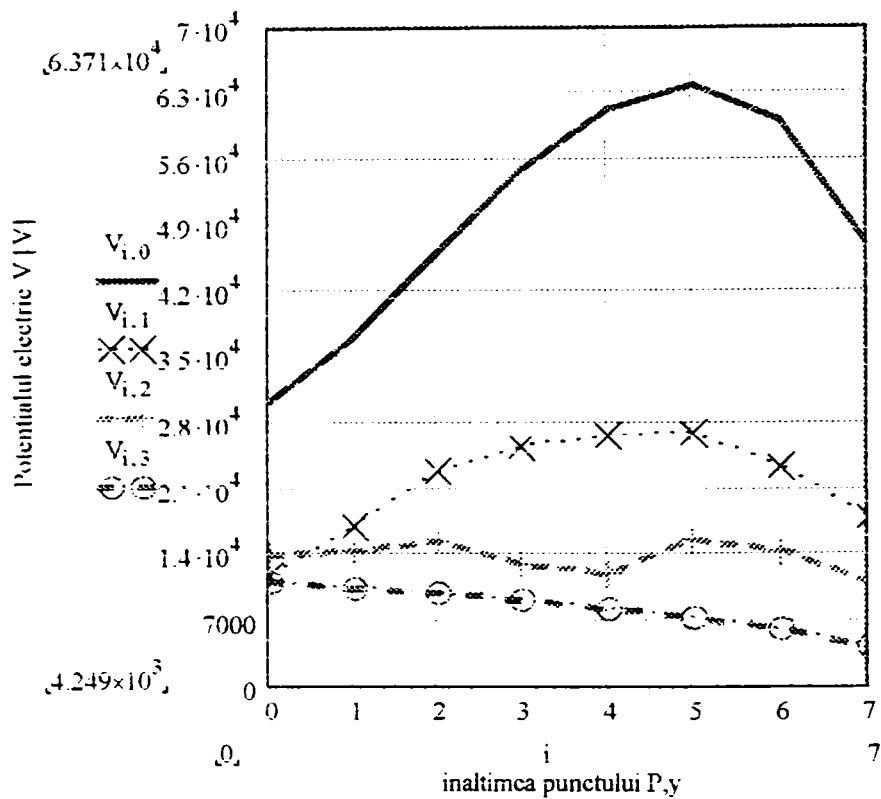


Figura 3.2.23.: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P,y (27; 24; 21; 18; 15; 12; 9; 6 m) și x (0; 7; 11; 21 m)

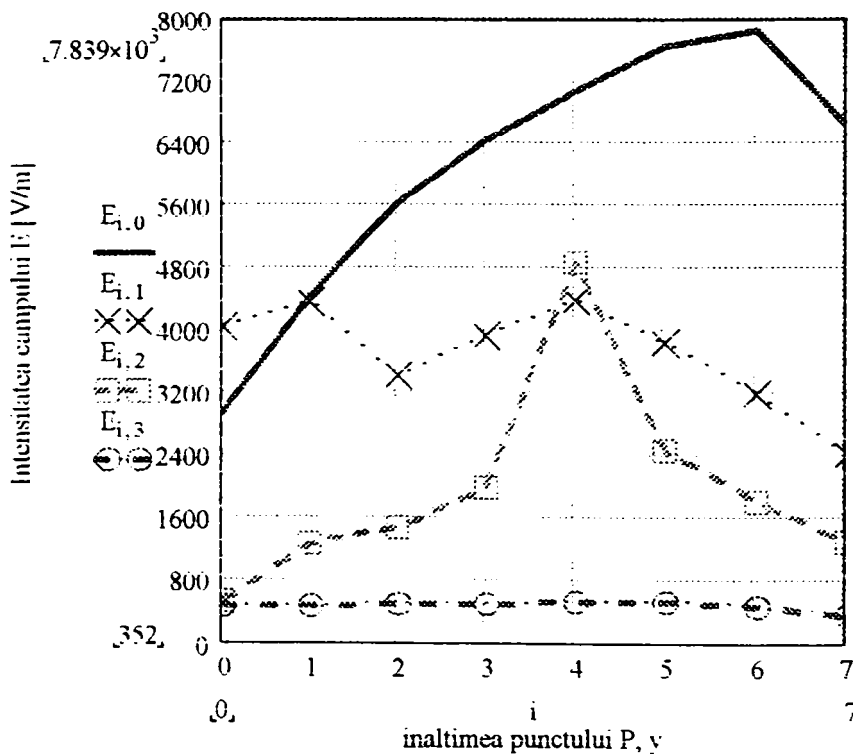


Figura 3.2.24.: Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P,y (27; 24; 21; 18; 15; 12; 9; 6 m) și x (0; 7; 11; 21 m)

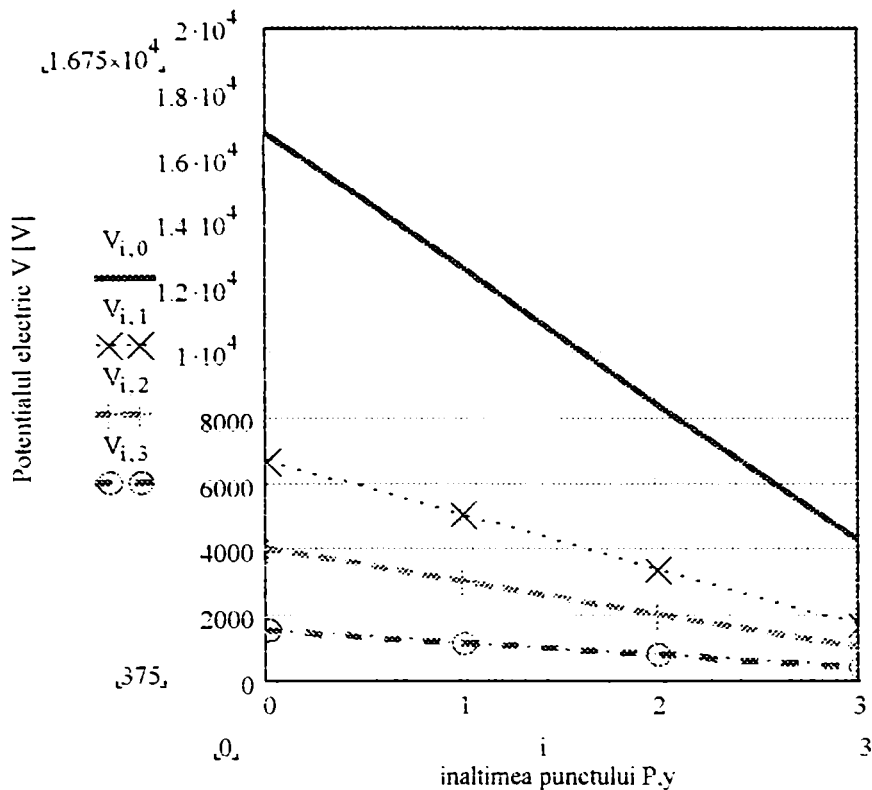


Figura 3.2.25.: Variația potențialului electric V în funcție de poziția punctului P:y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 7; 11; 21 m)

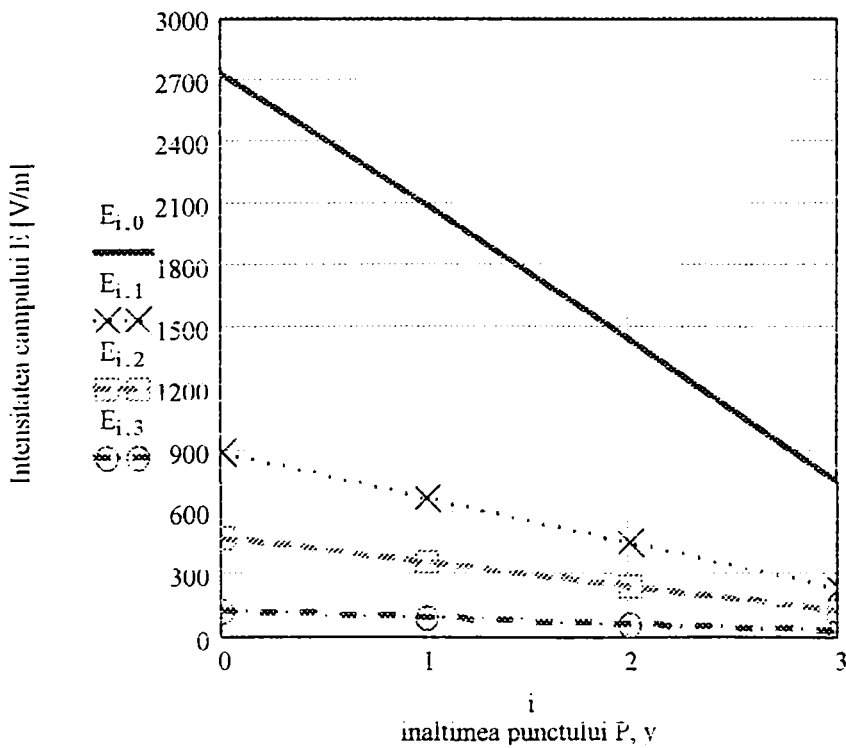


Figura 3.2.26.: Variația intensității câmpului electric E în funcție de poziția punctului P:y (2; 1.5; 1; 0.5 m) și x (0; 7; 11; 21 m)

3.3. Influența electromagnetică a liniilor electrice de înaltă tensiune

3.3.1. Regimul de funcționare al circuitului inductor este unul permanent

Acest fenomen apare numai în regimul de sarcină a liniei electrice, fiind determinat de câmpul magnetic al curenților electrici. Cu cât suprafața delimitată de bucla inductoare (sau indusă) este mai mare, cu atât fluxul magnetic este mai mare iar efectul este perceput pe o distanță mai mare. Tensiunile induse electromagnetic sunt tensiuni longitudinale, spre deosebire de cele induse electrostatic, care sunt transversale.

În regim normal de funcționare liniile de transport prezintă în jurul conductoarelor de fază un câmp magnetic de dispersie care induce în vecinătatea liniei tensiuni de valoare redusă față de cele induse prin cuplaj capacitiv [10], [12].

În regim de avarie nesimetric apare componenta homopolară a curenților, care prin bucla conductor – pământ (conductor de gardă), foarte largă, fluxul inductor stabilește tensiuni induse în circuitul liniei învecinate (figura 3.3.1).

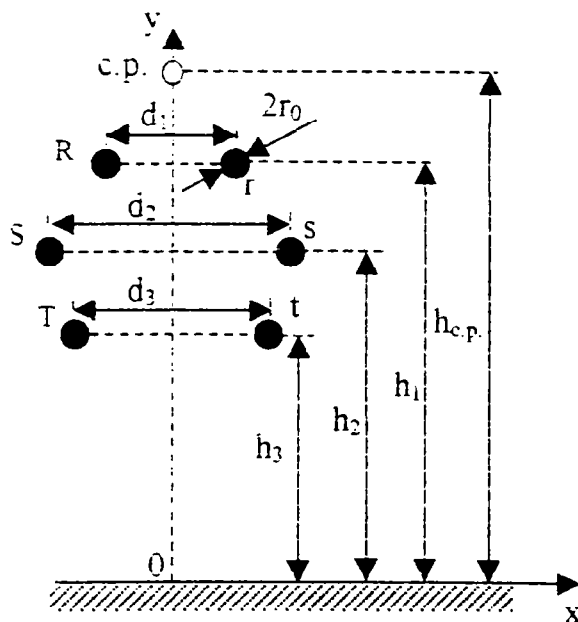


Figura 3.3.1 Coronament hexagon, linie două circuit

Astfel, tensiunea indusă electromagnetic într-o linie vecină are expresia:

$$\underline{U}_{MI} = j \cdot \omega \cdot M \cdot I \cdot l \quad (3.3.1)$$

unde:

M este inductivitatea mutuală între cele două linii pe unitatea de lungime;

l – lungimea de paralelism a celor două linii;

I – valoarea efectivă a curentului inductor

$$\omega = 2\pi f$$

Raportul între tensiunea indusă electromagnetic și cea indusă electrostatic este:

$$\frac{U_{MI}}{U_p} = \frac{\omega \cdot M \cdot I \cdot l}{\frac{q}{C}} \quad (3.3.2)$$

iar la suprafața conductorului:

$$\frac{U_{MI}}{U_p} = \frac{\Delta U}{U} \quad (3.3.3)$$

unde ΔU este căderea de tensiune determinată de curentul I în linia inductoare iar U – tensiunea față de pământ a liniei inductoare.

În regim normal de funcționare $\Delta U \ll U$, motiv pentru care tensiunea indusă electromagnetic este mult mai redusă decât cea indusă electrostatic.

Calculul tensiunilor induse în regim normal de funcționare a circuitului (R, S, T), prin cuplaj inductiv, în conductorii fazelor (r, s, t) aparținătoare circuitului scos de sub tensiune se face în Mathcad Professional, tabelul 3.3.1.

Simetria sistemului trifazat presupune ca forma curenților să fie :

$$\underline{I}_R = I; \quad \underline{I}_S = I \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} \quad \underline{I}_T = I \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} \quad (3.3.4)$$

Relațiile de calcul pentru tensiunile induse prin cuplaj inductiv sunt:

$$\begin{aligned} U_{M_r} &= -j \cdot \omega \cdot I \cdot \left(M_1 + M_2 \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} + M_3 \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} \right) \\ U_{M_s} &= -j \cdot \omega \cdot I \cdot \left(M_2 + M_4 \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} + M_5 \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} \right) \\ U_{M_t} &= -j \cdot \omega \cdot I \cdot \left(M_3 + M_5 \cdot e^{-j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} + M_6 \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3}} \right) \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

Considerăm linia electrică dublu circuit cu $U_n = 110$ kV și configurația coronamentului în triunghi ($h_1=20$ m ; $h_2=16$ m ; $h_3=12$ m și $d_1=6,1$ m ; $d_2=7,65$ m ; $d_3=6,1$ m), atunci când unul din circuite este scos de sub tensiune (r,s,t), deci devine un circuit pasiv și este cuplat inductiv cu circuitul învecinat (R,S,T), care are un regim de funcționare normal, sunt induse tensiunile cu valorile din tabelul 3.3.1.

Pentru întreaga linie de lungime l [m], tensiunile induse (tabelul 3.3.2) sunt calculate cu relația:

$$U_{M_k} = l \cdot U_{M_k} \quad (3.3.6)$$

Tabelul 3.3.1 Valorile tensiunilor induse/unitatea de lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r,s,t) la 110 kV d.c., circuitul (r,s,t) fiind scos de sub tensiune iar prin circuitul (R,S,T) circulează curentul de valoare efectivă I

[V/m]	$I=1$ [A]	$I=100$ [A]	$I=500$ [A]
U_{M_r}	$2.724 \cdot 10^{-5}$	$2.724 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
U_{M_s}	$2.449 \cdot 10^{-6}$	$2.449 \cdot 10^{-4}$	$1.224 \cdot 10^{-3}$
U_{M_t}	$2.724 \cdot 10^{-5}$	$2.724 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$

Tabelul 3.3.2 Valorile tensiunilor induse pentru întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r,s,t) la 110 kV d.c., circuitul (r,s,t) fiind scos de sub tensiune iar prin circuitul (R,S,T) circulă curentul de valoare efectivă I

[V]	I=1[A]	I=100[A]	I=500 [A]
U_{Mr}	0.354	35.411	177.053
U_{Ms}	0.032	3.183	15.915
U_{Mt}	0.354	35.411	177.053

În cazul liniei electrice, dublu circuit, cu $U_n = 220$ kV și configurația coronamentului în triunghi ($h_1=25$ m ; $h_2= 18,5$ m ; $h_3=12$ m și $d_1=9$ m ; $d_2=16$ m ; $d_3=10$ m), atunci când unul din circuite este scos de sub tensiune (r,s,t), deci devine un circuit pasiv și este cuplat inductiv cu circuitul învecinat (R,S,T), care are un regim de funcționare normal, sunt induse tensiunile cu valorile din tabelul 3.3.3.

Pentru întreaga linie de lungime l, tensiunile induse electromagnetic au valorile din tabelul 3.3.4.

Tabelul 3.3.3 Valorile tensiunilor induse/unitatea de lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r,s,t) la 220 kV d.c., circuitul (r,s,t) fiind scos de sub tensiune iar prin circuitul (R,S,T) circulă curentul de valoare efectivă I

[V/m]	I=1[A]	I=200[A]	I=500 [A]
U_{Mr}	$3.316 \cdot 10^{-3}$	$6.632 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$
U_{Ms}	$7.216 \cdot 10^{-4}$	$1.443 \cdot 10^{-3}$	$3.608 \cdot 10^{-3}$
U_{Mt}	$2.728 \cdot 10^{-3}$	$5.457 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$

Tabelul 3.3.4 Valorile tensiunilor induse pe întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r,s,t) la 220 kV d.c., circuitul (r,s,t) fiind scos de sub tensiune iar prin circuitul (R,S,T) circulă curentul de valoare efectivă I

[V]	I=1[A]	I=200[A]	I=500 [A]
U_{Mr}	2.421	484.111	1210
U_{Ms}	0.527	105.355	263.389
U_{Mt}	1.992	398.358	995.894

Linia electrică cu $U_n = 400$ kV, dublu circuit, are configurația coronamentului în hexagon cu: $h_1=26$ m ; $h_2= 16,25$ m ; $h_3=8$ m și

$d_1=14\text{m}$; $d_2=22\text{m}$; $d_3=14\text{m}$. În circuitul (r,s,t), scos de sub tensiune și cuplat inductiv cu circuitul învecinat (R,S,T), care are un regim de funcționare permanent, sunt induse tensiunile cu valorile din tabelul 3.3.5

Pentru întreaga lungime l, tensiunile induse electromagnetic au valorile din tabelul 3.3.6.

Tabelul 3.3.5 Valorile tensiunilor induse/unitatea de lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r,s,t) la 400 kV d.c., circuitul (r,s,t) fiind scos de sub tensiune iar prin circuitul (R,S,T) circulează curentul de valoare efectivă I

[V/m]	I=1[A]	I=400[A]	I=500 [A]
U_{Mr}	$2.789 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$
U_{Ms}	$5.858 \cdot 10^{-6}$	$2.343 \cdot 10^{-3}$	$2.929 \cdot 10^{-3}$
U_{Mt}	$2.732 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$

Tabelul 3.3.6 Valorile tensiunilor induse pe întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r,s,t) la 400 kV d.c., circuitul (r,s,t) fiind scos de sub tensiune iar prin circuitul (R,S,T) circulează curentul de valoare efectivă I

[V]	I=1[A]	I=400[A]	I=500 [A]
U_{Mr}	0.279	111.556	139.445
U_{Ms}	0.059	23.433	29.291
U_{Mt}	0.273	109.284	136.605

3.3.2. Circuitul inductor funcționează în regim de avarie

Calculul tensiunilor induse în conductoarele fazelor (r, s, t) prin cuplaj inductiv, atunci când circuitul inductor este în regim de avarie, presupune considerarea situației de nesimetrie creată de existența curentului electric doar pe una din faze (R), celelalte având intensitatea curentului electric, practic nulă. Închiderea unui circuit (calea de întoarcere) astfel format se poate face prin pământ sau prin conductorul de protecție.

Distanța între conductorul din aer și calea de întoarcere prin pământ poate fi calculată cu relația [23]:

$$R_p = 550 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [\text{m}]$$

unde rezistivitatea solului este: $\rho = 50 \text{ } \Omega\text{m}$ pentru sol umed și $\rho = 165 \text{ } \Omega\text{m}$ pentru sol uscat; $f = 50 \text{ Hz}$ – frecvența curentului din calea de întoarcere.

În cazul în care calea de întoarcere este și conductorul de protecție, atunci în calculul tensiunilor induse se consideră și inductivitățile mutuale introduse de acesta:

$$M_{cpk} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{R_p}{D_{cpk}} \quad [\text{H/m}]$$

unde D_{cpk} este distanța între conductorul de protecție și conductorul de fază $k = (r, s, t)$.

Pentru regimul de funcționare nesimetric se consideră scurtcircuitul monofazat cu valorile curenților de scurtcircuit din tabelul 3.2.10.

Dacă calea de întoarcere este pământul, valorile tensiunilor induse prin cuplaj inductiv, pentru linia electrică de 110 kV, 220 kV și 400 kV sunt prezentate în tabelele 3.3.7, 3.3.8 și 3.3.9, iar pentru întreaga linie de lungime l , în tabelele 3.3.10, 3.3.11 și 3.3.12.

Tabelul 3.3.7 Valorile tensiunilor induse/m, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 110 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V/m]	$I=1[\text{A}]$	$I=500[\text{A}]$	$I_{sc}[\text{kA}]$
U_{Mr}	$2.828 \cdot 10^{-4}$	0.141	1.693
U_{Ms}	$2.662 \cdot 10^{-4}$	0.133	1.593
U_{Mt}	$2.514 \cdot 10^{-4}$	0.126	1.504

Tabelul 3.3.8 Valorile tensiunilor induse/m. prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 220 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V/m]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
U _{Mf}	2.584 10 ⁻²	0.129	0.662
U _{Ms}	2.302 10 ⁻²	0.115	0.59
U _{Mt}	2.219 10 ⁻²	0.111	0.569

Tabelul 3.3.9 Valorile tensiunilor induse/m. prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 400 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V/m]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
U _{Mf}	2.306 10 ⁻²	0.115	4.153
U _{Ms}	2.068 10 ⁻²	0.103	3.723
U _{Mt}	2 10 ⁻²	0.1	3.601

Tabelul 3.3.10 Valorile tensiunilor induse pe întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 110 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
U _{Mf}	3.677	1.838 10 ³	2.412 10 ⁴
U _{Ms}	3.46	1.73 10 ³	2.27 10 ⁴
U _{Mt}	3.268	1.634 10 ³	2.144 10 ⁴

Tabelul 3.3.11 Valorile tensiunilor induse pe întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 220 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
U _{Mf}	18.864	9.432 10 ³	4.835 10 ⁴
U _{Ms}	16.808	8.404 10 ³	4.308 10 ⁴
U _{Mt}	16.196	8.098 10 ³	4.152 10 ⁴

Tabelul 3.3.12 Valorile tensiunilor induse pe întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 400 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
U _{Mf}	2.306	1.153 10 ³	4.153 10 ⁴
U _{Ms}	2.068	1.034 10 ³	3.723 10 ⁴
U _{Mt}	2	999.963	3.601 10 ⁴

În cazul închiderii circuitului prin conductorul de protecție, pentru tensiunile induse în conductoarele fazelor (r, s, t), ale circuitului pasivizat se obțin valorile din tabelele 3.3.13 ($U_n=110$ kV, $h_{cp}=26$ m), 3.3.14 ($U_n=220$ kV, $h_{cp}=43,4$ m) și 3.3.15 ($U_n=400$ kV, $h_{cp}=52$ m), iar cele corespunzătoare liniei electrice în totalitatea lungimii ei, sunt cele din tabelele 3.3.16, 3.3.17 și 3.3.18.

Tabelul 3.3.13 Valorile tensiunilor induse/m. prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 110 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V/m]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
\bar{U}_{Mr}	$2.2 \cdot 10^{-5}$	0.011	0.139
U_{Ms}	$2.6 \cdot 10^{-5}$	0.013	0.174
U_{Mt}	$2.6 \cdot 10^{-5}$	0.013	0.172

Tabelul 3.3.14 Valorile tensiunilor induse/m. prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 220 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V/m]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
\bar{U}_{Mr}	$4.6 \cdot 10^{-5}$	0.023	0.12
U_{Ms}	$3.8 \cdot 10^{-5}$	0.019	0.1
U_{Mt}	$4.2 \cdot 10^{-5}$	0.021	0.11

Tabelul 3.3.15 Valorile tensiunilor induse/m. prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 400 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V/m]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
\bar{U}_{Mr}	$4.109 \cdot 10^{-5}$	0.021	0.74
U_{Ms}	$3.787 \cdot 10^{-5}$	0.019	0.682
U_{Mt}	$4.208 \cdot 10^{-5}$	0.021	0.758

Tabelul 3.3.16 Valorile tensiunilor induse pe întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 110 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
U _{Mfr}	0.2616	138.196	1.813 10 ³
U _{Mfs}	0.344	172.529	2.263 10 ³
U _{Mft}	0.34	170.47	2.236 10 ³

Tabelul 3.3.17 Valorile tensiunilor induse pe întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 220 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S.T)

[V]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
U _{Mfr}	3.4	1.707 10 ³	8.749 10 ³
U _{Mfs}	2.838	1.419 10 ³	7.273 10 ³
U _{Mft}	3.122	1.561 10 ³	8 10 ³

Tabelul 3.3.18 Valorile tensiunilor induse pe întreaga lungime, prin cuplaj inductiv în conductoarele circuitului (r.s.t) la 400 kV d.c., circuitul (r.s.t) fiind scos de sub tensiune, în funcție de valoare efectivă I a curentului prin circuitul (R.S,T)

[V]	I=1[A]	I=500[A]	I _{sc} [kA]
U _{Mfr}	0.411	205.469	7.398 10 ³
U _{Mfs}	0.379	189.366	6.819 10 ³
U _{Mft}	0.421	210.409	7.576 10 ³

Tensiunile induse prin cuplaj inductiv sunt mai mari în cazul perechilor de faze omoloage apropiate (R - r) și diminuate în cazul perechilor de faze omoloage mult depărtate (S -s).

Așa după cum se poate observa, valori mari ale tensiunilor induse prin cuplaj inductiv se obțin în regim de avarie (scurtcircuit monofazat) a circuitului inductor în comparație cu cele obținute în regim permanent de funcționare a acestuia, când sistemul trifazat de curenți inductori exercită un efect de compensare asupra fluxurilor magnetice determinate de aceștia.

O altă remarcă se poate face asupra valorilor tensiunii induse prin influență electromagnetică în funcție de calea de întoarcere a curentului. Dacă aceasta este conductorul de protecție, nu pământul, se constată o diminuare a valorilor tensiunii induse

Pentru calcularea inducției magnetice B , în puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene, dublu circuit, de 110 kV, cu configurația coronamentului în hexagon ($h_1=20\text{m}$; $h_2=16\text{m}$; $h_3=12\text{m}$ și $d_1=6,1\text{m}$; $d_2=7,65\text{m}$; $d_3=6,1\text{m}$), atunci când unul din circuite este scos de sub tensiune (r,s,t), deci devine un circuit pasiv, iar pe circuitul învecinat (R,S,T), are loc un regim de scurtcircuit monofazat, s-au folosit relațiile (3.1.12) și (3.1.13). Valorile corespunzătoare sunt prezentate în tabelul 3.3.19 cu reprezentarea grafică corespondentă din figura 3.3.2. Valoarea curentului de scurtcircuit așa după cum rezultă din tabelul 3.2.10 este: $I_{sc} = (2,686-5,984j) 10^3 \text{ A}$

Tabelul 3.3.19 Valorile inducției magnetice în vecinătatea LEA 110kV, d.c., atunci când (r,s,t) este scos de sub tensiune, iar pe (R,S,T) are loc un scurtcircuit monofazat

[m]	B[μT]		
y_p, x_p	0	10	20
21	408.7	100.2	56.86
19	408.7	100.2	56.86
17	306.6	97.97	56.44
15	224	93.87	55.62
13	171.8	88.58	54.46
11	138	82.75	53.01
9	114.9	76.86	51.36
7	98.25	71.22	49.57
2	71.86	59	44.86
1.5	69.97	57.94	44.38
1	68.17	56.91	43.92
0.5	66.47	55.91	43.45

Tabelul 3.3.21 Valorile inducției magnetice în vecinătatea LEA 400kV, d.c., atunci când (r,s,t) este scos de sub tensiune, iar pe (R,S,T) are loc un scurtcircuit monofazat

[m]	B[μ T]		
$y_p \backslash x_p$	0	10	20
27	509.2	211.4	133.3
25.5	513.1	211.7	133.3
24	494.6	210.4	133
22.5	460.1	207.5	132.3
21	418.6	203.2	131.1
19.5	376.9	197.8	129.7
18	338.7	191.6	127.9
16.5	305.1	184.9	125.8
15	276.2	177.8	123.5
13.5	251.3	170.6	121
2	144	122.4	99.68
1.5	141.3	120.7	98.76
1	138.7	119.1	97.86
0.5	136.2	117.5	96.96

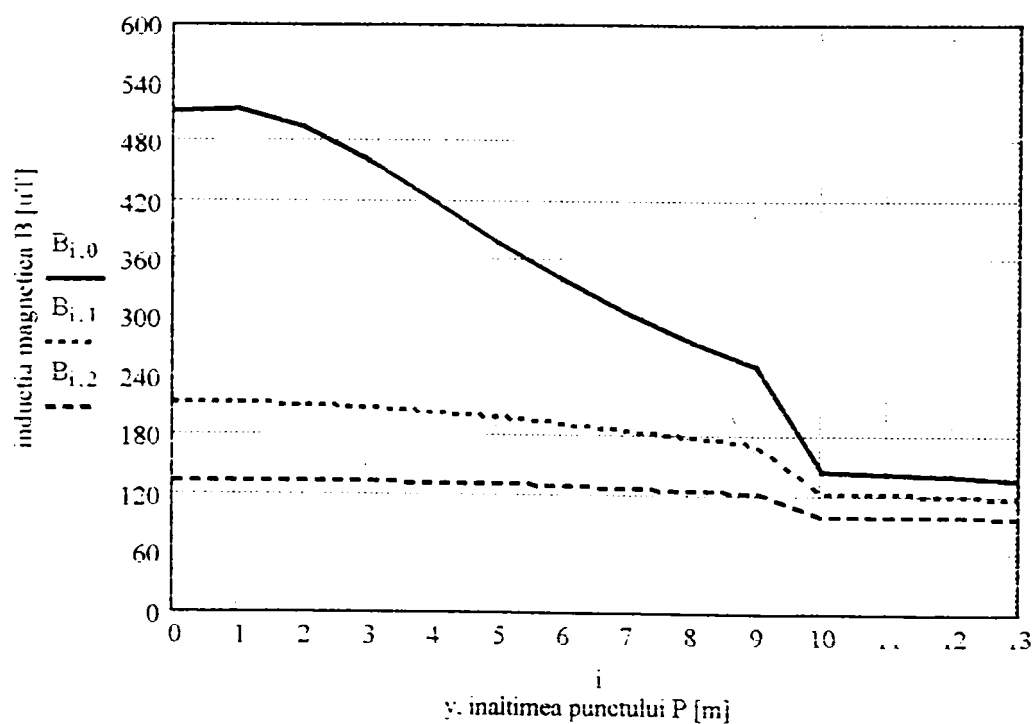


Figura 3.3.4. Variația inducției magnetice B [μ T] în funcție de poziția punctului P ($x=0;10;20$ și $y=27; 25.5; 24; 22.5; 21; 19.5;18;16.5;15;13.5;2;1.5;1;0.5$ m)

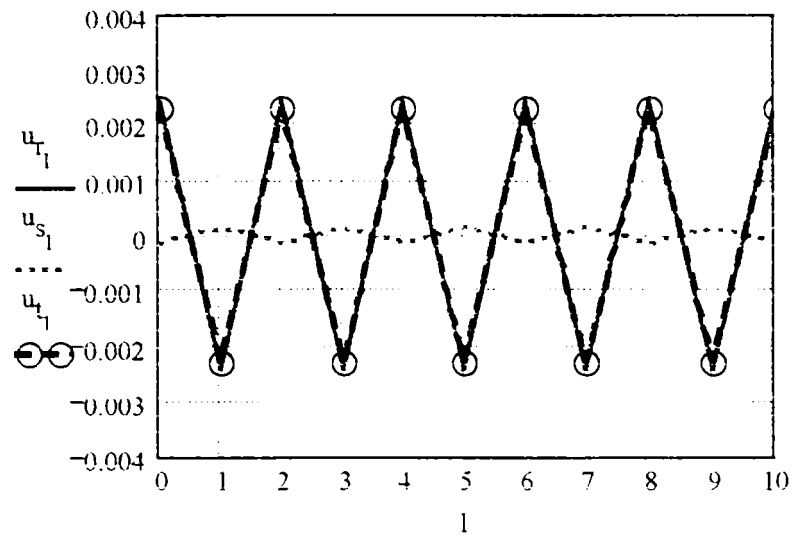


Figura 3.3.5. Variația tensiunilor induse în regim simetric prin cuplaj inductiv, pentru intervalul de timp $\Delta t = 0.1$ s. cazul LEA 110 kV, d.c.

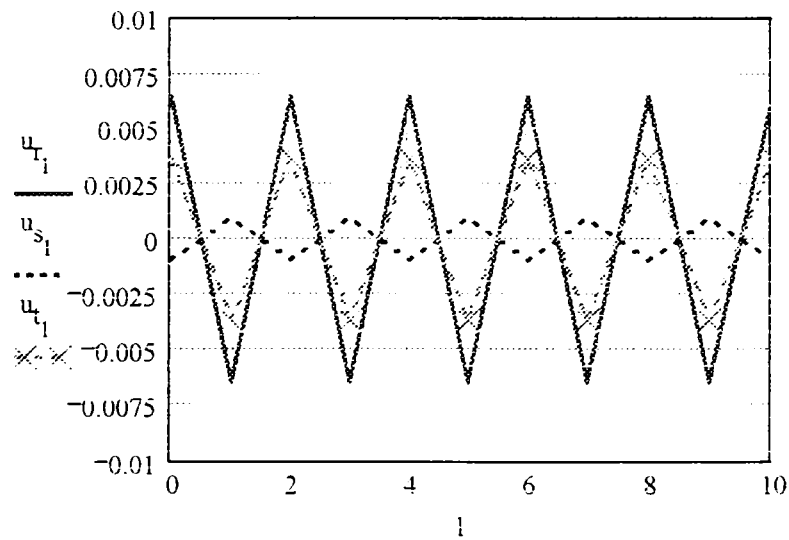


Figura 3.3.6. Variația tensiunilor induse în regim simetric prin cuplaj inductiv, pentru intervalul de timp $\Delta t = 0.1$ s. cazul LEA 220 kV, d.c.

Din variația în timp a tensiunilor induse în regim simetric prin cuplaj inductiv se observă influența exercitată de geometria liniei electrice asupra valorilor calculate.

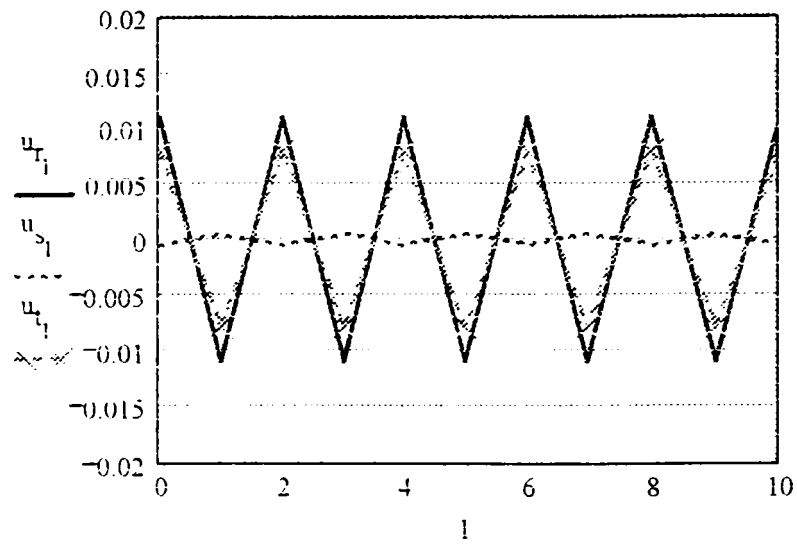


Figura 3.3.7. Variația tensiunilor induse în regim simetric prin cuplaj inductiv, pentru intervalul de timp $\Delta t = 0,1$ s, cazul LEA 400 kV, d.c.

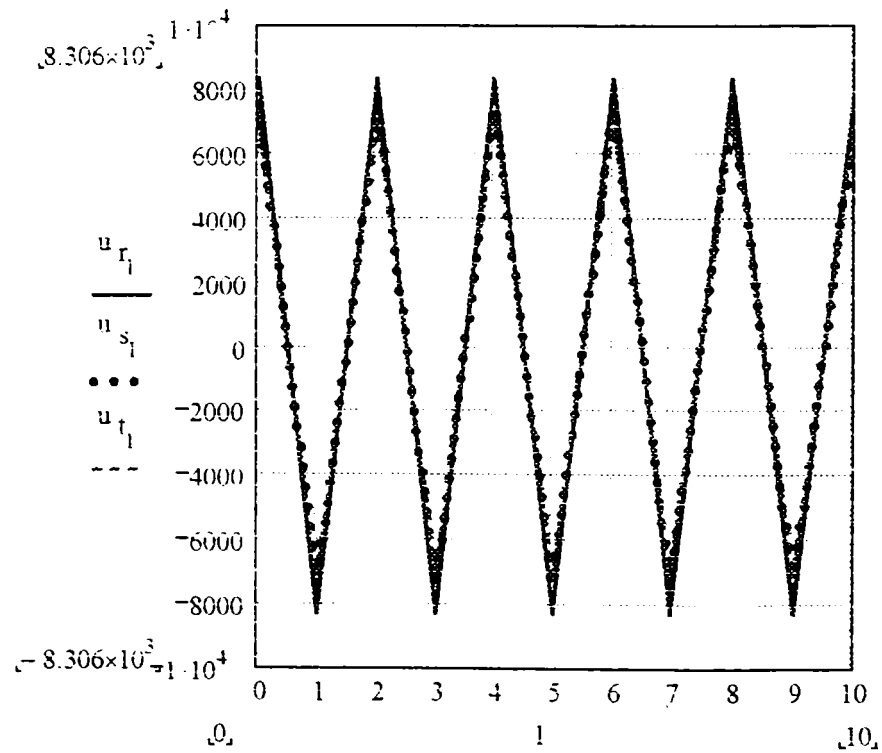


Figura 3.3.8. Variația tensiunilor induse în regim nesimetric prin cuplaj inductiv, pentru intervalul de timp $\Delta t = 0,1$ s, cazul LEA 400 kV, d.c., (calea de întoarcere este pământul)

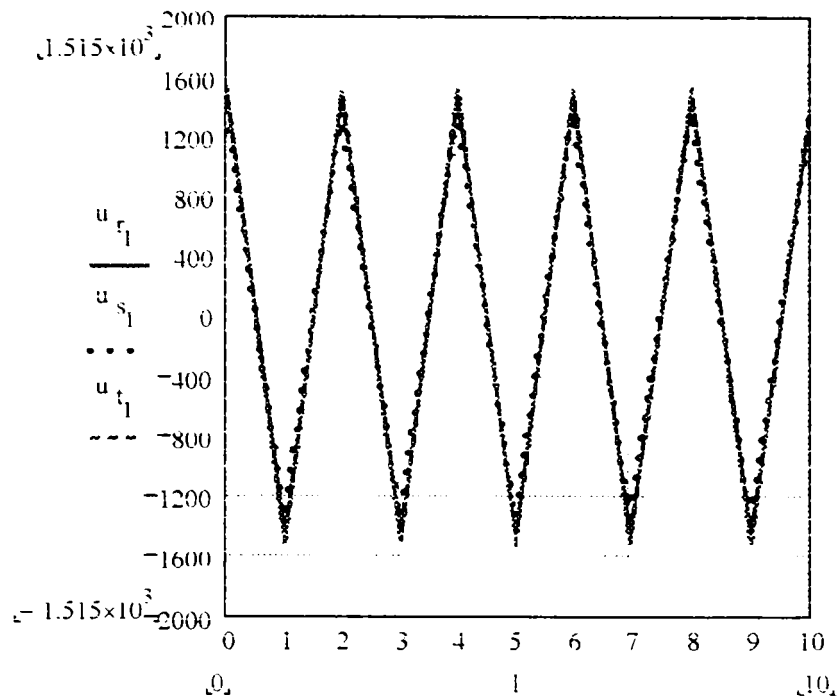


Figura 3.3.9. Variația tensiunilor induse în regim nesimetric prin cuplaj inductiv, pentru intervalul de timp $\Delta t = 0.1$ s. cazul LEA 400 kV. d.c.. (calea de întoarcere este a curentului este conductorul de protecție)

Din ilustrările grafice, figura 3.3.8 și 3.3.9 se observă o diminuare semnificativă a tensiunilor induse prin cuplaj inductiv atunci când calea de întoarcere a curentului este conductorul de protecție.

3.4. Influența rezistivă

Curenții de defect determină influențe prin cuplaj rezistiv (galvanic sau conducție) [9],[35]. Valorile tensiunilor care apar în acest caz pe structurile conductoare prezintă un pericol pentru securitatea indivizilor.

Calculul repartiției de potențial în vecinătatea stațiilor electrice de înaltă tensiune, se face în ipoteza unei prize de pământ asimilată electrodului în formă de placă, introdusă într-un sol omogen de o anumită rezistivitate.

Prizele de pământ ale stațiilor de înaltă tensiune au legături atât cu prizele de pământ a celorlalte stații de înaltă tensiune și posturi de transformare, cât și cu priza de pământ naturală definită prin învelișurile metalice ale cablurilor subterane, conducte de apă și canalizare, șine de cale ferată, traverse din beton, fundațiile din beton cu armătură ale diferitelor construcții, astfel dimensiunile reale ale prizei cresc, iar repartiția de potențial se face după o curbă cu panta mai mică.

Deoarece valorile tensiunilor induse prin cuplaj rezisiv obținute în urma calculelor sunt cu mult mai mari decât cele reale, obținute în urma măsurătorilor efectuate, se impune introducerea unui factor subunitar care ține seama de gradul de echipotențializare datorat instalațiilor metalice subterane.

3.4.1. Considerații asupra modului de calcul al tensiunilor determinate prin cuplaj rezistiv

Un calcul al tensiunilor induse prin cuplaj galvanic presupune cunoscute valorile curentului de scurtcircuit monofazat care circulă prin priza de pământ, I_p ; rezistivitatea solului, ρ ; rezistența de dispersie a prizei de pământ, R_p ; raza echivalentă a prizei stației de înaltă tensiune, a .

Fie o stație 110 / 20 kV, cu raza medie $a=50\text{m}$. Intensitatea curentului electric de punere la pământ, se consideră ca fiind $I_p = 20 \text{ kA}$ iar rezistența de punere la pământ $R_p = 0,2 \Omega$.

Distribuția de potențial se determină cu formula [35]:

$$V_{(x)} = V_p \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin \frac{a}{x} \quad (3.4.1)$$

unde:

$$V_p = V_{(a)} = R_p \cdot I_p = 4 \cdot 10^3 \text{ [V]} \quad (3.4.2)$$

Dacă $r = 5 \cdot 10^3$ m este raza zonei de interes, atunci potențialul în punctele circumferinței corespunzătoare va fi $V(r) = 33.507$ [V].

O prezentare grafică a variației potențialului electric în vecinătatea stației, se face în figura 3.4.1.

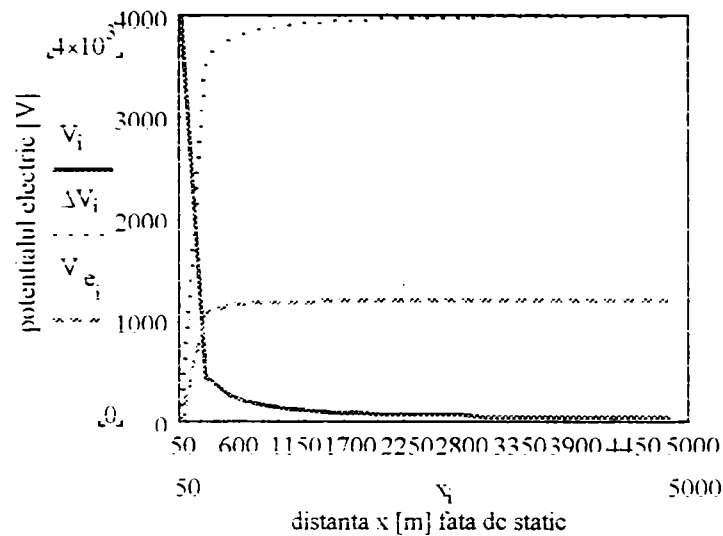


Figura 3.4.1. Variația potențialului electric V , a diferenței de potențial între două puncte ΔV și a potențialului corectat V_e .

Zona considerată periculoasă, în punctele căreia potențialul depășește valoarea de 430 V, prevăzută în norme ca limită acceptată, are raza $r = 297,514$ m și suprafața corespunzătoare de $2,781 \cdot 10^5$ m² în care se impun măsuri de protecție specifice (deschiderea buclei de pământare, intercalarea unui transformator de separare sau a unui transformator de neutralizare cu miez toroidal în circuitul semnalului util).

Reducerea zonei periculoase s-ar putea face printr-o micșorare a valorii rezistenței prizei de pământ [35].

Deoarece la priza de pământ a stației electrice de înaltă tensiune se racordează structura metalică îngropată în sol, care constituie o priză

naturală, se poate susține că propagarea potențialului electric în domeniul învecinat se face prin această priză naturală.

Datorită volumului de metal îngropat în sol, există o anumită echipotențializare între diferite puncte din vecinătatea stației.

Pentru corectarea formulelor de calcul aplicate, astfel ca acestea să corespundă cât mai exact valorilor reale, se poate considera o valoare mult mai mică decât cea reală a rezistivității solului, în calculul rezistenței prizei de pământ, ținând astfel cont de existența interconexiunii cu priza de pământ naturală.

O altă posibilitate de corectare a formulelor de calcul ar consta în introducerea unor factori de echipotențializare [35], $e = 0,2 \dots 0,5$, astfel ca formula existentă pentru determinarea diferenței de potențial să devină:

$$\Delta V_x = e \cdot I_p \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin \frac{a}{x} \right) \quad (3.4.3)$$

Din calculele prezentate se observă că odată cu creșterea curenților de scurtcircuit zona potențialelor electrice periculoase se extinde.

Prin echipotențializare, datorită rezistenței reale a prizei de pământ a stației electrice, îmbunătățită de priza naturală, precum și dimensiunile ei geometrice, diferențele de potențial față de punctele depărtate rămân în limitele calculate.

3.4.2. Limitarea tensiunilor induse prin cuplaj rezistiv

Pentru micșorarea tensiunilor induse prin cuplaj rezistiv sub valoarea de 1200 V, sunt realizate legături conductive suplimentare între instalațiile de legare la pământ ale stațiilor electrice de înaltă tensiune [36].

Metoda constă în șuntarea rezistenței corpului omenesc și a izolației față de pământ ale conductoarelor printr-un circuit de o impedanță suficient de mică pentru curenții inductivi, dar cu rezistență

foarte mare pentru curentul continuu din circuit. În stații, fiecare conductor activ se conectează la instalația de legare la pământ printr-o inductivitate înseriată cu o capacitate, acordate la rezonanță.

Când are loc un scurtcircuit monofazat, circulația curentului de defect se face prin circuitele rezonante, dimensionate astfel încât rezistența bobinei să fie suficient de mică, pentru ca tensiunea la capetele acesteia să fie sub limitele admise, adică 430 V în cazul unui timp de deconectare $t \in (0,5 \text{ s}, 3 \text{ s}]$, sau 650 V în cazul unui timp de deconectare $t \leq 0,5 \text{ s}$ a defectului.

Experiența de exploatare dovedește că în ultima perioadă n-au avut loc incidente pe liniile electrice aeriene din cauza tensiunilor induse prin cuplaj rezistiv [10], [60]. Din acest motiv nu s-a considerat oportun a aprofunda această problemă în lucrare; totuși pentru uniformitatea conținutului lucrării ea a fost prezentată succint, cu elemente cunoscute din literatura de specialitate.

3.5.Considerarea conductorului de gardă

3.5.1.Rolul conductorului de protecție

Liniile electrice aeriene sunt prevăzute cu conductoare de protecție (de gardă), legate la pământ în dreptul fiecărui stâlp sau numai în anumite puncte ale liniei.

Conductoarele de protecție pun în paralel stâlpii în cazul unei lovituri directe de trăsnet, sau a unui scurtcircuit cu punere la pământ. În acest fel rezistența echivalentă de punere la pământ prin sistemul conexiunii paralele a prizelor stâlpilor se micșorează, conducând la micșorarea pronunțată a tensiunii de atingere și de pas, la $f=50\text{Hz}$ și mai puțin semnificativă în cazul loviturilor de trăsnet, unde curentul are frecvența echivalentă mult mai mare.

Prin conductorul de protecție se asigură ecranarea liniilor electrice aeriene față de efectele câmpurilor atmosferice care pot consta în tensiuni induse de valori foarte mari.

Într-o anumită măsură este diminuată influența liniilor de înaltă tensiune, asupra liniilor vecine. Pentru eliminarea pierderilor de putere prin conductorul de protecție în regim normal dezechilibrat, acesta se leagă la pământ doar în câteva puncte. În acest caz linia este împărțită în zone astfel încât la una din extremitățile zonei, conductorul este legat rigid la pământ, iar la cealaltă extremitate se leagă la pământ prin intermediul unui eclator.

În cazul apariției unei unde de supratensiune, eclatorul se amorsează și conductorul se pune la pământ în ambele capete, realizând rolul său de protecție.

(Liniile cu $U_{\text{max}} \geq 60 \text{ kV}$ trebuie protejate pe toată lungimea, iar cele de 25 și 35 kV se recomandă a fi protejate doar la intrarea în stații.)

3.5.2. Efectul de ecranare al conductoarelor de protecție.

Câmpul electric atmosferic, determinat cu precădere de stratul ionizat din jurul globului pământesc, care formează cu suprafața pământului un condensator sferic, se poate considera uniform în apropierea solului unde se găsesc conductoarele liniilor electrice aeriene.

Intensitatea câmpului electric atmosferic este dependent de starea meteorologică, prin faptul că în determinarea sa pe timp de furtună intervin și norii aflați în stare de electrizare, care împreună cu solul în care s-au indus sarcini electrice, formează un condensator plan. Astfel, intensitatea câmpului electric atmosferic crește la valori de ordinul a

$100 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$. Pe timp frumos acesta este de ordinul a $100 \frac{\text{V}}{\text{m}}$.

Efectul de ecranare față de potențial a conductorului de protecție constă într-o micșorare relativă a potențialului U în punctul P în absența conductorului de protecție [22]:

$$\eta = \frac{U - U_{cp}}{U} = \frac{h_{cp}}{h} \cdot \frac{\ln \frac{r_p'}{r_p}}{\ln \frac{2 \cdot h_{cp}}{r_{cp}}}, \quad (3.5.1)$$

unde cu U_{cp} s-a notat potențialul punctului în care se găsește conductorul de protecție ; h_{cp} - înălțimea la care este montat conductorul de protecție, de rază r_{cp} ; h - înălțimea punctului P situat la distanțele r_p și r_p' de conductorul de protecție și imaginea sa.

Pentru eficacitatea ecranării în punctele în care sunt situate conductoarele active (distanța suficient de mică față de conductorul de protecție, în raport cu înălțimea de fixare a acestuia și aproape de verticala lui) se obține expresia:

$$\eta = \frac{h_{cp}}{h} \cdot \frac{\ln \frac{h_{cp} + h}{h_{cp} - h}}{\ln \frac{2 \cdot h_{cp}}{r}}, \quad (3.5.2)$$

unde h reprezintă înălțimea față de sol a conductorului activ.

Eficacitatea ecranării față de potențial, la liniile cu un singur conductor de protecție este de ordinul 30-40%. În cazul folosirii a două conductoare de protecție, eficacitatea ecranării crește în jurul valorii de 60%.

Eficacitatea ecranării față de potențial este cu atât mai mare cu cât conductorul activ este mai apropiat de conductorul de protecție, deoarece prezența conductorului de protecție determină micșorarea potențialului în toate punctele învecinate, indiferent de direcție.

Față de câmpul electric atmosferic, conductorul de protecție realizează un efect de “umbrire” prin scăderea valorilor intensității câmpului electric în punctele situate în partea inferioară acestuia.

La o anumită distanță față de conductorul de protecție:

$$d_{cp} = \frac{h_{cp}}{\ln \frac{2 \cdot h_{cp}}{r_{cp}}}, \quad (3.5.3)$$

intensitatea câmpului electric rezultat este nulă. ($d_{cp} = 3,36$ m pentru linia electrică aeriană de 110kV, $d_{cp} = 5,7$ m pentru LEA de 220kV).

Câmpul electric se concentrează spre partea superioară a suprafeței conductorului de protecție, determinând o ionizare intensă a aerului în această parte și implicit orientarea loviturii directe de trăsnet spre conductorul de protecție, evitând astfel conductoarele active. În consecință, conductoarele active vor fi plasate în zonele cu cele mai mici valori ale intensității câmpului electric, adică în vecinătatea punctului aflat la distanța d_{cp} față de conductorul de protecție.

Eficacitatea conductorului de protecție este maximă la distanța d_{cp} sub acesta și scade în continuare cu înălțimea, fiind nulă la distanța $\frac{d_{cp}}{2}$.

Este necesar să se plaseze conductoarele active în zona unde conductorul de protecție are eficacitatea maximă. Faptul că $d_{cp} \approx h_{cp} \cdot 10^{-1}$, permite amplasarea conductoarelor active suficient de aproape de conductorul de protecție, fără a fi necesară o mărire exagerată a stâlpului.

Problema așezării conductoarelor de fază astfel încât să fie ecranate față de câmp în mod egal și probabilitatea loviturii directe să fie aceeași pentru toate fazele, presupune cuprinderea lor sub conductorul de

protecție, în interiorul unui unghi diedru ($\alpha = 20^\circ - 30^\circ$), format de planul vertical și un plan înclinat, care trece prin conductorul de protecție.

3.5.3. Factorul de reducere al conductorului de protecție

Prin prezența sa, conductorul de protecție determină o diminuare a tensiunilor induse prin cuplaj galvanic și inductiv în circuitele electrice învecinate liniilor electrice, cu un factor dat de următoarea relație [37]:

$$r_{cp} = \left| 1 - \frac{Z_{acp}}{Z_{cp}} \right| \quad (3.5.4)$$

în care:

Z_{acp} este impedanța complexă mutuală între conductorul activ și conductorul de protecție; Z_{cp} – impedanța complexă proprie a conductorului de protecție.

Factorul de reducere astfel calculat nu depinde de rezistența electrică de dispersie a prizei de punere la pământ a stâlpilor liniilor electrice aeriene, deci nu ține seama de repartiția galvanică a curentului de scurtcircuit prin stâlpii apropiați stâlpului cu defect.

Deoarece inducția mutuală (3.3.8) între conductorul activ și conductorul de protecție crește odată cu creșterea rezistivității solului, valorile r_{cp} sunt sensibil mai scăzute în zonele în care solul are o rezistivitate mai mare. Valoarea rezistenței electrice de dispersie a prizei de punere la pământ a stâlpilor, $R_s \leq 20 \Omega$, influențează favorabil factorul de reducere al conductorului de protecție.

3.6. Concluzii

Capitolul de față este capitolul de bază al tezei, care de fapt conturează obiectul acesteia. Astfel, lucrarea de față și-a propus să aprofundeze aspecte legate de influențele electrostatice și electromagnetice, care apar între conductoarele liniilor cu dublu circuit, unul din circuite fiind în funcțiune și celălalt scos din funcțiune și accesibil personalului de exploatare care efectuează lucrări de reparații sau revizie.

Ca urmare s-au considerat coronamente cu simplu și dublu circuit pentru linii cu tensiuni nominale de 110, 220, 400 kV și corespunzător în regim normal de funcționare și de avarie pentru circuitele în funcțiune s-au calculat la nivelul conductoarelor circuitului scos din funcțiune tensiunile induse prin cuplaj capacitiv sau inductiv. Tensiunile induse rezistiv, apar doar la nivelul stațiilor de la capetele (sau de pe traseul) liniei, mai mult experiența de exploatare a liniilor electrice aeriene a condus la concluzia că incidentele produse pe circuitele scoase din funcțiune ale unor linii cu dublu circuit, unul din circuite aflându-se în funcțiune nu s-au datorat cuplajelor rezistive, ci celor capacitive și inductive. Ca urmare acestea au fost aprofundate în lucrare.

Pentru început a fost prezentată geometria liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune, adică distanțele dintre faze și respectiv dintre faze și pământ; apoi s-a calculat matricea capacităților și inductivităților de fază. În mod deosebit a interesat matricea parametrilor mutuali dintre conductoarele celor două circuite: capacități și inductivități. Datorită poziției simetrice a conductoarelor de protecție în raport cu cele două circuite, nu s-a luat în considerare prezența conductoarelor de protecție. Așa cum era de așteptat, matricile parametrilor mutuali dintre

conductoarele de fază ale celor două circuite nu prezintă simetrie în raport cu diagonala principală, ci în raport cu elementul (median) a_{22} . Această observație este valabilă de regulă pentru toate elementele de rețea: linie și transformator (sau bobine de reactanță trifazate).

La acestea se adaugă și următoarele:

-capacitățile mutuale C_{ki} ($k=R,S,T$; $i=r,s,t$) se caracterizează prin aceea că $C_{Rr}=C_{Tt}$, $C_{Rr} \neq C_{Ss}$ cu 3,39% pentru 110kV, cu 7,71% pentru 220kV și cu 8,107% pentru linia de 400kV. La linia de 220kV apar diferențe și între capacitățile C_{Rr} și C_{Tt} , diferența fiind de 1,3%;

-cu creșterea tensiunii nominale a liniei diferențele dintre capacitățile mutuale dintre fazele omoloage se accentuează, aceasta nedepășind însă 10%;

-valorile capacităților mutuale dintre fazele neomoloage scad cu creșterea tensiunii nominale, fapt explicabil dacă se are în vedere, că odată cu creșterea tensiunii nominale cresc distanțele de izolație;

-pentru inductivitățile mutuale diferențe dintre termenul median și cei alăturați de pe diagonala principală este de 5% pentru 110 kV, de 1,8% pentru 220 kV și de 2,26% pentru 400 kV. Deci și inductivitățile mutuale diagonale diferă dar nu pe măsură ce tensiunea nominală crește; asimetria cea mai mare o prezintă coronamentul stâlpului de 220 kV.

-termenii nediagonali scad cu creșterea tensiunii nominale a liniei, situație evidentă, de la $L_{Sr}=0,847\mu\text{H/m}$ la 110 kV spre exemplu la $0,658\mu\text{H/m}$ la 400 kV;

În ceea ce privește valorile potențialului electric și ale intensității câmpului electric creat de liniile electrice aeriene cu simplu circuit, datorită sarcinilor electrice în puncte situate în vecinătate se pot menționa următoarele:

-cele mai mari valori ale potențialului față de pământ și ale intensității câmpului electric pentru linia de 110kV se obțin în vecinătatea conductorului fazei T, în punctul de coordonate $x=0$ și $y=12,25\text{m}$, adică pe axa stâlpului, la înălțimea de 12,25m, unde $U=30,66\text{kV}$ și $E=41,21\text{kV/m}$;

-pe măsură ce ne îndepărtăm de axa stâlpului, potențialul și intensitatea câmpului electric scade rapid, astfel la 3m depărtare și la aceeași înălțime, $U=8,029\text{kV}$ iar $E=2,791\text{ kV/m}$;

-cele mai mari valori ale potențialului față de pământ și ale intensității câmpului electric pentru linia de 220 kV se obțin în vecinătatea conductorului fazei S, pentru punctul de coordonate $x=0$ și $y=10,5\text{m}$, unde $U=18,93\text{kV}$ și $E=22,25\text{kV/m}$;

-la o anumită distanță de axa stâlpului, potențialul și intensitatea câmpului electric depind de înălțime; valorile lui U și E cresc cu scăderea înălțimii, dar scăderea este neliniară; astfel dacă ne referim la puncte situate în vecinătatea fazei T, la înălțimea de 10,5 și 12m, valorile lui U devin 6,489kV; 5,157kV, respectiv ale lui E , 1,812 kV/m; 1,437 kV/m;

-cele mai mari valori ale potențialului și ale intensității câmpului electric pentru linia de 400 kV se obțin în vecinătatea conductorului fazei S la înălțimea de 20m și practic pe axa stâlpului, valorile lui U și E fiind $U=40,35\text{kV}$ iar $E=20,36\text{ kV/m}$;

-în vecinătatea conductorului fazei T, valorile lui U și E scad, atingând valori de cca 19,7 kV, respectiv 3,3 kV/m;

-pentru LEA de 400 kV Mintia-Arad, calculele efectuate au scos în evidență valori mari ale potențialului electric față de suprafața solului și respectiv ale intensității câmpului electric în puncte situate în vecinătatea conductorului fazei S; astfel UC [98,12; 159,8 kV] iar EC [8,68; 50,7 kV/m];

-în punctele cu săgeată maximă (puncte în care conductorul se apropie cel mai mult de sol), valorile lui U și E în cazul folosirii coronamentului portal sunt mai mici decât în cazul folosirii coronamentului triunghi; situația este indusă în vecinătatea stâlpului. Dacă diferențele sunt relativ mici în cazul potențialului, nu același lucru se poate afirma în cazul intensității câmpului electric; unele diferențe sunt de cca. 50%;

În cazul liniilor electrice aeriene de transport cu dublu circuit de tensiuni nominale 110; 220 și 400 kV s-au obținut următoarele concluzii:

-pentru linia de 110 kV comportarea acesteia sub aspectul tensiunilor induse electrostatic diferă, dependent de faptul că, coronamentul este hexagon sau portal; în prima situație pentru înălțimi cuprinse între 0,5 și 2 m și distanțe față de axa stâlpului de 0 până la 24 m, potențialul electric și respectiv intensitatea câmpului electric E este cuprinsă între 0,027 și 1,77 kV, respectiv 4,17 și 380 V/m. În a doua situație, pentru același domeniu de puncte practic U și E variază între 0,091 și 4,511 kV, respectiv 1,94 și 799 V/m, adică limite de variații foarte mari. De remarcat că pentru coronamentul hexagon, așa cum era de așteptat valorile lui U și E sunt sensibil mai reduse în aceleași puncte decât pentru coronamentul portal. Considerând prin comparație linia de 110 kV cu simplu circuit se constată că în aceleași puncte în cazul liniei de dublu circuit, indiferent de coronament valorile potențialului și ale intensității câmpului electric sunt mai mari;

-pentru linia de 220 kV, coronament hexagon și puncte de înălțimi cuprinse între [0,5; 2 m] și distanțe față de axul stâlpului cuprinse între [0,58 m] s-au obținut pentru potențial valori cuprinse între 0,04 și 3,943 kV iar pentru intensitatea câmpului electric valori de [2,55; 734 V/m]; cu creșterea înălțimii de la 0,5 la 2 m la aceeași distanță valorile lui U și E cresc, iar pentru aceeași înălțime, dar la creșterea distanței valorile lui U

și E scad; variațiile celor două mărimi sunt practic liniare în raport cu înălțimea, dar de pante diferite, dependent de distanța pe orizontală a punctului la care ne referim. Referitor la punctele de valori maxime ale lui U și E , se remarcă cele două puncte de coordonate $(0; 0,5)$ și $(0; 2)$ pentru care U și E au valorile $U=\{2,95 \text{ kV}; 3,943 \text{ kV}\}$ și $E=\{574 \text{ V/m}; 734 \text{ V/m}\}$. Făcând o comparație între valorile lui U și E obținute în cazul liniei cu dublu circuit și a celei cu simplu circuit, se constată că în primul caz valorile obținute în aceleași puncte din vecinătate sunt mai mari, majorarea nu este însă excesivă, de exemplu în punctul de coordonate $(0; 2)$ în primul caz $U=3,943 \text{ kV}$; $E=734 \text{ V/m}$ iar în al doilea $U=2,808 \text{ kV}$ iar $E=599 \text{ V/m}$, deci o creștere de cca. 22,0%.

-pentru linia de 400 kV cu dublu circuit, cu coronament hexagon considerând puncte de coordonate $x \in [0; 31\text{m}]$ și $y \in [0,5; 2\text{m}]$ s-au obținut pentru potențialul U , valori cuprinse între $[0,59; 9,57 \text{ kV}]$ iar pentru intensitatea câmpului electric E , valori cuprinse între $[0,041; 1,484 \text{ kV/m}]$. Comparativ cu linia cu simplu circuit se constată o reducere semnificativă a valorilor lui U și E . Astfel în cazul liniei cu dublu circuit în punctele de coordonate $(0; 1,5)$, $(0; 2)$ $U=\{7,247 \text{ kV}; 9,574 \text{ kV}\}$, respectiv $E=\{3,626; 4,725 \text{ kV/m}\}$. În schimb valorile sunt mult mai mari decât în cazul coronamentului portal simplu circuit.

În ceea ce privește câmpul magnetic calculat în vecinătatea liniilor electrice de înaltă tensiune cu simplu circuit se constată următoarele:

- valorile inducției magnetice B , depind de configurația coronamentului, mărimea curentului (de fapt valoarea efectivă, aceasta fiind presupusă aceeași în toate fazele liniei);
- pentru coronament triunghi, tensiune nominală $U_n=110 \text{ kV}$ și curent $I_0=100 \text{ A}$ în punctele de coordonate $x \in [0; 10 \text{ m}]$ iar $y \in [0,5; 2 \text{ m}]$,

inducția magnetică $B \in [0,398; 0,744 \mu\text{T}]$ iar componenta sa după axa x , $B_x \in [0,0618; 0,572 \mu\text{T}]$. În intervalele lui x și y menționate mai sus inducția crește cu scăderea lui x , respectiv cu creșterea lui y . Cele mai mari valori ale inducției magnetice se obțin pe axa de simetrie a stâlpului, în punctele situate în vecinătatea fazelor R și T. Astfel valori de $B=29,64 \mu\text{T}$ și $B=82,9 \mu\text{T}$ obținute pe axa stâlpului la înălțimi de 19,25 m și respectiv de 12,25 m sunt periculoase pentru organismul uman, motiv pentru care ele trebuie evitate sau limitate;

-Pentru coronament triunghiular și $U_n=220 \text{ kV}$, $I_0=200 \text{ A}$ în puncte de coordonate $x \in [0; 20 \text{ m}]$ și $y \in [0,5; 2 \text{ m}]$, inducția $B=[0,6138; 1,988 \mu\text{T}]$, respectiv componenta orizontală a acesteia $B_x=[0,1256; 1,434 \mu\text{T}]$. În intervalul de valori a lui x și y considerat B crește la scăderea lui x și la creșterea lui y . Valorile maxime pentru inducția magnetică se obțin în apropierea conductorilor de fază, în speță în punctul învecinat fazei T, $B=164,2 \mu\text{T}$ valoare ce depășește nivelul admis pentru organismul uman la frecvențe de 50 Hz ($B_{\text{adm}}=100 \mu\text{T}$).

-pentru coronament triunghi și $U_n=400 \text{ kV}$, $I_0=200 \text{ A}$ în puncte de coordonate $x \in [0; 20 \text{ m}]$ și $y \in [0,5; 2 \text{ m}]$ inducția $B=[0,9; 4,56 \mu\text{T}]$ și respectiv $B_x=[0,26; 2,968 \mu\text{T}]$. Cea mai mare valoare a inducției magnetice se obține în vecinătatea fazei R (faza 1) și ea are valoarea de $37,32 \mu\text{T}$.

În ceea ce privește câmpul magnetic calculat în vecinătatea liniilor electrice de înaltă tensiune cu dublu circuit, se constată următoarele:

-pentru linia de 110 kV, coronament hexagon și în puncte de coordonate $x \in [0; 20 \text{ m}]$, $y \in [0,5; 2 \text{ m}]$, mărimea curentului $I_0=100 \text{ A}$, inducția magnetică $B \in [0,435; 1,323 \mu\text{T}]$ iar $B_x \in [0,112; 1,323 \mu\text{T}]$; valorile

maxime ale inducției magnetice ($B= 11,12 \mu\text{T}$) sunt mult mai mici ca acelea de la linia cu simplu circuit și apar în vecinătatea conductorului fazei S;

-pentru linia de 220 kV, coronament hexagon, în puncte de coordonate $x \in [0; 20 \text{ m}]$, $y \in [0,5; 2 \text{ m}]$, mărimea curentului $I_0=200 \text{ A}$, inducția magnetică $B \in [1,26; 2,807 \mu\text{T}]$ iar $B_x \in [0,26; 2,807 \mu\text{T}]$; valorile maxime ale inducției apar la nivelul axului stâlpului la o înălțime de cca. 20 m și are valoarea $B=14 \mu\text{T}$, mult mai mică decât în cazul liniei cu simplu circuit;

-pentru linia de 400 kV, coronament hexagon, în puncte de aceleași coordonate. mărimea curentului $I_0=200 \text{ A}$, inducția magnetică $B \in [0,9; 4,56 \mu\text{T}]$ iar $B_x \in [0,26; 2,968 \mu\text{T}]$, iar în domeniul considerat crește cu creșterea înălțimii y și cu micșorarea distanței măsurate față de axul stâlpului. Valorile maxime ale inducției se ating în vecinătatea fazei S, deci în apropiere de axa stâlpului și la înălțime de cca. 27 m și are valoarea de $B=37,32 \mu\text{T}$, adică comparabilă de la linia de simplu circuit.

În ceea ce privește influența electrostatică a liniilor electrice de înaltă tensiune s-au considerat coronamente de stâlpi cu dublu circuit pentru care s-a considerat un circuit în funcțiune, iar celălalt scos de sub tensiune, urmărindu-se calculul tensiunilor induse prin cuplaj capacitiv de primul circuit într-al doilea, respectiv în jurul ambelor circuite ale liniei. S-au constatat următoarele:

-dependent de tensiunea nominală a liniei și faza la care ne referim, tensiunile induse electrostatic pe conductoarele fazelor circuitului scos din funcțiune diferă în condițiile considerării sarcinilor electrice liniar distribuite. Astfel la 110 kV tensiunea maximă apare pe faza R (4522 V) iar cea minimă pe S (443,3 V); la 220 kV tensiunea maximă apare pe

T (8229 V) iar cea minimă pe R (1091 V) iar la 400 kV, tensiunea maximă apare pe faza S (4151 V) iar cea minimă pe T (1684 V);

-valorile tensiunii induse U , respectiv ale intensității câmpului electric E , în puncte din jurul liniei de 110 kV, de coordonate $x \in [0; 13,8 \text{ m}]$ și $y \in [0,5; 2 \text{ m}]$ sunt cuprinse $U \in [0,019; 8,67 \text{ kV}]$ și $E \in [0,06; 2,77 \text{ kV/m}]$. Cele mai mari valori ale lui U , respectiv E se obțin în puncte situate pe axa de simetrie a stâlpului la înălțimea corespunzătoare conductorilor de fază R și T, având valorile: $U = \{8,671 \text{ kV}; 6,974 \text{ kV}\}$ și $E = \{2,772 \text{ kV/m}; 2,794 \text{ kV/m}\}$;

-pentru linia electrică aeriană de 220 kV, în puncte de coordonate $x \in [0; 18 \text{ m}]$ și $y \in [0,5; 25 \text{ m}]$, s-au obținut pentru potențialul U valorile $U \in [0,122; 42,09 \text{ kV}]$, iar pentru intensitatea câmpului electric $E \in [0,03; 15,09 \text{ kV/m}]$. Cele mai mari valori ale potențialului electric s-au obținut în axa de simetrie a stâlpului, la nivelul corespunzător conductorului de fază 1 și respectiv 2, $U = 42,05 \text{ kV}$ și respectiv $U = \{13,71 \text{ kV}; 34,57 \text{ kV}\}$. Intensitatea câmpului electric are valorile maxime în vecinătatea conductorului de fază S (2), $E = \{8,24 \text{ kV/m}; 15,09 \text{ kV/m}\}$;

-pentru linia electrică aeriană de 400 kV, cu configurația coronamentului în hexagon, în punctele din vecinătatea liniei și de coordonate $x \in [0; 21 \text{ m}]$ și $y \in [0,5; 27 \text{ m}]$ s-au obținut pentru potențialul U valorile, $U \in [0,209; 47,62 \text{ kV}]$ iar pentru câmpul electric E valorile $E \in [0,34; 5,142 \text{ kV/m}]$. Valorile cele mai mari pentru U și E se obțin în axa stâlpului, la înălțimi de 27 m și respectiv 9 m. În aceste puncte potențialul $U = \{47,62 \text{ kV}; 18,99 \text{ kV}; 14,81 \text{ kV}\}$ iar intensitatea câmpului electric $E = \{5,142 \text{ kV/m}; 5,446 \text{ kV/m}; 5,473 \text{ kV/m}\}$. Așa cum era firesc o dată cu creșterea tensiunii nominale, valorile potențialului și a intensității câmpului electric cresc și ele;

-apelând la relații simplificate pentru calculul potențialului în diferite puncte din vecinătatea liniei, relații prezentate în literatură în condiții simplificatorii (dispunerea conductoarelor de fază în vârfurile unui triunghi echilateral, $x \gg D_m$, D_m fiind distanța medie geometrică dintre faze etc.) se constată că pentru valori mici ale lui x , adică $x < D_m$, valorile obținute sunt complet diferite de cele exacte; anumite concordanțe se pot identifica pentru distanțe mai mari decât D_m .

În condițiile în care pe circuitul aflat în funcțiune al liniei se produce un scurtcircuit monofazat, de exemplu pe faza R, iar curentul de scurtcircuit la momentul 0 se consideră 0, valorile tensiunilor induse de circuitul cu defect în conductoarele circuitului scos de sub tensiune, după 0,1 secunde depind de faza la care ne referim, mărimea curentului de scurtcircuit și de tensiunea nominală a liniei. Astfel:

-variația în timp a tensiunilor induse electrostatic corespunde unei variații periodice, de perioadă egală cu 20 ms, de amplitudine mai mare pentru faza s, mai mică pentru faza t și zero pentru r;

-tensiunea indusă pe faza t este defazată în urma tensiunii de pe faza s cu aproape $\pi/2$ grade electrice la linia de 110kV; cu $0,488\pi$ la linia de 220kV și $0,942\pi$ la linia de 400kV; diferența valorilor tensiunilor induse putând fi explicată datorită geometriei coronamentului hexagon a liniei considerate și poziția celor două faze;

-valorile potențialului electric U și ale intensității câmpului electric E, în puncte din jurul liniei de 110kV de coordonate $x \in [0 ; 14\text{m}]$ și $y \in [0,5 ; 20\text{m}]$ variază în limitele: $U \in [0,347 ; 21,17\text{kV}]$ și $E \in [0,032 ; 4,386\text{kV/m}]$, valorile maxime atingându-se în apropierea axei de simetrie și la o înălțime de 21,17m;

-valorile potențialului electric U și ale intensității câmpului electric E , în puncte situate în jurul liniei de 220kV și de coordonate $x \in [0 ; 18\text{m}]$ și $y \in [0,5 ; 25\text{m}]$ sunt cuprinse între limitele $U \in [0,222 ; 28,62\text{kV}]$ iar $E \in [0,018 ; 3,94\text{kV/m}]$, valorile maxime înregistrându-se pe axa de simetrie la înălțimea de 15m și acestea sunt $U=28,62\text{kV}$ și $E=3,635\text{kV/m}$, respectiv la 10m înălțime $U=26,72\text{kV}$ și $E=3,940\text{kV/m}$;

-valorile potențialului electric U și ale intensității câmpului electric E , în puncte situate în jurul liniei de 400kV și de coordonate $x \in [0 ; 21\text{m}]$ și $y \in [0,5 ; 27\text{m}]$ sunt cuprinse între valorile $U \in [0,375 ; 63,71\text{kV}]$ și $E \in [0,031 ; 7,839\text{kV/m}]$, valorile maxime înregistrându-se și aici în axa stâlpului la o înălțime de 12 și respectiv 9m; $U=\{63,71; 59,89\text{kV}\}$ și $E=\{7,644 ; 7,839\text{kV/m}\}$.

În cea ce privește influența electromagnetică a liniilor de înaltă tensiune, trebuie evidențiat faptul că tensiunea indusă este o tensiune longitudinală, ce apare în lungul circuitului și a cărei mărime depinde de parametrii circuitului indus și de curenții care circulă prin circuitul inductor, deci și de faptul că acesta funcționează în regim permanent normal sau de avarie. Astfel pentru un curent inductor de 1A tensiunile induse în conductoarele circuitului indus (scos din funcțiune) sunt de 0,02724V/km la linia de 110kV, 0,03316V/km la linia de 220kV și 0,02789V/km la aceea de 400kV, deci valorile tensiunilor induse chiar pentru o lungime de 100km sunt foarte mici, nedepășind 4V/km. Dacă curentul însă crește de 100A, tensiunile vor crește și ele proporțional, devenind periculoase pentru personalul de exploatare prin potențialul creat în anumite puncte ale circuitului pe căderile de tensiune longitudinale.

Dacă circuitul inductor funcționează în regim de scurtcircuit monofazat:

-pentru linia de 110kV cu dublu circuit în caz de scurtcircuit pe linia inductoare, valorile inducției magnetice B în puncte din vecinătate, de coordonate $x \in [0 ; 20\text{m}]$ și $y \in [0,5 ; 21\text{m}]$ sunt cuprinse în intervalul $B \in [43,45 ; 408,7\mu\text{T}]$, fiind mari în axul liniei și pe măsură ce ne apropiem de înălțimea de 19m; cu creșterea distanței față de axul liniei inducția scade;

-pentru linia de 220kV cu dublu circuit pentru puncte din vecinătate, de coordonate $x \in [0 ; 20\text{m}]$ și $y \in [0,5 ; 27\text{m}]$ valorile inducției magnetice sunt cuprinse în intervalul $B \in [14,8 ; 113,2\mu\text{T}]$ valorile mai mari fiind obținute în axa liniei; cea mai mare valoare a lui B se obține la înălțimea de cca. 25m în axul liniei;

-pentru linia de 400kV cu dublu circuit pentru puncte de coordonate $x \in [0 ; 20\text{m}]$ și $y \in [0,5 ; 27\text{m}]$ valorile inducției magnetice sunt cuprinse în intervalul $B \in [96,96 ; 513,1\mu\text{T}]$, valoarea maximă fiind atinsă în apropierea punctului de coordonate: $x = 0$ și $y = 25,5$;

-tensiunile induse prin cuplaj inductiv în conductoarele de fază ale liniei induse variază periodic în aceeași perioadă ca și a curentului de scurtcircuit permanent, amplitudinea acestora depinzând de geometria liniei (coronamentul stâlpului) și de mărimea curentului de scurtcircuit.

Se constată că tensiunile induse prin cuplaj inductiv, sunt mai mari în cazul perechilor de faze omoloage apropiate (R - r) și diminuate în cazul perechilor de faze omoloage mult depărtate (S - s).

În regim de avarie (scurtcircuit monofazat) a circuitului inductor, tensiunile induse în circuitul scos din funcțiune sunt mult mai mari, putând atinge valori periculoase.

Având în vedere valorile mari ale tensiunilor induse, se impune necesitatea utilizării scurtcircuitoarelor care să asigure un contact galvanic foarte bun atât cu conductoarele de fază ale circuitului pasivizat asupra căruia se execută intervenția, cât și cu priza de pământ în mai multe puncte, pentru a evita cu certitudine posibilitatea apariției unor accidente

Dacă calea de întoarcere a curentului de scurtcircuit este conductorul de protecție, se constată o atenuare sensibilă a valorilor tensiunilor induse.

Pentru linia de 110kV cu dublu circuit (coronament hexagon), valorile inducției magnetice în puncte din jurul liniei de coordonate $x \in [0 ; 20\text{m}]$ și $y \in [0,5 ; 21\text{m}]$ sunt cuprinse în intervalul $[43,4 ; 408,7\mu\text{T}]$; valoarea maximă se obține pe axul vertical al stâlpului la înălțimea de cca. 19m și are valoarea de cca. $408,7\mu\text{T}$. De menționat că valoarea curentului de scurtcircuit monofazat este de $268,6 -j598,4\text{A}$;

Pentru linia de 220kV cu dublu circuit (coronament hexagon) , valorile inducției magnetice în puncte din jurul liniei de coordonate $x \in [0 ; 20\text{m}]$ și $y \in [0,5 ; 21\text{m}]$ sunt cuprinse în intervalul $[14,8 ; 113,2\mu\text{T}]$; valoarea maximă a inducției se obține pe axul stâlpului la înălțimea de cca 25,5m și este de $113,2\mu\text{T}$;

Pentru regimul de avarie (scurtcircuit monofazat) al circuitului inductor, atunci când în mod inevitabil, tensiunile fazelor față de pământ se modifică, sunt puse în evidență tensiuni induse electrostatic, pe fazele afectate, de valori comparabile cu tensiunile induse în cazul funcționării în regim permanent a circuitului inductor, (5...7) % din tensiunea pe fază.

Având în vedere valorile mari ale tensiunilor induse, se impune necesitatea utilizării scurtcircuitoarelor care să asigure un contact

galvanic foarte bun atât cu conductoarele de fază ale circuitului pasivizat asupra căruia se execută intervenția, cât și cu priza de pământ în mai multe puncte, pentru a evita cu certitudine posibilitatea apariției unor accidente

Din calculele efectuate [10], [22], [23], rezultă că în cazul montării scurtcircuitoarelor chiar atunci când sistemul curenților liniei aflate sub tensiune este puternic nesimetric tensiunile prizelor de pământ obțin valori scăzute, care nu pot provoca electrocutări cu consecințe grave asupra personalului din zonă. Dacă însă rezistența prizei de pământ are o valoare mare este posibil ca tensiunea pe aceasta să devină periculoasă.

Un pericol semnificativ din punct de vedere al electrocutărilor îl reprezintă și un contact galvanic imperfect (printr-o rezistență de valoare mare) între scurtcircuitor și conductorul de fază. Într-o astfel de situație tensiunea fazei poate ajunge la valori foarte mari (cazul unei nesimetrii accentuate al sistemului trifazic inductor) care pot conduce la consecințe grave.

Toate aceste elemente conduc la necesitatea calitativă a utilizării unor scurtcircuitoare care să asigure un contact electric perfect atât cu conductoarele de fază cât și cu priza de pământ.

Zona protejată, conform *Normelor de protecția muncii* PE 119, se realizează montând la ambele extremități ale zonei de lucru, dispozitive de scurtcircuitare și legare la pământ.

Valorile tensiunilor de atingere și de pas sunt cuprinse între 125 V (timpi de deconectare $t > 0,8$ ms) și 250 V (timpi de deconectare $t > 0,2$ ms). Ele se pot dubla în cazul folosirii echipamentului individual de protecție.

Între dispozitivele de scurtcircuitare și legare la pământ se admite o distanță maximă care ia în considerare: rezistența de dispersie a prizelor

de pământ, valoarea tensiunii induse și a tensiunii de atingere respectiv pas. Asigurând prizelor de pământ o valoare minimă posibil se obține o reducere semnificativă a riscului unor atingeri periculoase pentru cei care lucrează pe linie.

Contribuțiile aduse de autor în cadrul acestui capitol se referă la următoarele:

- evidențierea efectelor produse de liniile electrice aeriene de înaltă tensiune asupra conductoarelor învecinate;
 - evidențierea situațiilor particulare care apar în condițiile în care un circuit al unei linii duble este în funcțiune iar celălalt este scos din funcțiune fiind accesibil personalului de întreținere și revizie;
 - calculul intensității câmpului electric și a potențialului electric în puncte vecine (inclusiv la nivelul conductoarelor circuitului scos din funcțiune) în condițiile regimului permanent, normal de funcționare al circuitului inductor și în regim de avarie, provocat de un scurtcircuit monofazat;
 - analiza situațiilor extreme care pot apare și sublinierea unor concluzii;
 - estimări cantitative și calitative efectuate cu ocazia studiilor de caz efectuate, comparații între valorile câmpurilor electric și magnetic, tensiuni induse transversal sau longitudinal pentru linii de diferite tensiuni nominale, dar același tip de stâlp (hexagon sau portal), aceeași tensiune nominală dar tipuri de stâlp diferite (portal și hexagon), stabiliri de concluzii utile.
-

CALCULUL TENSIUNILOR INDUSE DE LINIILE ELECTRICE AERIENE DE ÎNALTĂ TENSIUNE ÎN DOMENIUL NUMERELOR FUZZY

4.1. Probleme generale ale mulțimilor fuzzy [63], [64]

Mulțimile fuzzy și logica fuzzy sunt definite în 1965, de profesorul Lotfi Zadeh, ca instrumente pentru lucrul cu instrucțiuni non-probabilistice legate de structura unei mulțimi de obiecte. În prezent logica fuzzy este considerată ca fiind una din cele mai importante teorii pentru care lui Lotfi Zadeh i-a fost acordată medalia de onoare de către IEEE.

Logica fuzzy formalizează un mod de operare cu elemente care au un grad de nedeterminare. Propozițiile și raționamentele în tehnica fuzzy nu sunt considerate ca fiind în totalitate adevărate sau false. Valoarea de adevăr a aserțiunilor nu mai este 0 sau 1, ci aparține intervalului $[0,1]$ potrivit unor funcții de apartenență. Acest mod de gândire este caracteristic pentru om, care nu utilizează simboluri discrete și numere, ci reprezentări calitative și termeni lingvistici.

În calculele care se fac referitor la câmpul electromagnetic determinat de rețelele electrice de transport și distribuție o parte din datele folosite sunt mai mult sau mai puțin incerte, astfel că nu este posibilă o precizie a valorii exacte pentru o anumită mărime, existând posibilitatea unor erori în datele asociate unei rețele existente. Soluțiile impuse de problemele determinate de rețelele electrice sunt puse în evidență prin utilizarea tehnicilor deterministe. Tehnica fuzzy prezentată de profesorul Zadeh este o alternativă de lucru cu date incerte sau inexacte.

Utilizarea tehnicilor fuzzy presupune trecerea de la conceptul de "probabilitate" la conceptul de "posibilitate" în gestionarea informațiilor

incerte și inexacte. Folosirea teoriei fuzzy deschide largi perspective în exprimarea soluțiilor prin modelarea adecvată a informațiilor de care se dispune.

Funcția caracteristică atașată elementelor unei mulțimi de numere reale R , este definită astfel:

$$\forall x \in R \quad \mu(x) \in \{0,1\}$$

Reprezentarea datelor de intrare incerte ca numere fuzzy se poate face prin folosirea unei sintaxe lingvistice știind că numărul fuzzy

- nu este niciodată sub a_1
- este uzual între a_2 și a_3
- nu este niciodată peste a_4

ceea ce se poate scrie:

$$A=[a_1, a_2, a_3, a_4]$$

Când incertitudinea apare din rotunjirea erorilor sau a erorilor de măsură atunci presupunem că valoarea numărului fuzzy A este aproximativ a_0 , cu o eroare maximă e_r , deci parametrii numărului fuzzy pot fi definiți ca:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = a_0 - e_r \\ a_2 = a_0 - \frac{e_r}{2} \\ a_3 = a_0 + \frac{e_r}{2} \\ a_4 = a_0 + e_r \end{array} \right.$$

Prin eșantion de date empirice:

Dacă avem un eșantion $x_i, i=1 \dots n$ atunci:

Gradul de apartenență (α) al unei valori la unul dintre cei cinci termeni lingvistici – semantici este o măsură a conformității valorii cu semnificația clasei lingvistice. Funcția de apartenență oferă, deci, o măsură cantitativă, numerică a gradului de adecvare a valorii respective cu noțiunea semantică. Dacă funcția de apartenență ia valori în intervalul

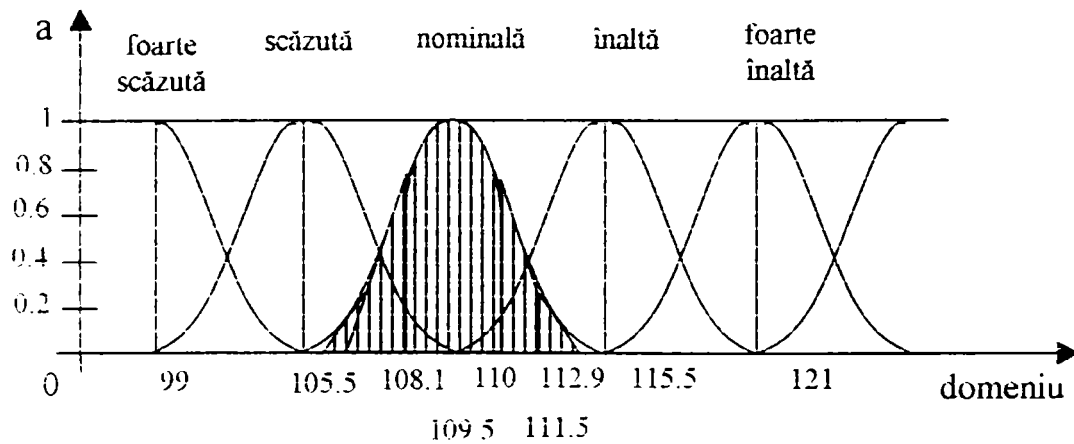


Figura 4.1

[0,1] se spune că este normalizată. Normalizarea funcțiilor de apartenență este recomandată pentru a putea realiza cu acestea operații de logică fuzzy.

Setul de elemente care compune o mulțime fuzzy este alcătuit din acele elemente care aparțin domeniului de definiție și au gradul de apartenență la mulțime mai mare ca zero.

$$S(A) = \{x \in X / \mu_A(x) > 0\}$$

Mulțimea elementelor care aparțin cel puțin în măsura α mulțimii fuzzy A este denumită setul de nivel α al mulțimii fuzzy A :

$$A_\alpha = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

Mulțimile fuzzy pot fi definite ca perechi asociate

$$A = \{(x_1, \mu_{1A}(x_1)), (x_2, \mu_{2A}(x_2)), \dots, (x_n, \mu_{nA}(x_n))\}$$

Descrierea mulțimii fuzzy “tensiune nominală” prin perechi asociate este:

$$A = \left\{ (108.1, 0.3), (109.5, 0.8), (110, 1), (111.5, 0.8), (112.9, 0.3) \right\}$$

Predicatele vagi date printr-un factor de certitudine f_c , sunt:

$$\mu_{\text{sigur}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{daca, } f_c < 0.8 \\ 1, & \text{daca, } 0.8 \leq f_c \leq 1 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{necunoscut}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{daca, } f_c > 0 \\ 1, & \text{daca, } 0 \leq f_c \leq 0.2 \end{cases}$$

$$\mu_{\text{sigurnuapartineclasei}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{daca, } f_c \in (0, 1] \\ 1, & \text{daca, } f_c \notin (0, 1] \end{cases}$$

Relațiile funcționale (funcții de apartenență) sunt exprimate astfel:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{daca, } x < 105.5 \\ \left(1 + (x - 110)^2 \right)^{-1}, & \text{daca, } 105.5 \leq x \leq 115.5 \\ 0, & \text{daca, } x > 115.5 \end{cases}$$

Mulțimea vidă fuzzy Φ este definită prin funcția de apartenență:

$$\mu_{\Phi}(x) = 0.$$

Convexitatea mulțimilor fuzzy este proprietatea necesară pentru definirea operațiilor cu aceste mulțimi. Mulțimea fuzzy A este convexă dacă:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2));$$

$$x_1, x_2 \in X, \lambda \in [0, 1]$$

Cele mai frecvent utilizate funcții de apartenență sunt funcțiile de apartenență triunghiulare, figura 4.2, caracterizate prin trei puncte de referință ale domeniului de definiție, notate a, b, c , sau a_1, a_2, a_3 .

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1 - \frac{x-b}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases}$$

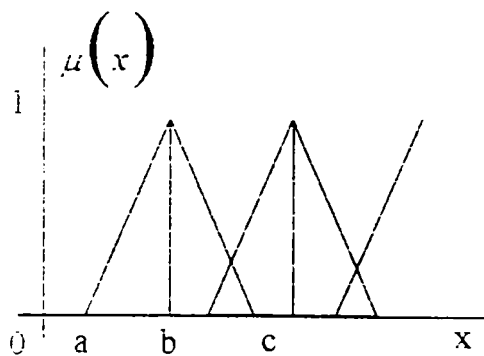


Figura 4.2

funcții de apartenență trapezoidale, figura 4.3, caracterizate prin patru puncte de referință ale domeniului de definiție, notate a, b, c, d , sau a_1, a_2, a_3, a_4 .

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ 1 - \frac{x-c}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases}$$

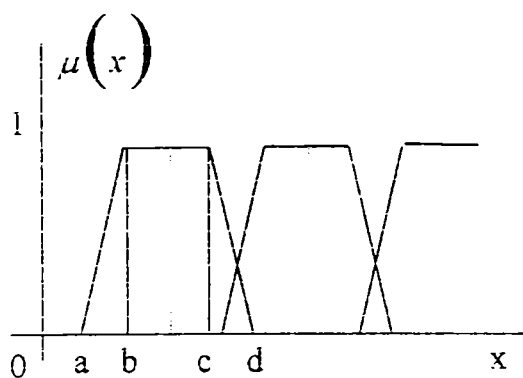


Figura 4.3.

respectiv funcțiile de apartenență gaussiene, figura 4.4.

$$\mu_A(x) = e^{-k(y-x)^2}$$

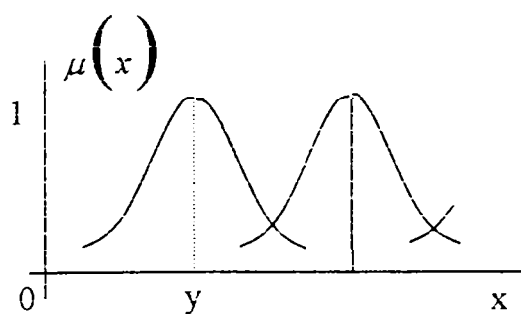


Figura 4.4

Operațiile cu mulțimi fuzzy reprezintă operații cu funcțiile lor de apartenență.

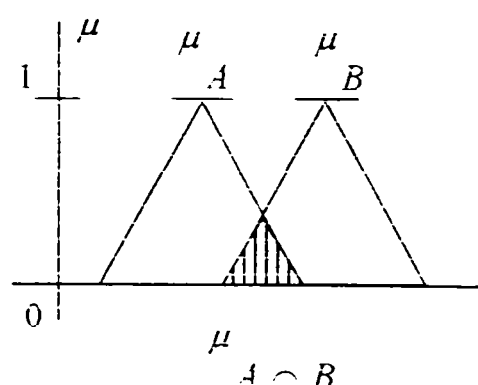
Egalitatea a două mulțimi fuzzy, A și B se definește astfel:

$$A = B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad (\forall) x \in U \quad \text{unde } U \text{ este } A \cup B$$

Intersecția a două mulțimi fuzzy A și B, corespunde operatorului logic AND și constă într-o mulțime fuzzy $A \cap B$, a cărei funcție de apartenență se exprimă matematic prin relația:

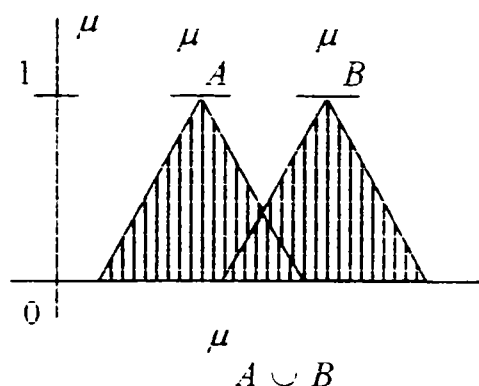
$$\mu_{A \cap B} = \min \left\{ \mu_A, \mu_B \right\}, x \in U$$

respectiv grafic



Reuniunea a două mulțimi fuzzy A și B, corespunde operatorului logic OR și constă într-o mulțime fuzzy $A \cup B$ a cărei funcție de apartenență este:

$$\mu_{A \cup B} = \max \left\{ \mu_A, \mu_B \right\}, x \in U$$



Cardinalul unei mulțimi fuzzy A, pentru domenii discrete este

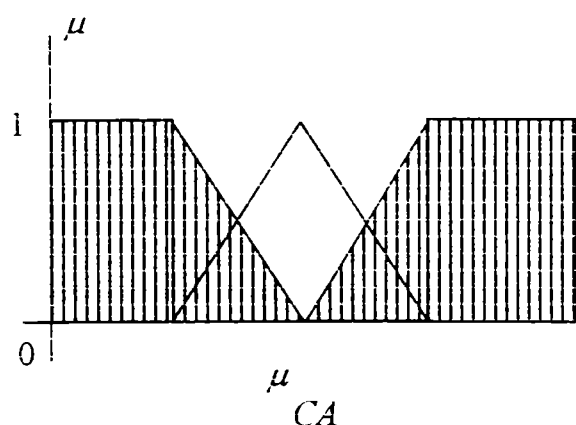
$$|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x)$$

iar pentru domenii continue

$$|A| = \int \mu_A(x)$$

Complementara unei mulțimi fuzzy A, corespunzătoare operatorului logic NOT, este notată CA și are ca funcție de apartenență:

$$\mu_{CA} = 1 - \mu_A$$



Produsul cartezian a două mulțimi fuzzy A și B:

$$C = A \times B \Rightarrow C = \left\{ x \in X / \left(x, \mu_C(x) = \min \left\{ \mu_A(x), \mu_B(x) \right\} \right) \right\}$$

Produsul algebric a două mulțimi fuzzy A și B:

$$C = A \cdot B \Rightarrow C = \left\{ x \in X / \left(x, \mu_C(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \right) \right\}$$

Puterea unei mulțimi fuzzy A:

$$\mu_A^m(x) = \left[\mu_A(x) \right]^m$$

Suma algebrică a două mulțimi fuzzy A și B:

$$A + B = \left\{ x \in X / \left(x, \mu_{A+B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \right) \right\}$$

Diferența algebrică a două mulțimi fuzzy A și B:

$$A - B = A \cap CB$$

Suma mărginită a două mulțimi fuzzy A și B:

$$A \oplus B = \left\{ x \in X / \left(x, \mu_{A \oplus B}(x) = \min \left\{ 1, \mu_A(x) + \mu_B(x) \right\} \right) \right\}$$

Diferența mărginită a două mulțimi fuzzy A și B:

$$A \ominus -B = \left\{ x \in X / \left(x, \mu_{A \ominus -B}(x) = \max \left\{ 0, \mu_A(x) - \mu_B(x) \right\} \right) \right\}$$

Produsul mărginit a două mulțimi fuzzy A și B:

$$A \otimes B = \left\{ x \in X / \left(x, \mu_{A \otimes B}(x) = \max \left\{ 0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1 \right\} \right) \right\}$$

Compararea numerelor fuzzy are o importanță deosebită în aplicațiile practice ale acestei teorii, în special în domeniul problemelor de optimizare și al proiectării instalațiilor electrice sau tehnologice, unde variabilele de decizie pot fi obținute sub forma unor numere fuzzy și deci procesul de alegere a soluției optime impune implementarea unor proceduri de ordonare a acestora.

În cele ce urmează compararea numerelor fuzzy se bazează pe conceptul de depărtare a unui număr real k , notat $R_{(A, k)}$ și exprimat matematic prin relația

$$R_{(A, k)} = \frac{2A_1 + A_2}{2}$$

Dacă $k=0$, depărtarea unui număr fuzzy trapezoidal poate fi calculată cu relația

$$R_{(A, k)} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4}$$

Acest criteriu descompune o mulțime de numere fuzzy în submulțimi caracterizate prin aceeași depărtare față de un număr real dat (de obicei zero) și asigură o ordonare liniară a tuturor numerelor fuzzy și deci o comparare a acestora.

Rezultatele obținute prin metode fuzzy ne pot oferi cu precizie limitele în care valorile măsurabile trebuie să se găsească. O caracteristică de bază a teoriei mulțimilor fuzzy este încrederea în rezultat, realizată prin intermediul intervalului de încredere cuantificat prin funcția de apartenență a teoriei fuzzy.

Despre un rezultat se poate spune că este cu un

- grad de satisfacție maximă
- grad de satisfacție zero
- grad de insatisfacție maxim

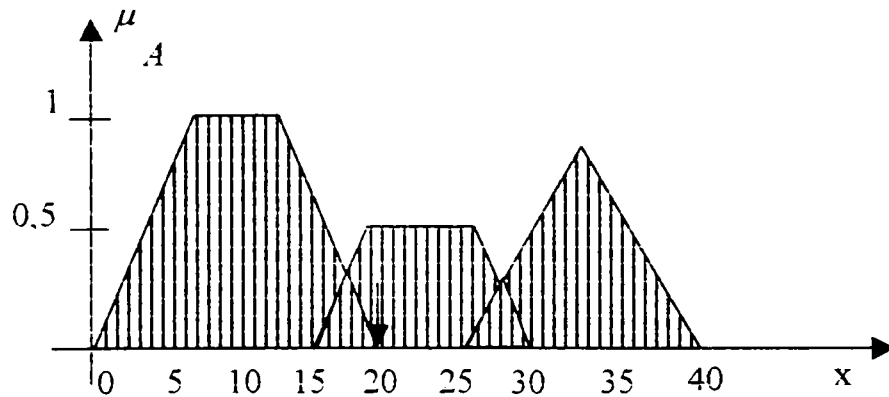
Utilizarea tehnicilor fuzzy în calculul tensiunilor induse de liniile electrice aeriene de înaltă tensiune face trecerea de la valori punctuale ale tensiunii, la un interval, la care trecerea de la o valoare la alta se face gradat, determinând limitele între care sigur tensiunea respectivă se va afla, plecând de la date incerte de intrare.

Asocierea unor semnificații lingvistice pentru un set de valori numerice obținând un set de mărimi fuzzy poartă numele de fuzificare. Procesul invers care asociază unei mărimi fuzzy o mărime numerică precisă poartă numele de defuzificare.

Pentru defuzificare sunt definite diverse metode care permit obținerea unei valori numerice printr-o expresie ce combină mai multe funcții de apartenență.

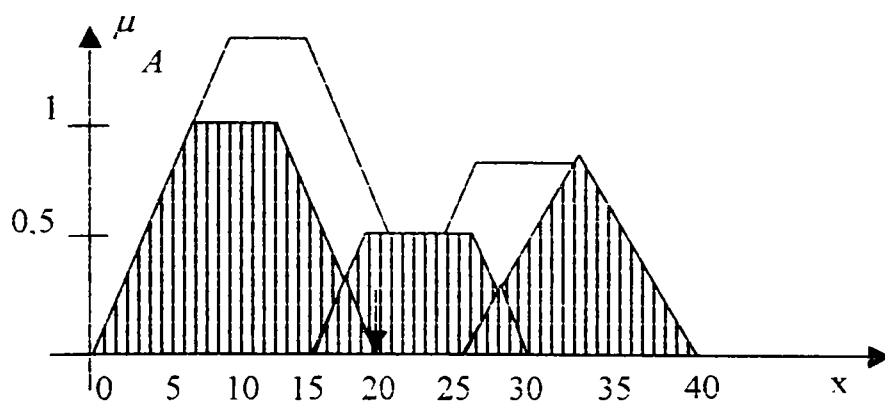
Metoda centrului de greutate al suprafeței delimitată de maximele locale, localizează punctul selectat în centrul de greutate al figurii rezultată prin suprapunerea graficelor funcțiilor de apartenență.

$$x_{\text{selectat}} = \frac{\int x \cdot \text{MAX}_k \left(\mu_{Ak}(x) \right) \cdot dx}{\int \text{MAX}_k \left(\mu_{Ak}(x) \right) \cdot dx}$$



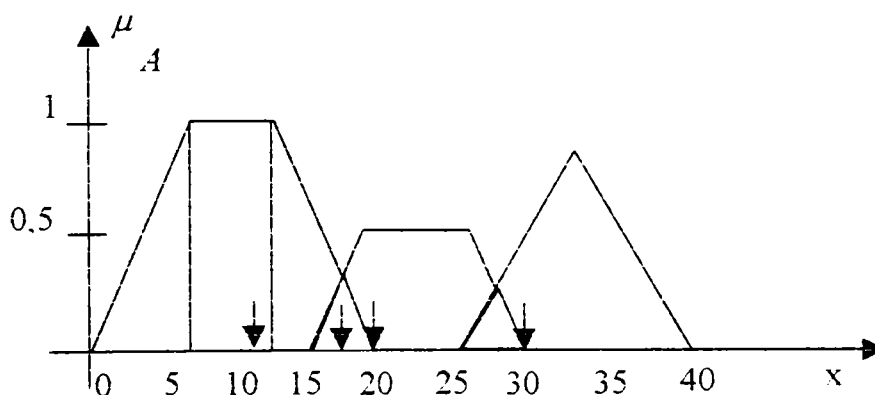
Metoda centrului de greutate al suprafeței rezultată prin însumarea valorilor individuale.

$$x_{\text{selectat}} = \frac{\int x \cdot \sum_k \left(\mu_{Ak}(x) \right) dx}{\int \sum_k \left(\mu_{Ak}(x) \right) dx}$$



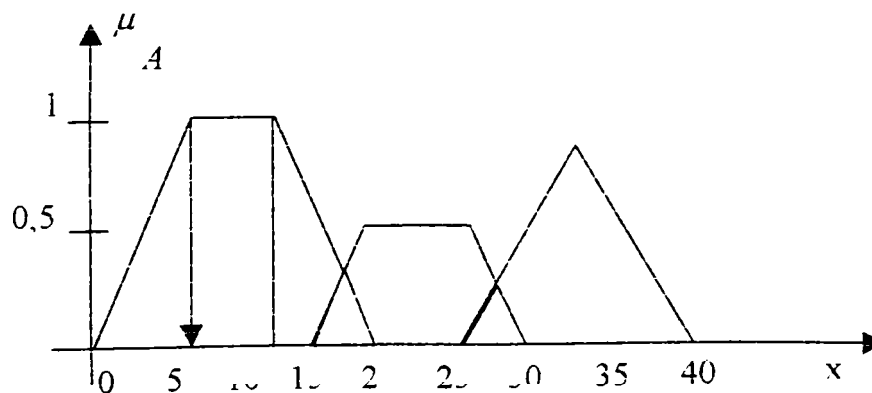
Metoda ponderării centrelor de greutate ale suprafețelor individuale selectează acel punct care rezultă prin medierea centrelor de greutate ale ariilor graficelor funcțiilor de apartenență individuale

$$X_{\text{selectat}} = \frac{\sum_k \left(\frac{\int x \cdot (\mu_{Ak}(x)) dx}{\int (\mu_{Ak}(x)) dx} \cdot \int (\mu_{Ak}(x)) dx \right)}{\sum_k \int (\mu_{Ak}(x)) dx}$$



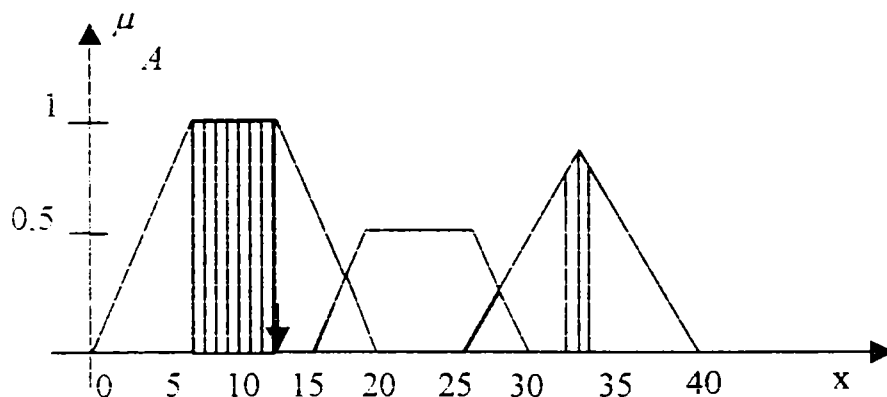
Metoda primului maxim absolut, selectează primul punct din domeniul de definiție numeric, pentru care funcția de apartenență are valoarea maximă.

$$X_{\text{selectat}} = \inf_x \left(x / \mu_A(x) \right) = \max_x \left(\mu_A(x) \right)$$



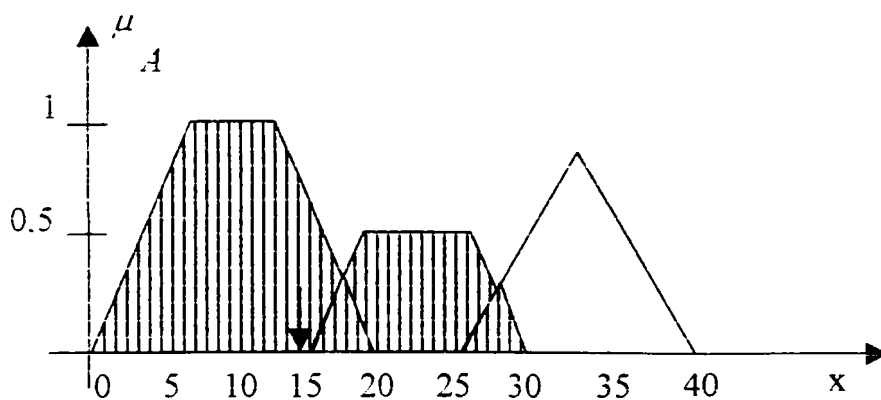
Metoda medierii maximelor locale, determină coordonatele punctelor din domeniul numeric de definiție, pentru care funcția de apartenență înregistrează maxime locale și face o medie a acestor coordonate.

$$x_{\text{selectat}} = \frac{\sum x \cdot \max \text{ locale } \mu_{Ak}}{nr \text{ max locale}}$$



Metoda centrului de greutate al ariei convexe maxime localizează punctul selectat în centrul de greutate al ariei convexe maxime.

$$x_{\text{selectat}} = \frac{\int_{\text{arieconvexa max ima}} x \cdot \text{MAX}_k (\mu_{Ak}(x)) dx}{\int_{\text{arieconvexa max ima}} \text{MAX}_k (\mu_{Ak}(x)) dx}$$



4.3.O abordare fuzzy a estimării tensiunilor induse de liniile electrice aeriene în circuitele vecine

Dintre domeniile în care mulțimile și logica fuzzy se pot aplica, în continuare se prezintă estimatorul fuzzy pentru tensiunea electrică indusă în vecinătatea unei linii electrice de înaltă tensiune.

În general, un estimator fuzzy presupune existența următoarelor blocuri (figura 4.5):

- Datele de intrare;
- Blocul de fuzzificare a mărimilor preluate;
- Blocul de calcul logic;
- Blocul de memorare a cunoștințelor fuzzy;
- Blocul de defuzzificare;
- Transmiterea mărimilor de ieșire

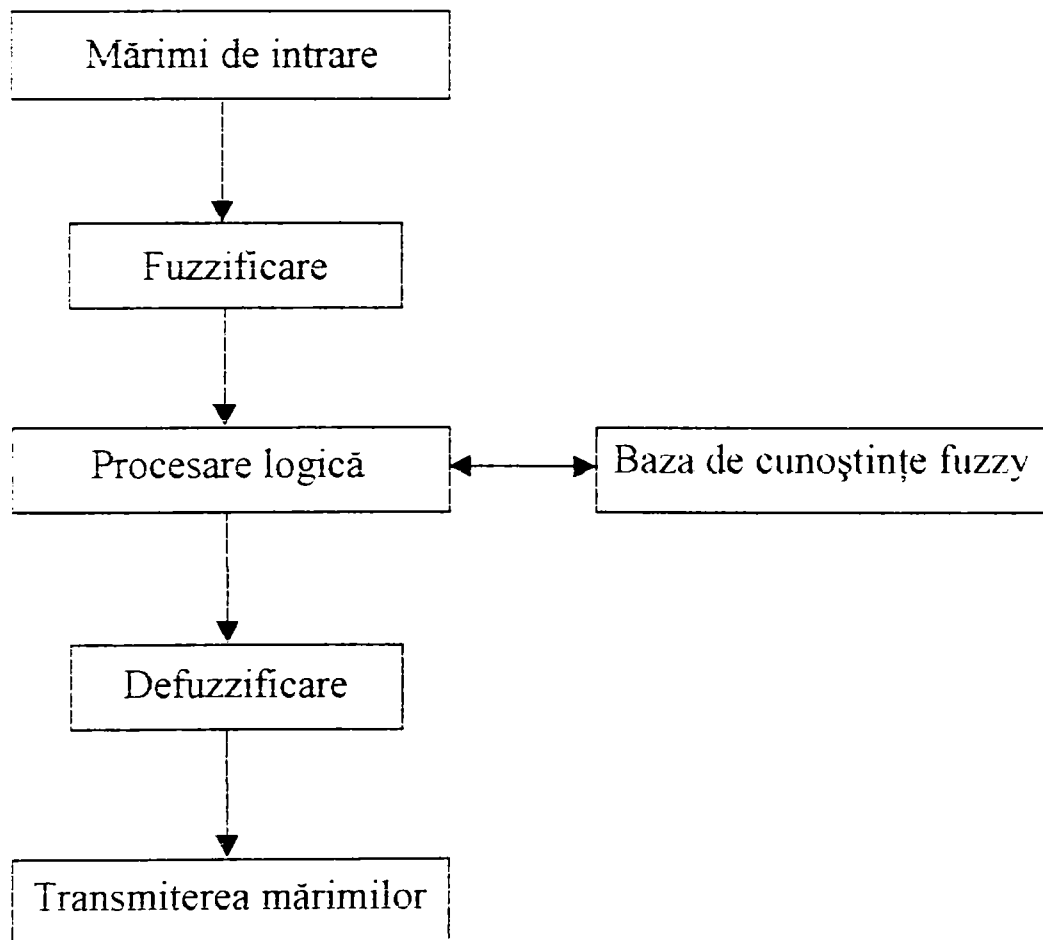


Figura 4.5

Crearea unui estimator fuzzy presupune codificarea funcției de estimare într-un set de reguli care operează asupra mulțimilor fuzzy

rezultate prin fuzificarea domeniilor de definiție corespunzătoare geometriei liniei electrice aeriene (mărimi de intrare în estimator). În figurile 4.6 și 4.7, este prezentată descompunerea domeniilor de definiție ale distanței d și înălțimii h în mulțimi fuzzy. Astfel în figura 4.6 se prezintă domeniile de risc în raport cu distanțele procentuale dintre faze. Pentru $x=(0,75 \div 1,25)d$ tensiunea indusă electrostatic este de valori normale, în raport cu limitele admise pentru tensiuni în *Normelor de protecția muncii* PE 119.

Modelul estimatorului se completează cu următorul set de reguli:

R0: Dacă *distanța este foarte mică și inversul înălțimii este foarte mic*, atunci *tensiunea este foarte periculoasă*;

R1: Dacă *distanța este mică și inversul înălțimii este mic*, atunci *tensiunea este foarte periculoasă*;

R2: Dacă *distanța este normală și inversul înălțimii este foarte mic*, atunci *tensiunea este periculoasă*;

Rn: Dacă *distanța este foarte mare și inversul înălțimii este foarte mare*, atunci *tensiunea este puțin periculoasă*.

Acest sistem de reguli se pretează unei memorii fuzzy asociate, conforme cu tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 Memoria fuzzy asociată estimatorului

(l. înălțime)/distanța	f.mică	Mică	normală	mare	f.mare
Mare	periculoasă	f.periculoasă	periculoasă	puțin periculoasă	puțin periculoasă
Normală	f.periculoasă	Periculoasă	periculoasă	puțin periculoasă	puțin periculoasă
Mică	f.periculoasă	f.periculoasă	periculoasă	periculoasă	periculoasă

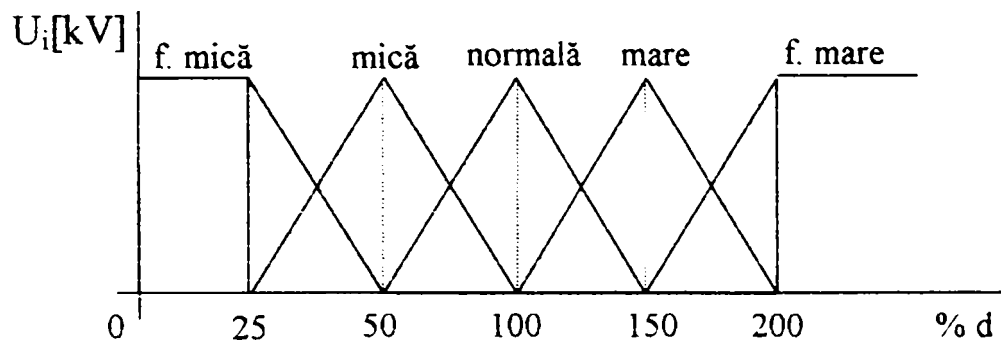


Figura 4.6 Domeniile de risc în raport cu distanțele procentuale dintre faze

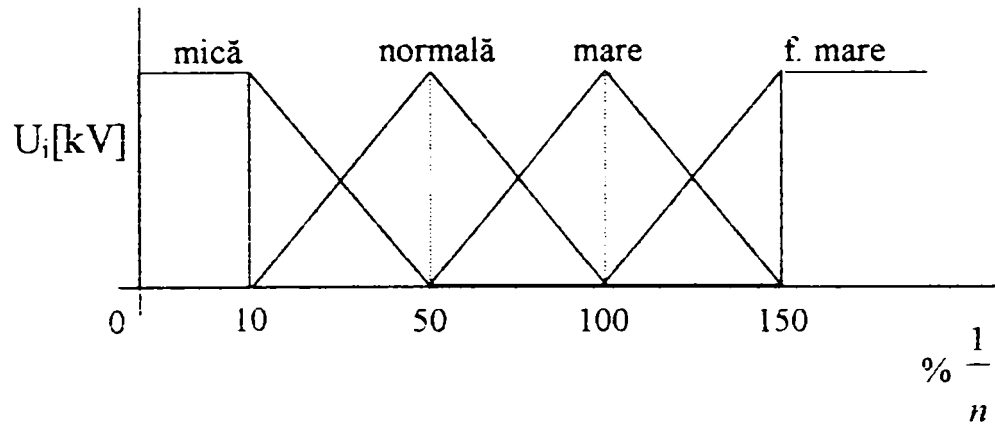


Figura 4.7 Domeniile de risc în raport cu inversul înălțimii (procentual) conductorilor de fază față de pământ

Acest estimator fuzzy, este conceput pentru a pune în evidență conceptul de “posibilitate” a riscului pe care-l prezintă pentru organismul uman interacțiunea cu câmpul electromagnetic determinat de liniile electrice aeriene de înaltă tensiune, gestionează informații incerte și inexacte referitoare la parametri electrici (tensiunea, curentul) și geometrici (distanța între conductorii de fază, înălțimea acestora față de pământ).

Folosind acest estimator personalul de exploatare nu mai trebuie să calculeze tensiunea indusă sau intensitatea câmpului electric (sau magnetic) în vecinătatea unor linii electrice aeriene de înaltă tensiune

(110; 220; 400kV), la fel și cei care conduc lucrările sau fac operații de modernizare, ci pe baza raportului dintre distanță și înălțimea la conductorii de fază ai liniei, apreciază dacă tensiunea este mică sau mare, periculoasă sau nu.

În acest fel, fenomenele de inducție electromagnetică produse de liniile electrice aeriene de înaltă tensiune pot fi cuprinse într-un cadru mult mai adecvat decât acela determinist sau probabilistic. În plus poate fi din plin valorificată experiența personalului care lucrează în domeniu, aprecierile lor fiind foarte utile la întocmirea acestui estimator.

4.4. Concluzii și propuneri

Teoria mulțimilor fuzzy reprezintă un instrument util în analiza rețelelor electrice pentru situații în care datele despre acestea sunt informații cu o natură incertă, fie datorită limbajului natural în care sunt exprimate, fie datorită cunoașterii incomplete a parametrilor de natură electrică sau a caracteristicilor geometrice ale rețelei.

Implementarea acestei teorii în analiza rețelelor electrice prin prisma influențelor exercitate de liniile electrice aeriene de înaltă tensiune asupra circuitelor electrice învecinate și ale efectelor pe care le produc prin câmpul electromagnetic determinat asupra organismului uman, permite afirmații de natură lingvistică asupra gradului de pericolozitate față de o constantă a numerelor fuzzy.

Astfel, prin elaborarea estimatorului fuzzy pentru tensiunea indusă electrostatic de o linie electrică aeriană de înaltă tensiune, bazat pe memoria fuzzy asociată, se pot face afirmații de natura “periculos”, “foarte periculos” sau “nepericulos” în funcție de poziția punctului considerat în

spațiul din vecinătatea linie electrice, în care se estimează valoarea tensiunii față de o valoare de referință. Cu aceste elemente se poate opera direct în studii și analize, se pot cuprinde în funcții obiectiv, care să țină cont și de efectul tensiunilor induse de liniile de înaltă tensiune asupra circuitelor vecine.

Elementele originale aduse de autor în acest capitol se referă tocmai la întocmirea unui estimator fuzzy pentru aprecierea influenței electrostatice a liniilor de înaltă tensiune ($U_n=110; 220; 400\text{kV}$) asupra circuitelor învecinate.

CAPITOLUL 5

ALGORITM ȘI PROGRAM DE CALCUL A TENSIUNILOR INDUSE DE LINIILE ELECTRICE AERIENE

5.1. Metodologia de calcul

În cadrul acestui capitol a fost elaborat un program de calcul în mediul MATLAB pentru estimarea câmpului electromagnetic la funcționarea în regim permanent a unei linii electrice aeriene de înaltă tensiune în regim normal și în regim de avarie (cu un circuit avariat printr-un scurtcircuit). Scopul a fost acela de a valida rezultatele obținute.

Determinarea câmpului electromagnetic în vecinătatea liniilor electrice aeriene este necesară în contextul interesului pe care-l prezintă atât cunoașterea efectelor biologice pe care acesta le exercită cât și perturbațiile provocate în funcționarea instalațiilor electrice aflate în domeniul de influență al acestui câmp. Punerea în evidență a valorilor limită pentru expunerea în câmp electric și magnetic a personalului implicat în activitatea de exploatare a rețelelor electrice de transport și distribuție este imperios necesară pentru diminuarea riscului unor consecințe nefirești pentru sănătate [9], [14], [16], [18], [21], [31].

Modelarea matematică a câmpului electric și magnetic se face printr-un pachet de programe de înaltă performanță, MATLAB (MATrix LABoratory), dedicat calculului numeric și reprezentării grafice în domeniul științei [51].

MATLAB-ul integrează analiza numerică, calculul matricial, procesarea semnalului și reprezentările grafice, într-un mediu ușor de folosit prin faptul că soluțiile problemelor nu necesită programarea tradițională, ele fiind o consecință a unei exprimări matematice naturale pentru problema enunțată. Elementul de bază cu care se operează este matricea.

Fiind dată geometria liniei electrice aeriene de înaltă tensiune, dublu circuit, care constă în tipul stâlpului cu elementele dimensionale ale coronamentului (h_k, d_k, r_o, h_{cp}) și lungimea liniei (l) respectiv mărimile electrice U_{fk}, I_k se calculează matricile corespunzătoare distanțelor dintre conductoarele fază [\mathbf{D}], distanțelor dintre conductoarele fază și imaginea lor față de sol [\mathbf{D}'], ale coeficienților de potențial [\mathbf{p}], ale sarcinilor electrice pe conductorii de fază [\mathbf{q}], ale capacităților parțiale [\mathbf{C}] și ale inductivităților mutuale [\mathbf{M}].

Pentru calculul câmpului electric și magnetic în domeniul, omogen din punct de vedere electric, din vecinătatea liniei electrice aeriene, dublu circuit, aflată în regim permanent de funcționare se consideră următoarele relații:

- pentru potențialul electric față de pământ,

$$V = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_o} \cdot \sum_{k=1}^n q_k \cdot \ln \frac{r'_k}{r_k} \quad (5.1)$$

- pentru intensitatea câmpului electric,

$$E = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_o} \cdot \left(\left(\sum_{k=1}^n q_k \cdot x_k \cdot F_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^n q_k \cdot y_k \cdot F_k \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

unde

$$F_k = \frac{1}{r_k^2} - \frac{1}{r'_k{}^2} \quad (5.2)$$

$$F_k = \frac{1}{r_k^2} - \frac{1}{r'_k{}^2}$$

- pentru inducția magnetică,

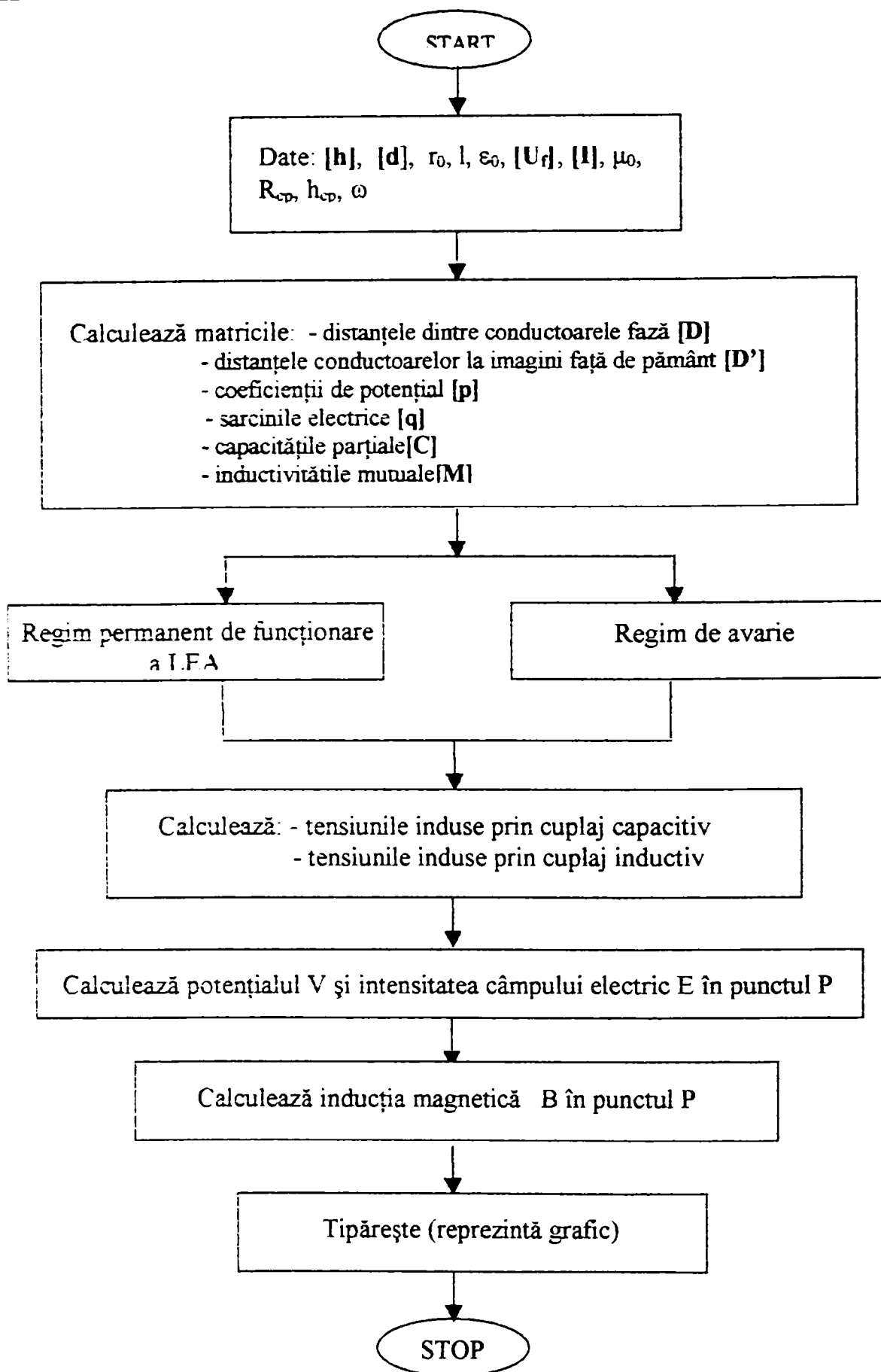


Figura 5.1. Ordinograma principală de calcul a potențialului electric V , a intensității câmpului electric E și inducției magnetice B

$$B = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0} \cdot \left(\left(\sum_k \frac{I_k \cdot \frac{x}{k}}{r_k^2} \right)^2 + \left(-\sum_k \frac{I_k \cdot \frac{y}{k}}{r_k^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

Pentru situația în care unul din circuitele liniei electrice este scos de sub tensiune, devenind astfel pasiv, iar celălalt continuă să funcționeze în regim permanent fiind activ, acesta va induce în circuitul electric pasivizat tensiuni prin efectul electrostatic și electromagnetic ca urmare a cuplajului capacitiv și inductiv realizat între cele două circuite electrice.

Pentru calculul tensiunii induse electrostatic în conductoarele de fază ale circuitului scos de sub tensiune se folosește relația matricială:

$$[\mathbf{U}] = [\mathbf{U}_f] \cdot [\mathbf{C}_e] \cdot [\mathbf{C}_n]^{-1}$$

iar pentru calculul tensiunii induse în lungul conductoarelor de fază prin efectul de influență electromagnetică este utilizată următoarea expresie:

$$[\mathbf{U}_M] = j \cdot \omega \cdot l \cdot [\mathbf{M}] \cdot [\mathbf{I}]$$

Dacă circuitul electric inductor al liniei electrice de înaltă tensiune se află într-o situație de avarie, scurtcircuit monofazat, atunci datorită valorii mult crescute a curentului de scurtcircuit în conductoarele circuitului electric indus se manifestă cu precădere fenomenul de inducție electromagnetică.

Ordinograma prezentată în figura 5.1, orientează calculul câmpului electric și magnetic, prin pachetul de programe MATLAB, efectuat în vederea cunoașterii valorilor în puncte din vecinătatea liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune și punerea în evidență a extremelor maxime caracteristice atât situațiilor de funcționare permanente caracterizate prin sisteme simetrice de tensiuni și curenți, cât și celor caracterizate printr-o puternică nesimetrie a sistemelor de tensiuni și curenți.

5.2. Algoritmul programului

Urmărind realizarea efectivă a calculelor referitoare la câmpul electromagnetic determinat de liniile electrice de înaltă tensiune în domeniul lor de influență s-au materializat următoarele programe pe baza pachetului de programe de înaltă performanță oferit de mediul MATLAB R12. S-a urmărit punerea în evidență a valorilor câmpului electric și magnetic atât în regim permanent de funcționare cât și pentru regimul de avarie al liniilor electrice. Sunt puse în evidență fenomenele de influență exercitate de liniile electrice aeriene asupra circuitelor electrice învecinate prin programele de calcul prezentate în continuare.

Program 1

```
%CALCULUL CÂMPULUI ELECTRIC SI MAGNETIC ÎN VECINATATEA LEA. DC.
%ÎN REGIM PERMANENT DE FUNCTIONARE
clc
clear
%Date initiale
h1=25; h2=18.5; h3=12;
d1=9; d2=16; d3=10;
r0=14.625*10^(-3);
L=73*10^3;
eps0=1/(4*pi*9*10^9);

%Tensiunile de faza
U=zeros(6,1);
U(1,1)=127*10^3;
U(2,1)=(127*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
U(3,1)=(127*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);
U(4,1)=U(1,1); U(5,1)=U(2,1); U(6,1)=U(3,1);

%Calculul distanțelor dintre conductoarele de faza
D=zeros(6,6);
D(1,1)=r0; D(1,2)=sqrt(((d1-d2)^2)/4+(h1-h2)^2); D(1,3)=sqrt(((d1-d3)^2)/4+(h1-h3)^2);
D(1,4)=d1; D(1,5)=sqrt(((d1+d2)^2)/4+(h1-h2)^2); D(1,6)=sqrt(((d1+d3)^2)/4+(h1-h3)^2);
D(2,1)=D(1,2); D(2,2)=D(1,1); D(2,3)=sqrt(((d2-d3)^2)/4+(h2-h3)^2);
D(2,4)=sqrt(((d1+d2)^2)/4+(h1-h2)^2); D(2,5)=d2; D(2,6)=sqrt(((d2+d3)^2)/4+(h2-h3)^2);
D(3,1)=D(1,3); D(3,2)=D(2,3); D(3,3)=D(2,2); D(3,4)=D(1,6); D(3,5)=D(2,6); D(3,6)=d3;
D(4,1)=D(1,4); D(4,2)=D(2,4); D(4,3)=D(3,4); D(4,4)=D(1,1); D(4,5)=D(1,2); D(4,6)=D(1,3);
D(5,1)=D(1,5); D(5,2)=D(2,5); D(5,3)=D(3,5); D(5,4)=D(4,5); D(5,5)=D(1,1); D(5,6)=D(2,3);
D(6,1)=D(1,6); D(6,2)=D(2,6); D(6,3)=d3; D(6,4)=D(4,6); D(6,5)=D(5,6); D(6,6)=D(1,1);
D;
```

```

%Calculul distanțelor conductoarelor de faza
%la imaginile lor fata de pamant
D1=zeros(6,6);
D1(1,1)=2*h1; D1(1,2)=sqrt(((d1-d2)^2)/4+(h1+h2)^2);
D1(1,3)=sqrt(((d1-d3)^2)/4+(h1+h3)^2);
D1(1,4)=sqrt(d1^2+(2*h1)^2); D1(1,5)=sqrt(((d1+d2)^2)/4+(h1+h2)^2);
D1(1,6)=sqrt(((d1+d3)^2)/4+(h1+h3)^2);
D1(2,1)=D1(1,2); D1(2,2)=2*h2; D1(2,3)=sqrt(((d2-d3)^2)/4+(h2+h3)^2);
D1(2,4)=D1(1,5); D1(2,5)=sqrt(d2^2+(2*h2)^2); D1(2,6)=sqrt(((d2+d3)^2)/4+(h2+h3)^2);
D1(3,1)=D1(1,3); D1(3,2)=D1(2,3); D1(3,3)=2*h3; D1(3,4)=D1(1,6); D1(3,5)=D1(2,6);
D1(3,6)=sqrt(d3^2+(2*h3)^2); D1(4,1)=D1(1,4); D1(4,2)=D1(2,4); D1(4,3)=D1(3,4);
D1(4,4)=D1(1,1); D1(4,5)=D1(1,2); D1(4,6)=D1(1,3); D1(5,1)=D1(1,5); D1(5,2)=D1(2,5);
D1(5,3)=D1(3,5);D1(5,4)=D1(4,5); D1(5,5)=D1(2,2); D1(5,6)=D1(2,3);D1(6,1)=D1(1,6);
D1(6,2)=D1(2,6); D1(6,3)=D1(3,6); D1(6,4)=D1(4,6); D1(6,5)=D1(5,6); D1(6,6)=D1(3,3);
D1;

```

Program 2

```

%CALCULUL CAMPULUI ELECTRIC SI MAGNETIC IN CAZUL CUPLAJULUI
%CAPACITIV SI INDUCTIV
%( UN CIRCUIT ELECTRIC ESTE PASIVIZAT)

```

```

%Calculul capacităților parțiale

```

```

C(1,1)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(1,4)/r0); C(1,2)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(1,5)/r0);
C(1,3)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(1,6)/r0); C(2,1)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(2,4)/r0);
C(2,2)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(2,5)/r0); C(2,3)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(2,6)/r0);

```

```

C(3,1)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(3,4)/r0); C(3,2)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(3,5)/r0);
C(3,3)=2.*pi.*eps0.*L./log(D(3,6)/r0);

```

```

%Calculul capacităților parțiale fata de pamant

```

```

C0(1)=2.*pi.*eps0.*L./log(2.*h1/r0);
C0(2)=2.*pi.*eps0.*L./log(2.*h2/r0);
C0(3)=2.*pi.*eps0.*L./log(2.*h3/r0);

```

```

%Calculul capacităților echivalente

```

```

Cn(1)=C(1,1)+C(1,2)+C(1,3)+C0(1);
Cn(2)=C(2,1)+C(2,2)+C(2,3)+C0(2);
Cn(3)=C(3,1)+C(3,2)+C(3,3)+C0(3);

```

```

Cc(1)=C(1,1)-(C(2,1)+C(3,1))./2;
Cc(2)=C(2,2)-(C(1,2)+C(3,2))./2;
Cc(3)=C(3,3)-(C(2,3)+C(1,3))./2;

```

```

%Calculul tensiunilor induse capacitiv

```

```

Ui(1)=U(1,1).*Cc(1)./Cn(1);
Ui(2)=U(2,1).*Cc(2)./Cn(2);
Ui(3)=U(3,1).*Cc(3)./Cn(3);

```

```

%Calculul tensiunilor induse maxime capacitiv

```

```

Uimax(1)=U(1,1).*Cc(1)/(Cc(1)+C0(1));
Uimax(2)=U(2,1).*Cc(2)/(Cc(2)+C0(2));
Uimax(3)=U(3,1).*Cc(3)/(Cc(3)+C0(3));

```

```

%Calculul inductivitatilor mutuale
Mu(1)=beta.*log(Rcp./D(1,4)); Mu(2)=beta.*log(Rcp./D(2,4));
Mu(3)=beta.*log(Rcp./D(3,4)); Mu(4)=beta.*log(Rcp./D(2,5));
Mu(5)=beta.*log(Rcp./D(2,6)); Mu(6)=beta.*log(Rcp./D(3,6));

%Calculul tensiunilor induse inductiv pe unitatea de lungime
Ue(1)=(omega.*I1.*(Mu(1)+Mu(2).*(-.5-i*sqrt(3)/2)+Mu(3).*(-.5+i*sqrt(3)/2))).*(-i);
Ue(2)=(omega.*I1.*(Mu(2)+Mu(4).*(-.5-i*sqrt(3)/2)+Mu(5).*(-.5+i*sqrt(3)/2))).*(-i);
Uc(3)=(omega.*I1.*(Mu(3)+Mu(5).*(-.5-i*sqrt(3)/2)+Mu(6).*(-.5+i*sqrt(3)/2))).*(-i);

%Calculul tensiunilor induse inductiv de-a lungul liniei
Uelinie=Ue.*L;

%Calculul tensiunilor induse totale (capacitiv + inductiv)
U(4,1)=Uimax(1)+Uelinie(1); U(5,1)=Uimax(2)+Uelinie(2); U(6,1)=Uimax(3)+Uelinie(3);

%Calculul sarcinilor electrice de pe conductorii de faza
P=(1/(2*pi*eps0)).*log(D1./D);
Q=P^U;

%Calculul distantelor dintre conductoarele de faza ale
%LEA si punctele de calcul din vecinatatea sa
%Calculul potentialelor electrice
%Calculul intensitatii campului electric

alfa=1/(2*pi*cps0);
miu0=4.*pi.*10.^-7;
I1=200; I2=200.*(-.5-i*sqrt(3)/2); I3=200.*(-.5+i*sqrt(3)/2);
I4=I1; I5=I2; I6=I3;
beta=miu0./(2.*pi);

d_x=linspace(0.15.100);
d_y=linspace(0.30.100);
M=length(d_x);
N=length(d_y);
vp=zeros(M,N);
for i=1:M
    for j=1:N
        %Calculul distantelor pentru determinarea potentialelor
        xp1(i,j)=d_x(j)+d1./2+eps; xp2(i,j)=d_x(j)+d2./2+eps; xp3(i,j)=d_x(j)+d3./2+eps;
        xp4(i,j)=abs(d_x(j)-d1./2)+eps; xp5(i,j)=abs(d_x(j)-d2./2)+eps;
        xp6(i,j)=abs(d_x(j)-d3./2)+eps;
        yp1(i,j)=abs(d_y(i)-h1)+eps; yp2(i,j)=abs(d_y(i)-h2)+eps;
        yp3(i,j)=abs(d_y(i)-h3)+eps; yp4(i,j)=yp1(i,j);
        yp5(i,j)=yp2(i,j); yp6(i,j)=yp3(i,j); xp11(i,j)=xp1(i,j)+eps; xp21(i,j)=xp2(i,j)+eps;
        xp31(i,j)=xp3(i,j)+eps; xp41(i,j)=xp4(i,j); xp51(i,j)=xp5(i,j); xp61(i,j)=xp6(i,j);
        yp11(i,j)=h1+d_y(i)+cps; yp21(i,j)=h2+d_y(i)+cps; yp31(i,j)=h3+d_y(i)+cps;
        yp41(i,j)=yp11(i,j)+eps; yp51(i,j)=yp21(i,j)+eps; yp61(i,j)=yp31(i,j)+eps;

        rp1(i,j)=sqrt((xp1(i,j)).^2+(yp1(i,j)).^2); rp2(i,j)=sqrt((xp2(i,j)).^2+(yp2(i,j)).^2);
        rp3(i,j)=sqrt((xp3(i,j)).^2+(yp3(i,j)).^2); rp4(i,j)=sqrt((xp4(i,j)).^2+(yp4(i,j)).^2);
        rp5(i,j)=sqrt((xp5(i,j)).^2+(yp5(i,j)).^2); rp6(i,j)=sqrt((xp6(i,j)).^2+(yp6(i,j)).^2);

        rp11(i,j)=sqrt((xp11(i,j)).^2+(yp11(i,j)).^2); rp21(i,j)=sqrt((xp21(i,j)).^2+(yp21(i,j)).^2);
        rp31(i,j)=sqrt((xp31(i,j)).^2+(yp31(i,j)).^2); rp41(i,j)=sqrt((xp41(i,j)).^2+(yp41(i,j)).^2);
        rp51(i,j)=sqrt((xp51(i,j)).^2+(yp51(i,j)).^2); rp61(i,j)=sqrt((xp61(i,j)).^2+(yp61(i,j)).^2);
    end
end

```

```

%Determinarea potentialului fata de pamant
vp(i,j)=alfa.*(Q(1,1).*log(rp11(i,j)./rp1(i,j))+Q(2,1).*log(rp21(i,j)./rp2(i,j))+...
Q(3,1).*log(rp31(i,j)./rp3(i,j))+Q(4,1).*log(rp41(i,j)./rp4(i,j))+...
Q(5,1).*log(rp51(i,j)./rp5(i,j))+Q(6,1).*log(rp61(i,j)./rp6(i,j)));

%Determinarea intensitatii campului electric
fp1(i,j)=1./(rp1(i,j).^2)-1./(rp11(i,j).^2); fp2(i,j)=1./(rp2(i,j).^2)-1./(rp21(i,j).^2);
fp3(i,j)=1./(rp3(i,j).^2)-1./(rp31(i,j).^2); fp4(i,j)=1./(rp4(i,j).^2)-1./(rp41(i,j).^2);
fp5(i,j)=1./(rp5(i,j).^2)-1./(rp51(i,j).^2); fp6(i,j)=1./(rp6(i,j).^2)-1./(rp61(i,j).^2);

xp4m(i,j)=d_x(j)-d1./2+eps; xp5m(i,j)=d_x(j)-d2./2+eps; xp6m(i,j)=d_x(j)-d3./2+eps;
yp1m(i,j)=d_y(i)-h1+eps; yp2m(i,j)=d_y(i)-h2+eps; yp3m(i,j)=d_y(i)-h3+eps;
yp4m(i,j)=yp1m(i,j); yp5m(i,j)=yp2m(i,j); yp6m(i,j)=yp3m(i,j);

epx(i,j)=alfa.*(Q(1,1).*xp1(i,j).*fp1(i,j)+Q(2,1).*xp2(i,j).*fp2(i,j)+...
Q(3,1).*xp3(i,j).*fp3(i,j)+ Q(4,1).*xp4m(i,j).*fp4(i,j)+...
Q(5,1).*xp5m(i,j).*fp5(i,j)+ Q(6,1).*xp6m(i,j).*fp6(i,j));
epy(i,j)=alfa.*(Q(1,1).*yp1m(i,j).*fp1(i,j)+ Q(2,1).*yp2m(i,j).*fp2(i,j)+...
Q(3,1).*yp3m(i,j).*fp3(i,j)+Q(4,1).*yp4m(i,j).*fp4(i,j)+...
Q(5,1).*yp5m(i,j).*fp5(i,j)+.Q(6,1).*yp6m(i,j).*fp6(i,j));

%epx_modul(i,j)=abs(epx(i,j));
%epy_modul(i,j)=abs(epy(i,j));
e_camp(i,j)=sqrt((epx(i,j).^2)+(epy(i,j).^2));

%CALCULUL CAMPULUI MAGNETIC
%Determinarea inductiei magnetice
fpb1(i,j)=1./(rp1(i,j).^2); fpb2(i,j)=1./(rp2(i,j).^2);
fpb3(i,j)=1./(rp3(i,j).^2); fpb4(i,j)=1./(rp4(i,j).^2);
fpb5(i,j)=1./(rp5(i,j).^2); fpb6(i,j)=1./(rp6(i,j).^2);

bpx(i,j)=-beta.*(I1.*yp1m(i,j).*fpb1(i,j)+ I2.*yp2m(i,j).*fpb2(i,j)+...
I3.*yp3m(i,j).*fpb3(i,j)+ I4.*yp4m(i,j).*fpb4(i,j)+...
I5.*yp5m(i,j).*fpb5(i,j)+ I6.*yp6m(i,j).*fpb6(i,j));
bpy(i,j)=beta.*(I1.*xp1(i,j).*fpb1(i,j)+I2.*xp2(i,j).*fpb2(i,j)+...
I3.*xp3(i,j).*fpb3(i,j)+ I4.*xp4m(i,j).*fpb4(i,j)+...
I5.*xp5m(i,j).*fpb5(i,j)+I6.*xp6m(i,j).*fpb6(i,j));
b_camp(i,j)=sqrt((bpx(i,j).^2)+(bpy(i,j).^2));

end
end
vp;
vp_modul=abs(vp);
e_camp_modul=abs(e_camp);
b_camp_modul=abs(b_camp);
bpx_modul=abs(bpx);
bpy_modul=abs(bpy);

surf(d_x, d_y, vp_modul)
xlabel('x [m]')
ylabel('inaltimea h [m]')
zlabel('potentialul V [V]')

```

```

%Calculul tensiunilor induse capacitiv
Ui(1)=U(1,1).*Ce(1)/Cn(1);
Ui(2)=U(2,1).*Ce(2)/Cn(2);
Ui(3)=U(3,1).*Ce(3)/Cn(3);

%Calculul tensiunilor induse maxime capacitiv
Uimax(1)=U(1,1).*Ce(1)/(Ce(1)+C0(1));
Uimax(2)=U(2,1).*Ce(2)/(Ce(2)+C0(2));
Uimax(3)=U(3,1).*Ce(3)/(Ce(3)+C0(3));

%Calculul inductivităților mutuale
Mu(1)=beta.*log(Rcp./D(1,4)); Mu(2)=beta.*log(Rcp./D(2,4));
Mu(3)=beta.*log(Rcp./D(3,4)); Mu(4)=beta.*log(Rcp./D(2,5));
Mu(5)=beta.*log(Rcp./D(2,6)); Mu(6)=beta.*log(Rcp./D(3,6));

%Calculul tensiunilor induse inductiv pe unitatea de lungime
Ue(1)=(omega.*I1.*(Mu(1)+Mu(2).*(-.5-i*sqrt(3)/2)+Mu(3).*(-.5+i*sqrt(3)/2))).*(-i);
Ue(2)=(omega.*I1.*(Mu(2)+Mu(4).*(-.5-i*sqrt(3)/2)+Mu(5).*(-.5+i*sqrt(3)/2))).*(-i);
Ue(3)=(omega.*I1.*(Mu(3)+Mu(5).*(-.5-i*sqrt(3)/2)+Mu(6).*(-.5+i*sqrt(3)/2))).*(-i);

%Calculul tensiunilor induse inductiv de-a lungul liniei
Uelinie=Ue.*L;

%Calculul tensiunilor induse totale (capacitiv + inductiv)
U(4,1)=Uimax(1)+Uelinie(1); U(5,1)=Uimax(2)+Uelinie(2); U(6,1)=Uimax(3)+Uelinie(3);

%Calculul sarcinilor electrice pe conductorii de faza
P=(1/(2*pi*eps0)).*log(D1./D);
Q=PU;

%Calculul distanțelor dintre conductoarele LEA și punctele de calcul
%Calculul potențialelor electrice
%Calculul intensității câmpului electric

d_x=linspace(0,25,100);
d_y=linspace(0,30,100);
M=length(d_x);
N=length(d_y);
vp=zeros(M,N);
for i=1:M
    for j=1:N,
        %Calculul distanțelor pentru determinarea potențialelor
        xp1(i,j)=d_x(j)+d1./2+eps; xp2(i,j)=d_x(j)+d2./2+eps; xp3(i,j)=d_x(j)+d3./2+eps;
        xp4(i,j)=abs(d_x(j)-d1./2)+eps; xp5(i,j)=abs(d_x(j)-d2./2)+eps;
        xp6(i,j)=abs(d_x(j)-d3./2)+eps;
        yp1(i,j)=abs(d_y(i)-h1)+eps; yp2(i,j)=abs(d_y(i)-h2)+eps; yp3(i,j)=abs(d_y(i)-h3)+eps;
        yp4(i,j)=yp1(i,j); yp5(i,j)=yp2(i,j); yp6(i,j)=yp3(i,j);
        xp11(i,j)=xp1(i,j)+eps; xp21(i,j)=xp2(i,j)+eps; xp31(i,j)=xp3(i,j)+eps;
        xp41(i,j)=xp4(i,j); xp51(i,j)=xp5(i,j); xp61(i,j)=xp6(i,j);
        yp11(i,j)=h1+d_y(i)+eps; yp21(i,j)=h2+d_y(i)+eps; yp31(i,j)=h3+d_y(i)+eps;
        yp41(i,j)=yp11(i,j)+eps; yp51(i,j)=yp21(i,j)+eps; yp61(i,j)=yp31(i,j)+eps;

        rp1(i,j)=sqrt((xp1(i,j)).^2+(yp1(i,j)).^2); rp2(i,j)=sqrt((xp2(i,j)).^2+(yp2(i,j)).^2);
        rp3(i,j)=sqrt((xp3(i,j)).^2+(yp3(i,j)).^2); rp4(i,j)=sqrt((xp4(i,j)).^2+(yp4(i,j)).^2);
        rp5(i,j)=sqrt((xp5(i,j)).^2+(yp5(i,j)).^2); rp6(i,j)=sqrt((xp6(i,j)).^2+(yp6(i,j)).^2);
    end
end

```

```

rp11(i,j)=sqrt((xp11(i,j)).^2+(yp11(i,j)).^2); rp21(i,j)=sqrt((xp21(i,j)).^2+(yp21(i,j)).^2);
rp31(i,j)=sqrt((xp31(i,j)).^2+(yp31(i,j)).^2); rp41(i,j)=sqrt((xp41(i,j)).^2+(yp41(i,j)).^2);
rp51(i,j)=sqrt((xp51(i,j)).^2+(yp51(i,j)).^2); rp61(i,j)=sqrt((xp61(i,j)).^2+(yp61(i,j)).^2);

%Determinarea potentialului
vp(i,j)=alfa.*(Q(1,1).*log(rp11(i,j)./rp1(i,j))+Q(2,1).*log(rp21(i,j)./rp2(i,j))+...
Q(3,1).*log(rp31(i,j)./rp3(i,j))+Q(4,1).*log(rp41(i,j)./rp4(i,j))+...
Q(5,1).*log(rp51(i,j)./rp5(i,j))+Q(6,1).*log(rp61(i,j)./rp6(i,j)));

%Determinarea intensitatii campului electric
fp1(i,j)=1./(rp1(i,j).^2)-1./(rp11(i,j).^2);fp2(i,j)=1./(rp2(i,j).^2)-1./(rp21(i,j).^2);
fp3(i,j)=1./(rp3(i,j).^2)-1./(rp31(i,j).^2);fp4(i,j)=1./(rp4(i,j).^2)-1./(rp41(i,j).^2);
fp5(i,j)=1./(rp5(i,j).^2)-1./(rp51(i,j).^2);fp6(i,j)=1./(rp6(i,j).^2)-1./(rp61(i,j).^2);

xp4m(i,j)=d_x(j)-d1./2+eps; xp5m(i,j)=d_x(j)-d2./2+eps; xp6m(i,j)=d_x(j)-d3./2+eps;
yp1m(i,j)=d_y(i)-h1+eps; yp2m(i,j)=d_y(i)-h2+eps; yp3m(i,j)=d_y(i)-h3+eps;
yp4m(i,j)=yp1m(i,j); yp5m(i,j)=yp2m(i,j); yp6m(i,j)=yp3m(i,j);

epx(i,j)=alfa.*(Q(1,1).*xp1(i,j).*fp1(i,j)+Q(2,1).*xp2(i,j).*fp2(i,j))+...
Q(3,1).*xp3(i,j).*fp3(i,j)+Q(4,1).*xp4m(i,j).*fp4(i,j))+...
Q(5,1).*xp5m(i,j).*fp5(i,j)+Q(6,1).*xp6m(i,j).*fp6(i,j));
epy(i,j)=alfa.*(Q(1,1).*yp1m(i,j).*fp1(i,j)+Q(2,1).*yp2m(i,j).*fp2(i,j))+...
Q(3,1).*yp3m(i,j).*fp3(i,j)+Q(4,1).*yp4m(i,j).*fp4(i,j))+...
Q(5,1).*yp5m(i,j).*fp5(i,j)+Q(6,1).*yp6m(i,j).*fp6(i,j));
%epx_modul(i,j)=abs(epx(i,j));
%epy_modul(i,j)=abs(epy(i,j));
e_camp(i,j)=sqrt((epx(i,j).^2)+(epy(i,j).^2));

%CALCULUL CAMPULUI MAGNETIC
%Determinarea inductiei magnetice
fpb1(i,j)=1./(rp1(i,j).^2);fpb2(i,j)=1./(rp2(i,j).^2);fpb3(i,j)=1./(rp3(i,j).^2);
fpb4(i,j)=1./(rp4(i,j).^2);fpb5(i,j)=1./(rp5(i,j).^2);fpb6(i,j)=1./(rp6(i,j).^2);

bpx(i,j)=-beta.*(I1.*yp1m(i,j).*fpb1(i,j)+I2.*yp2m(i,j).*fpb2(i,j))+...
I3.*yp3m(i,j).*fpb3(i,j)+I4.*yp4m(i,j).*fpb4(i,j))+...
I5.*yp5m(i,j).*fpb5(i,j)+I6.*yp6m(i,j).*fpb6(i,j));
bpy(i,j)=beta.*(I1.*xp1(i,j).*fpb1(i,j)+I2.*xp2(i,j).*fpb2(i,j))+...
I3.*xp3(i,j).*fpb3(i,j)+I4.*xp4m(i,j).*fpb4(i,j))+...
I5.*xp5m(i,j).*fpb5(i,j)+I6.*xp6m(i,j).*fpb6(i,j));
b_camp(i,j)=sqrt((bpx(i,j).^2)+(bpy(i,j).^2));

end
end
vp:
vp_modul=abs(vp);
e_camp_modul=abs(e_camp);
b_camp_modul=abs(b_camp);
bpx_modul=abs(bpx);
bpy_modul=abs(bpy);

surf(d_x, d_y, vp_modul)
xlabel('x [m]')
ylabel('inaltimea h [m]')
zlabel('potentialul V [V]')

```

```
figure(2);  
surf(d_x, d_y, e_camp_modul)  
colormap cool;  
xlabel('x [m]')  
ylabel('inaltimea h [m]')  
zlabel('campul E [V/m]')
```

```
figure(3);  
surf(d_x, d_y, b_camp_modul)  
colormap cool;  
xlabel('x [m]')  
ylabel('inaltimea h [m]')  
zlabel('campul B [T]')
```

```
figure(4);  
surf(d_x, d_y, bpx_modul)  
colormap cool;  
xlabel('x [m]')  
ylabel('inaltimea h [m]')  
zlabel('campul B_x [T]')
```

```
figure(5);  
surf(d_x, d_y, bpy_modul)  
colormap cool;  
xlabel('x [m]')  
ylabel('inaltimea h [m]')  
zlabel('campul B_y [T]')
```

5.3. Aplicarea programului

Folosind pachetul de programe MATLAB R12, pentru linia electrică aeriană, de 110 kV, dublu circuit, cu stâlpi tip Sn 110.252, s-au introdus următoarele valori:

```
%Date inițiale
h1=20; h2=16; h3=12;
d1=6.1; d2=7.65; d3=6.1;
r0=9.5*10^(-3);
L=13*10^3;
eps0=1./(4*pi*9*10^9);
miu0=4.*pi.*10.^-7;
f=50; ro=50;
omega=2.*pi.*f;
Rcp=550.*sqrt(ro./f);
```

a.1. Regimul de funcționare permanent

```
%Tensiunile pe faze
U=zeros(6,1);
U(1,1)=63.509*10^3;
U(2,1)=(63.509*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
U(3,1)=(63.509*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);
U(4,1)=U(1,1); U(5,1)=U(2,1); U(6,1)=U(3,1)

%Curenții prin faze
I1=100; I2=100.*(-.5-i*sqrt(3)/2); I3=100.*(-.5+i*sqrt(3)/2);
I4=I1; I5=I2; I6=I3;
```

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 1**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.2, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.3, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.4.

b.1. Tensiunile induse prin cuplaj capacitiv și inductiv atunci când unul din circuite este pasivizat:

```
%Tensiunile de faza
U=zeros(6,1);
U(1,1)=63.509*10^3;
U(2,1)=(63.509*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
U(3,1)=(63.509*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);

%Curentii prin faze
I1=100; I2=100.*(-.5-i*sqrt(3)/2); I3=100.*(-.5+i*sqrt(3)/2);
I4=0; I5=0; I6=0;
```

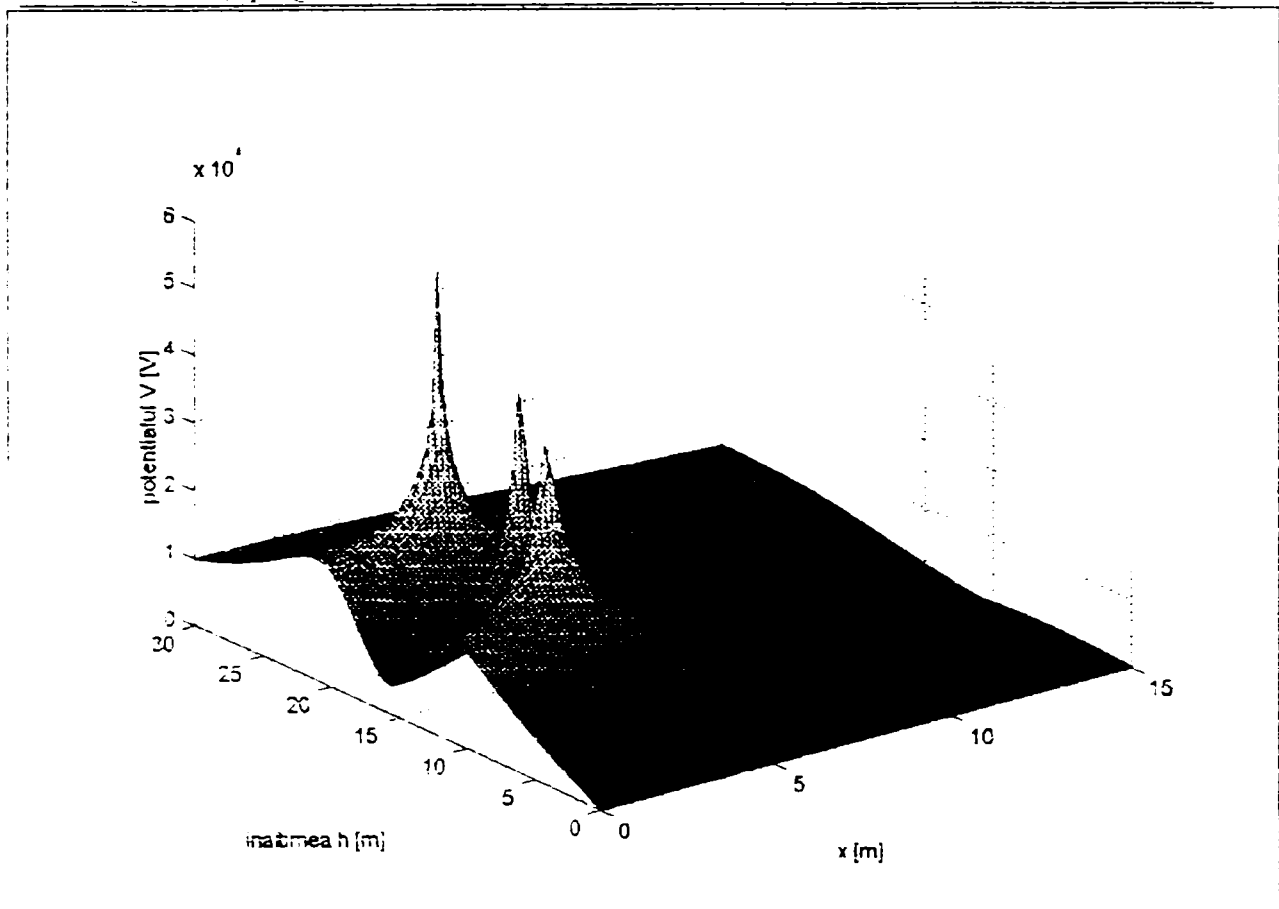



Figura 5.2 Reprezentarea potențialului electric V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, regim normal

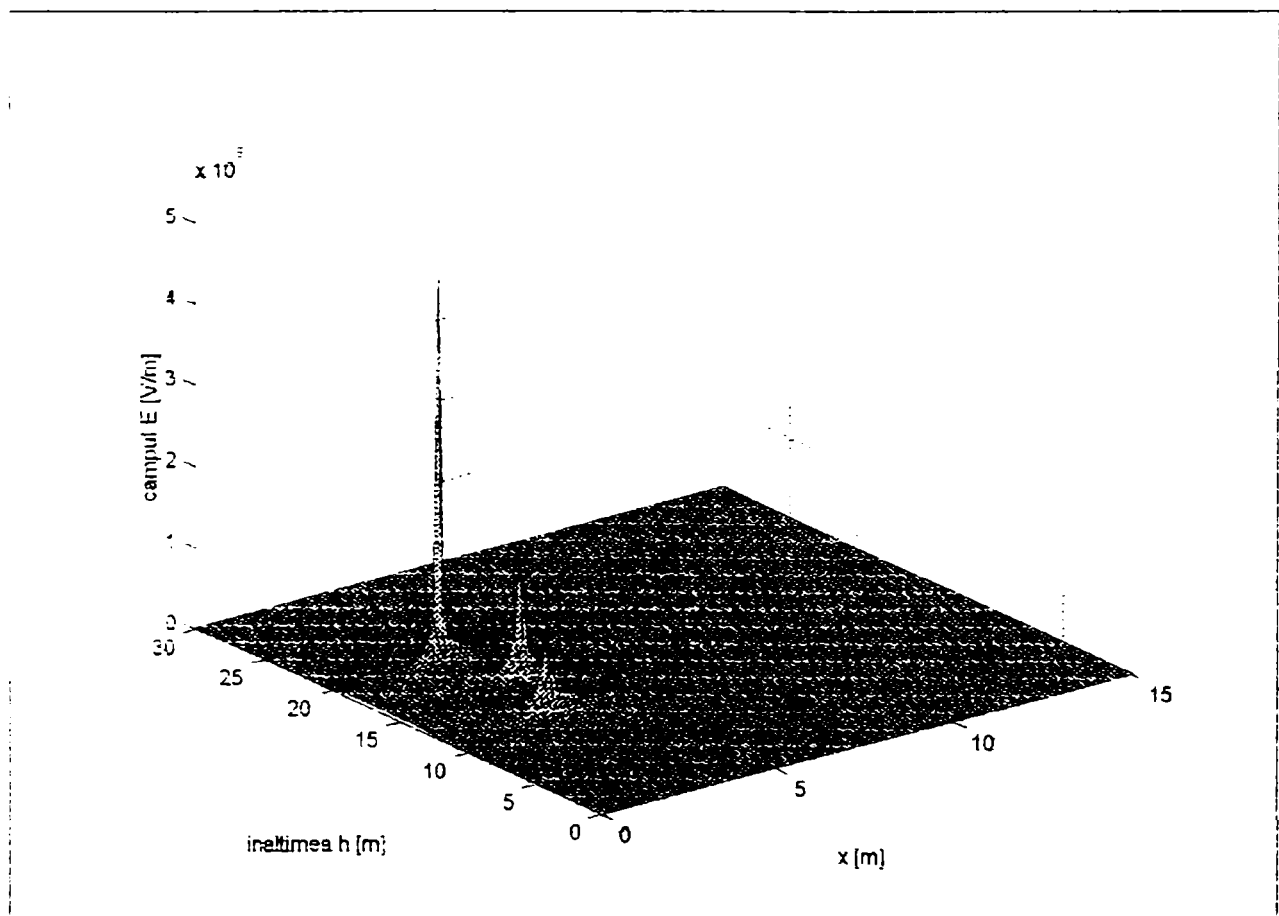


Figura 5.3 Variația intensității câmpului electric E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, regim normal

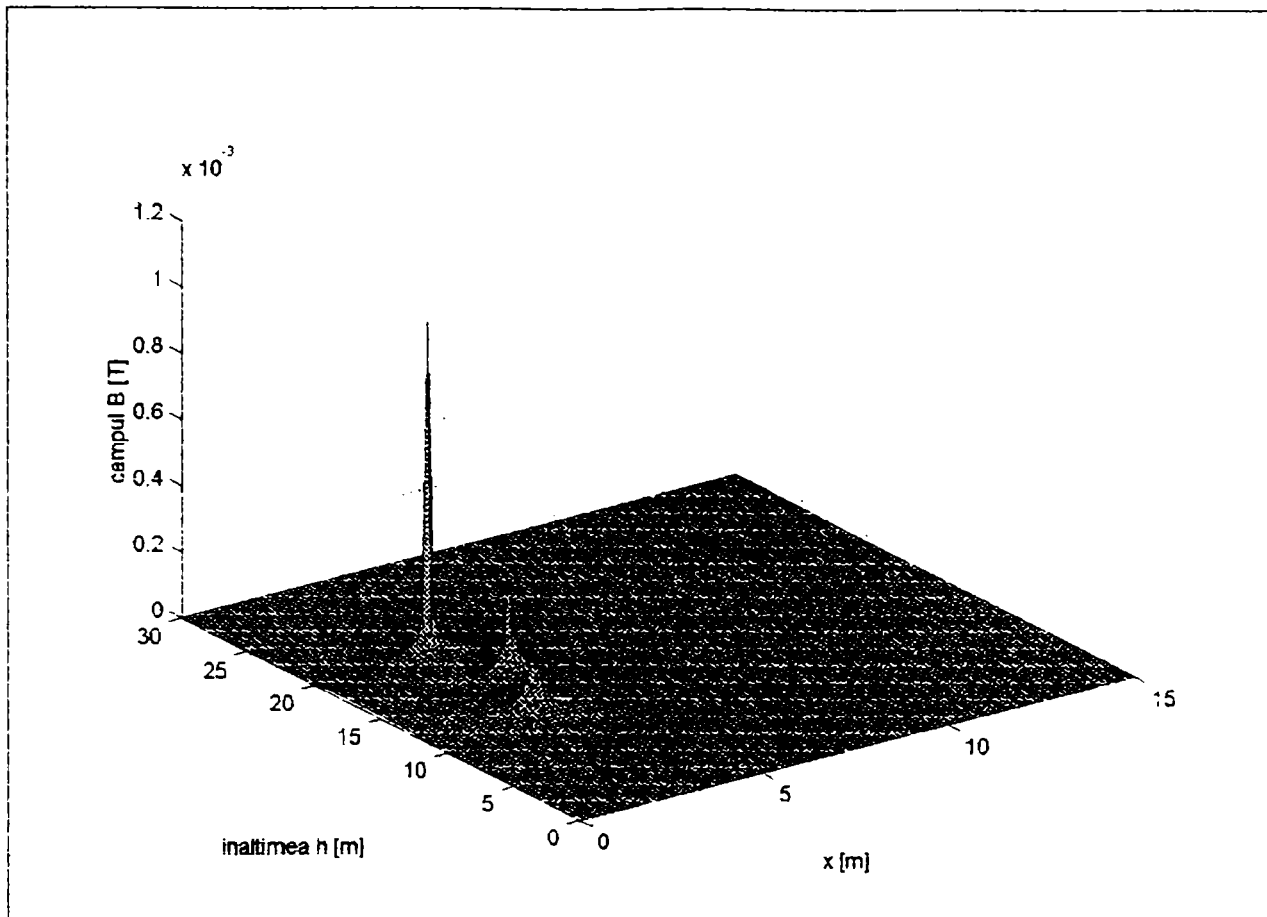


Figura 5.4 Variația inducției câmpului magnetic B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, regim normal

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 2**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.5, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.6, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.7.

c.1. Funcționare în regim de avarie (scurtcircuit monofazat)

%Curentii din linii

```
I1=(2.686-i*5.984)*10^3; I2=0; I3=0;
I4=0; I5=0; I6=0;
```

%Tensiunile de faza

```
U=zeros(6,1);
U(1,1)=0;
U(2,1)=10^4*(-5.25-i*6.431);
U(3,1)=10^4*(-5.25+i*4.569);
```

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 3**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.8,

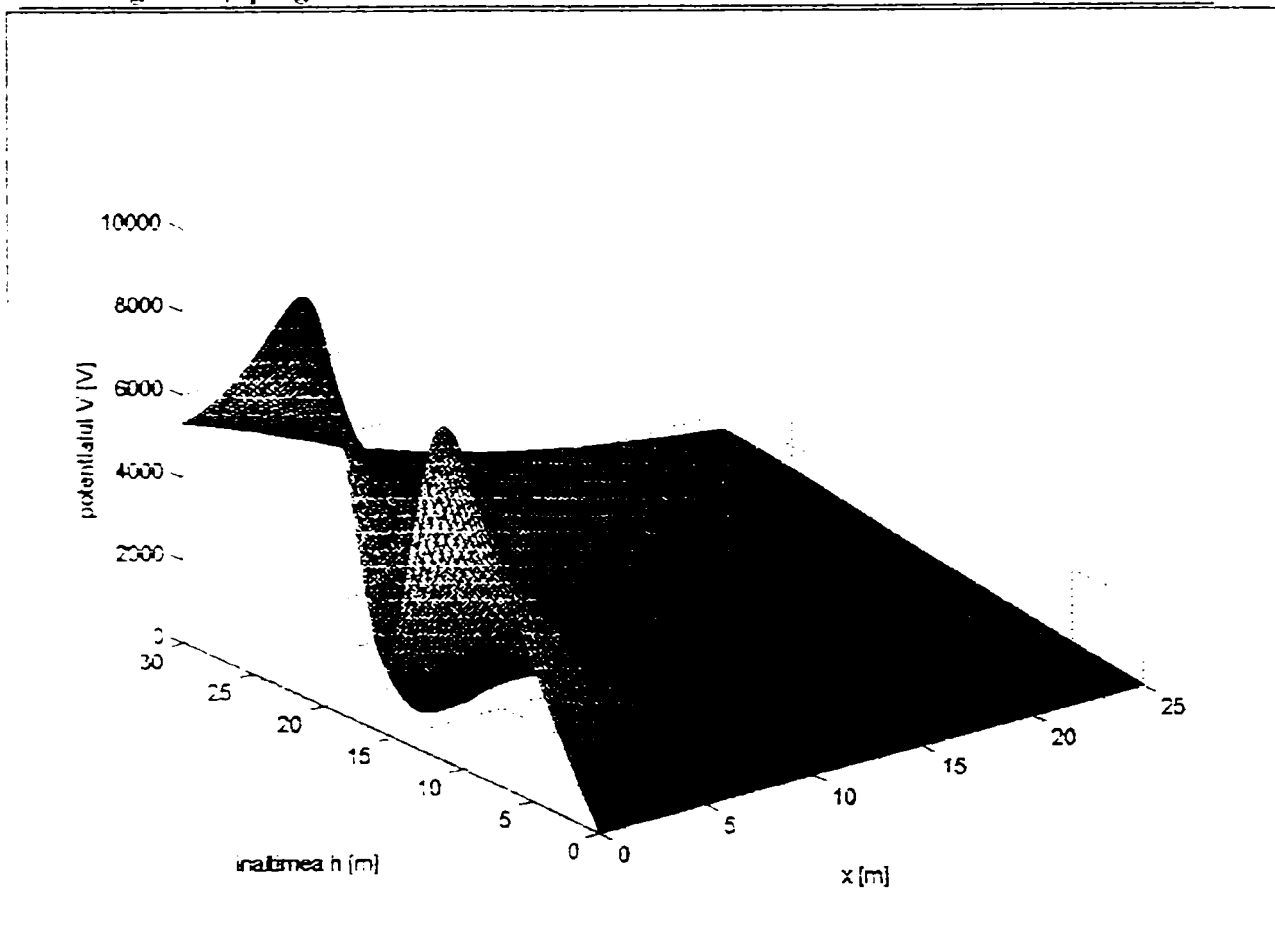


Figura 5.5 Reprezentarea potențialului electric V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, unul din circuite fiind pasivizat

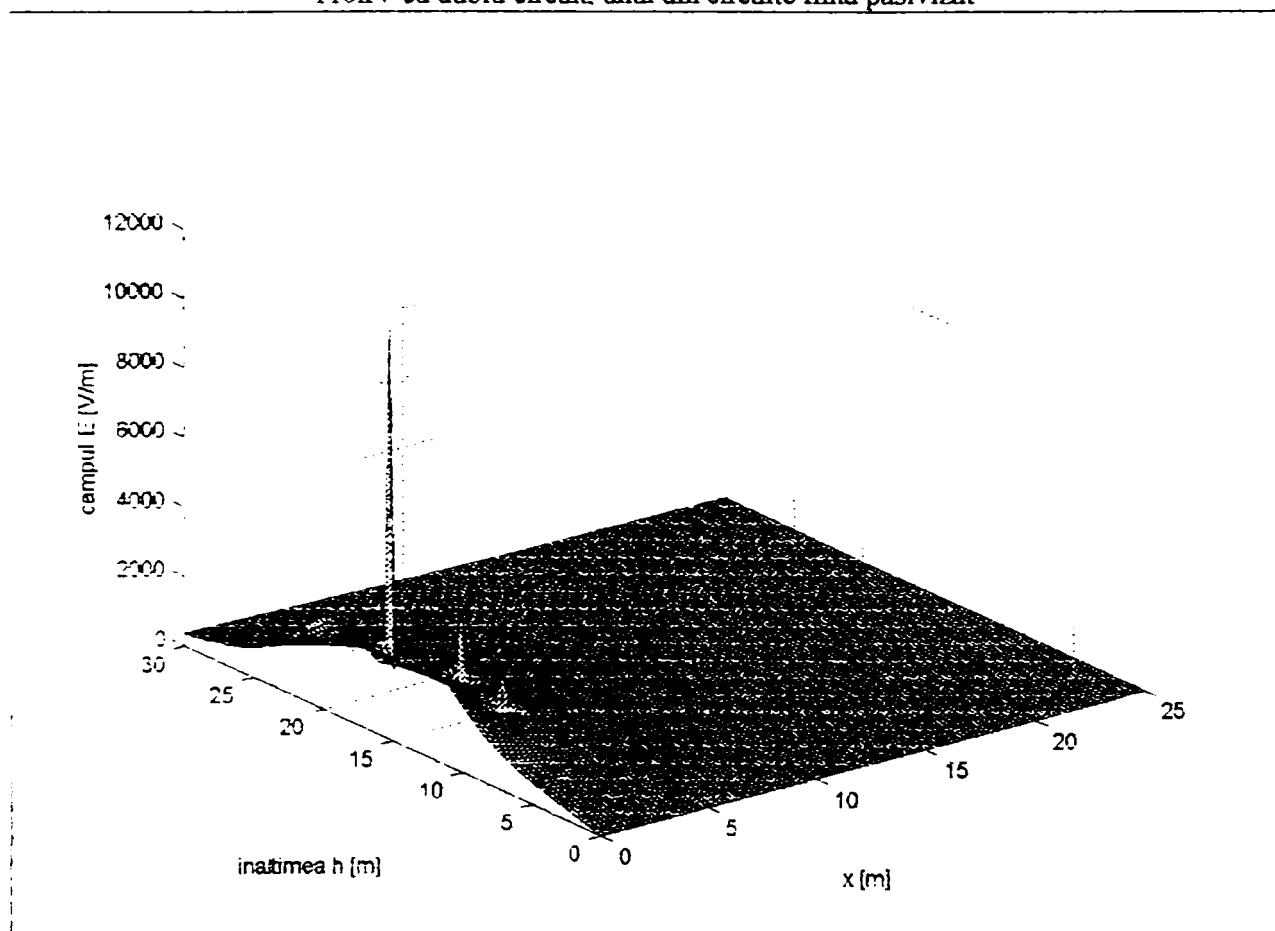


Figura 5.6 Variația intensității câmpului electric E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, unul din circuite fiind pasivizat

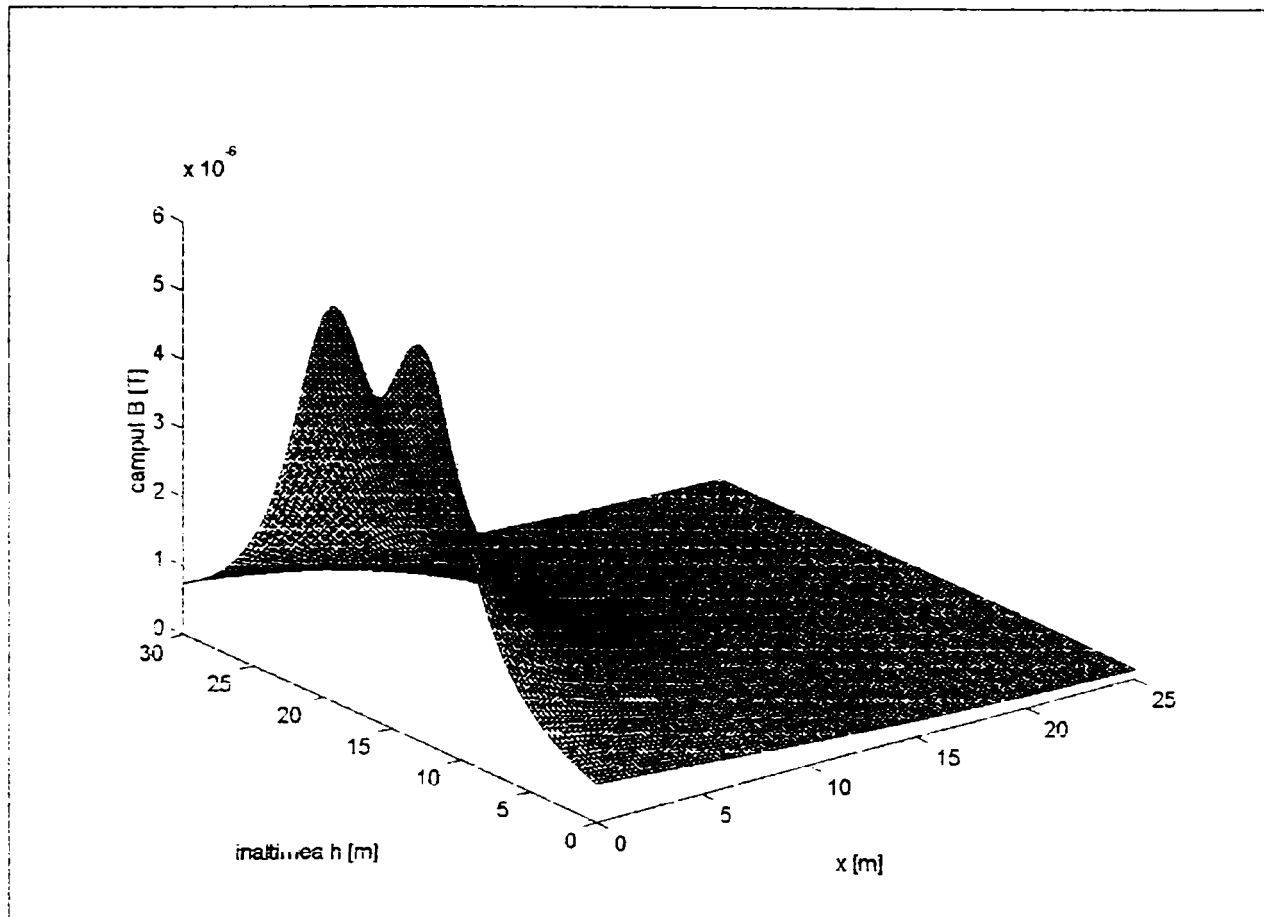


Figura 5.7 Variația inducției câmpului magnetic B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, un circuit pasivizat

pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.9, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.10

Pentru linia electrică aeriană, de 220 kV, dublu circuit, cu stâlpi tip Sn 220.202, s-au introdus următoarele valori de calcul:

```
%Date initiale
h1=25; h2=18.5; h3=12;
d1=9; d2=16; d3=10;
r0=14.625*10^(-3);
L=73*10^3;
eps0=1./(4*pi*9*10^9);
miu0=4.*pi.*10.^-7;
f=50; ro=50;
omega=2.*pi.*f;
Rcp=550.*sqrt(ro./f);
```

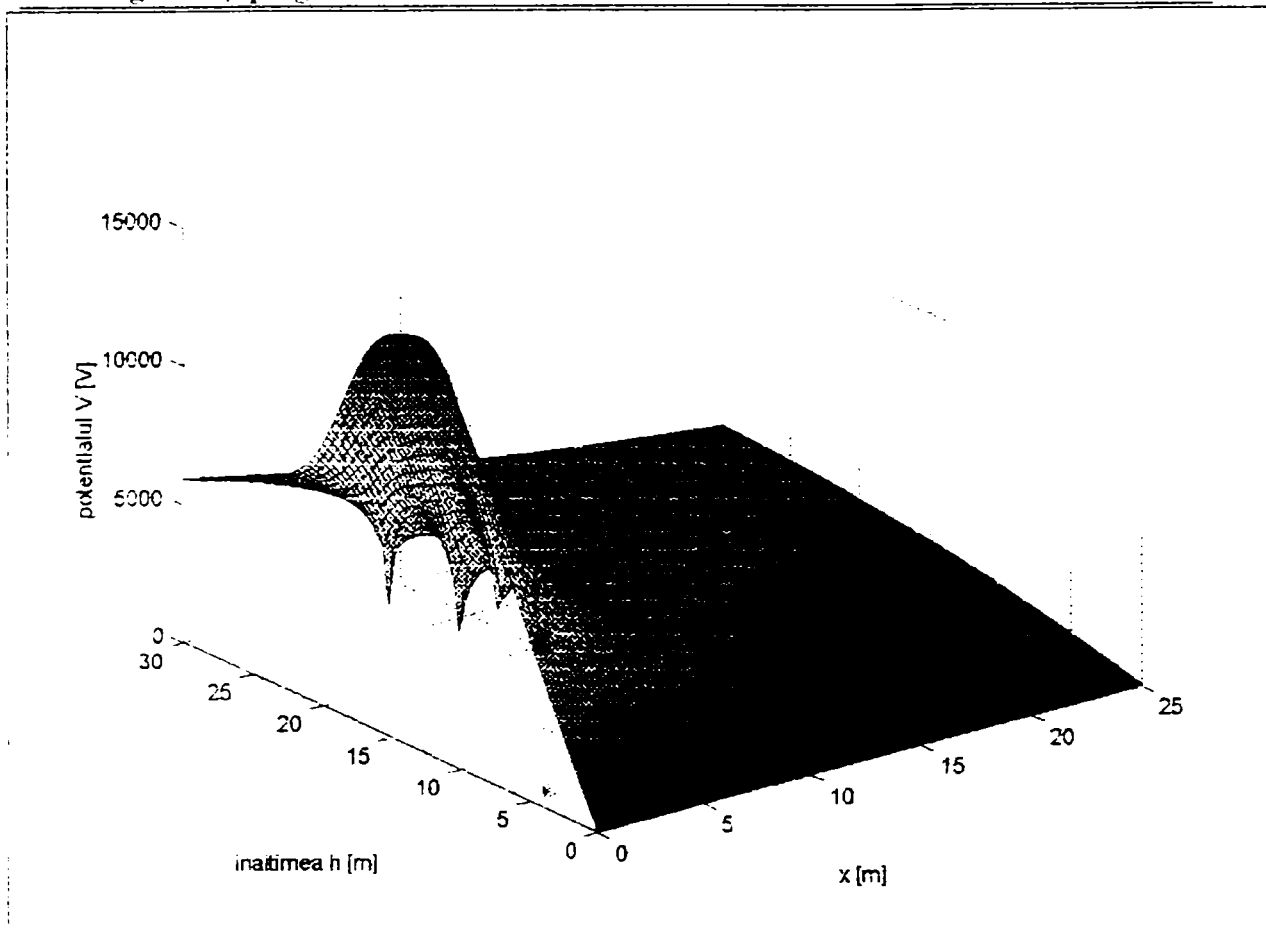


Figura 5.8 Variația potențialului V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec.

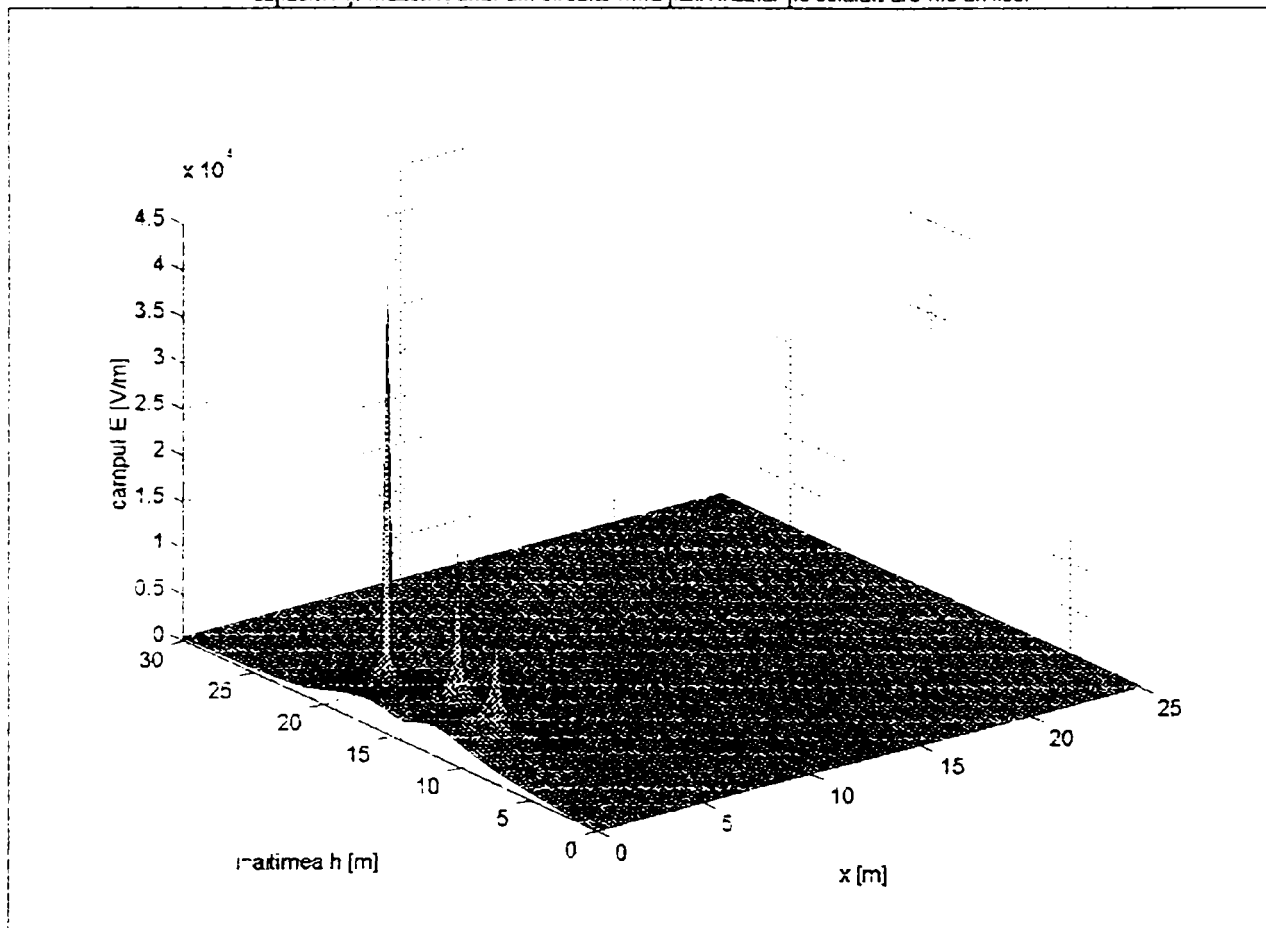


Figura 5.9 Variația intensității E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu d. c., prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec

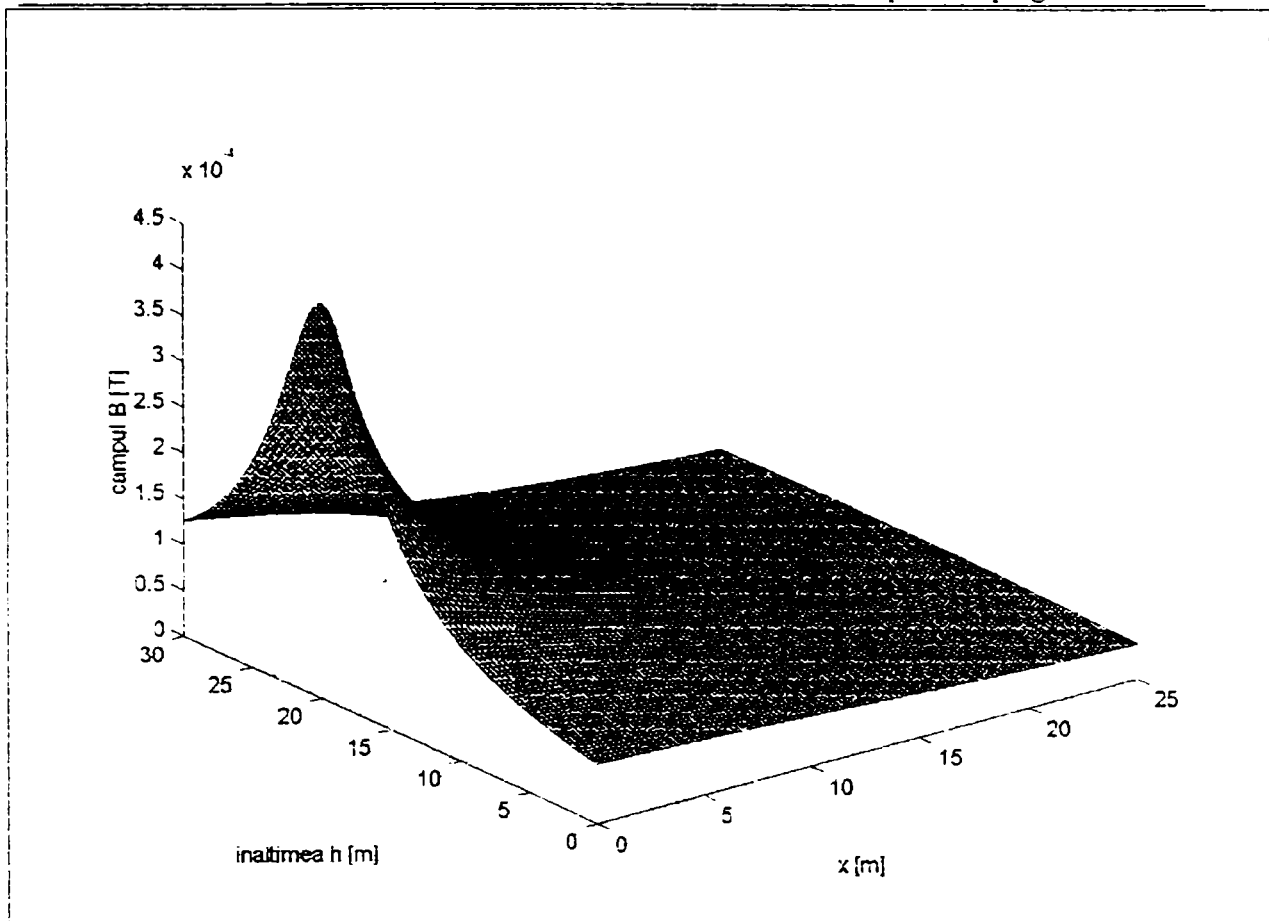


Figura 5.10 Variația inducției B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu d. c., prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un scc

a.2. Regimul de funcționare permanent

%Tensiunile de faza

```
U=zeros(6,1);
U(1,1)=127*10^3;
U(2,1)=(127*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
U(3,1)=(127*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);
U(4,1)=U(1,1); U(5,1)=U(2,1); U(6,1)=U(3,1);
```

%Intensitatea curenților prin faze

```
I1=200; I2=200.*(-.5-i*sqrt(3)/2); I3=200.*(-.5+i*sqrt(3)/2);
I4=I1; I5=I2; I6=I3;
```

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 1**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.11, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.12, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.13.

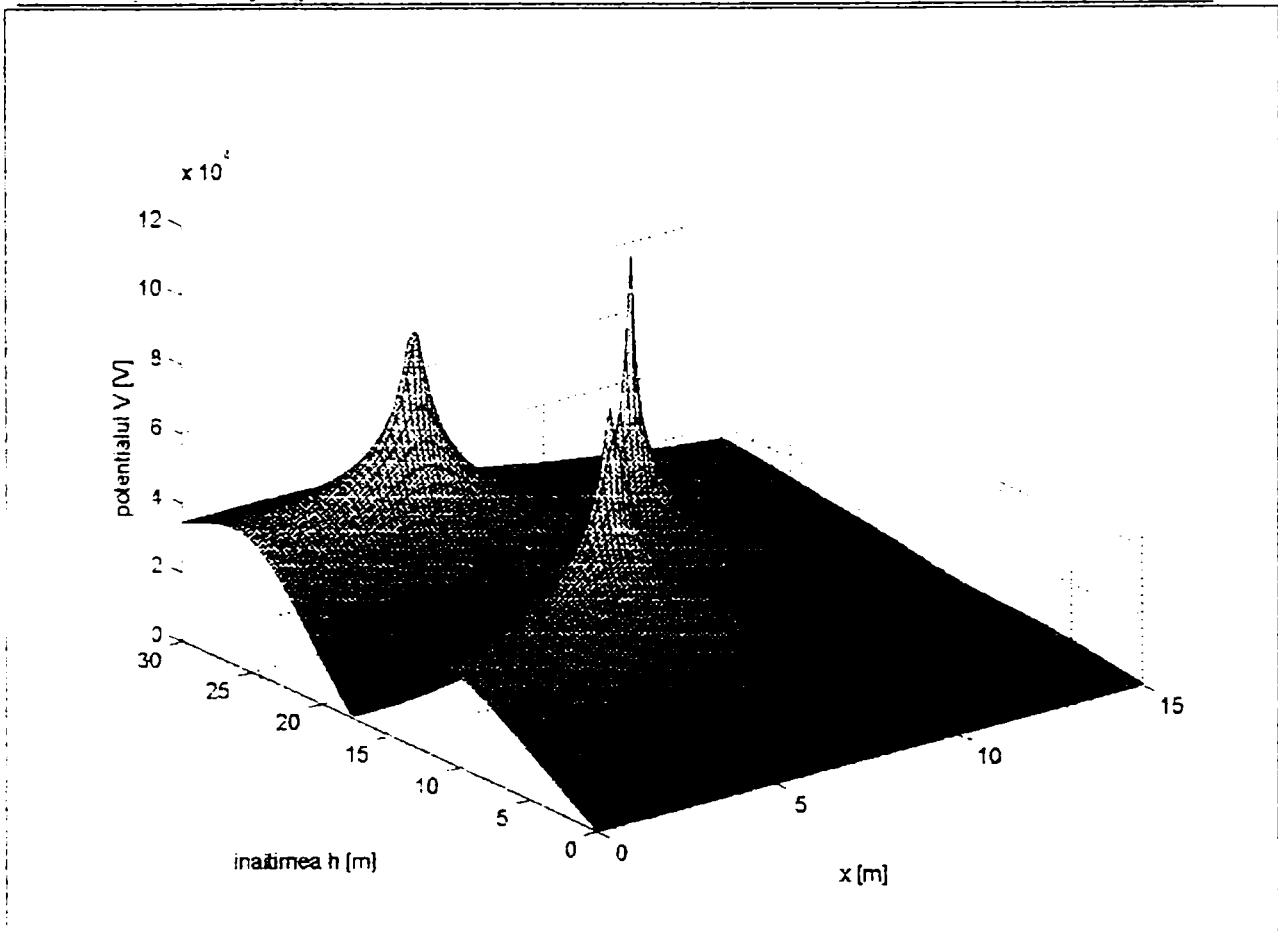


Figura 5.11 Reprezentarea potențialului electric V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu dublu circuit, regim normal

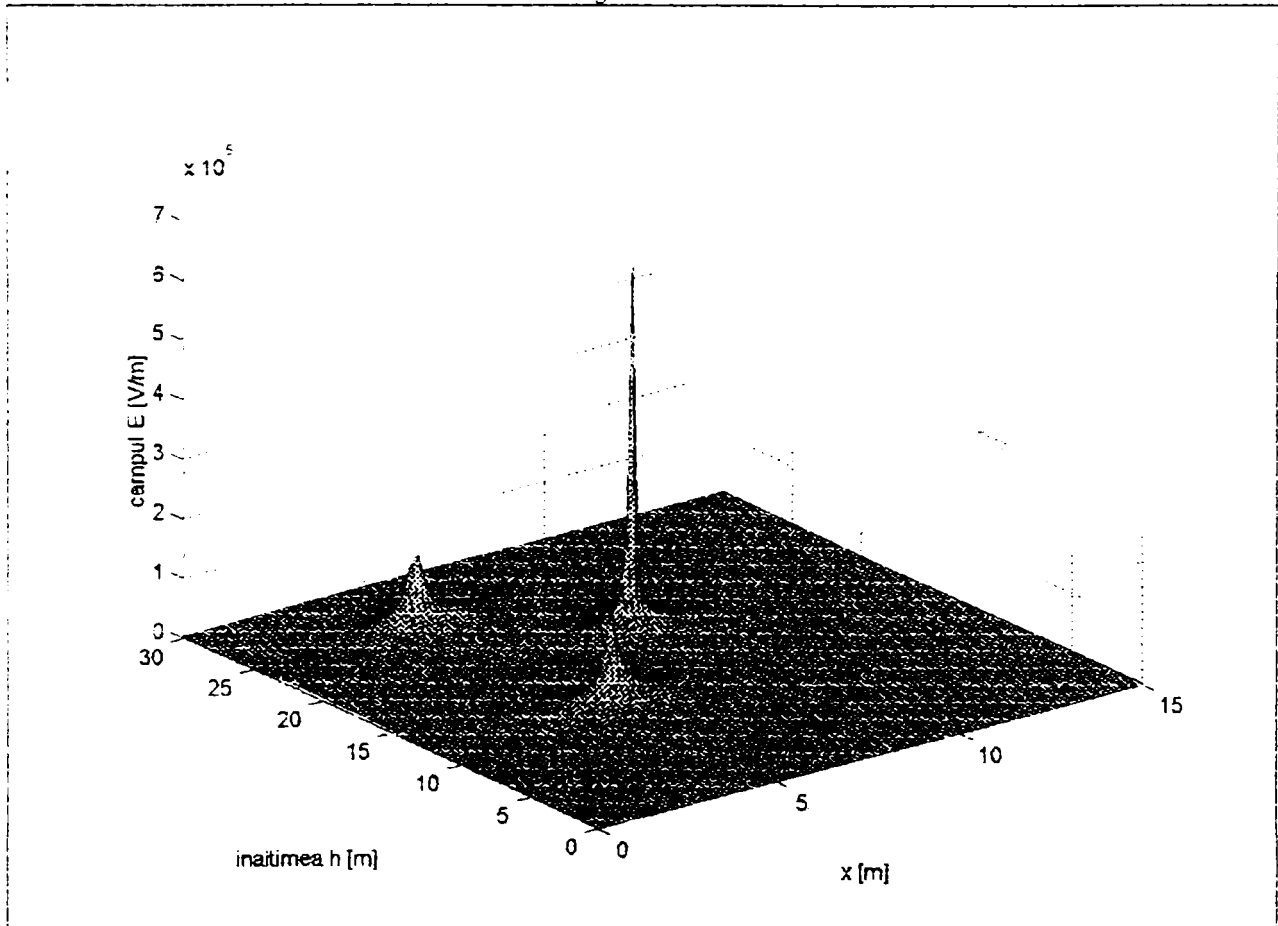


Figura 5.12 Variația intensității câmpului electric E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu dublu circuit, regim normal

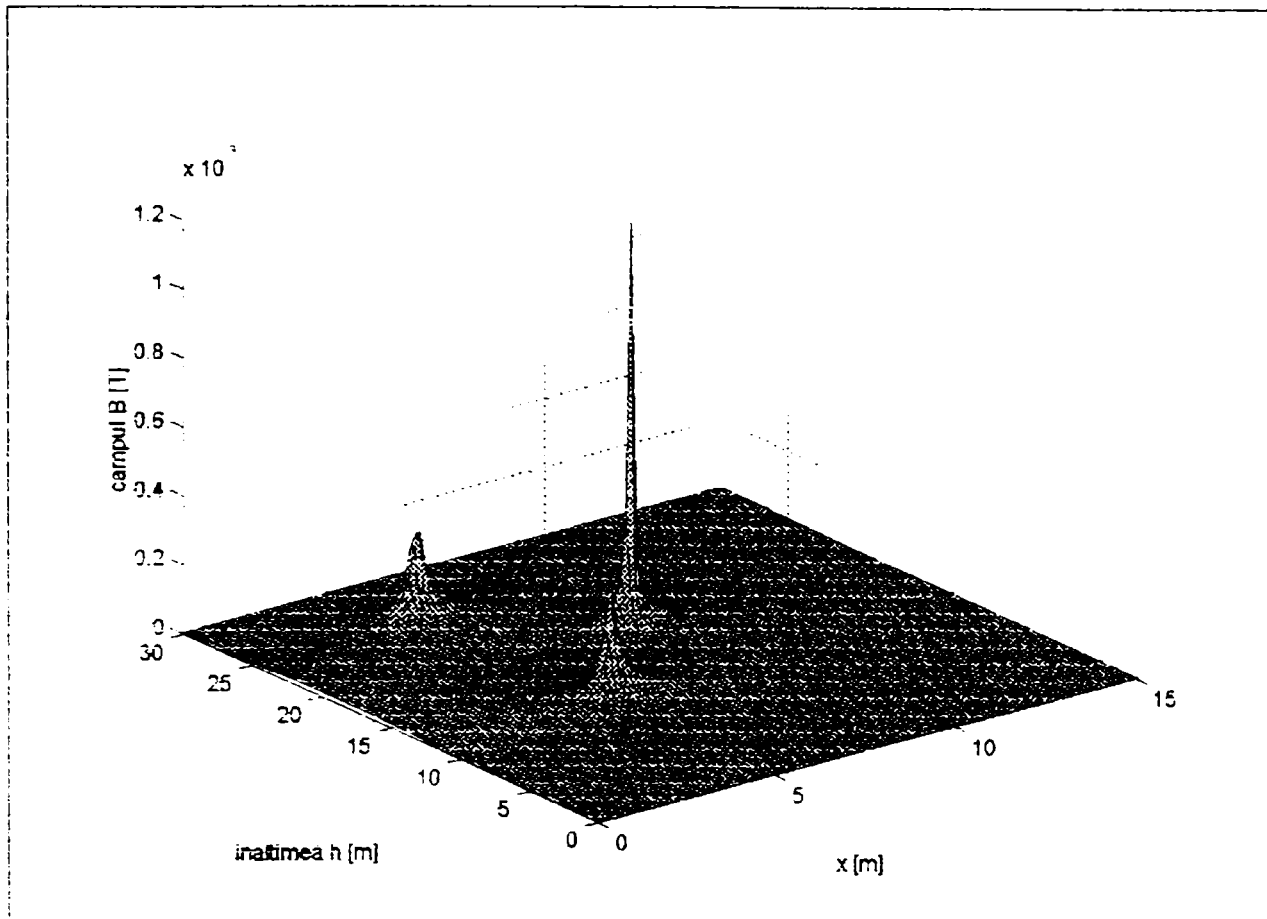


Figura 5.13 Variația inducției câmpului magnetic B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu dublu circuit, regim normal

b.2. Tensiunile induse prin cuplaj capacitiv și inductiv atunci când unul din circuite este pasivizat:

```
%Curenții din faze
I1=200; I2=200.*(-.5-i*sqrt(3)/2); I3=200.*(-.5+i*sqrt(3)/2);
I4=0; I5=0; I6=0;
```

```
%Tensiunile de faza
U=zeros(6,1);
U(1,1)=127*10^3;
U(2,1)=(127*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
U(3,1)=(127*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);
```

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 2**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.14, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.15, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.16.

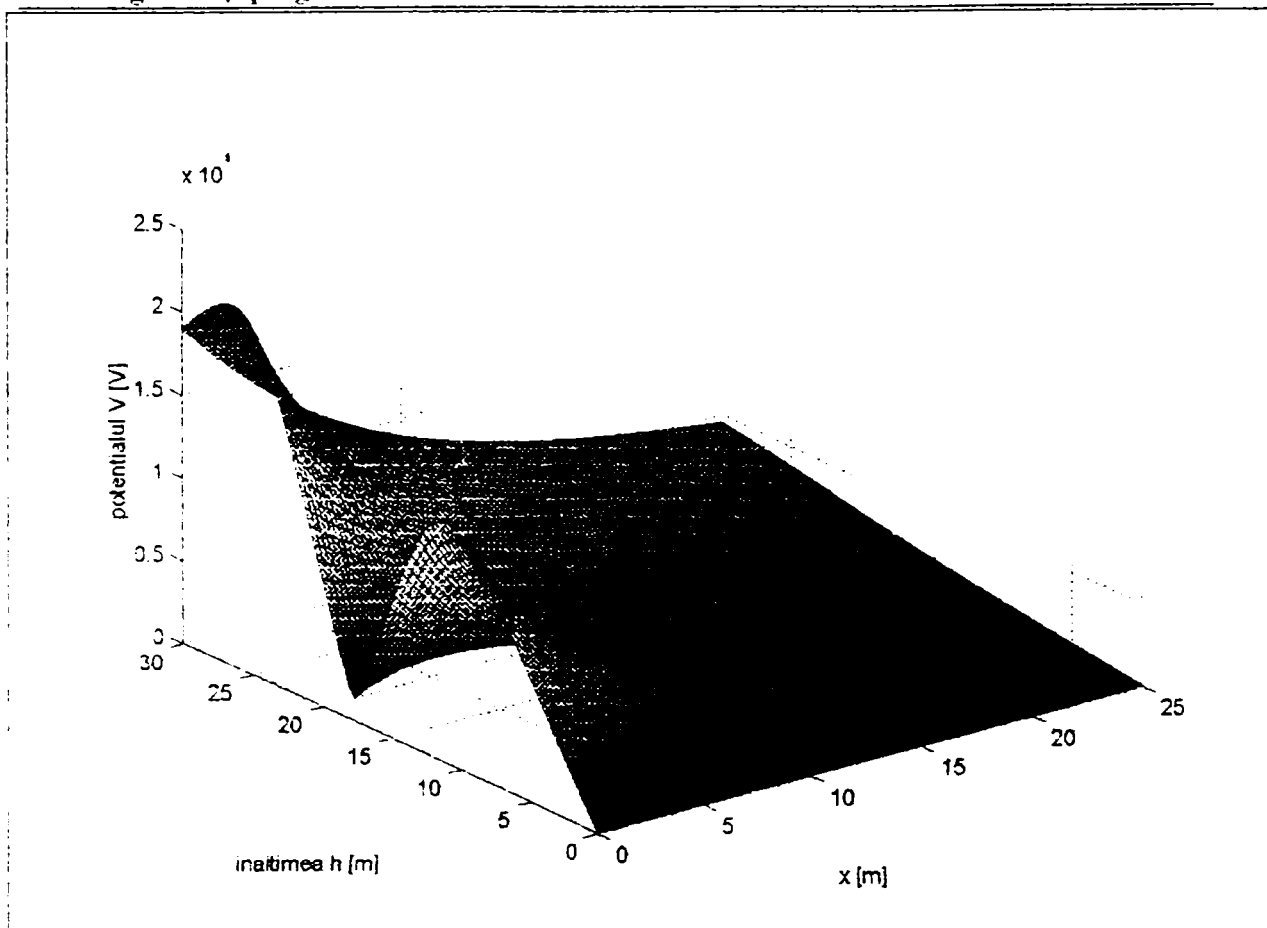


Figura 5.14 Reprezentarea potențialului electric V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu dublu circuit, unul din circuite fiind pasivizat

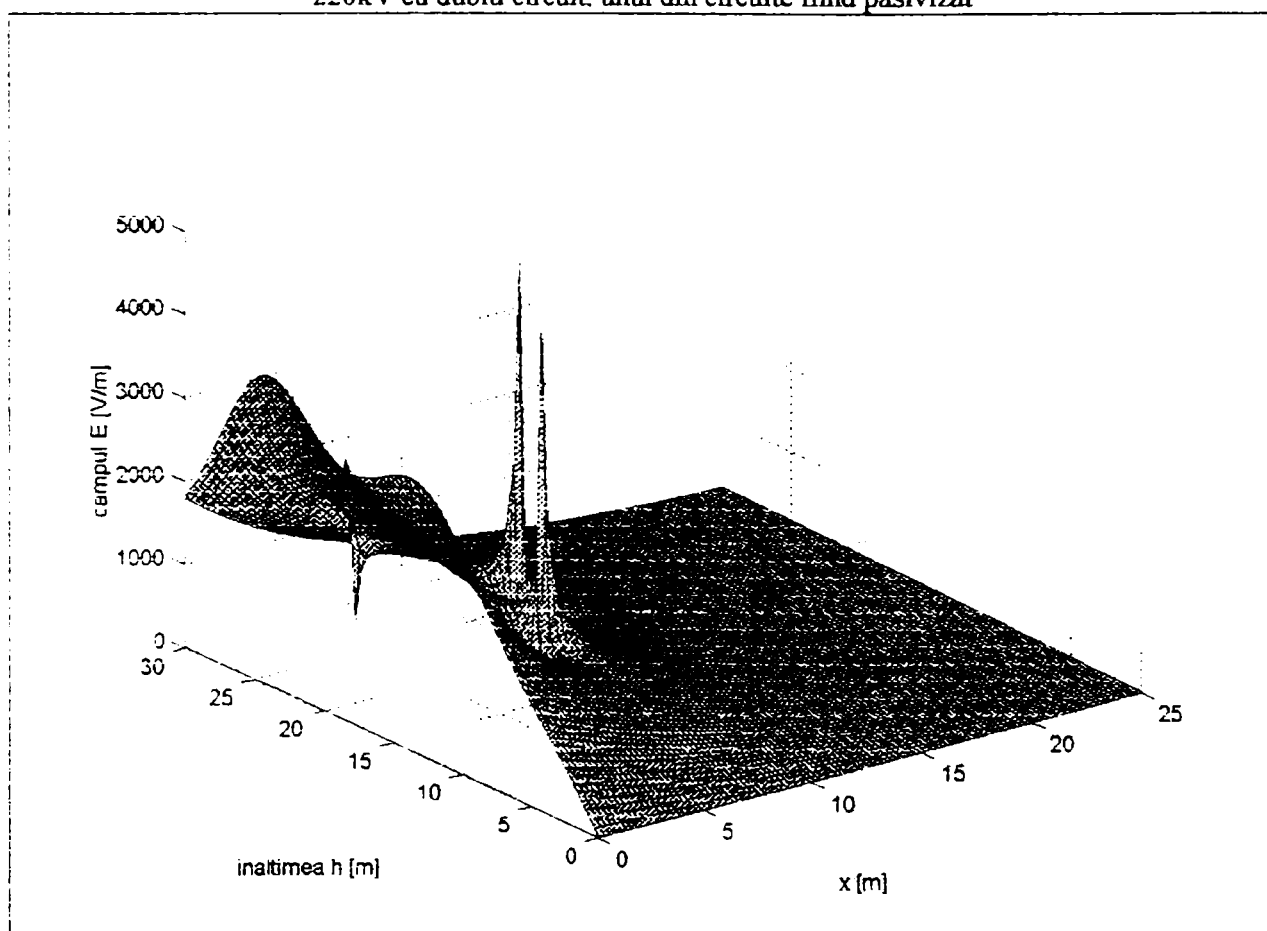


Figura 5.15 Variația intensității câmpului electric E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu dublu circuit, unul din circuite fiind pasivizat

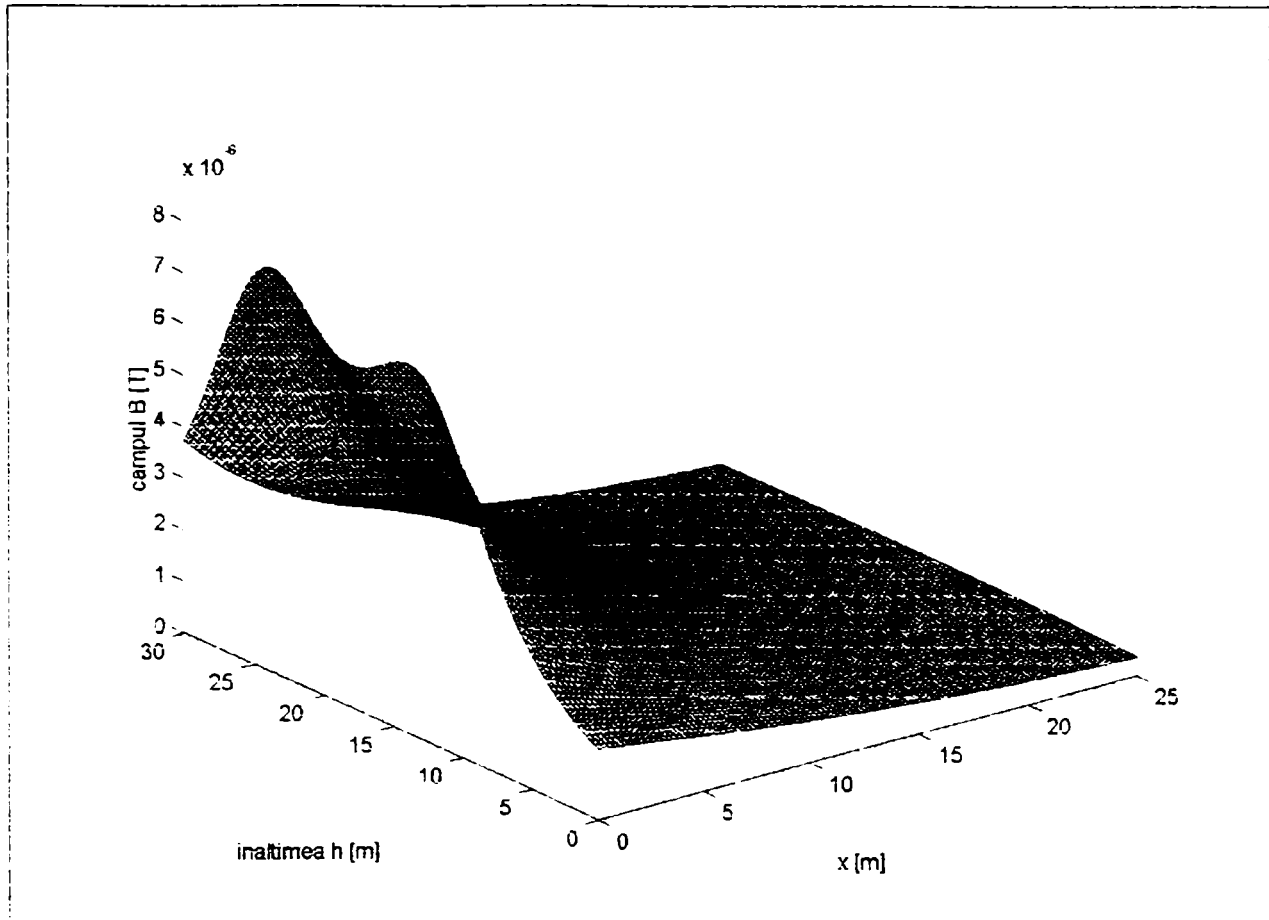


Figura 5.16 Variația inducției câmpului magnetic B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu dublu circuit, un circuit pasivizat

c.2. Funcționare în regim de avarie (scurtcircuit monofazat)

Curentii din linii

$$I_1 = 441.5 - i \cdot 2.525 \cdot 10^3; I_2 = 0; I_3 = 0;$$

$$I_4 = 0; I_5 = 0; I_6 = 0;$$

%Tensiunile de faza

$$U = \text{zeros}(6,1);$$

$$U(1,1) = 0;$$

$$U(2,1) = 10^5 \cdot (-1.143 - i \cdot 1.1);$$

$$U(3,1) = 10^5 \cdot (-1.143 - i \cdot 1.1);$$

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 3**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.17, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.18, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.19.

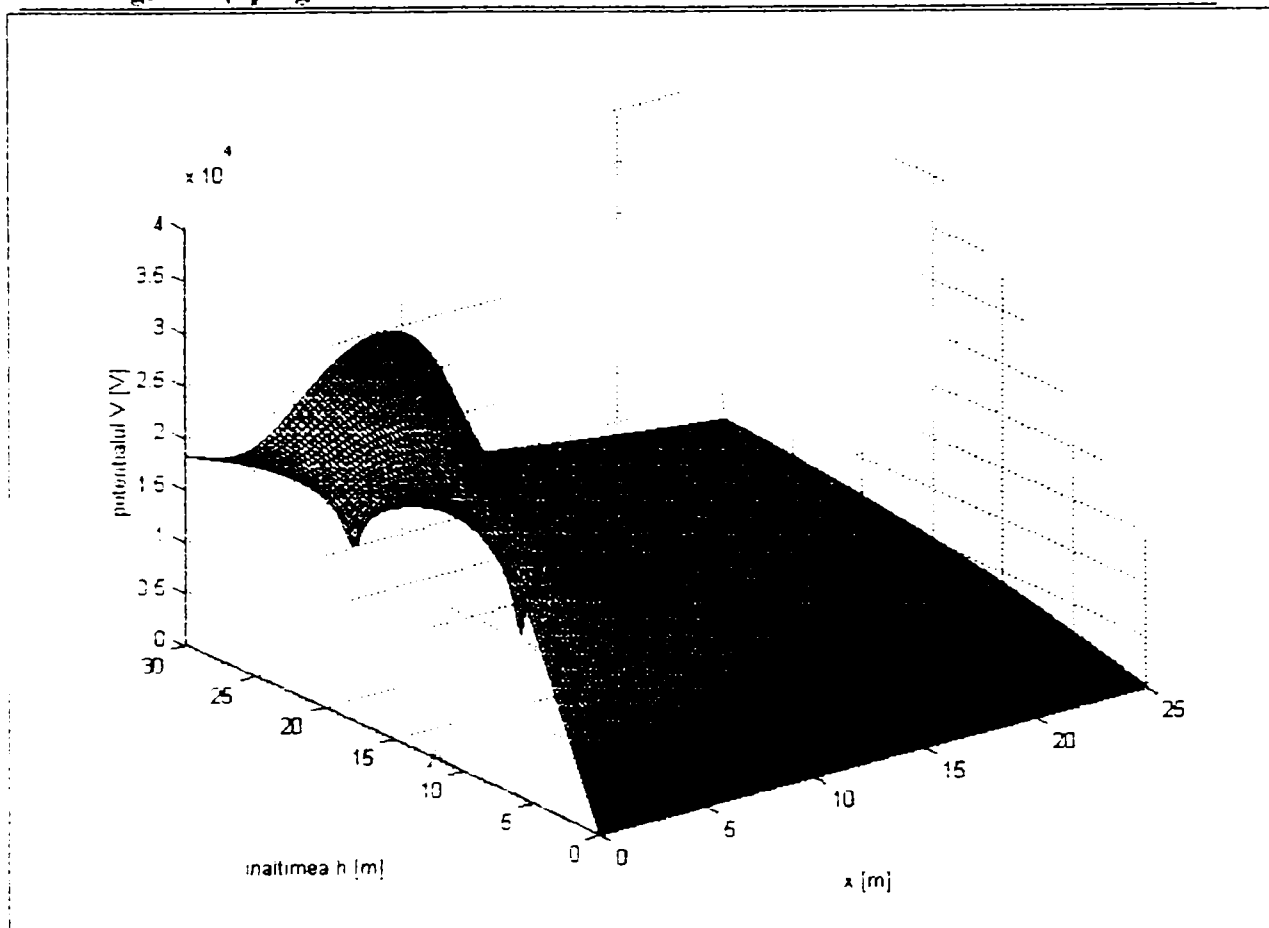


Figura 5.17 Variația potențialului V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu dublu circuit, prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec

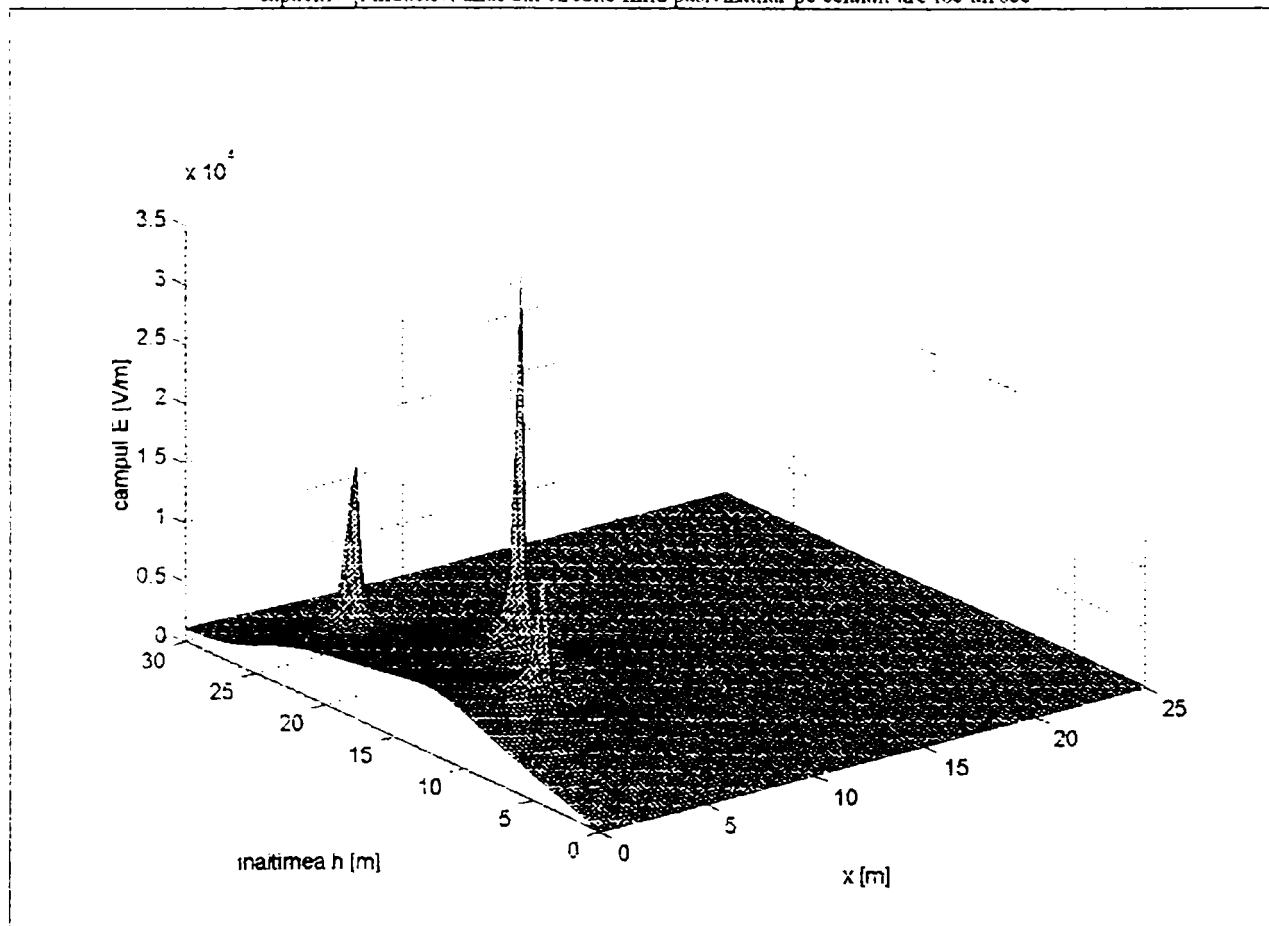


Figura 5.18 Variația intensității E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu d. c., prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec

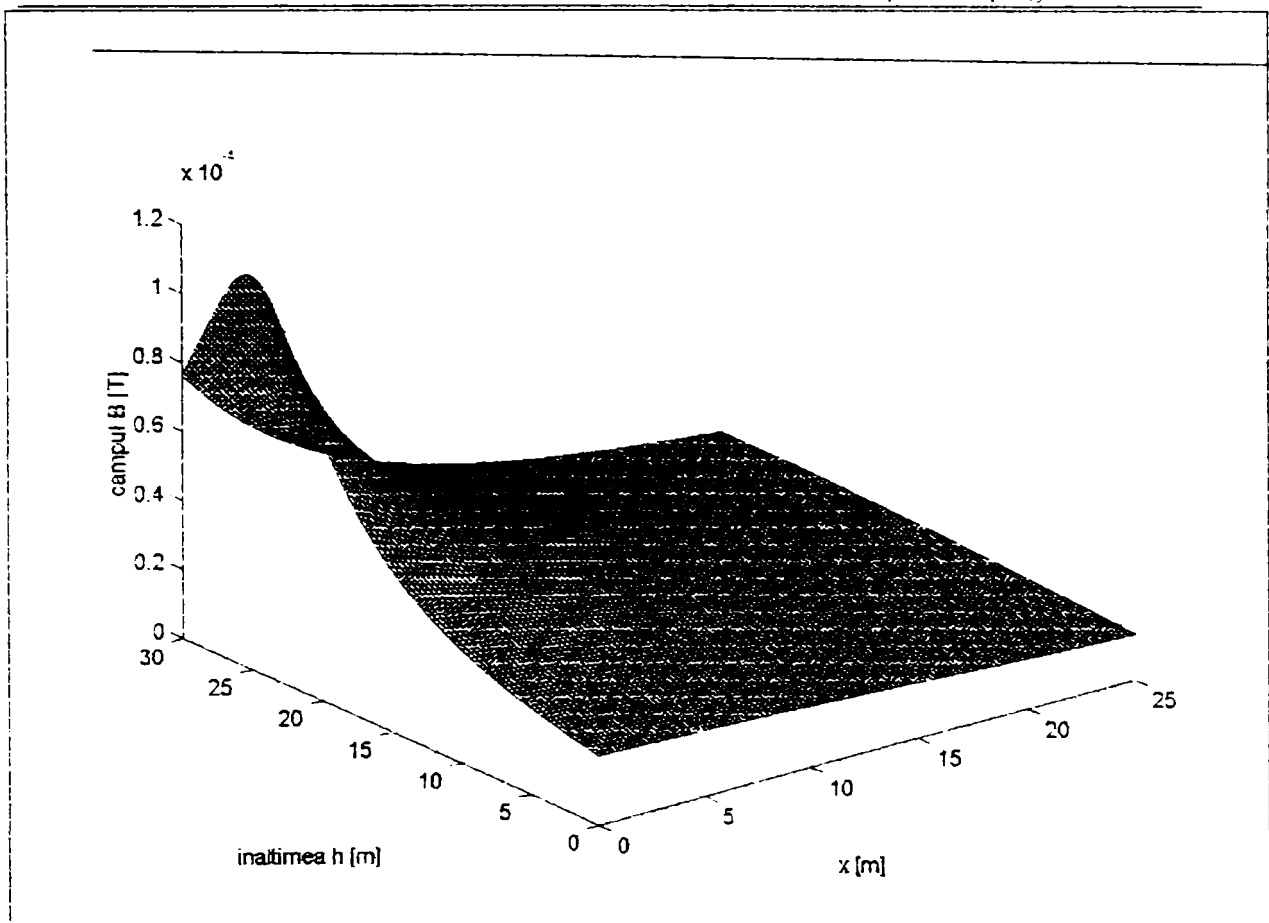


Figura 5.19 Variația inducției B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 220kV cu d. c., prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un scc

Pentru linia electrică aeriană, de 400 kV, dublu circuit, cu stâlpi tip Sn 400.272, s-au introdus următoarele valori de calcul:

```
%Date inițiale
h1=26; h2=16.25; h3=8;
d1=14; d2=22; d3=14;
r0=92.5*10^(-3);
L=1*10^4;
eps0=1./(4*pi*9*10^9);
miu0=4.*pi.*10.^-7;
f=50; ro=50;
omega=2.*pi.*f;
Rcp=550.*sqrt(ro./f);
```

a.3. Regimul de funcționare permanent

```
%Tensiunile de fază
U=zeros(6,1);
U(1,1)=230.94*10^3;
U(2,1)=(230.94*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
U(3,1)=(230.94*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);
U(4,1)=U(1,1); U(5,1)=U(2,1); U(6,1)=U(3,1);
```

%Curenții prin faze

$I_1=200$; $I_2=200.*(-.5-i*\text{sqrt}(3)/2)$; $I_3=200.*(-.5+i*\text{sqrt}(3)/2)$;

$I_4=I_1$; $I_5=I_2$; $I_6=I_3$;

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 1**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.20, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.21, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.22.

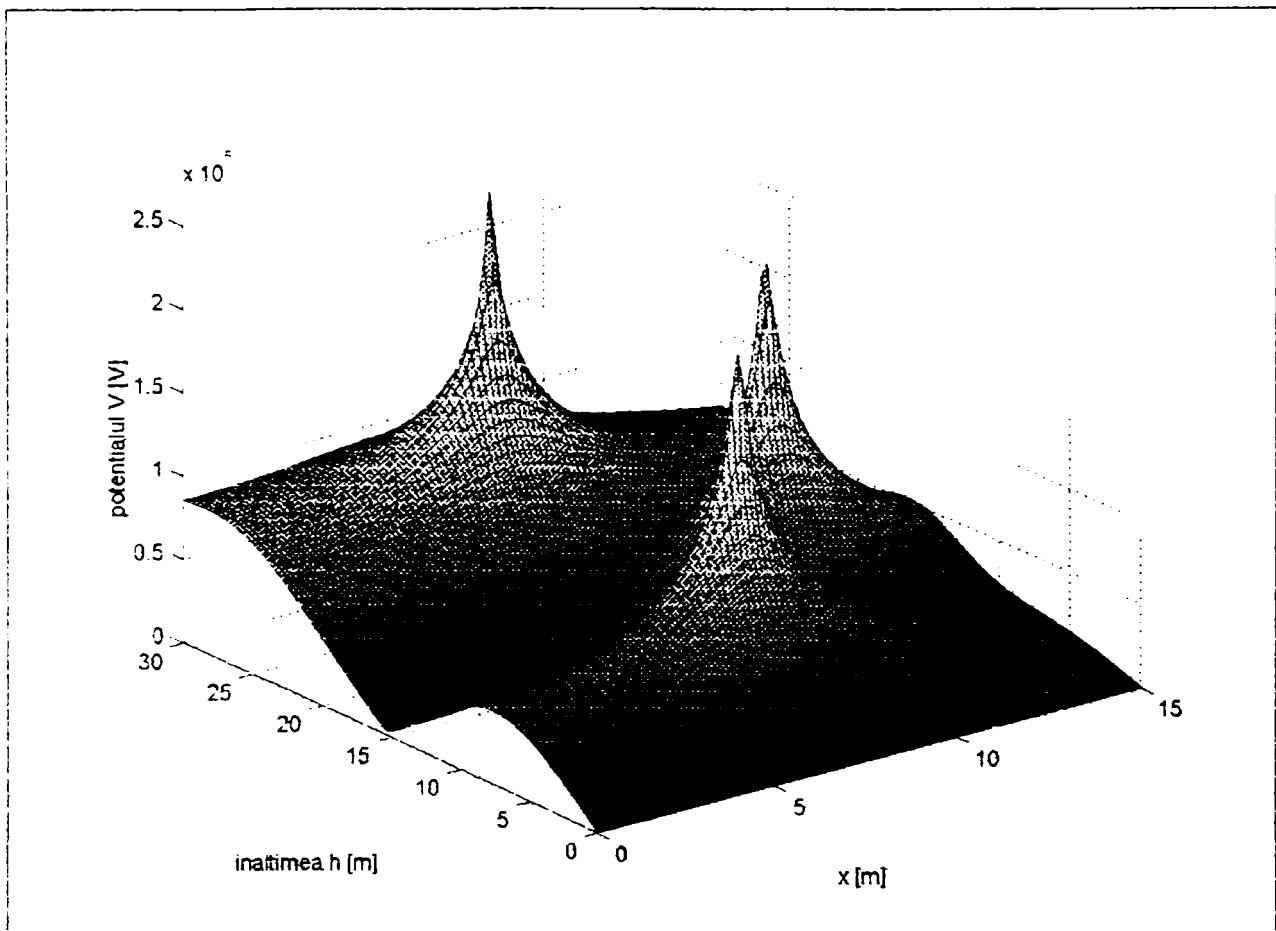


Figura 5.20 Reprezentarea potențialului electric V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu dublu circuit, regim normal

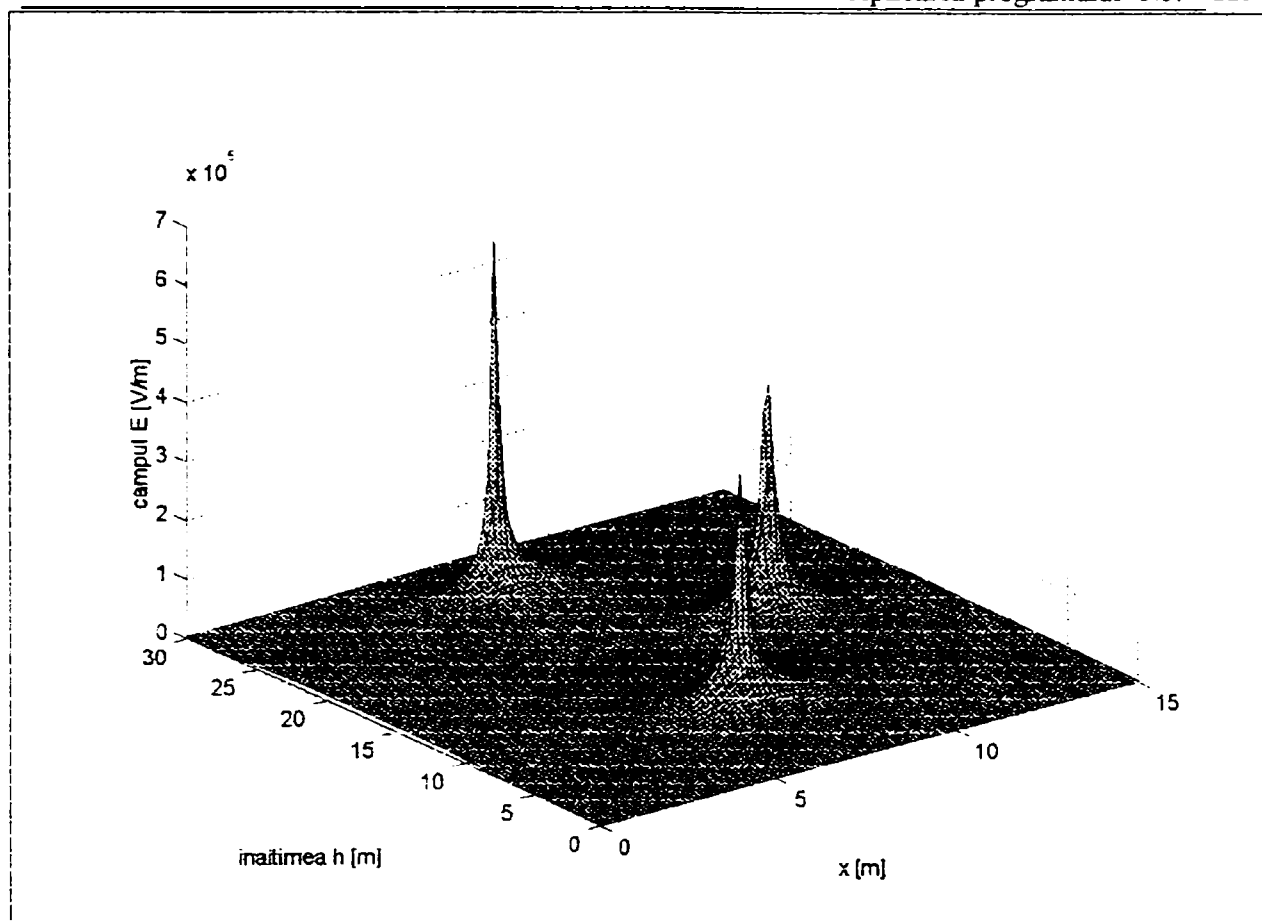


Figura 5.21 Variația intensității câmpului electric E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu dublu circuit, regim normal

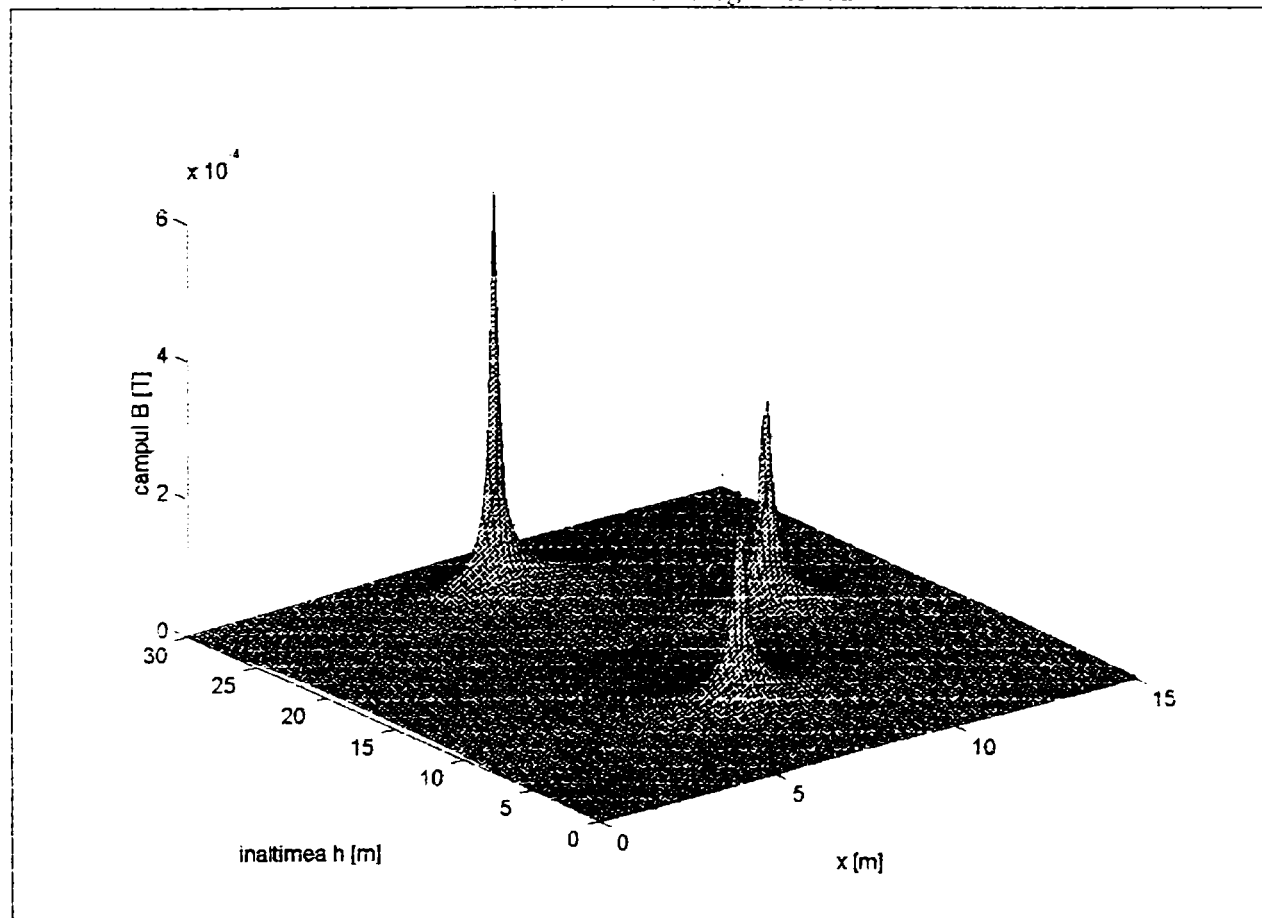


Figura 5.22 Variația inducției câmpului magnetic B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu dublu circuit, regim normal

b.3. Tensiunile induse prin cuplaj capacitiv și inductiv atunci când unul din circuite este pasivizat:

```
%Curentii din linii
```

```
I1=200; I2=200.*(-.5-i*sqrt(3)/2); I3=200.*(-.5+i*sqrt(3)/2);
```

```
I4=0; I5=0; I6=0;
```

```
%Tensiunile de faza
```

```
U=zeros(6,1);
```

```
U(1,1)=230.94*10^3;
```

```
U(2,1)=(230.94*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
```

```
U(3,1)=(230.94*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);
```

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 2**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.23, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.24, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.25.

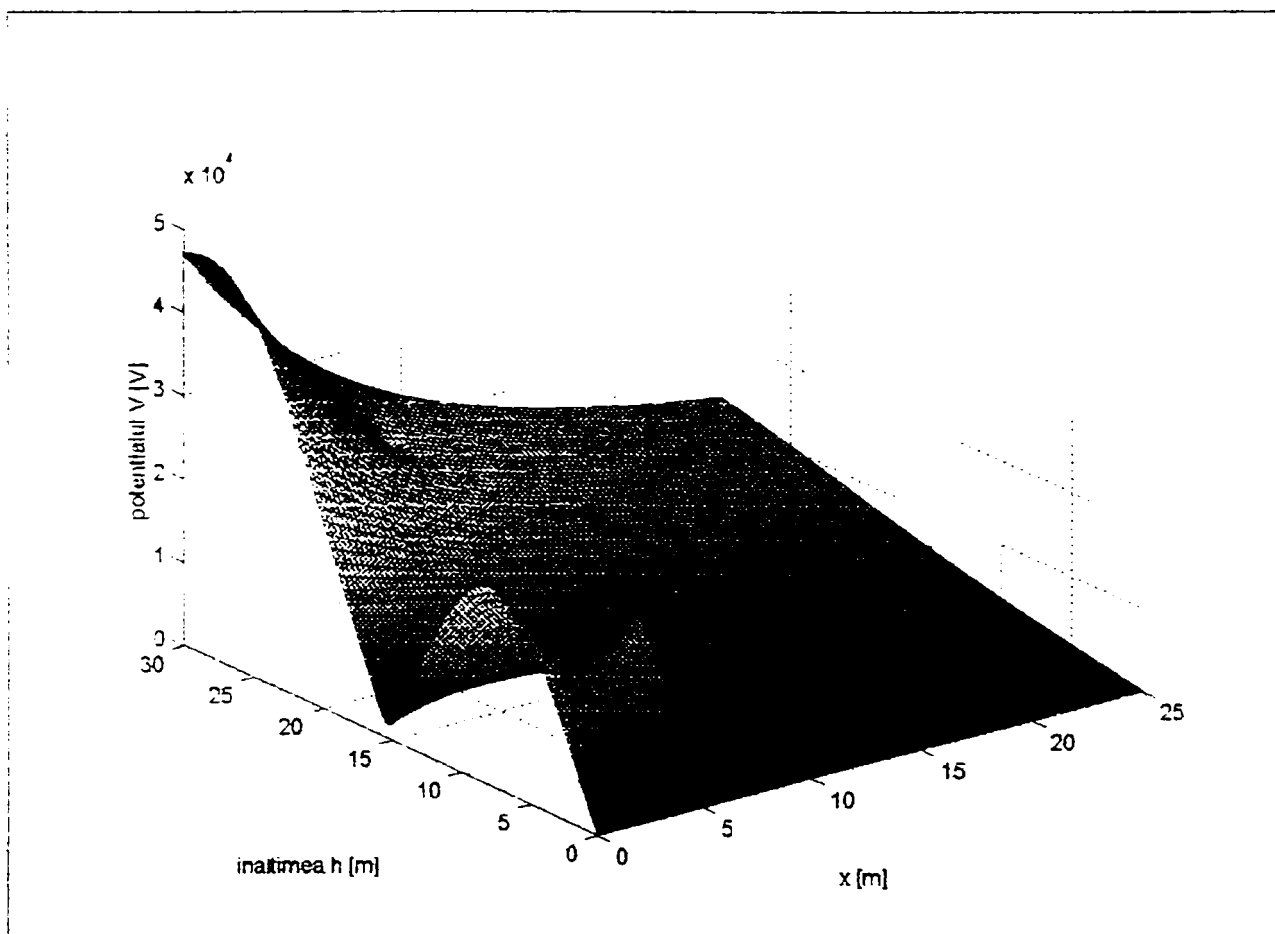


Figura 5.23 Reprezentarea potențialului electric V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu dublu circuit, unul din circuite fiind pasivizat

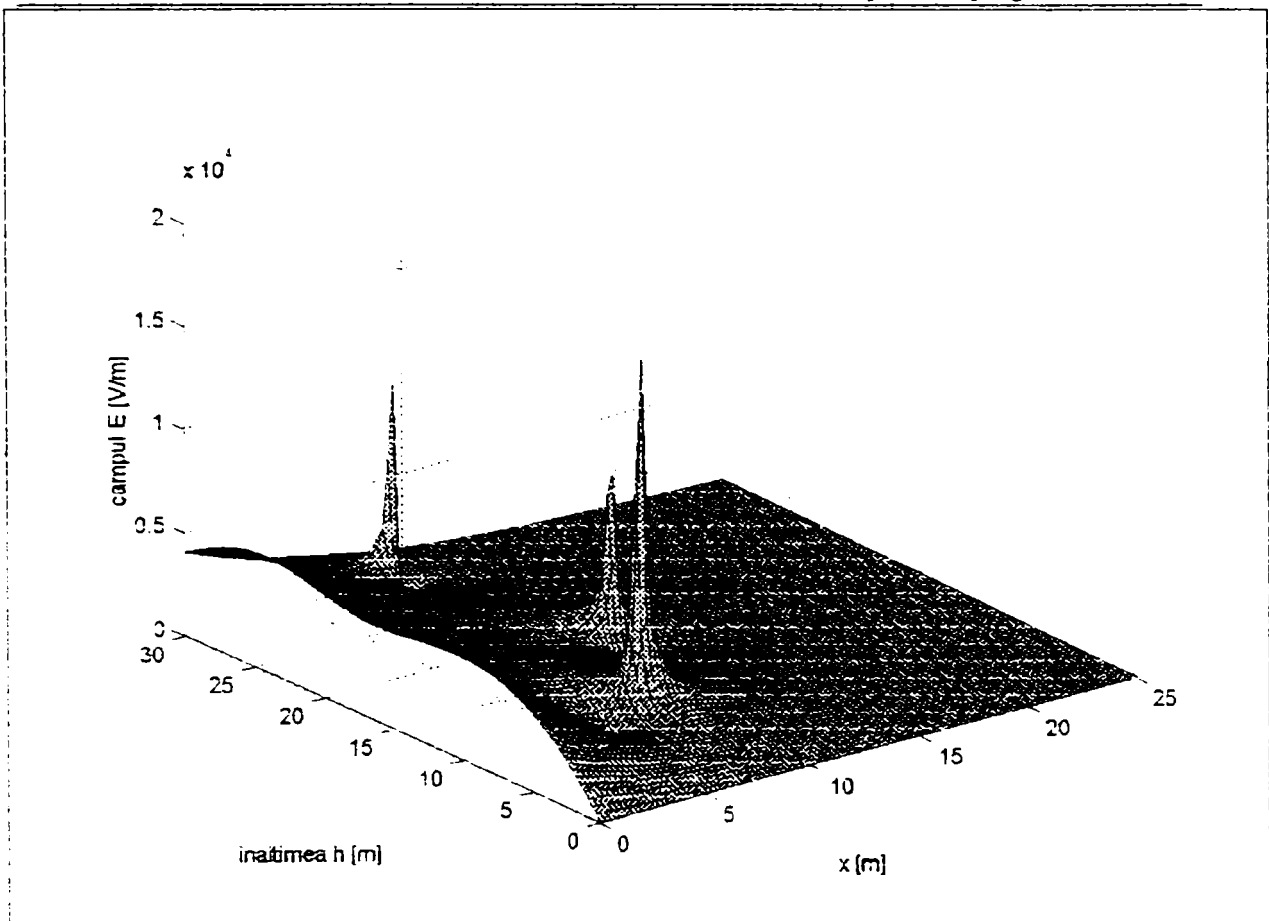


Figura 5.24 Variația intensității câmpului electric E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu dublu circuit, unul din circuite fiind pasivizat

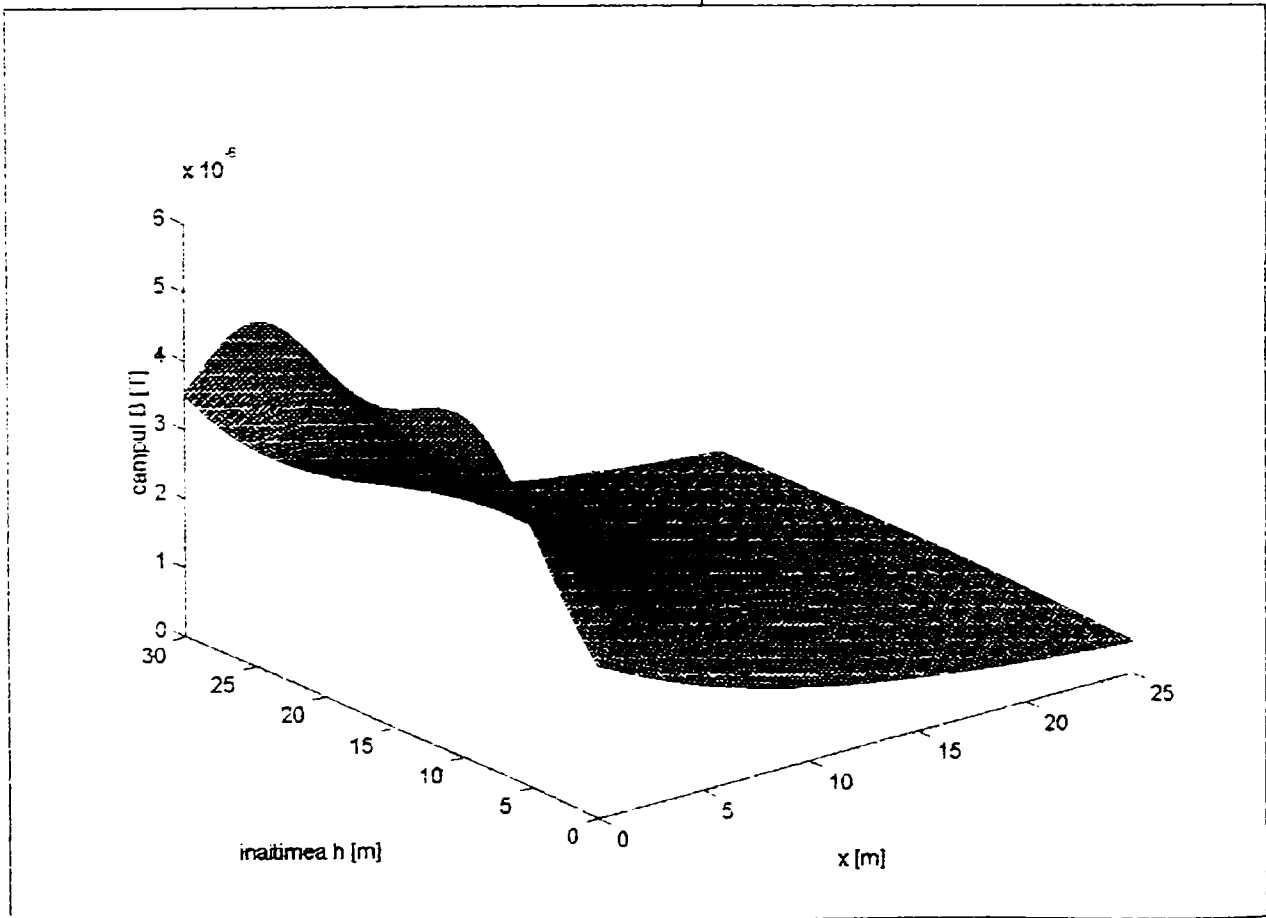


Figura 5.25 Variația inducției câmpului magnetic B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu dublu circuit, un circuit pasivizat

c.3. Funcționare în regim de avarie (scurtcircuit monofazat)

%Curentii din linii

$I1=(3.601-i*17.64)*10^3$; $I2=0$; $I3=0$;

$I4=0$; $I5=0$; $I6=0$;

%Tensiunile de faza

$U=zeros(6,1)$;

$U(1,1)=0$;

$U(2,1)=10^5*(-1.749-i*1.907)$;

$U(3,1)=10^5*(-1.749+i*2.093)$;

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 3**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.26, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.27, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.28

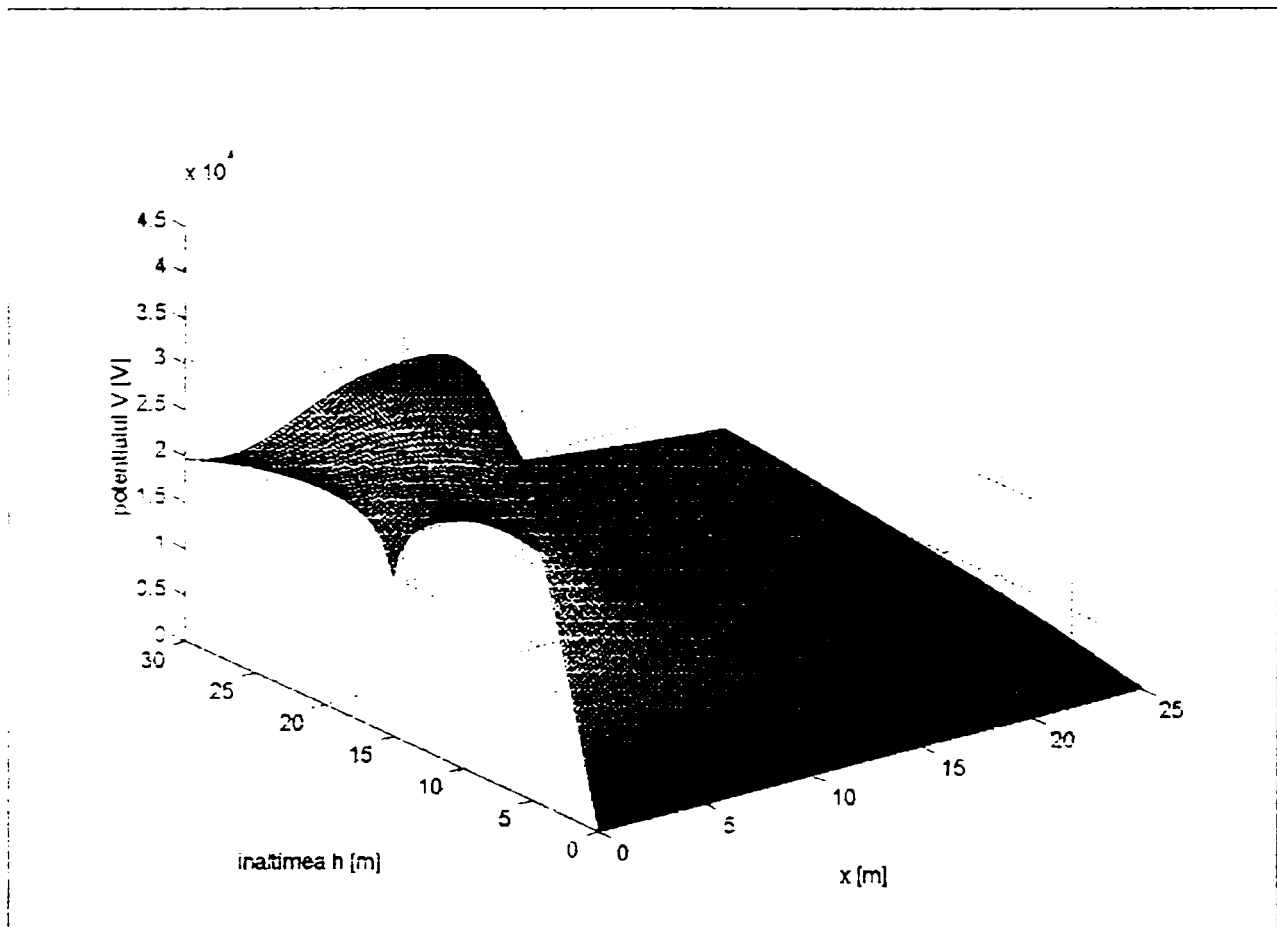


Figura 5.26 Variația potențialului V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu dublu circuit, prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec

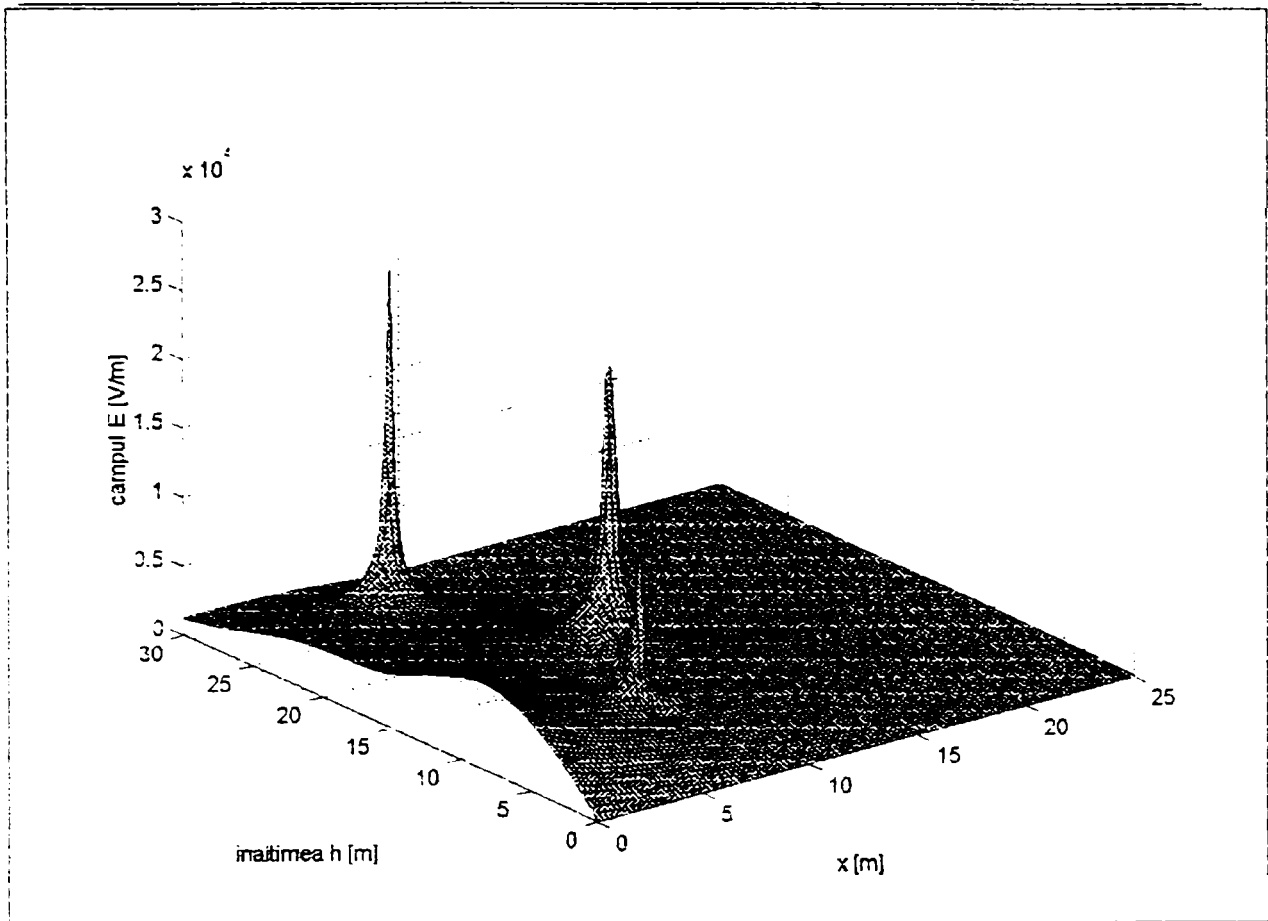


Figura 5.27 Variația intensității E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu d. c., prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat iar pe celălalt are loc un sec

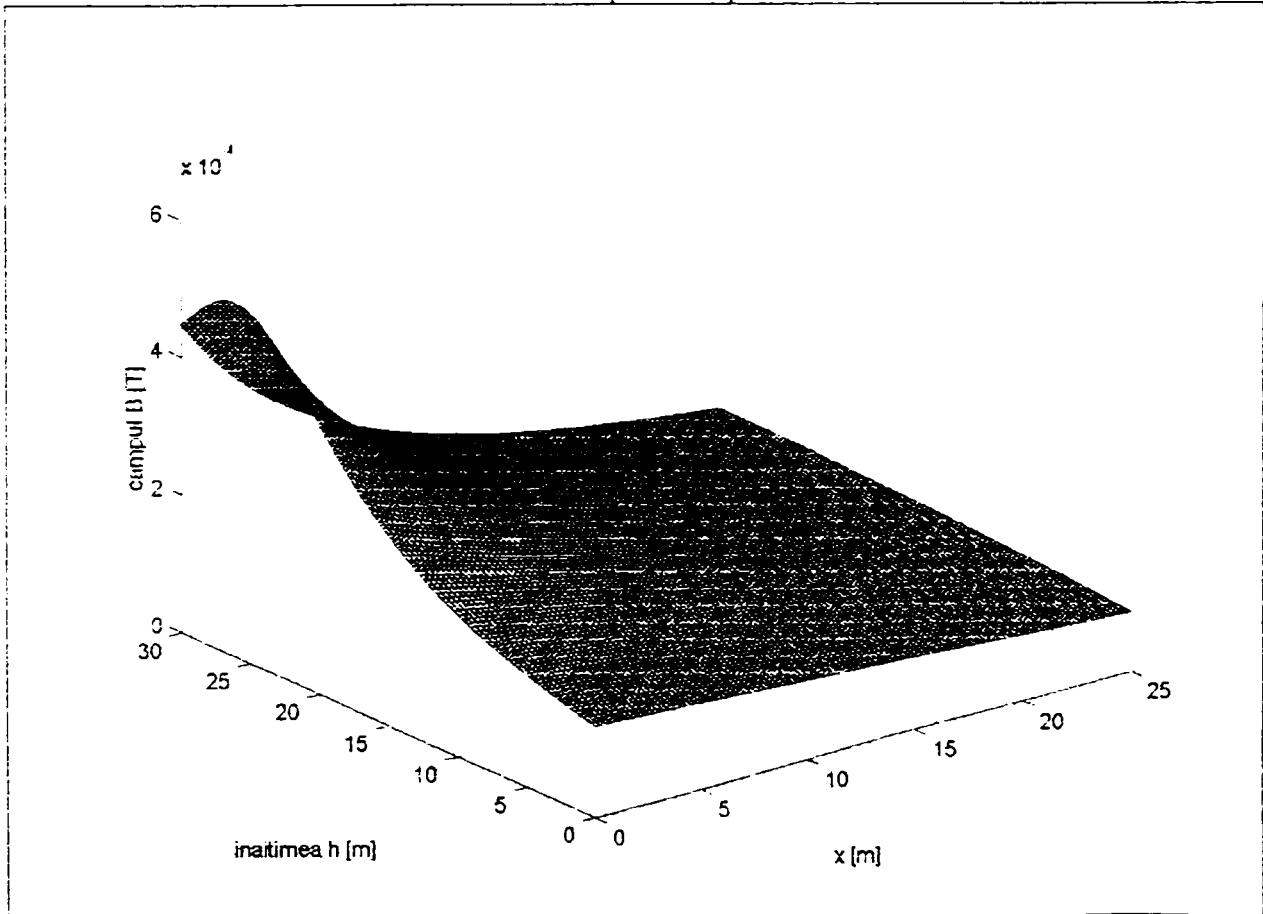


Figura 5.28 Variația inducției B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 400kV cu d. c., prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec

Folosind pachetul de programe MATLAB R12, pentru linia electrică aeriană compactă de 110 kV, dublu circuit [9], [12], [25] s-au introdus următoarele valori:

```
%Date inițiale:
h1=17.2; h2=14.6; h3=12;
d1=2.6; d2=2.6; d3=2.6;
r0=9.5*10^(-3);
L=10^4;
eps0=1./(4*pi*9*10^9);
miu0=4.*pi.*10.^-7;
f=50; ro=50;
omega=2.*pi.*f;
Rcp=550.*sqrt(ro./f);
```

a.4. Regimul de funcționare permanent

```
%Tensiunile pe faze
U=zeros(6,1);
U(1,1)=63.509*10^3;
U(2,1)=(63.509*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
U(3,1)=(63.509*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);
U(4,1)=U(1,1); U(5,1)=U(2,1); U(6,1)=U(3,1)

%Curenții prin faze
I1=100; I2=100.*(-.5-i*sqrt(3)/2); I3=100.*(-.5+i*sqrt(3)/2);
I4=I1; I5=I2; I6=I3;
```

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 1**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.29, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.30, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.31.

b.4. Tensiunile induse prin cuplaj capacitiv și inductiv atunci când unul din circuite este pasivizat:

```
%Tensiunile de faza
U=zeros(6,1);
U(1,1)=63.509*10^3;
U(2,1)=(63.509*10^3)*(-.5-i*sqrt(3)/2);
U(3,1)=(63.509*10^3)*(-.5+i*sqrt(3)/2);

%Curenții prin faze
I1=100; I2=100.*(-.5-i*sqrt(3)/2); I3=100.*(-.5+i*sqrt(3)/2);
I4=0; I5=0; I6=0
```

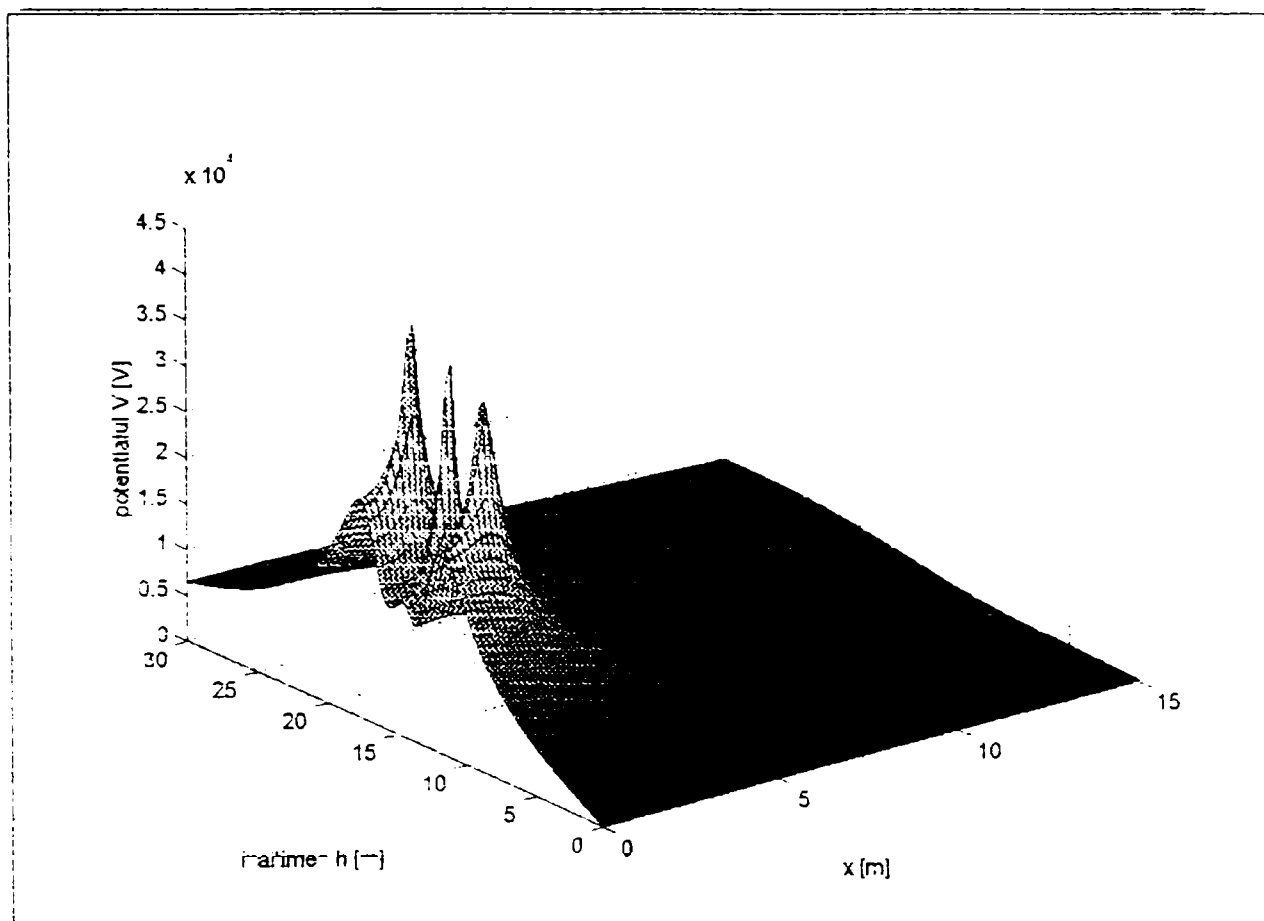


Figura 5.29 Reprezentarea potențialului electric V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV compactă, cu dublu circuit, regim normal

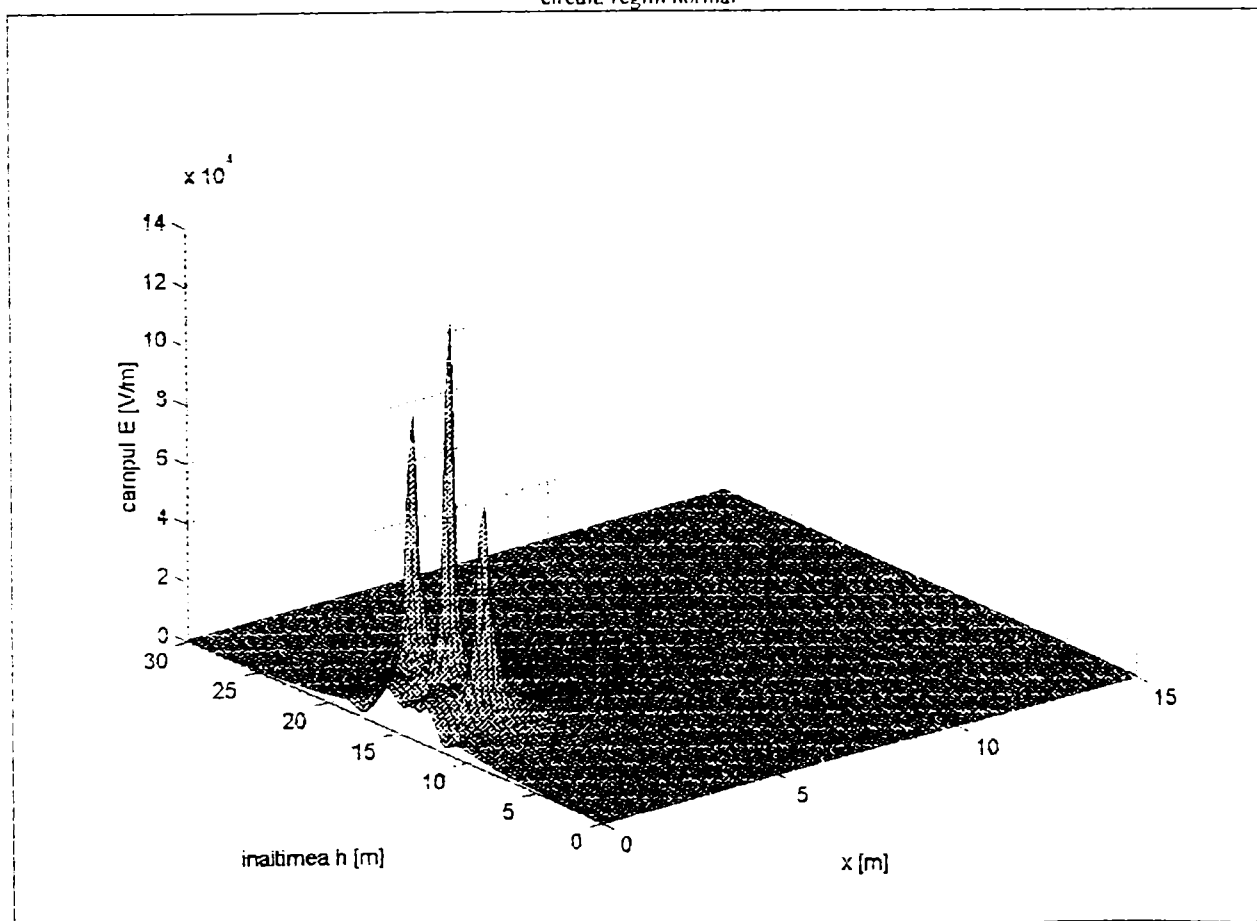


Figura 5.30 Variația intensității câmpului electric E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, regim normal

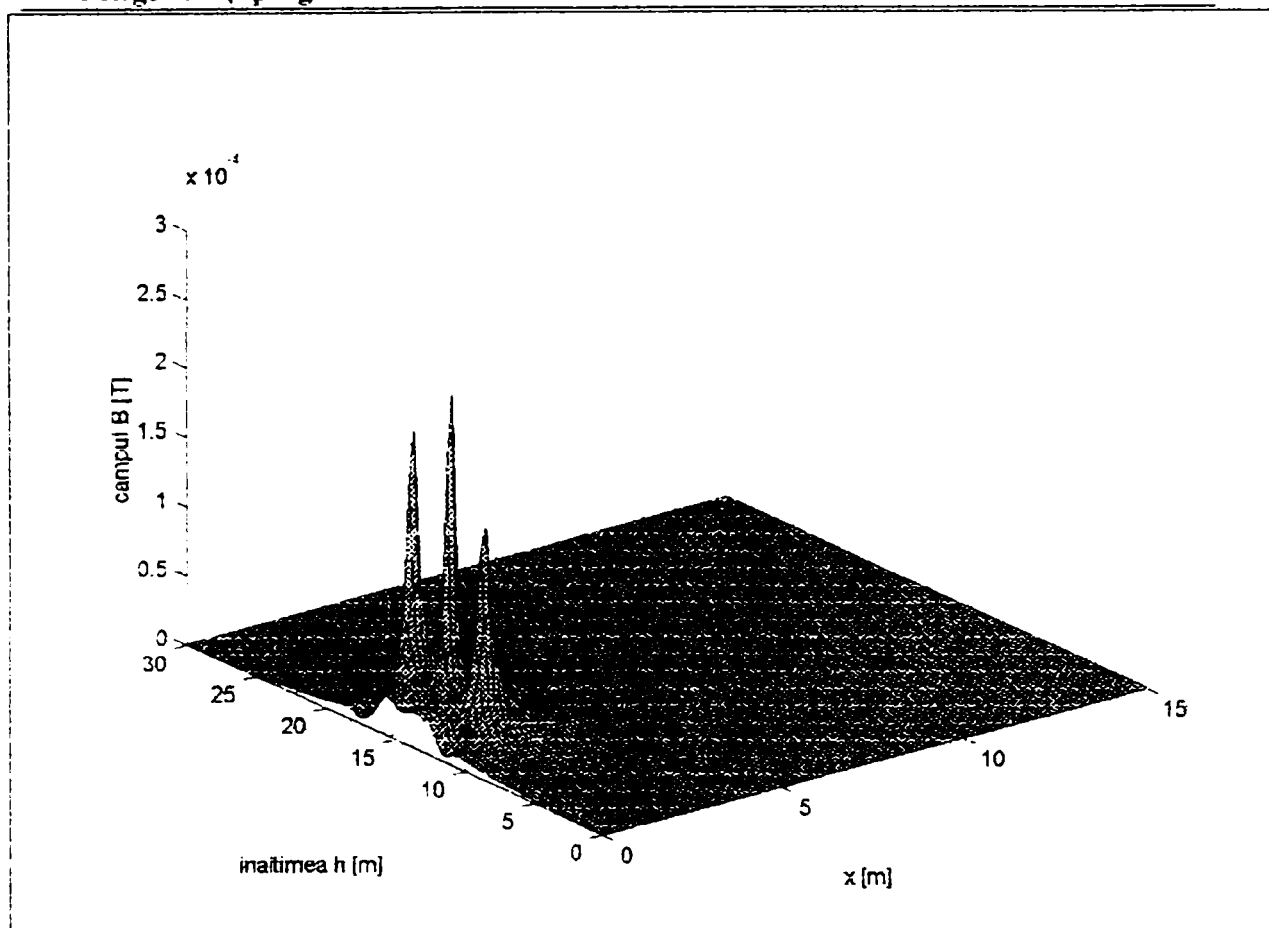


Figura 5.31 Variația inducției câmpului magnetic B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV, compactă, cu dublu circuit, regim normal

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 2**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.32, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.33, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.34.

c.4. Funcționare în regim de avarie (scurtcircuit monofazat)

%Curentii din linii

$I1=(2.686-i*5.984)*10^3$; $I2=0$; $I3=0$;

$I4=0$; $I5=0$; $I6=0$;

%Tensiunile de faza

$U=zeros(6,1)$;

$U(1,1)=0$;

$U(2,1)=10^4*(-5.25-i*6.431)$;

$U(3,1)=10^4*(-5.25+i*4.569)$;

Valorile obținute prin intermediul lui **Program 3**, pentru potențialul electric V față de pământ sunt prezentate grafic în figura 5.35, pentru intensitatea câmpului electric E în figura 5.36, iar pentru inducția magnetică B în figura 5.37.

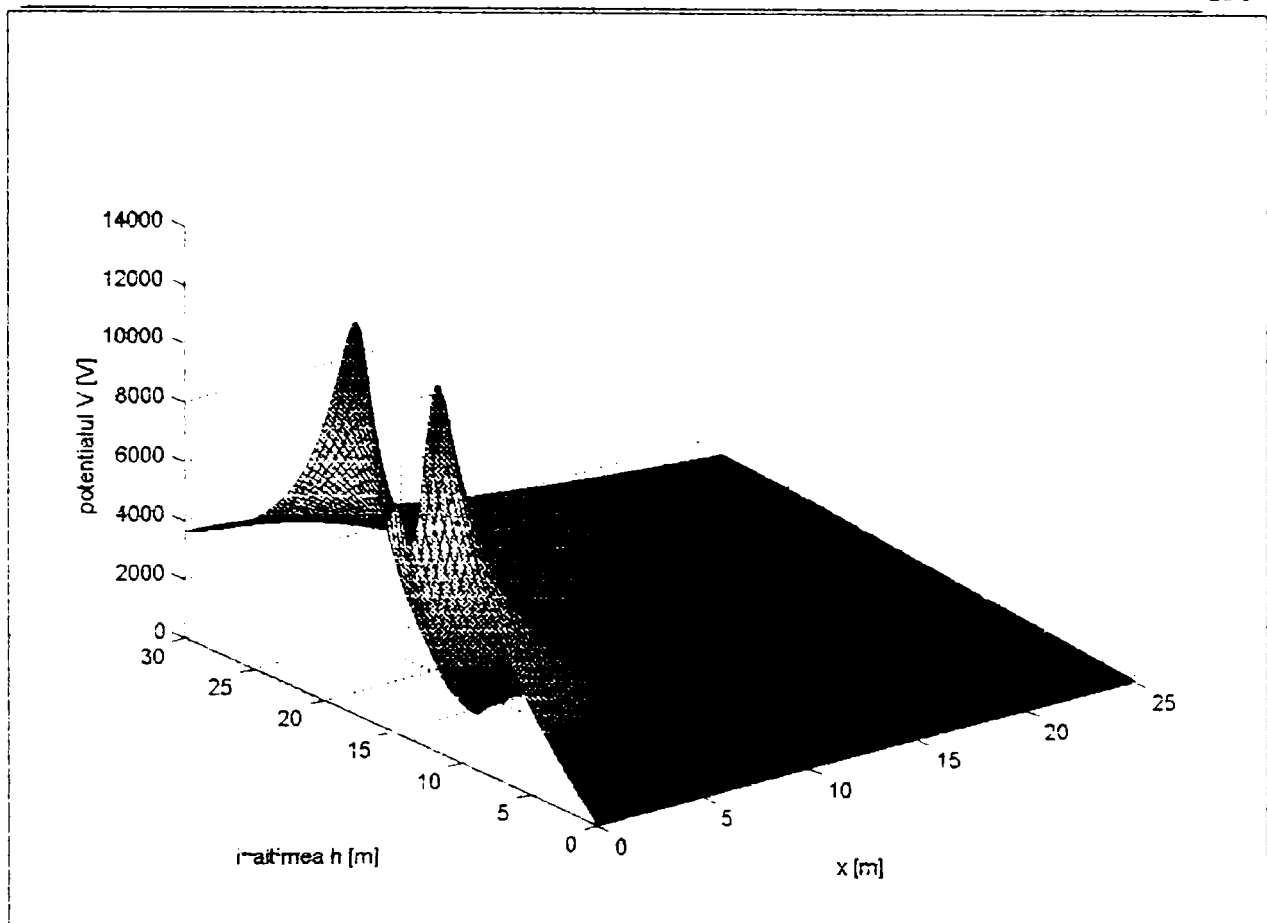


Figura 5.32 Reprezentarea potențialului electric V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu dublu circuit, unul din circuite fiind pasivizat

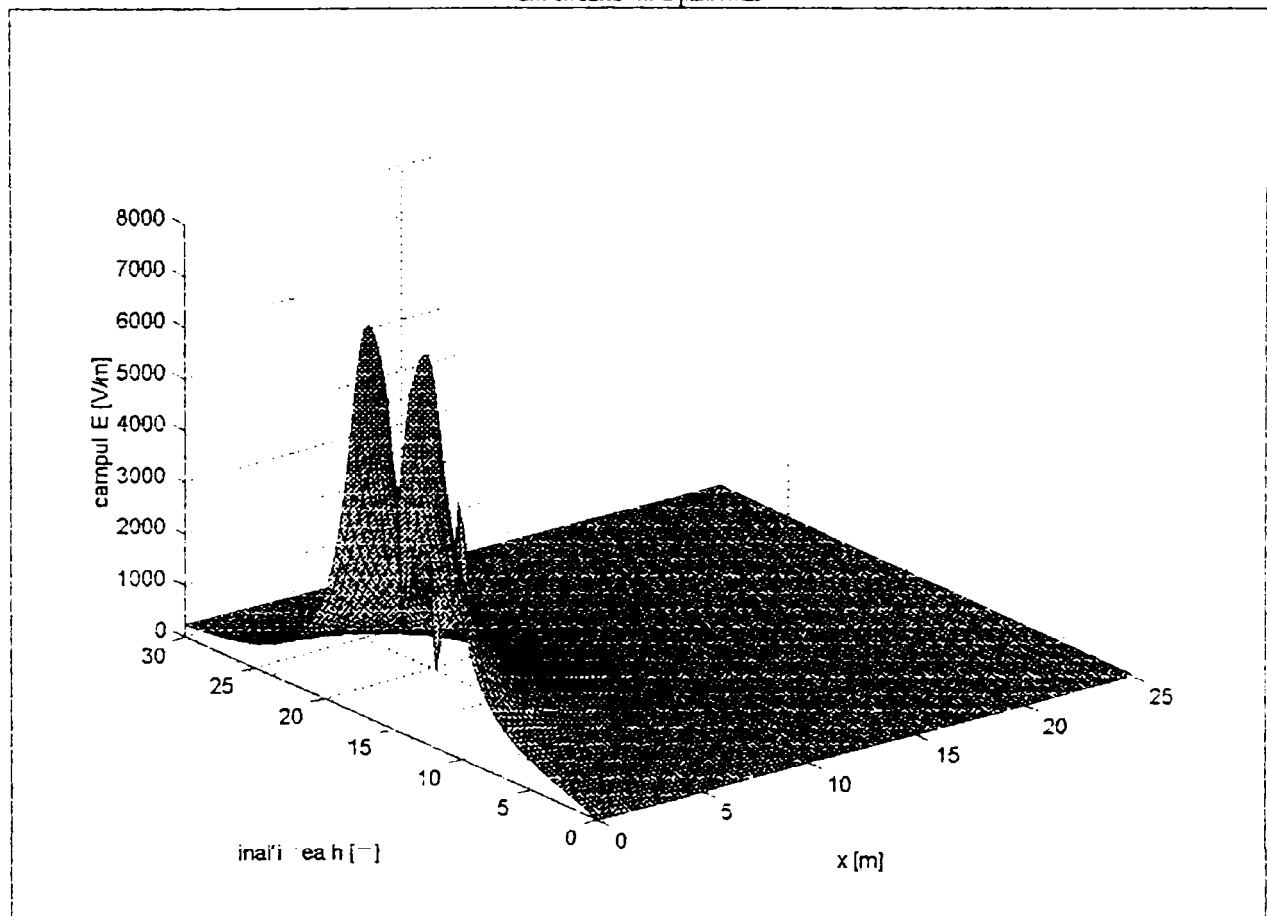


Figura 5.33 Variația intensității câmpului electric E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV, compactă, cu dublu circuit, unul din circuite fiind pasivizat

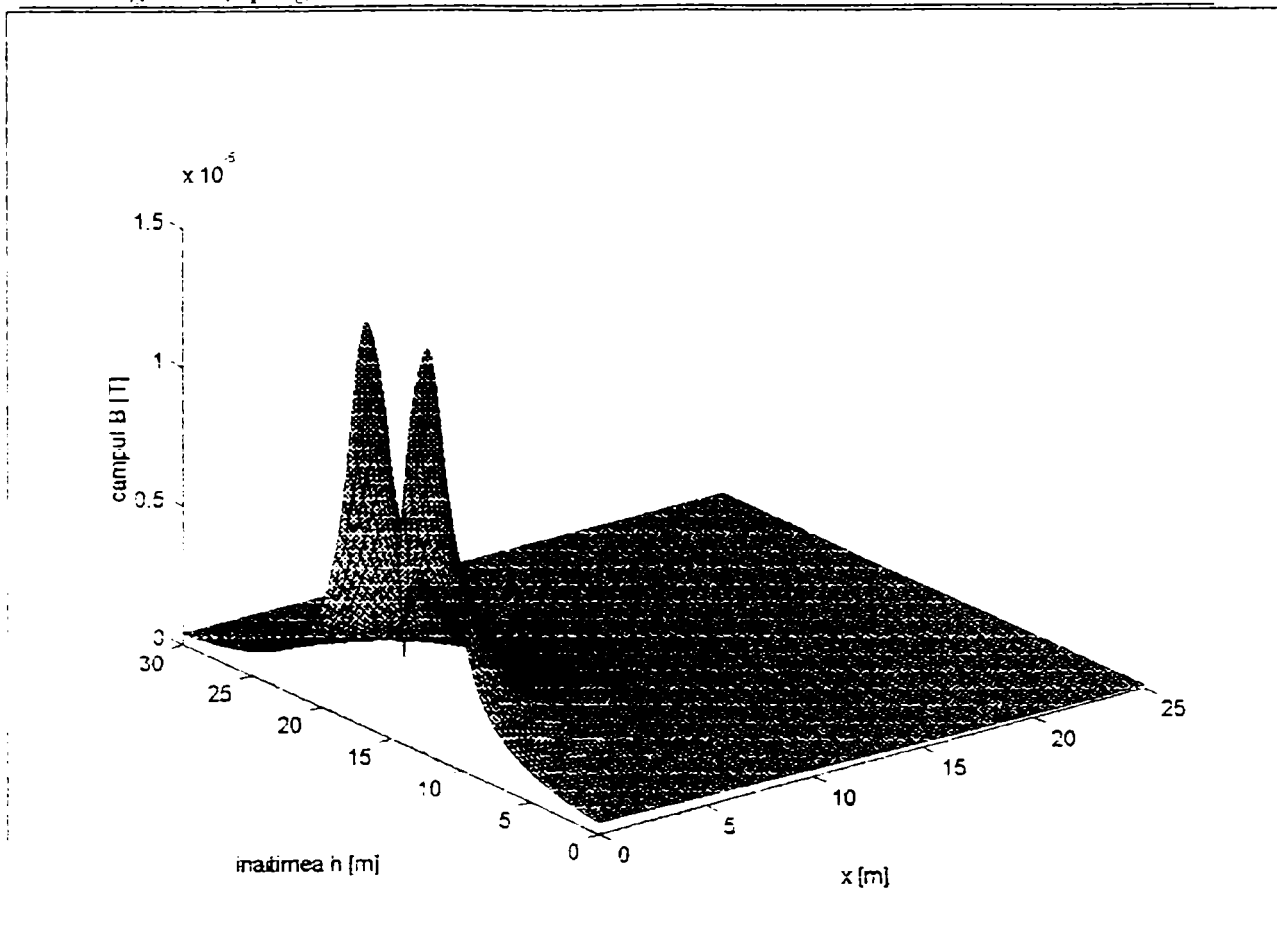


Figura 5.34 Variația inducției câmpului magnetic B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV compactă cu dublu circuit, un circuit pasivizat

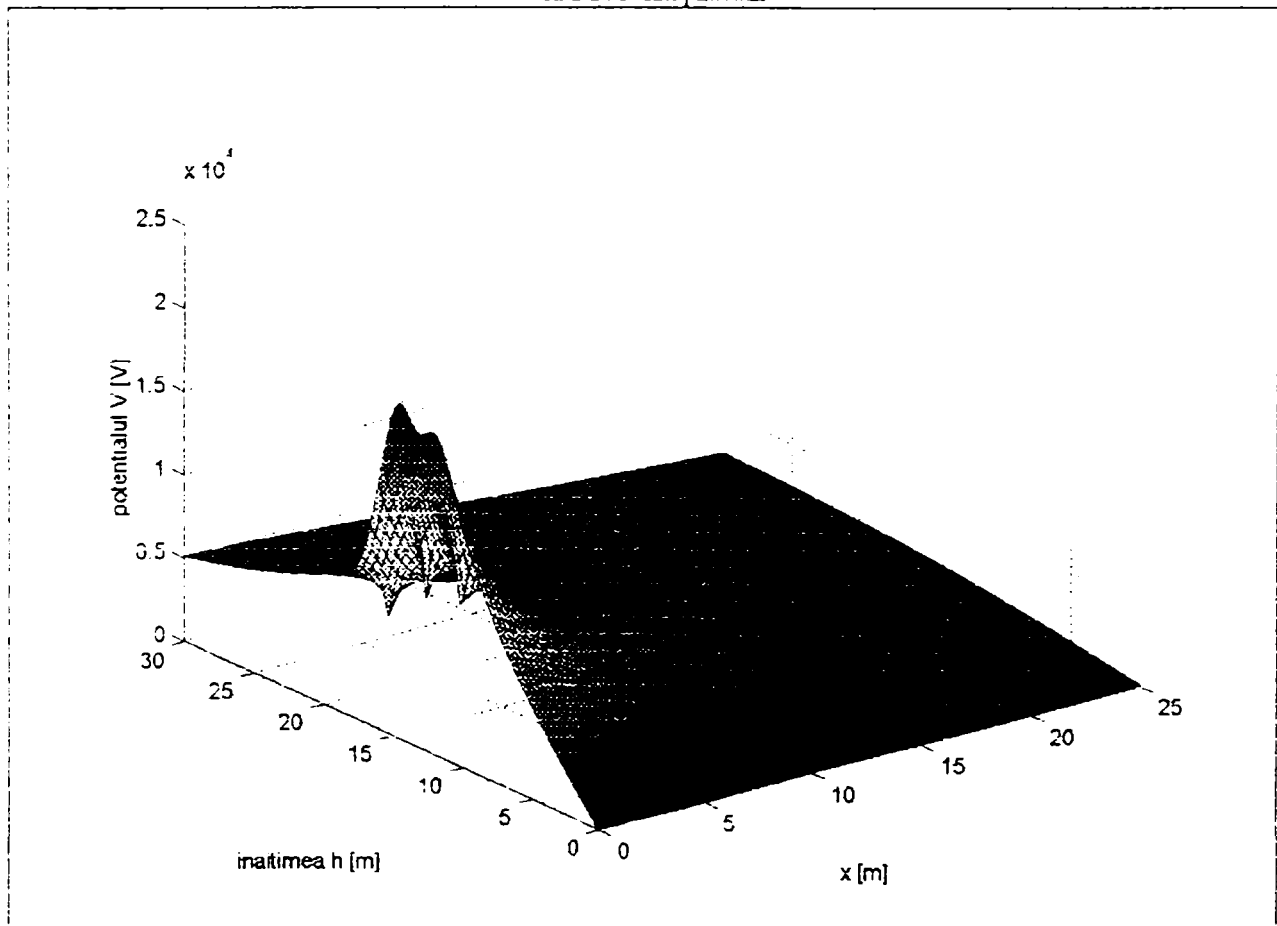


Figura 5.35 Variația potențialului V în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu d. c. compactă, prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec

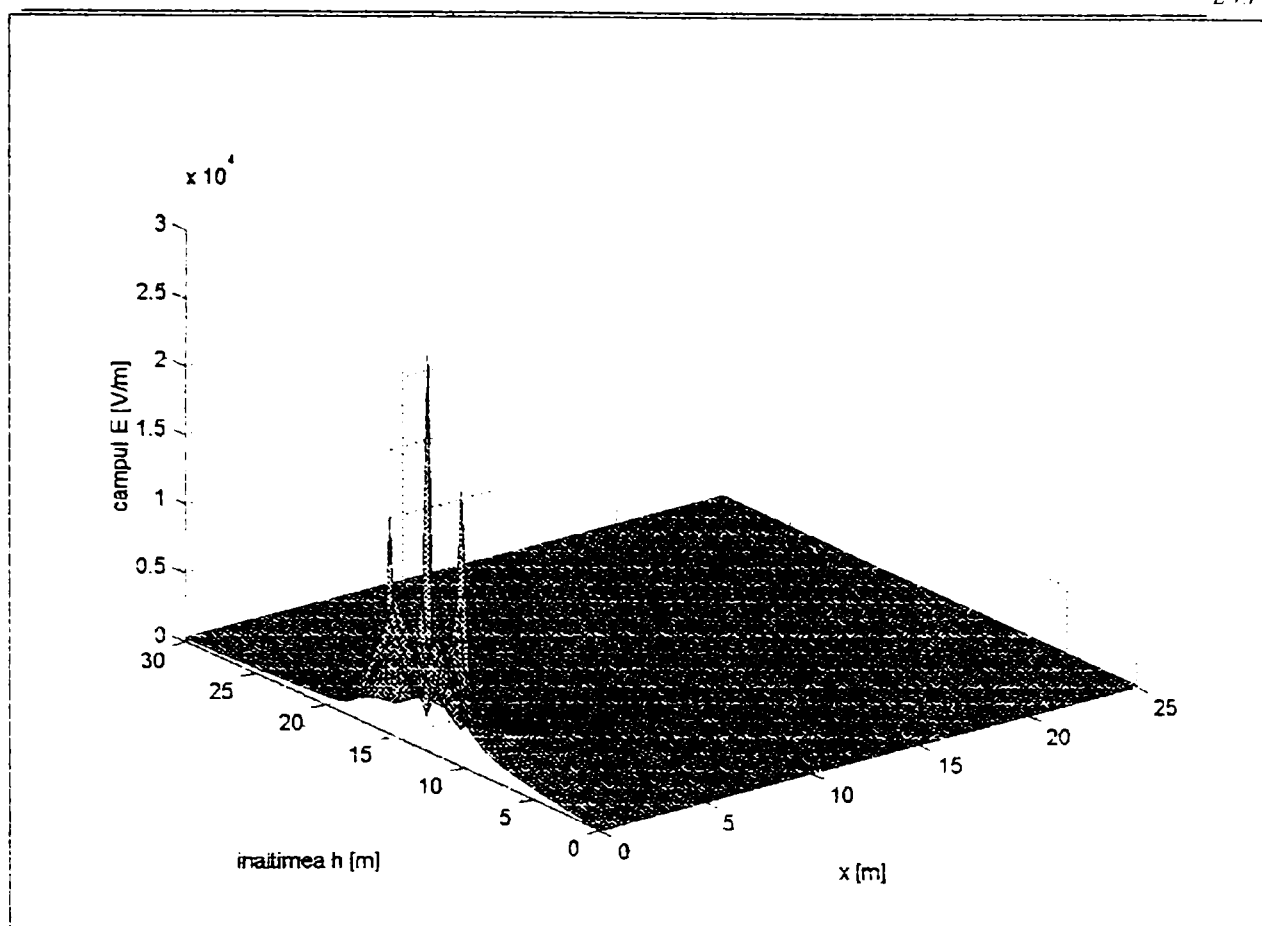


Figura 5.36 Variația intensității E în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu d. c., compactă, prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec

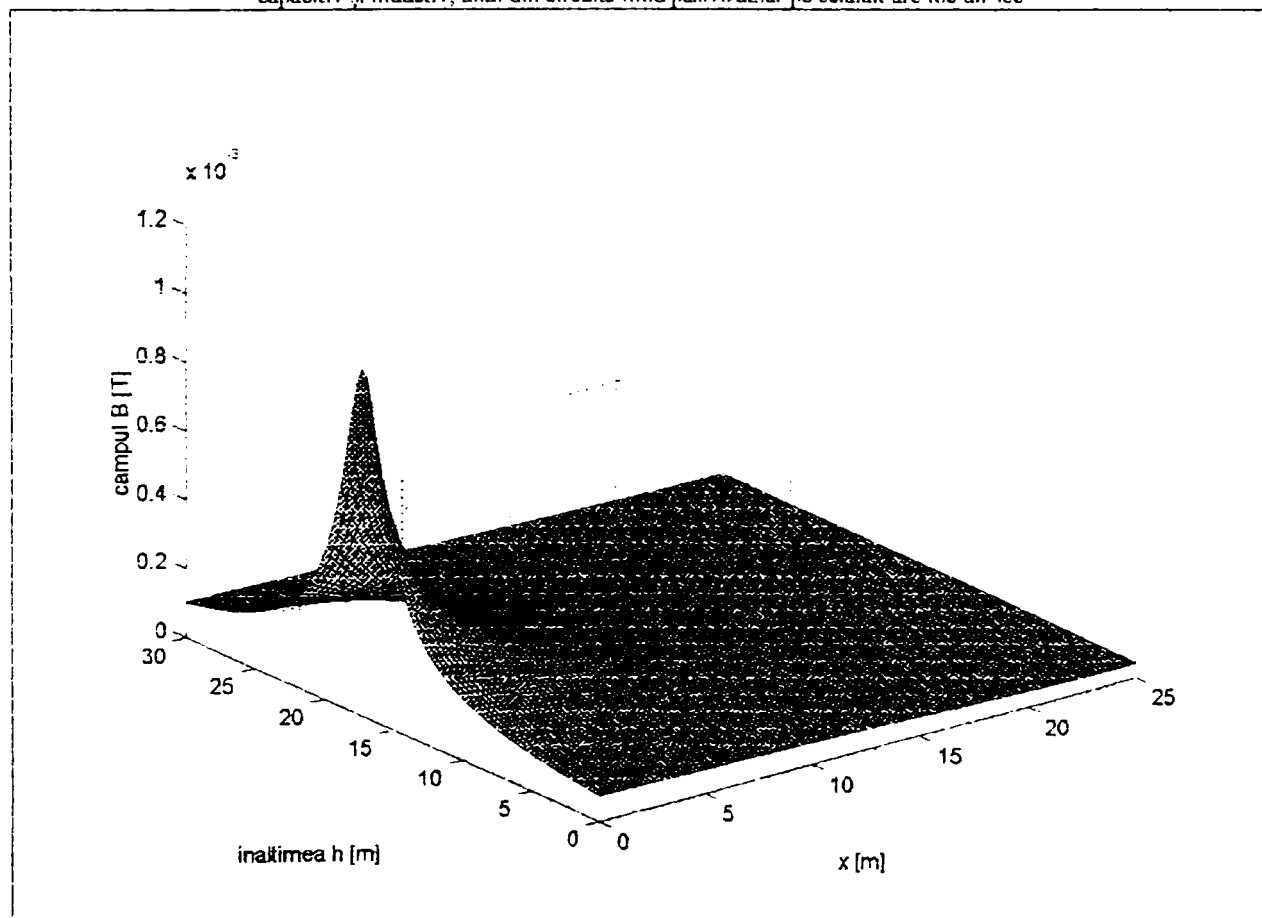


Figura 5.37 Variația inducției B în punctele de coordonate (x,h) pentru LEA 110kV cu d. c., compactă prin cuplaj capacitiv și inductiv, unul din circuite fiind pasivizat, iar pe celălalt are loc un sec

Din analiza comparativă a valorilor obținute pentru tensiunea electrică, intensitatea câmpului electric și inducția magnetică în punctele din vecinătatea liniei electrice aeriene de 110 kV, compactă, se observă o diminuare considerabilă a acestora în regim permanent (normal) de funcționare. La funcționare în regim de avarie aceste valori sunt comparabile.

Reprezentările grafice efectuate pentru mărimile de interes scot în evidență foarte sugestiv punctele și zonele în care aceste mărimi depășesc anumite limite impuse, de fapt limitele admise prin norme care nu trebuiesc depășite. Se poate constata o foarte bună coincidență între cele calculate în capitolul 3 și cele estimate cu ajutorul programului MATLAB R12 în prezentul capitol.

5.4. Concluzii

Prin aplicarea pachetului de programe MATLAB R12 în calcularea valorilor potențialului electric față de pământ, intensității câmpului electric și inducției câmpului magnetic în puncte din vecinătatea liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune, sunt confirmate rezultatele obținute anterior în modelarea câmpului electromagnetic prin intermediul programelor de calcul Mathcad 2001 Professional.

Cu acuratețea specifică pachetului de programe de înaltă performanță oferit de mediul MATLAB R12, s-au pus în evidență valorile intensității câmpului electric și ale inducției câmpului magnetic atât în regim permanent de funcționare cât și pentru regimul de avarie al liniilor electrice. Sunt puse în evidență fenomenele de influență electrostatică și electromagnetică exercitate de liniile electrice aeriene asupra circuitelor electrice învecinate prin modificările pe care le comportă câmpul electromagnetic

Folosind același pachet de programe și în cazul liniei electrice aeriene de 110 kV, compacte s-au pus în evidență, comparativ, valorile reduse ale mărimilor de stare ale câmpului electromagnetic în acest caz.

Programele MATLAB R12 permit o reprezentare spațială a mărimilor calculate pe deplin sugestivă care redă imaginea suprafețelor de potențial, ale câmpului electric și magnetic.

Ele pot fi aplicate pentru orice situații, permițând stabilirea de concluzii și adoptarea de soluții corespunzătoare rapide pe baza analizei formei curbelor de variație a mărimilor de interes și identificarea zonelor (sau punctelor) critice.

Contribuțiile aduse de autor în cadrul acestui capitol se referă la aplicarea pachetului de programe MATLAB R12 la calculul valorilor potențialului electric, intensității câmpului electric și inducției magnetice în puncte din vecinătatea liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune cu dublu circuit în diferite condiții de funcționare: regim permanent normal, regim permanent normal pentru un circuit, celălalt fiind scos din funcțiune și un circuit în regim de avarie (scurtcircuit monofazat) iar celălalt scos din funcțiune.

CAPITOLUL 6 DETERMINĂRI EXPERIMENTALE

6.1.Scopul determinărilor

Măsurarea directă a mărimilor de stare ale câmpului electromagnetic (tensiunea electrică, intensitatea câmpului electric și inducția magnetică) determinat de instalațiile electrice sub tensiune reprezintă un interes practic deosebit prin faptul că sunt validate rezultatele numerice obținute prin calculele efectuate pentru o anumită configurație afectată de ipoteze simplificatoare. În zonele limitrofe instalațiilor energetice de înaltă tensiune, prezența personalului care deservește aceste instalații impune măsuri de protecție față de valorile mari ale câmpului electric și magnetic aferent. Aceste măsuri de protecție impun o bună cunoaștere a valorilor mărimilor de stare ale câmpului electromagnetic și corelarea acestora cu valorile de risc pentru organismul uman. Măsurarea acestor mărimi este în general dificilă, deoarece prin prezența sa instrumentul de măsură introduce o deformare a câmpului existent în locul respectiv.

O importanță deosebită o are cunoașterea tensiunilor induse prin cuplaj electrostatic (capacitiv) respectiv electromagnetic (inductiv) în circuitele electrice pasivizate (scoase de sub tensiune) aflate în vecinătatea circuitelor electrice active.

În literatura de specialitate [32] se prezintă un aparat sub forma unui dipol sferic cu care se poate măsura câmpul electric cu erori de măsură de ordinul procentului și care prin prezența sa nu deformează sesizabil câmpul. Din observațiile de laborator a rezultat că într-un câmp electric cu valori mai mari de 500 Vm^{-1} , prezența omului la o distanță mai mare de 1,5 m nu influențează indicația instrumentului din dipoli.

În cadrul prezentei lucrări determinările experimentale s-au efectuat atât în laborator cât și în instalații (stații) electrice.

6.2. Determinări în laborator

Încercările preponderente efectuate în Laboratorul de Înaltă Tensiune a Universității “Politehnica” Timișoara se fac cu instalația de înaltă tensiune alternativă ITA de 350 kV și 175 kVA [19]. Pentru anumite încercări se utilizează generatorul de impuls GIT de 500 kV – 4,6kJ, precum și instalația de înaltă tensiune continuă ITC de 80 kV – 3 mA.

Laboratorul este dublu ecranat electromagnetic în sistem cușcă Faraday, cu tablă expandată din fier spre exterior și cu tablă din aluminiu, acoperită cu marmoroc spre interior.

Cabina de comandă este separată de standul de încercări printr-o rețea de sârme din oțel sudate la scheletul metalic al ecranului, întregul ansamblu fiind legat la pământ la o priză de construcție specială.

Măsurătorile experimentale ale intensității câmpului electric în vecinătatea unui conductor din alamă cu $r = 6,2$ mm, suspendat la $z = 1,5$ m față de sol, cu lungimea $l = 1$ m și alimentat de la ITA 350 kV cu tensiunea de 100 kV, au permis punerea în evidență a efectului de margine, precum și repartiția spațială a intensității câmpului electric. În tabelul 6.1 sunt puse în evidență valorile măsurate ale intensității câmpului electric E în puncte aflate într-un plan paralel cu solul la înălțimea $z = 1$ m.

Instalația de înaltă tensiune continuă ITC 80 kV conține un transformator de înaltă tensiune PEG 0,8 / 65 TUR Dresda cu $U_n = 65$ kV și $S_n = 800$ VA. În tabelul 6.2 sunt prezentate valorile măsurate ale intensității câmpului electric pe direcția verticală la distanța de 0,5 m față

Tabelul 6.1 Valorile intensității câmpului electric [kV] măsurate în laboratorul de ÎT în apropierea unui conductor de alamă ($r = 6,2$ mm, $z = 1,5$ m, $l = 1$ m)

(x,0)	(0,0)	(0,25,0)	(0,5,0)	(0,75,0)	(1,0)
E	65	55	32	20	8
(0,y)	(0,0)	(0,0,25)	(0,0,5)	(0,0,75)	(0,1)
E	65	35	15	8	4

de axa izolatorului de înaltă tensiune. Prin interpunerea unui ecran din plasă de sârmă de oțel (similar grilajului metalic al cabinei de comandă) și repetând măsurătorile s-a pus în evidență eficiența ecranării (valorile corespunzătoare intensității câmpului electric E' sunt practic nule în acest caz)

Tabelul 6.2 Valorile intensității câmpului electric [kV] cu și fără ecran măsurate pe verticală la distanța de 0,5m față de axa izolatorului

Z	0,7	0,95	1,2	1,45	1,7
E	2	4	6	12	5
E'	0	0	0	0	0

Măsurătorile au fost realizate având în vedere respectarea normelor de protecția muncii pentru instalații de înaltă tensiune .

6.3. Determinări în instalații

Pentru confirmarea rezultatelor obținute prin calculele efectuate referitor la valorile intensității câmpului electric E , în vecinătatea liniilor electrice de înaltă tensiune, 110 kV (Mintia-Brad, stația Dumbrăvița), 220 kV (Mintia-Peștiș, Mintia-Timișoara ,Porțile de Fier-Reșița), 400kV(Mintia-Arad), respectiv la valorile inducției magnetice B s-au făcut măsurători prin metoda directă – IEEE Standard 644 și CEI 833 cu aparatul EMDEX II produs de Enertech Consultants, U.S.A. [69].

Determinările au fost efectuate în condițiile normale de funcționare a liniei electrice aeriene, iar pentru condițiile meteorologice sunt menționate următoarele situații: timp noros, vânt, după ninsoare, 1°C.

Sunt menționate valorile maxime admise prin NORMELE GENERALE DE PROTECȚIE A MUNCII din 1996 [9]

10 kV m⁻¹ / schimb de lucru

30 kV m⁻¹, pentru un interval de timp al expunerii, scurt.

Durata expunerii în câmp electric cu intensități cuprinse între 10 kV m⁻¹ și 30 kV m⁻¹ se calculează cu relația $t \leq 80 E^{-1}$, unde t reprezintă durata zilei de lucru, iar E intensitatea câmpului electric în kV m⁻¹.

Nivelurile corespunzătoare intensității câmpului electric (în kV m⁻¹) pentru linia electrică aeriană de 110 kV (Mintia - Brad), simplu circuit, stâlp tip Sn 110.102, pentru linia electrică aeriană de 220 kV, simplu circuit, stâlp tip IC nY 220 și pentru linia electrică aeriană de 400 kV, simplu circuit, stâlp tip PASC 400.109, în punctele de măsură din coridorul de protecție, puncte de săgeată maximă, sunt prezentate în tabelul 6.3.

Tabelul 6.3. Valorile intensității câmpului electric măsurate în jurul liniei 110kV (Mintia-Brad) [69]

[m]	E[kV/m]		
	R	S	T
y _p \x _p			
1.7	3.83	0.23	3.41
1.7	3.98	3.67	4.06
1.7	3.19	1.33	3.35

Pentru liniile electrice aeriene de 220 kV și 400 kV s-au făcut determinări ale intensității câmpului electric în diferite puncte din vecinătatea conductoarelor de fază, conforme cu valorile prezentate în tabelul 6.4 respectiv tabelul 6.5.

Tabelul 6.4. Valorile intensității câmpului electric măsurate în jurul liniei 220kV (Mintia-Peștiș) [69]

[m]	E[kV/m]				
	-9.5	-8.5	0	7.4	8.4
y _p \x _p					
17.5	-	-	6.22	-	-
21	18.91	37.06	-	36.96	19.37

Tabelul 6.5. Valorile intensității câmpului electric măsurate în jurul liniei 400kV (Mintia-Arad) [69]

[m]	E[kV/m]		
$y_p \backslash x_p$	- 11	0	11
24	26.08	20.35	-
25.5	34.85	-	35.92

Axa de referință pentru coordonatele punctelor de măsură s-a considerat axa de simetrie a stâlpului.

Din măsurătorile efectuate se constată o depășire a valorii de 10 kV m^{-1} admisă de NGPM pentru o durată corespunzătoare schimbului de lucru, în unele puncte, iar în altele este depășită chiar și valoarea de 30 kV m^{-1} , prevăzută de normă pentru durate scurte de expunere.

Determinările inducției magnetice prin metoda directă au fost făcute având în vedere valorile maxime admise prin NORMELE GENERALE DE PROTECȚIE A MUNCII din 1996 [9], [69]

500 μT / schimb de lucru

5 mT, pentru expuneri mai mici de 2 ore

25 mT, pentru un interval scurt al expunerii extremităților corpului.

Nivelurile corespunzătoare inducției câmpului magnetic (în μT) pentru linia electrică aeriană de 110 kV (Mintia – Brad, cu $I = 70 \text{ A}$ și încărcare maximă corespunzătoare unei valori de 200 A), simplu circuit, stâlp tip Sn 110.102 , pentru linia electrică aeriană de 220 kV (cu $I = 410 \text{ A}$ și încărcare maximă corespunzătoare unei valori de 600 A), simplu circuit, stâlp tip IC nY 220 și pentru linia electrică aeriană de 400 kV (cu $I = 262 \text{ A}$ și încărcare maximă corespunzătoare unei valori de 600 A), simplu circuit, stâlp tip PASC 400.109, în punctele de măsură din coridorul de protecție, puncte de săgeată maximă, sunt prezentate în tabelul 6.6.

Tabelul 6.6. Valorile inducției câmpului magnetic măsurate în jurul liniei 110kV (Mintia-Brad) [69]

[m]	B[μ T]		
$y_p \backslash x_p$	R	S	T
1.7	2.27	2.19	2.08
1.7	1.07	0.78	0.98
1.7	1.97	1.69	2.02

Pentru liniile electrice aeriene de 220 kV (pentru $I = 100$ A cu încărcarea maximă a circuitului de 1000 A) și 400 kV (pentru $I = 110$ A cu încărcarea maximă a circuitului de 1200 A) s-au făcut determinări ale inducției câmpului magnetic în diferite puncte din vecinătatea conductoarelor de fază, conforme cu valorile prezentate în tabelul 6.7 respectiv tabelul 6.8.

Tabelul 6.7. Valorile inducției câmpului magnetic măsurate în jurul liniei 220kV (Mintia-Timișoara) [69]

[m]	B[μ T]				
$y_p \backslash x_p$	-9.5	-8.5	0	7.4	8.4
17.5	-	-	3.94	-	-
21	4.4	8.9	-	6.8	4.23

Tabelul 6.8. Valorile inducției câmpului magnetic măsurate în jurul liniei 400kV (Mintia-Sibiu) [69]

[m]	B[μ T]		
$y_p \backslash x_p$	- 11	0	11
24	5.63	6.04	-
25.5	14.11	-	15.86

Pentru linia electrică aeriană de 220 kV, dublu circuit, cu stâlpi tip Sn 110.102, (pentru $I = 180$ A cu încărcarea maximă a circuitului de 1200 A) s-au făcut determinări ale inducției câmpului magnetic în diferite puncte din vecinătatea conductoarelor de fază, conforme cu valorile prezentate în tabelul 6.9.

Tabelul 6.9. Valorile inducției câmpului magnetic măsurate în jurul liniei 220kV (Mintia-Peștiș) [69]

[m]	B[μ T]			
$y_p \setminus x_p$	-8	-5	5	8
23	-	6.89	5.78	-
28.5	19.14	-	-	18.21
35	-	15.22	14.98	-

Interesul pe care-l prezintă tensiunile induse prin cuplaj capacitiv și cele prin cuplaj inductiv a condus la efectuarea de măsurători cu voltmetre electrostatice de înaltă tensiune, pentru linia electrică aeriană de 220 kV, dublu circuit [10]. Astfel rezultatele măsurătorilor în cazul cuplajului capacitiv sunt consemnate în tabelul 6.10, iar cele corespunzătoare cuplajului inductiv în tabelul 6.11.

Tabelul 6.10 Valorile tensiunilor induse prin cuplaj capacitiv la LEA 220kV cu dublu circuit (Porțile de Fier-Reșița)

Faza	U[kV]		
	R	S	T
	3.4	3.5	4.9

Tabelul 6.11 Valorile tensiunilor induse prin cuplaj inductiv la LEA 220 kV cu dublu circuit (Porțile de Fier-Reșița)

Faza	U[kV]		
	R	S	T
I=255 A	0.1	0.25	0.3
I=300 A	0,505	0,158	0,402
I=500 A	2,43	1,872	1,401

În vederea confirmării valorilor intensității câmpului electric, E , obținute în punctele din vecinătatea liniilor electrice aeriene prin modelare numerică, s-a procedat la măsurarea acestora cu aparatul de măsură conceput și realizat la Catedra de Măsurări electrice din Universitatea "Politehnica" Timișoara [32], [75]. În acest context sunt consemnate valorile corespunzătoare în punctele din vecinătatea unei linii electrice aeriene de 110 kV în tabelul 6.12. Valorile intensității câmpului electric corespunzătoare punctelor de măsură de pe suprafața

organismului uman situat în câmpul electromagnetic determinat de linia electrică aeriană de 110 kV sunt prezentate în tabelul 6.13.

Tabelul 6.12. Valorile intensității câmpului electric măsurate în jurul liniei 110kV (stația Dumbrăvița), cu dipolul sferic

[m]	E [V/m]		
	0	10	20
$y_p \backslash x_p$			
2	428.571	85.714	28.571
1,5	142.857	28.571	28.571
1	57.143	22.857	28.571
0,5	28.571	14.286	20
0,1	14.286	2.857	14.286

Tabelul 6.13. Valorile intensității câmpului electric măsurate în jurul liniei 110kV (stația Dumbrăvița), cu dipolul sferic pe suprafața unui operator

x_p	E [V/m]		
	0	10	20
laba piciorului	71.429	20	14.286
Genunchi	114.286	22.857	14.286
Stomac	285.714	28.571	28.571
Plămân	285.714	28.571	42.857
Gât	4429	4429	457,14 3
Frunte	7429	6571	1000
Creștetul capului	9286	7286	1714
Ceafă	5857	1429	342.85
Omoplat	142.857	42.857	57.143
Rinichi	71.429	20	28.571
Călcâi	71.429	14.286	2.857

Măsurătorile s-au făcut în condițiile organismului izolat față de pământ, după ploaie, la o temperatură de 17 °C.

6.4. Concluzii

Din compararea rezultatelor obținute prin calcule și valorile măsurate se constată unele deosebiri. O relativă dispersie a valorilor măsurate și calculate se poate explica prin unele erori și perturbații care intervin în schemele și aparatele de măsură, cât și prin modul în care au

fost evaluate în calcul toate distanțele geometrice care pot avea și unele fluctuații în anumite zone ale traseului liniilor electrice aeriene. Aceste aspecte justifică în bună măsură abordarea fuzzy în cadrul unui studiu credibil.

Din măsurătorile efectuate se constată că prezența omului modifică câmpul în funcție de modul în care este izolat față de pământ și valoarea câmpului existent în absența sa. Aceste valori cresc în funcție de izolația omului față de pământ, fiind în general de 6÷7 ori mai mari dacă omul este neizolat. Se constată că echipamentul de protecție reduce în medie la jumătate câmpul electric existent în partea superioară a corpului uman.

Experiența arată că în cazul unui domeniu conductor izolat față de pământ, din vecinătatea unei linii electrice aeriene, tensiunile care se induc determină prin atingere curenți electrici a căror valoare a intensității devine periculoasă pentru organismul uman. În cadrul pregătirii tezei s-au efectuat măsurători cu voltmetrul electrostatic pe linia electrică aeriană de 220 kV, dublu circuit, în situația de stare separat vizibil în ambele capete ale circuitului pasivizat, obținându-se următoarele valori ale tensiunilor induse prin influență electrostatică și electromagnetică: $U_r=3,4$ kV; $U_s=3,5$ kV; $U_t=4,9$ kV, iar pentru starea de legare la pământ valorile obținute sunt mult mai mici: $U_r=100$ V; $U_s=250$ V; $U_t=300$ V [10].

Se recomandă ca obiectele metalice aflate în vecinătatea liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune să fie legate permanent la pământ, iar în cazul liniile electrice pasivizate pe care se execută lucrări se impune cu necesitate o foarte bună legătură la pământ și verificarea ei permanentă. Practic se poate solicita monitorizarea instalațiilor de legare la pământ în aceste situații.

**SISTEM PENTRU SESIZAREA INFLUENȚELOR
PERICULOASE PRODUSE DE LINIILE ELECTRICE DE
ÎNALTĂ TENSIUNE**

7.1.Considerații generale.Critica soluțiilor existente

Măsurile tehnice de protecție a muncii pentru executarea de lucrări în instalații electrice impun în cazul scoaterii totale sau parțiale a instalației de sub tensiune verificarea lipsei de tensiune [9], [77].

Indicatoarele de tensiune cu tub cu descărcări în gaze sunt folosite pentru tensiuni de până la 110kV, nefiind practice datorită gabaritului și a limitării utilizării lor în stațiile exterioare numai pe timp uscat.

Pentru detectarea prezenței câmpului determinat de liniile de înaltă tensiune, de la distanță, fiind exclus cuplajul direct între instalația aflată sub tensiune și operator se face apel la aparatură electronică.

Utilizarea acestor aparate nu este restricționată de condițiile de mediu.

Avertizoarele (detectoarele) de prezență a câmpului electric de înaltă tensiune pot fi folosite în domeniul de 6 – 400kV ca indicatoare de tensiune sau ca mijloc suplimentar de protecție a muncii semnalând în apropierea liniilor sau a instalațiilor aflate sub tensiune apropierea periculoasă de acestea, la distanțe mai mici decât cele prevăzute în normele de protecție a muncii, distanțe la care apare pericolul de electrocutare.

Cerințele impuse acestor aparate:

- sensibilitate suficientă pentru detectarea câmpului electric cu $f = 50\text{Hz}$ de la distanțe mai mari decât cele minime admisiile în instalațiile de înaltă tensiune: 2m (110kV); 3m (220kV) și 5m (400kV);

- sesizorul (antena capacitivă) sensibil doar la tensiunea instalației. Sunt excluse antenele telescopice (0,5 ... 1,5m) și cele inductive pentru evitarea accidentelor;
- dimensiunile reduse pentru aparatele avertizoare sunt o necesitate;
- schema să presupună un consum energetic redus și evitarea descărcării inutile a bateriei de alimentare;
- circuit de control prin care să fie pusă în evidență funcționarea corectă în fiecare moment al utilizării sale.

Un avertizor acustic pentru prezența tensiunii pe liniile electrice aeriene (AATL-1) a fost realizat în IRME București [77].

Aparatul indică de la o distanță prezența tensiunii pe o linie electrică aeriană de $6 \div 400\text{kV}$, avertizând astfel scoaterea liniei de sub tensiune, operație care precede punerea obligatorie la pământ înaintea oricărei intervenții asupra liniei electrice aeriene.

Avertizorul este un mijloc de protecție suplimentar care nu înlocuiește măsurile de protecție conform „NPM pentru instalațiile electrice”.

În cazul liniilor electrice aeriene dublu circuit avertizorul poate fi utilizat numai în cazul în care sunt scoase de sub tensiune ambele circuite. El nu poate fi utilizat în stațiile de transformare din cauza influențelor pe care le exercită câmpurile determinate de echipamentele învecinate aflate sub tensiune.

Ca principiu de funcționare avertizorul AATL-1 este format dintr-un amplificator de joasă frecvență, tranzistorizat, la ieșirea căruia tensiunea având frecvența rețelei captată de antena capacitivă și amplificată la un nivel de ordinul voltului este redresată și aplicată pe un montaj cheie care deschide un oscilator RC producând un ton de avertizare cu frecvența în jur de 10^3 Hz.

Verificarea funcționării corecte a schemei electronice, din antenă la ieșirea pe casca telefonică este asigurată de un buton care prin apăsare amorsează schema și atestă funcționarea corectă a aparatului.

Avertizorul acustic de prezență a tensiunii pentru cască, se consideră a fi o altă soluție în realizarea unui sistem de avertizare a electricienilor la apropierea de instalațiile de înaltă tensiune, aparat cu dimensiuni cât mai reduse pentru a putea fi fixat pe casca de protecție.

Avertizorul AATC-1 are un principiu de funcționare identic cu cel al avertizorului AATL-1. În plus s-a impus dotarea aparatului cu o schemă automată de verificare a stării de funcționare a întregului aparat, prin emiterea unui impuls tonal audibil în cască cu o anumită periodicitate.

Aparatul conține un număr de 37 componente care constau într-un transformator pe un miez tip oală, 7 tranzistoare, 16 rezistoare 12 condensatoare și o capsulă telefonică

7.2.Soluția propusă.Principiul de funcționare, avantaje, dezavantaje

În cadrul tezei s-a propus un avertizor cu caracteristici performante față de cele existente actualmente în exploatare [76].

Principiul de funcționare al sistemului de avertizare al prezenței unui câmp electric periculos în zona de activitate se bazează pe faptul că între armăturile unui condensator introdus într-un câmp electric ia naștere o diferență de potențial proporțională cu intensitatea acestuia, E . Realizarea efectivă a condensatorului constă dintr-o suprafață metalizată (din circuit imprimat) și carcasa aparatului prevăzută cu o folie metalică.

Tensiunea de intrare corespunde căderii de tensiune pe rezistorul R_{in} , iar tensiunea obținută la ieșire, în urma procesului de amplificare

este de 5 până la 100 de ori mai mare decât cea de intrare, în funcție de reglajul sensibilității cu ajutorul potențiometrului prevăzut în schemă (figura 7.1).

Pentru satisfacerea acestui deziderat se impune ca impedanța de intrare a amplificatorului să fie foarte mare ($10^6 \Omega$) iar la ieșire impedanța să fie practic nulă.

Semnalul este trecut printr-un filtru "trece-jos" care are rolul de a selecta numai semnalele de joasă frecvență (50 Hz), determinate de câmpul electric specific instalațiilor electrice și liniilor electrice de transport și distribuție a energiei electrice. Așa cum rezultă din reprezentarea grafică (figura 7.2), prin filtru trec și semnalele armonice superioare, nu numai fundamentala. Frecvența de tăiere fiind 300 Hz, semnalele cu frecvența mai mare de 10 kHz și cele cu frecvența de ordinul Hz-ilor sunt practic eliminate.

După filtrarea semnalului, acesta este aplicat unui circuit monostabil, declanșat de semnalul al cărui amplitudine este mai mare decât nivelul pragului critic, (setat) și care poate fi modificat în funcție de timpul scurs de la momentul revenirii din ultima basculare.

Constanta de timp a circuitului monostabil este în jur de 100 ms fiind determinată de valoarea produsului $C_m \cdot R_m$. Odată comutat, monostabilul va "ignora" orice altă comandă primită la intrare, până la expirarea acestui timp. Imediat după revenirea monostabilului dintr-o comutare anterioară, sensibilitatea sa la intrare va fi inițial mai mică, crescând în mod treptat până la valoarea maximă, într-un interval de timp de câteva ori mai lung decât cele 100 ms. În acest fel, în cazul unui semnal de un anumit nivel la intrare, se va obține la ieșire un tren de impulsuri (cu durata fixă de 100 ms). Frecvența de repetiție a acestor

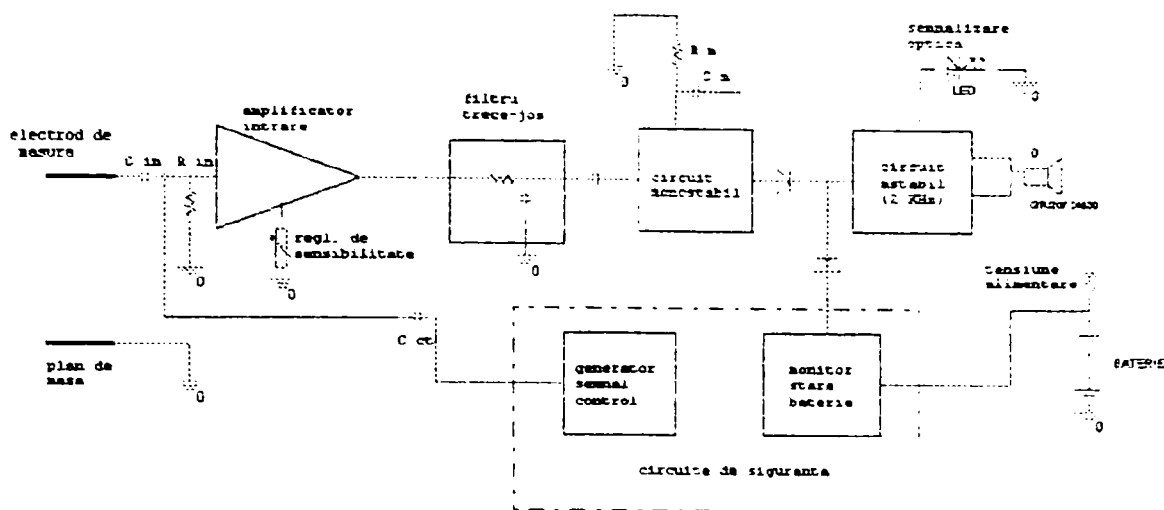
SCHEMA DE PRINCIPIU A
APARATULUI

Figura 7.1. Schema de principiu a avertizorului propus

impulsuri va fi însă proporțională cu amplitudinea semnalului de la intrare.

Pe durata fiecărui impuls este deblocată funcționarea unui oscilator de audio frecvență, care prin intermediul unui difuzor piezo-electric emite un semnal sonor. Frecvența a fost astfel aleasă încât săcoincidă cu frecvența de rezonanță a traductorului piezoelectric (1 - 3 kHz), asigurând un sunet suficient de intens pentru a fi perceput chiar și într-un mediu zgomotos. Concomitent cu semnalul sonor, aparatul emite și un semnal luminos, prin intermediul unui LED. Aceasta facilitate este utilă în situațiile în care semnalul sonor este acoperit de zgomote puternice, sau se dorește o funcționare silențioasă a detectorului.

În vederea asigurării unui grad sporit de siguranță și încredere în funcționarea aparatului, acesta a fost prevăzut cu un oscilator de "test", care are o frecvență de oscilație foarte mică (0.2 Hz). Acest oscilator

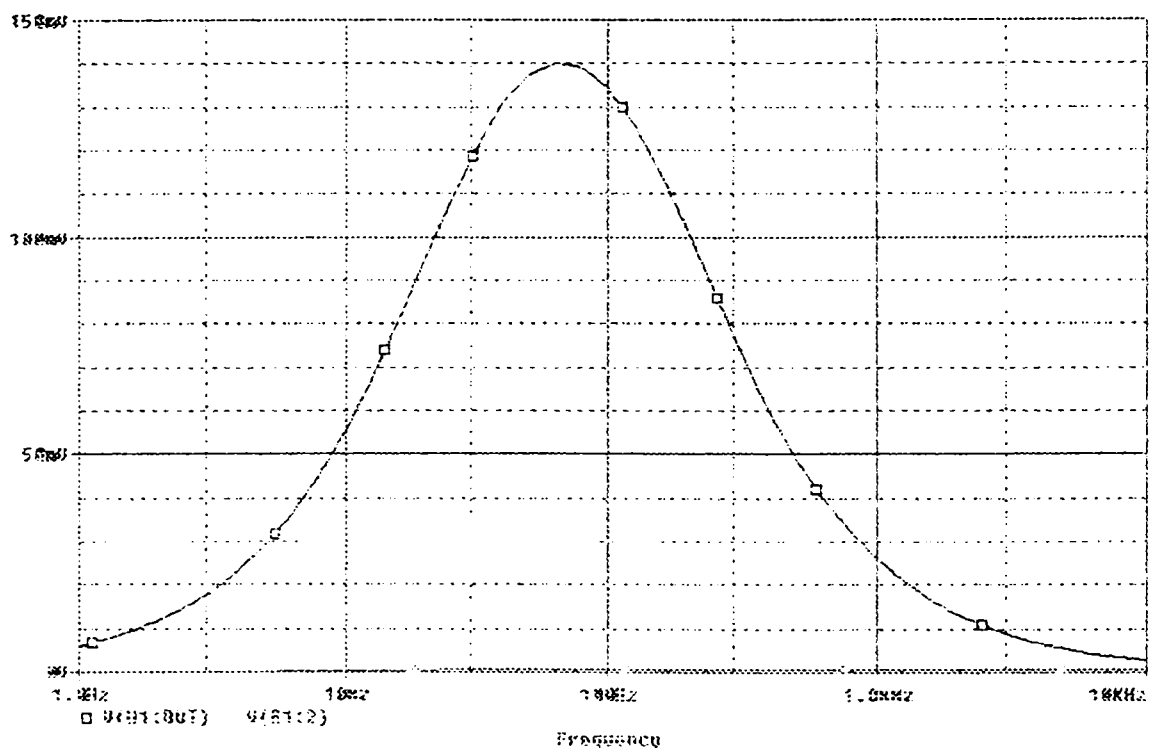


Figura 7.2 Reprezentarea grafică a semnalului prin filtru “trece-jos”, utilizat în montaj

generează periodic (la fiecare 5 s) un impuls electric slab la intrarea aparatului. Acest impuls detectat va emite un impuls sonor, care asigură utilizatorul că aparatul este în stare de funcționare și că toate blocurile sistemului funcționează corect.

Un compartor asigură supravegherea tensiunii de alimentare (baterie, acumulator). În cazul în care tensiunea la bornele sursei scade sub o anumită valoare, emite un semnal de avertizare sonor și optic continuu.

Aparatul propus a fost realizat practic, folosind componente miniaturale de tip SMD. Toate funcțiile descrise mai sus fiind asigurate cu ajutorul unui singur circuit integrat, precum și de un număr limitat de componente discrete (condensatori, rezistori, LED, traductor piezoelectric). Suprafața ocupată de întregul montaj este foarte mică (30 x 20 mm), acesta ocupând un volum mult mai mic decât cel al sursei de alimentare.

Carcasa de protecție a aparatului poate fi realizată din material dielectric, principiul de funcționare al acestuia nu impune vre-un contact cu mâna operatorului, solul sau cu conductoarele aflate sub tensiune.

Acest aparat detectează și semnalizează doar prezența unui câmp electric de o anumită valoare prestabilită, fără a ține seama de anumiți factori care pot influența într-un fel sau altul valoarea intensității câmpului electric. Nivelul semnalului la intrare depinde de distanța față de conductorul aflat sub tensiune, precum și de prezența altor câmpuri electrice în apropiere. De asemenea, trebuie ținut cont de efectul de ecranare al unor corpuri metalice (legate la pământ) precum și de cuplajul planului de masă al montajului față de sol.

Consumul de energie al aparatului este relativ mic. Poate fi alimentat de la o sursă de tensiune continuă între 6 și 12 V. Montajului realizat are la borne o baterie de 9 V. În starea de veghe valoarea intensității curentului este de $5 \cdot 10^{-4}$ A. Atunci când emite semnalul sonor intensitate curentului crește la o valoare de $5 \cdot 10^{-3}$ A, pentru o fracțiune neînsemnată de timp, fapt care nu limitează în mod semnificativ durata de viață a sursei.

Astfel, pentru o sursă (baterie sau acumulator), cu tensiunea de 9 V și capacitatea de 60 mAh, se asigură o perioadă de funcționare neîntreruptă de 120 h.

Se poate obține o creștere a autonomiei în funcționare, îmbunătățirea gradului de miniaturizare al montajului precum și fiabilitatea acestuia (rezistența la șocuri, umezeală etc.) prin folosirea unui circuit integrat cu un consum propriu mult mai mic, dar cu un preț de cost mai mare.

7.3.Încercări experimentale, verificări

Realizarea practică a sistemului de avertizare a permis efectuarea de teste în condiții de laborator și în condiții reale prin plasarea sa în vecinătatea liniilor aeriene de înaltă tensiune care concură la stația electrică de transformare Moșnița.

Datorită principiului său de funcționare, conceput pentru a detecta și semnaliza câmpul electric de o anumită valoare prestabilită în funcție de distanța față de conductorul aflat sub tensiune, respectiv de nivelul tensiunii acestuia, s-a constatat detectarea și semnalizarea prezenței câmpului electric de la aproximativ 100 m față de linia electrică aeriană de 110 kV. Această distanță, prin reglarea sensibilității aparatului putând fi diminuată până la 1 m.

Reglând nivelul semnalului la intrare în funcție de valoarea minimă a tensiunii care trebuie semnalizată, aparatul, aplicat în cazul legăturii de scurtcircuitare cu priza de pământ, clemei, poate avertiza asupra unei discontinuități în circuitul de punere la pământ. Astfel acesta detectează o cădere de tensiune $\Delta u \geq 24 \text{ V}$ pe legătura electrică necorespunzătoare.

Actualmente, există o propunere de brevet de invenție a acestei instalații sub egida întreprinderii “Transelectrica” S.A. Timișoara, urmând să se treacă la realizarea câtorva avertizoare care vor face parte din dotarea personalului ce va lucra în instalațiile “Transelectrica”.

7.4.Concluzii

Prin modul în care este conceput și gabaritul său redus acest aparat destinat sesizării influențelor periculoase produse de liniile electrice de înaltă tensiune se impune ca necesar în punctele de lucru pentru protejarea persoanelor a căror activitate se desfășoară “sub tensine”, motiv pentru care el a fost propus pentru brevetare.

Este de remarcat gradul sporit de siguranță și încredere în funcționarea aparatului, prin oscilatorul de “test” cu care acesta a fost prevăzut. Faptul că aparatul emite și un semnal luminos, prin intermediul unui LED, concomitent cu semnalul sonor, îi asigură utilitatea și în condițiile în care semnalul sonor nu poate fi recepționat din cauza unor zgomote puternice care-l acoperă, sau se dorește o funcționare silențioasă a aparatului

Totodată el este recomandat și de un consum redus de energie, printr-o baterie cu tensiunea la borne de 9V, se asigură o perioadă de funcționare neîntreruptă de 120 ore.

Se poate obține o creștere a autonomiei în funcționare, îmbunătățirea gradul de miniaturizare al montajului precum și fiabilitatea acestuia (rezistența la șocuri, umezeală etc) prin folosirea unui circuit integrat cu un consum propriu mult mai mic, dar cu un preț de cost mai mare. Prin introducerea unui sistem de memorare se poate obține o contorizare a duratei de lucru în prezența unui câmp electric a cărui intensitate are o valoare peste limita considerată a fi periculoasă.

CAPITOLUL 8

CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII

Problema influenței câmpului electromagnetic produs de liniile electrice aeriene de transport asupra mediului înconjurător este o problemă veche și totuși actuală. Este veche pentru că ea a apărut în același timp cu construcția și exploatarea primelor linii de transport și actuală, pentru că prezintă mereu noi aspecte odată cu dezvoltarea acestor linii, creșterea tensiunilor de funcționare, extinderea culoarelor pe care le reclamă prezența acestor linii. Chiar dacă societatea omenească s-a conștientizat de impactul acestor linii de transport, necesitatea lor este inerentă actualmente când producerea distribuită a energiei electrice nu poate acoperi nici 10% din necesar. Deci liniile electrice de transport trebuie încă dezvoltate și eficientizate, în acest aspect din urmă încadrându-se două din elementele esențiale: controlul și impactul asupra mediului, acesta din urmă câștigând tot mai mult teren în sprijinul “vieții” pe Pământ, aceluia din urmă fiindu-i subordonat în ultima perioadă chiar și controlul liniar [85].

De remarcat două etape pe care le-a parcurs în dezvoltarea lor liniile electrice aeriene în ultima perioadă, etape marcate pe de o parte de progresul tehnic, iar pe de altă parte de dorința omului de a proteja mediul de viață și nu în ultimul rând propria sa existență. Referitor la prima etapă, marcată de perfecționarea izolației și apariția izolației compozite trebuie menționată compactizarea liniilor, reducerea dimensiunilor și culoarelor reclamate de acestea. A doua etapă este marcată de utilizarea electronicii de putere în realizarea unor regimuri particulare de funcționare, care asigură o capacitate sporită de transport fără a crește tensiunea de lucru. În aceeași categorie se înscriu și liniile polifazate și cele care au elemente active suplimentare pentru diminuarea câmpului

electromagnetic din vecinătate [85], [86]. Realizările din acest domeniu și mai ales propunerile EPRI vin să confirme importanța problemelor și în general a tuturor preocupărilor orientate spre adâncirea problemelor legate de influența electromagnetică a liniilor de transport, manifestarea lor în diferite regimuri, identificarea zonelor din vecinătatea liniilor electrice aeriene unde câmpul electric sau magnetic depășește anumite limite, metode și mijloace de limitare a acestora. Astfel, noul sistem de transmisie cu influență electromagnetică redusă “Right-of-Way” (R-O-W) [84], introducerea unei bucle (circuit) suplimentare de ecranare compensate capacitiv longitudinal, sau a unui circuit trifazat de compensare a câmpului electromagnetic inductor alcătuit din conductoarele de gardă și pământ [85] sunt câteva din realizările deosebite realizate în acest domeniu.

Marcat de aceste preocupări, precum și de comunicările făcute de CIGRE la finele secolului trecut [81], [82], de unele accidente petrecute pe linia de 220kV, Porțile de Fier – Reșița, autorul acestei lucrări a considerat oportună desfășurarea unei cercetări aplicative în domeniul influenței liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune asupra circuitelor învecinate, cu referire concretă la unul din circuitele unei linii duble de transport scos din funcțiune iar celălalt în funcțiune, în regim permanent normal sau de avarie, acesta din urmă fiind de un scurtcircuit monofazat. Chiar dacă s-au considerat ipoteze simplificatorii cum ar fi neglijarea influenței conductorului de protecție sau prezența solului, efectului pelicular sau de apropiere, s-a dorit ca metodologia de calcul stabilită să fie una practică, simplă și eficientă, care să poată fi ulterior validată prin simulări și determinări experimentale.

În acest sens teza a fost concepută ca un tot unitar care să trateze următoarele aspecte: introducere, linii electrice compacte, calculul

influenței electromagnetice a liniilor electrice de înaltă tensiune, determinarea câmpului electric și a celui magnetic produs de liniile de transport prin simulare folosind un mediu de programare Mathcad 2001 Professional, determinări experimentale, propunerea unui sistem electronic pentru avertizarea personalului de exploatare privind prezența și nivelul câmpului electromagnetic, concluzii generale. Produsul acestei lucrări s-a constituit într-o metodologie clară de calcul și de simulare a câmpului electromagnetic generat de liniile electrice aeriene de transport, de validare a acestor calcule prin determinări experimentale și nu în ultimul rând de elaborarea a unui estimator lingvistic fuzzy al tensiunilor induse și propunerea unui avertizor electronic de câmp electromagnetic.

În cadrul primului capitol, autorul prin bibliografia consultată justifică necesitatea studiului efectuat asupra efectelor biologice pe care le determină câmpul electromagnetic al liniilor electrice de înaltă tensiune. Riscul posibil asupra sănătății și integrității umane pe care-l prezintă apropierea în scop determinat sau accidental de liniile electrice aeriene de transport și distribuție a energiei electrice, funcționând în regim permanent sau de avarie, este pus în evidență printr-o mare varietate de studii.

În al doilea capitol al tezei este prezentată o soluție a viitorului, expresie a compactizării liniilor electrice aeriene, impusă de necesitatea asigurării unei restricționări spațiale a construcției acestora, creșterea capacității de transport a energiei electrice, reducerea consumului material și nu în ultimul rând încadrarea estetică și ecologică a liniilor în ambianța mediului natural. Cu această ocazie sunt evidențiate problemele pe care le ridică compactizarea, soluții și restricții ridicate. Impactul compactizării asupra influenței electrostatice și electromagnetice.

Capitolul trei, considerat de autor ca fiind fundamental, cuprinde o analiză numerică a câmpului electric și magnetic în punctele din vecinătatea liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune atunci când acestea funcționează atât în regim permanent cât și în regim de avarie, fiind luate în considerare influențele de natură electrostatică (cuplaj capacitiv), electromagnetică (cuplaj inductiv) și rezistivă (cuplaj galvanic).

Modelarea numerică s-a efectuat în mediul Mathcad 2001 Professional, pentru liniile electrice aeriene de 110 kV, 220 kV și 400 kV, simplu respectiv dublu circuit.

În prima parte a capitolului s-au tratat problemele generale ale influențelor exercitate de liniile electrice aeriene asupra circuitelor învecinate, geometria pe care o presupune o linie electrică de înaltă tensiune simplu circuit, respectiv dublu circuit, precum și calculul capacităților parțiale și ale inductivităților mutuale. S-au pus în evidență valorile potențialului electric față de pământ, ale intensității câmpului electric și ale inducției magnetice în diferite puncte din vecinătatea liniei electrice aeriene de înaltă tensiune, simplu circuit și dublu circuit, pentru un regim permanent de funcționare.

În continuare se pune în evidență influența electrostatică pe care o manifestă un circuit inductor asupra circuitului pasivizat. Circuitul inductor funcționează atât în regim permanent cât și în regim de scurtcircuit monofazat. Luând în considerare expresiile de calcul pentru tensiunile induse electrostatic se pun în evidență erorile care apar în evaluarea tensiunii atunci când se introduc ipoteze simplificatoare. Se introduce un coeficient de corecție β . Folosind expresia spline de interpolare a erorilor de calcul se obțin valorile comparative ale erorilor. Un rol important în valoarea tensiunii induse îl are poziția relativă a celor două circuite. Dacă ele sunt la aceeași înălțime față de suprafața solului,

tensiunea indusă este maximă și reprezintă între (7...9) % din U_f . Tensiunea indusă crește cu înălțimea față de sol a conductorului aparținător circuitului electric indus și scade cu distanța față de circuitul inductor. Pentru regimul de avarie (scurtcircuit monofazat) al circuitului inductor, atunci când în mod inevitabil, tensiunile fazelor față de pământ se modifică, sunt puse în evidență tensiuni induse electrostatic, pe fazele afectate, de valori comparabile cu tensiunile induse în cazul funcționării în regim permanent a circuitului inductor, (5...7) % din U_f .

Având în vedere valorile mari ale tensiunilor induse, se impune necesitatea utilizării scurtcircuitoarelor care să asigure un contact galvanic foarte bun atât cu conductoarele de fază ale circuitului pasivizat asupra căruia se execută intervenția, cât și cu priza de pământ în mai multe puncte, pentru a evita cu certitudine posibilitatea apariției unor accidente

Influența electromagnetică se manifestă numai în regimul de sarcină a circuitului inductor asupra circuitului pasivizat, fiind determinat de câmpul magnetic al curenților electrici. Este important de remarcat faptul că valoarea tensiunii induse prin cuplaj inductiv depinde nu numai de configurația geometrică a liniei electrice dublu circuit ci și de valoarea curenților prin fazele circuitului activ (inductor). Un alt aspect care influențează valoarea tensiunii induse electromagnetic este cel al lungimii de paralelism între cele două circuite (inductor și indus).

În situația limită a unui scurtcircuit monofazat pe circuitul electric inductor, tensiunile induse ating valori mari, ceea ce impune o minimizare a duratei acestuia pentru a limita efectul perturbațiilor produse. Considerarea conductorului de protecție a scos în evidență efectul reducerii tensiunilor induse

Din considerente legate de protecția muncii, circuitul electric pasiv (deconectat) se leagă la pământ în ambele capete prin prizele de pământ ale stațiilor electrice ($R_p < 0,5\Omega$). În bucla astfel formată vor circula curenți de inducție care determină pierderi suplimentare de energie. Acestea nu au fost considerate la acțiunea tensiunilor induse.

În cazul montării scurtcircuitoarelor chiar atunci când sistemul curenților liniei aflate sub tensiune este puternic nesimetric tensiunile prizelor de pământ obțin valori scăzute, care nu pot provoca electrocutări cu consecințe grave asupra personalului din zonă. Dacă însă rezistența prizei de pământ are o valoare mare este posibil ca tensiunea pe aceasta să devină periculoasă.

Capitolul 4 conține o abordare fuzzy a calculului tensiunilor induse de liniile electrice aeriene în circuitele învecinate.

La începutul paragrafului sunt prezentate problemele generale ale mulțimilor fuzzy, iar în continuare sunt prezentate numerele fuzzy, operații cu numere fuzzy, respectiv defuzzyficarea.

Se prezintă regulile de bază ale unui estimator fuzzy pentru tensiunea indusă electrostatic de o linie electrică aeriană. Crearea estimatorului fuzzy presupune codificarea funcției de estimare într-un set de reguli care operează asupra mulțimilor fuzzy rezultate prin fuzificarea domeniilor de definiție corespunzătoare geometriei liniei electrice aeriene, adică mărimile de intrare în estimator, care se pretează unei memorii fuzzy asociate. În evaluarea mărimilor fiind excluse simbolurile discrete și numerele, se apelează la termeni lingvistici, trecându-se de la conceptul de “probabilitate” la cel de “posibilitate” în gestionarea informațiilor incerte și inexacte.

Estimatorul fuzzy este conceput pentru a pune în evidență “posibilitatea” riscului pe care-l prezintă pentru organismul uman

interacțiunea cu câmpul electromagnetic determinat de liniile electrice aeriene de înaltă tensiune și gestionează informații incerte și inexacte referitoare la parametri electrici (tensiunea, curentul), respectiv geometrici (distanța între conductorii de fază, înălțimea acestora față de pământ).

Pe baza pachetului de programe de înaltă performanță oferit de mediul MATLAB R12, în capitolul 5, s-a efectuat determinarea câmpului electromagnetic în domeniile din vecinătatea liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune. La început s-a prezentat metodologia de calcul (paragraful 5.1), apoi s-a realizat efectiv algoritmul de calcul al tensiunilor induse prin influență electrostatică (cuplaj capacitiv) și electromagnetică (cuplaj inductiv) în paragraful 5.2 ca în paragraful 5.3 să fie puse în evidență valorile potențialului electric față de pământ, ale intensității câmpului electric și inducției magnetice atât în regim permanent de funcționare cât și pentru regimul de avarie al liniilor electrice de înaltă tensiune, fiind astfel validate rezultatele care s-au obținut în capitolul 3 prin aplicarea mediului Mathcad 2001 Professional.

Folosind același pachet de programe s-au calculat valorile potențialului față de sol, ale intensității câmpului electric și inducției magnetice în puncte din vecinătatea unei linii electrice aeriene compacte de 110 kV. Rezultatele obținute confirmă faptul că, compactizarea liniilor electrice aeriene permite reducerea influenței electromagnetice, atât prin valoarea câmpului, cât și a tensiunii induse.

Conținutul capitolului 6, confirmă valorilor obținute prin analiza numerică prezentată în capitolele anterioare pentru mărimile de stare ale câmpului electromagnetic în vecinătatea liniilor electrice aeriene, prin efectuarea unei incursiuni în domeniul măsurătorilor, atât într-un cadru de

laborator cât și în puncte din mediul exterior, învecinat acestor linii electrice.

Astfel, la început este pusă în evidență metodologia și aparatura care se pretează cel mai bine la realizarea practică a măsurătorilor în cadrul instalațiilor aflate sub tensiune. Determinările din laborator, s-au efectuat în cadrul Laboratorului de Înaltă Tensiune al Universității “Politehnica” din Timișoara. Determinările experimentale în instalațiile electrice, respectiv în vecinătatea liniilor electrice de înaltă tensiune s-au efectuat beneficiind de aparatul de măsură a intensității câmpului electric de frecvență industrială realizat în cadrul Catedrei de Măsurări electrice din Universitatea “Politehnica” Timișoara și de măsurătorile executate de Politehnica din București.

Se constată că măsurătorile efectuate validează în bună măsură modelul numeric obținut atât pentru câmpul electric cât și pentru cel magnetic, dacă ținem seama de corecturile care se impun ca urmare a erorilor introduse de factorul subiect. Desigur, există diferențe, dar acestea nu depășesc 30÷50%.

Deoarece măsurile tehnice de protecție a muncii pentru executarea de lucrări în instalații electrice impun în cazul scoaterii totale sau parțiale a instalației de sub tensiune verificarea lipsei de tensiune, în capitolul 7 am prezentat funcționarea sistemului de avertizare al prezenței unui câmp electric periculos în zona de activitate. Soluția prezentată vine în sprijinul protejării indivizilor nu numai în situația lucrului “sub tensiune”, ci și în cazul unei staționări de lungă durată în câmp electromagnetic. Realizarea aparatului în funcție de acest deziderat a contribuit la soluționarea mai multor aspecte aflate sub incidența protecției muncii în instalațiile electrice aflate sub tensiune.

Datorită principiului său de funcționare, aparatul astfel conceput poate detecta și semnaliza câmpul electric de o anumită valoare prestabilită în funcție de distanța față de conductorul aflat sub tensiune, respectiv de nivelul tensiunii acestuia. Astfel s-a constatat detectarea și semnalizarea prezenței câmpului electric de la aproximativ 100 m față de o linie electrică aeriană de 110 kV. Această distanță, prin reglarea sensibilității aparatului putând fi diminuată în funcție de condițiile de protecție ale personalului față de instalația electrică aflată sub tensiune.

Reglând nivelul semnalului la intrare în funcție de valoarea minimă a tensiunii care trebuie semnalizată, aparatul, poate avertiza asupra unei discontinuități în circuitul de punere la pământ.

Pentru modul în care este conceput și gabaritul său redus acest aparat a fost propus pentru brevetare și el a fost luat în considerare de către specialiștii întreprinderii TRANSELECTRICA S.A.

Este de remarcat gradul sporit de siguranță și încredere în funcționarea aparatului, faptul că emite și un semnal luminos, concomitent cu semnalul sonor, îi asigură utilitatea și în condițiile în care semnalul sonor nu poate sau nu se dorește a fi recepționat. Totodată el este recomandat și de un consum redus de energie.

O creștere a autonomiei în funcționare, îmbunătățirea gradului de miniaturizare al montajului precum și a fiabilității (rezistența la șocuri, umezeală etc), se poate obține prin folosirea unui circuit integrat cu un consum propriu mult mai mic, dar cu un preț de cost mai mare. Prin introducerea unui sistem de memorare se poate obține o contorizare a duratei de lucru în prezența unui câmp electric a cărui intensitate se consideră peste limita considerată a fi periculoasă.

Contribuțiile aduse de autor în cadrul lucrării se referă la:

- sistematizarea informațiilor referitoare la influența liniilor electrice de înaltă tensiune asupra liniilor vecine;
 - sistematizarea cunoștințelor despre problematica liniilor compacte și evidențierea rolului adoptării acestora sub aspectul influenței electromagnetice a liniilor de transport aeriene asupra mediului învecinat;
 - evidențierea situațiilor particulare care apar în condițiile în care un circuit al unei linii duble este în funcțiune iar celălalt este scos din funcțiune fiind accesibil personalului de întreținere și revizie;
 - calculul intensității câmpului electric și a potențialului electric în puncte vecine (inclusiv la nivelul conductoarelor circuitului scos din funcțiune) în condițiile regimului permanent, normal de funcționare al circuitului inductor și în regim de avarie, provocat de un scurtcircuit monofazat; analiza situațiilor extreme care pot apare și sublinierea unor concluzii;
 - estimări cantitative și calitative efectuate cu ocazia studiilor de caz efectuate, comparații între valorile câmpurilor electric și magnetic, tensiuni induse transversal sau longitudinal pentru linii de diferite tensiuni nominale, dar același tip de stâlp (hexagon sau portal), aceeași tensiune nominală dar tipuri de stâlp diferite (portal și hexagon), stabiliri de concluzii utile;
 - întocmirea unui estimator fuzzy pentru aprecierea influenței electrostatice a liniilor de înaltă tensiune (110; 220; 400kV) asupra circuitelor învecinate;
 - aplicarea pachetului de programe MATLAB R12 la calculul valorilor potențialului electric, intensității câmpului electric și inducției magnetice în puncte din vecinătatea liniilor electrice aeriene de înaltă tensiune cu dublu circuit în diferite condiții de funcționare: regim permanent normal, regim permanent normal pentru un circuit, celălalt fiind scos din
-

funcțiune și un circuit în regim de avarie (scurtcircuit monofazat) iar celălalt scos din funcțiune;

-efectuarea de măsurători și determinări experimentale în laboratorul de Înaltă Tensiune a facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din cadrul Universității “Politehnica” Timișoara, în stațiile Moșnița, Dumbrăvița și Mintia;

- propunerea unui sistem de avertizare asupra prezenței și nivelului câmpului electromagnetic cu componente electronice (circuite integrate).

BIBLIOGRAFIE

- [1] Hortopan, Gh. ș.a.; *Ecranarea electromagnetica în tehnica curenților intensi*; Editura Tehnică, București, 1990.
 - [2] Curelaru, A. ; *Probleme de stații și rețele electrice*; Scrisul Românesc; Craiova, 1979
 - [3] Mocanu, C., I.; *Teoria câmpului electromagnetic*; EDP, București, 1981
 - [4] Rafiroiu, D.; *Bioelectromagnetism*; Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 2001
 - [5] Mândru Gh., Rădulescu M.M.; *Analiza numerică a câmpului electromagnetic*; Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1986
 - [6] W.P. King; *Fields and Currents in the Organs of the Human Body When Exposed to Power Lines and VLF Transmitters*; IEEE, Transactions on Biomedical Engineering, vol.45, No.4, 1998, pp.520-530
 - [7] Răduleț, R.; *Bazele electrotehnicii, probleme, vol.1*; EDP, București, 1981
 - [8] Munteanu, C.; *Metoda elementelor de frontieră*; Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 1997
 - [9] Titihazan, V.; *Impactul rețelelor electrice asupra mediului și aspecte de compatibilitate electromagnetica*; Editura AGIR, București, 2000
 - [10] Titihazan V., Toader D.; *Metodologie de calcul a influenței electromagnetice pe LEA 220 kV DC Porțile de Fier – Reșița; Elemente de compatibilitate electromagnetica*; Contract de cercetare aplicativă Nr.928/2002, Timișoara
 - [11] Arie A. Arie ș.a; *Rețele electrice*; ET, București, 1981
 - [12] Buta A.; *Transportul energiei electrice în curent continuu*; Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1998
 - [13] Șora C.; *Bazele electrotehnicii*; E.D.P., București, 1982
 - [14] De Sabata I.; *Bazele electrotehnicii* ; Institutul Politehnic “Traian Vuia”, Timișoara, 1979
 - [15] Șora C. ; *Bazele electrotehnicii* ; Institutul Politehnic “Traian Vuia”, Timișoara, 1973
 - [16] Foster K. R.; *Electromagnetic Field Effects and Mechanisms*; IEEE Engineering in Medicine and Biology, 1996, pp.50-56
 - [17] Lapin G.D.; *The EMF to BBB Connection*; IEEE Engineering in Medicine and Biology, July/Aug., 1996, pp.57-60
-

- [18] Moulder J. E.; *Biological Studies of Power- Frequency Fields and Carcinogenesis*; IEEE Engineering in Medicine and Biology, July/Aug., 1996, pp.31-40.
- [19] Titihazan V. și; *Determinări privind intensitatea câmpului electric în laboratorul de înaltă tensiune și estimarea riscurilor în expunerea profesională la câmpuri electromagnetice*; Al VI-lea Simpozion Național TTI 99, București
- [20] Alexandrov G.N. și a.; *Proiectarea liniilor electrice de foarte înaltă tensiune*; E.T., București, 1989
- [21] Vatră F., Cristovici A.; *Efectele acțiunii câmpului electric generat de instalațiile electrice de înaltă tensiune asupra corpului omenesc și concluzii pe plan mondial privind această problemă*; Energetica; 36, Nr.6, 1988, pp.275-279
- [22] Crișan O.; *Rețele electrice*; Institutul Politehnic Timișoara, 1969
- [23] Buta A.; *Transportul și distribuția energiei electrice*; Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1991
- [24] Gavrilaş M.; *Cercetări privind optimizarea structurii și a regimurilor liniilor de transport a energiei electrice compacte*; Teză de doctorat, Iași, 1994
- [25] Vatră F.; *Compactizarea liniilor electrice aeriene. Necesități și posibilități*; Al VI-lea Simpozion Național TTI 99, București, pp.17-22
- [26] Postolati V.M. și a.; *Studierea caracteristicilor LEA 0,4-110kV cu conductoare izolate*; Al VI-lea Simpozion Național TTI 99, București
- [27] Coatu S. și a.; *Perturbații electromagnetice tranzitorii în stațiile electrice de înaltă tensiune*; Al VI-lea Simpozion Național TTI 99, București
- [28] Baran I. și a.; *Evaluarea perturbațiilor electromagnetice emise de canalul de trăsnet în stadiul de descărcare principală*; Al VI-lea Simpozion Național TTI 99, București
- [29] Șerban T. și a.; *Relația calitate-mediu, definitorie pentru limitarea impactului asupra mediului a LEA 110-750 kV*; Al VI-lea Simpozion Național TTI 99, București
- [30] Hurdubețiu S., Ioan S.; *Câmpul electromagnetic al liniilor electrice aeriene multifazate*; Al VI-lea Simpozion Național TTI 99, București

- [31] ****Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques*; Hygiène et sécurité du travail/ Nr.182, 2001
- [32] Stoica V., Crișan S.; *Observații asupra câmpului electric din stațiile exterioare de transformare de înaltă tensiune*; Energetica, Nr.5-6,1975,pp.184-186
- [33] Rucăreanu C. ș.a.; *Linii electrice aeriene și subterane*; E.T., București, 1989
- [34] Buta A., Pană A.; *Transportul și distribuția energiei electrice*; Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1997
- [35] Bălan, Gh. ș.a.; *Influența instalațiilor electrice de înaltă tensiune de curent alternativ asupra cablurilor de telecomunicații de pe teritoriul orașelor mari* ; Energetica, Nr.3-4, 1977
- [36] Stein M., Sufrim M.; *Metodă nouă de protecție împotriva influențelor prin cuplaj rezistiv și inductiv, în cazul cablurilor-pilot de lungimi mari și curenți mari de punere la pământ*; Energetica, Nr.5, 1974.
- [37] Prelipcean I., Sfichi R.; *Considerații privind calculul factorului de reducere introdus în conductorul de protecție al LEA 110 kV simplu circuit aflate în paralelism cu linii de telecomunicații*; Energetica, Nr.8, 1977
- [38] **Marincu A.**; *Fields and Currents in the Human Body when exposed to Power Lines*; ПЕЕС2003, Niš, Serbia și Muntenegru
- [39] **Marincu A.**, Titihazan V., Buta A.; *Observații asupra câmpului electric și magnetic în vecinătatea liniilor electrice de înaltă tensiune*; C.I.E., Oradea, 2003.
- [40] Vetreș I., **Marincu A.**; *Comportarea energetică a unui receptor neliniar în regim deformant*; C.I.E., Oradea, 2003.
- [41] Stuchly, M. A., XI, W.; *Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields* ; Phys. Med. Biol.39; 1994
- [42] **Marincu A.**, Titihazan V., Buta A.; *Tensiunile induse prin influență electrostatică și electromagnetică de o linie electrică aeriană de înaltă tensiune, în regim de avarie, asupra circuitelor electrice învecinate*; P.S.C., Timișoara, 2003.
- [43] Vetreș I., **Marincu A.**; *O teoremă de reciprocitate a câmpului electrocinetic în prezența câmpului magnetic*; P.S.C., Timișoara, 2003

- [44] **Marincu A., Greconici M.;***Câmpul electric și magnetic în vecinătatea unei linii electrice de înaltă tensiune și posibilele efecte asupra sistemelor biologice*; P.S.C., Timișoara, 2003
- [45] **Marincu A., Titihazan V., Buta A.;***Influența electrostatică a unei linii electrice aeriene de înaltă tensiune, în regim de avarie, asupra circuitelor electrice învecinate*; Zilele Academice, Timișoara, 2003.
- [46] **Marincu A., Buta A.;***Considerații asupra modului de calcul a tensiunilor induse prin influență electrostatică în cazul liniilor electrice de înaltă tensiune*; Producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Nr. , București, 2003.
- [47] **Marincu A.;***Fenomene electromagnetice*; Editura Politehnica, Timișoara, 2003 (în curs de apariție).
- [48] **Bernhardt J.H.;***Basic criteria of ELF-standards: worldwide archivement in public and ocupation health protection against radiation*. Proceedings of the Eighth International Congress of the International Radiation Protection Association Geneva IRPA 1992, pp.66-71
- [49] **Tenforde, T.S.-***Interactions of ELF magnetic fields with living systems*. In : Polk, C. : Postow, E., eds. Biological effects of electromagnetic fields. Boca Raton, FL :CRC Press :1996.
- [50] **Astumian, R.D. ; Weaver, J.C. ; Adair, R.K.-***Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells*, PNAS 92: 1995 , pp 201-205.
- [51] **Ghinea M., Fireteanu V.;** MATLAB; Editura Teora, București, 1995
- [52] **Tenforde, T.S.-***Cellular and molecular pathways of extremely low frequency electromagnetic field interactions with living systems*. In : Blank, M., ed.- Electricity and magnetism in biology and medicine. San Francisco, CA: San Francisco Press 1993 pp.645-650.
- [53] **Tenforde, T.S. –***Biological interactions and human health effects of extremely low frequency magnetic fields*. In : Anderson, L. E. :Stevens, R.G. ; Wilson, B.W.eds’-Extremely low-frequency electromagnetic fieleds : the question of cancer. Columbia,OH :Battelle Press :1990 : 291-315.
-

- [54] Kirschvink, J.L. ; Kobayashi-Kirschvink, A. ; Diaz Ricci, J.C. Kirschvink, S.J.-*Magnetite in human tissues : a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields.* Bioelectromagnetics Suppl. 1: 1992a, pp.92-95.
- [55] Kirschvink, J.L. ; Kobayashi-kirschvink, A. ; Woodford,B.J.-*Magnetite biomineralization in the human brain.* Proc. Nat. Acad. Sci. 89 :1992b pp.234-237.
- [56] Cridland, N.A.- *Electromagnetic fields and cancer; a review of revelant cellulars studies.* Chilton,UK : National Radiological Protection Board ; Report NRPB-R :1993.
- [57] Walleczek,J.- *Electromagnetic field effects on cells of the immune system : the role of calcium signalling.* The FASEB Journal 6 : 1992.
- [58] Phillips, J.L. ; Haggren, W. ; Thomas, W.J.; Ishida-Jones, T.;Adey,W.R.-*Magnetic fieldinduced changes in specific gene transcription .* Biochim. Biophys. Acta 1132 : 1992.
- [59] Litovitz, T.A. ; Krause, D. ; Penafiel, M. ; Elson, E.C. ; Mullins, J.M.-*The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity.* Bioelectromagnetics 14 :1993.
- [60] Titihazam, V.;Roşca Ştefania; Titihazan Mariana ;Buta, A.; **Marincu, A.**-*Compatibilitatea electromagnetică a liniilor de înaltă tensiune și probleme specifice de protecția muncii.* Conferința de Inginerie Electrică CIE 2003 Oradea.
- [61] **Marincu A.**, Greconici M., Vesa Daniela; *The biological effects on a human body exposed in a electromagnetic field produced by high voltage electrical overhead line with single phase – to - earth fault.* Novi – Sad, 2003, Serbia și Muntenegru
- [62] **Marincu A.**, Greconici M., Vesa Daniela; *Influențe ale câmpului electromagnetic determinat de o linie electrică de înaltă tensiune în regim de avarie asupra organismului uman aflat sub incidența sa.* Chișinău, 2003, Republica Moldova
- [63] Kaufmann A., Gupta M.M.; *Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science.* North – Holland, Amsterdam, 1988
- [64] Kauhaniemi K. ; *Fuzzy Models and Techniques for the calculation of Radial Distribution Networks.* Proc. Of Joint International Power Conference ATP' 93, Athens, 1993

- [65] Chindriș M., Cziker A.; *Utilizarea sistemelor fuzzy în energetică*. Editura MEDIAMIRA, Cluj – Napoca, 2002
- [66] Bârlădeanu E., Poată Al.; *Contribuții la modelarea matematică a unor procese manageriale în domeniul rețelelor electrice*. În: *Energetica*, 42.B, nr.5, 1995, pag.493-498
- [67] Cârțină Gh., Grogoraș Gh.; *Inteligența artificială. Optimizări în energetică*. Editura Venus, Iași, 2001
- [68] Bogoi C.; *Utilizarea tehnicilor fuzzy în calculul regimului permanent al rețelelor electrice radiale de distribuție*. G.S.C.I. București
- [69] ****Buletin măsurare unde electromagnetice*; Institutul Național de Cercetare – Dezvoltare pentru Protecția Muncii, București, 2001
- [70] Nicolaescu A.; *Efectele biologice ale câmpurilor electromagnetice în expunerea profesională la CEM de joasă frecvență*; Universitatea “Politehnica” Timișoara, 2002
- [71] Sevastre I., Munteanu C.; *Selecția și instruirea personalului în activitatea de lucru sub tensiune: principii, realizări și perspective*; Simpozion Național de LST, Sibiu, 1999
- [72] N.Wertheimer, E. Leeper; *Electrical Wiring Configuration and Childhood Cancer*; *Am.J.Epidemiologie* 11(4), 1979, pp.89-94
- [73] Gary C.; *Effets biologiques d`un champ electrique. Que peut dire l`electricien a ce sujet?* *Rev. Gen. El. Numero Special*, 1976, pp.346-349
- [74] C.Poole, D. Ozonoff; *Magnetic Fields and Childhood Cancers*; *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, July/August, 1996, pp.141-146
- [75] Pop E., Crișan S., Stoica V.; *Procedeu și aparat pentru măsurarea câmpurilor electrice de frecvență industrială*; Brevet de invenție Nr.67108, IPTV, Timișoara
- [76] Popa L., Popovici V., **Marincu A.**, Buta A.; *Aparat pentru detectarea și semnalizarea prezenței tensiunii pe liniile electrice aeriene*; Propunere de invenție, cerere Nr.1213/28.02.2003
- [77] Goldenberg R.; *Dispozitive de avertizare pentru mărirea gradului de siguranță a lucrărilor din instalațiile de înaltă tensiune*; *Energetica*, nr.3, 1971, pag.55-58
- [78] Mocanu C.I.; *Teoria circuitelor electrice*;

- E.D.P.,București, 1979
- [79] Singer. H, Steinbigler M., Weiss P.; *A charge simulation method for the calculation of high voltage fields*; IEEE Transaction Power App and Systems, vol PAS –93,1974, pp 1660-1668
- [80] Stuchlz M. A., Zhav S.; *Magnetic field-induced currents in the human body in proximity of power lines*; IEEE Transactions Power Delivery, vol. 11, No. 1, jan 1996, pp 102-109
- [81] Plante M., *50-60 Hz electric and magnetic fields and health: major progress*; ELECTRA, No.179, august 1998, pp 9-11
- [82] Maddock B. J.; *A summary of standards for human exposure to electric and magnetic fields at power frequency*;ELECTRA, No. 179, august 1998, pp 51-65
- [83] Ianoz M.; *Efectele biologice ale câmpurilor electromagnetice. Producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice*; Nr. 10/2000, pp 37-43, ODE București
- [84] Walling R. A., Paserbo J. J. Burns C. W.; *Series – capacitor compensated shield scheme for enhanced mitigation of transmission line magnetic fields*; IEEE Transactions on Bwer-Delivery, vol.8, No.1, January 1993, pp 461- 467
- [85] Jonsson A. U.; *Discussion of paper: [84]*, IEEE Trans on Power-Delivery, vol.8, No.1, Jan.1993, pp.468
- [86] Nowai A., Keri J. F. Al., Marsico R.; *Upgrade – Loops: Apparatus and method for increasing electrical clearances of energized conductors*; IEEE Transactions on Bwer Delivery, vol.12, No.4, October 1997, pp 1836-1841
- [87] Nowai A., Keri A. J. F., Shih C. M.; *Shield Wire less reduction for duple circuit transmission lines*; IEEE Transactions on Power Delivery, vol.3, No.4, October 1988, pp.1854 -1864
- [88] Takashi N. et al; *Development of gelloping endurance design for extra large 6-conductor bundle spaces by experience of the full scale 500kV test line*; IEEE Transactions on Power-Delivery, vol.12, No.4, October 1997, pp.1824 -1829
- [89] Maishita et al, *galloping phenomeno of large bundle conductors experimental results of the field test lines*; CIGRE, 22-04-1984
- [90] Takuma T. et al; *Effects of an insuleting support in AC electric field measurement*; IEEE Transactions on Power Delivery, vol.8, No.4, October 1993, pp.2031- 2037
-

- [91] Takuma T. et al; *Analysis of calibration arrangements for AC field strength meters*; IEEE Transactions, vol. PAS - 104, No.2, 1985, pp.489 - 496
- [92] Taku Ncda et al; *Charge-voltage curses of surge corona on transmission lines: two measurement methods*; IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, No.1, January 2003, pp.307-314
- [93] Villas J. E., Partela C. M.; *Calculation of electric field and potential distribution into soil and air mediu for a grennd electrode of a HUDC System*; IEEE Transactions on Power Delivery, vol.18, No.3, July 2003, pp.867-873
- [94] Timotin Al., Hortopan V.; *Lecții de Bazele electrotehnicii*; E.D.P., București, 1962