

**Universitatea POLITEHNICA din Timișoara**  
**Facultatea de Electrotehnică**

---

---

# **Teză de doctorat**

*Ing. Flaviu Mihai FRIGURĂ - ILIASA*

---

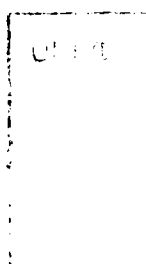
---

*Contribuții la studiul ameliorării performanțelor energetice  
ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor  
care utilizează varistoare pe bază de ZnO*

---

---

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA



**Conducător științific:**

*Prof. dr. ing. Alexandru VASILIEVICI*

## **Cuvânt înainte**

*Această teză este consecința directă a unor preocupări comune, existente în cadrul colectivului de Aparate și Echipamente Electrice al Catedrei de Electroenergetică a Facultății de Electrotehnică din Timișoara precum și în cadrul Laboratorului "Génie Electrique" al Universității PAUL SABATIER din Toulouse. Este o continuare a studiilor privind echipamentele de protecție contra supratensiunilor efectuate de către mine încă din perioada studenției.*

*Îmi exprim întreaga grațitudine domnului prof. dr. ing. Alexandru VASILIEVICI, pentru sprijinul și coordonarea științifică acordate pe întreaga durată a elaborării tezei. Domnia sa a avut o contribuție determinantă în conturarea direcțiilor de studiu și de cercetare ale tezei.*

*Mulțumirile mele se îndreaptă în egală măsură și către domnul prof. dr. ing. Bui AI, de la Universitatea PAUL SABATIER din Toulouse, pentru disponibilitatea și amabilitatea cu care am fost primit în cadrul Laboratorului "Génie Electrique", precum și pentru sugestiile utile pe care mi le-a oferit în toți acești ani.*

*Cu mult respect și considerație, gândurile mele se îndreaptă către colectivul Catedrei de Electroenergetică, în mijlocul căreia am găsit un mediu propice studiului și cercetării, un colectiv minunat din care sunt mândru că fac și eu parte. Domnului prof. dr. ing. Flavius Dan ȘURIANU și domnului Conf. dr. ing. Doru VĂTĂU le mulțumesc pentru colaborarea excelentă avută în toți acești ani, atât în scopul implementării în practică a rezultatelor cercetării, cât și în scopul diversificării domeniului de cercetare. Mulțumesc pe această cale și conducerii S.C. PROTENERGO S.A. din Timișoara pentru încrederea acordată.*

*Doresc să mulțumesc și cercetătorilor de la Laboratorul "Génie Electrique" din Toulouse pentru ajutorul constant pe care mi l-au furnizat în permanență. Aș vrea să evidențiez contribuția decisivă a domnului inginer André LOUBIERE. Nu pot omite sprijinul amical acordat și de către domnul Vincent BLEY.*

*Nu în ultimul rând aș dori să mulțumesc familiei mele, colegilor și prietenilor care au stat alături de mine în toți acești ani.*

*Chiar dacă nu am amintit pe toți cei care au contribuit direct sau indirect la realizarea acestei teze, mulțumirile mele se îndreaptă și înspre ei.*

**TIMIȘOARA,  
Octombrie 2001**

**Flaviu Mihai FRIGURĂ-ILIASA**

# Cuprins

## Cuvânt înainte

|                      |  |    |
|----------------------|--|----|
| <b>Capitolul I</b>   | <b>Introducere</b> .....   | 1  |
| 1.1.                 | Obiectul și actualitatea temei.....  | 1  |
| 1.2.                 | Obiectivele și structura tezei.....  | 2  |
| 1.3.                 | Realizarea și oportunitatea tezei.....   | 4  |
| <b>Capitolul II</b>  | <b>Supratensiunile care apar în rețelele electrice și echipamentele moderne de protecție împotriva acestora</b> .....    | 6  |
| II.1.                | Supratensiunile care apar în rețelele electrice. Clasificare.....  | 7  |
| II.2.                | Tipuri de impulsuri standardizate utilizate pentru încercări.....  | 10 |
| II.3.                | Prezentare generală a sistemelor de protecție contra supratensiunilor.....   | 13 |
| II.4.                | Avantaje ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor bazate pe varistoare cu ZnO.....                        | 15 |
| II.5.                | Echipamente de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO pentru aplicații la joasă tensiune.....    | 18 |
| II.6.                | Definirea mărimilor specifice varistoarelor cu oxizi metalici și echipamentelor bazate pe astfel de varistoare.....      | 24 |
| II.7.                | Concluzii.....   | 27 |
| II.8.                | Contribuții personale și originale.....  | 27 |
| <b>Capitolul III</b> | <b>Varistorul pe bază de ZnO ca element principal al echipamentelor de protecție contra supratensiunilor</b> .....       | 28 |
| III.1.               | Caracteristica statică curent – tensiune pentru un varistor pe bază de ZnO.....  | 28 |
| III.2.               | Tehnologia de fabricație a varistoarelor pe bază de ZnO și influența tehnologiei folosite asupra calității acestora..... | 31 |
| III.2.1.             | Operațiile procesului de fabricație.....   | 31 |
| III.2.2.             | Microstructura și proprietățile fizice ale varistoarelor pe bază de ZnO.....   | 34 |
| III.2.3.             | Influența tehnologiei de fabricație și a diverșilor componenți asupra parametrilor varistoarelor.....                    | 36 |
| III.3.               | Uzura varistoarelor pe bază de ZnO în exploatare.....  | 39 |
| III.3.1.             | Degradarea.....  | 40 |
| III.3.2.             | Mecanismele degradării.....  | 41 |
| III.3.3.             | Distrugerea.....   | 42 |
| III.4.               | Concluzii.....   | 43 |
| III.5.               | Contribuții personale și originale.....  | 44 |
| <b>Capitolul IV</b>  | <b>Solicitările termice ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO</b> .....   | 45 |
| IV.1.                | Dezvoltarea căldurii în căile de curent prin efect electrocaloric.....   | 47 |
| IV.2.                | Transmisia termică în echipamentele electrice.....   | 49 |
| IV.2.1.              | Transmisia termică prin conducție.....   | 49 |
| IV.2.2.              | Transmisia termică prin radiație.....  | 53 |
| IV.2.3.              | Transmisia termică prin convecție.....   | 54 |
| IV.2.4.              | Transmisia termică combinată.....  | 56 |
| IV.3.                | Ecuția generală a bilanțului termic.....   | 57 |
| IV.3.1.              | Calculul încălzirii varistoarelor omogene, de secțiune constantă, în ipotezele teoriei clasice (ITC).....                | 61 |
| IV.3.2.              | Calculul răcirii varistoarelor omogene, de secțiune constantă, în ipotezele teoriei clasice.....                         | 63 |
| IV.4.                | Concluzii.....   | 64 |
| IV.5.                | Contribuții personale.....   | 64 |

|                       |  |     |
|-----------------------|--|-----|
| <b>Capitolul V</b>    | <b>Modelarea transferului termic prin metoda elementelor finite</b> .....  | 65  |
| V.1.                  | Probleme specifice modelării unui proces termic.....   | 66  |
| V.2.                  | Structura modelului numeric cu elemente finite.....  | 69  |
| V.3.                  | Deducerea ecuațiilor elementare.....   | 71  |
| V.4.                  | Analiza câmpurilor termice conductive, neliniare, folosind un model unidimensional.....  | 73  |
| V.5.                  | Analiza câmpurilor termice conductive liniare folosind modele bi și tridimensionale.....   | 77  |
| V.6.                  | Concluzii.....   | 81  |
| V.7.                  | Contribuții personale.....   | 82  |
| <b>Capitolul VI</b>   | <b>Metodă globală de analiză a stabilității termice a echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO</b> ..... | 83  |
| VI.1.                 | Definirea noțiunii de ambalare termică.....  | 83  |
| VI.2.                 | Analiza experimentală a fenomenului de ambalare termică.....   | 86  |
| VI.3.                 | Metoda globală de analiză a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO.....   | 93  |
| VI.4.                 | Soluții tehnice pentru creșterea stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO.....  | 97  |
| VI.5.                 | Concluzii.....   | 101 |
| VI.6.                 | Contribuții personale și originale.....  | 101 |
| <b>Capitolul VII</b>  | <b>Modelarea numerică a transferului termic prin metoda elementelor finite, utilizând pachetul CAD FLUX 2D</b> .....                             | 102 |
| VII.1.                | Algoritmul de utilizare a <b>FLUX 2D</b> .....   | 103 |
| VII.2.                | Aspecte legate de geometria pieselor utilizate.....  | 104 |
|                       | VII.2.1. Configurația <b>A</b> .....   | 105 |
|                       | VII.2.2. Configurația <b>B</b> .....   | 106 |
|                       | VII.2.3. Configurația <b>C</b> .....   | 107 |
|                       | VII.2.4. Configurația <b>D</b> .....   | 109 |
|                       | VII.2.5. Configurația <b>E</b> .....   | 110 |
|                       | VII.2.6. Configurația <b>M</b> .....   | 111 |
|                       | VII.2.7. Configurația <b>N</b> .....   | 112 |
|                       | VII.2.8. Configurația <b>P</b> .....   | 113 |
| VII.3.                | Baza de date cu proprietățile materialelor utilizate.....  | 115 |
|                       | VII.3.1. Materialul varistor.....  | 115 |
|                       | VII.3.2. Rășina epoxidică.....   | 117 |
|                       | VII.3.3. Alama.....  | 118 |
| VII.4.                | Descrierea și rezolvarea problemei fizice analizate.....   | 121 |
| VII.5.                | Concluzii.....   | 123 |
| VII.6.                | Contribuții personale și originale.....  | 123 |
| <b>Capitolul VIII</b> | <b>Montarea în paralel a varistoarelor cuplate termic prin conducție</b> .....   | 124 |
| VIII.1.               | Prezentarea varistoarelor utilizate.....   | 124 |
| VIII.2.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent.....   | 127 |
|                       | VIII.2.1. Analiza regimului de serviciu permanent pentru un varistor singur.....   | 128 |
|                       | VIII.2.2. Analiza regimului de serviciu permanent al varistoarelor montate în paralel și cuplate termic.....                                     | 131 |
| VIII.3.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls.....   | 133 |
|                       | VIII.3.1. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls, pentru un varistor singur.....  | 135 |
|                       | VIII.3.2. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls, pentru varistoarele montate în paralel și cuplate termic.....             | 137 |
| VIII.4.               | Concluzii.....   | 139 |
| VIII.5.               | Contribuții personale și originale.....  | 139 |



|                     |   |            |
|---------------------|---|------------|
| <b>Capitolul IX</b> | <b>Analiza comparativă a stabilității termice în regim de serviciu permanent, pentru soluțiile tehnice propuse.....</b> | <b>140</b> |
| IX.1.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația <b>A</b> .....                          | 141        |
| IX.2.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația <b>B</b> .....                          | 143        |
| IX.3.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația <b>C</b> .....                          | 145        |
| IX.4.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația <b>D</b> .....                          | 147        |
| IX.5.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația <b>E</b> .....                          | 149        |
| IX.6.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația <b>M</b> .....                          | 151        |
| IX.7.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația <b>N</b> .....                          | 153        |
| IX.8.               | Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația <b>P</b> .....                          | 155        |
| IX.9.               | Concluzii.....  | 157        |
| IX.10.              | Contribuții personale și originale.....   | 157        |
| <br>                |   |            |
| <b>Capitolul X</b>  | <b>Analiza comparativă a stabilității termice în regim de serviciu de impuls, pentru soluțiile tehnice propuse.....</b> | <b>158</b> |
| X.1.                | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația <b>A</b> .....                          | 159        |
| X.2.                | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația <b>B</b> .....                          | 162        |
| X.3.                | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația <b>C</b> .....                          | 165        |
| X.4.                | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația <b>D</b> .....                          | 168        |
| X.5.                | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația <b>E</b> .....                          | 171        |
| X.6.                | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația <b>M</b> .....                          | 174        |
| X.7.                | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația <b>N</b> .....                          | 177        |
| X.8.                | Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația <b>P</b> .....                          | 180        |
| X.9.                | Concluzii.....  | 183        |
| X.10.               | Contribuții personale și originale.....   | 183        |
| <br>                |   |            |
| <b>Capitolul XI</b> | <b>Concluzii și perspective.....</b>  | <b>184</b> |
| XI.1.               | Rezultatele cercetării.....   | 184        |
| XI.2.               | Concluziile principale.....   | 185        |
| XI.3.               | Contribuțiile personale și originale.....   | 186        |
| XI.4.               | Perspective ale continuării studiului.....  | 188        |

### **Referințe bibliografice**

### **Anexe**



## CAPITOLUL I

### Introducere

#### I.1. Obiectul și actualitatea temei

Extinderea rețelelor de distribuție la joasă tensiune, atât la noi în țară, cât și în străinătate, precum și a rețelelor electrice de telecomunicații, a condus la apariția unor mijloace eficiente de protecție împotriva supratensiunilor care pot apărea în aceste rețele.

În plus, asistăm la o creștere accentuată a numărului consumatorilor electrici extrem de sensibili la modificările tensiunii de alimentare în general (ca frecvență, amplitudine, formă etc.). Dintre acești consumatori amintim: tehnica de calcul, aparatura electronică de măsură, de control, electronica de putere, aparatura video, audio, consumatorii electrocasnici, unii consumatori industriali. Supratensiunile pot avea chiar efecte distrugătoare asupra acestor consumatori având în construcția lor materiale cu rigiditate dielectrică foarte redusă. Prețul de cost ridicat al acestor consumatori justifică necesitatea unor sisteme performante de protecție contra supratensiunilor.

În ultimii ani s-au intensificat și studiile privind compatibilitatea electromagnetică și asigurarea calității energiei, în primul rând ca o consecință directă a preocupărilor furnizorilor de energie electrică privind calitatea serviciilor prestate. Se remarcă și interesul crescut al producătorilor de aparatură electronică în general (și nu numai) privind posibilitatea integrării unor module de protecție contra supratensiunilor chiar în construcția produselor care urmează a fi protejate.

Pe lângă eforturile depuse atât de către producătorii de electricitate cât și de către producătorii de aparatură electronică și electrotehnică, trebuie evidențiată și apariția unei noi categorii de sisteme de protecție contra supratensiunilor, care vizează în mod direct consumatorul de electricitate și utilizatorul de aparatură electronică. Aceste sisteme de protecție sunt destinate a funcționa în instalațiile de distribuție la joasă tensiune din clădiri. Rolul lor este de a completa protecțiile contra supratensiunilor existente în rețeaua de alimentare sau în interiorul consumatorilor. Prin interpunerea lor între rețea și consumator se realizează o coordonare și o selectivitate a protecțiilor (ele fiind montate în zona tablourilor de distribuție, a prizelor).

În paralel, pe plan mondial și european au apărut și standarde referitoare la selectivitatea protecțiilor la supratensiune precum și la construcția și performanțele echipamentelor de protecție. Pentru moment, în România nu există un standard privind protecția rețelelor electrice de joasă tensiune împotriva supratensiunilor. De asemenea nu există standarde privind proiectarea, construcția, încercările și performanțele echipamentelor de protecție contra supratensiunilor destinate a funcționa la joasă tensiune sau în rețele de telecomunicații. În perspectiva aderării României la Uniunea Europeană, într-un viitor relativ apropiat, o mare parte din standardele europene privind protecția contra supratensiunilor vor fi adoptate și la noi în țară, sub sigla SR EN. De aceea în această lucrare se vor face referiri mai ales la standardele europene (franceze și germane), alături de standardele internaționale CEI (IEC).

Numeroși fabricanți de aparate electronice din România au adoptat, în mod voluntar, un număr mare de standarde europene, în primul rând pentru a putea justifica aplicarea siglei "CE", sau certificarea tip ISO 9000, fără a asimila în programul lor de producție și echipamente moderne de protecție contra supratensiunilor. Deși există o cerere potențială imensă de astfel de echipamente de protecție contra supratensiunilor (care ar trebui introduse în fiecare tablou de distribuție la joasă tensiune, în prizele care alimentează consumatori sensibili etc.) piața românească din domeniu este practic inexistentă, fapt datorat în primul rând unei slabe informări a consumatorului privind riscurile existente (de multe ori se consideră că o protecție la supracurent de tip siguranță fuzibilă



este suficientă). Lipsa unui standard care să impună prezența unor astfel de protecții la joasă tensiune este o altă cauză a inexistenței echipamentelor de protecție contra supratensiunilor. În prima parte a lucrării de față se va face o analiză critică a standardelor și soluțiilor tehnice existente.

Echipamentele de protecție contra supratensiunilor care utilizează varistoare pe bază de ZnO au fost concepute inițial pentru aplicații la medie și înaltă tensiune. Ele au fost realizate și pentru domeniul de joasă tensiune începând cu anii '80. Astăzi ele reprezintă soluția tehnică cea mai utilizată pentru realizarea unor protecții eficiente contra supratensiunilor.

Principala problemă care apare în exploatarea acestora este asigurarea stabilității termice. Prin aceasta se dorește menținerea echipamentului în stare optimă de funcționare, un timp cât mai îndelungat, știut fiind că, în cazul varistoarelor pe bază de ZnO, curentul electric care se stabilește prin dispozitiv este puternic influențat de temperatură.

Ameliorarea performanțelor energetice ale acestor echipamente, sub aspectul creșterii capacității de absorbție în energie în regim de serviciu de impuls și a reducerii temperaturii atinse de părțile parcurse de curent în regim de serviciu permanent, constituie o preocupare constantă a producătorilor de varistoare, dar și de echipamente de protecție care înglobează aceste varistoare.

Această lucrare își propune să ofere unele soluții tehnice privind creșterea stabilității termice a întregului ansamblu, din perspectiva proiectării și realizării unor echipamente de protecție care înglobează varistoare pe bază de ZnO. Soluțiile care vizează varistorul propriu-zis țin de domeniul chimiei și fizicii materialelor și nu fac obiectul acestui studiu.

Domeniul de utilizare al varistoarelor pe bază de ZnO este extrem de vast, fiind înglobate în construcția unor echipamente de protecție contra supratensiunilor destinate a funcționa la orice nivel de tensiune, atât în curent continuu cât și alternativ. Aplicațiile care fac apel la aceste echipamente de protecție sunt extrem de numeroase, de la rețelele de transport și distribuție a energiei electrice, la rețelele de transport urban, feroviar, de telecomunicații civile și militare. În ultimul timp se fac cercetări privind utilizarea varistoarelor pe bază de ZnO pentru protecția contra supratensiunilor a dispozitivelor electronice de putere. Concluziile emise în această teză sunt valabile pentru toată gama de varistoare existente, indiferent de domeniul de aplicație și de tensiunea lor nominală.

Așa cum am evidențiat, varistoarele pe bază de ZnO și echipamentele care le integrează sunt un domeniu de foarte mare actualitate, atât în România, cât și pe plan mondial. Studiul stabilității termice a acestei categorii de echipamente de protecție constituie de asemenea o temă de mare actualitate.

## 1.2. Obiectivele și structura tezei

Obiectivul principal, urmărit în cadrul tezei, este studiul ameliorării comportamentului termic al echipamentelor de protecție contra supratensiunilor care utilizează varistoare pe bază de ZnO, în scopul obținerii unor soluții tehnice care pot fi utilizate în practică, în vederea unei mai bune funcționări a acestor echipamente.

Se are în vedere creșterea stabilității termice a varistoarelor și a întregului ansamblu în care sunt înglobate.

Prin aplicarea acestor soluții tehnice se mărește fiabilitatea echipamentelor de protecție, crește durata lor de viață și siguranța în exploatare și nu în ultimul rând se obține și o îmbunătățire a performanțelor lor.

Soluțiile tehnice propuse și analizate în această teză, prin simplitatea lor, asigură, în situația aplicării lor în practică, o rentabilitate economică garantată.

Întrebarea centrală, la care se încearcă a se găsi un răspuns în paginile acestei teze este: "Ce trebuie făcut pentru a reduce încălzirea varistoarelor, indiferent de regimul lor de exploatare?"

Întregul demers teoretic și aplicativ este realizat prin perspectiva fabricantului și utilizatorului de echipamente electrice de protecție contra supratensiunilor care utilizează varistoare pe bază de ZnO și nu din perspectiva fabricantului de varistoare.

S-a încercat a se evita o separare structurală între conținutul teoretic și cel aplicativ, în scopul de a evidenția legătura strânsă dintre cele două.



Problematika abordată, atât prin aspectele teoretice cât și prin cele aplicative, este subordonată următoarelor obiective majore:

- identificarea tipurilor de supratensiuni care pot apărea în rețelele electrice, a cauzelor și măsurilor de protecție;
- realizarea unei sinteze bibliografice actualizate privind domeniul echipamentelor de protecție contra supratensiunilor, mai ales pentru aplicațiile la joasă tensiune precum și a standardelor internaționale în domeniu;
- prezentarea unor aspecte privind influența tehnologiei de fabricație a varistoarelor asupra calității și performanțelor acestora, în scopul evidențierii limitelor tehnologice;
- analiza solicitărilor termice la care sunt supuse aceste echipamente, în baza ipotezelor teoriei clasice;
- expunerea instrumentului matematic pe care se bazează modelarea transferului termic prin metoda elementelor finite;
- evidențierea algoritmului utilizat în modelarea transferului termic prin metoda elementelor finite, utilizând programul **CAD FLUX 2D**;
- dezvoltarea metodei globale de analiză a stabilității termice și explicarea conceptului de stabilitate termică;
- determinarea tensiunii limită de funcționare a unui varistor în funcție de temperatura mediului ambiant și definirea fenomenului de ambalare termică, indiferent de regimul de funcționare;
- propunerea unor soluții tehnice în vederea ameliorării performanțelor energetice ale varistoarelor pe bază de ZnO;
- modelarea transferului termic, utilizând **FLUX 2D**, pentru fiecare soluție tehnică propusă, în regim de serviciu permanent și în regim de serviciu de impuls;
- efectuarea unor măsurători experimentale, pentru fiecare soluție tehnică propusă, în fiecare regim de funcționare;
- compararea măsurătorilor experimentale cu rezultatele modelărilor numerice și cele ale calculului estimativ, în scopul analizei critice a fiecărei soluții, a verificării parametrilor de material utilizați (ca valoare și lege de variație) și a verificării condițiilor inițiale și la limită.

În structurarea lucrării s-a urmărit expunerea clară a fiecărei probleme, înșiruirea logică și nu în ultimul rând trecerea gradată de la simplu la complex, respectiv divergența și convergența ideilor.

Lucrarea este structurată pe 11 capitole (incluzând Introducerea și Concluziile), la care se adaugă un scurt "Cuvânt înainte", Referințele bibliografice (în număr de 102), precum și 4 Anexe principale.

În prezentarea lucrării s-a optat pentru varianta precizării semnificației simbolurilor la prima utilizare a acestora sau ori de câte ori s-a crezut necesar, astfel încât nu se mai prezintă o listă separată pentru simbolurile utilizate.

În prima parte a Capitolului II se expun principalele tipuri de supratensiuni, clasificările acestora după diverse criterii, cauzele producerii acestora. Sunt evidențiate și principalele forme de undă standardizate utilizate în încercări, pentru simularea supratensiunilor, așa cum rezultă ele din standardele internaționale și naționale. În cea de-a doua parte a acestui capitol sunt prezentate echipamentele de protecție contra supratensiunilor utilizate în aplicații la joasă tensiune, avantajele echipamentelor cu varistoare pe bază de ZnO precum și mărimile specifice acestora.

Capitolul III se referă la varistoarele pe bază de ZnO, ca elemente principale ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor. Sunt prezentate caracteristicile statice curent - tensiune pentru un varistor pe bază de ZnO, tehnologia de fabricație precum și influența tehnologiei de fabricație asupra performanțelor electrice și termice ale varistorului. O atenție aparte, în cadrul acestui capitol, este acordată degradării varistoarelor pe bază de ZnO și a mecanismelor care explică acest fenomen, în corelație directă cu obiectivele tezei.

Solicitările termice ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO sunt detaliate în Capitolul IV, așa cum rezultă din abordarea teoretică. Se definesc





principalele modalități de transmisie termică (conducție, convecție și radiație). Se acordă o mare atenție ecuației generale a transferului termic, ca un punct de referință în abordarea stabilității termice.

Modelarea transferului termic în situația varistoarelor pe bază de ZnO, prin metoda elementelor finite constituie subiectul Capitolului V. În cadrul acestui capitol sunt expuse problemele specifice modelării unui proces termic, structura modelului numeric cu elemente finite, deducerea ecuațiilor elementare precum și analiza câmpurilor termice conductive liniare și neliniare, folosind modele unidimensionale, bidimensionale și tridimensionale.

În Capitolul VI este expusă metoda globală de analiză a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO. În prealabil se definește noțiunea de stabilitate termică și se prezintă în acest sens unele rezultate experimentale, care vizează determinarea tensiunii limită de funcționare în regim permanent pentru o anumită valoare a temperaturii ambiante. Sunt enumerate și soluțiile tehnice propuse în vederea creșterii stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO, deduse prin metoda globală de analiză a stabilității termice.

Capitolul VII este rezervat modelării transferului termic, în situația varistoarelor pe bază de ZnO, utilizând programul **FLUX 2D**. Sunt prezentați algoritmi de bază ai programului, valorile și legile de variație ale parametrilor de material precum și caracteristicile geometrice ale tuturor celor 8 configurații propuse, dintre care 6 sunt prevăzute cu mase adiționale din alamă. Se insistă și asupra modului în care trebuie formulate problemele fizice în scopul modelării cu **FLUX 2D**.

Una dintre soluțiile tehnice propuse anterior, anume montarea în paralel a varistoarelor cuplate termic, este analizată în Capitolul VIII. La începutul capitolului sunt evidențiate configurațiile analizate. Comportamentul termic al fiecărei configurații propuse este analizat critic, atât în regim de serviciu permanent, cât și în regim de serviciu de impuls. Analiza este însoțită și de concluzii privind avantajele și dezavantajele soluțiilor propuse.

În Capitolul IX este realizată analiza stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO în regim de serviciu permanent. Sunt prezentate comparativ rezultatele modelărilor numerice privind încălzirea varistoarelor în regim de serviciu permanent precum și rezultatele măsurătorilor experimentale efectuate. Capitolul se încheie cu o serie de concluzii privind comportamentul fiecăreia dintre configurațiile propuse.

Capitolul X analizează comportamentul termic al fiecăreia dintre configurațiile studiate în Capitolul IX, dar în regim de serviciu de impuls. Sunt prezentate de asemenea rezultatele modelărilor numerice, însoțite și de rezultate ale măsurătorilor experimentale. Sunt expuse și concluzii privind comportamentul termic al fiecăreia dintre configurațiile avute în vedere.

Fiecare capitol se încheie cu un subcapitol destinat concluziilor specifice precum și cu un subcapitol care evidențiază contribuțiile personale și, după caz originale, ale autorului.

Capitolul XI sintetizează concluziile specifice fiecărui capitol anterior și evidențiază contribuțiile personale sau originale ale autorului.

### I.3. Realizarea și oportunitatea tezei

Această teză este o continuare a cercetărilor începute de către autor încă din perioada studenției, privind proiectarea echipamentelor de protecție contra supratensiunilor care utilizează varistoare pe bază de ZnO și ameliorarea stabilității termice a acestora.

Ea reflectă unele preocupări actuale ale colectivului disciplinei de Aparare și Echipamente electrice din cadrul Catedrei de Electroenergetică a Facultății de Electrotehnică din Timișoara și anume studiul transferului termic în situația diverselor aparate și echipamente electrice precum și optimizarea proiectării unor echipamente moderne de protecție contra supratensiunilor.

De asemenea, concepția, proiectarea, realizarea și exploatarea unor echipamente de protecție contra supratensiunilor, pentru aplicații la joasă tensiune, care folosesc varistoare pe bază de ZnO, fac obiectul atenției unor fabricanți sau utilizatori de asemenea echipamente, dintre care amintim S.C. PROTENERGO S.A. din Timișoara, pentru care autorul a și realizat un modul de protecție contra supratensiunilor înglobat într-un bloc multipriză prelungitor.



Realizarea practică a acestei teze a fost posibilă în baza relațiilor de colaborare existente, în cadrul unor programe europene TEMPUS, COPERNICUS sau SOCRATES-ERASMUS, între Universitatea POLITEHNICA din Timișoara, reprezentată prin Catedra de Electroenergetică și Universitatea PAUL SABATIER din Toulouse, Franța, reprezentată de către Laboratorul "Génie Electrique". Măsurătorile experimentale prezentate în această teză sunt realizate aproape în întregime în cadrul stagiilor efectuate de către autor la Universitatea PAUL SABATIER din Toulouse în perioada 1998 – 2001. Aceste stagii au permis și o bună documentare bibliografică privind problematica varistoarelor pe bază de ZnO și a echipamentelor care le înglobează.



## CAPITOLUL II

### Supratensiunile care apar în rețelele electrice și echipamentele moderne de protecție împotriva acestora

Apariția echipamentelor de protecție contra supratensiunilor care utilizează rezistențe variabile bazate pe oxizi metalici este o consecință directă a preocupărilor care există la ora actuală în lume vizând îmbunătățirea calității și continuității serviciilor de alimentare cu energie electrică, creșterea siguranței în exploatare a rețelelor electrice, precum și satisfacerea cerințelor unor categorii speciale de utilizatori ai energiei electrice.

Orice aparat, echipament sau instalație electrică este proiectat să funcționeze la o tensiune nominală, ceea ce corespunde unui anumit nivel de izolație. În timpul funcționării, el este alimentat la o tensiune de serviciu, apropiată foarte mult de tensiunea nominală. Orice creștere a tensiunii de alimentare peste valoarea maximă a tensiunii de serviciu reprezintă o supratensiune.

Supratensiunile conduc la solicitări anormale ale izolațiilor tuturor componentelor rețelei electrice (izolatori ai rețelei, transformatoare, întreruptoare, separatoare, aparate de măsură și control, alte aparate și echipamente din stațiile electrice), iar în lipsa unor mijloace de protecție adecvate, pot ajunge chiar până la utilizatori, cu consecințe imprezvizibile asupra consumatorilor conectați la rețea, sau mai grav, asupra vieții sau sănătății operatorilor umani.

Dintre consecințele cele mai întâlnite ale supratensiunilor amintim:

- avarierea consumatorilor prin:
  - străpungere dielectrică;
  - conturnare;
  - supraîncălzire.
  - îmbătrânirea accentuată a echipamentelor;
- probleme în continuitatea și calitatea serviciului de alimentare cu energie electrică;
- incendii;
- electrocutări;

Aparatura video, audio, tehnica de calcul, aparatele electrocasnice sunt consumatorii cei mai frecvent afectați atât de supratensiuni, cât și de lipsa alimentării. Nici consumatorii industriali nu sunt feriți de apariția acestor defecțiuni, care conduc la avarii importante, întreruperile în alimentarea cu electricitate cauzate de supratensiuni producând și mari pierderi financiare.

Există două soluții pentru a înlătura efectele supratensiunilor:

- supradimensionarea izolațiilor (nejustificată economic sau nerealizabilă fizic);
- utilizarea unor dispozitive de protecție a consumatorilor și / sau a rețelei electrice.

Ca urmare un echipament (dispozitiv) de protecție contra supratensiunilor trebuie să răspundă următoarelor cerințe:

- ◆ să împiedice creșterea tensiunii la bornele consumatorului sau a aparatului electric protejat peste nivelul tensiunii de serviciu (să prevină distrugerea sau avarierea consumatorului);
- ◆ să elimine total riscul accidentării prin electrocutare a personalului uman, accidentare cauzată de creșterea anormală a potențialului electric al unor părți ale consumatorului;
- ◆ să asigure continuitatea alimentării în timpul și după apariția avariei; decuplarea consumatorului de la rețea pentru un anumit interval de timp nu satisface cerințele actuale ale utilizatorilor de energie electrică;





Toate rețelele electrice sunt expuse riscului apariției supratensiunilor, indiferent de nivelul de tensiune (joasă, medie, înaltă, foarte înaltă tensiune), de dimensiuni, de destinație (transport energie electrică, telecomunicații, de tracțiune electrică, etc.) sau de tipul lor (linii electrice aeriene sau subterane). Consumatorul de energie electrică nu trebuie să fie afectat de aceste supratensiuni.

Realizarea unor echipamente eficiente de protecție contra supratensiunilor reprezintă o preocupare constantă a specialiștilor care lucrează în domeniul rețelilor, aparatelor și echipamentelor electrice și nu numai.

## II.1. Supratensiunile care apar în rețelele electrice. Clasificare

Supratensiunile care apar în rețelele electrice sunt clasificate, în general, după originea și locul lor [61],[16] în:

- ◆ *supratensiuni interne* (care depind de rețea);
- ◆ *supratensiuni externe* (nu sunt cauzate de factori interni ai rețelei);

**Supratensiunile interne** sunt datorate în primul rând proceselor tranzitorii care apar la comutație, ca urmare a variației rapide a parametrilor rețelei.

Se clasifică în:

a). *supratensiuni temporare* cauzate de:

- ◆ avarii sau puneri la pământ ale liniei;
- ◆ deconectarea bruscă a unei sarcini;
- ◆ efectul FERRANTI (la funcționarea în gol a unei linii);
- ◆ alimentarea unei sarcini capacitive prin intermediul unei impedențe ridicate;
- ◆ ferorezonanță.

b). *supratensiuni de manevră* cauzate de:

- ◆ conectarea / deconectarea consumatorilor inductivi;
- ◆ conectarea / deconectarea consumatorilor capacitivi;
- ◆ conectarea / deconectarea liniilor în gol;
- ◆ deconectarea liniilor în scurtcircuit;
- ◆ supratensiuni de restabilire;

**Supratensiunile externe** sunt în general de origine atmosferică, în primul rând datorate unor lovituri de trăsnet aplicate rețelelor electrice.

Pot fi:

a). *directe* (descărcarea lovește direct linia);

b). *indirecte* (descărcarea lovește un suport sau un cablu de gardă și afectează linia prin cuplaj).

Referitor la durata de aplicare a supratensiunilor se poate prezenta următoarea clasificare diferită de cea anterioară [8],[9]:

- ◆ *supratensiuni de durată* (între 1 și 60 s și chiar mai mult);
- ◆ *supratensiuni temporare* (între 0,3 și 1 s);
- ◆ *supratensiuni interne* (între 10 și 4000  $\mu$ s);
- ◆ *supratensiuni atmosferice* (între 3 și 10  $\mu$ s).

Observăm că în cazul acestei clasificări noțiunea de "supratensiune internă" nu mai are aceeași semnificație ca și în cazul precedent, unde aceasta includea primele trei categorii.



Având în vedere criteriile relative la timpul de aplicare, forma de undă și mărimea supratensiunilor, clasificarea poate continua.

**Supratensiunile temporare** pot fi la rândul lor clasificate [8],[9],[10] în supratensiuni:

- puternic amortizate;
- dinamice (asimetrice);
- datorate conectării liniilor electrice cu transformatoare la capăt.

Aceste supratensiuni vehiculează energii importante, mai ales datorită timpului scurt de aplicare. Nu întotdeauna provoacă deschiderea sistemului de protecție.

**Supratensiunile interne** [8],[9],[10] pot fi clasificate în supratensiuni:

- de comutație;
- de rezonanță.

**Supratensiunile de durată** [8],[9], [10] se pot clasifica în:

- supratensiuni datorate exploatării liniilor la putere redusă;
- supratensiuni datorate tot unor procese de comutație;
- supratensiuni care apar ca urmare a unor puneri la pământ.

**Supratensiunile externe (atmosferice)**[8],[9].

Sunt cele mai violente solicitări ale rețelelor și echipamentelor electrice.

Sunt cauzate de loviturile directe sau indirecte de trăsnet.

În cazul loviturilor de trăsnet *directe*, descărcarea se face direct asupra rețelei electrice. Tensiunea unei astfel de descărcări poate atinge sute și mii de kV, iar curentul zeci sau chiar sute de kA. Durata de aplicare a unei asemenea supratensiuni este de ordinul microsecundelor, extrem de rar ajungând la milisecunde [8].

Mecanismul de producere al trăsnetelor și în general al tuturor descărcărilor electrice atmosferice este relativ bine cunoscut. În fiecare secundă, în lume au loc 2000-5000 de furtuni însoțite de descărcări electrice.

Într-un nor tip Cumulonimbus, care are o dezvoltare verticală de până la 10-15 km, apar sarcini electrice pozitive localizate spre vârf și negative spre bază. Descărcările electrice care apar sunt fie în interiorul norului (fulgere), fie între baza norului și pământ (trăznete). Practic există două tipuri de trăznete, cel electronegativ și cel electropozitiv. Trăsnetul electronegativ sau descendent (de la nor spre sol) este cel mai întâlnit (în proporție de 80%). Trăsnetul electropozitiv, când baza norului este încărcată pozitiv, ascendent (de la sol spre nor), nu apare decât în 20% din cazuri, mai ales în zone cu relief accidentat, sau muntoase. Energia disipată în acest caz este sensibil mai mare.

Majoritatea descărcărilor electrice pe liniile de înaltă tensiune cauzează unde de curent care se propagă în ambele sensuri, dar valoarea lor maximă în 97-98% din cazuri nu depășește 100 kA. Mai mult de jumătate dintre ele nu depășesc 38 kA. În România și în Uniunea Europeană, echipamentele de protecție a rețelelor electrice sunt testate pentru un impuls de curent de 65 kA ca valoare maximă. Statele Unite, Canada și Australia, țări cu un indice keraunic (număr anual de zile cu descărcări electrice atmosferice, în care se aude și zgomotul tunetului) mai mare, încercările se fac la 100 kA [39].

În cazul loviturilor indirecte de trăsnet, descărcarea are loc în apropierea liniei, în pământ, în cablul de gardă, paratrăsnet sau structura metalică de susținere. Rețeaua electrică este afectată prin cuplaj electromagnetic. Folosirea conductorului de gardă în rețelele de medie tensiune nu conduce la obținerea unei protecții corespunzătoare, datorită inducerii unor supratensiuni importante în conductorul aflat sub tensiune. În plus, datorită distanței mici între cele două cabluri, amândouă ar fi afectate în aceeași măsură [70].

În cazul rețelelor de medie tensiune, valoarea supratensiunilor atmosferice poate depăși de 10 ori tensiunea nominală a rețelei.



Nici rețelele electrice subterane nu sunt ferite de loviturile indirecte de trăsnet care pot induce tensiuni importante peste tensiunea nominală. Ele sunt expuse supratensiunilor și datorită creșterii potențialului electric al solului în urma unei descărcări electrice în vecinătate. Cercetările efectuate de către compania General Electric arată că aceste linii pot fi lovite chiar și direct de către trăsnet. Cercetări recente efectuate în Germania [71] demonstrează că, în cazul unei lovituri directe de trăsnet asupra unei clădiri, zona de risc maxim pentru producerea unor supratensiuni induse prin efect indirect, direct sau prin creșterea potențialului pământului, în mediu urban, are o rază de 1,5 km.

O altă categorie aparte de supratensiuni externe o constituie cele cauzate de Impulsul Electromagnetic Nuclear (IEMN) și cele produse de diverse arme electromagnetice. În urma exploziilor nucleare în spațiul atmosferic sau extraatmosferic se induc tensiuni tranzitorii extrem de violente, atât în rețelele electrice de putere cât și în rețelele de telecomunicații, ducând, în funcție de expunerea diferitelor categorii de consumatori, la distrugerea întregii infrastructuri și a tot ce înseamnă aparatură electrică și electronică pe suprafețe vaste (chiar continente întregi). Chiar dacă exploziile nucleare la suprafață și în spațiul extraatmosferic sunt actualmente interzise prin tratate internaționale, pericolul "terorismului electromagnetic" rămâne [75].

Mărimea supratensiunilor, indiferent de natura lor, este dată în unități relative (u. r.).

Aceasta se definește ca:  $1u.r. = \sqrt{2} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ , unde  $U_m$  este tensiunea nominală maximă între faze.

la funcționare în regim permanent [86].

Pe scurt, cele două clasificări de mai sus se pot reprezenta grafic astfel [16], [39], conform figurii II.1.

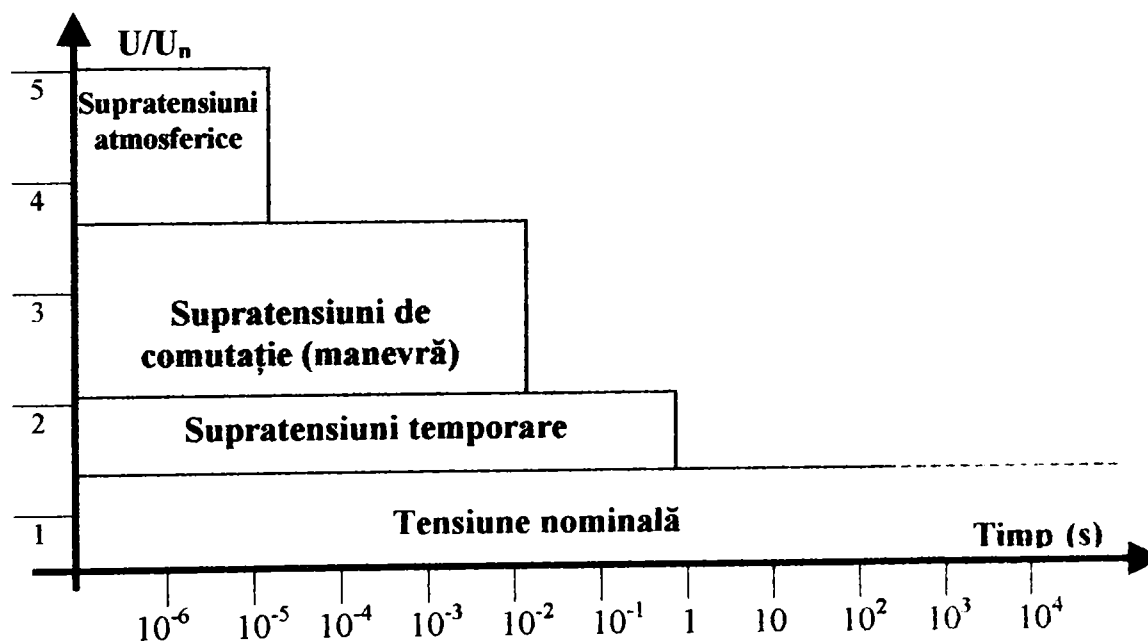


Figura II.1: Clasificarea supratensiunilor din rețelele electrice după ordinul de mărime și durata lor.

Practic, din punct de vedere al proiectantului de echipamente de protecție contra supratensiunilor și referindu-ne numai la criteriile amplitudine și durată de aplicare [86], [39], [40], [16] putem vorbi doar de aceste trei mari categorii de supratensiuni și anume:

- *supratensiuni de origine atmosferică* (amplitudine extrem de mare 5-10 u. r., durată redusă, de ordinul  $\mu$ s);
- *supratensiuni de comutație* (amplitudine mai mică de 3,5 u. r., dar durată mai mare, până la ordinul ms, cu undă tip 250 / 2500  $\mu$ s);
- *supratensiuni temporare* (amplitudine redusă la 1,7 u. r., dar durată de aplicare de ordinul secundelor).



Referitor la valoarea relativă a fiecărui tip de supratensiune despre care am vorbit anterior, în practică se utilizează diferiți coeficienți care se referă fie la valori efective de tensiune, fie la valori maxime, fie la altfel de combinații de mărimi. Prezentarea lor nu face obiectul acestei lucrări

## II.2. Tipuri de impulsuri standardizate utilizate pentru încercări

Pentru realizarea încercărilor echipamentelor electrice în regim de impuls, se utilizează forme de undă standardizate [84], [85], care se apropie de realitatea fizică a supratensiunilor din rețelele electrice.

Aceste impulsuri standardizate sunt:

- pentru tensiune: impulsul de tensiune 1.2/50  $\mu\text{s}$ ;
- pentru curent: impulsul de curent 8/20  $\mu\text{s}$ .

Cele două unde de impuls standardizate sunt prezentate în figura II.2.

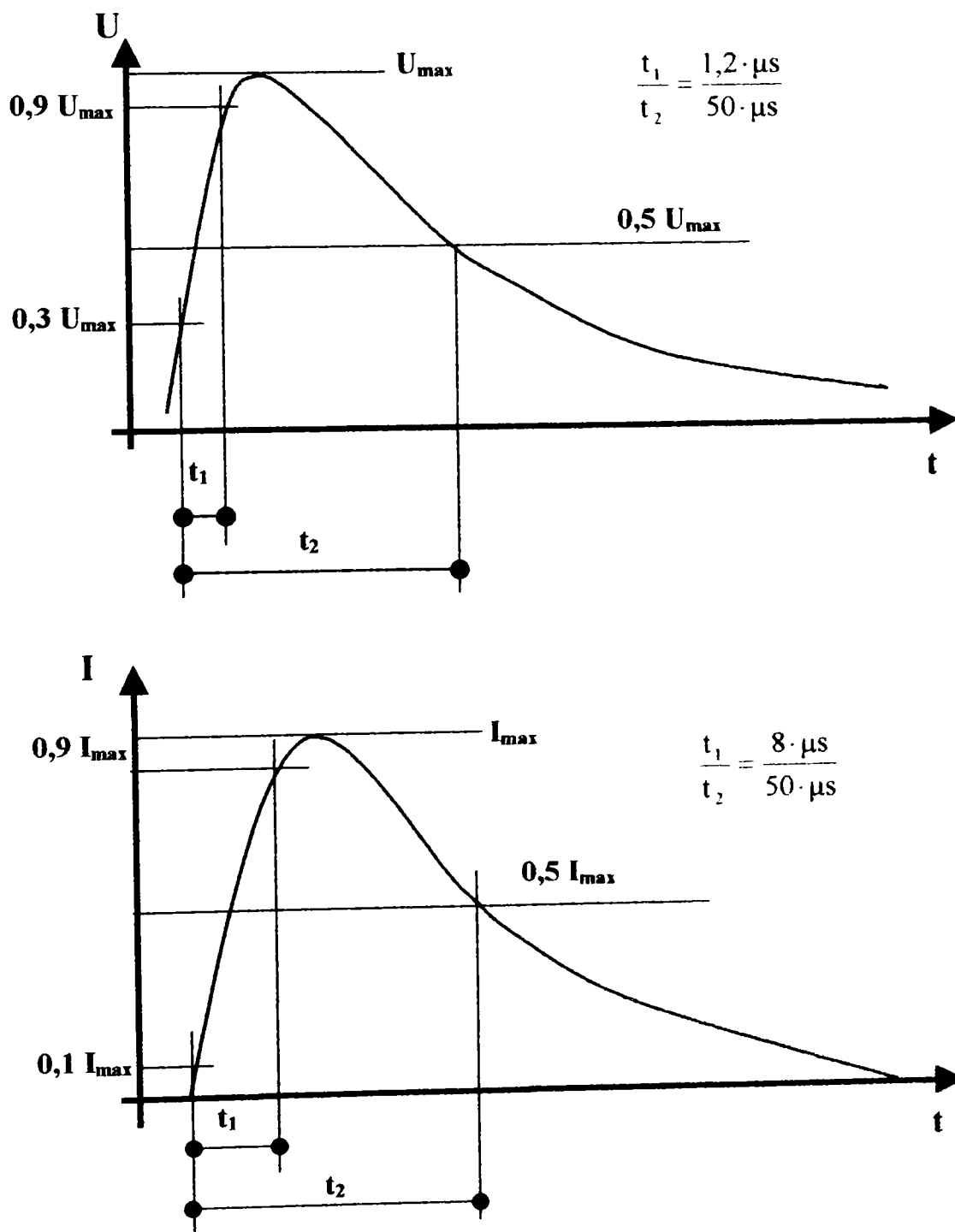


Figura II.2: Forme de undă standardizate.



Aceste forme de undă sunt utilizate în mod normal pentru încercările de rigiditate dielectrică a diverselor materiale sau echipamente și sunt preluate și de standardul CECC 42000 destinat încercărilor varistoarelor pe bază de ZnO [79], [72]. În urma acestor serii de încercări se obțin informații privind curentul maxim admisibil, tensiunea reziduală și caracteristica curent - tensiune, dar și informații privind degradarea și îmbătrânirea varistorului. Aceste probleme vor fi dezbătute ulterior.

Standardul CECC 42000 admite pentru impulsul de curent și o undă asemănătoare cu unda 8/20  $\mu$ s, dar având raportul 10/1000  $\mu$ s, pentru 100 de impulsuri în regim de un impuls la 2 minute, față de 100 impulsuri în regim de două pe minut în primul caz.

Ecuția unei biexponențiale de tensiune este (conform CEI 60-2):

$$u(t) = u_0 \cdot (e^{-\delta_1 t} - e^{-\delta_2 t}) \quad (2.1)$$

Unde:  $\delta_1 = 6,05 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ;  $\delta_2 = 1,43 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$  iar  $U_0$  este tensiunea nominală.

Supratensiunile sunt în general fenomene periodice în timp și în spațiu, unde care se propagă în lungul liniilor, din locul impactului până în stațiile electrice. Dacă nu există sisteme de protecție, aceste unde de supratensiune se pot propaga până la consumator, lucru care trebuie evitat. În principiu este vorba de oscilații amortizate, dar care pot produce pagube importante.

De cele mai multe ori, supratensiunile sunt fenomene tranzitorii, de natură oscilatorie și nu unidirecțională (de tip "front crescător"). În plus s-a constatat că unele instalații electrice, mai ales din sfera instalațiilor electronice de putere sau de telecomunicații, au un răspuns diferit, în funcție de unda de șoc care li se aplică (oscilantă sau unidirecțională).

Încă din anii '70, IEEE a propus spre normalizare [83], după examinarea a mai multor oscilograme ale unor supratensiuni oscilatorii, un nou tip de formă de undă, denumită 0,5  $\mu$ s - 100 kHz. Această formă de undă este prezentată în figura II.3.

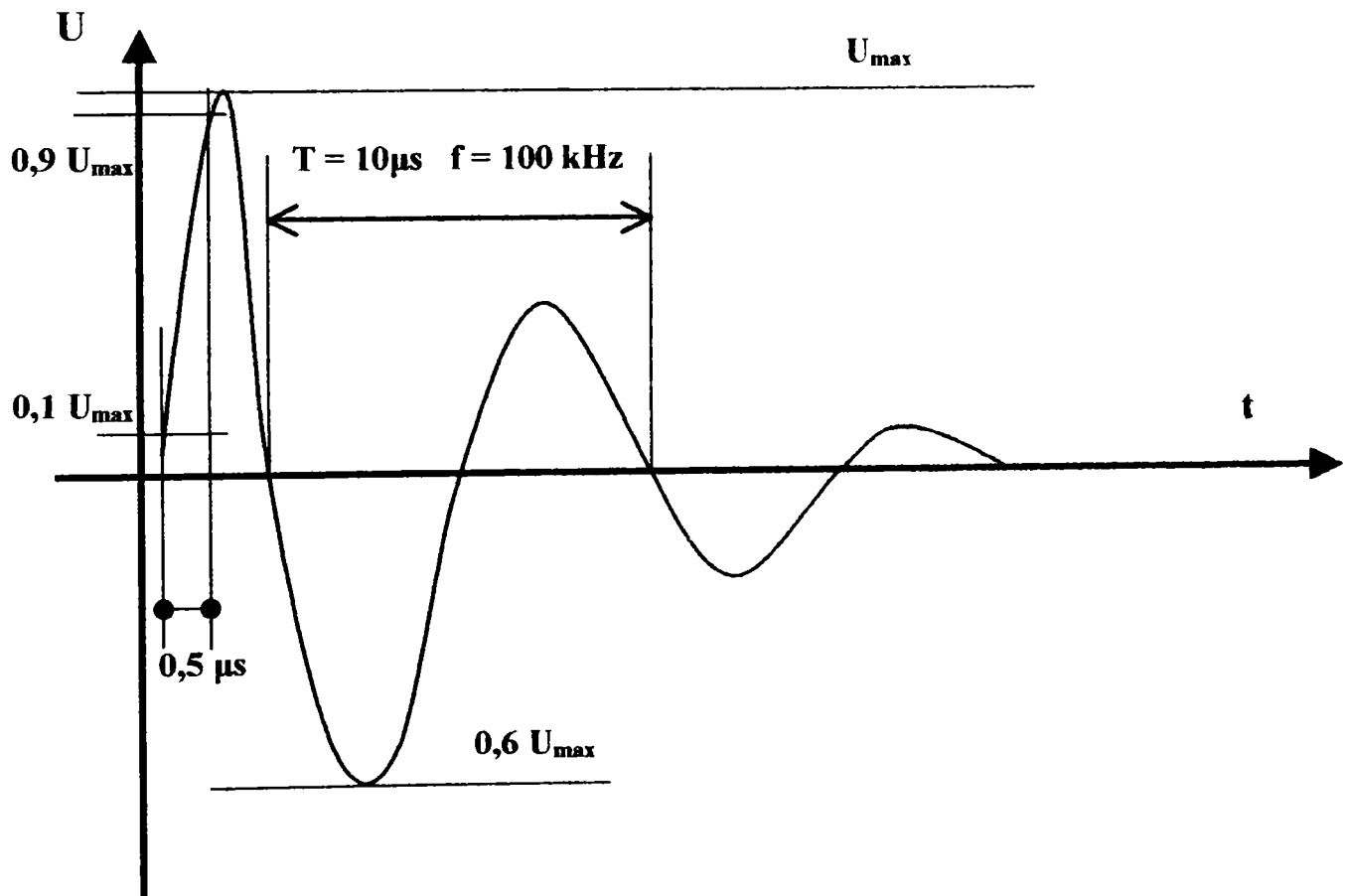


Figura II.3: Unda normalizată de tensiune 0,5  $\mu$ s - 100 kHz.

Această undă are un front foarte rapid de 0,5  $\mu$ s, urmat de o oscilație rapid amortizată, cu frecvența de 100 kHz. Aplicarea acestei forme de undă conduce la apariția unor solicitări dinamice destul de apropiate de realitate, mai ales în cazul unor circuite electrice interioare.





Este destul de dificil de produs, dar realizabilă cu ajutorul dispozitivelor semiconductoare de putere. Forma de undă a curentului produs de generatorul de șoc ține de particularitățile lui constructive. Curentul de încercare este în mod normal definit cantitativ prin valoarea lui de vârf.

Este un tip de solicitare care nu elimină încercările anterioare, ci este complementar lor.

Aceste unde prezentate până acum analizează situația unei supratensiuni violente de origine atmosferică.

Noile echipamente, bazate pe rezistențe neliniare, care asigură protecție și în cazul celorlalte tipuri de supratensiuni, cu durată mare de aplicare și aport energetic sporit, sunt testate și la un impuls rectangular de curent, măsurând tensiunea ce apare la bornele lor.

Conform normei CEI 60-2 (CEECC 42000) [85], acest impuls de curent este prezentat în figura II.4. Este utilizat pentru estimarea performanțelor energetice ale varistoarelor pe bază de ZnO.

Durata convențională a frontului este de maximum 0,1 ms. Valoarea de vârf se stabilește de către cel care efectuează încercările, după anumite criterii ce vor fi prezentate ulterior. Toleranța în jurul valorii de vârf este de +10%, respectiv -10%.

Durata aplicării acestei valori este de minimum 0,2 ms și de maximum 2 ms.

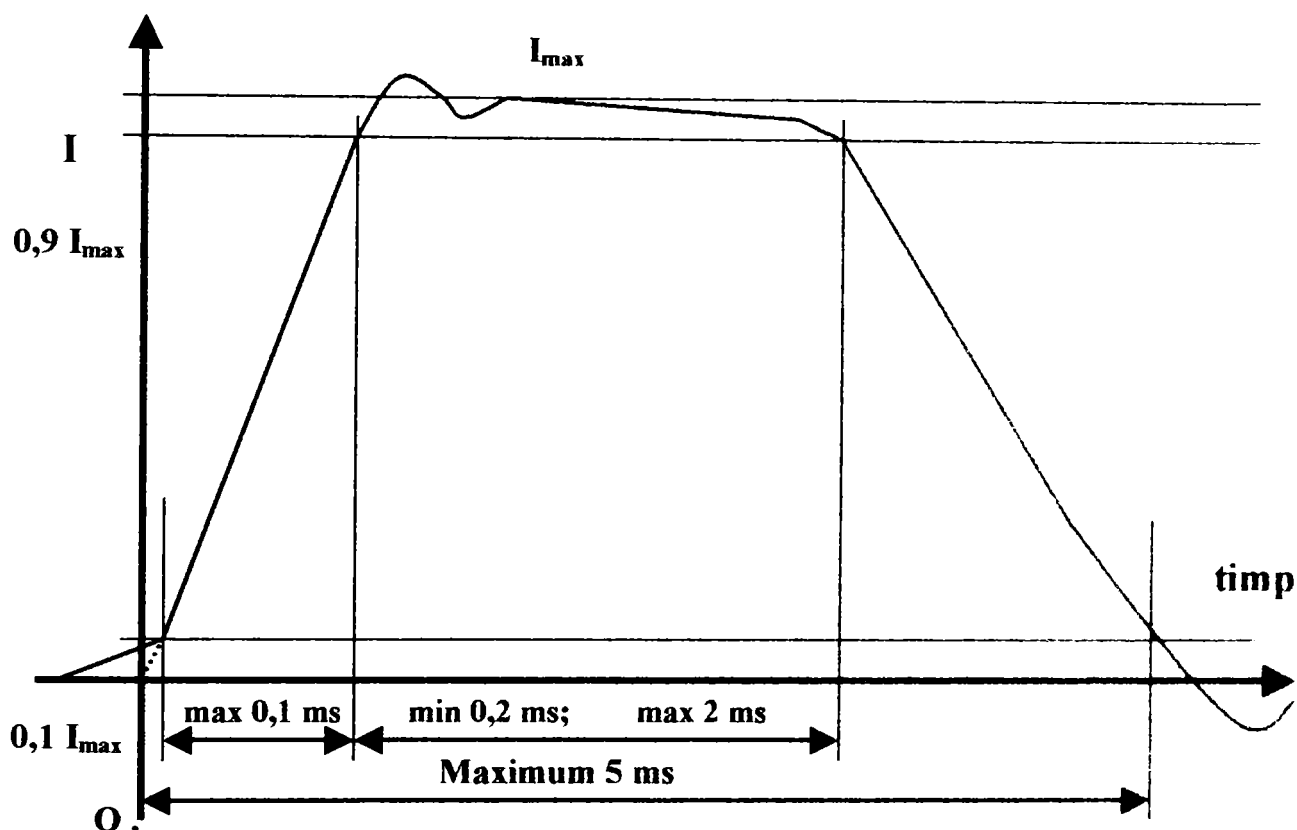


Figura II.4: Formă de undă de șoc în curent rectangulară.

Nu ne propunem aici să prezentăm toate tipurile de formă de undă sau toate solicitările folosite în practică pentru încercarea aparatelor și echipamentelor electrice, ci doar să prezentăm problemele legate de manifestările supratensiunilor, așa cum sunt ele luate în calcul de către specialiști. Aceste tipuri de unde corespund destul de bine situațiilor reale, fiind utilizate în încercările aparatelor electrice de protecție, fabricanții și utilizatorii de echipamente electrice dispunând de generatoare de șoc capabile să producă asemenea forme de undă.

Și în rețelele de telecomunicații, care au nivele de tensiune mult mai mici, pot apărea supratensiuni cauzate de [75]:

- contactul accidental cu linii electrice de putere;
- interferența prin inducție cu liniile electrice de putere;
- lovituri directe de trăsnet;
- lovituri indirecte de trăsnet;
- dispozitive semiconductoare care lucrează în comutație forțată



### II.3. Prezentare generală a sistemelor de protecție contra supratensiunilor

După cum am mai arătat, protecția contra supratensiunilor constă în instalarea de echipamente adecvate în scopul de a evita distrugerea izolației instalației protejate, de a evita întreruperile accidentale, de a limita riscul electrocutării datorate creșterii potențialului diverselor părți ale instalațiilor electrice, și de a evita riscul apariției de incendii ca urmare a amorsării unor arcuri electrice sau a supraîncălzirii.

Cronologic, pentru a asigura protecția rețelelor electrice s-au utilizat și se utilizează încă:

- paratrăznete;
- conductoare de gardă;
- punerea la pământ a neutrului rețelelor electrice printr-un rezistor;
- protecții serie (filtre LC, disjunctoare, fuzibile);
- protecții paralele (eclatoare și descărcătoare de toate tipurile).

**Paratrăznetul**, inventat de către Benjamin Franklin în secolul al 18-lea, este încă utilizat pentru protecția liniilor și stațiilor electrice contra loviturilor directe de trăznet. În principiu, un paratrăznet constă din captatorul loviturii, calea de punere la pământ și priza de pământ. Acest dispozitiv foarte simplu este încărcat prin inducție electrică la potențialul pământului, pozitiv în general (80 % din situații, după cum am mai spus). Datorită câmpului electric intens cauzat de raza mică a vârfului captatorului, se favorizează apariția descărcării electrice între nor și paratrăznet, orientând lovitura către pământ. Cele mai noi variante de paratrăznete au prevăzute elemente care grăbesc ionizarea aerului în apropierea captatorului [78]. Se utilizează paratrăznete verticale pentru protecția perimetrelor stațiilor electrice și paratrăznete orizontale plasate la extremitățile pilonilor liniilor electrice aeriene [61].

**Conductorul de gardă** protejează liniile electrice contra loviturilor directe de trăznet. Este un conductor suplimentar (sau mai multe), pasiv, plasat în paralel cu cele active, deasupra lor, legat la pământ prin intermediul pilonilor metalici de susținere a liniei. Fiind deasupra conductoarelor active, el va prelua lovitura directă și va asigura punerea ei la pământ.

Aceste căi preferențiale de punere la pământ a loviturii de trăznet atenuează acțiunea supratensiunilor atmosferice directe, dar nu le înlătură.

În plus, există pericolul inducerii prin cuplaj a unor lovituri indirecte de trăznet, cu consecințe la fel de grave. Nu asigură nici un fel de protecție contra celorlalte tipuri de supratensiuni.

**Legarea neutrului la pământ** se practică în condițiile rețelelor de joasă și înaltă / foarte înaltă tensiune. Nu se utilizează decât rar în cazul rețelelor de medie tensiune, care au neutrul izolat sau tratat printr-o inductanță. Acest lucru favorizează, în cazul apariției unor scurtcircuite, un curent de scurtcircuit mărit, ceea ce determină acționarea rapidă a protecțiilor maxime. Unda de supratensiune generează și ea un curent semnificativ, care va declanșa funcționarea protecțiilor. Energia trăznetului se descarcă pe rezistența de legătură a neutrului cu pământul.

Protecțiile prin relee, fie de curent, fie de tensiune, cauzează întreruperea furnizării de energie electrică, cel puțin pe durata unui ciclu de RAR, creând discontinuități în alimentare. Nici această soluție singură nu rezolvă problema.

**Protecțiile serie**, indiferent de tipul lor, realizează întreruperea furnizării de electricitate, fapt nedorit de către utilizator. În plus, permit apariția, chiar și pentru o perioadă scurtă de timp, a unei tensiuni ridicate la bornele utilizatorului.

O protecție eficientă a instalațiilor electroenergetice împotriva supratensiunilor se poate realiza numai prin utilizarea, pe lângă unele mijloace anterior prezentate, a **protecțiilor paralele**.

Protecția la supratensiuni este în majoritatea cazurilor o protecție de tip paralel, care se leagă în paralel cu instalația sau porțiunea de rețea care se dorește a fi protejată. Scopul fundamental al acestui tip de protecție este de a crea o legătură tranzitorie între instalația de protejată și pământ. Această legătură trebuie să fie eficientă pe o durată, după cum am mai spus, destul de mică de timp. Supratensiunile cauzează astfel de fenomene tranzitorii de durată redusă [16].





Principiul unei protecții paralele este prezentat în figura II.5.

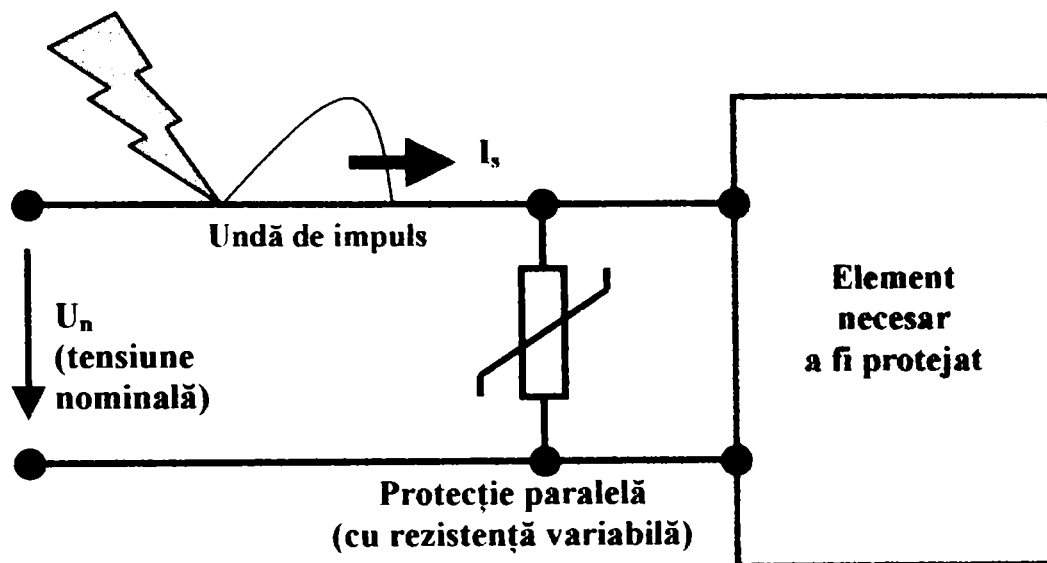


Figura II.5: Schema electrică de principiu a protecției paralele.

Cerințele unui sistem de protecție paralelă sunt [16], [56], [64]:

- un timp de răspuns foarte redus, pentru a nu expune instalația la supratensiuni decât un timp foarte scurt;
- în regim normal de funcționare să aibă un consum foarte redus (curentul care parcurge echipamentul de protecție să fie neglijabil, datorită impedanței transversale foarte mare);
- capacitatea de a absorbi energii foarte ridicate în timpul acționării la defecțiuni;
- o tensiune de amorsare (deschidere) și una reziduală (închidere) cât mai apropiate una de alta și de tensiunea de serviciu;
- limitarea supratensiunilor la o valoare inferioară nivelului de protecție (tensiunea maximă pe care o poate suporta izolația echipamentului de protecție) și a tensiunii de ținere a izolației instalației de protejat;
- stabilitate termică și electrică în timp;
- selectivitate;
- sensibilitate;
- fiabilitate și mentenanță sporite;
- preț de cost acceptabil;

În practică nu există încă un dispozitiv care să răspundă tuturor acestor cerințe.

Din categoria **protecțiilor paralele** utilizate în energetică amintim [66],[61],[16]:

- eclatoarele;
- descărcătoarele cu coarne;
- descărcătoarele tubulare cu fibră;
- descărcătoarele cu gaze (pentru module de protecție la joasă tensiune);
- descărcătoarele cu rezistență variabilă bazate pe:
  - carbură de siliciu (SiC);
  - diode Zener cu seleniu;
  - diode Zener cu siliciu;
  - ceramici semiconductoare cu ZnO și alți oxizi metalici;

În cazul sistemelor de telecomunicații se folosesc și protecții bazate pe diverse tipuri de diode precum și descărcătoare cu gaz în variantă capsulată.

Tendința este de înlocuire și în acest domeniu a diodelor cu ceramici semiconductoare, care au o mai mare capacitate de absorbție a energiei.



O protecție paralelă se montează de regulă între fază și pământ, rolul ei este de a limita valoarea supratensiunilor care pot apărea între calea de curent și pământ prin punerea temporară a liniei la pământ printr-o impedanță mică și întreruperea legăturii linie-pământ imediat ce valoarea supratensiunii nu mai este periculoasă pentru instalație. Ea reprezintă, în cazul aplicării unei supratensiuni nivelul cel mai redus de izolație, calea de impedanță minimă pentru scurtcircuitarea undei. Alimentarea cu energie electrică nu este deloc oprită.

**Descărcătoarele** sunt aparate care conduc la pământ, ca și eclatoarele de altfel, energia din unda de supratensiune, dar spre deosebire de acestea întrerup și curentul de însoțire, care apare după trecerea undei, datorită proprietăților electrice neliniare are unor rezistențe variabile.

Cu cât rezistențele sunt mai neliniare, conducerea sarcinilor la pământ prin curentul de scurgere este mai rapidă. Unele descărcătoare au înglobate în construcția lor chiar și eclatoare.

O protecție eficientă contra supratensiunilor se poate face doar utilizând **descărcătoarele cu rezistență variabilă** [61].

Cerința fundamentală a descărcătoarelor în general și a descărcătoarelor cu rezistență variabilă în particular, este de a opune o rezistență (impedanță) cât mai mică curentului de scurgere și o rezistență (impedanță) cât mai mare curentului de însoțire.

O primă categorie de descărcătoare cu rezistență variabilă o reprezintă **descărcătoarele pe bază de carbură de siliciu (SiC)**.

La noi în țară se produc asemenea echipamente, bazate pe amestecuri sinterizate de carbură de siliciu (carborund) și alți compozanți cunoscute sub denumirile comerciale de vilit, tirit, xilit. Aceste materiale se prezintă sub formă de discuri de grosimi și diametre standardizate. Unul dintre dezavantajele majore ale acestor echipamente este neliniaritatea redusă a varistoarelor pe bază de SiC. Un alt dezavantaj constructiv pornește de la necesitatea asocierii funcționale a acestor varistoare cu eclatoare și cu dispozitive destinate stingerii arcului electric, în cele mai multe dintre cazuri.

Putem afirma, fără a greși, că soluția cea mai eficientă pentru protecția contra supratensiunilor este reprezentată la ora actuală de **descărcătoarele cu rezistență variabilă cu varistoare pe bază de oxizi metalici**.

## II.4. Avantajele echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de oxizi metalici (ZnO)

Echipamentele de protecție cu varistoare pe bază de oxizi metalici (**MOV: Metal Oxide Varistors**) reprezintă categoria cea mai nouă și mai avansată de elemente de protecție contra supratensiunilor, datorită unor avantaje evidente.

Varistoarele pe bază de oxizi metalici (MOV) sunt fabricate într-o gamă constructivă extrem de largă, existând echipamente de protecție pentru fiecare nivel de tensiune, de la rețelele de telecomunicații și instalațiile electrice de joasă tensiune până la rețelele de înaltă și foarte înaltă tensiune, indiferent de tipul curentului (alternativ sau continuu).

La ora actuală există cercetări pentru implementarea acestor varistoare chiar și în domeniul electronicii de putere, ca elemente de protecție a dispozitivelor semiconductoare de putere care lucrează în regim de comutație forțată [39].

Deși cercetările privind proprietățile neliniare ale ceramicilor semiconductoare pe bază de amestecuri de oxizi metalici datează din anii '50, fiind efectuate în Japonia și în fosta Uniune Sovietică, aceste echipamente au apărut pe piață la începutul anilor '70, primul brevet de invenție în acest domeniu aparținând companiei japoneze Matsushita Electric Industrial Co., fiind acordat în 1968. Majoritatea companiilor gigante din domeniul electrotehnic (ABB, Siemens, General Electric, Matsushita Electric etc.) au incluse în programele lor de fabricație asemenea echipamente [44], [45], mai ales pentru domeniile de medie și înaltă tensiune. În domeniul de joasă tensiune și telecomunicații predomină companiile mici și mijlocii, echipamentele pentru acest domeniu nefiind extrem de pretențioase ca tehnologie de fabricație. O parte din soluțiile tehnice existente le vom detalia pe parcurs.



Avantajele echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de oxizi metalici sunt [16]:

- caracteristica curent-tensiune prezintă o neliniaritate accentuată, coeficientul de neliniaritate  $\alpha$  (panta curbei) având valori între 20 și 70;
- majoritatea variantelor constructive nu necesită eclatori în serie cu varistoarele;
- gabaritul (masă și dimensiuni) este mult mai redus;
- curentul de scurgere în regim permanent (în absența supratensiunilor) are valori extrem de mici;
- timpul de răspuns este mult mai mic (între 10 și 25 ns);
- au capacitate mărită de absorbție în energie (energia specifică  $E > 150 \text{ J/cm}^2$ ), și permit trecerea unor curenți cu densitate  $J > 5 \text{ kA/cm}^2$ ;
- nivelul de protecție este mai scăzut (echipamentele sunt mai sensibile la creșterile de tensiune);

Alte avantaje ale utilizării echipamentelor de protecție contra supratensiunilor care înglobează varistoare pe bază de oxizi metalici sunt [16], [70]:

- *eliminarea întreruperilor scurte cauzate de supratensiuni:*

În cazul echipamentelor de protecție cu eclatori, după trecerea undei de supratensiune, linia este pusă la pământ prin curentul de scurgere care persistă. Pentru a asigura stingerea arcului electric și eliminarea scurtcircuitului produs, protecțiile declanșează un ciclu de RAR. Deci apare o pauză în alimentare, nocivă mai ales pentru aparatura electronică.

- *diminuarea numărului de întreruperi din cauze accidentale:*

Datorită construcției compacte și a absenței eclatorilor (la medie și înaltă tensiune), descărcătoarele produse pe baza acestei tehnologii nu pot amorsa accidental, din cauze meteorologice, datorită poluării sau din alte cauze (păsări, animale mici, vegetație etc).

- *diminuarea riscului creșterii potențialului electric al instalațiilor vecine:*

În cazul echipamentelor cu eclatori, potențialul prizei de pământ sau al unor instalații apropiate poate ajunge la câțiva kV după aplicarea unei supratensiuni.

- *posibilitatea legării lor în paralel:*

La legarea în paralel a descărcătoarelor MOV, fără spațiu disruptiv, toate descărcătoarele conduc curentul simultan. Energia supratensiunii este distribuită tuturor descărcătoarelor legate în paralel, astfel încât capacitatea de absorbție a energiei nu mai este o limitare.

- *pot fi utilizate la frecvențe mai reduse de 50 Hz:*

Descărcătoarele cu OM nu produc curent rezidual (de însoțire), care la frecvențe reduse devine destul de important

- *pot opera și în curent continuu;*

- *au o rezistență la poluare sporită:*

Datorită repartiției uniforme a supratensiunii, nu există descărcări parțiale pe carcasa echipamentului, indiferent de gradul de poluare al anvelopei de protecție.

În figura II.6. se prezintă comparativ caracteristica tensiune - curent a unui varistor pe bază de SiC și a unuia pe bază de ZnO [70].

Observăm că în cazul varistorului pe bază de ZnO, caracteristica de funcționare la temperaturi normale este suficient de aplatizată în zona de curenți ( $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ A}$ ).

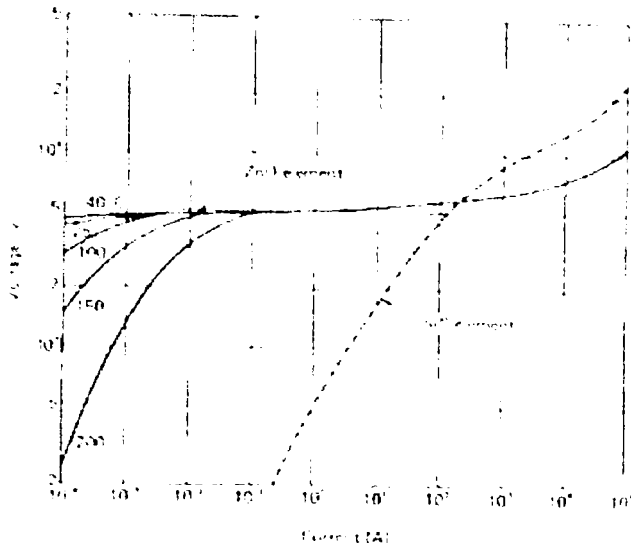


Figura II.6: Caracteristici curent – tensiune comparative pentru varistoare SiC și ZnO.

Rămâne destul de aplatizată și în zona supratensiunilor de manevră, însoțite de curenți de sute de amperi, chiar și în zona supratensiunilor atmosferice care produc curenți de 10 kA și mai mult. Pe abscisă a fost marcat curentul în A, iar pe ordonată tensiunea în V.

Aplatizarea reflectă tocmai gradul de neliniaritate crescut și apropierea caracteristicii varistorului pe bază de ZnO de caracteristica ideală.

Pentru a putea face o comparație mai directă între principalele echipamente de protecție contra supratensiunilor utilizate la medie și înaltă tensiune, prezentăm proprietățile acestora în tabelul II.1. [39].

| Dispozitiv                           | Dispozitiv ideal                                      | Eclator  | DRV cu SiC   | DRV cu ZnO   |
|--------------------------------------|---|--|--|--|
| <b>Proprietăți</b>                   |   |  |  |  |
| Curent de scurgere la $U_n$          | ...ul   | ...ul  | ...dicat   | scăzut   |
| Nivel de protecție $N_p$             | redus   | tensiune de amorsare mare → nivel de protecție ridicat | ridicat  | redus  |
| Capacitate de absorbție a energiei   | ridicată  | ridicată   | scăzută  | ridicată   |
| Timp de răspuns                      | rapid   | lent ( $\approx 10^{-6}$ s)                            | mediu ( $< 10^{-8}$ s)   | rapid ( $\leq 10^{-9}$ s)  |
| Gama de capacitate [pF]              | -   | 1 – 10 pF  | -  | 12 $\mu$ F – 50 $\mu$ F  |
| $\alpha$ determinat între 1 și 10 mA | cât mai mare  | -  | 3 – 6  | 25 – 70  |
| Preț de cost                         | cât mai scăzut  | scăzut   | mare   | mediu  |
| Domenii de aplicare                  | orice domeniu de tensiune, CC sau CA, orice frecvență | joasă și medie tensiune, cu grad mare de răspândire    | medie și înaltă tensiune, circuite de forță, cu domenii de aplicare în restrângere | joasă, medie și înaltă tensiune, cu o arie de răspândire în expansiune |
| Complexitate                         | medie către redusă                                    | redusă   | ridicată   | medie  |

Tabelul II.1: Comparație a proprietăților dispozitivelor de protecție la supratensiuni.

Dar această categorie de echipamente prezintă și dezavantaje, dintre care menționăm

- degradarea varistorului, reflectată în modificarea caracteristicii curent-tensiune după trecerea fiecărei unde de supratensiune;
- degradarea permanentă a varistorului chiar în absența supratensiunilor (fenomenul de îmbătrânire), datorată trecerii în permanență a unui curent de valoare extrem de mică prin varistor;

631/206 10/15





- în timpul funcționării, caracteristica curent-tensiune este foarte dependentă de temperatură, creșterea ei fie datorită condițiilor microclimatice, fie datorită efectului Joule – Lenz, antrenează o creștere exponențială a curentului care trece prin varistor. La limită se poate produce chiar o creștere necontrolată, în avalanșă, care conduce la fenomenul de ambalare termică și la distrugerea echipamentului.

Pentru a concluziona, comparând proprietățile tuturor acestor aparate de protecție contra supratensiunilor cu varianta ideală, se constată că echipamentele bazate pe tehnologia varistoarelor cu oxizi metalici (ZnO) îndeplinesc cele mai multe din aceste cerințe.

### **II.5. Echipamente de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO pentru aplicații la joasă tensiune**

Realizarea unor protecții eficiente contra supratensiunilor în instalațiile de joasă tensiune și mai ales în domeniul consumatorilor casnici sau a aparaturii electronice (tehnica de calcul, TV, video, HiFi etc.) este o problemă rezolvabilă în ziua de azi, mai ales datorită apariției ceramicilor conductoare pe bază de oxizi metalici.

Pentru protecția rețelelor electrice de joasă tensiune, la ora actuală, se utilizează combinate sau singure următoarele tipuri de protecții paralele:

- eclatori simplii în aer;
- eclatori în diverse medii gazoase în variantă capsulată;
- diode Zener cu seleniu;
- diode Zener cu siliciu;
- varistoare pe bază de SiC;
- varistoare pe bază de ZnO.

Vom prezenta în continuare în tabelul II.2, o comparație între principalele categorii de rezistențe variabile utilizate pentru protecții la joasă tensiune, evidențiind avantajele și dezavantajele fiecăreia:

| <i>Materialul utilizat</i>      | <i>Principalele avantaje</i>  | <i>Principalele dezavantaje</i>   |
|---------------------------------|---|---|
| <b>Carbură de siliciu (SiC)</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ capacitate de absorbție a energiei importantă;</li> <li>▪ fiabilitate</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pierderi considerabile în serviciu permanent;</li> <li>▪ stabilitate termică redusă;</li> </ul>  |
| <b>Diode Zener cu seleniu</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ capacitate de absorbție a energiei medie;</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ element unipolar;</li> <li>▪ pierderi foarte mari în serviciu permanent;</li> <li>▪ neliniaritate medie;</li> <li>▪ instabile la înaltă temperatură;</li> <li>▪ preț ridicat;</li> </ul> |
| <b>Diode Zener cu siliciu</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ caracteristică foarte neliniară;</li> <li>▪ timp de răspuns extrem de redus;</li> <li>▪ pierderi slabe în regim permanent;</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ element unipolar;</li> <li>▪ capacitate redusă de absorbție în energie;</li> <li>▪ preț extrem de ridicat;</li> </ul>  |
| <b>Ceramici bazate pe ZnO</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ capacitate importantă de absorbție în energie;</li> <li>▪ neliniaritate mărită a caracteristicii;</li> <li>▪ timp de răspuns redus;</li> <li>▪ pierderi reduse în serviciu permanent;</li> <li>▪ fiabilitate sporită;</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pierderile la tensiunea de serviciu cresc cu temperatura;</li> </ul>   |

**Tabelul II.2: Comparație între rezistențele neliniare utilizate pentru protecții la joasă tensiune.**





Vom prezenta, pe scurt, principalele sisteme utilizate precum și standardele aferente.

În România nu există, pentru moment, standarde care să se refere la protecțiile contra supratensiunilor în domeniul de joasă tensiune. Cererea de astfel de echipamente pe piața românească ar putea crește accelerat în condițiile în care se vor adapta asemenea reglementări. Instalațiile electrice din fiecare birou sau locuință urmând a fi prevăzute cu asemenea echipamente.

Studiile efectuate de către autor au vizat în primul rând acest domeniu, al aplicațiilor la joasă tensiune a varistoarelor pe bază de ZnO.

O problemă, specifică instalațiilor electrice domestice la joasă tensiune în primul rând, este **coordonarea nivelului de protecție** în diferitele puncte ale instalației [34], [75], [81], [82].

Distingem, după natura materialului electric care trebuie protejat și locul de amplasare în instalația electrică domestică, 4 categorii de module de protecție contra supratensiunilor, prezentate în tabelul II.3., împreună cu standardele internaționale sau europene care descriu tipul de protecție:

| Clasa echipamentului   | Specificații tehnice   | Nivel de protecție   | Curent de scurgere nominal  |
|--|--|--|---|
| <b>A</b><br>Utilizate de-a lungul liniilor de JT până la intrarea în clădiri   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nu necesită protecție împotriva contactului direct;</li> <li>▪ Pot fi supraîncărcate sau distruse de lovituri directe de trăsnet;</li> <li>▪ Sunt concepute să opereze în exterior în cele mai grele condiții meteo și de poluare.</li> </ul> | Conform IEC 99.1, tabelul 1  | Conform E DIN VDE 0675-6/11-89, tabelul 6, Isn = 5 kA (8/20)                                  |
| <b>B</b><br>Utilizate la intrarea în clădiri în primul rând pentru protecția contra supratensiunilor atmosferice. Protejează materiale sensibile din categoria IV.   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Necesită protecție împotriva contactului direct;</li> <li>▪ Nu trebuie să prezinte risc de defectare sau incendiu în serviciu;</li> </ul>   | Np = 6 kV<br>Conform cat. IV din DIN VDE 0110-1 și E DIN VDE 0675-6/A1/03-96 Tabelul 7                                       | Până la 5 kA, Conform E DIN VDE 0675-6/A1/03-96 Tabelul 4 și conform DIN 48 810/08/86 Anexa A |
| <b>C</b><br>Utilizate după tabloul electric general și după contor pentru protecția contra supratensiunilor de durată. Protejează materiale sensibile din categoria III.   |  | Np = 4 kV<br>Conform cat. III din DIN VDE 0110-1 și E DIN VDE 0675-6/A1/03-96 Tabelul 7 și E DIN VDE 0675-6/11-89 Tabelul 4  | Isn = 1,5 kA (8/20) Conform E DIN VDE 0675-6/11-89 Tabelul 6                                  |
| <b>D</b><br>Utilizate în zona prizelor, înainte de intrarea în consumatorii domestici pentru protecția împotriva supratensiunilor de durată. Pot fi detașate de către utilizator. Protejează materiale sensibile din categoria II. |  | Np = 2,5 kV<br>Conform cat. II din DIN VDE 0110-1 și E DIN VDE 0675-6/A1/03-96 Tabelul 7 și E DIN VDE 0675-6/11-89 Tabelul 4 | Isn = 1,5 kA (8/20) Conform E DIN VDE 0675-6/11-89 Tabelul 6                                  |

**Tabelul II.3 : Clase de module de protecție contra supratensiunilor la joasă tensiune.**

În figura II.7. prezentăm o schemă de principiu a locului de amplasare a modulelor de protecție conform clasei fiecăruia. S-au reprezentat și materialele din categoria I de sensibilitate, cu un nivel de protecție de 1,5 kV, conform DIN VDE 01110-1, anume consumatorii casnici care se conectează în prize. Protecția fiecăruia din acești consumatori este concepută de producătorul aparatului și este integrată în structura acestuia. În interiorul clădirilor legăturile la pământ se efectuează prin neutrul de protecție.

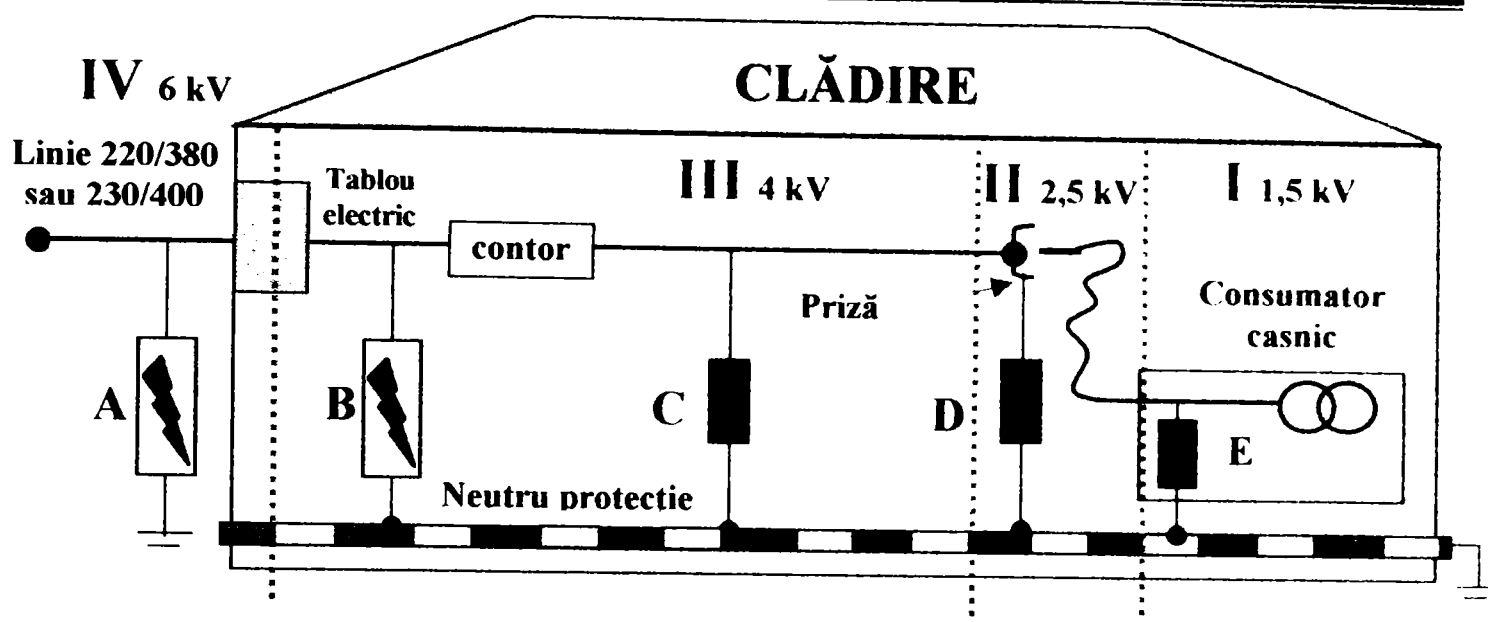


Figura II.7 : Dispunerea fiecărei clase de module de protecție contra supratensiunilor într-o clădire, conform DIN VDE 0675.

Echipamentele de protecție la joasă tensiune, care folosesc varistoare pe bază de ZnO se prezintă sub forma unor module compacte de protecție, care au în componența lor, de cele mai multe ori, alături de varistoarele propriu-zise și eclatoare cu gaz și diverse tipuri de diode.

Un varistor singur, la joasă tensiune nu poate răspunde simultan următoarelor cerințe [4]

- să aibă un nivel de protecție în regim tranzitoriu cât mai apropiat de tensiunea de serviciu;
- să suporte supratensiuni temporare apropiate în timp una de cealaltă;
- să își mențină tensiunea de prag constantă în timp îndelungat, evitând "îmbătrânirea";
- să nu intre în ambalare termică după un impuls extrem de violent, fiind alimentat în continuare la tensiunea nominală a rețelei.

În schimb are un timp de reacție foarte redus, de până la 25 ns.

Există riscul ca din cauza curentului care îl parcurge în permanență, a masei relativ reduse, a limitării posibilităților de disipare a căldurii, dat fiind că operează și în regiunea slab neliniară a caracteristicii, ca varistorul să ajungă în urma unor procese tranzitorii violente (impulsuri de tensiune) în regim de ambalare termică. Din punct de vedere electric această stare se manifestă prin tendința varistorului de a oferi o cale de impedanță (rezistență) minimă și după trecerea undei de supratensiune, el având rezistență electrică mică datorită temperaturii sale ridicate, rețeaua fiind astfel pusă la pământ în regim de scurtcircuit, sau, după caz, suprasarcină, lucru nedorit

Varistorul are nevoie [4] fie de un dispozitiv care să îl conecteze doar când e nevoie, dar care ar diminua viteza de reacție și performanțele în general, fie de un dispozitiv care să-l deconecteze în cazul ambalării termice [16].

Principalii parametri ai unui modul de protecție la joasă tensiune sunt.

- Tensiunea în serviciu (nominală), care este cea a rețelei 220-230 V sau 380-400 V (efectiv), acolo unde este cazul;
- Nivelul de protecție (conform clasei și categoriei de material protejat), anume valoarea de vârf a tensiunii la bornele modulului;
- Curentul de scurgere nominal, în valoare de vârf, (1,5 sau 5 kA, funcție de clasă);

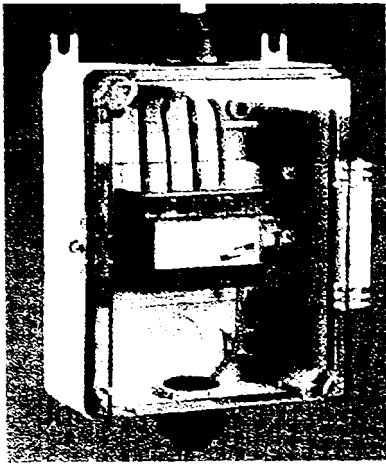
Ultimii doi parametri sunt calculați pentru unda standardizată tip 8/20  $\mu$ s.

Vom prezenta în continuare câteva astfel de module existente pe piață la ora actuală [72],[80]

Un exemplu de tablou de protecție cu module pentru clasa A, fabricat de către firma DEHN +SÖHNE GmbH. din Germania, este prezentat în figura II.8.

Se remarcă faptul că este conceput să opereze în exterior, fiind protejat IP 65.





**Figura II.8:**  
**Modul de protecție clasa A**

Este realizat în concepție trifazată, modulele de protecție sunt montate câte unul pe fiecare fază, având un modul care protejează inclusiv nulul.

Legătura cu pământul se face prin nulul de protecție (dacă este accesibil).

Pentru anumite nivele de tensiune, modulele de protecție clasa A sunt executate sub forma unor capsule cilindrice

Fiecare modul este prevăzut cu o semnalizare la acționare

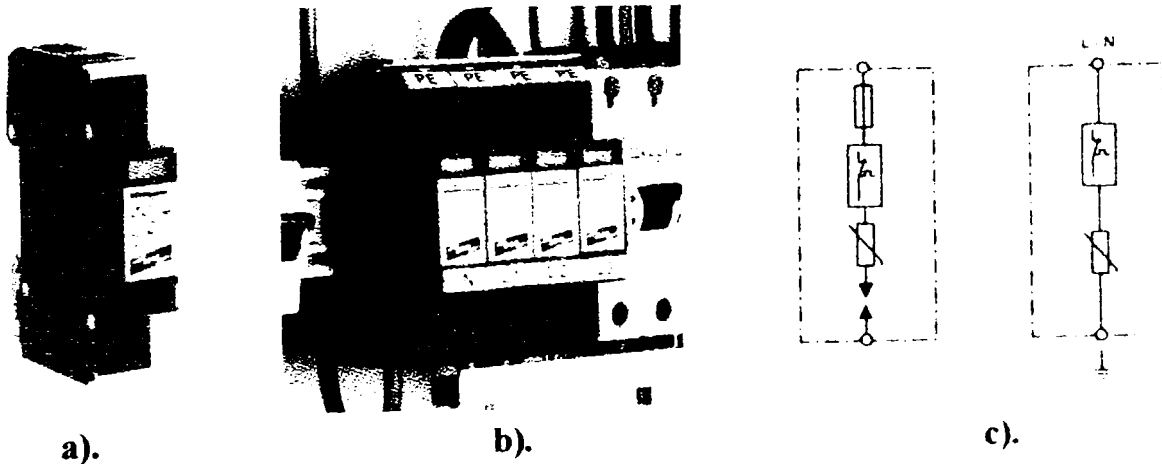
Parametrii sunt corespunzători clasei.

Modulele de protecție pentru clasele B și C sunt identice ca și aspect și construcție [13], [71].

Diferă doar parametrii de deconectare a varistorului (eclator sau dispozitiv termobimetalic).

Un astfel de modul este prezentat în figura II.9.a).

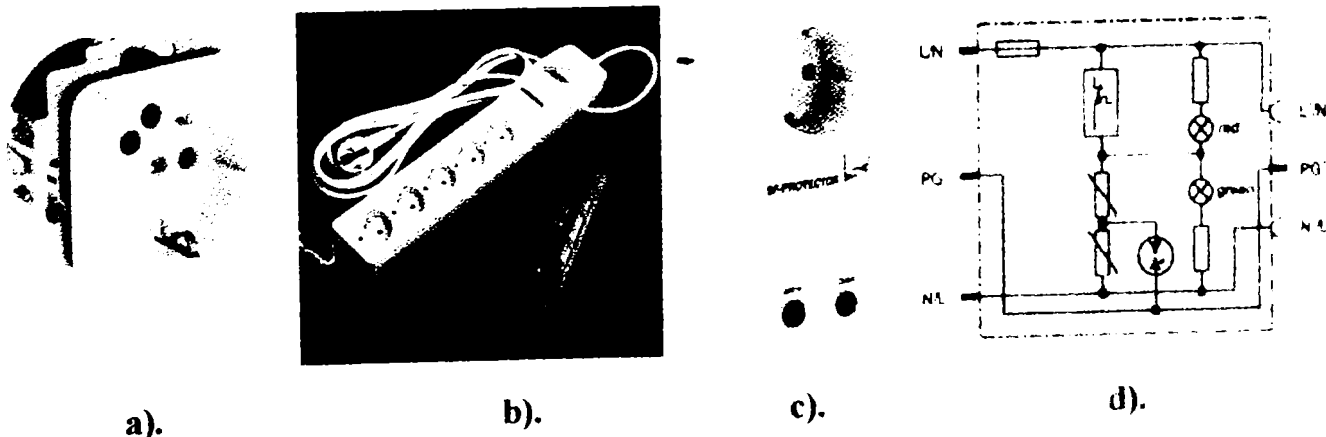
Modulele sunt concepute spre a fi montate pe șinele din tablourile sau dulapurile electrice tip DIN-rail 35 mm, normă europeană EN 50 022, valabilă și în România. În figura II.9.b) este prezentată situația în care 4 astfel de module sunt montate pe aceeași șină alături de modulele de protecție pentru scurtcircuite și suprasarcini (cu conexiunile de rigoare). Aici este vorba de module clasa B, montate în tabloul electric general. Modulele sunt produse de către aceeași firmă germană.



**Figura II.9: Module de protecție clasa B și C.**

Alături, în Figura II.9. c). am prezentat și schemele electrice ale acestor module [71].

Modulele destinate protecției în zona contactelor fișă - priză (clasa D) sunt prezentate în figura II.10. [71], [72], [13], [22], conform [89], [92], [93].



**Figura II.10 : Module de protecție clasa D.**

Figura II.10. a). prezintă un ansamblu compact priză îngropată în perete + modul de protecție încorporat.



În figura II.10. b). sunt prezentate două module de protecție, unul încorporat în prelungitoare multipriză, celălalt aplicabil în exterior la orice priză, produse de către firma MURATRON S.A. din Franța [22]. Figura II.10. c). și d). prezintă un modul de protecție, clasa D, aplicabil pe exteriorul oricărei prize produs de către firma DEHN + SÖHNE GmbH.[72] împreună cu schema sa electrică.

Elementele schemelor electrice ale acestor echipamente sunt:

- Varistorul cu rolul de a absorbe energia șocului;
- Descărcătorul cu gaz, cu rol de deconectare a varistorului în regim permanent de serviciu și fixare a tensiunii de amorsare a dispozitivului (în cazul supratensiunilor de durată);
- Blocul termobimetalic, cu rol de a deconecta întregul ansamblu în caz de creștere a temperaturii după aplicarea unui șoc (evită ambalarea termică a varistorului);
- Siguranța fuzibilă, cu rol de a limita curentul de scurgere la valoarea standardizată pentru a nu distruge varistorul.

Toate aceste subansamble asigură protecția varistorului, elementul principal al modulului.

Unele module au, pe lângă elementele anterioare, și indicatoare de funcționare cu lămpi de Ne înseriate cu rezistențe de limitare a curentului prin lampă, culorile fiind: verde pentru serviciul permanent și roșu pentru avarie. Pentru semnalizare se utilizează și montaje serie rezistență + diodă + LED, acestea nefiind întotdeauna fiabile și eficiente [47]. [101].

Vom prezenta în continuare un modul de protecție contra supratensiunilor, clasa D, produs de către S.C. PROTENERGO S.A. din Timișoara [87].

Acest modul a fost conceput și proiectat integral de către autor, în cursul anului 2001, fiind primul modul de protecție clasa D conceput și realizat în România. Este rezultatul direct al implementării tehnologiei varistoarelor cu ZnO într-un domeniu puțin abordat de către fabricanții cu tradiție de la noi.

Produsul se află momentan în stadiul de omologare și elaborare a standardului de firmă, primele încercări fiind deja realizate la Laboratorul "Génie Electrique" din Toulouse, el urmând să iasă pe piață la sfârșitul anului 2001 sau începutul anului 2002. Pe piața din România există la ora actuală relativ puține produse similare, din import, la prețuri semnificativ mai mari.

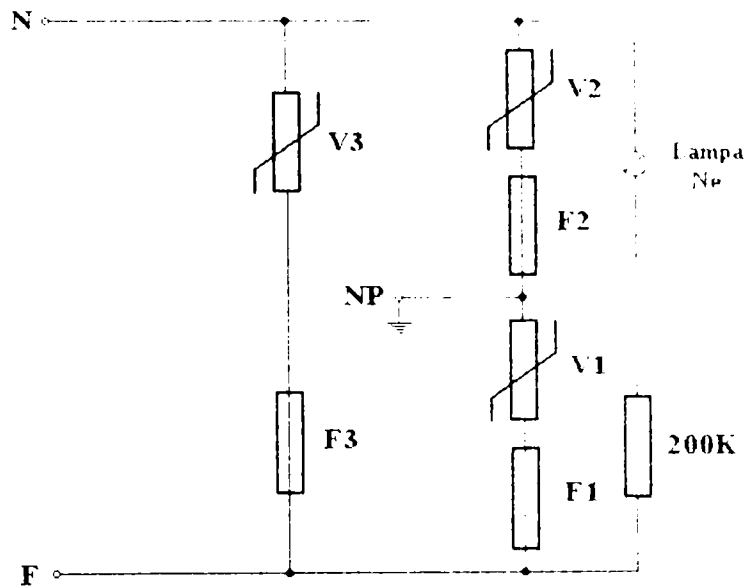
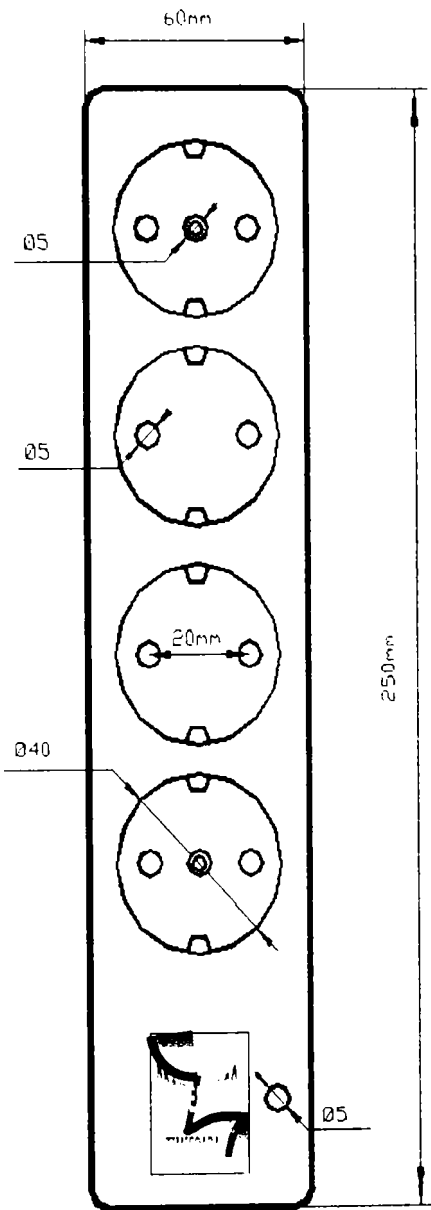
Produsul se numește "Bloc Multipriză protejat la Supratensiuni, BMS 01". Asigură protecția contactului fișă – priză, fiind localizat înainte de consumator. Se prezintă sub forma unui bloc multipriză prelungitor, în execuție compactă, care are încorporat modulul de protecție.

#### **Datele tehnice principale sunt:**

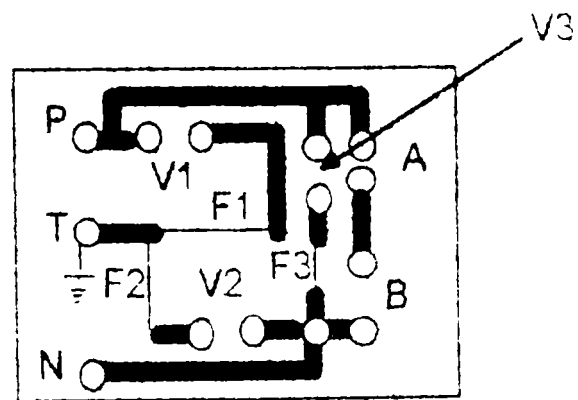
|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| Tensiune nominală:                                      | 220 – 250 V                        |
| Curent nominal maxim:                                   | 10 A                               |
| Putere vehiculată maximă:                               | 2500 W                             |
| Frecvența nominală de alimentare:                       | 50 – 60 Hz                         |
| Curent de scurgere (în regim de serviciu permanent):    | < 50 $\mu$ A                       |
| Nivel de protecție (undă 8/20 $\mu$ s):                 | 2,5 kV                             |
| Timp de răspuns:  | < 20 ns                            |
| Capacitate de absorbție în energie (undă 8/20 $\mu$ s): | 520 J                              |
| Temperatură de exploatare:                              | -20 °C... +40 °C                   |
| Lungime cablu:  | 1,5 m ( $\pm$ 5%)                  |
| Număr prize:  | minimum 3, în funcție de variantă: |

Blocul multipriză protejat la supratensiuni corespunde clasei D, conform DIN - VDE 0675, și NFC 61740. Corespunde și SR CEI 60536: 1995 [89], [90], [91].

Dintre multitudinea de soluții tehnice existente am optat pentru includerea modulului de protecție în carcasa unui bloc multipriză având 4 prize, fiecare dintre ele fiind prevăzută cu fișă de pământare, conform STAS 8167/88, SR CEI 60884+A1:1997 și DIN 49441 R1 [92],[93],[99],[100].



Schema electrică a modului de protecție



Cablajul imprimat al modului.

Figura II.11: Modulul de protecție tip BMS 01.

Carcasa este prevăzută cu un spațiu, având dimensiunile aproximative din figura II.11, destinat a adăposti modulul de protecție, care trebuie interpus obligatoriu între contactul fișă - priză din perete și contactul fișă - priză al consumatorului, înainte de consumator.

Schema electrică este alcătuită, conform figurii II.11 din:

- trei varistoare V1, V2, V3;
- trei siguranțe fuzibile F1, F2, F3;
- o lampă de neon;
- o rezistență de 200 K $\Omega$ , 0,5 W.

Cablajul, imprimat pe o placă de sticlotexolit cu dimensiunile 50 X 30 mm, are configurația din figura II.11:

Setul de orificii A corespunde lămpii cu neon iar setul de orificii B rezistenței de 200 K $\Omega$ .

Fuzibilele F1, F2, F3 sunt realizate pe placa de cablaj prin gravarea unor piste cu grosimea de 0,6 mm față de 2 mm cât au celelalte trasee. Elementele fuzibile sunt concepute să acționeze la un curent de 8,5 - 9 kA, în valoare de vârf, curent care ar produce intrarea varistoarelor în regim de ambalare termică, după trecerea undei de supratensiune, ceea ce ar cauza un scurtcircuit fază pământ și supraîncălzirea exagerată, urmată de deteriorarea modului, cu risc sporit de apariție de incendii.



Fuzibilele sunt înseriate cu varistoarele și plasate între:

- neutru și fază;
- neutru și neutru de protecție;
- fază și neutru de protecție.

În condiții defectuoase de exploatare a instalațiilor electrice, este posibil ca potențialul neutrului să nu fie egal cu cel al neutrului de protecție, ceea ce a impus această soluție de conectare aparent fără justificare. În orificiile P, T și N se sudează cabluri de legătură între modul și, respectiv fază, neutru de protecție și neutru blocului multipriză.

Lampa cu neon este destinată semnalizării prezenței tensiunii la bornele blocului multipriză. Tensiunea nominală de funcționare a lămpii este de 60 Vca, la un curent de maxim 1 mA. Se montează între fază și neutru. Se înseriază cu o rezistență de 200 k $\Omega$ , pentru a asigura nivelul de tensiune de 60 Vca, la un curent limitat la 0.8 mA.

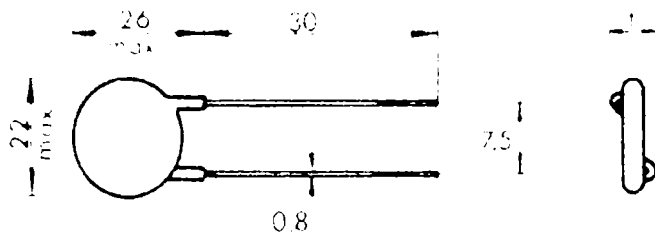


Figura II.12 : Varistor de tip V250K20.

Varistoarele utilizate sunt de tipul V250K20, produse de către ISKRA Varistor Ljubljana [79], având dimensiunile prezentate în figura II.12.

Dimensiunea  $t$  este de 5.8 mm.

Da ele tehnice de caracteristicile varistorului sunt conform [79], în concordanță cu notațiile standardizate, valorile fiind măsurate la o temperatură ambiantă de 25 °C, anume:

|   |               |
|---|---------------|
| - tensiune maximă de operare în curent alternativ $U_{RMS}$ :         | 250 V         |
| - tensiune maximă de operare în curent continuu $U_{DC}$ :            | 320 V         |
| - tensiunea de prag a varistorului (la un curent de 1 mA) $U_N$ :     | 389 V         |
| - energia absorbită pentru formă de undă 10/1000 $\mu$ s:             | 130 J         |
| - energia absorbită pentru formă de undă 8/20 $\mu$ s:                | 520 J         |
| - energia absorbită la impuls treaptă de 2ms:                         | 141 J         |
| - puterea maximă disipată $P_{max}$ :                                 | 1 W           |
| - nivelul de protecție pentru formă de undă 8/20 $\mu$ s              | 2500 V        |
| - capacitatea electrică (la 230 V, 1 kHz):                            | 920 pF        |
| - curent maxim absorbit pentru formă de undă 8/20 $\mu$ s $I_{max}$ : | 8000 A        |
| - diametrul discului varistor:  | 20 mm         |
| - curent de scurgere în regim permanent:                              | < 100 $\mu$ A |
| - timp de răspuns:  | < 20 ns       |
| - tensiunea reziduală $U_C$ , la un curent $I_n = 100$ A:             | 650 V         |

Definirea mărimilor de mai sus se va face în subcapitolul următor.

Domeniul de utilizare al BMS 01 vizează consumatorii casnici, cu puteri sub 2500 W: motoare de putere medie, instalații de aer condiționat, frigider, instalații de iluminat, aparatură electronică, TV, audio, video, HiFi, tehnică de calcul, cuptoare și aparate electrocasnice de încălzit.

## II.6. Definirea mărimilor specifice varistoarelor cu oxizi metalici și echipamentelor bazate pe astfel de varistoare

După cum am văzut și în capitolul anterior, varistorul pe bază de oxizi metalici este elementul central al unei game extrem de largi de echipamente contra supratensiunilor.

Pentru a putea dimensiona sau alege un varistor și pentru a-l putea integra într-un echipament oarecare trebuie introduse niște mărimi specifice domeniului de utilizare. De cele mai multe ori aceste mărimi sunt standardizate. Datorită lipsei unei standardizări pe plan intern în domeniul varistoarelor pe bază de oxid de zinc, vom utiliza în mare parte standardele, mărimile și terminologia europeană, care probabil vor fi adoptate în viitor și de România, mai ales în perspectiva aderării la Uniunea Europeană. Toți parametrii la care ne vom referi în continuare sunt amplu descriși în normele UTE, NFC 61740 [82] și CEI 664-1980 [84]. Aceștia sunt dați ca și date de catalog pentru fiecare tip de varistoare ZnO sau de echipamente care înglobează varistoare ZnO.



Acești parametri sunt [82], [84]:

- $U_N$  – tensiunea de prag a varistorului (descărcătorului), reprezintă tensiunea continuă măsurată la bornele varistorului (descărcătorului) în mod convențional cu referire la un curent de 1 mA, în [V curent continuu]. Fabricantul varistorului (descărcătorului) trebuie să indice și toleranța acestei tensiuni, (care conform CECC 42000 Test 4.20 este în general de  $\pm 10\%$ );
- $U_n$  – tensiunea nominală a instalației de protejat, ca valoare efectivă (220 sau 230 Vca la aplicațiile de joasă tensiune);
- $U_{MCOV}$  – tensiunea maximală de serviciu permanent, reprezintă limita maximă admisibilă, ca valoare efectivă, a tensiunii de alimentare de frecvență industrială (**Maximum Continuous Operating Voltage**, în engl.), este dată de instalația de protejat. Pentru instalațiile de joasă tensiune se consideră valabilă relația:  $U_{MCOV} = 230 \times 1,06 = 250$  Vca.;
- $U_{RMS}$  (**la limită =  $U_{MCOV}$** ) – reprezintă tensiunea efectivă maximă, în serviciu permanent la bornele varistorului (descărcătorului), se acceptă ca fiind egală cu  $U_{MCOV}$ , cerută de instalația de protejat. Empiric, raportul  $U_N / U_{RMS}$  este în jur de 1,5...1,7. Relația aceasta este arbitrară.  $U_N$  fiind o tensiune continuă,  $U_{RMS}$  fiind o valoare efectivă (**Rated Mean Square** în engl.);
- $U_{DC}$  – tensiunea maximală ca valoare continuă (**Direct Current** în engl.), în serviciu permanent, la bornele varistorului (descărcătorului), la limită ea este egală cu tensiunea impusă de funcționarea instalației de protejat, în curent continuu. În cazul rețelelor de curent alternativ nu prezintă mare importanță ;
- $U_{TOV}$  – tensiunea maximală, ca valoare efectivă, reprezintă limita maximală a supratensiunilor temporare care pot apărea în instalația de protejat (**Temporary Over Voltage** în engl.);
- $U_r$  (**la limită =  $U_{TOV}$** ) – tensiunea nominală a varistorului (descărcătorului), reprezintă cea mai mare valoare efectivă permisă a tensiunii de frecvență industrială pentru care este dimensionat și proiectat descărcătorul, astfel încât el să funcționeze corect în condiții de supratensiuni temporare (**Rated Voltage**, în engl.), este practic tensiunea de calcul a descărcătorului;
- $U_{res}$  – tensiunea reziduală, reprezintă tensiunea maximă ca valoare de vârf, care poate fi suportată de instalație în timpul descărcării unui impuls de curent tip 8/20  $\mu$ s, de amplitudine dată.
- $U_C$  – tensiunea reziduală dată de varistor (descărcător), ca valoare de vârf (**Maximum Clamping Voltage**, în engl.) Obișnuit se dă această tensiune obținută pentru curentul nominal de descărcare al varistorului (descărcătorului)  $I_n$ ;
- $I_n$  – curentul nominal, reprezintă valoarea de vârf a curentului de descărcare, la unda tip 8/20  $\mu$ s, utilizat pentru testarea varistorului (descărcătorului). Pentru aplicațiile de joasă tensiune este de 100 A, conform CECC 42000 Test C2.1;
- $I_{max}$  – curentul maxim al varistorului, reprezintă valoarea de vârf, dată de constructor, a undei de impuls de curent, tip 8/20  $\mu$ s, suportată o singură dată de descărcător (**Permissible Peak Current** în engl.). Are valori de sute sau mii de [A];
- $I_f$  – curentul de scurgere, reprezintă curentul care se stabilește prin varistor (descărcător) atunci când este alimentat cu tensiunea nominală  $U_n$ , având aici o altă accepțiune decât în cazul descărcătoarelor cu eclatoare, având o valoare mai mică de 100  $\mu$ A pentru aplicațiile la joasă tensiune unde  $U_n = 220-230$  Vef.;
- $N_p$  – nivelul de protecție, parametru ce caracterizează performanțele protecției cu varistoare (descărcătoare) și care reprezintă valoarea de vârf a tensiunii celei mai ridicate, admisibilă la bornele descărcătorului sau varistorului, în condiții date de încercare, în [V]. Această tensiune trebuie să fie superioară ca valoare fiecăreia din valorile de mai jos:
  - Tensiunea maximală de amorsaj la șoc de tensiune  $t_1/t_2 = 1,2/50$   $\mu$ s;
  - Tensiunea reziduală la curentul nominal de descărcare (ca valoare maximă);
  - Tensiunea maximă de amorsare pe frontul undei împărțită la 1,15;
- $N_i$  – nivel de izolație; parametru care caracterizează performanțele de izolație ale instalației în care este plasat varistorul (descărcătorul), definit prin tensiunea de ținere la șoc, ce corespunde tensiunii de conturare a izolației instalației la unda de tensiune 1,2/50  $\mu$ s în [V];







Aceste valori corespund unui anumit punct de referință de pe caracteristica curent-tensiune a varistorului sau a echipamentului, considerat a fi important de către fabricant, din rațiuni tehnologice sau de exploatare [75].

Pentru varistoare, ca date de catalog importante se mai dau:

- Puterea maximă care poate fi disipată  $P_{max}$ , în [W];
- Capacitatea de absorbție în energie  $W_{max}$  sau  $Q_{max}$ , în [J]. Se definește diferențiat pentru:
  - Undă impuls de curent 8/20  $\mu$ s;
  - Undă de impuls de curent 10/1000  $\mu$ s;
  - Undă tip treaptă de impuls, cu durata de 2 ms;
- Capacitatea electrică, în [pF], în regim tranzitoriu, la o frecvență de 1 kHz.

Tot în categoria datelor furnizate de către fabricantul de varistoare intră și caracteristica curent-tensiune a varistorului, pe care o vom analiza în capitolul următor. S-a preferat adoptarea notațiilor cu "U" pentru tensiune, în standardele internaționale utilizându-se "V" pentru tensiune

## II.7. Concluzii

În acest capitol am încercat s-a făcut o prezentare generală a problemelor legate de apariția și manifestarea supratensiunilor în rețelele electrice precum și a mijloacelor de protecție folosite pentru a evita pagubele și accidentele produse de aceste fenomene.

În primul subcapitol s-au prezentat clasificările supratensiunilor după locul și durata lor de manifestare, dar mai ales o sinteză a acestor clasificări realizată din punctul de vedere al fabricantului de echipamente de protecție contra supratensiunilor. S-a căutat un răspuns la întrebarea "Ce sunt supratensiunile și cum se manifestă?".

În al doilea subcapitol s-au descris principalele forme de undă standardizate care simulează undele de supratensiune și sunt utilizate pentru încercări.

În cel de-al treilea subcapitol s-au analizat sistemele de protecție contra supratensiunilor existente la ora actuală.

Subcapitolul al patrulea înfățișează principalele avantaje ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO, un posibil răspuns la întrebarea "De ce varistoare pe bază de ZnO?".

În subcapitolul al cincilea s-au prezentat câteva variante constructive ale celor mai moderne echipamente de protecție contra supratensiunilor, unele din ele chiar originale. În capitolele următoare se vor face referiri mai ales la domeniul de joasă tensiune (220 -230 V), de aceea echipamentele prezentate corespund acestui domeniu. S-a oferit un posibil răspuns la întrebarea "Care sunt aceste echipamente și cum funcționează?".

Subcapitolul al șaselea face referiri la principalele mărimi utilizate în proiectarea și exploatarea echipamentelor de protecție contra supratensiunilor, așa cum reies din cele mai moderne standarde europene și internaționale.

## II.8. Contribuții personale și originale

Concepția și proiectarea, în premieră în România, a unui modul de protecție contra supratensiunilor, clasa D, produs de către S.C. PROTENERGO S.A. din Timișoara, după norme europene;

- Sinteza principalelor standarde europene și internaționale privind echipamentele de protecție contra supratensiunilor în instalațiile electrice de joasă tensiune, în absența unor standarde românești, în ipoteza că acestea vor sta la baza viitoarelor standarde naționale în domeniu, mai ales în perspectiva aderării României la Uniunea Europeană;
- Prezentarea detaliată și obiectivă a soluțiilor tehnice existente în acest moment în domeniul protecției contra supratensiunilor în rețelele de joasă tensiune;





## CAPITOLUL III

### Varistorul pe bază de ZnO ca element principal al echipamentelor de protecție contra supratensiunilor

În accepția generală, un varistor este un element de circuit neliniar, a cărui principală proprietate electrică, anume rezistența sa, variază în funcție de un parametru exterior impus.

În tehnică, varistorul este asimilat cu un element de circuit a cărui rezistență variază invers proporțional (intrinsec, neliniar) cu tensiunea aplicată, tensiunea fiind principalul parametru care determină variația proprietății electrice fundamentale și anume rezistența. Influența temperaturii asupra rezistenței electrice, chiar dacă ea este mult mai mare decât în cazul rezistoarelor, nu joacă un rol important în definirea acestor componente de circuit. Lucrarea de față își propune să prezinte și influența colaterală a acestui parametru asupra funcționării varistoarelor și a echipamentelor care le înglobează.

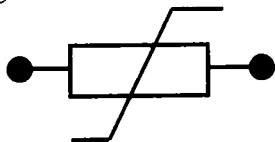


Figura III.1:  
Simbolul varistorului.

În schemele electrice, varistorul se reprezintă prin simbolul din figura III.1.

Caracteristica statică curen-tensiune  $I(U)$  a varistoarelor utilizate în construcția echipamentului de protecție este cea care furnizează informațiile esențiale despre evoluția dependenței dintre cele două mărimi și asupra performanțelor echipamentului [27].

#### III.1. Caracteristica statică curen-tensiune pentru un varistor ZnO

Dependența neliniară dintre curen-tul (densitatea de curen-t) și tensiunea (intensitatea câmpului aplicat) la bornele varistorului este dată [7] de relația:

$$J = K \cdot E^{\alpha} \quad (3.1)$$

unde:

- $J$  este densitatea curen-tului prin varistor [ $A/m^2$ ];
- $E$  este intensitatea câmpului electric aplicat la bornele varistorului [ $V/m$ ];
- $K$  este o constantă care depinde de geometria și modul de fabricare și utilizare a varistorului;
- $\alpha$  este coeficientul de neliniaritate;

O relație similară (în esență o exprimare asemănătoare legii lui Ohm pentru o porțiune de circuit) poate fi scrisă și între curen-tul care trece prin varistor și tensiunea aplicată:

$$I = H \cdot U^{\alpha} \quad (3.2)$$

- $I$  este curen-tul prin varistor [ $A$ ];
- $U$  este tensiunea aplicată la bornele varistorului [ $V$ ];
- $H$  este o altă constantă;
- $\alpha$  este coeficientul de neliniaritate;

Protecția rețelelor și echipamentelor este cu atât mai eficientă cu cât coeficientul de neliniaritate  $\alpha$  are o valoare mai mare [90]. Spre deosebire de varistoarele cu SiC, la care  $\alpha = 3 - 6$ , varistoarele cu ZnO au obișnuit un  $\alpha = 25$  până la 70 și un curen-t de scurgere mult mai scăzut decât celelalte [51].

Caracteristica curen-tensiune a unui varistor [16] este reprezentată în figura III.2. S-a preferat reprezentarea sub forma  $J = f(E)$  și nu  $I = f(U)$ , pentru a ne referi exclusiv la materialul varistorului și nu la problemele de geometrie și construcție.

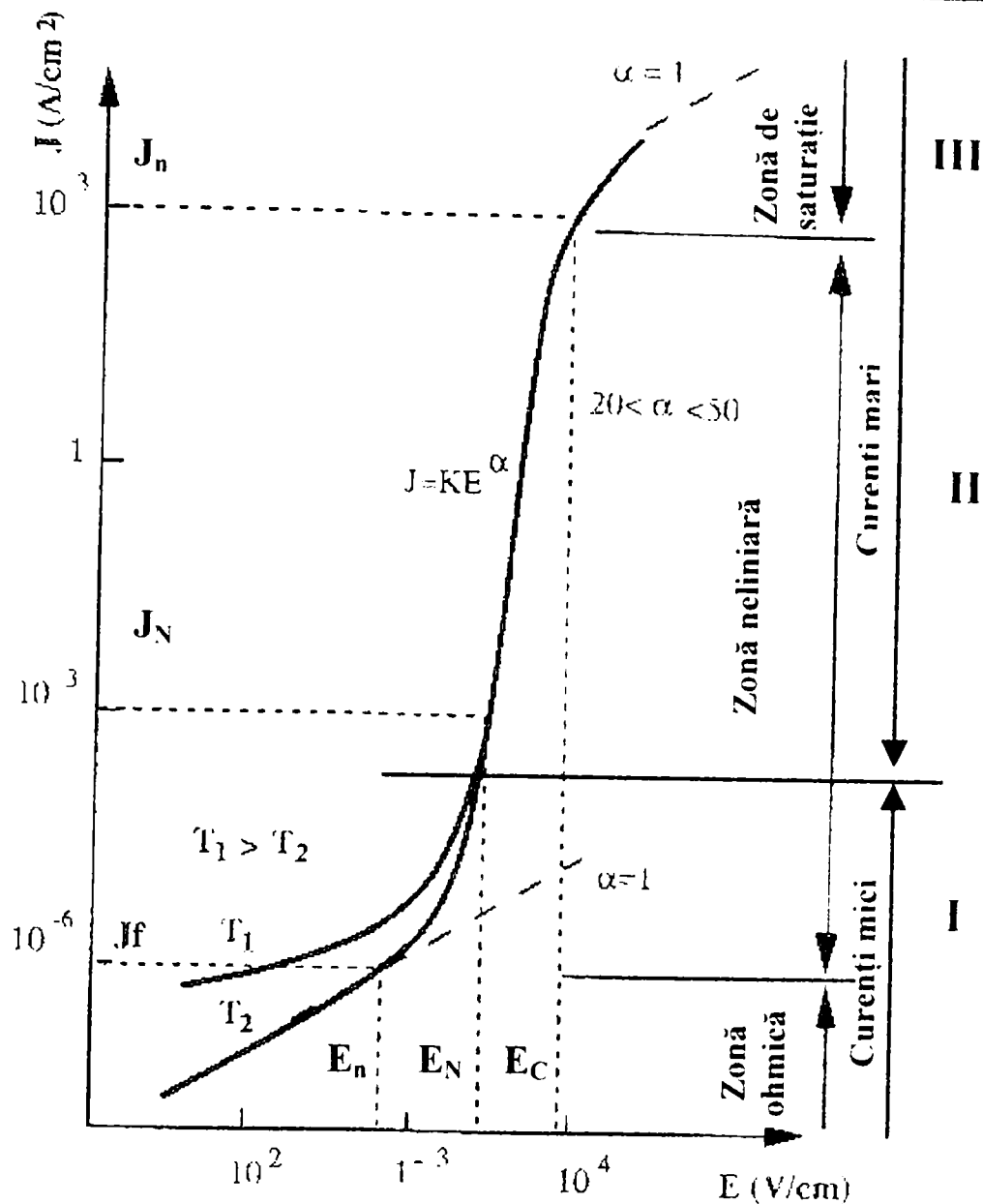


Figura III.2: Caracteristica  $J(E)$  a unui varistor cu ZnO.

Caracteristica curent-tensiune prezintă trei zone importante, fiecare fiind caracterizată prin proprietăți de conducție particulare [7],[16], [88] :

#### ▪ I – zona ohmică

Corespunde curenților slabi, dependenți de tensiune printr-o relație ohmică (liniară). Rezistivitatea electrică a varistorului în aceste zone este de  $10^4 - 10^{10} \Omega\text{m}$ . Materialul poate fi considerat ca izolator.

Această zonă trebuie avută în vedere la dimensionarea echipamentului de protecție pentru a plasa tensiunea nominală  $U_n$  (pe grafic intensitatea câmpului electric  $E_n$ ) a rețelei sau echipamentului de protejat (practic punctul de funcționare în regim de serviciu permanent), pentru a avea curenți de scurgere cât mai mici, (sub 1 mA la medie și înaltă tensiune). Ea corespunde curentului de scurgere  $I_f$  (respectiv densitatea de curent  $J_f$ ).

În această zonă curentul este determinat de conducția termică, așa cum rezultă și din caracteristica  $J(E)$  ridicată pentru temperaturi ale mediului ambiant de  $T_1$  și respectiv  $T_2$ ,  $T_1 > T_2$ .

Temperaturile ridicate ale mediului ambiant în care este plasat varistorul, sau chiar creșterea temperaturii acestuia prin efect Joule-Lenz favorizează depășirea mai ușoară a barierei de potențial de către electronii liberi, ceea ce duce la creșterea curentului, așa cum se poate observa și din formula 3.3 [2]:



$$J = A(U) \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{q_e \cdot \phi(U)}{k \cdot T}} \quad (3.3)$$

unde, mărimile utilizate reprezintă:

- $U$  – tensiunea electrică aplicată;
- $q_e$  – sarcina electronului ( $= 1,6 \cdot 10^{-19}$  [C]);
- $k$  – constanta lui Boltzman ( $= 5,67 \cdot 10^{-8}$  [W/(m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>)]);
- $T$  – temperatura absolută (pe scară Kelvin);
- $\phi(U)$  – înălțimea barierei de potențial;
- $A(U)$  – constanta de radiație a lui Richardson, care este funcție de tensiunea aplicată și este foarte diferită de constanta lui Richardson-Dushman pentru un metal;

Formula reflectă destul de bine realitatea. În practică, aceste dependențe sunt înlocuite cu funcții polinomiale sau exponențiale simple, utilizând metode numerice de aproximare.

### ▪ II – zona neliniară

În această zonă se manifestă efectul de varistor, acest efect fiind bine descris de relațiile (3.1) și (3.2).

Coeficientul de nelinearitate poate fi deci asimilat cu panta caracteristicii și calculat cu formula 3.4:

$$\alpha = \frac{d(\log(I))}{d(\log(U))} \quad (3.4)$$

Valorile normale ale coeficientului de nelinearitate  $\alpha$  sunt cuprinse între 20 și 50, uneori ajungând la 70. Tensiunea de prag a varistorului (sau echipamentului),  $U_N$  (respectiv intensitatea câmpului  $E_N$ ), una din mărimile de referință, ea fiind măsurată convențional la o densitate de curent de 1 mA/cm<sup>2</sup>, sau, pentru simplificarea măsurărilor la un curent de 1 mA.

De asemenea, tot pentru simplificare, vom face referire directă la tensiune și curent, nu la intensitatea câmpului și densitatea de curent.

Această porțiune de caracteristică nu este dependentă de temperatură, așa cum se constată ușor și din grafic. Valoarea lui  $\alpha$  este variabilă de-a lungul caracteristicii și nu se poate considera o valoare prestabilită, determinarea lui  $\alpha$  făcându-se exclusiv experimental, din caracteristica  $I(U)$ , între două puncte alese convențional. Operând cu caracteristici logaritmice sau semilogaritmice, este mai ușor să se determine la 1 mA, respectiv 10 mA, conform relației 3.5.

De fapt această relație este dedusă prin logaritizarea relației 3.4, care conduce la următoarea relație pentru  $\alpha$  (prin explicitarea diferențialelor ca diferențe finite):

$$\alpha = \frac{\ln I_2 - \ln I_1}{\ln U_2 - \ln U_1} \quad (3.5)$$

Relația 3.5 face referiri la două puncte de pe caracteristică, luate arbitrar, de exemplu cel cu un curent de 1 mA ( $I_1$ ) și cel cu un curent de 10 mA ( $I_2$ ) și tensiunile corespunzătoare, cele două puncte fiind suficient de apropiate pentru a explicita diferențiala.

În această porțiune conducția se realizează prin efect de tunel, conform [33] sau prin generalizarea mecanismului termoelectronic [7].

### ▪ III zona de saturație

Corespunde curenților foarte ridicați, de câțiva kA.

Aici se situează curentul de descărcare nominal  $I_n$  (respectiv densitățile de curent corespunzătoare  $J_n$ ), precum și curentul maxim al varistorului ( $I_{max}$ ), în regim de șoc, dincolo de care se produce distrugerea iremediabilă a elementului. Caracteristica devine din nou ohmică, curentul este limitat doar de rezistența lineară a granulelor de ZnO, rezistivitatea materialului în



această zonă fiind de ordinul  $0,5 \times 10^{-2}$  [ $\Omega\text{m}$ ]. Aici varistorul poate fi asimilat cu un material conductor electric.

Se pot introduce relațiile 3.6 și 3.7 între tensiunea  $U$  și curentul  $I$  (respectiv intensitatea câmpului electric  $E$  și densitatea de curent  $J$ ), pentru descrierea conductivității în acest domeniu:

$$U = R_g I \quad (3.6)$$

sau:

$$E = \rho_g J \quad (3.7)$$

Unde mărimile reprezintă:  $R_g$  – rezistența electrică a granulelor de ZnO;  
 $\rho_g$  – rezistivitatea electrică a granulelor de ZnO;

Calitățile de element de protecție ale varistorului sunt asigurate în zonele II și III.

În zonele de funcționare normală a varistorului (I și II), repartiția potențialului la nivel microscopic, pe varistoarele elementare din structura sa, depinde esențial de rezistivitatea fiecărei granule.

După cum vom detalia și în capitolele următoare, caracteristica curent-tensiune a varistoarelor depinde de toate barierele de potențial care se stabilesc între două granule de ZnO învecinate, deci fiecare joncțiune constituie un microvaristor elementar care poate fi caracterizat individual, lucru ce poate fi făcut cu ajutorul unor tehnici speciale.

### III.2. Tehnologia de fabricație a varistoarelor pe bază de ZnO și influența tehnologiei folosite asupra calității acestora

La ora actuală există diverse procedee fizico-chimice de fabricare a varistoarelor pe bază de ZnO. Pentru exemplificare, toate referirile se vor face la procedeul practicat și utilizat de către autor, în timpul stagiului efectuat în 1998 la Laboratorul "Génie Electrique" al Universității PAUL SABATIER din Toulouse. Scopul întregului demers a fost familiarizarea cu tehnologia de fabricație și producerea unei serii de varistoare cu capacitate mărită de absorbție în energie, utilizate pentru experimentele ulterioare.

Proprietățile pe care trebuie să le asigure varistoarele sunt:

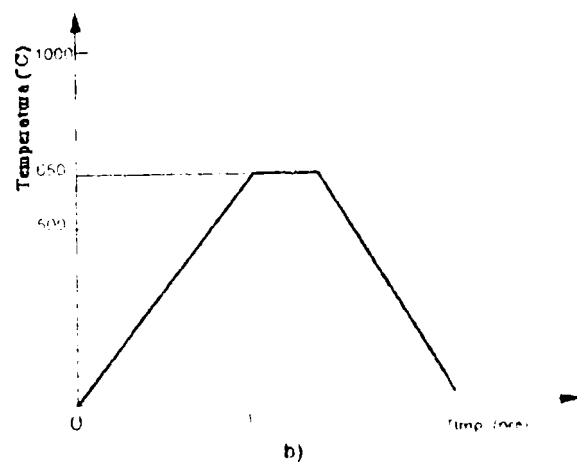
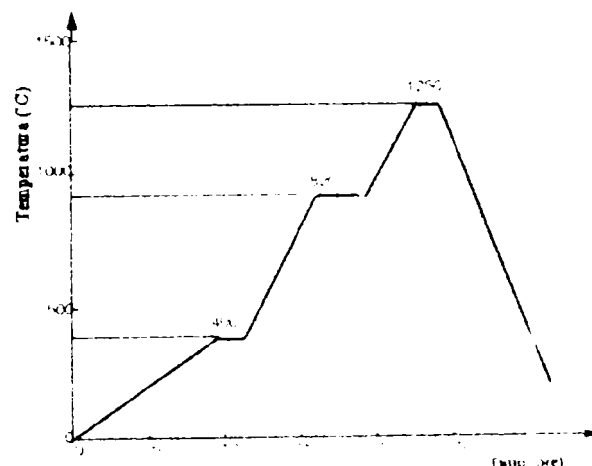
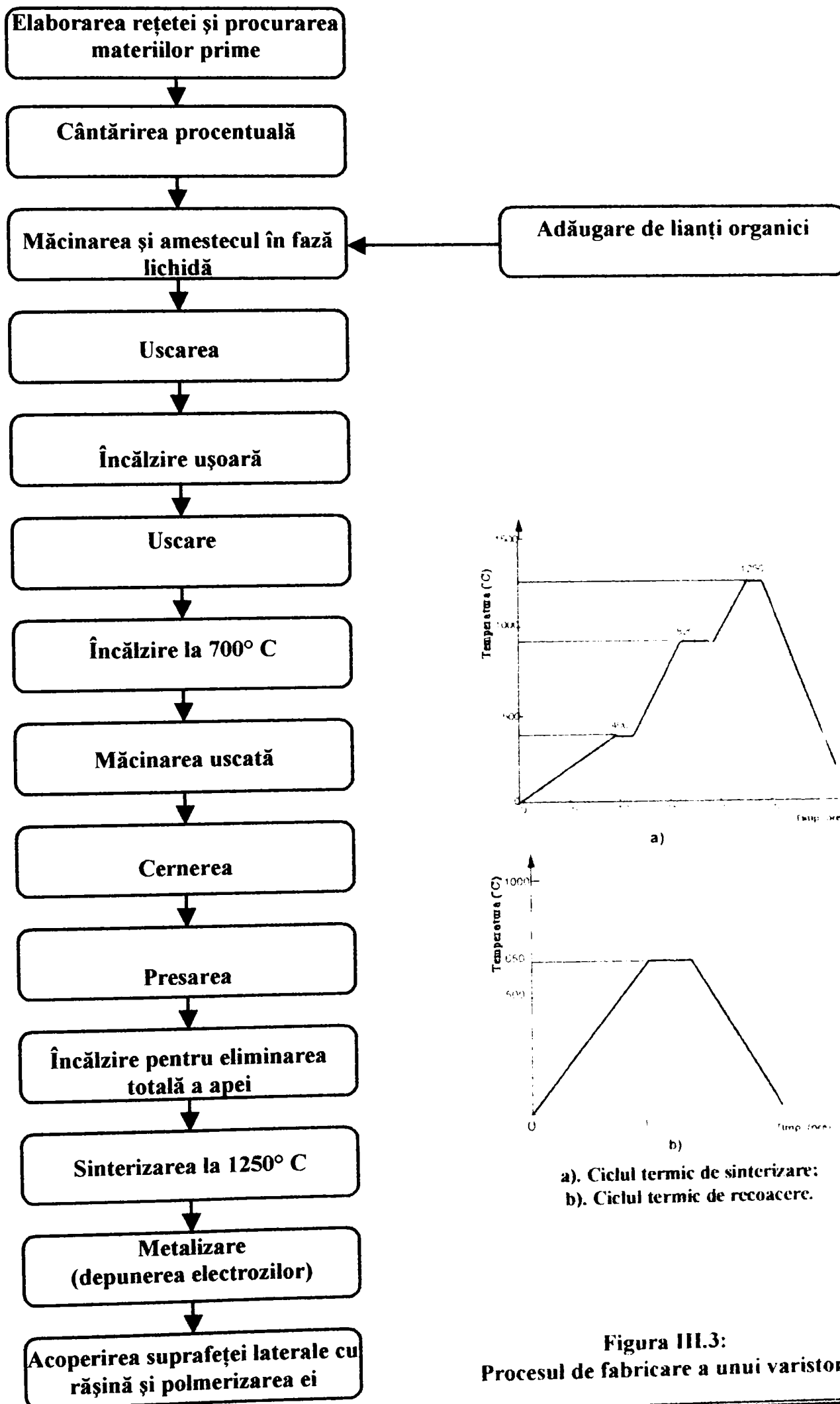
- Tensiune de prag suficient de ridicată pentru un răspuns excelent la toate tipurile de solicitări;
- O bună comportare la solicitările electrice, termice, chimice și mecanice sau combinate;

Tensiunea de prag depinde în mod esențial de dimensiunea granulației pulberii de oxid metallic. În general, dacă se dorește obținerea unui varistor de bună calitate trebuie avute în vedere următoarele aspecte [16]:

- Controlul proprietăților materiilor prime care intră în compoziție (puritate, reactivitate chimică, repartiție granulometrică, densitate etc.);
- Prepararea unei pudre omogene;
- Respectarea parametrilor tratamentelor termice;
- Controlul permanent al atmosferei din cuptor în timpul încălzirii;
- Natura electrozilor;

#### III.2.1. Operațiile procesului de fabricație

Oxizii utilizați ca materie primă se prezintă sub formă de pudre cristaline. Dimensiunile cristalelor sunt variabile, în funcție de tipul oxizilor, dar rămân inferioare valorii de  $10 \mu\text{m}$ , cristalele de ZnO fiind baza compoziției. Etapele fabricației sunt prezentate în diagrama din figura III.3.



a). Ciclul termic de sinterizare;  
b). Ciclul termic de recoacere.

Figura III.3:  
Procesul de fabricare a unui varistor.





### Cântărirea

Cântărirea componentelor se efectuează cu o balanță cu o precizie de 0,1 mg.

Compoziția chimică inițială a unui varistor este prezentată în tabelul III.1. [16], conform unei rețete proprietate a companiei franceze SOULE S.A. și obținută la L.G.E.Toulouse, masele fiind raportate la 500 g de amestec. Rolul fiecărui component va fi detaliat ulterior.

| Substanță                         | Procentaj [%] | Masă [g] la 500 g amestec |
|-----------------------------------|---------------|---------------------------|
| ZnO                               | 82,25         | 411,28                    |
| MnO <sub>2</sub>                  | 0,75          | 3,75                      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 1,32          | 6,601                     |
| Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>    | 2,09          | 10,457                    |
| NiO                               | 0,648         | 3,244                     |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 4,047         | 20,235                    |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 8,862         | 44,345                    |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 0,0756        | 0,378                     |
| MgO                               | 0,0438        | 0,219                     |
| Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> | 0,0260        | 0,130                     |

Tabelul III.1. Compoziția chimică inițială a unui varistor.

### Măcinarea

După cântărire, oxizii sunt măcinați într-un cilindru cu bile. Această operație de amestecare se face mult mai ușor în fază lichidă, prin adăugarea de apă distilată și agent de polimerizare organic. Această operație durează în jur de 30 de ore.

### Încălzirea ușoară, uscarea și măcinarea uscată

Pasta obținută în etapa precedentă este uscată prin expunere deasupra unei plăci încălzite, sau într-o etuvă, până la evaporarea completă a apei.

După această operație, pudra rezultată care are o granulație neuniformă trebuie din nou măcinată, dar de această dată se face o măcinare uscată care durează câteva ore.

Înainte de măcinare pudra este din nou supusă încălzirii, de data aceasta la 700 grade C.

### Cernerea

După măcinarea uscată se face cernerea cu scopul de a separa granulele din pudră cu o dimensiune mai mare de 200 μm. Aceasta are ca principal scop facilitarea umplerii formelor și apoi presarea pudrei în aceste forme.

### Presarea

Pudra este turnată într-o formă cilindrică și apoi presată la 400 – 600 barr.

Dimensiunile pastilelor ce se vor obține sunt stabilite în funcție de curentul nominal (diametrul) și tensiunea de prag (înălțimea pastilei) ce se doresc a fi asigurate.

### Sinterizarea

Aceasta este operația cea mai importantă, deoarece de parametrii ciclului termic depind foarte mult reacțiile fizico-chimice între diferitele elemente constituente, structura și proprietățile varistorului.

În prima fază are loc o creștere cu un gradient mic a temperaturii (în 10 ore), până la 400°C, temperatură care se menține constantă timp de 3 ore. În această fază are loc eliminarea oricăror urme de apă. Urmează apoi creșterea până la 840° C, cu un palier de cel puțin o oră la această temperatură. În această fază se realizează structura cristalină a materialului. În ultima fază are loc din nou o creștere la 1250 °C și apoi o răcire lentă până la temperatura mediului ambiant. Datorită numărului mare de constituanți și etapelor procesului termic precum și a temperaturilor mari, cunoașterea fizico-chimică a proceselor din interiorul varistorului este încă imperfectă.



În timpul încălzirii la 1250 °C are loc o evaporare totală a oxizilor aditivi, în primul rând a oxidului de bismut. Încălzirea varistorului este evident neuniformă, ea fiind mai importantă la suprafață decât în centru.

În urma acestei operații se constată o reducere a volumului inițial al pastilei cu circa 20%, deci o creștere a densității spre densitatea teoretică de 5,7 kg/m<sup>3</sup>. Densitatea ajunge la 98-99% din această valoare teoretică. Acest fapt va fi evidențiat și prin dimensiunea finală a pastilei (diametrul scade cu 10% la toate seriile fabricate iar înălțimea scade cu 15%).

Procesul de sinterizare la cald împreună cu cel de coacere sunt reprezentate grafic în figura III.3 a), și b).

### Depunerea electrozilor

După sinterizarea eşantioanelor, pe cele două fețe ale pastilei cilindrice se depune prin serigrafie sau cu pensula o pastă conductoare, pe bază de Ag sau mai rar de Al, aceste suprafețe constituind electrozii pastilei sau cilindrului varistor.

### Recoacerea varistorului

Pentru ca pasta de pe suprafețele frontale să devină metalică și deci să aibă loc formarea electrozilor pastilei, este necesar un tratament termic de recoacere la peste 600 °C, tratament prezentat în figura III.3.b).

### Acoperirea suprafeței laterale cu rășină

Pe periferia eşantionului se depune o rășină epoxidică izolantă. Această căptușire se face cu scopul de a proteja varistorul contra acțiunii mediului ambiant, a agresiunilor chimice, dar mai ales pentru a evita conturnările care pot apărea la aplicarea unor șocuri de curent și tensiune de mare amplitudine.

În prealabil varistorul se încălzește la 220 °C timp de 2-3 ore pentru ca rășina să adere perfect și să polimerizeze pe suprafața laterală.

După această operație varistoarele vor fi supuse testelor de caracterizare și verificare a calității, teste care vor fi ulterior prezentate.

## III.2.2. Microstructura și proprietățile fizice ale varistoarelor pe bază de ZnO

Varistoarele sunt în esență niște ceramici policristaline cu proprietăți semiconductoare.



Figura III.4: Structura unei pastile de ZnO văzută la microscopul electronic.

Structura este relativ simplă, formată din granule de ZnO separate prin spații intergranulare.

Figura III.4. prezintă ceramică policristalină, așa cum este observabilă ea la microscopul electronic [33].

Această structură se aseamănă cu un zid de piatră, în care granulele de ZnO sunt "pietrele", iar ceilalți oxizi metalici rămași după procesul de fabricație realizează "mortarul", care este responsabil de caracterul nelinier al varistorului.

Observațiile la microscop au evidențiat trei părți componente în structura unui varistor:

- Granulele de ZnO, a căror dimensiune variază în funcție de tratamentul termic și compoziția chimică, în mod obișnuit fiind în jurul a 20 μm.
- Stratul intergranular bogat în Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a cărui dimensiune variază între 10<sup>-3</sup> și 10<sup>-1</sup> μm, în funcție tot de tratamentul termic aplicat;
- Granulele fazei izolante, a cărei structură de bază este constituită din oxizi de Co, Sb, Bi, Mn, Cr. Acestea au dimensiunile de ordinul 0,1 – 10 μm.



Granulele de ZnO au structura unui semiconductor dopat  $n$ , cu o mare concentrație a donatorilor. Electronii de conducție sunt pe de o parte de natură intrinsecă, legați de atomii interstițiali, iar pe de altă parte de natură extrinsecă, datorati dopajului cu Co și Mn.

Proprietățile fizice ale rețelei cristaline sunt [11]:

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| ▪ Rețea:                      | hexagonală;   |
| ▪ Constantele rețelei:        | $a = 3,24 \text{ \AA}$ ; $c = 5,19 \text{ \AA}$ ; $c/a = 1,6$ ; |
| ▪ Masa molară:                | $81,37 \text{ g/mol}$ ;   |
| ▪ Densitatea volumică:        | $5,7 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$ ;                                 |
| ▪ Căldura specifică:          | $0,7 \text{ J/(g}\cdot\text{grad)}$ la $300 \text{ K}$ ;        |
| ▪ Temperatura de topire:      | $2300 \text{ K}$ ;  |
| ▪ Lărgimea benzii interzise:  | $3,2 \text{ V}$ ;   |
| ▪ Densitatea atomilor donori: | $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ;                                     |
| ▪ Mobilitatea electronică:    | $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ;                                  |
| ▪ Rezistivitatea electrică:   | $0,5 \text{ }\Omega\text{cm}$ ;                                 |

Izolația granulelor de ZnO se comportă ca un dielectric cu permitivitatea dielectrică relativă în jurul valorii de  $\epsilon_r = 8,5$ . Căderea de tensiune pe un astfel de spațiu intergranular este de aproximativ  $3 \text{ V}$ . Numărul acestor spații intergranulare va determina tensiunea de prag  $U_N$ . Această structură va determina mecanismele de conducție și degradare care vor fi prezentate ulterior.

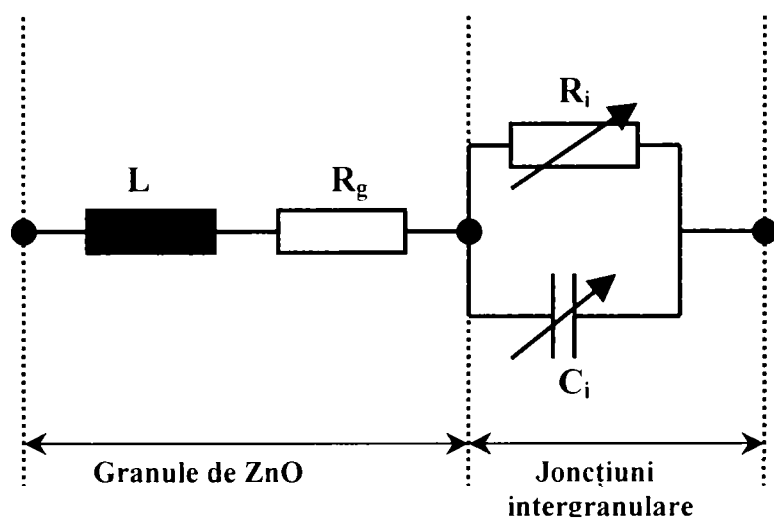


Figura III.5: Schema echivalentă a unui varistor pe bază de ZnO.

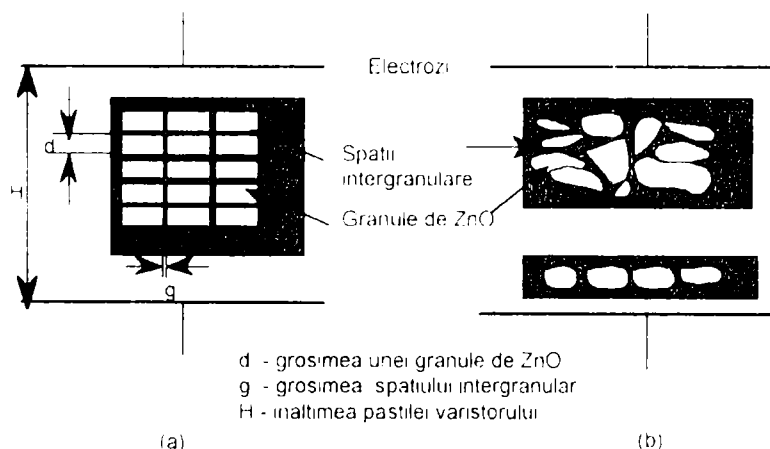


Figura III.6. Microstructura unui varistor pe bază de ZnO: a). teoretică (idealizată); b) reală.

unui varistor, după terminarea tuturor operațiunilor de fabricație este dată în tabelul III.2. [86], împreună cu proprietățile fizico-chimice ale fiecărui constituent major.

Ea este diferită de cea inițială datorită evaporării majorității oxizilor adiționali în timpul procesului tehnologic.

Schema echivalentă prezentată pentru un microvaristor (o granulă de ZnO înconjurată de spațiu izolat intergranular) la nivel microscopic, se poate reprezenta ca în figura III.5.

Schema electrică echivalentă pentru întregul varistor se poate obține prin combinații de asemenea scheme elementare în paralel și în serie.

Prezența inductanței în schemă nu a putut fi explicată încă de nici o teorie [16]. Așadar inductanța înș este pusă în evidență de experimente, mai ales în cazul regimurilor tranzitorii.

Caracterul inductiv se manifestă printr-o întârziere a curentului față de tensiunea pe care o observăm în situația unui șoc de curent de mare amplitudine.

Microstructura corespunzătoare acestui model, atât cea reală cât și cea idealizată, sunt prezentate în figura III.6 [39]. Pe figură sunt marcate și dimensiunile geometrice cele mai importante pentru varistor.

Așa cum indică și denumirea lor, varistoarele au în componența lor în cea mai mare parte ZnO, la care se adaugă un număr de oxizi aditivi, fiecare având un anumit rol.

Compoziția chimică aproximativă a



Compoziția chimică diferă de la un producător la altul.

| Componenta                     | Compoziția procentuală [% molare] | Cantitate la 10 g produs [g] | Masa molară [g] | Densitatea [g/cm <sup>3</sup> ] | Tipul rețelei cristaline și culoarea la 25°C | Temperatura de topire [°C] |
|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------|---------------------------------|--|----------------------------|
| ZnO                            | 97,0                              | 9,117                        | 81,37           | 5,70                            | Hexagonală Albă                              | 2000                       |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,5                               | 0,269                        | 496,96          | 8,90                            | Romboedrică Galbenă                          | 820                        |
| MnO <sub>2</sub>               | 0,5                               | 0,050                        | 86,94           | 5,03                            | Romboedrică Neagră                           | 535                        |
| Co <sub>3</sub> O <sub>2</sub> | 0,5                               | 0,139                        | 240,80          | 6,07                            | Cubică Neagră                                | 1935                       |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,5                               | 0,088                        | 151,99          | 5,21                            | Hexagonală Verde                             | 2435                       |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1,0                               | 0,337                        | 291,50          | 5,20                            | Cubică Albă                                  | 656                        |

**Tabelul III.2: Compoziția chimică finală a unui varistor și proprietățile fizico-chimice ale fiecărui constituent.**

După cum s-a constatat anterior, componenta principală a varistoarelor este oxidul de zinc (ZnO). Acesta se prezintă sub formă de pulbere cristalizată, de culoare albă, puritatea lui ajungând până la 99%. Impuritățile cele mai importante sunt sulfatii (0,01 %), arsenicul (0,005 %), plumbul (0,005 %), azotul (0,001 %), clorul (0,001 %), calciul (0,001 %).

### III.2.3. Influența tehnologiei de fabricație și a diversilor componenți asupra parametrilor varistoarelor

Proprietățile electrice ale varistoarelor sunt influențate de concentrația oxizilor aditivi cât și de dimensiunea granulației pulberii.

Tensiunea de prag ( $U_N$ ) a varistorului depinde de numărul de straturi intergranulare și deci de dimensiunile granulelor de ZnO. De asemenea, coeficientul de neliniaritate  $\alpha$  și curentul de scurgere la tensiunea de serviciu ( $I_f$ ) sunt influențați de proporția oxizilor suplimentari folosiți ca lianți sau ca dopanți.

În esență chiar conducția electrică a varistorului este determinată de barierele de potențial care se formează la nivelul spațiilor intergranulare [63].

Aditivii cei mai importanți sunt cei precizați în tabelul III.3., împreună cu rolul jucat de fiecare în ansamblul varistorului. Pe lângă aceștia, în structura varistoarelor se introduc și o serie de dopanți, cum ar fi: Cr, Sb, Ba, Ni, Ti, Al, Li [16], care sunt prezentați în tabelul III.4.

| Componentul                                     | Utilitatea  |
|---|---|
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | Joacă un rol esențial în manifestarea efectului de varistor, adică a neliniarității pronunțate a caracteristicii curent-tensiune. Observațiile la microscopul electronic [26] au arătat că bismutul se localizează între granulele conductoare electrice de ZnO, asigurând o izolație electrică eficientă. Concentrația de Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> în pulberea inițială influențează valoarea curentului de scurgere ( $I_f$ ) și a exponentului de neliniaritate $\alpha$ |
| Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> MnO <sub>2</sub> | Sunt oxizi indispensabili obținerii unei caracteristici puternic neliniare. Rolul lor este de a dopa granulele de ZnO și deci de a deplasa nivelul Fermi, modificând structura sarcinii spațiale și facilitând micșorarea înălțimii barierei de potențial;  |
| Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                  | Oxidul de stibiu are rolul de a fixa Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> la temperaturi înalte și astfel limitează creșterea dimensiunii granulelor de ZnO. În acest fel este fixată tensiunea de prag $V_N$ pentru o anumită înălțime a pastilei varistorului.  |

**Tabelul III.3: Influența unor aditivi asupra proprietăților varistorului.**

Adăugarea altor aditivi nu modifică microstructura electronică a benzilor de energie, dar contribuie la ameliorarea caracteristicilor electrice ale materialului obținut. Astfel, dacă oxizii de Sb și Cr limitează dimensiunile granulelor, Ti sau Si favorizează creșterea lor.



Alumiul, prin nitrații și oxizii săi diminuează rezistivitatea materialului, pe când Li are un efect contrar. O sistematizare a influenței fiecărui component asupra proprietăților fizico-chimice și a celor electrice este prezentată în tabelul III.4. [43].

| Elementul     | Proprietăți fizico-chimice specifice   | Proprietăți electrice specifice  |
|---------------|--|--|
| Bi            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Permite sinterizarea în fază lichidă;</li> <li>▪ Concentrație ridicată a dopanților în spațiul intergranular;</li> <li>▪ Aderența la oxizii de Al.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mărește curentul de scurgere</li> </ul>                           |
| Co            |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dopează granulele de ZnO</li> </ul>                               |
| Mn            |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dopează granulele de ZnO</li> </ul>                               |
| Cr            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Limitează dimensiunea granulelor de ZnO.</li> </ul>   |  |
| Sb            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Limitează dimensiunea granulelor de ZnO.</li> </ul>   |  |
| Ti            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Crește dimensiunea granulelor de ZnO</li> </ul>   |  |
| Si            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Crește dimensiunea granulelor de ZnO</li> </ul>   |  |
| B             |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stabilizează curentul în timp</li> </ul>                          |
| Ni            |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduce curentul de scurgere</li> </ul>                            |
| Al            |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Scade rezistivitatea electrică;</li> <li>▪ Crește tg δ</li> </ul> |
| Ga, In, Zr    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Scad rezistivitatea electrică</li> </ul>                          |
| Li, K, Na, Cu |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cresc rezistivitatea electrică</li> </ul>                         |

**Tabelul III.4: Influența unor elemente chimice asupra proprietăților fizico-chimice ale varistoarelor, sau asupra celor electrice.**

Ameliorarea proprietăților electrice ale varistoarelor se poate face atât prin optimizarea concentrației fiecărui constituent, cât și prin modificarea parametrilor ciclului termic de sinterizare.

M. Matsuoka [25] a realizat încă de la începutul anilor '70 un material varistor care pe lângă ZnO mai are doar 5 oxizi aditivi. Acest material este considerat de referință, fiind admirabil prin simplitatea compoziției chimice și performanțele electrice obținute (având un coeficient de neliniaritate  $\alpha = 50$ , determinat între 1 și 10 mA).

Tabelul III.5.[33] rezumă evoluția coeficientului de neliniaritate  $\alpha$  în funcție de numărul de aditivi și temperatura de sinterizare a ciclului termic.

| Aditivi<br>(în concentrație molară de 0,5 % fiecare)   | Temperatura de sinterizare<br>[°C] | Intensitatea electrică de prag<br>$E_s$ [V/mm] | $\alpha$ |
|--|------------------------------------|--|----------|
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 1150                               | 10   | 4        |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 1150                               | 65   | 3        |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CoO   | 1250                               | 30   | 13       |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MnO   | 1350                               | 50   | 18       |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MnO CoO   | 1350                               | 30   | 22       |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MnO CoO Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                | 1250                               | 48   | 21       |
| Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MnO CoO Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1350                               | 135  | 50       |

**Tabelul III.5: Dependența caracteristicilor electrice de concentrația aditivilor și temperatura de sinterizare.**

De mare importanță pentru fabricantul și utilizatorul de varistoare este influența diametrului mediu al granulelor de ZnO asupra tensiunii de prag  $U_N$ . Un varistor cu ZnO are în componența sa granule de diferite dimensiuni. Prin urmare, va exista o cale preferențiată de trecere a curentului pe drumul de rezistență minimă, traversând granulele de ZnO care au rezistența electrică cea mai mică.

Tensiunea de prag asociată unei asemenea granule  $v_N$  se definește ca fiind egală cu înălțimea barierei de potențial între două granule alăturate, anume:

$$u_N = U_{bi} \approx 3 V \quad (3.8)$$





Presupunând că trecerea curentului se face prin  $n$  microvaristoare înseriate pe înălțimea  $H$  a varistorului și considerând că toate granulele de ZnO au același diametru mediu  $d_g$ ,

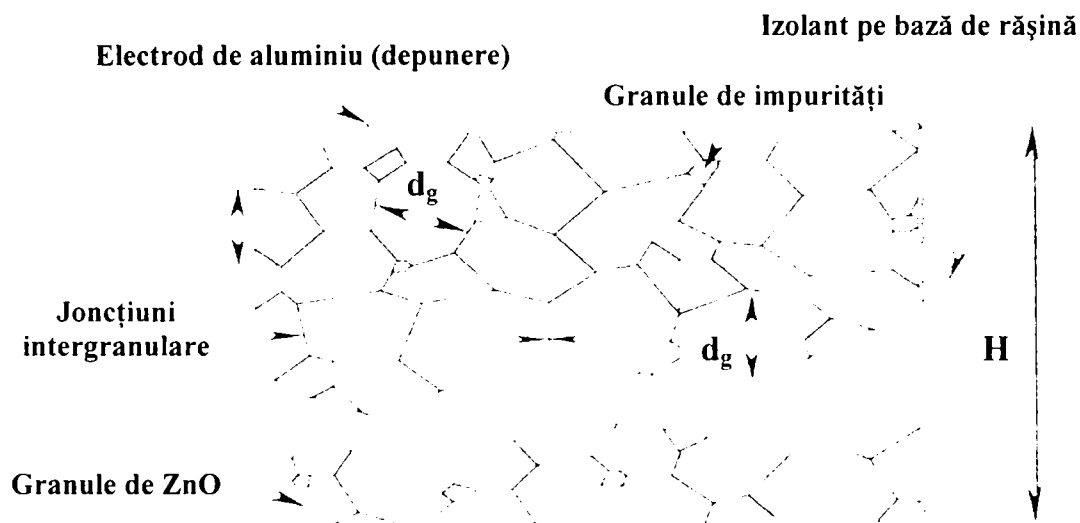
$$n = H/d_g \quad (3.9)$$

și deci tensiunea de prag a varistorului va fi proporțională cu numărul de straturi de ZnO, deci cu înălțimea  $H$  a pastilei ceramice și, efectuând înlocuirile, obținem:

$$V_N = n \cdot u_N = \frac{H}{d_g} \cdot u_N = \frac{H}{d_g} \cdot U_{bi} = \frac{H}{d_g} \cdot 3[V] \quad (3.10)$$

După cum se constată din această ecuație, stabilind tensiunea de prag  $U_N$ , necesară varistorului și cunoscând granulația medie a granulelor de ZnO, putem calcula cu aproximație înălțimea pe care va trebui să o aibă pastila ceramică. Calculul practic se face pornind de la constatarea că dimensiunea medie a granulelor de ZnO este aproximativ  $20 \mu\text{m}$  [7].

În figura III.7 prezentăm o secțiune de principiu, realizată printr-un varistor gata fabricat, de grosime micrometrică [16].



**Figura III.7: Secțiune de principiu printr-un varistor.**

Această dimensionare se referă doar la înălțimea pastilei. Diametrul pastilei se va alege după criterii mult mai complicate, care țin de curentul maxim pe care îl suportă varistorul și de stabilitatea termică ce se dorește a fi obținută.

Pentru domeniul de joasă tensiune, conform standardelor UL#1449 (*Transient Voltage Surge Suppressors*, File E103662) și CSA 2221-01 (*Accessories and Parts for Electronic Products*, File LR109328) [79], există trei categorii de varistoare, fiecare având următoarele diametre standardizate, înălțimea fiind proporțională cu tensiunea de prag, nefiind standardizată:

- Varistoare de uz general, îmbrăcate complet în rășină epoxidică, cu conectori radiali:  
Diametrele standard sunt: 5, 7, 10, 14, 18 respectiv 20 mm;
- Varistoare cu capacitate sporită de absorbție a energiei, fără conectori, cu fețele acoperite cu electrozi prin depunere și suprafața laterală acoperită cu rășină epoxidică:  
Diametrele standard sunt: 25, 32, 40 și 60 mm;
- Varistoare cu destinație specială (aplicații militare sau alte aplicații aparte).

Vom prezenta o metodă empirică de corelare a diametrului varistorului care răspunde celor două cerințe contradictorii:

- Realizarea unei serii de varistoare cu același diametru și înălțime variabilă;
- Corelarea diametrului varistorului cu înălțimea cerută de capacitatea de absorbție în energie;

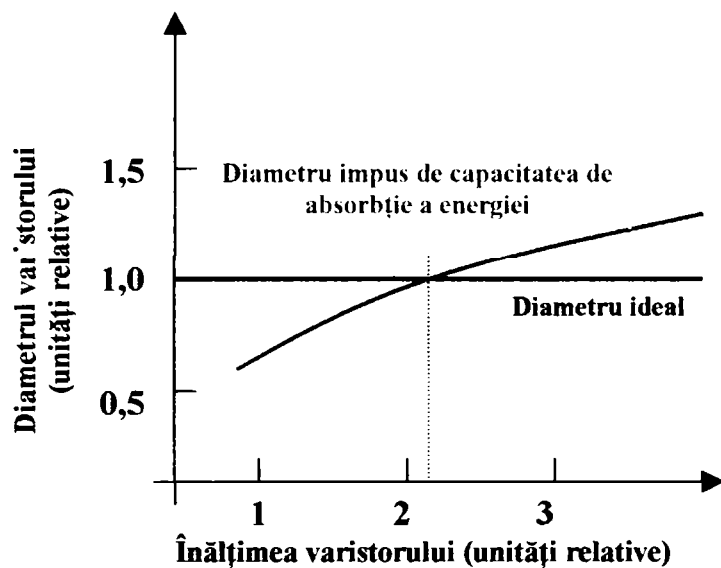


Figura III.8: Alegerea diametrului varistorului.

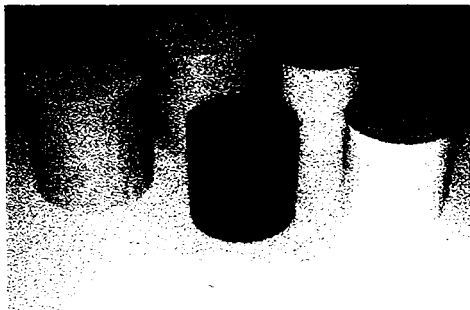


Figura III.9:  
Serie de varistoare pe bază de ZnO. pentru medie tensiune.

În figura III.8 prezentăm pe scurt realizarea compromisului între cele două [30]:

Se observă că până la un raport între înălțime și diametru de aproximativ 2 sau 2,1, se poate realiza o serie de varistoare de diametru constant, impus de prima valoare a grosimii aleasă.

Peste această valoare a grosimii (exprimată la fel ca și diametrul în unități relative), diametrul solicitat de un varistor de înaltă tensiune, pentru a face față șocurilor vor venite și a putea absorbi energia acestora, este mai mare decât cel corespunzător începutului de serie. În consecință se impune trecerea la un nou

Se poate genera o serie nouă cu acest diametru inițial. Se realizează serii de varistoare, care diferă doar prin înălțime (tensiune  $U_N$ ), diametrul fiind identic.

În România se produc experimental doar varistoare destinate aplicațiilor la joasă tensiune, la I.C.P.E. București, conform S.F. 64/1996, pe baza unei tehnologii asemănătoare celei prezentate aici [77].

În figura III.9 prezentăm o serie de varistoare

### III.3. Uzura varistoarelor pe bază de ZnO în exploatare

Înglobate în echipamentele de protecție, varistoarele supuse solicitărilor electrice intense suferă modificări ale proprietăților lor inițiale, care în anumite cazuri pot afecta substanțial capacitatea lor de a asigura protecția la supratensiuni. Deteriorarea varistoarelor (uzura) se reflectă în modificarea caracteristicii curent-tensiune, și mai ales a tensiunii de prag  $U_N$ .

Evaluarea gradului de uzură a unui varistor se face:

- De către fabricant, după primele încercări de lot (conform CECC 42000 Test 4.7, 4.20, 4.10.1, 4.10.2, 4.11, 4.12, 4.15, 4.18.1, C2.1, C2.2 etc.);
- De către utilizator, ori de câte ori este nevoie, după aceleași standarde sau după norme proprii.

Criteriile de evaluare ale uzurii [63], [59] sunt, după aceleași standarde: [79].

- Variația tensiunii de prag raportată la valoarea de catalog:

În general  $\left| \frac{\Delta U_N}{U_N} \right| \leq 10\%$ , dar pentru unele solicitări mecanice:  $\left| \frac{\Delta U_N}{U_N} \right| \leq 5\%$  ;

- Observarea vizuală (nu prezintă defecte vizibile și marcajul este lizibil)

În funcționarea varistorului, uzura se manifestă prin:

- Degradare (îmbătrânire)
- Distrugere



### III.3.1. Degradarea varistoarelor

Solicitările care pot produce degradarea sunt de diverse tipuri:

- Polarizarea în funcționare normală (la tensiunea nominală), care în cazul unor temperaturi ridicate ale mediului ambiant poate determina creșterea exagerată a curentului de scurgere prin varistor;
- Supratensiunile violente, de scurtă durată, dar de mare amplitudine, datorate descărcărilor atmosferice;
- Supratensiunile de lungă durată rezultate în urma manevrelor efectuate în instalația electrică;
- Descărcările parțiale din apropierea varistorului;
- Solicitățile electrice, termice, mecanice și chimice ale mediului înconjurător asupra varistorului.

Ca urmare a degradării se va constata o creștere a curentului de scurgere în funcționare normală și o scădere a tensiunii de prag.

În cazul solicitărilor unidirecționale (în curent continuu), caracteristicile  $I(U)$  vor prezenta un caracter asimetric, o schimbare mai pronunțată observându-se pentru încercările cu tensiuni de polaritate inversă celor aplicate pentru degradare. Supunerea varistorului la solicitări cu tensiuni alternative determină o degradare simetrică.

Aceste observații experimentale sugerează o deformare a barierei Schottky cu o scădere a înălțimii barierei de potențial provocată de o modificare a distribuției sarcinii spațiale la suprafața de separație.

Majoritatea modelelor referitoare la acest subiect explică la nivel microscopic fenomenul degradării varistorului printr-o deplasare a ionilor sub acțiunea solicitărilor câmpului electric aplicat.

Fenomenul de degradare al varistoarelor la nivel microscopic este evidențiat prin deformarea barierei de potențial, datorate migrării ionilor și modificării concentrației ionice de la suprafața de separație intergranulară, iar la nivel macroscopic prin modificarea în sens nedorit a caracteristicilor electrice.

În esență:

- Creșterea curentului de scurgere ca urmare a îmbătrânirii varistorului are drept consecință creșterea puterii disipate prin efect Joule.
- Creșterea curentului de scurgere asociată cu diminuarea tensiunii de prag și a coeficientului de neliniaritate  $\alpha$  sunt alte simptome ale îmbătrânirii;
- Stabilirea unor canale conductoare prin interiorul varistorului sau pe suprafața exterioară, care sunt generate de un grad înalt de neomogenitate în material, este o altă consecință a îmbătrânirii;
- Apariția descărcărilor parțiale în interiorul varistorului sau între suprafața laterală izolantă protectoare și masa sinterizată a varistorului poate fi asimilată ca un efect direct al îmbătrânirii.

În funcție de fenomenele de degradare care se manifestă, se pot distinge două categorii de degradare:

- *Degradarea reversibilă*, atunci când eșantioanele supuse degradării își recapătă proprietățile inițiale după un anumit timp de repaus, timp ce poate fi redus prin aplicarea unui tratament termic (încălzire în curent de aer cald de exemplu). Acest tip de degradare este atribuit deplasării ionilor dinspre interiorul granulelor spre spațiul intergranular, cauzat de polarizare;
- *Degradarea ireversibilă*, atunci când eșantioanele supuse degradării nu sunt distruse, dar nu își mai recapătă proprietățile inițiale, nici după un timp îndelungat, indiferent de tratamentele aplicate. Dacă gradul de degradare este acceptabil, după evaluările standard, ele pot fi menținute în funcțiune.



### III.3.2. Mecanismele degradării

Vom prezenta pe scurt principalele modele care tratează degradarea varistoarelor pe bază de ZnO [32], [49].

#### *Modelul K. Eda și colaboratorii*

Aceștia au studiat degradarea varistoarelor supuse tensiunilor continue sau alternative, la diverse temperaturi ale mediului ambiant. Ridicarea caracteristicii  $I(U)$  și determinarea proprietăților dielectrice le-a permis să evalueze această degradare. Măsurarea curentului de depolarizare, stimulat termic, a condus la stabilirea cantității de ioni care au difuzat spre spațiul intergranular [54].

Atomii care s-au deplasat sunt, conform observațiilor, cationii de Zn, Sb, Co, Mn și Cr, care migrează sub acțiunea câmpului electric. Ei vor fi neutralizați și perturbă echilibrul sarcinilor.

Ca urmare, bariera Schottky suferă o deformare, scăderea ei îmbunătățind conducția prin spațiul intergranular [53].

Concluziile care se desprind sunt:

#### *1. Pentru solicitări unidirecționale (tensiune continuă):*

- Modificarea  $I(U)$  la o caracterizare cu tensiune inversă celei cu care a fost degradată, este provocată printr-o migrație a ionilor în regiunea intergranulară bogată în  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , care deformează bariera Schottky polarizată direct;
- Modificarea  $I(U)$  la tensiuni de același sens cu cea la care a fost degradată este consecința unei deplasări a ionilor în zona săracă în electroni, antrenând o deformare a barierei polarizate în sens invers.

#### *2. Pentru solicitări alternative:*

- Dubla barieră este deformată în ambele părți în mod simetric, prin deplasarea ionilor în cele două zone părăsite (sărace în electroni).

Autorii aduc de asemenea câteva precizări vizând modalitățile în care procesele de recoacere ameliorează stabilitatea varistorului. În timpul acestei operații, structura rețelei ionice se modifică, conductivitatea ionică (generată de ionii de  $\text{O}^{2-}$ ), diminuându-se. În plus, ionii  $\text{Zn}^{2+}$  interstițiali difuzează către suprafața de separație intergranulară, unde se pot combina cu  $\text{O}^{2-}$ , ducând la scăderea concentrației lor și deci la scăderea conductivității spațiului intergranular. Acest fapt conduce la scăderea curentului prin varistor, care înseamnă de fapt îmbunătățirea stabilității termice a lui.

Acest mecanism prezintă în esență mecanismul pierderilor în O. În urma acestor acțiuni rezultă o scădere a înălțimii barierei de potențial Schottky și o deformare asimetrică a acesteia din urmă, dacă tensiunea aplicată este continuă, sau simetrică dacă tensiunea aplicată este alternativă.

Autorul explică faptul că bariera Schottky polarizată în sens direct va fi deformată mai ușor decât cea polarizată în sens invers, explicând asta prin pierderea de oxigen mai ușoară pentru joncțiunea polarizată în sens direct.

Verificarea experimentală a acestui model a fost făcută de A. Chang și W.D. Kingery, care au pus în evidență o diferență de concentrație a ionilor metalici (Al, Si, Ca, Ti, Fe, Co și Bi) între spațiile intergranulare în starea inițială, nedegradată, și cea finală, după degradare.

#### *Modelul T.K. Gupta și colaboratorii*

Autorii presupun că o răcire rapidă în ciclul de sinterizare poate provoca un gradient termic important în granulele de ZnO. Acesta determină defecte în rețeaua cristalină (ionii de  $\text{Zn}^{2+}$  se deplasează în poziții intermediare) și o distribuție neomogenă a ionilor.



Aplicarea unei tensiuni mari asupra eșantionului supus încercărilor provoacă difuzia ionilor pozitivi  $Zn^{2+}$  în zona părăsită de electroni, către spațiul intergranular, unde neutralizează o parte din sarcinile negative care sunt generatoare ale barierei Scottky, rezultând o deformare a acesteia și o scădere a înălțimii barierei de potențial și creșterea curentului de conducție.

### **Modelul C.G. Shirley și W.M. Paulson**

Aceștia analizează mecanismul degradării în urma unui impuls de mare amplitudine și mare energie, echivalentul unei lovituri de trăsnet.

Acest șoc produce o neomogenitate a materialului varistor, încălzirile locale excesive distrugând în parte unele din spațiile izolante intergranulare. Rezultă deci la nivel global o scădere a numărului de bariere de potențial, deci o scădere a tensiunii de prag și o creștere a curentului de conducție la o aceeași tensiune normală aplicată, însoțită de o creștere globală a temperaturii pastilei, ce poate determina starea de instabilitate termică.

### **III.3.3 Distrugerea**

Distrugerea unui varistor se poate manifesta în primul rând prin [58]:

- **Străpungere punctiformă**

Dacă un anumit curent, de ordinul amperilor sau zecimilor de amperi, altfel inofensiv, parcurge varistorul în regim de serviciu permanent timp de câteva ore, poate conduce la stabilirea prin varistor a unui canal preferențial de trecere a curentului, de rezistență mică (sub 1 k $\Omega$ ). În urma apariției acestui canal au loc și fenomene de topire locală a materialului varistor, care conduc în final la apariția unui orificiu cu diametrul mai mic de 1mm. Practic, asistăm la topirea stratului intergranular, care are punct de topire mai mic decât ZnO. Ca urmare, efectul varistor încetează. Acest fenomen este favorizat de neomogenitatea materialului varistor, adică de existența în material a unor zone cu rezistivitate electrică mult mai scăzută decât altele, zone prin care se va scurge întreg curentul, ducând la topirea de care am vorbit mai înainte.

- **Străpungere totală**

Este produsă de trecerea prin varistor a unor curenți extrem de mari, chiar pe o durată de timp extrem de scurtă, așa cum se întâmplă în cazul trecerii undelor de supratensiune (supracurent). La fel ca în cazul scurtcircuitelor, apar forțe electromagnetice extrem de mari în interiorul materialului, favorizate de neuniformitatea acestuia, dar, în primul rând apar încălziri excesive ale materialului, datorită curentului extrem de mare. Și încălzirile excesive sunt favorizate de neuniformitatea materialului. Ca urmare, varistorul este topit total sau în mare parte, în unele situații ajungându-se la vaporizare și explozie. Din această cauză, descărcătoarele de medie și înaltă tensiune, executate în variantă capsulată, sunt prevăzute cu supape sau membrane distructibile, în scopul de a evita, într-o asemenea situație, explozia echipamentului.

- **Conturnare**

Fenomenul de conturnare constă în apariția unui curent electric pe suprafața laterală a varistorului, urmărind profilul acesteia. Conturnarea este favorizată de gradul de poluare a suprafeței laterale (impurități, praf, apă) sau de imperfecțiunile izolației din rășină epoxidică. Conturnarea se produce de regulă la tensiuni mari, la apariția unui impuls, și duce la topiri locale sau totale. Neomogenitatea sau lipsa izolației pot favoriza acest fenomen [89].

Oricare din aceste forme de distrugere sunt ireversibile. Varistorul care a suferit asemenea constrângeri trebuie înlocuit din echipament pentru a evita eventualele scurtcircuite cauzate de rezistența mică a varistorului chiar numai sub acțiunea tensiunii nominale a rețelei, sau, în cel mai rău caz, incendii și accidente.





### III.4. Concluzii

În final, referitor la procesul tehnologic de fabricație al varistoarelor, putem trage unele concluzii:

- Varistorul pe bază de ZnO poate fi privit ca o ceramică semiconductoare, este un semiconductor donor de tip N, conductivitatea lui fiind de natură
  - intrinsecă – datorată atomilor (ionilor) de Zn interstițiali și a lacunelor de oxigen;
  - extrinsecă – datorată dopajului cu Co sau Mn de exemplu;
- Limitarea conducției de barierele de potențial electrostatic de la nivelul interstițiilor intergranulare. Din măsurători s-a constatat că o conducție ridicată apare doar de la o valoare de 3 V aplicată barierei de potențial;
- Calculul grosimii varistorului pentru o anumită tensiune de prag, dorită din considerente de funcționare a echipamentului de protecție, se poate face aproximativ, dacă se cunoaște diametrul granulelor de ZnO, pe baza relației 3.10. Verificarea unui diametru ales se poate face evaluând raportul înălțime / diametru, iar în cazul în care acest depășește 2,1 se impune mărirea diametrului cu o treaptă;
- Dimensiunea medie a granulelor de ZnO, cu un rol important în fenomenul de conducție, este de cca. 20  $\mu\text{m}$ . Este posibil să se ajungă la dimensiuni între 3  $\mu\text{m}$  și 150  $\mu\text{m}$ , prin modificarea temperaturii de sinterizare, a duratei ciclului de sinterizare și a compoziției chimice;
- Joncțiunile intergranulare, cu rol în obținerea efectului varistor, sunt bogate în oxid de bismut și au grosimi cuprinse între 50 și 500 Å;
- Granulele mici de impurități izolante sunt precipitate între granulele de ZnO și au o grosime de cca. 5  $\mu\text{m}$ .
- Varistorul pe bază de ZnO prezintă o capacitate dielectrică neglijabilă, invers proporțională cu numărul de interstiții. Această observație merită luată în seamă mai ales în aplicațiile în curent alternativ;
- Pierderile dielectrice sunt foarte reduse ( $\text{tg } \delta < 0,03$ ) și prezintă un maxim la frecvența de 200 kHz;
- Timpul de răspuns este foarte scăzut, dar depinde în general și de impedanța circuitului de protejat, dar în mod obișnuit este de ordinul zecilor de ns;
- Posibilitatea de a absorbi energia depinde de parametrii geometrici și de calitatea varistorului. Poate ajunge până la 200 J/cm<sup>3</sup>;

Referitor la compoziția chimică a varistoarelor, se poate concluziona că aditivii pot fi împărțiți în două categorii: primii sunt compuși ai oxizilor ai căror cationi participă direct la formarea cristalelor elementare (Bi, Co, Mn), iar alții, care difuzează în interiorul cristalelor, asigurând performanțele electrice de nelinearitate ale varistoarelor.

În ceea ce privește tehnologia de fabricație a varistoarelor, se poate concluziona că un număr mare de factori pot influența calitatea varistorului și deci fabricația prezintă un grad ridicat de empirism. Dintre aceștia cei mai importanți sunt:

- Compoziția chimică a amestecului inițial de pulberi;
- Granulația pulberilor constituente;
- Temperatura tratamentelor termice;
- Profilul curbei tratamentelor termice;
- Proprietățile electrice ale pastei conductoare din care vor rezulta electrozii;

Găsirea variantei optime la toți acești factori, în mod empiric, va conduce în final la o caracteristică  $I(U)$  cu un grad important de nelinearitate, necesar pentru satisfacerea cerințelor contradictorii de tensiune de prag cât mai înaltă și nivel de protecție cât mai scăzut.



Unul din scopurile urmărite în prezentarea acestui capitol a fost acela de a demonstra că studiile în domeniul materialelor ceramice pe bază de ZnO sunt extrem de avansate. Practic una din concluziile esențiale este că, cel puțin pentru moment, s-a ajuns la o “zonă de saturație” în domeniul ameliorării performanțelor materialului varistor.

Ca urmare, principalele îmbunătățiri posibile ale performanțelor varistoarelor pot veni mai ales din partea utilizatorului de varistoare, adică a proiectantului de echipamente de protecție contra supratensiunilor, prin noi soluții tehnice de implementare a materialului existent.

### **III. 5. Contribuții personale și originale**

- Elaborarea unei serii de 6 varistoare, 2 dintre ele fiind utilizate ulterior pentru experimente, după rețeta și în cadrul Laboratorului “Génie Electrique” al Universității PAUL SABATIER din Toulouse (L.G.E.T.). Caracteristicile electrice ale celor două, în zona curenților slabi, sunt prezentate în Anexa 1;
- Prezentarea în întregime a procesului tehnologic de fabricație a varistoarelor;
- Studiul influenței procesului de fabricație asupra proprietăților varistoarelor, pe baza bibliografiei din domeniu și a cunoștințelor acumulate în timpul stagiilor în cadrul L.G.E.T.;
- Analiza cauzelor care duc la uzura varistoarelor, în legătură directă cu comportamentul termic al acestora;
- Precizarea unor elemente de chimie și fizica materialelor în scopul de a evalua calitatea și performanțele varistoarelor;
- Sinteza standardelor europene și internaționale privind fabricarea și calitatea varistoarelor.



## CAPITOLUL IV

### Solicitările termice ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO

Condițiile termice de funcționare ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor sunt determinate în principal de:

- domeniul de utilizare și destinația lor;
- nivelul nominal de tensiune;
- tipul (amplitudinea și durata) supratensiunilor care apar la bornele lor;
- materialul din componența varistorului;
- geometria varistorului și construcția echipamentului;
- presiunea de contact a electrozilor pe varistoare și omogenitatea coloanei;
- vârsta și gradul de uzură al echipamentului;
- modul de amplasare;
- condițiile climatice în care operează;
- modul de exploatare și de asigurare a mentenanței;
- frecvența apariției supratensiunilor.

În majoritatea echipamentelor de protecție contra supratensiunilor se dezvoltă neconținut căldură, în virtutea transformării unei părți importante din energia electromagnetică în energie termică, chiar când nu se aplică unde de supratensiune la bornele lor, datorită faptului că varistorul pe bază de ZnO este parcurs, la tensiunea nominală a rețelei, de un anumit curent electric. Ca urmare a căldurii degajate în varistor, temperaturile diferitelor părți ale acestuia sau ale echipamentului, cresc până la temperaturile limită, corespunzătoare regimului staționar, când întreaga căldură este cedată mediului ambiant.

Echipamentul, în regim staționar, posedă o anumită încărcătură calorică, ce se păstrează în stare potențială. Aceasta s-ar pierde, prin disipare progresivă în mediul ambiant mai rece, doar în situația deconectării echipamentului de la rețea. Valoarea acestei călduri latente reprezintă doar o fracțiune din valoarea energiei electrice care se transformă în căldură în interiorul varistorului, prin efect Joule – Lenz în cazul apariției unei unde de supratensiune.

În situația aplicării unui impuls de supratensiune, care duce la apariția unui supracurent important, această stare de echilibru termic staționar este depășită.

Pentru a se garanta o funcționare exemplară și de lungă durată a echipamentului de protecție, sub aspectul solicitărilor termice, standardele de fabricație impun (în funcție de materialele utilizate și condițiile de exploatare), anumite limite maxime admise pentru temperaturile de regim staționar.

Temperatura unui echipament electric este determinată de temperatura mediului ambiant  $\theta_a$  (unde se află amplasat echipamentul), la care se adaugă creșterea de temperatură  $\tau$  (supratemperatura), datorită încălzirii echipamentului prin efect electrocaloric. Diferența dintre temperatura suprafeței corpului cald și temperatura mediului ambiant se numește *supratemperatura* corpului (față de temperatura mediului ambiant) și este independentă de alegerea originii pe scara temperaturilor adoptate. Majoritatea normelor indică două valori pentru regimul staționar [53], [54]:

- supratemperatura maximă admisă  $\tau_s$ ;
- temperatura maximă admisă  $\theta_s$ .

Legătura între cele două este dată de relația 4.1.

$$\tau_s = \theta_s - \theta_a = T_s - T_a \quad [\text{grade}] \quad (4.1)$$



Valorile temperaturii pot fi calculate ca fiind absolute ( $T$ , pe scara Kelvin) sau pot fi raportate pe scara Celsius ( $\theta$ ). Legătura între cele două temperaturi este evidentă:

$$T = \theta + 273,15 \text{ [grade]} \quad (4.2)$$

Supratemperatura, fiind o diferență de temperaturi, are aceeași valoare și în °C și în K.

Pentru temperatura mediului ambiant se consideră o valoare limită de  $\theta_a = 40^\circ\text{C}$ . Valorile de temperatură înregistrate în vara anului 2000 în România și în întreaga Europă au demonstrat că această temperatură a aerului poate să fie nu numai atinsă, dar și depășită.

Sursa de căldură, în interiorul unui echipament de protecție, o constituie varistorul (sau coloana de varistoare), parcurse de un curent electric (fie în regim permanent, fie în regim tranzitoriu, de impuls). Pierderile dielectrice în varistor, în regim permanent sunt neglijabile, pentru marea parte a categoriilor de echipamente de protecție.

Restul părților echipamentului de protecție, care nu sunt surse de căldură, se pot încălzi puternic pe calea propagării căldurii de la o zonă la alta. Ceea ce interesează este nivelul și distribuția temperaturilor în elementele componente ale echipamentului, care depind de puterea surselor de căldură și localizarea lor în echipament. Pentru ca încălzirea echipamentului, în regim de serviciu permanent sau în regim de impuls, să nu depășească limitele admise de standarde, este necesar ca disiparea căldurii către mediul ambiant, adică răcirea aparatului, să fie cât mai activă.

Materialul varistor, pe lângă excelente proprietăți electrice și mecanice, trebuie să aibă și o bună conducție termică și o mare stabilitate în funcționarea la temperaturi ridicate [35].

La apariția unui șoc de tensiune, însoțit și de un șoc substanțial în curent, datorită duratei reduse de aplicare a acestei avarii, căldura produsă în căile de curent, neavând timpul necesar să se propage la celelalte elemente ale aparatului, se concentrează în masa varistorului, ceea ce poate conduce la [16]:

- creșterea în avalanșă a curentului (activat termic) prin varistor;
- topiri locale ale materialului varistor;
- străpungeri dielectrice;
- dilatări inegale (deformări) ale varistorului;
- îmbătrânirea accentuată a materialului varistor;
- topirea rășinii izolatoare, care poate genera conturnări;
- încălziri excesive ale carcasei echipamentului;
- în situațiile extreme se poate ajunge chiar la topirea, arderea și/sau vaporizarea varistorului;

Verificarea supratemperaturilor admise într-un echipament de protecție contra supratensiunilor se efectuează [48]:

- în materialul varistor (pe suprafața varistorului);
- în izolația de rășină (pe suprafața laterală) a varistorului;
- pe calea de curent (racorduri la rețea și electrozi);
- în interiorul carcasei izolatoare (în atmosfera gazoasă);
- pe suprafața carcasei izolatoare;

Studiul solicitărilor termice ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor se efectuează cu scopul de a determina prin calcul și a măsura experimental supratemperaturile atinse în diferite părți ale aparatului, față de temperatura mediului ambiant, la un regim dat de funcționare.

După cum am mai arătat, căldura se dezvoltă mai ales în masa materialelor active. Evacuarea acestei cantități de căldură se face pe calea transmisiei termice, care are loc întotdeauna, în baza principiului al II-lea al termodinamicii, de la corpurile sau părțile unui corp mai calde, la cele mai puțin calde. Acest proces termocinetic este cu atât mai pronunțat cu cât temperatura corpurilor mai calde este mai mare decât temperatura corpurilor învecinate (de regulă mediul ambiant) și durează atâta vreme până când temperaturile acestora devin egale.



## IV.1. Dezvoltarea căldurii în căile de curent prin efect electrocaloric

Pentru calculul solicitărilor termice ale părților componente ale aparatelor electrice în general, este necesar, în primul rând, să se stabilească mărimile și formulele, legate de dezvoltarea căldurii prin efect electrocaloric.

Dezvoltarea importantă de căldură în varistor are loc atunci când echipamentul de protecție a preluat șocul de supratensiune, situație în care mediul varistor poate fi considerat ca fiind un mediu conductor, dar și în regim permanent, la tensiunea nominală a rețelei.

În cazul cel mai general, al conductoarelor omogene, izotrope și cu proprietăți termice lineare, sau al mediilor neomogene, anizotrope și neliniare, în formă locală, legea transformării energiei electrice în energie termică dă expresia energiei disipate de câmpul electromagnetic în unitatea de timp și pe unitatea de volum. Conform cu această lege, puterea  $p$  cedată de câmpul electromagnetic pe unitatea de volum a conductorului (puterea specifică), în procesul de conducție electrică, este egală cu produsul scalar dintre intensitatea câmpului electric  $E$  și densitatea curentului electric de conducție,  $J$  [2]:

$$p = E \cdot J \quad [\text{W/m}^3] \quad (4.3)$$

Ca o interpretare microscopică a legii,  $p$  derivă din efectul microscopic al lucrului mecanic microscopic cheltuit de câmp, în unitatea de timp și pe unitatea de volum, pentru deplasarea în mediul conductor a particulelor libere încărcate.

În anumite condiții, în care mediul varistor poate fi considerat ca și omogen, mărimea  $p$  este densitatea de volum a puterii cedate de câmpul electromagnetic, deci căldura dezvoltată în unitatea de timp și de volum a mediului conductor (varistor) și, aplicând Legea lui Ohm, în formă locală:

$$E = \rho \cdot J \quad (4.4)$$

Avem expresia:

$$p = E \cdot J = \rho \cdot J^2 \quad (4.5)$$

Aceasta reprezintă forma locală a Legii Joule – Lenz [2].

Mărimea scalară  $p$  este întotdeauna pozitivă și caracterizează dezvoltarea de căldură, care este caracteristică stării electrocinetice a conductoarelor, determinând efectul electrocaloric, care este un fenomen ireversibil. Situația în care există și un câmp electric imprimat nu a fost luată în considerare, deci, pentru materialul varistor, efectele reversibile de tipul electrochimic, Peltier sau Thompson nu prezintă importanță practică în exploatare.

Forma integrală a legii transformării energiei în mediile conductoare se obține din (2.5) prin integrare pe volumul  $V$  al unui cilindru varistor, cu secțiunea transversală (circulară) de arie  $A$ , unde  $E$ ,  $J$ ,  $dl$  sunt paraleli. Puterea totală  $P$ , cedată de câmpul electric cilindrului (pastilei) varistor, parcurs de curentul de conducție, are expresia:

$$P = \int p \cdot dV = \int E \cdot J \cdot dV = \int E \cdot J \cdot A \cdot dl = \int E \cdot i \cdot dl = i \cdot \int E \cdot dl = u_{12} \cdot i \quad (4.6)$$

unde  $u_{12} = R \cdot i$  reprezintă tensiunea aplicată fețelor 1 și 2 ale varistorului, incluzând rezistența de contact [1].

În mediul varistor, în regim conductor, unde nu există câmp electric imprimat, puterea disipată în conductor sub formă de căldură este:

$$P = R \cdot i^2 = \int \rho \cdot J^2 \cdot dV \quad [\text{W}] \quad (4.7)$$

Aceasta este expresia Legii Joule – Lenz în formă integrală [2]. Evident, această putere nu poate fi decât pozitivă, cedată de către câmpul electric mediului.





Energia dezvoltată sub formă de căldură,  $Q$ , în timpul  $\Delta t = t_2 - t_1$  se obține prin integrarea relației (4.7):

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} R \cdot i^2 \cdot dt \quad [\text{J}] \quad (4.8)$$

Pentru un interval oarecare de timp putem scrie:

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [\text{J}] \quad (4.9)$$

Utilizarea relației (4.9) este condiționată de anumite restricții, ea putând fi utilizată doar în situația dezvoltării căldurii în regim termic permanent (staționar sau cvasistaționar). Situația corespunde supratensiunilor de durată, de ordinul secundelor sau minutelor, care se manifestă uneori sub formă sinusoidală. Curentul  $I$  reprezintă valoarea efectivă a curentului care se stabilește prin echipamentul de protecție. Se calculează, indiferent de forma undei de supratensiune, cu formula următoare, unde  $T$  reprezintă perioada undei de supratensiune [2]:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 \cdot dt} \quad [\text{A}] \quad (4.10)$$

Pentru rezolvarea regimurilor termice tranzitorii ale conductoarelor se recomandă folosirea ecuației (4.9) în formă diferențială:

$$dQ = R \cdot i^2(t) dt \quad (4.11)$$

Curentul  $i(t)$  poate fi constant sau variabil pe durata aplicării șocului.

În situația varistoarelor pe bază de ZnO, rezistența lor electrică este variabilă în timp. Deci relația (4.11) trebuie corectată corespunzător, rezultând expresia general valabilă de mai jos:

$$dQ = R(t) \cdot i^2(t) dt \quad (4.12)$$

În situația concretă a varistoarelor, curentul în zona a II-a a caracteristicii este activat termic, iar rezistența lor depinde foarte mult de temperatură, deci variația lor în timp este evidentă, ca urmare a variației temperaturii cu timpul.

Transportul cantității de căldură  $dQ$ , după direcția normală la o suprafață de arie  $dA$ , în unitatea de timp, în cazul general determină apariția unui flux termic  $P$ :

$$P = \frac{dQ}{dt} \quad [\text{W}] \quad (4.13)$$

Raportând fluxul termic la unitatea de suprafață se obține densitatea fluxului termic (fluxul termic specific sau debitul de căldură):

$$q = \frac{dP}{dA} \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (4.14)$$

În situația în care densitatea fluxului termic are aceeași valoare în toate punctele unei suprafețe izoterme de arie  $A$  (flux termic omogen), relația (4.14) devine:

$$q = \frac{P}{A} \quad [\text{W} / \text{m}^2] \quad (4.15)$$

În cazul propagării căldurii prin conducție, caz care va fi tratat în continuare, fenomenul termocinetic va fi caracterizat matematic prin  $q$ , care, pe lângă valoarea numerică, are și o direcție în spațiu și un sens bine determinat. În consecință, la flux termic staționar, funcția  $q(x,y,z)$  reprezintă un câmp vectorial care indică sensul de propagare a căldurii. Liniile de câmp ale vectorului  $q$  se numesc linii de curent termic.



## IV.2. Transmisia termică în echipamentele electrice

După cum am mai arătat, în cazul echipamentelor de protecție contra supra-tensiunilor, căldura se dezvoltă în masa materialului varistor. Evacuarea acestei cantități de căldură se face pe calea transmisiei termice, care are loc întotdeauna (în baza principiului al II-lea al termodinamicii) de la corpurile sau părțile unui corp mai calde, la cele mai puțin calde.

Acest proces termocinetic este cu atât mai intens cu cât temperatura corpurilor mai calde este mai mare decât temperatura corpurilor învecinate (de regulă mediul ambiant) și durează atâta vreme până când temperaturile acestora devin egale. Oricât de mare este încălzirea materialului varistor, se va ajunge teoretic la situația în care cantitatea de căldură dezvoltată în varistor să fie egală cu cea disipată în exterior pe calea transmisiei termice. Singura condiție este ca temperatura varistorului să nu depășească punctul de topire al materialului. Din acest moment se stabilește regimul termic staționar (permanent), când temperatura materialului activ rămâne la o valoare constantă. Durata de timp necesară atingerii acestui regim, cât și valoarea temperaturii staționare, depind în mare măsură de intensitatea răcirii materialului activ, adică de modul în care se realizează transmisia căldurii.

Rezultă, deci, că pentru a putea încărca cât mai mult aparatul, ceea ce înseamnă solicitare termică mărită a materialului activ, fără ca temperatura staționară să depășească temperatura admisă maximă, este necesar să se asigure o răcire cât mai eficientă a varistoarelor.

În procesul de răcire, la varistoarele în funcțiune se disting 3 moduri de transmisie a căldurii:

- prin conducție (conductibilitate termică);
- prin convecție;
- prin radiație.

Aceste moduri de transmitere a căldurii pot avea loc și simultan, atât la regim staționar, caracterizat prin flux de căldură constant, când temperatura este de asemenea constantă, cât și la procese nestaționare, caracterizate prin flux de căldură variabil, când temperatura variază în timp.

În **regimul termic staționar**, întreaga căldură dezvoltată în unitatea de timp, este disipată din aparat în mediul ambiant mai rece, nefiind posibilă acumularea căldurii în corpuri, iar în **regimul termic nestaționar**, nu există egalitate între căldura dezvoltată și cea disipată. Regimul termic cu caracter periodic, care se repetă după o anumită lege, în decursul unei anumite perioade de timp, constituie **regimul termic cvasistaționar**, care este un regim stabilizat, ca și cel staționar.

Un mod foarte caracteristic de transmisie termică îl constituie schimbul de căldură între un corp și mediul ambiant, în cazul nostru între varistoare și aer, schimb realizat prin suprafața liberă a corpului, care vine în contact nemijlocit cu mediul. În acest caz, transferul de căldură se asigură pe calea radiației, prin intermediul proceselor electromagnetice și pe calea convecției, prin spălarea suprafeței cu aerul în mișcare, cele două moduri de transmisie putând avea loc atât simultan, cât și fiecare separat.

### IV.2.1. Transmisia termică prin conducție

Conducția termică este fenomenul de propagare a căldurii prin masa corpurilor solide, lichide sau gazoase, sau între aceste corpuri aflate în contact, în cazul când temperatura în masa acestora are o repartiție neuniformă [53], [54].

Când, în toate punctele corpului, temperatura are aceeași valoare, transmisia căldurii prin conducție încetează. Cea mai mare conducție termică (viteză de transmisie a căldurii) o au metalele și cea mai redusă o au gazele rarefiate. Procesul de conducție se poate analiza cel mai simplu în situația mediilor izotrope. Procesele termice care au loc în aceste medii sunt determinate de câmpul lor de temperaturi, care reprezintă totalitatea valorilor momentane ale temperaturii din toate punctele mediului.



Deoarece temperatura este o mărime care poate fi caracterizată, într-un sistem de unități date, printr-un singur număr, nefiind legată de noțiunea de direcție, câmpul de temperaturi este un câmp scalar. Acest câmp este continuu, deoarece fiecărui interval infinit de mic dintre două puncte de observație îi corespunde o variație infinit de mică a temperaturii. Folosind mijloacele matematice, un astfel de câmp scalar poate fi exprimat, în cazul regimului termic nestaționar (variabil, tranzitoriu), prin următoarea funcție de spațiu și timp [54]:

$$\theta_M = \theta(x, y, z, t) \quad (4.16)$$

în care mărimile introduse reprezintă:

- $\theta_M$  - temperatura în punctul **M** supus observației;
- $x, y, z$  - coordonatele spațiale ale acestui punct;
- $t$  - coordonata de timp.

Temperatura este o mărime proporțională cu intensitatea mișcării termice a particulelor de substanță, mișcare inerentă tuturor particulelor materiale, care nu încetează în nici un fel de condiții, cu excepția atingerii temperaturii de 0 grade K (zero absolut,  $-273,15^\circ\text{C}$ ), situație care nu intervine în nici un caz în exploatarea acestor echipamente. Este o mărime intensivă, spre deosebire de alte mărimi care pot fi aditive.

În cazul când temperatura în diferitele puncte ale mediului rămâne constantă, câmpul de temperaturi devine staționar (invariabil, constant în timp), ca un caz particular al câmpului de temperaturi nestaționar, deci:

$$\theta_M = \theta(x, y, z) \quad (4.17)$$

Totalitatea punctelor acestui câmp staționar, care au aceeași temperatură, determină suprafețe izoterme (suprafețe de nivel termic), cu  $\theta = \text{constant}$ . Viteza maximă de variație a temperaturii (de la o suprafață sau curbă izotermă la alta) se obține prin deplasarea pe o dreaptă  $n$ , perpendiculară pe izotermă. Limita raportului  $\Delta\theta/\Delta n$  este dată de gradientul de temperatură [1], [34]:

$$\text{grad}\theta = \frac{\partial\theta}{\partial n} \cdot n_0 \quad (4.18)$$

unde  $n_0$  este versorul normalei la izotermă.

Astfel, pentru fiecare punct al unui câmp de temperaturi plan, când câmpul este bidimensional, situație întâlnită la varistoarele tip disc de exemplu,  $\theta = \theta(x, y)$ , se obține o mărime vectorială determinată, iar funcția  $\text{grad}\theta = f(x, y)$  reprezintă un câmp vectorial plan al gradientilor de temperatură.

În cazul unui câmp de temperaturi în spațiu, reprezentat prin funcția potențială  $\theta = \theta(x, y, z)$ , funcția  $\text{grad}\theta = f(x, y, z)$  reprezintă un câmp vectorial în spațiu.

În ambele cazuri, deoarece sensul descreșterii funcției potențiale este contrar sensului funcției vectoriale gradient, rezultă că sensul pozitiv al gradientului de temperatură coincide cu sensul în care temperatura crește, de la o izotermă la alta.

Se cunoaște, ca o consecință a principiului al II-lea al termodinamicii, că, între două puncte vecine, cu temperaturi diferite, există întotdeauna o propagare de energie termică de la punctul cu temperatura mai ridicată la punctul cu temperatura mai scăzută. Sensul propagării acestei energii de egalizare coincide cu sensul descreșterii temperaturii.

Acest fenomen termocinetic, în cazul propagării căldurii prin conducție, se pune în evidență prin *densitatea fluxului termic*  $q$ , iar funcția  $q = f(x, y, z)$  reprezintă câmpul vectorial în spațiu, care ilustrează sensul de difuziune al căldurii.

Pe cale experimentală se poate determina relația liniară:

$$q = -\lambda \text{grad}\theta \quad (4.19)$$

în care  $\lambda$  este *conductivitatea termică* (termoconductivitatea), exprimată în  $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{grad})]$ .



Din relația (4.19) se observă că vectorul  $q$  coincide ca direcție și sens cu  $(-grad \theta)$  și, deoarece vectorul gradient, în fiecare punct, este perpendicular pe izoterma corespunzătoare și tuburile elementare ale fluxului termic  $dP = q \cdot dA$  vor fi perpendiculare pe această izotermă.

Conductivitatea termică  $\lambda$  este o constantă empirică ce caracterizează însușirea corpurilor de a transmite căldura. Ea este funcție de temperatură, cu creșterea temperaturii în cazul metalelor  $\lambda$  scade, iar în cazul materialelor poroase  $\lambda$  crește. În general se admite variație liniară pentru conductivitatea termică [55]:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 \pm a \cdot \theta) \tag{4.20}$$

unde:

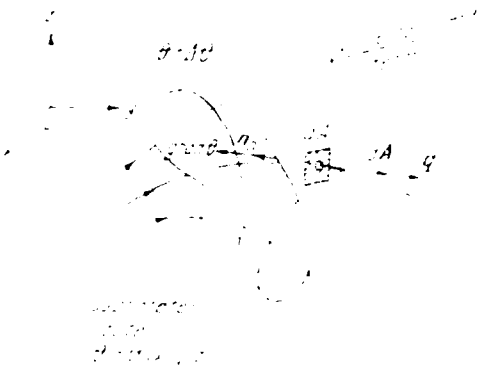
$\lambda_0$  - conductivitatea termică la 0°C, în [W/(m · grad)];

$a$  - mărime constantă, determinată experimental, în [grad<sup>-1</sup>].

În corpurile anizotrope,  $\lambda$  depinde de direcție, astfel într-un sistem de axe cartezian  $\lambda_x, \lambda_y$  și  $\lambda_z$  reprezintă conductivitățile termice după direcția axelor  $x, y$  și  $z$ .

Relația dintre căldura transmisă prin conducție și gradientul de temperatură este exprimată prin legea lui Fourier.

$$d^2Q = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial n} \cdot dA \cdot dt \text{ [J]} \tag{4.21}$$



Căldura transmisă  $d^2Q$  depinde de proprietățile mediului în care are loc procesul difuziunii căldurii. Semnul minus arată că sensul fluxului termic este opus sensului vectorului gradient [34].

Situația este prezentată în figura IV.1. ([54])

Dacă se dă temperatura într-un punct determinat al spațiului (care înseamnă o condiție la limită), împreună cu ecuațiile lui Poisson sau Laplace, avem posibilitatea determinării câmpului de temperaturi staționar.

Astfel, densitatea fluxului termic  $q$ , în câmpul de temperaturi spațial, are expresia:

$$\bar{q} = q_x \cdot \bar{i} + q_y \cdot \bar{j} + q_z \cdot \bar{k} \tag{4.22}$$

**Figura IV.1: Explicativă la transmisia termică prin conducție .**

Sau, conform relației vectoriale (4.19), în cazul unui corp anizotrop ( $\lambda_x \neq \lambda_y \neq \lambda_z$ ):

$$\bar{q} = -(\lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \bar{i} + \lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \cdot \bar{j} + \lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \cdot \bar{k}) \tag{4.23}$$

Pentru determinarea surselor (sau scurgerilor) câmpului vectorial  $q$ , determinăm divergența acestui câmp.

$$divq = \nabla q = -(\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}) \text{ [W/m}^3 \text{]} \tag{4.24}$$

Expresia din paranteză dă măsura productivității surselor de căldură, adică dă cantitatea de căldură dezvoltată sau absorbită în unitatea de timp și unitatea de volum.

Dacă notăm aceste surse calorice cu  $p$ , în [W/m<sup>3</sup>], care în general sunt funcții de trei coordonate spațiale, avem identitatea:

$$div q = p \tag{4.25}$$

Care, conform relației (4.24) se explicitează:

$$\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + p = 0 \tag{4.26}$$



Această relație reprezintă *ecuația lui Poisson* sau *ecuația diferențială a conducției staționare a căldurii*.

Dacă avem sub observație un domeniu al câmpului de temperaturi lipsit de surse interne de căldură ( $p = 0$ ), obținem:

$$\lambda_x \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad (4.27a)$$

În cazul unui corp (material) izotrop, ( $\lambda_x = \lambda_y = \lambda_z$ ), relația se rescrie:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0 \quad (4.27b)$$

Relațiile (4.27a) și (4.27b) reprezintă *ecuațiile lui Laplace*, care arată că în câmpul de temperaturi spațial staționar, fără surse interne de căldură, funcția  $\theta = \theta(x,y,z)$  trebuie să aibă o asemenea formă, pentru ca derivatele ei parțiale de ordinul doi să satisfacă relațiile respective.

Dacă distribuția de temperaturi în corp nu este staționară, se poate aplica *ecuația generală diferențială a conducției termice nestaționare*, determinată de Fourier pe baza legii conservării energiei:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (4.28)$$

Această relație prezintă legătura dintre variațiile în timp și în spațiu ale temperaturii. Dacă sunt date condițiile inițiale (distribuția de temperaturi în momentul inițial) și condițiile de frontieră (distribuția de temperaturi pe suprafața corpului), cu ajutorul acestei ecuații se poate calcula temperatura într-un punct dat al corpului fără surse, pentru oricare moment.

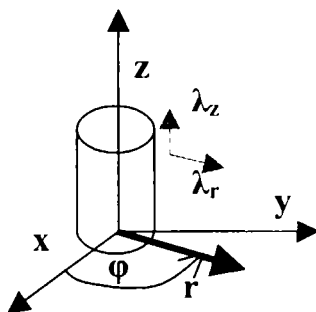
Parametrul  $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho_d}$  se numește *difuzivitate termică* și caracterizează inerția termică a corpurilor. Unitatea de măsură a acestei mărimi este  $[m^2/s]$ .

Pentru cazul concret al varistoarelor, difuzivitatea are valoarea  $a = 1,2 \cdot 10^{-6} [m^2/s]$  [14].

Difuzivitatea termică prezintă o mare importanță pentru câmpurile de temperaturi nestaționare. De exemplu, în cazul căldurii primite de un corp, această mărime caracterizează capacitatea materialelor de a-și mări temperatura cu o viteză mai mare sau mai mică, proporțională cu  $\lambda$  și invers proporțională cu căldura specifică a materialului  $c$  și densitatea lui volumică  $\rho_d$ .

Proprietățile termice ale unui material sunt complet caracterizate numai dacă se cunosc ambele mărimi  $\lambda$  și  $a$ . Difuzivitatea termică  $a$ , la fel ca și conductivitatea termică  $\lambda$  depinde de temperatură și de densitatea și umiditatea materialului. Acest parametru caracterizează reacția corpului asupra redistribuirii căldurii în jurul punctului dat, deci caracterizează capacitatea de dispersare (difuziune) a energiei calorice în material.

Ecuația generală a conducției termice (4.28), la regim staționar, când  $\theta = constant$  și  $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$  se transformă în ecuația lui Laplace.



**Figura IV.2: Sistemul de coordonate cilindrice.**

În cazul varistoarelor pe bază de ZnO este mult mai convenabil a se utiliza sistemul de coordonate cilindrice, prezentat în figura IV.2:

Coordonatele  $r$ ,  $\varphi$  și  $z$  sunt legate de coordonatele  $x$ ,  $y$ ,  $z$  prin relațiile de mai jos:

$$x = r \cdot \cos \varphi \quad (4.29a)$$

$$y = r \cdot \sin \varphi \quad (4.29b)$$

$$z = z \quad (4.29c)$$





În situația de față considerăm:

$$\lambda_x = \lambda_y = \lambda_r \quad (4.30a)$$

$$\lambda_\varphi = \lambda_r \quad (4.30b)$$

$$\lambda_z = \text{variabil} \quad (4.30c)$$

Cu aceste notații vom avea componentele funcției gradient în forma:

$$\text{grad}_r \theta = \frac{\partial \theta}{\partial r} \quad (4.31a)$$

$$\text{grad}_\varphi \theta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \quad (4.31b)$$

$$\text{grad}_z \theta = \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (4.31c)$$

Efectuând înlocuirile corespunzătoare în relația lui Fourier, pentru un regim nestaționar se obține în final:

$$c\rho_d \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda_r \cdot \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} \right) + \lambda_z \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (4.32)$$

Teoria propagării căldurii, așa cum a fost prezentată până acum se bazează pe teoria curgerii lichidelor incompresibile. Funcția scalară de temperatură se poate interpreta ca funcție potențială și atunci relațiile studiate reprezintă în fond ecuațiile fundamentale ale teoriei generale a potențialului.

#### IV.2.2. Transmisia termică prin radiație

Fenomenul de radiație termică are loc doar în mediile transparente relativ la undele electromagnetice cu lungimea de undă cuprinsă între 0,4 și 340 microni. Orice corp care are temperatura diferită de zero absolut poate fi o sursă de energie radiantă. Aceste radiații transportă cu ele o anumită cantitate de energie luată de la corpul care le-a emis, realizând astfel răcirea corpului.

Căldura cedată prin radiație este emisă în linie dreaptă de la suprafața corpului în mediul ambiant, iar razele de căldură (unde de natură electromagnetică), întâlnind în drumul propagării lor alte corpuri, sunt absorbite sau reflectate, după starea suprafeței acestor corpuri. În primul caz, corpul este negru absolut, iar în al doilea caz, dacă suprafața este netedă, el este lucios, iar dacă suprafața este cu asperități, corpul este alb.

Schimbul de căldură între corpuri cu temperaturi diferite pe calea energiei radiante se numește *transmisivitatea termică prin radiație (și absorbție)*.

În cazul răcirii corpurilor prin radiație se va avea în vedere că, la corpurile mate, radiația este mai puternică decât la cele lucioase. Corpul absolut negru are o capacitate maximă de radiație (emisie) a energiei [54].

Dacă se raportează căldura cedată, pe calea radiației, într-un mediu nelimitat, de către unitatea de suprafață în unitatea de timp ( $q_r$  – densitatea fluxului termic de radiație), la supratemperatura corpului față de mediul ambiant, se obține mărimea fizică  $\alpha_r$ , care caracterizează transmisia termică de pe suprafața de radiație, denumită *transmisivitatea termică prin radiație*:

$$\alpha_r = \frac{q_r}{\tau} = \frac{q_r}{T_c - T_a} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ grad})] \quad (4.33)$$

unde:

$T_c = 273 + \theta_c$  – este temperatura absolută a corpului care radiază (în grade Kelvin);

$T_a = 273 + \theta_a$  – este temperatura absolută a peretelui care limitează spațiul închis, în mod obișnuit temperatura absolută a mediului ambiant, în grade Kelvin);

$\tau = T_c - T_a = \theta_c - \theta_a$  reprezintă supratemperatura față de mediul ambiant, în grade Kelvin sau Celsius.



Undele electromagnetice traversează mediile transparente fără însă a le încălzi, fenomenul radiației nu este influențat apreciabil de aerul atmosferic. Radiația, fiind un proces electromagnetic, se va produce atât în aerul în mișcare cât și în cel imobil, identic ca în vid. Transformările de energie calorică în energie electromagnetică și invers se produc la nivelul suprafeței corpului, după cum corpul radiază sau absoarbe căldura.

Luând în considerare relația lui Stefan - Boltzmann, care definește densitatea de flux termic radiat:

$$q_r = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.34)$$

Putem calcula transmisivitatea termică prin radiație  $\alpha_r$ , care va avea valoarea dată de:

$$\alpha_r = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \frac{\left( \frac{T_c}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4}{T_c - T_a} \quad [\text{W} / (\text{m}^2 \text{ grad})] \quad (4.35)$$

În relația (4.35):

$C_0 = 5,77 [\text{W} / (\text{m}^2 \text{ grad}^4)]$  – reprezintă coeficientul de radiație al corpului absolut negru;  
 $\varepsilon$  – este coeficientul de absorbție (sau radiație), denumit și constantă de radiație.

Coeficientul  $\varepsilon \cdot C_0$  scoate în evidență faptul că în construcția varistoarelor sau a coloanelor de varistoare avem de-a face în majoritatea cazurilor cu suprafețe cenușii sau având culori închise.

De exemplu pentru suprafața laterală a cilindrului varistor, reprezentată de izolația cu rășină epoxidică, valoarea lui  $\varepsilon$  (emisivitate) este de 0,7 – 0,9, iar pentru suprafețele de la capete valoarea lui  $\varepsilon$  este de circa 0,1. Pentru alamă avem o valoare de 0,2 - 0,25.

Transmisivitatea termică prin radiație,  $\alpha_r$ , depinde de aspectul (luciu și în oarecare măsură culoarea) suprafeței corpului care radiază (sau absoarbe) energie, de gradul de încălzire a lui în raport cu mediul ambiant și, de asemenea, de condițiile de iradiere ale mediului ambiant.

Prin acoperirea suprafețelor radiante ale coloanei de varistoare cu rășină epoxidică se ameliorează, pe lângă performanțele electrice și condițiile de răcire. Vopselele mate sau închise favorizează radiația (sau absorbția) căldurii, iar cele lucioase și deschise o împiedică. Starea suprafeței este alt indicator de calitate al transferului termic prin radiație, o suprafață mată și rugoasă, puțin prelucrată sau șlefuită, favorizează radiația termică.

Căldura transmisă prin radiație de un corp mediului ambiant este dată de relația:

$$Q = \alpha_r \cdot S \cdot (\theta_c - \theta_a) \cdot t \quad [\text{J}] \quad (4.36)$$

Se va considera ca suprafața radiantă de arie  $S$  numai suprafața care radiază în spațiul liber, iar toate suprafețele părților care se radiază reciproc vor fi excluse din calcul.

La temperaturile întâlnite în cazul concret al varistoarelor pe bază de ZnO, care foarte rar depășesc 150 grade Celsius, transmisia căldurii prin radiație este de mai mică importanță în raport cu transmisia căldurii prin convecție.

### IV.2.3. Transmisia termică prin convecție

Fenomenul convecției se bazează pe schimbul de căldură între suprafața unui corp și un mediu fluid cu care aceasta este în contact. Această formă de transmisie a căldurii nu poate avea loc în vid. Într-un mediu fluid (lichid sau gazos), uniformizarea temperaturii între puncte cu solicitări termice diferite se face simultan prin conducție termică și prin convecție.

Dacă un corp cald este înconjurat de un lichid sau de un gaz mai puțin cald, atunci căldura lui se transmite mai întâi prin conducție particulelor lichidului sau gazului care sunt în contact direct cu suprafața corpului. Prin aceasta, particulele se încălzesc, iar masa de fluid care conține aceste particule, micșorându-și densitatea, în câmpul de gravitație terestră, va deveni mai ușoară, iar masa

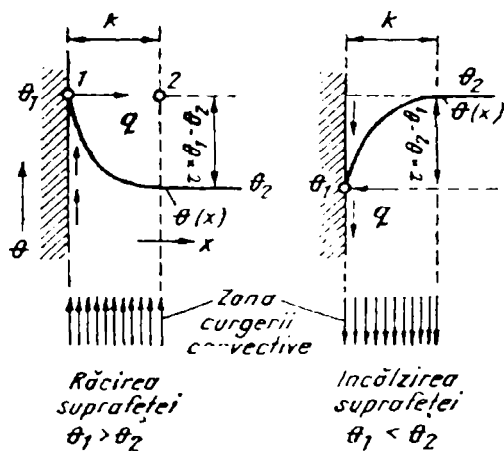


mai rece din vecinătate, fiind mai grea, va provoca mișcarea particulelor calde în sus; în locul lor vor veni alte particule mai reci, care de asemenea se încălzesc și sub acțiunea forțelor ascensionale se vor deplasa în sus. Aceste particule, fiind în permanentă mișcare, pe trasee paralele cu suprafața caldă, dau naștere unor curenți de fluid (fenomenul de convecție), care vor sustrage corpului căldura dezvoltată în el. În cazul când solidul este mai rece decât fluidul cu care vine în contact, sensul curentului de convecție este invers, mișcarea particulelor făcându-se de sus în jos.

Conductivitatea termică  $\lambda$  este de aproximativ 3000 de ori mai mică decât a fierului. Din acest motiv, cantitatea de căldură transmisă prin conducție este neglijabilă față de cantitățile foarte importante de căldură disipate pe calea convecției, care provoacă un foarte intens schimb de căldură.

În procesul transmisiei termice prin convecție, când mișcarea fluidului se datorează numai diferenței de greutate (densitate) dintre straturile calde și cele reci ale fluidului, convecția este *naturală* (liberă), iar când mișcarea fluidului este accelerată prin forțe exterioare, cu ajutorul pompelor (la lichide) sau al ventilatoarelor (la gaze), convecția este *artificială* (forțată).

Dacă vom considera cazul unui perete plan vertical, mai cald decât mediul fluid înconjurător și, de-a lungul unei axe  $x$ , perpendiculară pe perete, măsurăm temperaturile locale într-un punct 1 situat pe perete și într-un punct 2 situat în masa fluidului, la distanța la care temperatura peretelui nu mai are nici o influență asupra temperaturii fluidului, aflându-se în afara zonei procesului convectiv, distribuția de temperatură  $\theta = \theta(x)$ , va avea aspectul conform figurii IV.3 [54].



**Figura IV.3: Câmpul de temperaturi din vecinătatea unei suprafețe plane, în cazul convecției.**

Deoarece câmpurile de temperatură și de viteză variază de-a lungul înălțimii peretelui,  $\alpha_c$  va avea de asemenea valori diferite, prin urmare în calcule se va lua o valoare medie.

Parametrul  $\alpha_c$  depinde de:

- viteza de mișcare a fluidului;
- temperatura suprafeței corpului;
- temperatura mediului;
- căldura specifică a fluidului;
- geometria suprafeței

În literatura de specialitate se întâlnesc diverse expresii pentru  $\alpha_c$ , [34], [38], care nu vor fi prezentate, în situația concretă fiind mult mai eficient să se utilizeze tabele, grafice sau diagrame care prezintă valorile acestui parametru funcție de diverși factori. În cele mai multe situații  $\alpha_c$  se determină experimental pentru fiecare caz în parte.

Pentru calculul cantității de căldură transmisă prin convecție (incluzându-se și conducția) de la un corp cald la mediul ambiant fluid, avem relația:

$$Q = \alpha_c \cdot S \cdot (\theta_c - \theta_a) \cdot t \quad [\text{J}] \quad (4.38)$$

Această relație se obține cu ajutorul relației (4.37).

În acest caz, când prin suprafața peretelui avem un schimb de căldură între solid și fluid bazat pe convecție și conducție, densitatea fluxului termic  $q_c$  în punctul 1, va fi dată de relația de mai jos:

$$q_c = \alpha_c \cdot (\theta_1 - \theta_2) = \alpha_c \cdot \tau \quad [\text{W/m}^2] \quad (4.37)$$

în care:

- $\alpha_c$  este transmisivitatea termică prin convecție, în  $[\text{W}/(\text{m}^2\text{grad})]$ ;
- $\tau$  este supratemperatura perete față de temperatura mediului fluid, în  $[\text{°C}]$  sau  $[\text{K}]$ .

La baza studiului teoretic al procesului transmisiei termice prin convecție stă analiza distribuției temperaturii și vitezelor în curentul de fluid care se scurge de-a lungul peretelui.



#### IV.2.4. Transmisia termică combinată

Această formă combinată de transmisie a căldurii corespunde procesului real al schimbului de căldură dintre un corp solid și un fluid, în care caz întâlnim conducție, convecție și radiație simultan.

Cele trei componente ale schimbului termic se întâlnesc simultan, dar participă cu intensități diferite la transferul general al căldurii. Studiul separat al celor trei componente prezintă interes doar sub aspectul unui studiu fenomenologic, ceea ce interesează fiind cantitatea de căldură totală și repartiția temperaturii în ansamblul aparatului. În cazul coloanei de varistoare de ZnO sau a unui singur varistor, preponderentă este cedarea căldurii în mediul ambiant fluid (aer, SF<sub>6</sub>, mai rar ulei) printr-un proces de convecție naturală. Puține echipamente de protecție contra supratensiunilor sunt concepute să funcționeze răcite prin convecție forțată (de exemplu cu ventilatoare).

Considerând schimbul de căldură combinat, situație care se potrivește cazului unui echipament de protecție contra supratensiunilor care operează la joasă tensiune, unde ponderea căldurii cedate prin radiație este mai mare decât în cazul celorlalte categorii de echipamente, fiind totuși inferioară convecției, transmisia de căldură totală, în aerul practic imobil, se compune din căldura disipată pe calea radiației și căldura cedată prin convecție.

În cazul general se poate scrie densitatea globală a fluxului termic:

$$q_{\Sigma} = q_r + q_e = \alpha_r \cdot \tau + \alpha_c \cdot \tau = \tau \cdot (\alpha_r + \alpha_c) \quad (4.39a)$$

Suma din paranteză dintre transmisivitatea termică prin radiație  $\alpha_r$  și transmisivitatea termică prin convecție  $\alpha_c$  determină transmisivitatea termică globală  $\alpha_{\Sigma}$ :

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_r + \alpha_c \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{grad})] \quad (4.39b)$$

Prin urmare:

$$q_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} \cdot \tau \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (4.39c)$$

Cantitatea de căldură, disipată în unitatea de timp în mediul ambiant prin suprafața laterală de arie  $S$ , pe calea transmisiei combinate a căldurii, se determină aproximativ, cu ajutorul formulei lui Newton:

$$P = \alpha_{\Sigma} \cdot S \cdot (\theta_c - \theta_a) \quad [\text{W}] \quad (4.40)$$

Cantitatea de căldură disipată în timpul  $t$  se determină cu relația:

$$Q = \alpha_{\Sigma} \cdot S \cdot (\theta_c - \theta_a) \cdot t \quad [\text{W}] \quad (4.41)$$

Aceste formule sunt valabile numai în cazul când atât radiația, cât și convecția, se referă la aceeași suprafață laterală  $S$ . Acesta este cazul echipamentelor de protecție contra supratensiunilor realizate în variantă capsulată, fără ondulații pentru răcire.

În general suprafața radiantă este suprafața liberă a corpului, pe când suprafața de convecție este întreaga suprafață care vine în contact cu fluidul.

Majoritatea echipamentelor de protecție contra supratensiunilor, indiferent de nivelul de tensiune la care funcționează, sunt realizate în varianta constructivă capsulată.

**Capsularea** împiedică răcirea eficientă a coloanei de varistoare, convecția fiind mai redusă în această atmosferă închisă. În aceste condiții, temperatura ei poate depăși chiar de 2-3 ori valoarea care s-ar înregistra dacă montajul ar fi făcut în aer liber. Căldura se evacuează integral prin pereții carcasei. Supratemperatura staționară a suprafeței exterioare a carcasei, față de temperatura aerului ambiant, se poate determina cu relația (4.40) de exemplu. Supratemperatura suprafeței interioare a carcasei echipamentului se determină din ecuația transmisiei termice prin conducție (4.19) [54].

Supratemperatura mediului fluid din interiorul carcasei (aer, SF<sub>6</sub>, mai rar ulei) este ceva mai mare cu 5 până la 10 °C decât supratemperatura suprafeței interioare a carcasei, datorită convecției pe suprafața interioară.





Pentru transmisivitatea termică globală  $\alpha_{\Sigma}$  se vor alege valori cu 20 - 30% mai mici decât în aer, datorită spațiului limitat al interiorului carcasei [54].

Este interesant să prezentăm și expresia fluxului termic schimbat prin procesul de radiație – absorbție de către coloana cilindrică de varistoare, cu suprafața laterală  $S_1$ , la temperatura  $T_1$  și carcasa descărcătorului, care are suprafața interioară  $S_2$  și este la temperatura  $T_2$ . Cei doi cilindri sunt practic coaxiali. Fluxul termic total este [1]. Pentru cazul unui echipament de protecție contra supratensiunilor la care  $S_1 \ll S_2$  (coloana varistoarelor are o suprafață laterală mult mai mică decât suprafața interioară a carcasei izolatoare), fluxul termic schimbat este [6], [54], [61] :

$$P_r = \varepsilon_1 \cdot S_1 \cdot C_0 \cdot \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad [\text{W}] \quad (4.42)$$

Totul se petrece ca și când interiorul carcasei ar fi absolut negru, deci care absoarbe integral toată radiația electromagnetică la care este expus, indiferent de lungimea de undă.

### IV.3. Ecuația generală a bilanțului termic

În regimul termic permanent, întreaga cantitate de căldură ce se dezvoltă în varistor sau în coloana de varistoare este cedată mediului ambiant. Regimul termic permanent este regimul de serviciu, în care echipamentul de protecție este conectat în rețea (la tensiunea  $U_n$ ), varistoarele fiind parcurse de un curent de serviciu permanent ( $I_f$ ), care indiferent de categoria de tensiune a echipamentelor trebuie să fie inferior unui miliamper. Cu cât acest curent este mai mic, cu atât echipamentul de protecție este mai eficient, deoarece se reduc pierderile în regim permanent, iar căldura produsă de acest echipament este disipată mai ușor, asigurând debutul încălzirii varistorului în cazul aplicării unui impuls de tensiune (curent) pornind de la o valoare a temperaturii cât mai apropiată de temperatura mediului ambiant. Din punct de vedere termic, funcționarea unui varistor expus unei supratensiuni de lungă durată dar de foarte mică amplitudine poate fi tratată tot ca un regim termic permanent

Regimul termic permanent este un regim de durată, temperatura aparatului fiind constantă în timp și având valoarea  $\theta_s$ . În general echipamentele de protecție contra supratensiunilor sunt corpuri neomogene, temperaturile în diferite puncte ale coloanei de varistoare sau ale carcasei aparatului fiind diferite.

Este important să se cunoască repartiția spațială a temperaturilor (deci câmpul de temperaturi) în interiorul unui astfel de echipament, pentru a putea acționa în sensul reducerii acestora, chiar și în situația regimului permanent de funcționare. Determinarea câmpului de temperatură se face separat pentru medii active termic (cu surse interne de căldură, cazul coloanei de varistoare) și pentru medii pasive (izolația varistoarelor, carcasa echipamentului, mase suplimentare, etc.).

Căldura se propagă după direcții care țin de simetria, geometria părților active și modul în care această căldură este produsă în interiorul lor.

În general, este recomandabil să se adopte o transmisivitate termică medie pentru întreg perimetrul considerat, în primul rând datorită neomogenității materialului:

$$\alpha_{med} = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} \alpha_k \cdot S_k}{\sum_{k=1}^{k=n} S_k} \quad (4.43)$$

unde:

- $\alpha_k$  – este transmisivitatea termică globală, corespunzătoare porțiunii  $s_k$  din aria laterală a corpului (perimetrul secțiunii), în  $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{grad})]$ ;
- $s_k$  – mărimea porțiunii  $k$  din perimetrul secțiunii transversale, considerată în  $[\text{m}]$ .





Determinarea unui  $\alpha_{med}$  se impune mai ales în cazul unor secțiuni cu profil complicat, la care diferite porțiuni ale secțiunii disipă căldura în mod neuniform.

Procesul transmisiei termice la căile de curent parcurse de curenții alternativi are un caracter mai complicat. În acest caz, datorită efectului pelicular și efectului de proximitate, densitatea de curent și pierderile specifice nu au o distribuție uniformă în secțiunea căilor de curent. Rezolvarea ecuațiilor câmpului termic în astfel de situații întâmpină mari dificultăți. Cercetările efectuate până acum au demonstrat că influența efectului pelicular asupra câmpului de temperaturi în varistoare, atât în regim permanent, la tensiunea de frecvență industrială, cât și în regim de impuls, este relativ neglijabilă [5].

Definirea regimului staționar sau tranzitoriu din punct de vedere termic nu poate fi făcută decât după analizarea completă a ecuațiilor care guvernează regimul respectiv și a datelor furnizate de procesul propriu-zis.

În **regim termic staționar (permanent)**, câmpul de temperatură este constant în timp, deci nu depinde decât de coordonatele spațiale:

$$\theta = \theta(x, y, z) \quad (4.44)$$

În **regim termic nestaționar (tranzitoriu)**, câmpul de temperatură depinde de coordonatele spațiale ale punctului unde se face măsurătoarea dar și de timpul la care se face măsurarea.

$$\theta = \theta(x, y, z, t) \quad (4.45)$$

Căldura care se dezvoltă contribuie la creșterea temperaturii corpului în timp, iar transmisia căldurii către mediul ambiant se face combinat prin cele trei moduri prezentate anterior, anume conducție, convecție și radiație [54]. În cazul varistoarelor se recomandă, datorită simetriei cilindrice, utilizarea coordonatelor cilindrice  $r, \varphi, z$ , în locul celor euclidiene clasice  $x, y, z$ .

Determinarea repartiției temperaturilor se poate face:

▪ **Conform ipotezei teoriei clasice a încălzirii (ITC);**

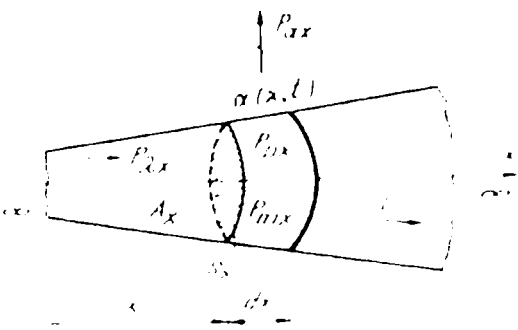
În această situație se consideră următoarele ipoteze simplificatoare:

- corpul este omogen;
- rezistența nu depinde de temperatură ( $R = constant$ );
- pierderile în unitatea de volum sunt constante ( $p = constant$ );
- transmisivitatea termică rezultantă nu depinde de temperatură ( $\alpha = const$ );
- căldura specifică nu depinde de temperatură ( $c = constant$ );
- temperatura mediului ambiant este constantă ( $\theta_a = constant$ );

▪ **Conform ipotezei teoriei clasice dezvoltate a încălzirii (ITCD);**

În această ipoteză se consideră că rezistivitatea (și deci pierderile) variază liniar cu temperatura:

$$\rho = \rho_a \cdot (1 + \alpha_r \cdot \tau) \quad (4.46)$$



**Figura IV.4: Fluxurile termice pentru calculul bilanțului termic.**

Celelalte ipoteze din ITC rămân valabile și în ITCD. Legea de variație al rezistivității cu temperatura pentru un varistor este mult mai complexă.

Pentru a prezenta ecuația generală a bilanțului termic în cazul varistoarelor pe bază de ZnO sau în cazul coloanelor de varistoare de acest tip, vom considera materialul varistor prezentat sub formă de trunchi de con, cu secțiune transversală circulară, așa cum este prezentat și în figura IV.4. [54] (în cazul cel mai general).

Se va prezenta deducerea ecuației generale a bilanțului termic, axa X fiind considerată axa de simetrie a cilindrului varistor (trunchi de con în cazul general).



Conductorul (varistorul) este încălzit prin efect electrocaloric de curentul  $I$ , care îl parcurge prin secțiunile de arie  $A_x$  (care pot fi variabile în lungul axei  $X$ ), suprafața exterioară fiind în contact cu mediul de răcire, care are temperatura  $\theta_a$ .

În ipoteza unei căderi relativ mici de temperatură în suprafața oricărei secțiuni transversale  $A_x$ , calculul termic se poate efectua considerând funcția  $\theta(x,t)$ , conductorul un mediu cu surse interne de căldură, iar suprafața laterală (exterioară) ca zonă de disipație a căldurii în mediul exterior de răcire.

Disiparea căldurii prin suprafața laterală produce un "efect de frontieră", datorită căruia suprafețele izoterme nu mai coincid cu secțiunile transversale prin conductor.

La conductorul considerat, delimităm un segment oarecare, de lungime elementară  $dx$ , care determină un volum  $dV_x = A_x \cdot dx$  și perimetrul  $s_x$  al secțiunii de arie  $A_x$ . Bilanțul termic pentru acest volum elementar  $dV_x$  stabilește un echilibru între variațiile cantităților de căldură în unitatea de timp caracterizate prin [54]:

a). Fluxul termic produs de sursele interne de căldură:

$$P_{px} = \frac{dQ_{px}}{dt} = p(x,t)dV_x = p(x,t) \cdot A_x \cdot dx \quad (4.47)$$

unde  $p(x,t)$  sunt pierderile specifice în conductor în volumul  $dV_x$ .

b). Fluxul termic de egalizare (calorică) liniară, determinat de gradientul de temperatură  $\partial\theta/\partial x$  din mediul conductor:

$$P_{\lambda x} = \frac{dQ_{\lambda x}}{dt} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}\theta) \cdot dV_x = \lambda \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \cdot A_x \cdot dx \quad (4.48)$$

unde  $\lambda$  este conductivitatea termică a conductorului omogen;

c). Fluxul termic corespunzător căldurii acumulate de elementul de masă  $dm$  și care rămâne înmagazinată în stare potențială în volumul  $dV_x$ :

$$P_{mx} = \frac{dQ_{mx}}{dt} = c \cdot dm \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = c \cdot \rho_d \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot A_x \cdot dx \quad (4.49)$$

unde produsul  $(c \cdot dm)$  reprezintă capacitatea calorică în [**J / grad**].

d). Fluxul termic de disipație a căldurii în mediul de răcire prin suprafața laterală  $s_x \cdot dx$ :

$$P_{\alpha x} = \frac{dQ_{\alpha x}}{dt} = \alpha(x,t) \cdot (\theta - \theta_a) \cdot s_x \cdot dx \quad (4.50)$$

unde  $\theta - \theta_x = \tau$  reprezintă supratemperatura conductorului aflat la temperatura  $\theta$  față de temperatura mediului ambiant aflat la temperatura  $\theta_a$ , iar  $\alpha(x,t)$  reprezintă transmisivitatea termică globală (medie).

Pe baza principiului conservării energiei, utilizând relațiile (4.47), (4.48), (4.49), (4.50), se poate obține ecuația bilanțului termic pentru elementul de volum corespunzător coordonatei  $x$ :

$$P_{px} + P_{\lambda x} = P_{mx} + P_{\alpha x} \quad (4.51)$$

care, în forma explicită este:

$$c \cdot \rho_d \cdot \frac{d\theta}{dt} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + p(x,t) - \alpha(x,t) \cdot \frac{s_x}{A_x} \cdot (\theta - \theta_a) \quad (4.52)$$

Fiecare termen din bilanțul de mai sus este exprimat în [**W/m<sup>3</sup>**] și corespunde fluxurilor termice menționate mai sus.

Ecuația (4.52), în ipoteza  $\partial\theta/\partial t = 0$ , permite calculul solicitărilor termice staționare ale căilor de curent în numeroase cazuri particulare ale unor varistoare aflate în regim de serviciu permanent, la tensiunea nominală a rețelei:



- Procesul termic staționar al unui varistor de tip disc, pentru joasă tensiune, parcurs de un curent de lungă durată, caz în care temperatura varistorului variază axial;
- Procesul termic staționar al unui varistor cilindric, pentru medie și înaltă tensiune, când nu există un flux termic longitudinal egalizator, determinat de variația axială a temperaturii;
- Procesul termic staționar al unui sistem neomogen (coloană de varistoare), alcătuit din segmente legate în serie, având fiecare diferiți parametrii geometrici și diferite condiții de disipare a căldurii în mediul de răcire;

Ecuția (4.52), în ipoteza  $\partial\theta/\partial t \neq 0$ , permite calculul solicitărilor termice nestaționare ale căilor de curent, în cazurile particulare ale unor varistoare aflate în regim dinamic, varistoare expuse unor supratensiuni.

- Procesul termic nestaționar (pe durata încălzirii sau răcirii) unui varistor de tip disc (la joasă tensiune), atunci când există un flux termic longitudinal egalizator;
- Procesul termic nestaționar al unui varistor tip cilindru (medie și joasă tensiune), când nu există un flux termic longitudinal egalizator;
- Procesul termic nestaționar al unui sistem neomogen (coloană de varistoare), alcătuit din segmente legate în serie, având fiecare diferiți parametrii geometrici și diferite condiții de disipare a căldurii în mediul de răcire;

Modificarea stărilor de funcționare a unui echipament de protecție contra supratensiunilor se caracterizează printr-un regim de lucru nestaționar, care este însoțit de solicitări termice tranzitorii, determinate de procesele de încălzire și de răcire [9].

Printre cele mai caracteristice solicitări termice tranzitorii ale acestei categorii de echipamente electrice amintim [16]:

- Procesul încălzirii echipamentelor pe durata alimentării la rețea, până la atingerea regimului staționar;
- Procesul răcirii după deconectarea de la rețea;
- Procesul încălzirii la sarcina de scurtă durată (cazul aplicării unui impuls de supratensiune și implicit supracurent);
- Procesul răcirii varistoarelor după ce s-a aplicat impulsul și până la atingerea regimului staționar;
- Procesul de încălzire sau răcire a varistoarelor aflate sub tensiune, în regim permanent, cauzat de variațiile temperaturii mediului ambiant.

Calculul proceselor termice tranzitorii (în care temperatura varistorului variază în timp) se bazează pe unele considerente de ordin practic. Astfel, pentru corpurile izotrope, cu surse interne de căldură, procesul termic nestaționar în cazul general se poate caracteriza prin ecuația conducției termice. Rezolvarea acestei ecuații, ținând seama de toți factorii care intră în fenomenele termice, implică mari dificultăți de calcul și în numeroase cazuri nu are justificare tehnică. De aceea este necesar să se facă unele aproximări care, dacă sunt corect alese, vor facilita foarte mult calculul, iar rezultatele vor fi satisfăcătoare.

De regulă se preferă existența doar a unui flux termic monodimensional (de exemplu doar radial). În cazul căilor de curent omogene, în timpul procesului tranzitoriu la încălzire, când în toate punctele densitatea de curent este constantă și conductibilitatea termică infinită, căderile de temperatură după orice direcție devin nule.

Procesele termice tranzitorii în căile de curent neomogene se rezolvă de obicei în (ITC), temperatura mediului ambiant fiind considerată constantă.

La procese tranzitorii de scurtă durată (secunde sau mai puțin) se neglijează cedarea căldurii în mediul ambiant.

Aceste condiții ideale, în realitate, nu sunt satisfăcute, ca urmare de multe ori este necesară analiza regimului tranzitoriu pe baza ipotezei teoriei clasice dezvoltate (ITCD), când unul din



parametrii menționați, sau mai mulți, vor varia (mai ales cu temperatura și respectiv cu timpul). În acest caz, evident, rezultatele pot fi mai apropiate de realitate.

O problemă aparte o constituie și neomogenitatea mediului varistor.

O analiză completă a repartiției temperaturii în mediul varistor, în situația regimului tranzitoriu, dar și a regimului permanent, se poate realiza numai utilizând metode numerice de modelare a câmpului termic.

#### IV.3.1 Calculul încălzirii varistoarelor omogene, de secțiune constantă, în ipotezele teoriei clasice (ITC)

Pentru a determina ecuația curbei de încălzire a unui varistor sau a unei coloane de varistoare, parcurse de curent (cu surse interne de căldură), plasat într-un mediu de răcire se poate efectua pornind de la ipotezele teoriei clasice (ITC)

Din clipa apariției pierderilor prin efect electrocaloric, în varistorul rece (sau cu o supratemperatură inițială), temperatura crește progresiv până la o valoare constantă (staționară).

Deoarece la început căldura cedată mediului ambiant este mică, energia calorică se acumulează în masa varistorului și provoacă o creștere rapidă a temperaturii, iar spre finele procesului tranzitoriu această creștere devine din ce în ce mai mică. Procesul încălzirii tranzitorii a varistorului se caracterizează prin micșorarea progresivă până la zero a vitezei de variație a temperaturii acestuia.

Pe durata regimului tranzitoriu de încălzire a varistorului întâlnim următoarele cantități de căldură [6], [61]:

- Căldura dezvoltată în conductor prin efect Joule-Lenz în elementul de timp  $dt$  (în [J]):

$$P \cdot dt = k_p \cdot I^2 \cdot R \cdot dt \quad (4.53)$$

unde:

- $P$  este puterea activă dezvoltată în varistorul parcurs de curent;
- $k_p$  – coeficientul de pierderi suplimentare;
- $I$  – valoarea efectivă a curentului (în [A]);
- $R$  – rezistența electrică a mediului varistor (în [ $\Omega$ ]).

- Căldura cedată mediului ambiant prin suprafața de răcire în elementul de timp  $dt$  (în [J]):

$$P_d \cdot dt = \alpha \cdot S \cdot \tau \cdot dt \quad (4.54)$$

unde:

- $P_d$  este puterea cedată (disipată) sau fluxul termic de disipare a căldurii în mediul ambiant (în [W]);
- $\alpha$  – transmisivitatea termică globală (medie) (în [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{grad}$ ]);
- $S$  – aria suprafeței de frontieră a conductorului prin care se cedează căldura (în [ $\text{m}^2$ ]);
- $\tau = \tau(t)$  – supratemperatura varistorului față de temperatura de referință a mediului ambiant, (în [ $^\circ\text{C}$ ]);

- Căldura acumulată în masa varistorului în elementul de timp  $dt$  (în [J]):

$$P_a \cdot dt = c \cdot m \cdot d\tau \quad (4.55)$$

unde:

- $P_a$  este puterea acumulată în masa varistorului (în [W]);
- $c$  – căldura specifică a varistorului (în [ $\text{J} / \text{kg} \cdot \text{grad}$ ]);
- $m$  – masa varistorului (în [kg]);
- $d\tau = d\theta$  – creșterea de temperatură (în [ $^\circ\text{C}$ ]).



Ecuția diferențială (cu derivate parțiale) a transmisiei termice este:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{j^2 \cdot \rho}{c \cdot \rho_d} - \frac{\alpha \cdot l_p}{c \cdot \rho_d \cdot A} \cdot \tau \quad (4.56)$$

unde:

- $j$  – densitatea superficială de curent prin varistor (în  $[\text{A}/\text{m}^2]$ );
- $\rho$  – rezistivitatea electrică (în  $[\Omega \cdot \text{m}]$ );
- $c$  – căldura specifică (în  $[\text{J} / \text{kg} \cdot \text{grad}]$ );
- $\rho_d$  – densitatea masică (în  $[\text{kg} / \text{m}^3]$ );
- $l_p$  – perimetrul secțiunii transversale a varistorului (în  $[\text{m}]$ );
- $A$  – aria secțiunii transversale prin varistor (în  $[\text{m}^2]$ );
- $\tau$  – supratemperatura (în  $[\text{°C}]$ ).

Cum  $d\theta = d\tau$ , putem scrie:

$$d\tau = \frac{j^2 \cdot \rho}{c \cdot \rho_d} \cdot dt - \frac{\alpha \cdot S}{c \cdot \rho_d \cdot A} \cdot \tau \cdot dt \quad (4.57)$$

unde  $S$  este suprafața laterală a varistorului (coloanei de varistoare), în  $[\text{m}^2]$ .

$$d\tau = \frac{P}{c \cdot m} \cdot dt - \frac{\alpha \cdot S}{c \cdot m} \cdot \tau \cdot dt \quad (4.58)$$

unde  $m$  este masa varistorului (coloanei de varistoare) în  $[\text{kg}]$ .

Ținând seama de toate aceste relații, putem scrie ecuația bilanțului termic:

$$P \cdot dt - \alpha \cdot S \cdot \tau \cdot dt = c \cdot m \cdot d\tau \quad (4.59)$$

Relația (4.59) reprezintă legea conservării energiei, conform căreia diferența dintre cantitatea de căldură dezvoltată într-un timp  $dt$  și cea evacuată prin suprafața varistorului în același interval de timp trebuie să fie egală cu căldura acumulată în varistor [6], [53], [54], [61].

Cele două componente, derivate din căldura dezvoltată, manifestă acțiuni diferite (dar reciproc condiționate) și anume: căldura cedată provoacă întârzierea atingerii regimului staționar, iar căldura acumulată provoacă creșterea temperaturii varistorului.

La finele procesului tranzitoriu, supratemperatura atinge valoarea staționară  $\tau_s = \theta_s - \theta_a$ , ceea ce corespunde începerii regimului termic staționar, când creșterea de temperatură tinde către zero și acumularea căldurii în varistor încetează ( $c \cdot m \cdot d\tau = 0$ ).

În regim staționar, relația (4.59) devine:

$$P = \alpha \cdot S \cdot \tau_s \quad (4.60)$$

De unde, supratemperatura de regim staționar  $\tau_s$  are expresia:

$$\tau_s = \frac{P}{\alpha \cdot S} = f(P) \quad (4.61)$$

În regim staționar, căldura dezvoltată în varistor, pe durata oricărui interval de timp, este cedată în întregime mediului ambiant. Supratemperatura staționară  $\tau_s$  este proporțională cu puterea  $P$  dezvoltată în varistor și este independentă de temperatura inițială.

Raportul:

$$T = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot S} \quad (4.62)$$

poartă numele de constantă termică de timp (în  $[\text{s}]$ ).





Având în vedere relația (4.59), putem rescrie ecuația bilanțului termic ca fiind:

$$\alpha \cdot S \cdot (\tau_s - \tau) \cdot dt = c \cdot m \cdot d\tau \quad (4.63)$$

Soluția acestei ecuații este:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}} + \tau_s \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (4.64)$$

Relația (4.64) reprezintă ecuația de încălzire a varistorului în timp, în cazul cel mai general.

Dacă avem situația particulară, când  $\tau_0 = 0$  (adică  $\theta_0 = \theta_a$ ), când la momentul începerii încălzirii, varistorul are temperatura mediului ambiant, ecuația (4.17) devine:

$$\tau(t) = \tau_s \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (4.65)$$

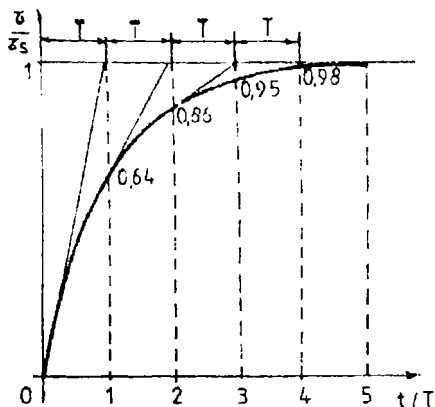


Figura IV.5: Construcția  
curbei de încălzire.

Curbele de încălzire ale unui varistor, date de relațiile (4.64) și (4.65) sunt prezentate în figura IV.5. [61], prin curbele a, respectiv b, constatându-se că ambele curbe au aceeași supratemperatură staționară  $\tau_s$ .

Segmentul  $AB = T$ , ca subtangentă la curba de încălzire corespunzătoare punctului **M**, rămâne mereu constant pentru orice poziție a punctului pe curbă.

Parametru  $T = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot S}$  poate fi luat constant numai dacă  $\alpha$  și

$c$  nu depind de temperatură și, deoarece are dimensiunea unui timp, poartă denumirea de constantă termică de timp, așa cum l-am prezentat deja în relația (4.62).

### IV.3.2. Calculul răcirii varistoarelor omogene, de secțiune constantă, în ipotezele teoriei clasice

După cum am mai spus, dacă într-un varistor s-a atins temperatura staționară, atunci întreaga căldură dezvoltată se cedează mediului ambiant.

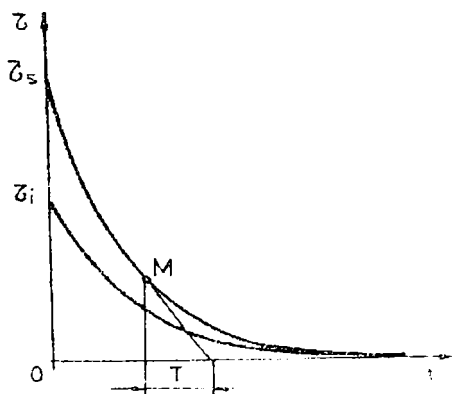


Figura IV.6: Curba de răcire  
a unui varistor în ITC.

Vârșitorul s-a încălzit până la temperatura  $\tau_s$  are înmagazinată (în stare potențială) o anumită cantitate de căldură egală cu  $c \cdot m \cdot \tau_s$ . Dacă se întrerupe curentul, încetează dezvoltarea de căldură în conductor ( $P = 0$ ) și din acel moment începe procesul de răcire, care constă în cedarea căldurii acumulate mediului ambiant. Când temperatura conductorului atinge temperatura mediului ambiant, întreaga cantitate de căldură se consideră complet evacuată.

Acest proces se demonstrează analitic și grafic cu ajutorul ecuației diferențiale (4.63) în condiția  $P \cdot dt = 0$ . Ca urmare, relația (4.63) se rescrie:

$$-c \cdot m \cdot d\tau = \alpha \cdot S \cdot \tau \cdot dt \quad (4.66)$$

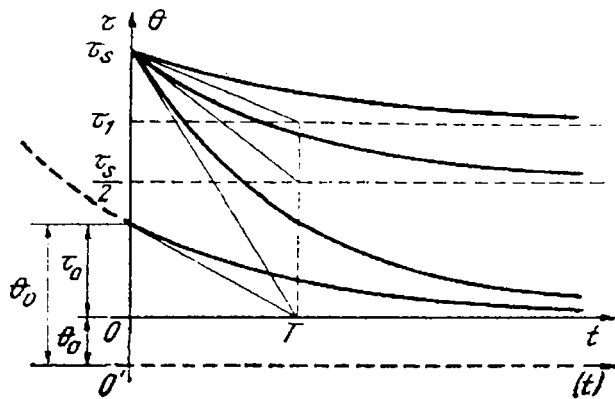
Această ecuație diferențială reflectă constatarea că micșorarea cantității de căldură acumulată este egală cu căldura cedată mediului de răcire.

Soluția acestei ecuații, luând în considerare că  $T = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot S}$ , este:

$$\tau(t) = \tau_s \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.67)$$



Și în acest caz subtangentele în oricare punct pe curba de răcire au aceeași valoare și sunt egale cu constanta termică de timp  $T$ , așa cum reiese și din figurile IV.6 [61] și IV.7 [54].



**Figura IV.7: Curbele de răcire ale unui varistor la diverse temperaturi.**

În cazul în care la  $t = 0$ , suprațempertura  $\tau$  a avut o valoare oarecare  $\tau_i$ , diferită de suprațempertura de regim staționar  $\tau_s$ , atunci putem scrie o relație asemănătoare cu (4.67), anume:

$$\tau = \tau_i \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.68)$$

În situația în care răcirea se efectuează de la suprațempertura  $\tau_s$  la suprațempertura  $\tau_1$ , ecuația răcirii devine:

$$\tau(t) = \tau_1 + (\tau_s - \tau_1) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (4.69)$$

#### IV.4. Concluzii

Acest capitol și-a propus să trateze probleme legate de dezvoltarea și transmisia căldurii în echipamentele de protecție contra supratensiunilor care utilizează varistoare pe bază de ZnO.

Indiferent de nivelul de tensiune și serviciul de funcționare, în interiorul varistoarelor se produce căldură, prin efect Joule-Lenz, căldură care poate cauza accelerarea conducerii electrice și distrugerea varistorului prin fenomenul "ambalării termice". Este foarte important ca această căldură să fie disipată în mediul ambiant prin conducție, convecție și radiație.

Nu ne-am propus decât să prezentăm mărimile care intervin în aceste procese precum și legăturile dintre ele. Modul concret în care aceste considerente teoretice se aplică în studiul funcționării echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO va fi prezentat în capitolul dedicat metodei globale de analiză a stabilității termice a acestor echipamente, împreună cu considerațiile proprii ale autorului și soluțiile tehnice produse și analizate teoretic și experimental.

Concluzia principală a acestui capitol este imposibilitatea generării unui model pur analitic utilizabil pentru studiul fenomenelor legate de producerea și transferul căldurii în echipamentele de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO, datorită variației parametrilor implicați și mai ales datorită faptului că, de exemplu în cazul varistoarelor tip disc, cedarea de căldură are loc și în sens radial, dar și axial.

Ca urmare, pentru studiul încălzirii și răcirii varistoarelor, indiferent de regimul termic în care se află, este necesară utilizarea unui model numeric, care să ia în considerare toate aceste aspecte și să ofere valori ale mărimilor studiate cât mai apropiate de realitatea fizică. În capitolul următor vom încerca o scurtă prezentare a acestui model numeric.

#### IV.5. Contribuții personale

În acest capitol, cele mai importante contribuții personale ale autorului sunt:

- explicitarea aplicării ecuațiilor generale ale dezvoltării căldurii și transmisiei termice în cazul concret al varistoarelor pe bază de ZnO;
- sintetizarea cunoștințelor din domeniu, necesare abordării matematice a proceselor termice care intervin în funcționarea varistoarelor pe bază de ZnO;
- stabilirea necesității unui nou model matematic, de tip numeric, pentru abordarea problemelor legate de transferul termic în această situație.



## CAPITOLUL V

### Modelarea transferului termic prin metoda elementelor finite

Modelarea numerică reprezintă astăzi cel mai util instrument matematic pus la dispoziția inginerilor, având aplicații în toate ramurile tehnicii, fie că este vorba de mecanică, energetică nucleară, construcții, aeronautică, inginerie chimică, design etc. Practic, nu există domeniu al tehnicii care să nu poată beneficia de rezultatele modelării numerice.

Modelarea numerică s-a dezvoltat în mod independent, dar nu exclusiv, pe două direcții principale:

- a). *Metoda diferențelor finite;*
- b). *Metoda elementelor finite.*

În **metoda diferențelor finite**, concepută încă de pe vremea lui Euler, când toate calculele erau efectuate manual, folosește ca punct de plecare modelul diferențial al fenomenului analizat, model pe care îl transformă apoi într-unul numeric, folosind procedeul de aproximare locală punctiformă a variabilelor de câmp. Ca urmare, sistemul de ecuații diferențiale cu derivate parțiale valabil pentru orice punct al domeniului de analiză se transformă într-un sistem de ecuații analogice, valabile numai pentru anumite puncte ale domeniului, puncte care definesc rețeaua de discretizare a modelului.

Dezavantajul principal al acestei metode îl constituie utilizarea unei rețele rectangulare de discretizare a domeniului de analiză. Unii autori [13], [15] au realizat modelarea prin metoda diferențelor finite, dar numai pentru varistoare tip cilindru, unde cedarea căldurii are loc în primul rând radial. Pentru aceasta au recurs la schimbări de variabilă și artificii de calcul pentru a putea efectua calculele. Mai apar și probleme legate de convergența soluțiilor și determinarea condițiilor specifice.

În **metoda elementelor finite**, ca punct de plecare se utilizează un model integral al fenomenului studiat. Acest model se obține în mod direct prin calcul, sau poate fi derivat din modelul diferențial corespunzător, cu ajutorul calculului variațional sau al metodei reziduurilor ponderate. Spre deosebire de metoda diferențelor finite, această metodă se bazează pe aproximarea locală pe porțiuni sau subdomenii a variabilelor de câmp.

Datorită folosirii unui model integral, ca bază de plecare, precum și a unor seturi de funcții continue pe porțiuni, metoda elementelor finite nu mai este condiționată de existența unei rețele rectangulare. Practic, se pot discretiza corpuri geometrice oarecare, cu frontieră nu neapărat rectilinie.

Datorită performanțelor sale ridicate, metoda elementelor finite a devenit aproape o metodă standard de analiză și proiectare, mai ales în ultimii ani, odată cu utilizarea pe scară tot mai mare a tehnicii de calcul.

Prin posibilitatea de a determina distribuții spațiale ale parametrilor studiați în diferitele corpuri precum și variația acestora în timp, modelarea numerică cu elemente finite contribuie și la formarea unui nou mod de gândire a analizei ingineresti, datorită, în principal, posibilității de a vedea în spațiu cu ajutorul calculatorului.

Software-ul necesar implementării acestei metode, împreună cu mediile CAD sunt utilizate în perioada de proiectare și testare virtuală a oricărui produs.

În cazul concret al modelării transferului termic pentru un echipament de protecție contra supratensiunilor bazat pe tehnologia ZnO, metoda elementelor finite reprezintă practic singura soluție pentru determinarea teoretică a temperaturilor care apar în diversele puncte ale varistorului, în vederea evitării supraîncălzirii acestuia și a evitării ambalării termice a ansamblului [39].



Cu ajutorul acestei metode se poate studia și distribuția câmpului termic în cazul varistoarelor tip disc, cu sau fără mase adiționale, lucru practic imposibil în cazul utilizării metodei diferențelor finite.

Vom acorda un spațiu destul de larg prezentării modului de aplicare a metodei elementelor finite pentru cazul nostru concret.

## V.1. Probleme specifice modelării unui proces termic

Conceptul de bază care trebuie aplicat în cazul modelării proceselor termice este aproximarea prin discretizare. Pe baza lui, corpurile, considerate ca fiind medii continue, se descompun într-un număr finit de elemente geometrice, cu aceleași proprietăți fizice și funcționale ca și cele ale corpului inițial.

Cu ajutorul acestor elemente finite se transformă modelul analitic diferențial într-un model numeric care poate fi implementat și rezolvat pe calculator.

În aparență, aplicarea metodei elementelor finite nu a adus nimic nou în studiul proceselor termice [46]. În esență, această metodă propune o viziune nouă asupra rezolvării problemelor de câmp termic staționar și tranzitoriu. Caracteristica fundamentală a acestei metode este generalitatea, respectiv capacitatea sa de analiză a unor sisteme care nu mai sunt discretizabile prin însăși structura lor, dar care pot fi considerate ca atare prin intermediul modelării matematice.

Se analizează medii continue și se determină câmpuri de variabile (temperaturi).

Pentru exemplificarea modului de abordare ne vom referi la un exemplu simplu, din aria noastră de interes, anume calculul repartiției temperaturii într-o coloană de varistoare în regim permanent, coloană parcursă de un curent constant.

Energia care se transformă prin efect Joule – Lenz în căldură contribuie la ridicarea temperaturii coloanei peste cea a mediului ambiant. Pentru simplificarea problemei se utilizează următoarele ipoteze [5], [12], [31], [46]:

- acțiunea termică a curentului electric poate fi descrisă prin termenul sursă  $p$ ;
- coloana este perfect izolată termic față de mediul ambiant de către izolația din rășină epoxidică;
- numărul de elemente de discretizare este mic (4).

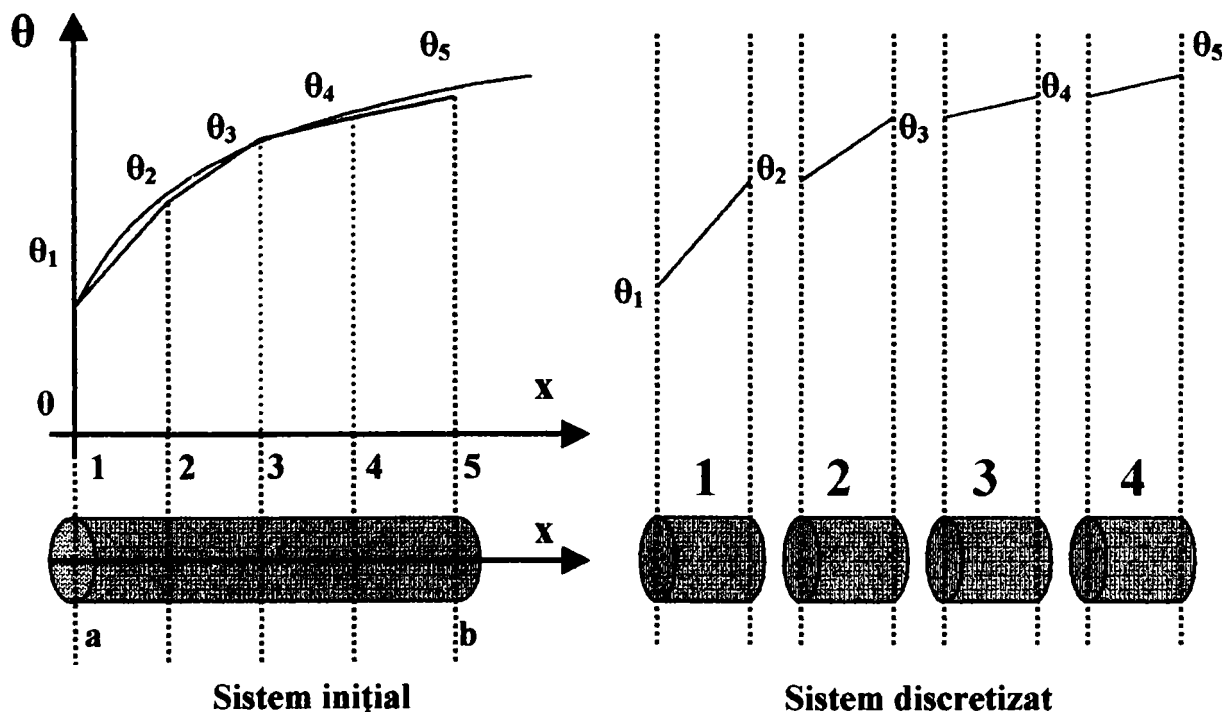


Figura V.1: Explicativă pentru situația unei coloane de varistoare.



Distribuția câmpului termic  $\theta(x)$  cu  $\theta : \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$  de-a lungul coloanei de varistoare izolate termic se determină cunoscând și coeficientul de conducție  $\lambda$ .

Pe grafic, în figura V.1., s-a reprezentat cu negru curba reală a distribuției temperaturii în coloana de varistoare, de-a lungul axei  $0x$ .

Coloana de varistoare **a-b** se împarte în segmente egale **1,2,3,4**, la extremitățile fiecărui segment având temperaturile  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  și  $\theta_5$ , temperaturi care se reprezintă în planul coordonatelor  $\theta-x$ .

Unind aceste puncte prin segmente de dreaptă se obține graficul distribuției de temperatură.

Acest grafic reprezintă un model de aproximare pentru câmpul termic real, deoarece:

- a). procesul de măsurare a temperaturii reale implică erori;
- b). infinitatea punctelor materiale ale conductorului analizat a fost înlocuită cu o mulțime finită de puncte de măsură și o mulțime de funcții de interpolare a variației câmpului termic real între aceste puncte, în cazul acesta utilizându-se interpolări lineare.

Distribuția obținută experimental se va apropia de cea teoretică cu atât mai mult cu cât numărul punctelor de măsură va fi mai mare și cu cât funcțiile de interpolare vor fi mai apropiate ca formă de variația temperaturii.

Pentru cazul unui **experiment numeric**, scopul este același și anume construcția unui model de aproximare definit printr-o mulțime finită de puncte cu valori termice obținute prin calcul și o mulțime de funcții de interpolare. Pentru similitudine se aleg aceleași puncte de referință.

După cum se știe, distribuția temperaturii verifică ecuația diferențială a lui Poisson, ( $p$  fiind fluxul termic care se propagă prin secțiunea coloanei):

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{p}{\lambda} = 0 \quad (5.1)$$

Pentru simplificarea calculelor, se poate face notația  $\frac{p}{\lambda} = Q$ .

Sunt date și condițiile la limită, anume:

Dacă  $x = a$ , avem  $\theta = \theta_a$ , respectiv,

dacă  $x = b$ , avem  $\theta = \theta_b$ .

Reformularea problemei, în mod echivalent, folosind calculul variațional presupune găsirea funcției  $\theta$ , care să minimizeze funcționala [46]:

$$J(\theta) = \int_a^b \left[ \frac{\lambda}{2} \cdot \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 - Q_0 \cdot \theta \right] dx \quad (5.2)$$

Pentru cazul concret al discretizării noastre, realizată cu patru elemente, integrala se rescrie:

$$J(\theta) = \int_a^2 \left[ \frac{\lambda}{2} \cdot \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 - Q_0 \cdot \theta \right] dx + \int_2^3 \left[ \frac{\lambda}{2} \cdot \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 - Q_0 \cdot \theta \right] dx + \int_3^4 \left[ \frac{\lambda}{2} \cdot \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 - Q_0 \cdot \theta \right] dx + \int_4^b \left[ \frac{\lambda}{2} \cdot \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 - Q_0 \cdot \theta \right] dx \quad (5.3)$$

Dacă notăm contribuția unui singur element finit cu:

$$J^e(\theta) = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \left[ \frac{\lambda}{2} \cdot \left( \frac{d\theta}{dx} \right)^2 - Q_0 \cdot \theta \right] dx \quad (5.4)$$

Vom putea rescrie (4.3) sub forma:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^4 J^e(\theta) \quad (5.5)$$





Se observă că modelul global al distribuției de temperatură de-a lungul conductorului electric se obține în mod generativ, pornind de la modelul elementar  $J^e(\theta)$ , care va fi explicitat în cele ce urmează [5], [46].

Se ia în considerare un element finit oarecare  $e$ , definit prin lungimea sa:

$$L^e = x_i - x_j \quad (5.6)$$

și prin vectorul valorilor nodale de temperatură:

$$T^e = \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Alegem de la început o variație lineară între  $\theta_i$  și  $\theta_j$ , de unde va rezulta funcția de interpolare a temperaturii pe acest element ca fiind:

$$\theta_e(x) = a_1 + a_2 \cdot x \quad (5.8)$$

Coefficienții  $a_1$  și  $a_2$  se determină în funcție de valorile nodale ale temperaturii:

$$\begin{aligned} \theta_i &= a_1 + a_2 \cdot x_i; \\ \theta_j &= a_1 + a_2 \cdot x_j; \end{aligned} \quad (5.9)$$

Rezolvând acest sistem de ecuații algebrice cu necunoscutele  $a_1$  și  $a_2$ , se obțin expresiile:

$$\alpha_1 = \frac{T_j x_j - T_i x_i}{L^e} \quad \text{și} \quad \alpha_2 = \frac{T_j - T_i}{L^e} \quad (5.10)$$

Introducând (5.10) în (5.9) și rearanjând termenii, se obține:

$$\theta^e(x) = N_i(x)T_i - N_j(x)T_j \quad (5.11)$$

unde s-au efectuat notațiile:

$$N_i(x) = \frac{x_j - x}{L^e} \quad \text{și} \quad N_j(x) = \frac{x - x_i}{L^e} \quad (5.12)$$

Funcțiile de interpolare  $N_i(x)$  și  $N_j(x)$  se mai numesc și funcții de formă, deoarece ele depind de forma geometrică a elementelor finite.

Ca urmare, funcția  $\theta^e(x)$ , definită prin relația (5.8) se poate exprima matriceal:

$$\theta^e(x) = [N_i, N_j] \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} = N \cdot T^e \quad (5.13)$$

Introducând (5.13) în (5.4), rezultă:

$$J^e(\theta_i, \theta_j) = \int_{x_i}^{x_j} \left\{ \frac{\lambda}{2} \left( \left[ \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} \right] \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} \right)^2 - Q_0 [N_i, N_j] \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} \right\} dx \quad (5.14)$$

Impunând condiția de staționaritate a funcționalei în raport cu variabilele nodale  $\theta_i$  și  $\theta_j$ , se obțin egalitățile [12], [31], [46]:

$$\frac{\partial J^e}{\partial T_i}(T_i, T_j) = \int_{x_i}^{x_j} \left\{ \lambda \frac{dN_i}{dx} \left[ \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} \right] \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} - Q_0 \cdot N_i \right\} dx = 0 \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial J^e}{\partial T_j}(T_i, T_j) = \int_{x_i}^{x_j} \left\{ \lambda \frac{dN_j}{dx} \left[ \frac{dN_i}{dx} \frac{dN_j}{dx} \right] \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} - Q_0 \cdot N_j \right\} dx = 0 \quad (5.16)$$

Rearanjând termenii și observând că vectorul valorilor nodale  $T_e$  nu depinde de  $x$ , va rezulta:



$$\begin{bmatrix} \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{dN_i}{dx} dx & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{dN_j}{dx} dx \\ \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{dN_i}{dx} dx & \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{dN_j}{dx} dx \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_{x_i}^{x_j} Q_0 \cdot N_i dx \\ \int_{x_i}^{x_j} Q_0 \cdot N_j dx \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

sau:

$$k^e \cdot T^e = F^e \quad (5.18)$$

unde:

$$k^e = \begin{bmatrix} k_{ii}^e & k_{ij}^e \\ k_{ji}^e & k_{jj}^e \end{bmatrix}, \quad T^e = \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix}, \quad \text{respectiv } F^e = \begin{bmatrix} F_i^e \\ F_j^e \end{bmatrix}$$

folosind notațiile conforme, de exemplu:

$$k_{ij}^e = \int_{x_i}^{x_j} \lambda \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{dN_i}{dx} dx, \quad \text{respectiv } F_i^e = \int_{x_i}^{x_j} Q_0 \cdot N_i dx \quad (5.19)$$

Asamblând acum toate elementele finite din domeniul considerat, se obține modelul global:

$$k \cdot T = F \quad (5.20)$$

unde:

$$k = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}, \quad \text{iar } F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$$

S-au efectuat notațiile:

$$k_{ij} = \sum_{e=1}^4 k_{ij}^e, \quad \text{respectiv } F_i = \sum_{e=1}^4 F_i^e \quad (5.21)$$

Vectorul valorilor nodale ale întregului domeniu este:

$$T = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4 \quad T_5] \quad (5.22)$$

## V.2. Structura modelului numeric cu elemente finite

Din cele prezentate până acum se poate constata că modelarea numerică cu elemente finite, aplicată în domeniul studiului transferului termic, este un proces complex, de natură interdisciplinară. Acest proces evoluează după un ciclu care începe și se încheie cu domeniul specific de investigație, de tipul inginerie-matematică-informatică-inginerie [46].

Produsul acestei activități îl constituie sistemul format din modelul geometric al corpului de analizat, modelul numeric cu elemente finite și programul sau pachetul de programe de calcul.

Modelul geometric este reprezentat în esență prin domeniul de analiză discretizat. El este rezultatul primelor etape de modelare [5], [12].

Modelul numeric cu elemente finite constituie partea funcțională a acestui sistem și este alcătuit din relații (ecuații, condiții la limită, etc.) care descriu comportarea corpului sub acțiunea solicitărilor anterioare. El este rezultatul procesului de transformare a modelului analitic într-un model numeric capabil de a fi implementat pe calculator. Programul sau pachetul de programe de calcul constituie partea operațională a modelării, respectiv suportul software care permite realizarea unui experiment numeric cu elemente finite.

Algoritmul aplicării metodei elementelor finite urmărește în principal, următoarele etape:

- formularea modelului analitic de bază;
- specificarea condițiilor la limită adecvate problemei de rezolvat;
- derivarea ecuațiilor elementare;
- asamblarea elementelor finite pentru obținerea modelului numeric global.



Pentru exemplificare, la început, vom considera cazul unui câmp termic conductiv, caracteristic mediului solid al varistorului, neglijând complet fenomenele convective.

Atunci când variația temperaturii într-o anumită direcție este mult mai mare decât în celelalte două direcții ale unui reper cartezian, acest câmp poate fi considerat unidirecțional.

Ecuția fundamentală a transferului de căldură în acest caz (în primă aproximație) este:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + q_0 = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (5.23a)$$

Notațiile utilizate reprezintă:

- $\theta$  – temperatura;
- $\lambda$  – conductivitatea termică;
- $q_0$  – fluxul termic volumetric al surselor de căldură;
- $\rho$  – densitatea materialului;
- $c_p$  – căldura specifică a materialului.

Dacă ne referim numai la regimul termic staționar ( $\theta = \theta(x)$ ) și la cazul unui mediu cu proprietăți termice liniare ( $\lambda = \text{const.}$ ), atunci ecuația fundamentală a câmpului termic devine:

$$\lambda \frac{d^2 \theta}{dx^2} + q_0 = 0 \quad (5.23b)$$

Condițiile la limită pot fi [5], [12], [31], [46] de tip:

- **Dirichlet** (când se specifică temperatura);

$$\theta = g(x) \quad \text{pentru } x \in S_T \quad (5.24)$$

- **Neumann** (când se specifică fluxul termic volumetric);

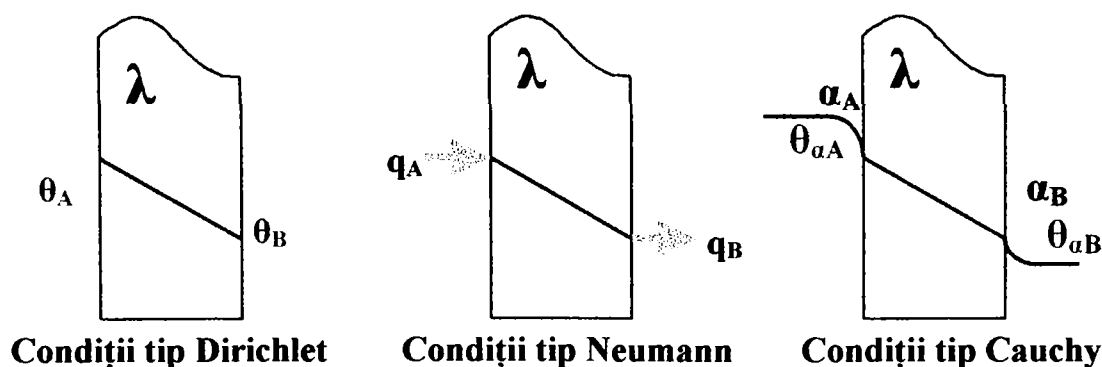
$$\lambda \frac{d\theta}{dx} n + q = 0 \quad \text{pentru } x \in S_q \quad (5.25)$$

- **Cauchy** (atunci când se specifică temperatura mediului ambiant și coeficientul de transfer al căldurii spre sau dinspre suprafața corpului solid).

$$\lambda \frac{d\theta}{dx} n + \alpha \cdot (\theta - \theta_a) = 0 \quad \text{pentru } x \in S_\alpha \quad (5.26)$$

Notațiile utilizate reprezintă:

- $g$  - o funcție de temperatură cunoscută;
- $n$  – versorul normalei la suprafața de frontieră considerată;
- $q$  – densitatea fluxului termic prin suprafața de frontieră considerată;
- $\alpha$  – coeficientul de transfer al căldurii de la / spre mediul ambiant;
- $\theta_a$  – temperatura mediului ambiant;
- $S_T$ ,  $S_q$  și  $S_\alpha$  sunt pânze ale suprafeței de frontieră pe care se specifică temperatura, fluxul termic și respectiv temperatura mediului ambiant împreună cu valoarea coeficientului de convecție  $\alpha$ .



**Figura V.2: Principalele tipuri de condiții la limită.**



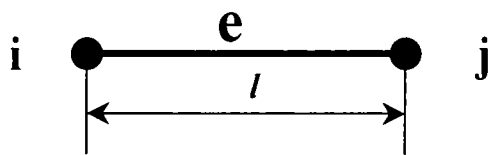
Modelul analitic de bază este constituit în acest caz din ecuația (5.23), care încorporează legea constitutivă pentru coeficientul de conductivitate termică ( $\lambda = \text{constant}$ ) și condițiile la limită specificate prin relațiile (5.24), (5.25) și (5.26).

În funcție de complexitatea problemei analizate, aceste condiții la limită pot fi prezente toate sau numai în parte. Schematic, fiecare din aceste condiții sunt prezentate în figura V.2:

### V.3. Deducerea ecuațiilor elementare

Următorul pas în aplicarea metodei elementelor finite îl reprezintă stabilirea ecuațiilor care descriu fenomenul fizic studiat (transferul termic) la nivelul unui element finit oarecare, respectiv comportarea elementului finit în câmpul variabilelor analizate sub acțiunea solicitărilor exterioare.

Derivarea lor presupune existența unui domeniu de analiză discretizat în elemente finite.



**Figura V.3: Element finit unidimensional de tip liniar.**

Pentru exemplificare prezentăm un astfel de element unidimensional de tip liniar, prezentat în figura V.3:

Pentru un element finit unidimensional “e”, de lungime  $l$ , cu nodurile  $i$  și  $j$ , funcțiile de formă sunt:

$$N_i(x) = \frac{x_j - x}{l} \quad N_j(x) = \frac{x - x_i}{l} \quad (5.27)$$

unde  $x_i$  și  $x_j$  sunt coordonatele nodurilor  $i$  și  $j$ .

Funcția de aproximare a temperaturii pe domeniul elementului finit este:

$$\theta_{ap}(x) = N_i(x) \cdot \theta_i + N_j(x) \cdot \theta_j \quad (5.28)$$

unde  $\theta_i$  și  $\theta_j$  sunt temperaturile în nodurile  $i$  și  $j$  ale elementului finit considerat.

Transformarea modelului analitic de bază într-o formă integrală se poate face fie pe cale variațională, fie folosind metoda reziduurilor ponderate.

Pentru cazul de față vom aplica metoda lui Galerkin [5], [46].

Introducând funcția de aproximare a temperaturii (5.28) în ecuația (5.23), scrisă la nivelul unui element, aceasta nu mai este satisfăcută, obținându-se practic un reziduu:

$$\lambda^e \frac{d^2 \theta_{ap}}{dx^2} + q_0^e = R^e \quad (5.29)$$

Reziduu se anulează doar în cazul limită când  $\theta(x) = \theta_{ap}(x)$ .

Integrând acest reziduu pe subdomeniile  $V_e$  ale domeniului de analiză  $V$ , se pot găsi anumite funcții de pondere  $H_i$ , astfel ca:

$$\sum_{e=1}^n \int_{V_e} H_i \cdot R^e \cdot dV = 0 \quad (5.30)$$

În varianta lui Galerkin, aceste funcții de pondere se consideră a fi chiar funcțiile de formă. Se obține astfel sistemul de ecuații elementare:

$$(N_i, R^e)_0 = \int_{V_e} N_i \cdot \left( \lambda^e \frac{d^2 \theta_{ap}}{dx^2} + q_0^e \right) dV = 0 \quad (5.31)$$

și, respectiv:

$$(N_j, R^e)_0 = \int_{V_e} N_j \cdot \left( \lambda^e \frac{d^2 \theta_{ap}}{dx^2} + q_0^e \right) dV = 0 \quad (5.32)$$

Notăția cu paranteze reprezintă produse scalare. Considerând constantă secțiunea transversală printr-un element finit ( $A = \text{constant}$ ), se obține sistemul:

$$\int_a^b N_i \left( \lambda^e \frac{d^2 \theta_{ap}}{dx^2} + q_0^e \right) dx = 0, \text{ respectiv : } \int_b^a N_j \left( \lambda^e \frac{d^2 \theta_{ap}}{dx^2} + q_0^e \right) dx = 0 \quad (5.33)$$



Folosirea indicelui "e" se face pentru a sublinia faptul că proprietățile mediului ( $\lambda$  și  $q_0$ ) pot avea valori diferite de la un element la altul.

Se pot face următoarele observații:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda^e \cdot N_i \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} \right) = \lambda^e \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} + \lambda^e \cdot N_i \cdot \frac{d^2\theta_{ap}}{dx^2} \quad (5.34)$$

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda^e \cdot N_j \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} \right) = \lambda^e \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} + \lambda^e \cdot N_j \cdot \frac{d^2\theta_{ap}}{dx^2} \quad (5.35)$$

Ecuatiile (5.33) se mai pot scrie sub forma:

$$\int_0^l \frac{d}{dx} \left( \lambda^e \cdot N_i \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} \right) dx - \int_0^l \lambda^e \cdot \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} dx + \int_0^l N_i \cdot q_0^e dx = 0 \quad \text{respectiv:}$$

$$\int_0^l \frac{d}{dx} \left( \lambda^e \cdot N_j \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} \right) dx - \int_0^l \lambda^e \cdot \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} dx + \int_0^l N_j \cdot q_0^e dx = 0 \quad (5.36)$$

Se integrează primii termeni și, aplicând legea lui Fourier în nodurile  $i$  și  $j$  ale elementului finit considerat rezultă:

$$N_i \cdot \lambda^e \frac{d\theta_{ap}}{dx} \Big|_{x=x_j} - N_i \cdot \lambda^e \frac{d\theta_{ap}}{dx} \Big|_{x=x_i} = -N_i \cdot \lambda^e \frac{d\theta_{ap}}{dx} \Big|_{x=x_j} = q_i \quad \text{respectiv:}$$

$$N_j \cdot \lambda^e \frac{d\theta_{ap}}{dx} \Big|_{x=x_j} - N_j \cdot \lambda^e \frac{d\theta_{ap}}{dx} \Big|_{x=x_i} = -N_j \cdot \lambda^e \frac{d\theta_{ap}}{dx} \Big|_{x=x_i} = q_j \quad (5.37)$$

Introducând (5.37) în (5.36) se obține:

$$\int_0^l \lambda^e \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} dx = \int_0^l N_i \cdot q_0^e \cdot dx + q_i \quad \text{respectiv:}$$

$$\int_0^l \lambda^e \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{d\theta_{ap}}{dx} dx = \int_0^l N_j \cdot q_0^e \cdot dx - q_j \quad (5.38)$$

Introducând funcția de aproximare a temperaturii (4.28) în ecuația (4.38) și rearanjând termenii, se va obține sistemul matriceal [46]:

$$\begin{bmatrix} \int_0^l \lambda^e \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{dN_i}{dx} dx & \int_0^l \lambda^e \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{dN_j}{dx} dx \\ \int_0^l \lambda^e \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{dN_i}{dx} dx & \int_0^l \lambda^e \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{dN_j}{dx} dx \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int_0^l N_i \cdot q_0^e \cdot dx + q_i \\ \int_0^l N_j \cdot q_0^e \cdot dx - q_j \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

Evaluând acum coeficienții matriceali se va obține:

$$\int_0^l \lambda^e \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{dN_i}{dx} dx = \lambda^e \int_0^l \left( -\frac{1}{l} \right) \cdot \left( -\frac{1}{l} \right) dx = \frac{\lambda^e}{l} \quad (5.40)$$

$$\int_0^l \lambda^e \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{dN_j}{dx} dx = \lambda^e \cdot \int_0^l \left( \frac{1}{l} \cdot \frac{1}{l} \right) dx = \frac{\lambda^e}{l} \quad (5.41)$$

$$\int_0^l \lambda^e \frac{dN_i}{dx} \cdot \frac{dN_j}{dx} dx = \lambda^e \int_0^l \left( -\frac{1}{l} \right) \cdot \left( \frac{1}{l} \right) dx = -\frac{\lambda^e}{l} \quad (5.42)$$

$$\int_0^l \lambda^e \frac{dN_j}{dx} \cdot \frac{dN_i}{dx} dx = \lambda^e \int_0^l \left( \frac{1}{l} \right) \cdot \left( -\frac{1}{l} \right) dx = -\frac{\lambda^e}{l} \quad (5.43)$$





Ceilalți doi termeni care conțin integrale sunt:

$$\int_0^{x_i} N_i \cdot q_0^e \cdot dx = q_0^e \cdot \int_{x_i}^{x_j} \frac{x_i - x}{l} dx = \frac{1}{2} q_0^e \cdot l \quad (5.44)$$

$$\int_0^{x_j} N_j \cdot q_0^e \cdot dx = q_0^e \cdot \int_{x_i}^{x_j} \frac{x - x_i}{l} dx = \frac{1}{2} q_0^e \cdot l \quad (5.45)$$

Introducând relațiile (5.40), (5.41), (5.42), (5.43), (5.44) și (5.45) în (5.39) vom obține:

$$\begin{bmatrix} \frac{\lambda^e}{l} & -\frac{\lambda^e}{l} \\ -\frac{\lambda^e}{l} & \frac{\lambda^e}{l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} g_0^e l + q_i \\ \frac{1}{2} g_0^e l - q_j \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

Folosind notația simbolică binecunoscută, se va obține modelul numeric elementar:

$$k^e \cdot T^e = F^e \quad (5.47)$$

Matricea de rigiditate  $k_e$  conține coeficientul de conductivitate termică  $\lambda_e$ , iar termenul liber  $F_e$  conține fluxul termic volumetric  $q_0^e$  și fluxurile termice nodale  $q_i$  și  $q_j$ . Vectorul temperaturilor nodale,  $T^e$ , constituie în acest caz vectorul mărimilor necunoscute ale problemei [46].

Următorul pas în soluționarea modelării cu elemente finite îl constituie asamblarea (reunirea) elementelor finite și procesul de sinteză a domeniului de analiză considerat. Pe plan geometric, rezultatul procesului de asamblare îl constituie refacerea domeniului, iar pe plan funcțional, obținerea modelului numeric global al corpului de studiat.

Asamblarea apare deci ca un proces reciproc discretizării, dar numai pe plan geometric. Între cele două etape de discretizare și de asamblare a elementelor finite are loc o etapă de obținere a modelului numeric elementar. Se produce, deci o încărcare a elementelor finite cu variabile care vor genera în final modelul numeric global. Deoarece pe plan geometric asamblarea conduce la reconstituirea domeniului inițial de analiză, fără a oferi informații suplimentare în raport cu discretizarea, ne vom referi în cele ce urmează la asamblarea funcțională a elementelor finite, și, respectiv, la obținerea modelului numeric global al obiectului de investigat.

Asamblarea elementelor finite se poate face în două moduri [5], [46]:

- secvențial;
- după noduri.

În primul caz, elementele finite se iau unul câte unul, în ordinea crescândă a numerotării lor.

În cel de-al doilea caz se iau nodurile globale ale sistemului, unul câte unul și se assemblează elementele finite din jurul fiecărui nod. Indiferent de procedeul folosit, rezultatul final, anume modelul numeric global, este același. Ceea ce poate diferi de la un caz la altul este forma de prezentare. Pentru probleme de dimensiuni mici, acest model numeric global se obține sub forma unui sistem de ecuații, cu matricele coeficient stocate în întregime sau în bandă.

Pentru probleme de dimensiuni mari, modelul numeric global se obține pe bucăți sau partiționat și se rezolvă prin metodele iterative sau de tip frontal.

#### V.4. Analiza câmpurilor termice conductive, neliniare, folosind un model unidimensional

Problemele care vizează studiul transferului termic în situația varistoarelor cu ZnO vizează medii care pot avea o comportare omogenă sau neomogenă, de exemplu în situația montării de piese adiționale pe structura varistorului

Se presupune, în general, că proprietățile fizice ale materialelor sunt constante, cu excepția conductivității termice  $\lambda$ , care depinde de temperatură.



Câmpul termic generat în acest caz este de tip conductiv și neliniar. Regimul termic poate fi staționar (atunci când temperatura nu variază în timp) sau tranzitoriu (când avem variație a temperaturii). Deși câmpul termic real este tridimensional, el poate fi analizat cu ajutorul unui model unidimensional, datorită variației de temperatură care este predominantă pe o singură direcție (perpendicular pe suprafața peretelui izolator și, respectiv, de-a lungul coloanei varistoare.

Existența simetriei cilindrice simplifică mult problemele referitoare la geometrie. Se va lua în calcul și generarea internă de căldură, prin intermediul fluxului termic volumetric, (dezvoltat în unitatea de volum), notat cu  $q_0$ .

Condițiile la limită pentru această clasă de probleme pot fi de tip Dirichlet, Neumann sau Cauchy. În primul caz se indică temperatura pe cele două suprafețe ale peretelui sau la capetele coloanei de varistoare. În cel de-al doilea caz se indică valoarea fluxului termic spre perete sau de la acesta la mediul ambiant. În ultimul caz se indică temperatura mediului ambiant și coeficientul de transfer de căldură de la coloană la perete, la suprafața exterioară a coloanei sau invers.

Modelul analitic de bază este exprimat prin ecuația fundamentală a bilanțului termic:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + q_0 = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}, \text{ pe domeniul } V \quad (5.48)$$

Condițiile inițiale, la limită pot fi [5], [12], [46], așa cum am enunțat mai devreme, de tipul:

- **Dirichlet** (când se specifică temperatura);

$$\theta = g(x, t) \quad \text{pentru } x \in S_T \quad (5.49)$$

- **Neumann** (când se specifică fluxul termic volumetric);

$$\lambda \frac{d\theta}{dx} n + q = 0 \quad \text{pentru } x \in S_q \quad (5.50)$$

- **Cauchy** (atunci când se specifică temperatura mediului ambiant și coeficientul de transfer al căldurii spre sau dinspre suprafața corpului solid).

$$\lambda \frac{d\theta}{dx} n + \alpha \cdot (\theta - \theta_a) = 0 \quad \text{pentru } x \in S_a \quad (5.51)$$

Notațiile utilizate reprezintă:

- $g$  - o funcție de temperatură cunoscută, care depinde de coordonata spațială  $x$  și cea temporală  $t$ ;
- $n$  - versorul normalei la suprafața de frontieră considerată (spre exterior);
- $q$  - densitatea fluxului termic prin suprafața de frontieră considerată;
- $\alpha$  - coeficientul de transfer al căldurii de la / spre mediul ambiant;
- $\theta_a$  - temperatura mediului ambiant;
- $S_T, S_q$  și  $S_a$  sunt porțiuni ale suprafeței de frontieră pe care se specifică temperatura, fluxul termic și respectiv temperatura mediului ambiant împreună cu valoarea coeficientului de convecție  $\alpha$ .

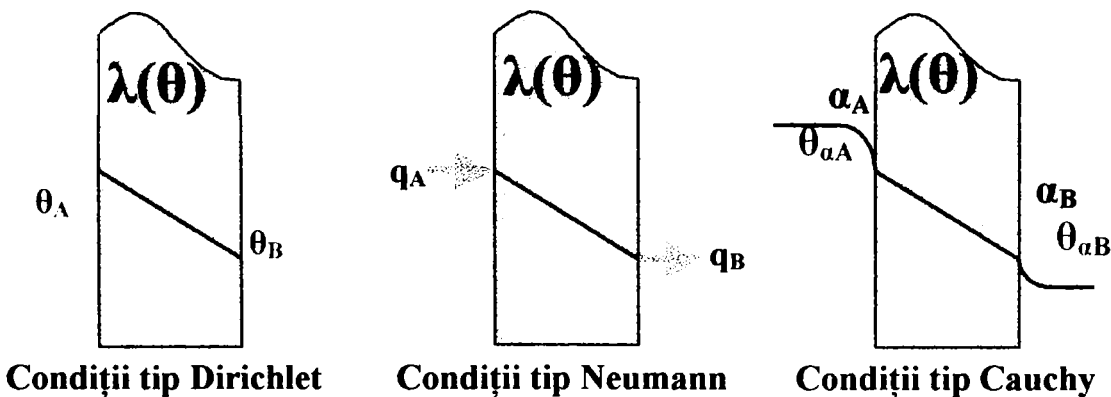


Figura V.4: Principalele tipuri de condiții la limită în regim nestaționar.



Domeniul de analiză fiind unidimensional, pot fi specificate simultan cel mult două dintre cele trei tipuri de condiții la limită. Principalele tipuri de condiții la limită sunt prezentate schematic în figura V.4. Se insistă deasemenea și asupra variației conductivității termice cu temperatura  $\lambda(T)$ .

Așa cum am mai arătat înainte, acest model matematic diferențial trebuie transformat mai întâi într-unul integral.

Prezentăm în cele ce urmează, formularea integrală a modelului analitic, bazată pe metoda lui Galerkin. Pentru claritatea expunerii, considerăm condiții Dirichlet la ambele extremități ale domeniului de analiză.

$$\begin{aligned} \text{La } x = 0 \text{ avem } \theta &= \theta_0; \\ x = \delta \text{ avem } \theta &= \theta_\delta; \end{aligned}$$

Domeniul de analiză  $V$  se discretizează în elemente finite liniare  $V^e$ , cu secțiunea constantă  $A$  și lungimea  $l$ .

Pe aceste elemente finite se definește funcția de aproximare a temperaturii:

$$\theta_{ap}(x,t) = N_i(x) \cdot \theta_i(t) + N_j(x) \cdot \theta_j(t) \quad (5.52)$$

$$\text{unde } N_i(x) = \frac{x_j - x}{l} \quad \text{și, respectiv, } N_j(x) = \frac{x - x_i}{l} \quad (5.53)$$

Folosind funcția de aproximare (5.52) și funcțiile de formă (5.53), transformăm ecuația diferențială (5.48) într-un sistem de ecuații integrale, astfel:

$$\int_{V^e} N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) + q_v - \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} \right] dV = 0 \quad (5.54)$$

$$\int_{V^e} N_j \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) + q_v - \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} \right] dV = 0 \quad (5.55)$$

Deoarece am considerat că elementele finite au o secțiune constantă, se poate scrie:

$$\int N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) + q_v - \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} \right] dx = 0 \quad (5.56)$$

$$\int N_j \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) + q_v - \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} \right] dx = 0 \quad (5.57)$$

Operând transformarea:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( N_i \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) = N_i \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) + \lambda \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \quad (5.58)$$

$$N_i \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( N_i \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) - \lambda \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \quad (5.59)$$

Se execută înlocuirile corespunzătoare, în sistemul (5.56) – (5.57).

Se obține noua formă a sistemului de ecuații:

$$\int \frac{\partial}{\partial x} \left( N_i \cdot \lambda \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) dx - \int \lambda \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} dx + \int N_i q_v dx - \int N_i \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} dx = 0 \quad (5.60)$$

$$\int \frac{\partial}{\partial x} \left( N_j \cdot \lambda \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \right) dx - \int \lambda \frac{\partial N_j}{\partial x} \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} dx + \int N_j q_v dx - \int N_j \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} dx = 0 \quad (5.61)$$



Integrând primii termeni din sistemul de ecuații (5.60) și (5.61) și aplicând legea lui Fourier, se va obține:

$$N_i \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \Big|_{x=x_i} - N_i \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = -N_i \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \Big|_{x=x_i} \quad (5.62)$$

$$N_j \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \Big|_{x=x_j} - N_j \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \Big|_{x=x_j} = -N_j \cdot \lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \Big|_{x=x_j} \quad (5.63)$$

precum și:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = q_i, \quad \text{respectiv} \quad -\lambda \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} \Big|_{x=x_j} = q_j \quad (5.64)$$

Introducem acest rezultat în sistemul de ecuații (4.60) - (4.61) și vom obține:

$$\int N_i \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} dx + \int \lambda \cdot \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} dx = \int N_i \cdot q_e dx + q_i \quad (5.65)$$

$$\int N_j \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} dx + \int \lambda \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} \cdot \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial x} dx = \int N_j \cdot q_e dx - q_j \quad (5.66)$$

Pentru obținerea formei finale a acestui sistem de ecuații, introducem funcția de aproximare (4.52) și funcțiile de formă (4.53) și apoi integrăm. Introducem și dependența conductivității cu temperatura, anume:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \beta \cdot \theta_{ap}) = \lambda_0 [1 + \beta(N_i \cdot \theta_i + N_j \cdot \theta_j)] \quad (5.67)$$

Notând valorile medii cu indicele  $m$ :

$$\theta_m = \frac{\theta_i + \theta_j}{2} \quad (5.68)$$

respectiv:

$$\lambda_m = \lambda_0 \cdot (1 + \beta \cdot \theta_m) \quad (5.69)$$

Efectuând toate aceste înlocuiri se obține sistemul matriceal:

$$\begin{bmatrix} \frac{\rho \cdot C_p l}{3} & \frac{\rho \cdot C_p l}{6} \\ \frac{\rho \cdot C_p l}{6} & \frac{\rho \cdot C_p l}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\lambda_m}{l} & -\frac{\lambda_m}{l} \\ -\frac{\lambda_m}{l} & \frac{\lambda_m}{l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{q_v \cdot l}{2} + q_i \\ \frac{q_v \cdot l}{2} - q_j \end{bmatrix} \quad (5.70)$$

Acesta poate fi reprezentat sintetic prin ecuația matriceală elementară:

$$K^e \cdot \theta^e + A^e \cdot \theta^e = B^e \quad (5.71)$$

Prin asamblarea tuturor elementelor finite din domeniul de analiză considerat se obține sistemul final al ecuațiilor de lucru:

$$K \cdot \theta + A \cdot \theta = B \quad (5.72)$$

Ecuația (5.72) se transformă, pentru cazul regimurilor termice tranzitorii în:

$$\left( \frac{2}{\Delta t} K + A \right) \cdot \theta_{n+1} = \left( \frac{2}{\Delta t} K - A \right) \cdot \theta_n + (B_{n+1} + B_n) \quad (5.73)$$

S-a notat cu  $n + 1$  și  $n$  doi pași consecutivi de timp  $t$  și  $t + \Delta t$ . Această ultimă relație evidențiază faptul că temperaturile nodale  $T$  la timpul  $t + \Delta t$  pot fi calculate o dată ce temperaturile nodale la timpul  $t$  au fost cunoscute.



## V.5. Analiza câmpurilor termice conductive liniare, folosind modele bi și tridimensionale

Modelul unidimensional poate fi utilizat cu oarecare succes doar în cazul coloanelor de varistoare lungi (de exemplu la descărcătoarele de înaltă și foarte înaltă tensiune tip GIS [69], [85]), unde dimensiunea de lungime a coloanei (de ordinul a 1000 până la 1500 mm) este cu mult mai mare decât dimensiunea de diametru a coloanei (aproximativ 40 până la 60 mm). Nici în acest caz rezultatele nu sunt concludente, deoarece se neglijează total cedarea de căldură către electrozii de la capăt, prin conducție. În situația modelării transferului termic în echipamente de protecție pentru joasă tensiune, unde varistoarele au formă de disc, se impune folosirea unui model bidimensional. Datorită simetriei cilindrice a ansamblului, folosirea modelului tridimensional nu este necesară explicit.

Prima etapă care trebuie abordată în acest caz este *Formularea problemei și obținerea modelului analitic de bază*.

Considerăm cazul general de transfer de căldură prin conducție într-un mediu neomogen și neizotrop. Aceasta înseamnă că mediul respectiv poate fi făcut din regiuni cu materiale diferite, iar materialele pot fi considerate ca având proprietăți care duc la propagarea diferită a căldurii în diversele direcții. Modelul analitic pentru acest caz general, cu luarea în considerație a fenomenelor tranzitorii, este dat de ecuația:

$$-\rho \cdot c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + q_v = 0 \quad (5.74)$$

Condițiile la limită, pe domeniul (volumul)  $V$  pot fi de tipul:

- **Dirichlet** (când se specifică temperatura);

$$\theta = g(x, y, z) \quad \text{pentru puncte } M(x, y, z) \in S_T \quad (5.75)$$

Se admite ca valoare inițială,  $\theta = \theta_0(x, y, z, t_0)$  în cazul estimărilor de regim nestaționar.

- **Neumann** (când se specifică fluxul termic volumetric);

$$\lambda_x \frac{d\theta}{dx} n_x + \lambda_y \frac{d\theta}{dy} n_y + \lambda_z \frac{d\theta}{dz} n_z + q = 0 \quad \text{pentru } N(x, y, z) \in S_q \quad (5.76)$$

- **Cauchy** (atunci când se specifică temperatura mediului ambiant și coeficientul de transfer al căldurii spre sau dinspre suprafața corpului solid).

$$\lambda_x \frac{d\theta}{dx} n_x + \lambda_y \frac{d\theta}{dy} n_y + \lambda_z \frac{d\theta}{dz} n_z + \alpha \cdot (\theta - \theta_a) = 0 \quad \text{pentru } P(x, y, z) \in S_a \quad (5.77)$$

Notațiile utilizate până acum, sau ulterior reprezintă:

- $g$  - o funcție de temperatură cunoscută, care depinde de coordonatele spațiale  $x, y, z$ ; (se poate efectua și o analiză de regim tranzitoriu, când temperatura depinde și de timp). Se referă, evident la suprafețele de frontieră  $S_T$ .
- $n_x, n_y, n_z$  sunt componentele versorului normalei la suprafața de frontieră considerată (spre exterior);
- $q$  - densitatea fluxului termic prin suprafața de frontieră considerată ( $S_q$ );
- $\alpha$  - coeficientul de transfer al căldurii de la / spre mediul ambiant, prin suprafața de frontieră  $S_a$ ;
- $\theta_a$  - temperatura mediului ambiant;
- $S_T, S_q$  și  $S_a$  sunt porțiuni ale suprafeței de frontieră pe care se specifică temperatura, fluxul termic și respectiv temperatura mediului ambiant împreună cu valoarea coeficientului de convecție  $\alpha$ .





În legătură cu aceste suprafețe ale domeniului considerat  $V$ , trebuie să facem următoarele precizări:

$$S_T \cup S_q \cup S_\alpha = S \quad (5.78)$$

$$S_T \cap S_q = \emptyset \quad S_T \cap S_\alpha = \emptyset \quad S_q \cap S_\alpha = \emptyset \quad (5.79)$$

- $S$  este suprafața exterioară a acestui domeniu luat în calcul;
- $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  sunt componentele conductivității termice pe cele trei direcții  $x, y$  și  $z$ ;
- $\rho$  – este densitatea masică a materialului;
- $c_p$  – este căldura specifică a materialului (intervine în cazul regimurilor nestaționare).
- $q_v$  – este termenul care reprezintă sursele de căldură.

Așa cum am mai arătat, următorul pas în modelarea transferului termic îl reprezintă **Formularea variațională a problemei**. Pentru aceasta, se consideră o variație infinitezimală a temperaturii  $\delta T$ , de la starea de echilibru termic, astfel ca:

$$\begin{aligned} & \int \left( \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} - q_v \right) \cdot \delta \theta \cdot dV - \int \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] \delta \theta \cdot dV + \\ & \int_{S_T} (\theta - g) \cdot \delta \theta \cdot dS + \int_{S_q} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z + q \right) \delta \theta \cdot dS + \\ & \int_{S_\alpha} \left[ \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z + \alpha \cdot (\theta - \theta_\alpha) \right] \delta \theta \cdot dS = 0 \end{aligned} \quad (5.80)$$

Variația de temperatură  $\delta T$  se alege astfel încât condițiile inițiale să poată fi realizate, respectiv  $\delta T = 0$  pe  $S_T$ .

Din considerente geometrice, se pot scrie relațiile:

$$\begin{aligned} dV &= dx \cdot dy \cdot dz && \text{precum și:} \\ dy \cdot dz &= \pm n_x \cdot dS & dz \cdot dx &= \pm n_y \cdot dS & dx \cdot dy &= \pm n_z \cdot dS \end{aligned} \quad (5.81)$$

Considerăm dezvoltarea de tipul:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta \theta \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \cdot \delta \theta + \lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (5.82)$$

Cu ajutorul acestei dezvoltări se obțin următoarele relații:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \delta \theta = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta \theta \right) - \lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (5.83)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \delta \theta = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \delta \theta \right) - \lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (5.84)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \delta \theta = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \delta \theta \right) - \lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (5.85)$$

Introducând relațiile (5.83), (5.84) și (5.85) în expresia termenului integrală de volum pe care îl vom nota cu  $E$ , din relația (5.80), anume:

$$E = \int \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] \delta \theta \cdot dV \quad (5.86)$$

se va obține:

$$E = \int \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta \theta \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \delta \theta \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \delta \theta \right) \right] dV - \int \left[ \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \lambda_y \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \lambda_z \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] \quad (5.87)$$



Dacă vom aplica primei integrale teorema divergenței, vom obține:

$$E = \int \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x \delta \theta + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y \delta \theta + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z \delta \theta \right) dS - \int \left[ \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] \quad (5.88)$$

Se observă că:

$$\delta \cdot \left[ \frac{1}{2} \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \right] = \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (5.89)$$

$$\delta \cdot \left[ \frac{1}{2} \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] = \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (5.90)$$

$$\delta \cdot \left[ \frac{1}{2} \lambda_z \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] = \lambda_z \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \cdot \delta \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (5.91)$$

Introducând aceste relații în (5.88), se obține:

$$E = \int \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z \right) \delta \theta dS - \delta \left\{ \int \frac{1}{2} \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] dV \right\} \quad (5.92)$$

Cunoscând relația dintre suprafețe (5.78), modificând relația (5.92) și introducând-o în (4.80), vom obține:

$$\begin{aligned} & \delta \left\{ \int \frac{1}{2} \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] dV \right\} + \int \left( \rho_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - q_v \right) \delta \theta \cdot dV - \int_{S_T} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z \right) \delta \theta \cdot dS - \\ & \int_{S_q} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z \right) \delta \theta \cdot dS - \int_{S_a} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z \right) \delta \theta \cdot dS + \int_{S_T} (\theta - g) \delta \theta \cdot dS + \\ & \int_{S_q} \left( \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z + q \right) \delta \theta \cdot dS + \int_{S_a} \left[ \lambda_x \frac{\partial \theta}{\partial x} n_x + \lambda_y \frac{\partial \theta}{\partial y} n_y + \lambda_z \frac{\partial \theta}{\partial z} n_z + \alpha (\theta - \theta_a) \right] \delta \theta \cdot dS = 0 \end{aligned} \quad (5.93)$$

Pe suprafața de temperatură constantă,  $S_T$  vom avea  $\delta \theta = 0$ . Ca urmare, termenii care conțin integrale pe  $S_T$  vor fi nuli, ceea ce simplifică destul de mult calculele ulterioare.

În baza relațiilor (4.81), constatăm că termenii cu derivate parțiale după cele trei direcții devin nuli, ceea ce reduce simțitor dimensiunile expresiei finale.

Combinând termenii cu integrale pe  $S_q$  și  $S_a$ , va rezulta expresia simplificată a lui (5.93):

$$\delta \left\{ \int \frac{1}{2} \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] dV \right\} + \int \left( \rho_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - q_v \right) \delta \theta \cdot dV + \int_{S_q} q \delta \theta \cdot dS + \int_{S_a} \alpha \cdot (\theta - \theta_a) \delta \theta \cdot dS = 0 \quad (5.94)$$

Se pot face următoarele observații [5]:

$$\int_{S_q} q \delta \theta \cdot dS = \delta \left\{ \int_{S_q} q \theta \cdot dS \right\} \quad (5.95)$$

$$\int_{S_a} \alpha \cdot (\theta - \theta_a) \delta \theta \cdot dS = \delta \left\{ \int_{S_a} \left( \frac{1}{2} \alpha \cdot \theta^2 - \alpha \cdot \theta \cdot \theta_a + \frac{1}{2} \alpha \cdot \theta_a^2 \right) dS \right\} \quad (5.96)$$

$$\int \left( \rho_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - q_v \right) \delta \theta \cdot dV = \delta \left\{ \int \left( \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - q_v \right) \theta \cdot dV \right\} \quad (5.97)$$



Introducând relațiile (5.95), (5.96) respectiv (5.97) în (5.94) se va obține:

$$\delta \cdot \left\{ \int \frac{1}{2} \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] dV + \int \left( \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - q_v \right) \theta \cdot dV + \int_{S_q} q \cdot \theta \cdot dS + \int_{S_a} \frac{\alpha}{2} (\theta - \theta_a)^2 dS \right\} = 0 \quad (5.98)$$

Vom nota cu "P" funcționala:

$$P = \int \frac{1}{2} \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] dV + \int \left( \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} - q_v \right) \theta \cdot dV + \int_{S_q} q \cdot \theta \cdot dS + \int_{S_a} \frac{\alpha}{2} (\theta - \theta_a)^2 dS \quad (5.99)$$

Se va obține atunci condiția de staționaritate, definită de (5.98) ca fiind, practic:

$$\delta \cdot P = 0 \quad (5.100)$$

Condiția de staționaritate reprezintă o formulare echivalentă din punct de vedere matematic cu formularea analitică dată de relația (5.74), în condițiile date de (5.75), (5.76), (5.77), (5.78) și (5.79).

În această formulare variațională termenul  $\frac{\delta \theta}{\delta t}$  se consideră constant. Asupra lui se va acționa numai în momentul construirii schemei cu diferențe finite pentru analiza regimurilor termice tranzitorii.

Următoarea etapă importantă în implementarea metodei elementelor finite o constituie **Obținerea modelului numeric:**

Pentru simplificare, având în vedere simetria cilindrică a varistoarelor, putem trata cazul unui câmp termic bidimensional și al unui regim termic tranzitoriu.

Funcționala specifică acestui caz este obținută din relația (5.99), prin considerarea variației de-a lungul axei *Oz* ca fiind nulă și renunțând la termenul sursă de căldură. Ca urmare:

$$P = \int \frac{1}{2} \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] dV + \int \left( \rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} \right) \theta \cdot dV + \int_{S_q} q \cdot \theta \cdot dS + \int_{S_a} \frac{\alpha}{2} (\theta - \theta_a)^2 dS \quad (5.101)$$

Această funcțională și condiția de staționaritate (5.100) constituie baza de plecare pentru modelarea cu elemente finite și, respectiv, realizarea unei analize numerice asistate pe calculator.

Cea mai accesibilă discretizare a domeniului de analiză este cea triunghiulară. Mediul de modelare cu elemente finite **FLUX 2D 7.40**, utilizat pentru realizarea modelărilor numerice, folosește același tip de rețea triunghiulară [73], [74].

Elementele finite triunghiulare sunt caracterizate prin trei noduri fiecare precum și funcții de formă liniare. Funcția de aproximare a câmpului termic la nivel elementar este dată de relația:

$$\theta_a(x, y, t) = N_1(x, y) \cdot \theta_1(t) + N_2(x, y) \cdot \theta_2(t) + N_3(x, y) \cdot \theta_3(t) = N^T \cdot T^e \quad (5.102)$$

S-au efectuat notațiile:

$$N^T = \begin{bmatrix} N_1(x, y) \\ N_2(x, y) \\ N_3(x, y) \end{bmatrix}, \text{ respectiv } T^e = \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ \theta_3(t) \end{bmatrix} \quad (5.103)$$

Se mai pot defini și matricele:

$$E^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} & \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} \end{bmatrix}, \text{ respectiv } D = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix} \quad (5.104)$$

Acestea se introduc în expresia funcțională  $P^e$ , scrisă acum la nivelul unui element finit  $V^e$ , introducând și funcția de aproximare  $\theta_{ap}(x, y, z)$ :



$$P^e = \int_{\mathcal{V}^e} \frac{1}{2} \cdot E^T D \cdot E \cdot dV + \int_{\mathcal{V}^e} \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} \cdot \theta_{ap} dV + \int_{\mathcal{S}_q^e} \theta_{ap} \cdot q \cdot dS + \int_{\mathcal{S}_\alpha^e} \frac{\alpha}{2} (\theta_{ap} - \theta_\alpha)^2 dS \quad (5.105)$$

Expresia funcționalei “ $P$ ” se obține prin însumarea contribuțiilor elementare  $P^e$  pentru întregul domeniu de analiză  $V$ .

$$P = \sum_{e=1}^n P^e = \sum_{e=1}^n \left\{ \int_{\mathcal{V}^e} E^T D E dV + \int_{\mathcal{S}_q^e} q \cdot \theta_{ap} dS + \int_{\mathcal{S}_\alpha^e} \frac{\alpha}{2} (\theta_{ap} - \theta_\alpha)^2 dS \right\} \quad (5.106)$$

Impunând condiția de staționaritate se va obține:

$$\sum_{e=1}^n \left\{ \int_{\mathcal{V}^e} B^T D B T^2 dV + \int_{\mathcal{V}^e} \rho \cdot c_p \frac{\partial \theta_{ap}}{\partial t} N^T dV + \int_{\mathcal{S}_q^e} q N^T dS + \int_{\mathcal{S}_\alpha^e} \alpha \cdot N \cdot N^T \cdot \theta^e dS - \int_{\mathcal{S}_\alpha^e} \alpha \cdot \theta_\alpha \cdot N^T dS \right\} = 0 \quad (5.107)$$

Pentru simplificare vom utiliza notațiile:

$$K_1^e = \int_{\mathcal{V}^e} \rho \cdot c_p \cdot N \cdot N^T dV \quad (5.108)$$

$$K_2^e = \int_{\mathcal{V}^e} B^T D B \cdot dV \quad (5.109)$$

$$K_3^e = \int_{\mathcal{S}_\alpha^e} \alpha \cdot N \cdot N^T dS \quad (5.110)$$

$$K_4^e = \int_{\mathcal{S}_\alpha^e} \alpha \cdot \theta_\alpha \cdot N^T dS - \int_{\mathcal{S}_q^e} q N^T dS \quad (5.111)$$

Cu aceste notații, matricea elementară devine:

$$K_1^e \cdot T^e + (K_2^e + K_3^e) \cdot T^e = K_4^e \quad (5.112)$$

Asamblând toate cele  $n$  elemente din domeniul discretizat, se va obține ecuația finală:

$$K_1 \cdot \theta + (K_2 + K_3) \cdot T^e = K_4 \quad (5.113)$$

Pentru cazul regimului tranzitoriu, folosim o schemă simplă, cu diferențe finite. Expresia iterativă de calcul este dată de relația:

$$\left( \frac{2}{\Delta t} K_1 + K_2 + K_3 \right) \cdot \theta_{n+1} = \left( \frac{2}{\Delta t} K_1 - K_2 - K_3 \right) \cdot \theta_n + (K_{4,n+1} + K_{4,n}) \quad (4.114)$$

Această relație evidențiază faptul că temperaturile nodale  $T$  la timpul  $t + \Delta t$  pot fi calculate o dată ce temperaturile nodale la timpul  $t$  au fost cunoscute.

## V.6. Concluzii

În acest capitol nu ne-am propus decât să arătăm o parte din ceea ce înseamnă “modelarea prin metoda elementelor finite”. Este tocmai acea parte care rămâne ascunsă utilizatorului diverselor pachete software și CAD care vede aceste produse informatice ca pe niște “cutii negre” în care trebuie să introduci niște date și din care să scoți niște rezultate, fără a cunoaște instrumentul matematic din interiorul lor. Nu ne-am propus să scriem un tratat matematic, ci doar să surprindem modul de aplicare a metodei elementelor finite în rezolvarea unor probleme specifice de câmp termic, atât permanent cât și tranzitoriu.

Modelarea prin metoda elementelor finite reprezintă un instrument modern și performant pentru studiul problemelor de câmp termic, indiferent de domeniul de aplicare.

Vom prezenta în capitolele următoare modul concret de utilizare a metodei elementelor finite în scopul studierii câmpului termic în interiorul echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO, utilizând pachetul CAD **FLUX 2D 7.40**.

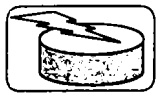


## **V.7. Contribuții personale**

Cele mai importante contribuții personale din acest capitol sunt:

- Evidențierea avantajelor modelării numerice prin metoda elementelor finite față de alte posibile instrumente matematice;
- Prezentarea esenței metodei elementelor finite, așa cum se aplică ea în situația modelării transferului termic pentru varistoarele pe bază de ZnO;
- Analiza critică a modului de implementare a acestei metode;
- Adaptarea modelului matematic pentru cazul concret al varistoarelor pe bază de ZnO.





## CAPITOLUL VI

### Metodă globală de analiză a stabilității termice a echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO

În regimul de serviciu nominal (permanent) de funcționare al echipamentului de protecție (când echipamentul este conectat la tensiunea nominală a rețelei și nu se aplică nici o supratensiune), varistorul (sau coloana de varistoare) ajunge după un timp relativ scurt în regim termic staționar, care corespunde unui echilibru între puterea (căldura în unitatea de timp) produsă prin efectul Joule-Lenz în masa varistorului parcurs de un curent relativ mic și cea donată (cedată) mediului ambiant sub formă de căldură [16].

Ruperea acestui relativ fragil echilibru generează creșterea temperaturii, care produce o creștere a curentului de scurgere prin varistor (curent de natură termoelectronică), procesul repetându-se în avalanșă, generând astfel așa-zisa “ambalare termică” [13], [16], [67].

Trecerea din regim termic permanent în regimul termic (tranzitoriu) de ambalare termică se face în următoarele cazuri [16], [42]:

- În regim de serviciu nominal, prin creșterea temperaturii mediului ambiant sau creșterea tensiunii rețelei;
- În regim de serviciu de avarie, energia din undele de supratensiune produce o creștere rapidă și pronunțată a temperaturii;
  - dacă aceasta rămâne inferioară unei anumite limite, căldura degajată poate fi evacuată, varistorul se răcește progresiv și temperatura revine la o valoare stabilă;
  - dacă temperatura depășește o anumită valoare de prag, (de exemplu prin aplicarea unor șocuri de tensiune care se succed la intervale scurte de timp), apare ambalarea termică.

#### VI.1. Definierea noțiunii de ambalare termică

Noțiunea de “ambalare termică” se poate defini numai prin definirea unui prag al curentului, de la care este posibilă creșterea sa necontrolată, însoțită, evident, și de o creștere necontrolată a temperaturii, cu consecințe devastatoare pentru materialul varistor.

Pentru a stabili valoarea reală a pragului de ambalare termică vom porni de la ecuația bilanțului termic, așa cum am prezentat-o și am dedus-o în capitolele anterioare, pentru un varistor (coloană de varistoare) cilindrică, de diametru “ $d$ ” și înălțime “ $h$ ” [86].

$$\frac{d\tau}{dt} + \left( \frac{\alpha \cdot l_p}{c_1 \cdot A} - \frac{\rho_a \cdot \alpha_R \cdot J^2}{c_1} \right) \cdot \tau = \frac{\rho_a \cdot J^2}{c_1} \quad (6.1)$$

Unde:

- $\tau(t) = \theta - \theta_a$  este supratemperatura varistorului la un moment dat;
- $\alpha$  este transmisivitatea termică globală (prin convecție și radiație);
- $c_1 = c \cdot \rho_d$  este căldura specifică volumică a varistorului;
- $\rho_a$  este rezistivitatea varistorului la temperatura mediului ambiant, luată ca o valoare medie pentru funcționarea varistorului la o tensiune în jurul celei nominale  $U_n$ ;
- $\alpha_R$  este coeficientul de variație al rezistivității cu temperatura;
- $A$  este aria secțiunii transversale;
- $l_p = \pi \cdot d$  este lungimea perimetrului varistorului;
- $J$  este densitatea de curent prin varistor.



Analiza globală a stabilității termice și determinarea pragului de ambalare termică se poate face atât în ITC cât și în ITCD.

- a. În condițiile în care rezistivitatea nu variază cu temperatura ( $\alpha_R = 0$ ), ecuația de bilanț termic devine:

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\alpha \cdot l_p}{c_1 \cdot A} \cdot \tau = \frac{\rho_a \cdot J^2}{c_1} \quad (6.2)$$

Soluția acestei ecuații este cunoscută din capitolele anterioare ca fiind:

$$\tau = \tau_{sa} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (6.3)$$

în care

$$\tau_{sa} = \frac{\rho_a \cdot J^2 \cdot A}{\alpha \cdot l_p} \quad (6.4)$$

și, pentru constanta termică de timp a varistorului:

$$T = \frac{c_1 \cdot A}{\alpha \cdot l_p} \quad (6.5)$$

cu precizarea că  $\tau_{sa}$  reprezintă supratemperatura maximă de regim permanent stabilizat, corespunzătoare unei anume densități de curent  $J$ ;

- b. Dacă rezistivitatea variază cu temperatura, la o tensiune constantă ( $\alpha_R \neq 0$ ):

În realitate rezistivitatea mediului varistor în zona "ohmică", de funcționare în regim de serviciu permanent, depinde extrem de mult de temperatură. Dependența o putem considera la limită ca fiind liniară numai pentru un interval de temperatură între 20 °C și 60 °C. În realitate ea are o variație mult mai complexă.

Ecuația (6.1) va avea soluția:

$$\tau = \tau_s \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_t}} \right) \quad (6.6)$$

sau, cu referire la (6.3):

$$\tau_s = \tau_{sa} \cdot \frac{1}{1 - \alpha_R \cdot \tau_{sa}} \quad (6.7)$$

unde  $\tau_s$  reprezintă temperatura staționară în regimul stabilizat dacă se ține cont și de variația rezistivității cu creșterea temperaturii.

$$T_t = \frac{T}{1 - \alpha_R \cdot \tau_{sa}} = \frac{c_1}{\rho_a \cdot J^2} \cdot \frac{\tau_{sa}}{1 - \alpha_R \cdot \tau_{sa}} \quad (6.8)$$

Analizând relațiile (6.9) și (6.10) se constată că există o densitate de curent critică  $J_{cr}$ , rezultată din condiția de anulare a numitorului acestor relații, anume:

$$1 - \alpha_R \cdot \tau_{sa} = 0 \quad (6.9)$$

ceea ce presupune ca și coeficientul lui  $\tau$  din (5.1) să fie nul:

$$\frac{\alpha \cdot l_p}{c_1 \cdot A} - \frac{\rho_a \alpha_R \cdot J_{cr}^2}{c_1} = 0 \quad (6.10)$$

de unde:

$$J_{cr} = \sqrt{\frac{\alpha \cdot l_p}{\rho_a \cdot \alpha_R \cdot A}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \alpha}{\alpha_R \cdot \rho_a \cdot d}} \quad (6.11)$$



ecuația bilanțului termic devenind:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\rho_a \cdot J_{cr}^2}{c_1} \quad (6.12)$$

care are soluția:

$$\tau(t) = \frac{\rho_a \cdot J_{cr}^2}{c_1} \cdot t \quad (6.13)$$

Aceasta reprezintă ecuația unei drepte care trece prin origine, deci pentru un timp de funcționare nelimitat, teoretic temperatura varistorului va crește la această densitate critică a curentului aplicat la o valoare tinzând spre infinit.

$$\frac{\rho_a \cdot J_{cr}^2}{c_1} \cdot t \text{ se numește intensitate de încălzire;}$$

$J_{cr}$  este densitatea de curent critică, o mărime specifică, strict definită pentru fiecare varistor.

În aparență, densitatea de curent critică  $J_{cr}$ , calculată conform (6.11) este dependentă în primul rând de diametrul varistorului și de transmisivitatea termică prin convecție  $\alpha$ , parametrii care țin de natura și geometria varistorului,  $\alpha$  depinzând și de temperatura mediului ambiant, dar într-o destul de mică măsură pentru valorile  $\theta_a$  de până la 40 °C.

În realitate putem face observația că  $J_{cr}$  astfel definit este o funcție de rezistivitatea varistorului în momentul conectării lui la rețea, anume  $\rho_a$ .

Rezistivitatea la momentul inițial,  $\rho_a$ , este determinată în principal de doi factori:

- tensiunea la care este conectat varistorul;
- temperatura inițială a acestuia (de cele mai multe ori temperatura ambiantă  $\theta_a$ )

Ca urmare, definirea lui  $J_{cr}$  se va face ținând seama de aceste două mărimi.

a). Pentru  $J < J_{cr}$ , temperatura maximă în regim stabilizat  $\tau_s$  va avea valori finite, pozitive, date de relația (6.7), dependente de valoarea curentului, acesta fiind determinat de tensiunea la care funcționează echipamentul în regim de serviciu permanent,  $U$ , care poate fi diferită de tensiunea nominală a rețelei  $U_n$ . Acest lucru se reflectă în coeficientul de utilizare, definit în Capitolul II,

anume:  $C = \frac{U}{U_N}$  [13],[16],[39]. Temperatura ambiantă are și ea un rol hotărâtor.

b). Dacă impunem condiția:

$$1 - \alpha_R \cdot \tau_S < 0, \text{ adică } J > J_{cr} \quad (6.14)$$

soluția ecuației (6.1) va fi de forma:

$$\tau = \tau_{\max} \cdot \left( e^{\frac{t}{T_+}} - 1 \right) \quad (6.15)$$

unde:

$$\tau_{\max} = \frac{\tau_{sa}}{\alpha_R \cdot \tau_{sa} - 1} \quad (6.16)$$

și constanta termică de timp:

$$T_+ = -T_\tau = \frac{\tau_{sa}}{\alpha_R \cdot \tau_{sa} - 1} \cdot \frac{c_1}{\rho_a \cdot J^2} \quad (6.17)$$

Aceasta înseamnă, așa cum reiese din (6.15), creșterea exponențială a temperaturii în timp, fără posibilitatea atingerii unui regim staționar. Inevitabil, acest lucru duce la distrugerea varistorului.



În concluzie, pentru fiecare valoare a tensiunii aplicate varistorului în regim de serviciu permanent și pentru fiecare valoare a temperaturii ambiante, menținând una din ele constante, putem stabili o valoare critică a densității de curent  $J_{cr}$ , care corespunde unei anumite valori a celeilalte mărimi. Deci pentru un  $\theta_a$  oarecare putem găsi valoarea  $C$  care determină  $J_{cr}$  și reciproc. Creșterea densității de curent peste acest nivel critic, datorită fie creșterii tensiunii de alimentare, fie creșterii temperaturii ambiante sau a temperaturii varistorului în urma unui impuls de curent, produce încălzirea excesivă a varistorului și intrarea acestuia în regimul de “ambalare termică”, adică de creștere violentă și necontrolată a temperaturii acestuia.

Dacă densitatea de curent se menține la valori sub acest prag critic, încălzirea varistorului duce în final la atingerea unei supratemperaturi de regim staționar,  $\tau_s$ , fără consecințe distructive pentru varistor.

În continuare vom prezenta modul de variație a densității de curent critice, în funcție de tensiunea aplicată varistorului și temperatura ambiantă.

## VI.2. Analiza experimentală a fenomenului de ambalare termică

Pentru a trage concluzii privind fenomenul de ambalare termică vom prezenta o parte din rezultatele experimentale obținute de către autor în cadrul Laboratorului “Génie Electrique” al Universității PAUL SABATIER din Toulouse.

S-a încercat să se răspundă la întrebarea “Cum se manifestă și în ce condiții se produce ambalarea termică?”. Nu se vor prezenta modelări numerice și nici soluții de evitare a acestui fenomen. Concluziile desprinse din analiza experimentală sunt foarte utile pentru încercările în regim permanent, care vor fi prezentate într-un capitol ulterior și pentru stabilirea limitelor de solicitare termică a varistoarelor.

Pentru studiul experimental s-a utilizat un varistor disc, fără conectori, cu fețele acoperite cu electrozi de Ag depus serigrafic, tip **ISKRA V250D32S**, fabricat de către ISKRA Varistor Slovenia.

Dimensiunile acestuia sunt prezentate în figura VI.1 [79]:

Diametrul util al varistorului este de 30 mm, el fiind înconjurat de un strat izolator de rășină epoxidică, de aproximativ 1 mm. Dimensiunea  $T = 3$  mm (înălțimea varistorului). Este un varistor cu capacitate mărită de absorbție în energie. Este utilizat pentru protecția rețelelor de 220-230 V c.a.

Datele de catalog ale acestuia sunt [12]:

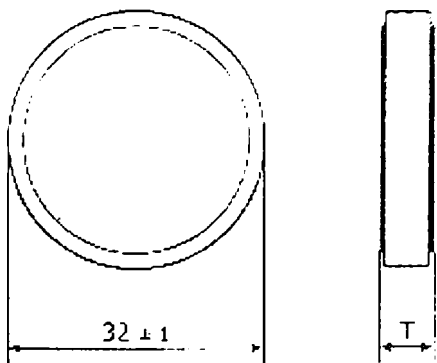


Figura VI.1: Varistorul ISKRA V250D32S (vedere de ansamblu)

|                       |              |
|-----------------------|--------------|
| $U_{RMS}$             | = 250 V      |
| $U_{DC}$              | = 320 V      |
| $P_{max}$             | = 1,2 W      |
| $I_{max} (8/20\mu s)$ | = 25000 A    |
| $W_{max}(2ms)$        | = 340 J      |
| $U_N$                 | = 390 V      |
| $\Delta U_N$          | = $\pm 10\%$ |
| - C                   | = 6... V     |
| $I_n$                 | = 200 A      |
| C                     | = 2200 pF.   |

Notațiile sunt cele standardizate, definite în Cap. II.6.

Se observă că fabricantul oferă valoarea maximă a coeficientului de utilizare, pentru o temperatură ambiantă  $\theta_a = 25$  °C:

$$C_{max} = \frac{U_{DC}}{U_N} = \frac{320V_{c.c.}}{390V_{c.c.}} = 0,82$$

În scopul de a determina (verifica) valoarea maximă a coeficientului de utilizare  $C = U/U_N$ , care să nu genereze ambalare termică la temperatura mediului ambiant și de a evidenția încălzirea varistorului la diverse valori ale tensiunii continue  $U$  (în jurul valorii  $U_{DC} = 320$ ) varistorul a fost supus încălzirii într-o incintă termostată (etuvă), cu temperatura  $\theta_a = 25$  °C.



Instalația experimentală este prezentată în figura VI.2. Exceptând etuva, ea este folosită și pentru încercări în tensiune continuă și regim termic permanent.

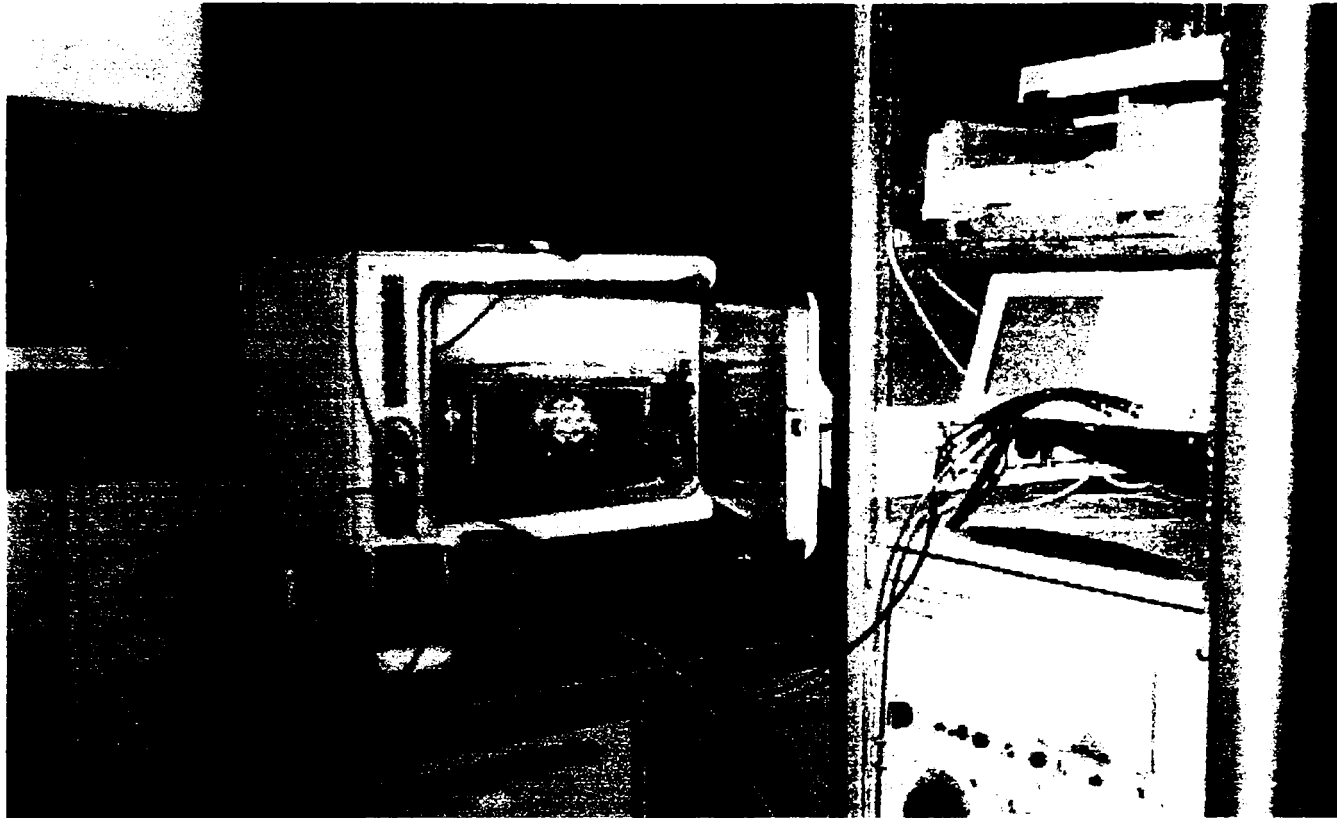


Figura VI.2: Instalația pentru încercări în tensiune continuă și etuva în care a fost introdus varistorul.

Schema electrică a instalației este prezentată în figura VI.3:

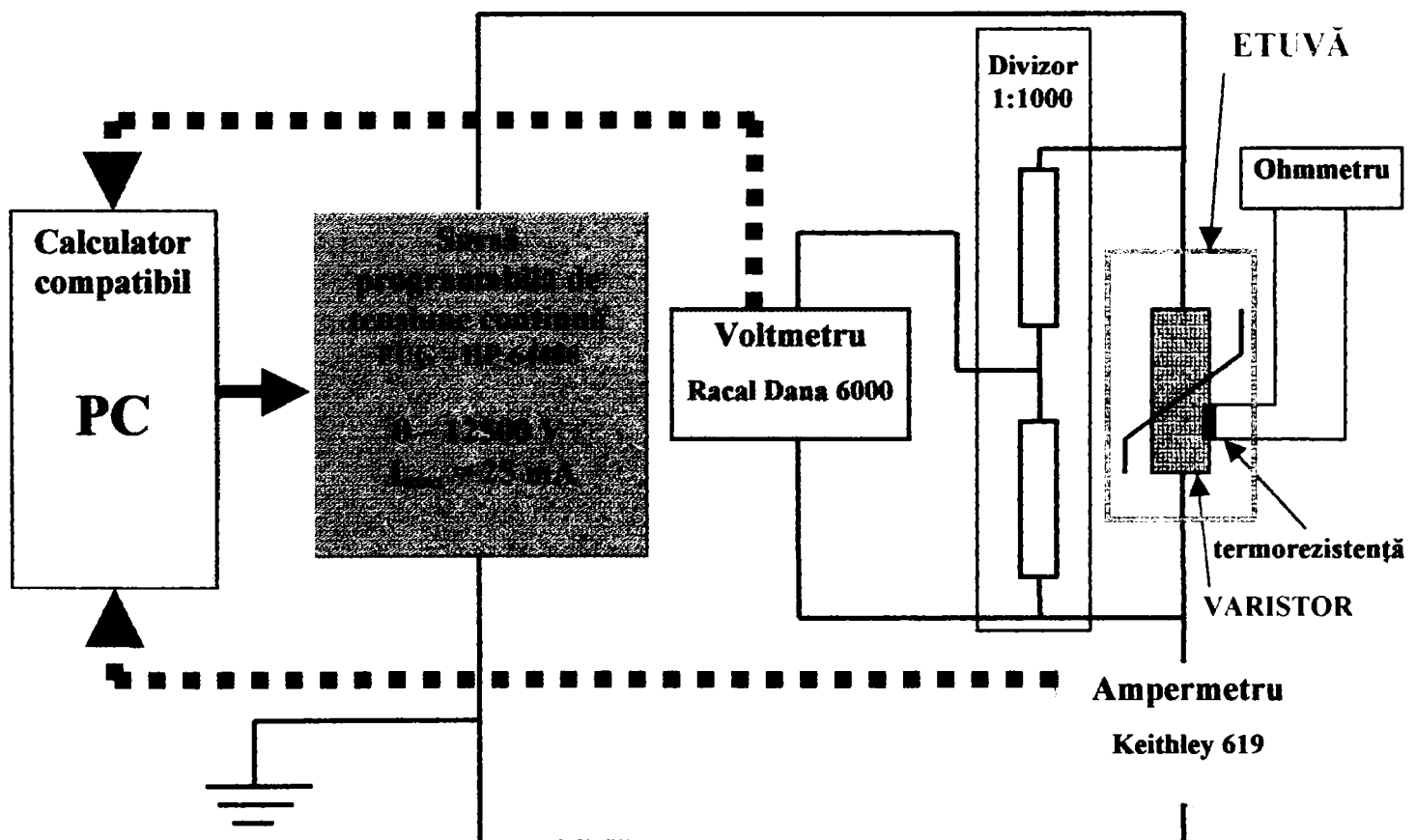


Figura VI.3: Schema electrică a instalației pentru încercări în regimuri permanente.





Varistorul este montat racordat prin fire, nu prin electrozi, pentru a evita influența acestora asupra varistorului. Este suspendat vertical în interiorul etuvei, pentru a avea aceeași transmisivitate termică  $\alpha$  pe ambele fețe. S-au efectuat măsurători ale temperaturii în două puncte de pe fețele varistoarelor, simetrice, apropiate de axa de simetrie.

Ca traductori de temperatură au fost utilizate termorezistențe de platină, extrem de sensibile în intervalul de temperatură  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta R/R > 1,5\%$  pentru un grad Celsius). Pentru măsurarea rezistenței electrice a acestora s-au utilizat 2 multimetre digitale standard (vizibile în fotografie). În prealabil aceste termorezistențe au fost etalonate de către fabricant și verificate în laborator.

Legea de variație a rezistenței lor cu temperatura este liniară, anume:

$$R = 0,385 \cdot \theta + 100 \quad [\Omega]$$

După cum rezultă din legea de variație a rezistenței cu temperatura, la  $0^{\circ}\text{C}$  rezistența lor este de  $100\text{ }[\Omega]$ . Termorezistențele corespund standardului DIN 43760.

Inerția termică a acestor termorezistențe este mică, ele răspunzând aproape instantaneu la cele mai mici variații ale temperaturii. Pentru a crește viteza de reacție a ansamblului, între captatorii termici și varistor s-a depus de fiecare dată un strat subțire de vaselină siliconică, știut fiind că acest material este un excelent conductor termic. Captatorii au fost apoi lipiți pe suprafața varistorului în punctul unde se dorea măsurarea temperaturii. Toate temperaturile determinate experimental în această lucrare au fost măsurate prin acest procedeu.

Elementele schemei instalației de încercări, în regim permanent, așa cum apar în figura VI.3 sunt:

- sursa de tensiune continuă, programabilă prin intermediul unui calculator compatibil IBM-PC 486, tip FUG-HP 64488, care poate debita o tensiune continuă între  $0$  și  $12500\text{ V}$ , la un curent maxim de  $25\text{ mA}$ . Sursa poate fi reglată și manual;
- un (micro)ampermetru digital Keithley 619 înseriat cu varistorul, care permite măsurarea curenților între  $1,9 \cdot 10^{-9}$  și  $1,9 \cdot 10^{-3}\text{ A}$ , având clasa de precizie  $0,5\%$ ;
- un voltmetru digital, cu memorie, tip Racal Dana 6000, care măsoară tensiunea aplicată între fețele varistorului printr-un divizor rezistiv, cu raportul  $1:1000$ , având clasa de precizie  $0,1\%$ ;
- două multimetre portabile (numai unul fiind reprezentat în schemă), funcționând în regim de ohmmetre, utilizate pentru măsurarea rezistenței captatorilor termici.

Ampermetrul digital și voltmetrul digital pot transmite datele obținute direct la PC, acesta fiind prevăzut cu o interfață de proces, compatibilă IEEE 488. Sistemului i se poate atașa și o imprimantă.

Așa cum am mai precizat, într-un prim set de încercări varistorul a fost polarizat la trei nivele diferite de tensiune, anume:

- $312\text{ V c.c.}$ , ceea ce corespunde la un  $C = 312/390 = 0,8$  valoare sub limită;
- $320\text{ V c.c.}$ , corespunzător  $C = 320/390 = 0,82$  – valoarea limită recomandată de producător;
- $345\text{ V c.c.}$ , corespunzător  $C = 345/390 = 0,884$  – valoare peste limită.

Scopul măsurărilor a fost:

- Evidențierea ambalării termice;
- Stabilirea limitei maxime de tensiune, pentru o temperatură ambiantă dată;
- Verificarea proprietăților termice ale varistorului;
- Stabilirea valorii limită a densității de curent, pentru o anumită tensiune și temperatură ambiantă, dincolo de care se produce ambalarea termică.

În figura VI.4 este evidențiată evoluția supratemperaturii varistorului ( $\tau$ ) în timp, pentru cele trei valori ale factorului de utilizare.

În figura VI.5 este reprezentată evoluția curentului prin varistor pentru valorile peste limită și sub limită ale coeficientului de utilizare.

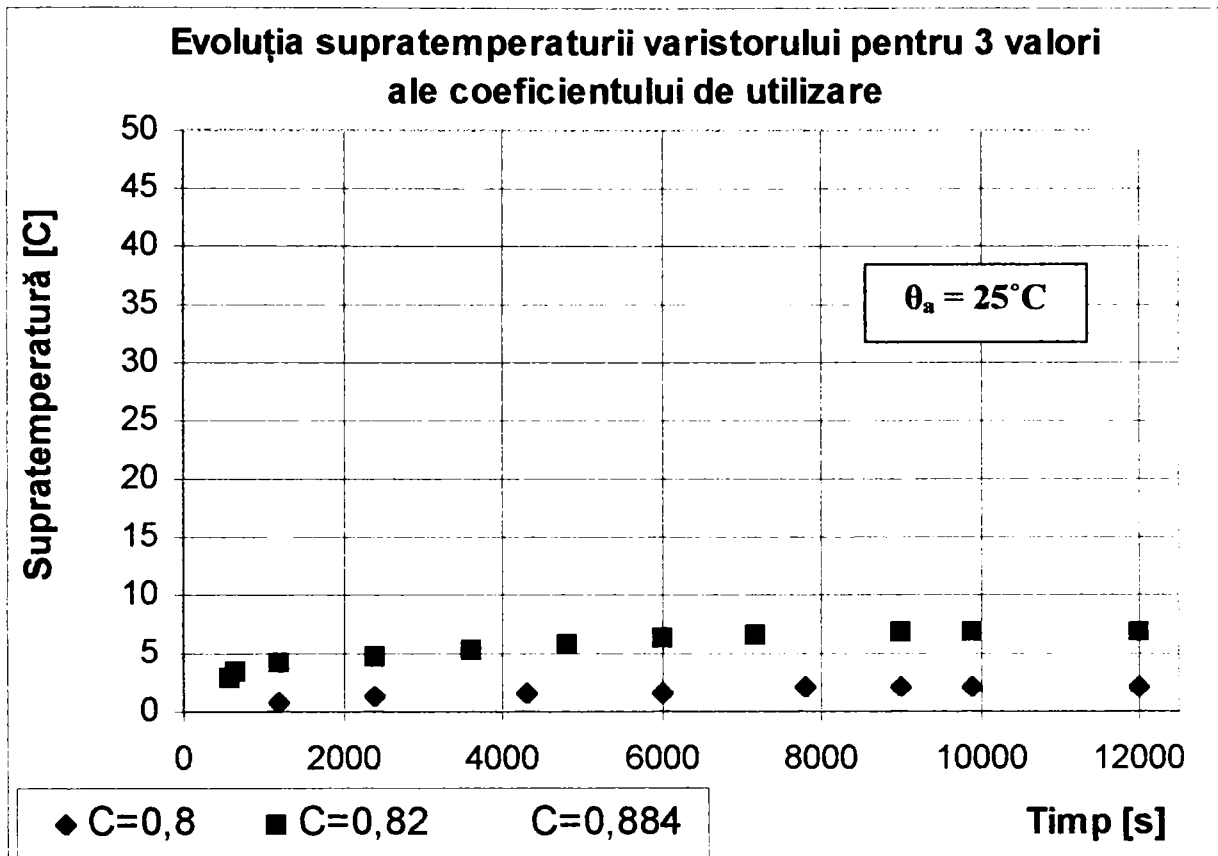


Figura VI.4: Evoluția în timp a supratemperaturii  $\tau$  a varistorului pentru trei valori ale coeficientului de utilizare.

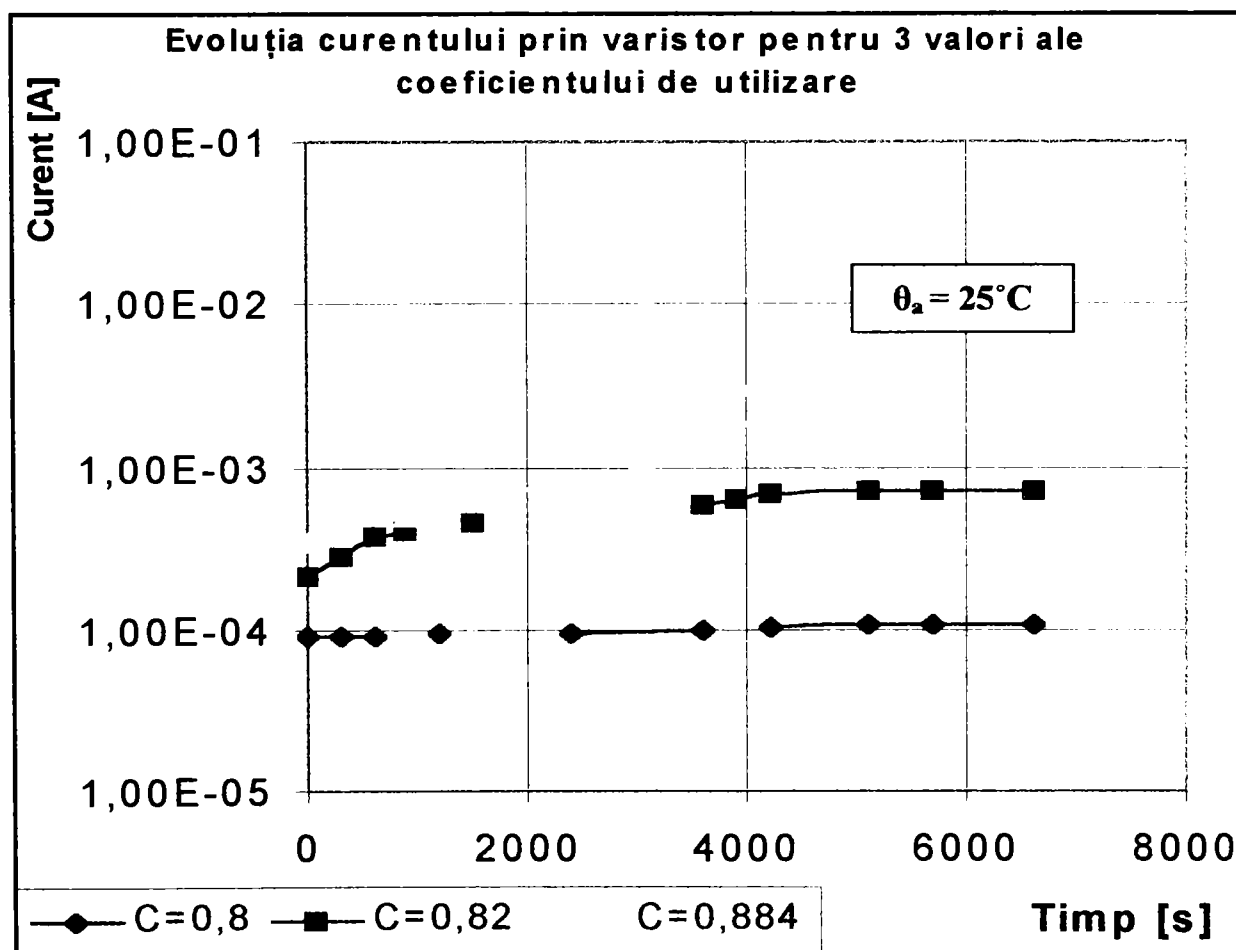


Figura VI.5: Evoluția în timp a curentului prin varistor pentru două valori ale coeficientului de utilizare C.



În figura VI.4 se observă că pentru coeficientul de utilizare limită  $C=0,82$  (recomandat de fabricant), se atinge un regim staționar, supratemperatura maximă a varistorului fiind  $\tau_s = 6,8$  °C.

O dată cu creșterea tensiunii de alimentare (deci a coeficientului de utilizare), în condițiile menținerii temperaturii ambiante constante, regimul staționar nu mai poate fi atins, creșterea temperaturii având loc în avalanșă. Acesta este fenomenul de ambalare termică. Varistorul a fost deconectat după o oră (3600 s), când supratemperatura lui atinsese 44,1 °C, în scopul de a evita distrugerea lui prin suprasolicitare termică.

Referitor la evoluția în timp a curentului prin varistor, putem face următoarele precizări:

- pentru un coeficient de utilizare  $C = 0,8$ , sub cel limită  $C = 0,82$ , valoarea curentului se menține aproximativ constantă în timp, în jurul a  $10^{-4}$  A;
- pentru un coeficient de utilizare  $C = 0,884$ , peste cel limită, curentul tinde să crească exponențial (scara curentului este logaritmică), situație cauzată de ambalarea termică.

Pentru un factor de utilizare limită ( $C = 0,82$ ,  $U = 320$  V c.c.), curentul se menține de asemenea stabil, în jurul a  $7,1 \cdot 10^{-4}$  A, chiar dacă pleacă de la o valoare de cca.  $2 \cdot 10^{-4}$  A, corespunzătoare caracteristicii statice  $I(U)$ .

Valoarea limită a coeficientului de utilizare dată de fabricant nu reprezintă valoarea la care se obține densitatea critică de curent, fiind inferioară acesteia. Densitatea de curent critică se obține, la o temperatură ambiantă de 25 °C, pentru un coeficient de utilizare de cca. 0,83 ...0,85, depinzând de geometria varistorului, conform (6.11), dar și de calitatea materialului.

Conform datelor experimentale disponibile la laboratorul "Génie Electrique" al Universității "Paul Sabatier" din Toulouse și a unor determinări proprii [2], [37] pentru varistorul utilizat avem următorii parametri:

- $\rho_a = 3,6 \cdot 10^5$  [ $\Omega \cdot m$ ];
- $\alpha_R = 3 \cdot 10^{-3}$  [ $grad^{-1}$ ];
- $d = 3 \cdot 10^{-2}$  [ $m$ ];

La o temperatură de aproximativ 25 °C vom avea  $\alpha \approx 17$  [ $W / (m^2 grad)$ ][38].

Densitatea critică de curent, calculată conform (6.11), pentru seria de varistoare cu diametrul de cca. 30 mm, va fi:

$$J_{cr} = 1,448 \text{ [A/m}^2\text{]}$$

Pentru această valoare a densității critice de curent, la aplicarea unei tensiuni nominale, în regim de serviciu permanent, avem un curent de ambalare termică:

$$I_{amb} = J_{cr} \cdot A \approx 1,02 \text{ [mA]}$$

Analizând expresia densității critice de curent  $J_{cr}$ , dată de (6.11), se poate concluziona că valoarea lui este influențată numai de condițiile de evacuare a căldurii prin modificarea lui  $\alpha$  sau prin modificarea diametrului pastilei de ZnO, cu precizările făcute anterior.

Densitatea critică va fi aceeași pentru toate seriile de varistoare de același diametru, fiind însă diferită energia care poate fi absorbită, energie dată de volumul pe care îl au (prin înălțimea diferită a pastilelor de ZnO).

În figura VI.6 prezentăm evoluția supratemperaturii varistorului pentru două valori ale temperaturii ambiante, anume  $\theta_a = 25$  °C și  $\theta_a = 55$  °C.

Măsurătorile au fost făcute menținând tensiunea constantă la valoarea de 320 V c.c., ceea ce corespunde la valoarea limită recomandată de fabricant  $C = 0,82$ .

Prima valoare află sub valoarea limită a temperaturii mediului ambiant, iar a doua se află deasupra. Valoarea limită a temperaturii mediului ambiant dincolo de care se produce ambalarea termică, pentru  $C = 0,8$  este de aproximativ 40-45 °C. Pentru funcționarea continuă, la tensiunea nominală ( $C < 0,65$ ) nu există nici un risc, fabricantul garantând varistorul până la  $\theta_a = 85$  °C.

Evoluția în timp a curentului prin varistor este prezentată în figura VI.7., în funcție de cele două valori ale temperaturii ambiante.

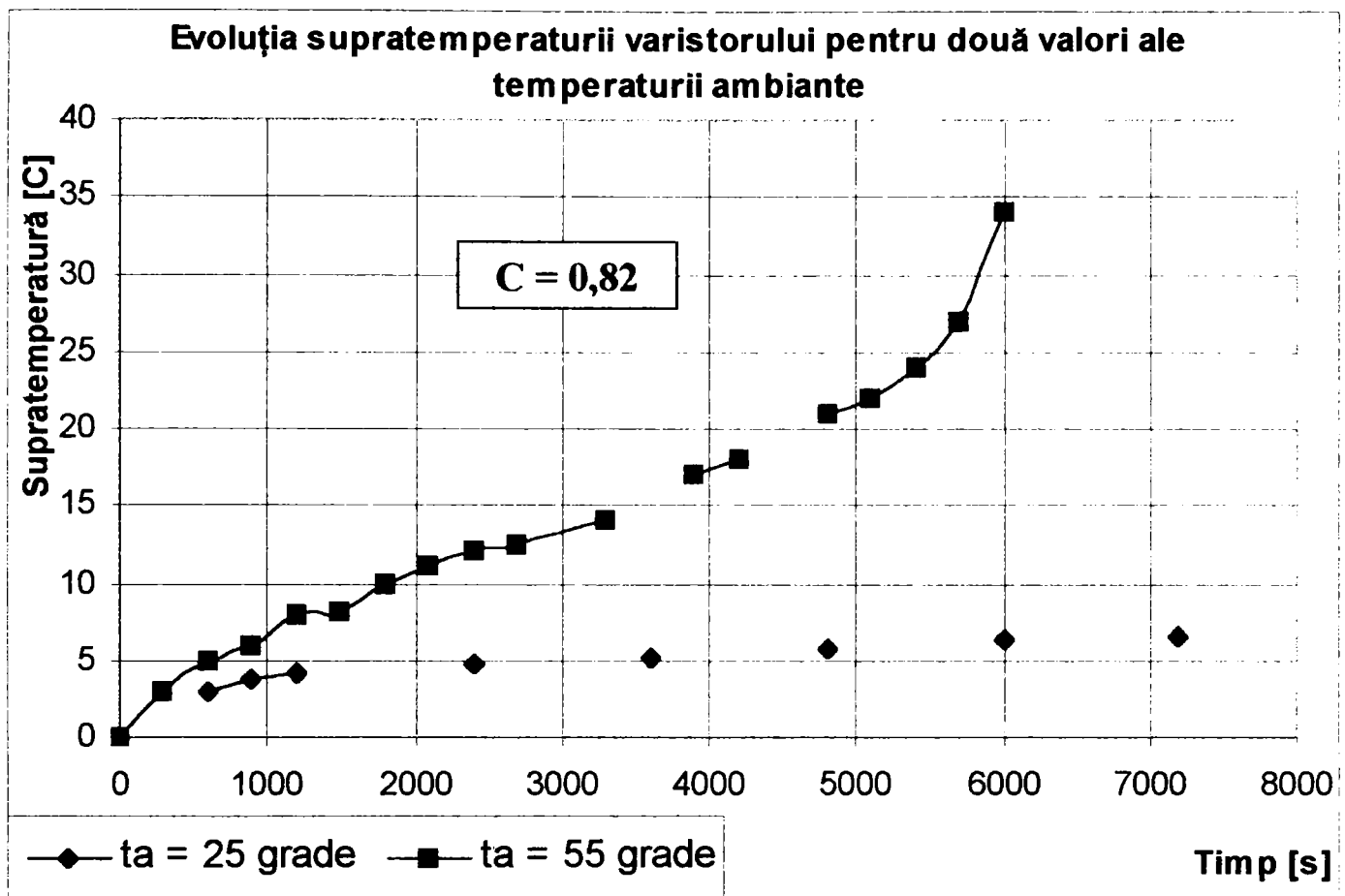


Figura VI.6: Evoluția în timp a supratemperaturii ( $\tau$ ) a varistorului pentru două valori ale temperaturii mediului ambiant  $\theta_a = 25^\circ\text{C}$  și respectiv  $\theta_a = 55^\circ\text{C}$ .

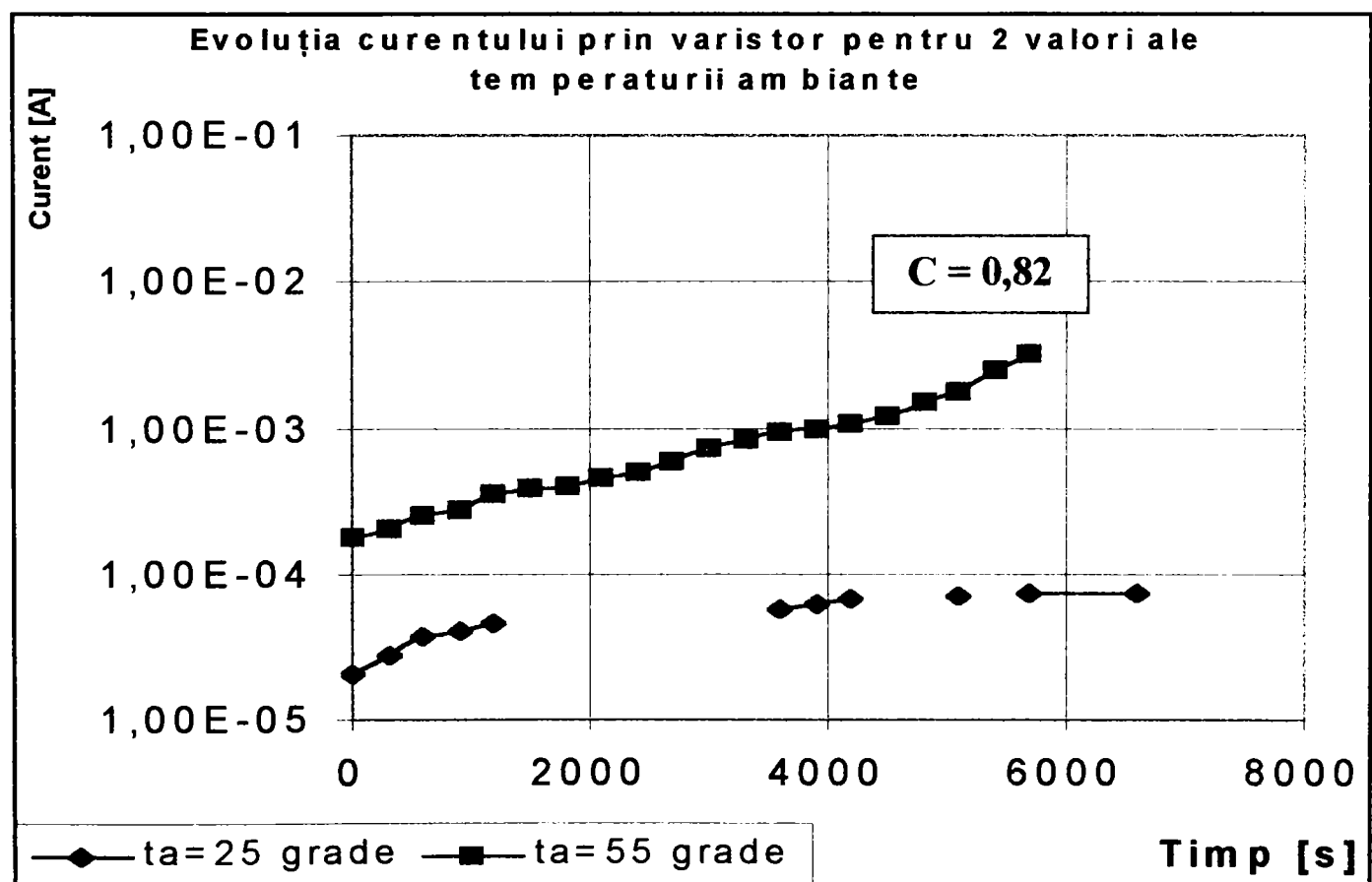


Figura VI.7: Evoluția în timp a curentului prin varistor, pentru două valori ale temperaturii ambiante,  $\theta_a = 25^\circ\text{C}$  și respectiv  $\theta_a = 55^\circ\text{C}$ .



Se observă că în acest caz, ambalarea termică apare și la un coeficient de utilizare  $C = 0,8$ , datorită creșterii temperaturii ambiante. Coeficientul de utilizare critic, de la care apare ambalarea termică se situează în jurul valorii de  $C = 0,75$  pentru o temperatură de  $55\text{ }^\circ\text{C}$ .

Ca urmare:

- la  $\theta_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $C_{cr} = 0,84$ ;
- la  $\theta_a = 55\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $C_{cr} = 0,75$ ;

Ca urmare, putem presupune, în urma determinărilor experimentale, că valorile critice ale coeficientului de utilizare au o dependență liniară în funcție de temperatură, dreapta valorilor critice trecând prin cele două puncte amintite mai sus și având ecuația:

$$C_{cr} = 0,915 - 3 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a$$

Această dreaptă este reprezentată în figura VI.8. Pentru perechile de puncte de coordonate  $(C, \theta_a)$  aflate deasupra acesteia, ambalarea termică la tensiunea aplicată și temperatura ambiantă este sigură, iar pentru punctele de coordonate  $(C, \theta_a)$  aflate sub această dreaptă, ambalarea termică nu se produce, nefiind depășită densitatea critică de curent.

S-au reprezentat și punctele obținute anterior, în experimentele efectuate.

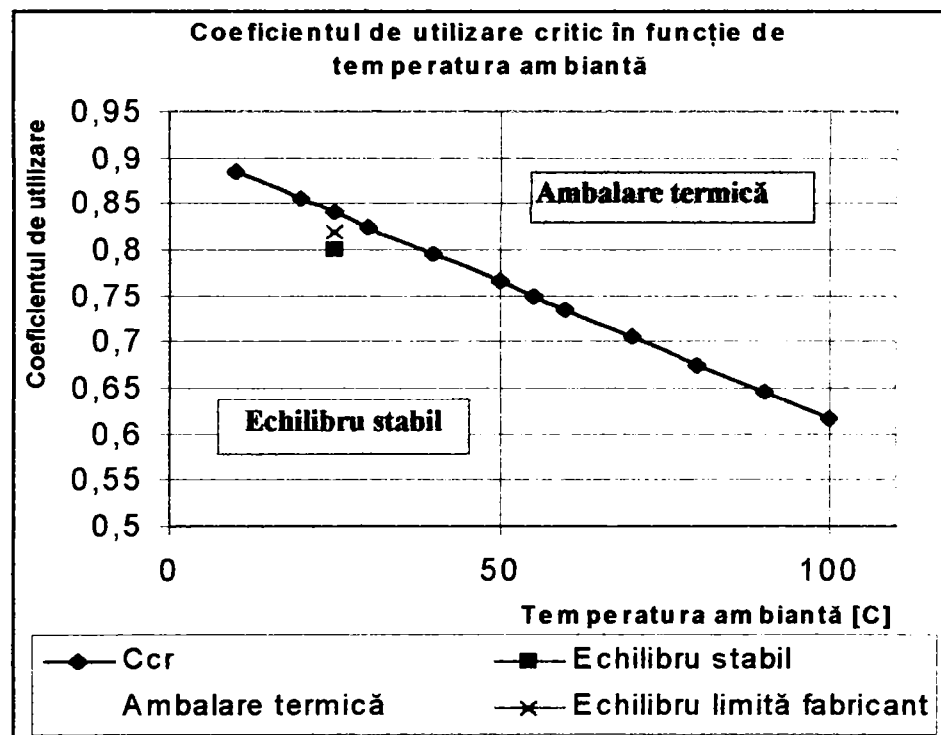


Figura VI.8: Dependența coeficientului de utilizare critic  $C_{cr}$  de temperatura mediului ambiant  $\theta_a$ .

Această dependență liniară corespunde destul de bine realității, ea fiind verificată și experimental.

Ea oferă utilizatorului de varistoare un răspuns la întrebarea “Care este tensiunea maximă la care poate opera un varistor în regim de serviciu permanent la o anumită valoare a temperaturii ambiante?”.

Răspunsul la această întrebare nu este întotdeauna furnizat explicit de către fabricatul varistorului. Această întrebare devine esențială, mai ales dacă echipamentul de protecție contra supratensiunilor care înglobează varistorul este realizat în variantă capsulată și/sau este expus surselor de căldură sau radiației solare.

Parametrii climatici ai varistoarelor sunt reglementați de standardele IEC 68-1, IEC 68-2-3 și CECC 42000, care conțin reglementări generale privind temperatura ambiantă în timpul funcționării și la depozitării varistoarelor.

De regulă, temperatura ambiantă de depozitare a varistorului nu trebuie să depășească, pentru varistoarele de joasă tensiune, valoarea de  $60 - 70\text{ }^\circ\text{C}$ .





Unii fabricanți de varistoare oferă unele informații privind calculul unui coeficient de modificare a tensiunii de exploatare în funcție de temperatură, valabil pe un interval redus de temperatură, dar această procedură este pur empirică și nu e reglementată de standarde. Legea de variație a tensiunii de alimentare (coeficientului de utilizare) limită în funcție de temperatura ambiantă poate fi verificată numai experimental.

Evaluarea stabilității termice a varistorului în regim de serviciu permanent nu este decât o primă etapă, necesară, în evaluarea stabilității termice globale.

### VI.3. Metoda globală de analiză a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO

O altă situație în care este posibilă apariția ambalării termice este descărcarea prin varistor a energiei unei de supratensiune. Ca urmare, evaluarea stabilității termice trebuie făcută global, luând în calcul și acest regim de serviciu de avarie.

Sub acțiunea curenților de descărcare, produși de supratensiuni, solicitarea termică a varistorului (coloanei de varistoare) se caracterizează prin următoarele particularități:

- Densitate de curent mare, cu mult superioară celei din regimul nominal de funcționare, când este supus numai la tensiunea nominală a instalației;
- Procesul de suprasarcină este de scurtă durată, curentul de descărcare prin varistor fiind redus la valoarea curentului de scurgere  $I_f$  (la  $U_n$ ), după eliminarea unei de supratensiune. În realitate, curentul de regim permanent care apare la scurt timp după trecerea unei impulsului este mai mare decât  $I_f$ , fapt datorat creșterii temperaturii varistorului în urma impulsului;
- Variația curentului în timp este complexă și are loc într-un interval scurt de timp;
- Rezistența (și deci rezistivitatea) electrică variază în limite foarte largi (câteva ordine de mărime) în timpul descărcării.

Se pune problema modelării matematice a câmpului de temperatură în timpul aplicării impulsului, modelare deosebit de dificilă, datorită variației foarte mari a parametrilor implicați. Ca urmare, nu putem decât să luăm în calcul creșterea globală a temperaturii varistorului după trecerea unei impulsului de curent.

În esență, trecerea unei impulsului de curent însoțită de conversia energiei electrice în căldură prin efect Joule – Lenz este un proces pur adiabatic. Datorită duratei extrem de reduse a impulsului (sub 1 ms), varistorul nu cedează căldură mediului ambiant nici prin convecție, nici prin radiație. Singura posibilitate de cedare rapidă a căldurii, în timpul impulsului și mai ales în secunde imediat următoare este conducția. Căldura este astfel vehiculată prin racordurile varistorului.

Putem spune fără a greși că întreaga energie a impulsului se acumulează sub formă de căldură în masa varistorului, ducând inevitabil la creșterea temperaturii acestuia.

Această căldură trebuie apoi evacuată din masa varistorului, deoarece, așa cum am arătat anterior, creșterea temperaturii varistorului favorizează conducția electrică și conduce la intrarea varistorului în regim de ambalare termică, cu consecințele binecunoscute. Evacuarea acestei călduri se realizează în principal prin convecție și într-o mai mică parte prin radiație și conducție.

Este foarte util ca, pentru a asigura o proiectare optimală a unui echipament de protecție contra supratensiunilor, să cunoaștem măsurile care se pot lua pentru evitarea riscului de ambalare termică a varistorului în regimul de serviciu care se instaurează după aplicarea impulsului.

Ca urmare, putem vorbi de stabilitate termică a varistorului în două ipostaze:

- stabilitate termică în regim de serviciu permanent;
- stabilitate termică în regim de impuls;

Vom încerca în continuare să definim esența și limitele acestor concepte pornind de la evaluarea bilanțului termic.



Pentru aceasta se va prezenta o diagramă de variație a puterii dezvoltate în varistor prin efect Joule – Lenz,  $P_{dez}$  și a puterii disipate prin convecție și radiație de către varistor, anume  $P_{dis}$ , în funcție de temperatura  $\theta$ , diagramă prezentată în figura VI.9.[16],[19],[29], [56]:

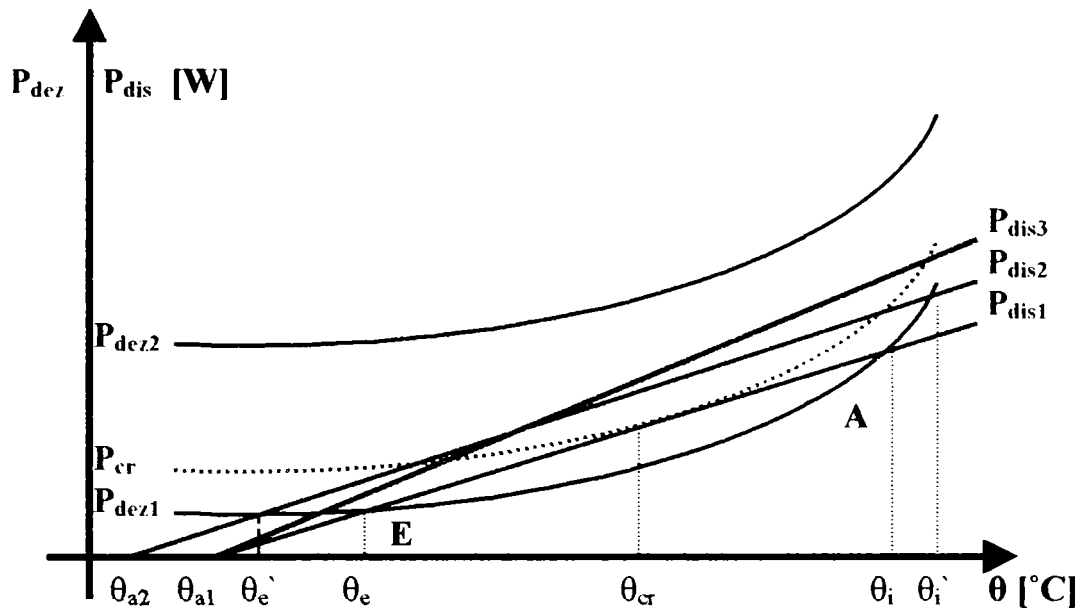


Figura VI.9: Echilibrul termic al unui varistor.

Expresiile matematice ale celor două puteri sunt, așa cum le-am explicat anterior:

**Puterea dezvoltată:**

$$P_{dez} = U \cdot I = U \cdot A(U) \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{q_e \cdot \Phi(U)}{k \cdot T}} \quad (6.1)$$

**Puterea disipată:**

$$P_{dis} = \alpha \cdot S_l \cdot (\theta - \theta_a) \quad (6.2)$$

- unde:
- $S_l$  este suprafața totală de disipare a puterii;
  - $\Phi(U)$  este înălțimea barierei de potențial în funcție de tensiunea aplicată;
  - $q_e$  este sarcina electronului;
  - $T$  este temperatura absolută (în [K]);
  - $k$  este constanta lui Boltzman;

În legătură cu poziția relativă a curbelor, putem avea următoarele situații, care sunt prezentate în corelație cu semnificația lor fizică:

- Două puncte de intersecție  $E$  și  $A$  (pentru curbele  $P_{dez1}$  și  $P_{dis1}$ ), acestea fiind corespunzătoare temperaturii nominale de funcționare de echilibru ( $\theta_e$ ) și temperaturii maxime de stabilitate termică ( $\theta_i$ ). La echilibru, temperatura varistorului ( $\theta_e$ ) este destul de apropiată de temperatura mediului ambiant ( $\theta_{a1}$ ), așa cum am arătat anterior, supratemperatura maximă fiind de 21 °C. Măsurătorile experimentale anterioare au demonstrat că acest curent este în cel mai defavorabil caz de ordinul miliamperilor. Punctul  $E$  este tocmai punctul de funcționare stabilă la temperatura ambiantă, pe care l-am evidențiat anterior. Dacă apare o supratensiune, aceasta este eliminată, iar energia ei produce o încălzire a varistorului, punctul de funcționare deplasându-se pe curba  $P_{dez1}$ . Limita de stabilitate este punctul care corespunde temperaturii  $\theta_i$ , până la acest punct, puterea disipată fiind mult mai mare decât cea produsă, varistorul se răcește și revine la punctul stabil de funcționare din  $\theta_e$  (după trecerea undei de supratensiune); dacă se depășește însă temperatura  $\theta_i$ , temperatura va continua să crească progresiv, generând ambalarea termică în regim dinamic. Acest fapt se petrece pentru unde de supratensiune care înmagazinează o



cantitate mare de energie, situație specifică supratensiunilor tranzitorii de comutație, care se succed la intervale scurte de timp, sau supratensiunilor atmosferice violente care apar în timpul unei furtuni.

- Un singur punct de intersecție (între curbele  $P_{cr}$  și  $P_{disl}$ ), în situația limită când cele două puncte de intersecție dintre puterea disipată și cea dezvoltată în varistor se suprapun, acest punct corespunde temperaturii limită de stabilitate în regim permanent  $\theta_{cr}$ , orice solicitare care apare poate produce ambalarea termică. Situația este caracteristică funcționării în regim permanent la o tensiune în jurul celei de prag, situația poate să apară practic la funcționarea varistorului la o tensiune ce corespunde unui coeficient de utilizare maxim (de exemplu  $C \approx 0,84$  la  $\theta_a = 25^\circ\text{C}$ , în cazul anterior studiat); orice supratensiune care va solicita varistorul va produce ieșirea din starea de echilibru și ambalarea termică a lui. De asemenea, creșterea temperaturii mediului ambiant va avea același efect, după cum am arătat anterior. Această situație limită de exploatare trebuie evitată, pentru a putea realiza un echipament fiabil.
- Cele două grafice nu au puncte comune, (curbele  $P_{dez}$  și  $P_{disl}$ ), caz în care puterea disipată este tot timpul mai mică decât cea produsă în regim permanent, deci este un regim indiscutabil de ambalare termică, corespunzător unui coeficient de utilizare excesiv de mare, chiar supraunitar.

Stările de echilibru stabil (punctul  $E$ ) și instabil (punctul  $A$ ) cu temperaturile corespunzătoare  $\theta_e$  și  $\theta_i$ , dau informații despre comportamentul energetic al varistorului.

Este foarte dificil de trasat acest grafic al echilibrului termic al varistorului. Curba puterii disipate de către varistor (dreapta  $P_{dis}$ ) este relativ ușor de trasat pentru o anumită geometrie și la o anumită valoare a temperaturii mediului ambiant.

Pentru varistorul tip **ISKRA V250D32S** analizat anterior, principalele mărimi din (6.2) sunt:

- suprafața totală de disipare a căldurii (cele două fețe + suprafața laterală):  
 $S_l = 1,91 \cdot 10^{-3} [\text{m}^2]$
- transmisivitatea termică combinată (prin convecție și radiație):  
 $\alpha = 17 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$

Cu aceste precizări, ecuația (6.2) se rescrie pentru cazul concret:

$$P_{dis} = \alpha \cdot S_l \cdot (\theta - \theta_a) = \alpha \cdot S_l \cdot \tau \approx 3,24 \cdot 10^{-2} \cdot \tau$$

Unde  $\tau$  este supratemperatura varistorului.

Curba puterii dezvoltate este extrem de dificil de trasat analitic.

În literatura de specialitate există anumite aproximări exponențiale sau polinomiale pentru mărimile implicate în această formulă. Soluția cea mai apropiată de realitate este cea dată de A. Fakkar [37], care rămâne totuși dificil de aplicat în practică.

Se explicitează funcțiile  $A(U)$  și  $\Phi(U)$  în funcție de coeficientul de utilizare  $C$ , rezultând:

$$A(C) = \exp(-12,7408 + 33,9755 \cdot C^2 + 287,7148 \cdot C^3 - 254,2384 \cdot C^4 + 76,4385 \cdot C^5)$$

Unitatea de măsură:  $[\text{A}/\text{cm}^2]$ . (6.3)

$$\Phi(C) = 0,546 + 0,0851 \cdot C - 1,2249 \cdot C^2 + 1,7122 \cdot C^3 - 0,3344 \cdot C^4 - 0,6083 \cdot C^5$$

Unitatea de măsură:  $[\text{V}]$ . (6.4)

În practică nu se utilizează acest tip de formule.

Conform standardului CECC 42000, fabricantul de varistoare trebuie să furnizeze ca dată de catalog puterea maximă care poate fi disipată de către varistor, anume  $P_{max}$ , în condițiile climatice normale, la o temperatură ambiantă  $\theta_a = 25^\circ\text{C}$ .

Aceasta corespunde supratemperaturii maxime  $\tau_{max}$  care poate fi disipată de varistor în aceste condiții și ne oferă valoarea  $\theta_i = \theta_a + \tau_{max}$ .



Pentru cazul concret al varistorului tip ISKRA V250D32S, această valoare este [12]:

$$- P_{\max} = 1,2 \text{ W}$$

Ca urmare:

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{\alpha \cdot S_f} = \frac{1,2}{3,24 \cdot 10^{-2}} = 37 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Pentru aceasta,  $\theta_e = \theta_a + \tau_{\max} = 25 + 37 = 62 \text{ [}^\circ\text{C]}$ .

Această temperatură nu are nici o legătură cu temperatura maximă pe care o poate suporta varistorul fără să se degradeze, aceasta fiind între 100 și 300  $^\circ\text{C}$ , în funcție de tipul acestuia. Ea caracterizează numai procesul de disipare al căldurii. Dacă temperatura ambiantă este alta, se modifică și transmisivitatea termică prin convecție și radiație  $\alpha$ , deci nu putem postula aceasta ca valoare limită. Se observă că nu este influențată de coeficientul de utilizare, ea caracterizând numai schimbul termic. Modul în care varistorul ajunge la acea temperatură nu este esențial.

De exemplu, punctul de echilibru stabil E, în cazul în care ne referim la un coeficient de utilizare  $C = 0,82$ , deci tensiune  $U = 320 \text{ Vc.c.}$ , poate avea coordonatele:

- temperatura de 6,8  $^\circ\text{C}$
- puterea  $P_{\text{dis}} = P_{\text{dez}} = U \cdot I = 320 \cdot 7,1 \cdot 10^{-4} = 0,227 \text{ W}$ ;

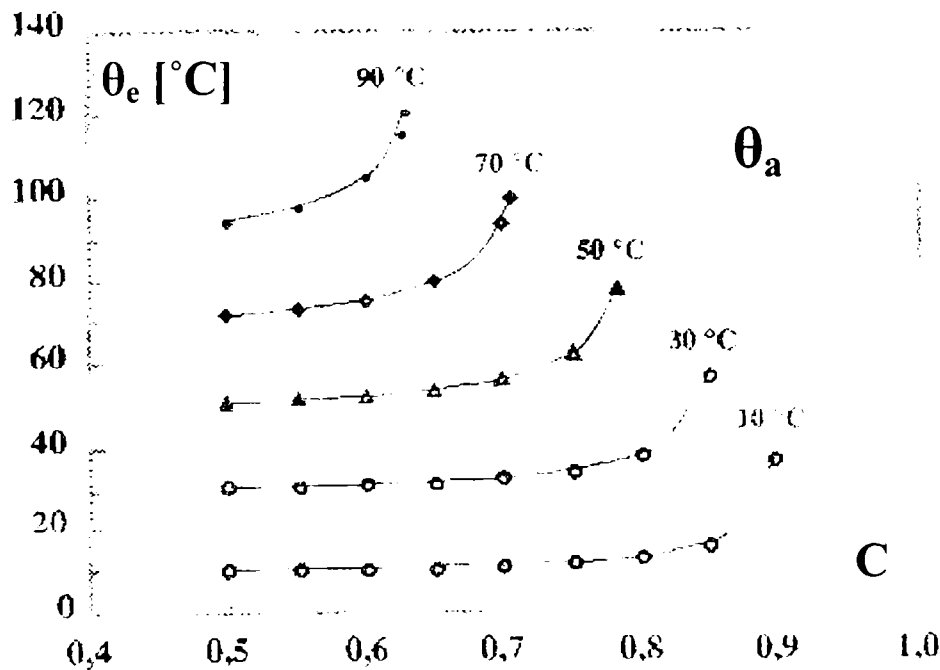
Aceste valori au rezultat experimental.

Dacă se evaluează raportul

$$\tau = \frac{P}{\alpha \cdot S_f} = \frac{0,227}{3,24 \cdot 10^{-2}} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$$

obținem o valoare destul de apropiată de cea reală (de unde tragem concluzia că  $\alpha$  a fost bine ales).

Se pot prezenta în continuare câteva din rezultatele laboratorului "Génie Electrique" din Toulouse [13], [14], [57].



**Figura VI.10: Dependența temperaturii de echilibru stabil  $\theta_e$  a a C și temperatura mediului ambiant  $\theta_a$  gra ic preluat .**

În figura VI.10 se prezintă dependența dintre temperatura de echilibru stabil a unui eșantion de material varistor ( $\theta_e$ ) în funcție de coeficientul de utilizare, determinată pentru mai multe valori ale temperaturii mediului ambiant. Se observă că pentru temperaturi maxime uzuale ale mediului ambiant de 30–50  $^\circ\text{C}$  se poate accepta un coeficient de utilizare de până la 0,8 (în regim nominal).



Chiar dacă pentru trasarea graficului din figura VI.10 s-au utilizat varistoare fabricate la Laboratorul "Génie Electrique" din Toulouse, rezultatele experimentale sunt foarte apropiate de cele obținute de către autor utilizând varistorul **ISKRA V250D32S**.

Dacă se ține cont de posibilitatea apariției unor supratensiuni de energie ridicată sau o creștere a temperaturii mediului ambiant,  $C$  trebuie redus până la valori inferioare lui 0,5.

După cum am mai precizat, tensiunea de prag se alege ca un compromis între nivelul de protecție și coeficientul de utilizare impus de dimensionarea termică, în funcție de domeniul concret al aplicației echipamentului de protecție.

#### VI.4. Soluții tehnice pentru creșterea stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO

Cea mai bună informație privind stabilitatea termică a unui varistor o dă diferența de temperatură  $\Delta\theta_{max} = \theta_i - \theta_e$  între punctele de intersecție ale celor două curbe, care caracterizează echilibrul stabil și instabil și care corespunde încălzirii maxime ce poate fi suportată de varistor în cazul unor impulsuri de supratensiune. Varistorul este cu atât mai stabil termic cu cât  $\Delta\theta_{max}$  este mai mare.

După cum se observă și din figura VI.9, acest lucru poate fi obținut prin:

- Micșorarea temperaturii mediului ambiant. Curba  $P_{dis1}$  se translatează în  $P_{dis2}$  și ecartul de temperatură:

$$\Delta\theta_{max} = \theta_i - \theta_e$$

se va mări, corespunzător, la valoarea:

$$\Delta\theta'_{max} = \theta'_i - \theta'_e, \quad \text{unde} \quad \Delta\theta'_{max} > \Delta\theta_{max}$$

prin aceasta mărindu-se capacitatea de absorbție în energie a varistorului.

Realizarea acestui deziderat se face prin montarea echipamentului în spații lipsite de surse de căldură sau puțin expuse la radiația solară.

- Îmbunătățirea schimbului termic cu exteriorul, puterea disipată  $P_{dis}$  va crește (curba  $P_{dis3}$ ). Acest lucru se face prin îmbunătățirea transmisivității termice globale prin plasarea unor radiatoare. Soluția este aplicată la descărcătoarele pe bază de ZnO care funcționează la medie și înaltă tensiune, unde radiatoarele se găsesc sub forma unor distanțoare metalice introduse în coloana varistoare, între cilindrii varistori. Scopul montării lor este de a corela linia de fugă a descărcătorului (în principiu chiar înălțimea lui) cu înălțimea mai mică a coloanei de varistoare [69], [88]. Ea este foarte puțin aplicată la joasă tensiune.
- Micșorarea puterii produse în varistor, în regim permanent. Practic se poate realiza prin alegerea unei tensiuni de prag mai mari, deci prin micșorarea coeficientului de utilizare  $C$ . Ca urmare, se ridică nivelul de protecție  $N_p$ , deci trebuie ajuns la un compromis pentru obținerea soluției optime.

O altă direcție de soluționare a problemei echilibrului termic constă în stabilirea paralel a unor soluții tehnice de îmbunătățire a transferului termic, așa cum am arătat mai sus și a unor soluții care vizează reducerea temperaturii maxime atinse de varistor.

Așa cum am mai arătat, la trecerea prin varistor a unei impuls de curent  $W$ , procesul fiind adiabatic, întreaga energie  $Q = W$ , disipată prin efect Joule – Lenz rămâne stocată în masa varistorului, producând creșterea temperaturii acestuia,  $\Delta\theta_I$ . Este de dorit ca această creștere să nu conducă la depășirea temperatura limită de echilibru.

Expresia creșterii temperaturii varistorului ca urmare a acumulării căldurii  $Q$  este:

$$W = Q = m_v \cdot c_v \cdot \Delta\theta_I \quad (6.5)$$





Energia impulsului, regăsită în căldura totală stocată  $Q$ , nu poate fi redusă, fiind un parametru care ține de solicitările exterioare. Dimpotrivă, este chiar de dorit ca echipamentul să suporte impulsuri de energie cât mai mare.

Căldura specifică a varistorului  $c_v$  este un parametru asupra căruia nu se poate interveni spectaculos. Este un parametru care rezultă din tehnologia de fabricație și trebuie acceptat ca atare, mai ales că principalul obiectiv al fabricantului este ameliorarea neliniarității caracteristicii  $I(U)$ , obiectiv căruia i se subordonează întreg demersul acestuia, după cum am arătat în Capitolul III. În plus, această problemă care ține de domeniul chimiei și fizicii materialelor, nu face obiectul preocupărilor utilizatorului de varistoare (fabricantul de echipamente de protecție contra supratensiunilor).

Creșterea masei varistorului  $m_v$  este realizabilă în limitele impuse de parametrii electrici, știut fiind că, așa cum am arătat în Capitolul III, înălțimea varistorului este fixată de nivelul de tensiune la care operează. Deci singura soluție viabilă ar fi creșterea diametrului, în limitele impuse de standarde. Soluția nu este întotdeauna justificată economic (prețul de cost al unui varistor tip disc crește o dată cu diametrul și tipul acestuia) și nici nu aduce îmbunătățiri semnificative, căldura rămânând înmagazinată în continuare în masa activă a varistorului.

O primă soluție tehnică, propusă de către autor este montarea în paralel a două varistoare în loc de unul. Soluția este aparent banală și nejustificată din punct de vedere economic. Dar esența soluției propuse constă în cuplarea termică a celor două varistoare prin conducție termică, fapt ce ar duce la egalizarea temperaturilor celor două varistoare și ar conduce la limitarea forțată a curenților prin varistoare.

Relația (6.5) se rescrie:

$$W = Q = (m_{v1} \cdot c_{v1} + m_{v2} \cdot c_{v2}) \cdot \Delta\theta_2 \quad (6.6)$$

Dacă masele celor două varistoare sunt egale  $m_{v1} = m_{v2}$  și căldurile specifice  $c_{v1} = c_{v2}$ , obținem o reducere la jumătate a diferenței de temperatură. Cuplajul termic este esențial, deoarece în lipsa lui, varistorul care are tensiunea de prag cea mai redusă (în situația în care nu sunt identice) va prelua cea mai mare parte din energia șocului, încălzindu-se excesiv. Prin cuplajul termic se încearcă forțarea unei încălziri identice.

Ansamblul se comportă ca și când în locul celor două varistoare ar exista unul singur, cu o masă mai mare, fără a diminua alegerea nivelului de protecție. În Capitolul VIII vor fi prezentate rezultatele experimentale și modelările matematice corespunzătoare.

O altă soluție tehnică propusă de către autor este montarea pe varistor a unor mase adiționale aflate în contact termic cu varistorul. Principiul acestei soluții tehnice este prezentat în figura VI.11.

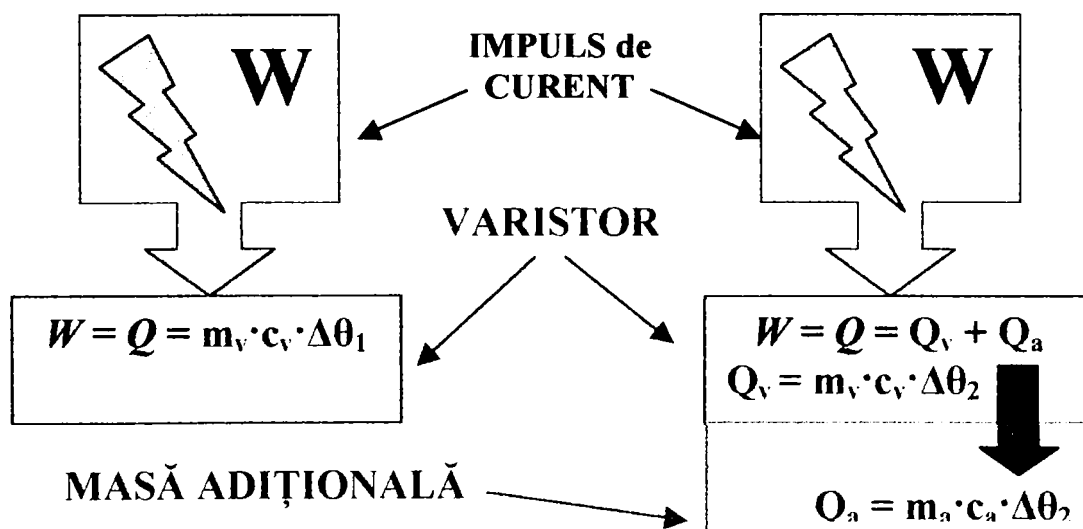


Figura VI.11: Principiul utilizării maselor adiționale.

Principiul utilizării maselor adiționale constă în stocarea căldurii  $Q = W$ , produse în varistor prin efect Joule – Lenz, atât în masa acestuia (fracțiunea  $Q_v = m_v \cdot c_v \cdot \Delta\theta_2$ ) cât și cedarea unei părți către masa adițională (fracțiunea  $Q_a = m_a \cdot c_a \cdot \Delta\theta_2$ ) cuplată termic cu varistorul.



Rezumând:

$$W = Q = Q_v + Q_a = (m_v \cdot c_v + m_a \cdot c_a) \cdot \Delta\theta_2 \quad (6.7)$$

Egalitatea de mai sus este valabilă deoarece:

- Rezistența masei adiționale este cu 4-5 ordine de mărime mai mică decât cea mai mică rezistență a varistorului, ca urmare masa adițională este pasivă, căldura produsă în interiorul ei fiind total neglijabilă, varistorul fiind singura sursă de căldură;
- Difuzivitățile termice (atât a varistorului cât și a masei adiționale cuplate conductiv) sunt suficient de ridicate pentru a vorbi de o încălzire aproape instantanee și uniformă a acestor piese de dimensiuni reduse supuse unor fluxuri termice considerabile; Ca urmare ambele piese vor avea aceeași temperatură, dată de  $\Delta\theta_2$ ;
- Procesul este adiabatic și se aplică principiul conservării energiei;

Se observă că  $\Delta\theta_2$  este mai mic decât  $\Delta\theta_1$  dat de formula (6.5). Masa adițională acționează ca o “pompa de căldură”, preluând instantaneu, prin conducție, (evacuând) o parte din căldura generată în varistor, reducând astfel temperatura acestuia.

Soluția montării de mase adiționale nu trebuie confundată cu soluția montării de radiatoare, chiar dacă în esență sunt asemănătoare.

Radiatorul nu are, în regim tranzitoriu, capacitatea de absorbție rapidă a unei mari cantități de căldură, datorită produsului  $m_a \cdot c_a$  destul de redus, rolul lui fiind doar de a mări suprafața de evacuare a căldurii în regim permanent [57].

Este interesant că, datorită geometriei maselor suplimentare, suprafața de evacuare a căldurii crește (nu atât de mult ca în cazul radiatoarelor). Deci, în regim termic permanent, (în regim de serviciu permanent al echipamentului) aceste mase adiționale pot fi asimilate ca radiatoare, dar cu un efect relativ redus asupra disipării de căldură, reușind să reducă cu câteva grade temperatura varistorului, așa cum vom arăta în Capitolul X. Ele ajută și la disiparea căldurii acumulate după trecerea impulsului, așa cum vom evidenția în Capitolul XI, fără a putea să le numim “radiatoare”.

Montarea radiatoarelor pe varistoare este dificilă, deoarece formele clasice ale radiatoarelor, tip “stea” sunt periculoase în momentul aplicării unor impulsuri violente de tensiune, existând pericole de conturare și amorsare a unor arcuri electrice pe suprafețele evazate (concentratori de câmp electric). Singura variantă fără risc major este cea a unor tuburi metalice cilindrice, de diametru mai mic decât al varistorului, utilizată în cazul descărcătoarelor de medie și înaltă tensiune. Această observație este valabilă și pentru masele adiționale, care se prezintă, în variantele propuse și analizate de către autor, sub forma unor cilindri plini, având diametrul mai mic decât al varistorului.

Materialul utilizat de către autor pentru masele adiționale este alama, având următoarele proprietăți:

- material ieftin;
- ușor de prelucrat;
- bun conductor termic (se va prezenta în secțiunea rezervată descrierii materialelor);
- căldură specifică suficient de mare;
- rezistivitate electrică redusă;
- poate fi sudat cu cositor pe suprafața varistorului;
- parametrii de material sunt bine determinați și cunoscuți;
- se întâlnește și în construcția electrozilor unor echipamente de protecție la supratensiuni.

În continuare se prezintă o soluție tehnică originală, propusă de către autor și care face obiectul unei cereri de brevet de invenție cu titlul “*Varistor cu oxid de zinc cu capacitate mărită de limitare a supratensiunilor*”, care se constituie în depozitul național reglementar 99-00813 din 15.07.1999, fiind în curs de examinare, în termenul legal, la **Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci** din București [17].



Cererea de brevet de invenție se referă la un varistor cu oxid de zinc cu capacitate mărită de limitare a supratensiunilor din rețelele electrice, destinat limitării supratensiunilor de lungă durată sau cu frecvență mare de apariție, indiferent de polaritate și de natura lor, scopul fundamental al acesteia îl constituie eliminarea pericolului distrugerii prin încălzire a varistorului.

Problema tehnică rezolvată de invenție este realizarea unui ansamblu care are la bază un varistor cu oxid de zinc care mărește capacitatea de absorbție și cedare a energiei disipată prin efect electrotermic în masa varistorului.

Varistorul cu oxid de zinc cu capacitate mărită de limitare a supratensiunilor, conform cererii mai sus amintite, elimină dezavantajul menționat anterior prin aceea că, în scopul limitării supratensiunilor de lungă durată sau cu frecvență mare de apariție, este alcătuit dintr-un varistor cu oxid de zinc, de formă inelară, ușor bombat spre interior și doi electrozi metalici cu rol de tampon termic, având o formă bombată spre interior, care sunt lipiți la capetele varistorului printr-un strat subțire de aliaj metalic, spațiul interior al ansamblului fiind ocupat de o rășină electroizolatoare.

Ea prezintă următoarele avantaje:

- Cu aceeași cantitate de amestec de oxizi metalici se poate obține un inel având diametrul unei singure pastile (sau al unui cilindru), deci apare o suprafață de răcire mai mare (transfer termic prin convecție în mediul ambiant);
- Forma inelară este mai adecvată în comparație cu forma cilindrică plină, deoarece în regim de impuls (având fundamentala de mare frecvență), se manifestă efectul pelicular, curentul electric fiind refulat spre exterior, zona centrală a cilindrului contribuind în măsură redusă la conducția electrică;
- Electrozii metalici asigură un câmp electric uniform și constituie un tampon termic având o capacitate calorică mare, absorbind în regim tranzitoriu o cantitate mare de căldură, menținând varistorul la o temperatură care să nu ducă la o ambalare termică, creând o disponibilitate mărită de a limita în felul acesta supratensiunile de lungă durată sau cu frecvență mare de apariție;
- Forma bombată înspre interior a varistorului și a electrozilor contribuie la uniformizarea temperaturii în interiorul ansamblului, deci la un mai rapid transfer al căldurii în mediul ambiant;
- Ansamblul este conceput pentru o utilizare modulară, la diverse nivele de tensiune.

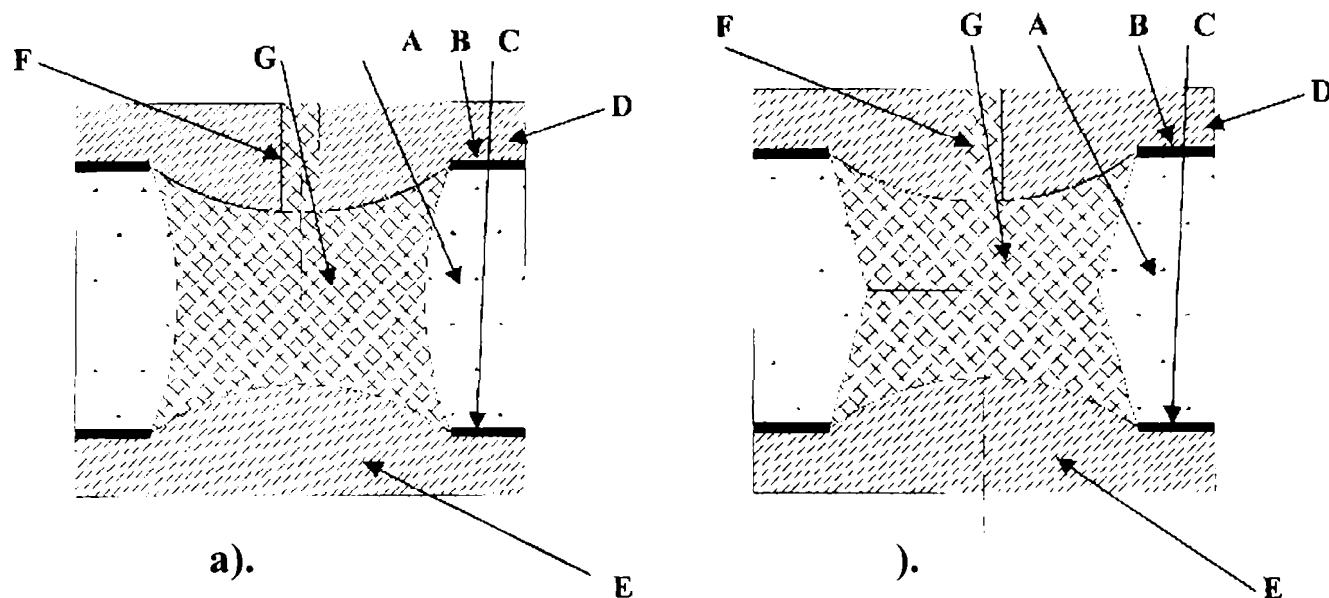
Se dau în continuare două exemple de realizare a invenției, în legătură și cu figurile VI.12.a și VI.12.b, care reprezintă:

- Fig.VI.12.a: Varistor cu oxid de zinc cu capacitate mărită de limitare a supratensiunilor, conform invenției, secțiune transversală prin varianta constructivă 1.
- Fig.VI.12.b: Varistor cu oxid de zinc cu capacitate mărită de limitare a supratensiunilor, conform invenției, secțiune transversală prin varianta constructivă 2.

Varistorul cu oxid de zinc cu capacitate mărită de limitare a supratensiunilor, conform exemplelor de realizare a invenției, constă dintr-un varistor cu oxid de zinc propriu-zis (A), de formă inelară, pe fața interioară fiind ușor bombat. La extremitățile acestui varistor (A) se aplică două straturi subțiri și uniforme de cositor sau alt aliaj cu proprietăți asemănătoare, (B) și (C). Peste aceste straturi se montează doi electrozi metalici (D) și (E), din alamă sau alt aliaj cu proprietăți corespunzătoare. Electrozii (D) și (E) sunt și ei bombați înspre interior. Electroful (D) are aplicat un canal (F) prin care se poate injecta o rășină izolantă (G), care va umple spațiul interior al ansamblului, de exemplu poliuretan sau rășină epoxidică.

Ansamblul se montează între electrozii principali ai dispozitivului tip DRV sau modul de protecție la joasă tensiune, fiind un sistem modular, prin înscrierea mai multor module de grosime mărită, dispozitivul tip DRV poate funcționa și la tensiuni mai mari.

Forma bombată a varistorului (A) asigură o mai uniformă repartiție a temperaturii în interiorul ansamblului (fapt demonstrat în urma realizării unei modelări numerice pe calculator). Se propun două variante constructive, având ca formă a secțiunii feței interioare un arc de cerc conform figurii VI.12.a, respectiv două segmente de dreaptă, conform figurii VI.12.b, mai ușor de realizat decât prima din punct de vedere tehnologic.



**Figura VI.12: Varistor cu oxid de zinc cu capacitate mărită de limitare a supratensiunilor. Secțiuni prin două variante constructive.**

Indiferent de varianta constructivă, aceste ansambluri varistor + masă adițională asigură menținerea temperaturii materialului varistor la o valoare mai mică decât în varianta funcționării fără masa adițională.

## VI.5. Concluzii

În acest capitol s-a analizat noțiunea de stabilitate termică a unui varistor pe bază de ZnO.

S-a ajuns la concluzia că studiul echilibrului termic al unui varistor trebuie făcut în toate regimurile sale de funcționare, pericolul ambalării termice putând apărea oricând. În consecință, s-a evidențiat echilibrul termic stabil, în regim de serviciu permanent, dar și echilibrul instabil, corespunzător regimului de serviciu de avarie (impuls).

Depășirea stării de echilibru termic stabil, în regim de serviciu permanent se face ca urmare a creșterii tensiunii de alimentare sau a temperaturii mediului ambiant.

Depășirea stării de echilibru termic instabil, în regim de serviciu de avarie (impuls) este cauzată de creșterea temperaturii varistorului ca urmare a înmagazinării de căldură în masa acestuia.

Întreg studiul a fost efectuat cu date concrete, pe un varistor de joasă tensiune.

## VI.6. Contribuțiile personale și originale

Dintre cele mai importante contribuții personale ale autorului, în acest capitol, amintim:

- definirea noțiunilor de echilibru termic stabil și instabil, utilizând date concrete;
- conceperea și realizarea unor experimente concludente care să evidențieze aceste aspecte;
- determinarea coeficientului de utilizare critic în funcție de temperatura ambiantă, pentru un varistor de joasă tensiune;
- desprinderea unor concluzii legate de stabilitatea termică a varistoarelor pe bază de ZnO;
- propunerea unor soluții tehnice de îmbunătățire a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO, în primul rând cele care vizează funcționarea în paralel a varistoarelor însoțită de cuplajul termic și cea care vizează utilizarea maselor adiționale (aceste soluții tehnice vor fi analizate în continuare);
- propunerea unei soluții tehnice originale, care face obiectul unei cereri de brevet de invenție, privind ameliorarea stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO.





## CAPITOLUL VII

### Modelarea numerică a transferului termic prin metoda elementelor finite, utilizând pachetul CAD FLUX 2D

În ultimii ani au apărut pe piața mondială nenumărate aplicații software care vin în sprijinul inginerilor, în scopul de a realiza modelarea diverselor procese mecanice, termice, electromagnetice, pentru a asigura proiectarea optimă a produselor vizate sau pentru a asigura controlul, testarea virtuală precum și diagnosticul acestor produse.

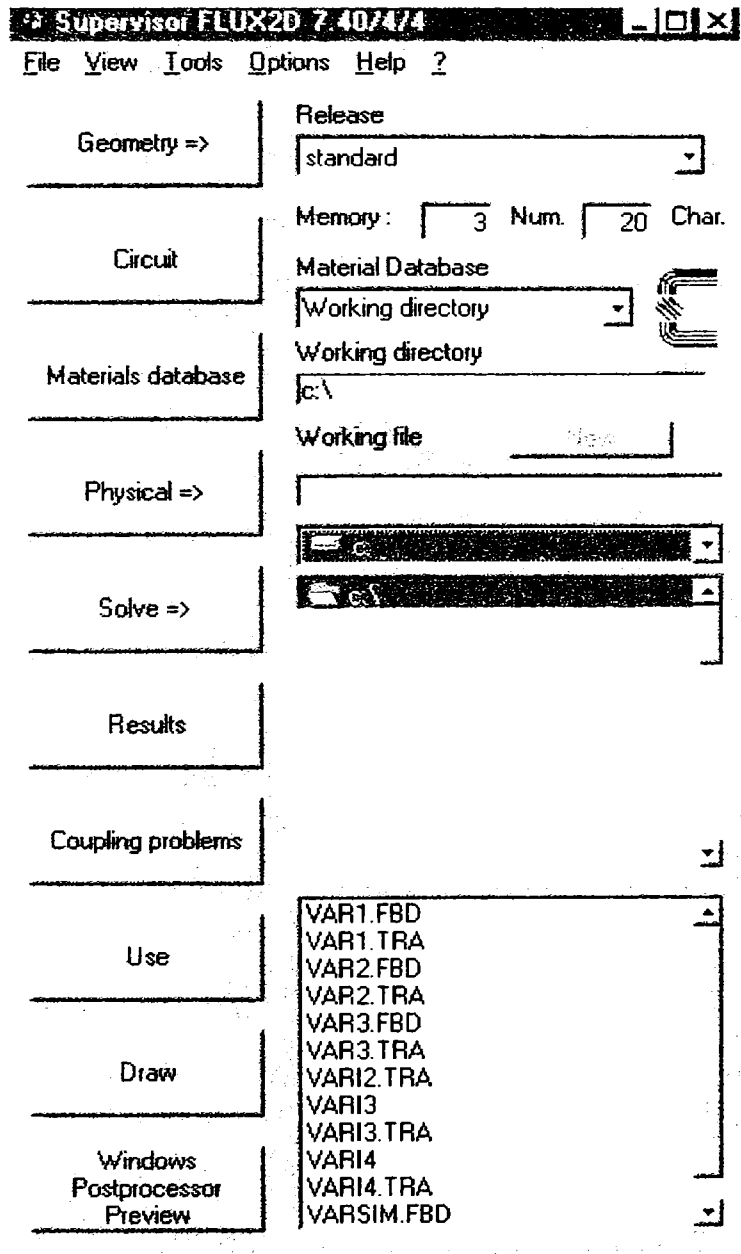


Figura VII.1: Fereastra principală de control a FLUX 2D 7.40.

Putem spune, fără a exagera, că etapa de modelare și simulare virtuală, alături de proiectarea CAD, reprezintă pași obligatorii în realizarea unui produs competitiv, cu costuri minime și fiabilitate sporită, știut fiind că este mult mai ieftin să testezi virtual nenumărate variante ale aceluiași produs. Modelarea numerică are avantaje evidente și în cazul proceselor greu sau imposibil de monitorizat, din industria electronică, aerospațială sau nucleară.

Datorită performanțelor tehnicii de calcul actuale, aplicațiile care vizează modelarea numerică pot fi rulate chiar pe calculatoare personale, reducând astfel costurile etapei de proiectare virtuală.

Din multitudinea de produse software care utilizează metoda elementelor finite, pentru modelarea transferului termic în situația varistoarelor pe bază de ZnO, s-a utilizat mediul de programare FLUX 2D.

Mediul software FLUX 2D, produs de către firma franceză CEDRAT [51], [52], împreună cu alte câteva laboratoare franceze, asociate C.N.R.S. este un pachet de programe destinate a facilita modelarea pe baza metodei elementelor finite. Este utilizabil în aplicații bidimensionale care vizează probleme de câmp electric, magnetic și termic.

Laboratorul de Aparate Electrice al Facultății de Electrotehnică din Timișoara dispune sub licență de exploatare, de varianta FLUX 2D 7.40, (4.4), din 1999, a acestui utilitar software.

Acest mediu de programare este recomandabil, din punct de vedere al raportului preț – calitate, fiind printre cele mai performante existente pe piață. El este destinat în primul rând inginerilor electrotehnici și electroniști.

Nu voi insista asupra modelului matematic pe baza căruia operează acest software, el fiind identic cu cel descris anterior, ci doar asupra utilizării procedurilor din acest program și a prezentării problemelor concrete.





## VII.1. Algoritm de utilizare al FLUX 2D

Așa cum se observă și din figura VII.1, FLUX 2D oferă proceduri separate pentru fiecare din etapele rezolvării problemei, de la trasarea geometriei, descrierea materialelor implicate, stabilirea condițiilor de frontieră, a condițiilor inițiale, până la rezolvarea problemei și interpretarea rezultatelor [73], [74].

În cele ce urmează vom prezenta schema logică a algoritmului utilizat în rezolvarea unor probleme specifice transferului termic în cazul varistoarelor pe bază de ZnO, adaptat procedurilor FLUX 2D:

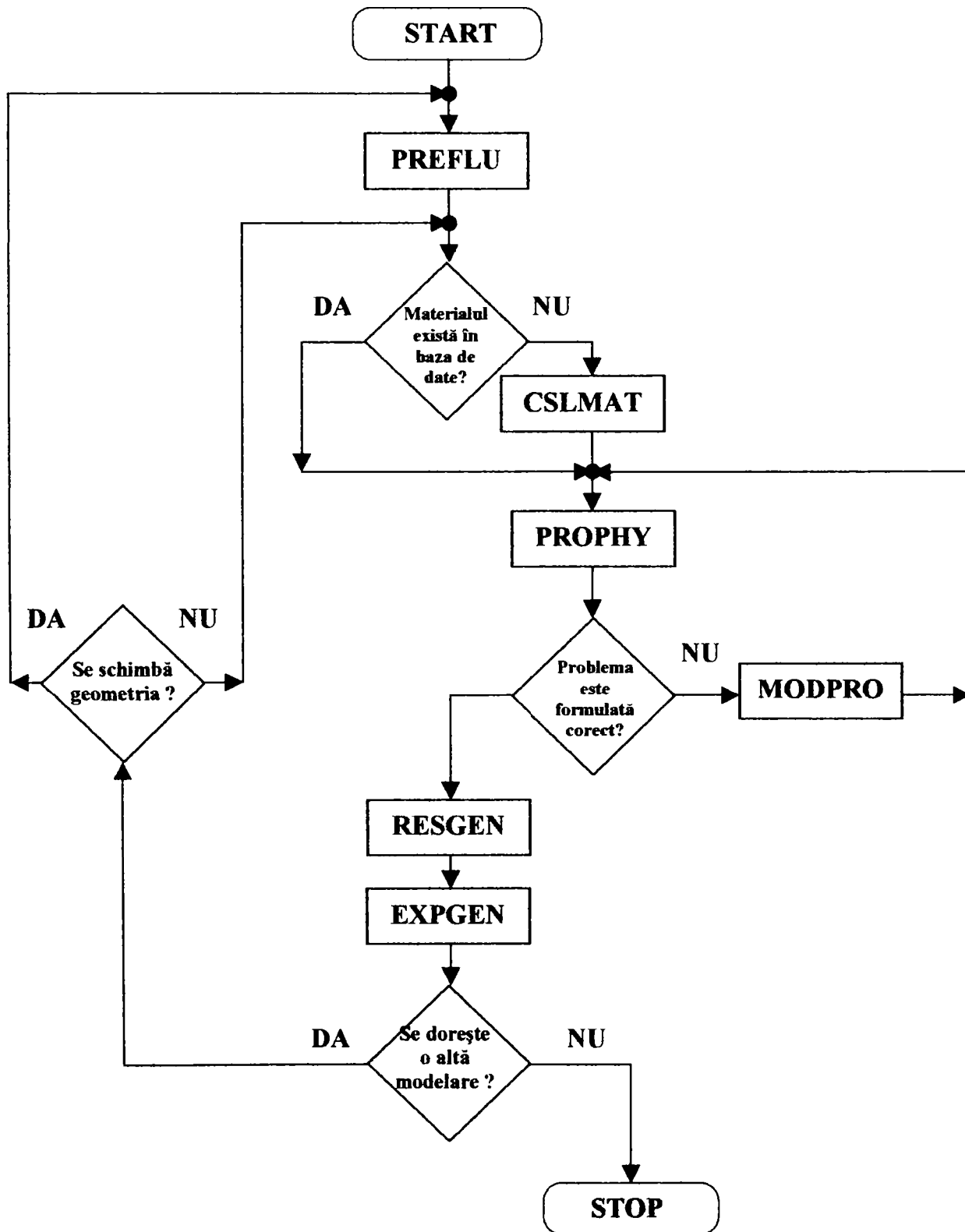


Figura VII.2: Schema logică a algoritmului de utilizare al FLUX 2D.



Procedurile standard ale **FLUX 2D** [73], [74] sunt:

- **PREFLU** - se trasează geometria pieselor analizate și se face discretizarea domeniilor obținute în elemente finite;
- **CSLMAT** - se creează baza de date privind proprietățile materialelor utilizate;
- **PROPHY** - se descrie problema fizică (se atribuie proprietăți domeniilor, se introduc condițiile inițiale și la limită etc.);
- **MODPRO** - permite modificări ale datelor problemei în timpul rulării programului;
- **RESGEN** - rezolvă problema conform preciziei dorite;
- **EXPGEN** - furnizează rezultatele analizei conform solicitării utilizatorului.

Nu vom insista prea mult asupra fiecărei proceduri, ci mai ales asupra datelor concrete introduse pentru modelările efectuate.

## VII.2. Aspecte legate de geometria pieselor utilizate

Algoritmul de utilizare al procedurii **PREFLU** este prezentat în figura VII.3, sub forma unei scheme logice:

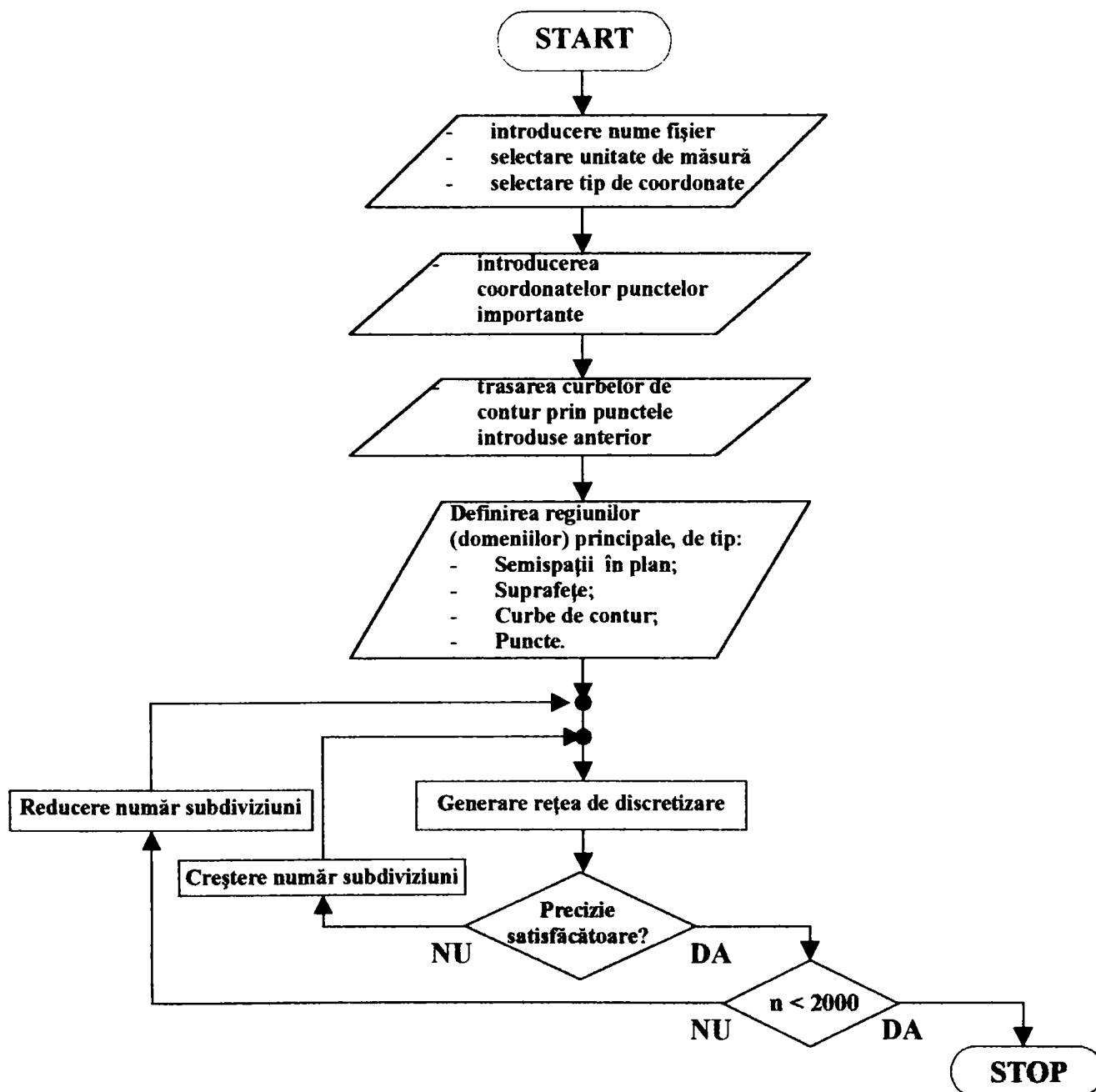


Figura VII.3: Schema logică pentru procedura PREFLU.



Numărul de noduri ale rețelei de elemente finite este limitat la 2000, deci acest aspect trebuie luat în considerare pentru fiecare geometrie propusă.

Pentru a putea exemplifica modul de utilizare al procedurii **PREFLU** și mai ales rezultatele obținute în urma utilizării acesteia, vom prezenta configurațiile care vor fi avute în vedere în analiza stabilității termice, atât în regim de serviciu permanent, cât și în regim de serviciu de impuls.

Configurațiile propuse și analizate sunt în număr de 8 și sunt denumite:

- **A, B, C, D, E** - cele care au la bază varistoare tip **ISKRA V250D32S**;
- **M, N, P** - cele care au la bază varistoare tip **ISKRA V420D32S**;

S-a preferat utilizarea unor varistoare procurate de pe piață, în dauna celor fabricate în laborator, primele având o calitate mai bună și parametrii mult mai bine determinați.

Din considerente de simetrie cilindrică, modelările pot fi efectuate într-o semisețiune a fiecărui ansamblu, modelarea bidimensională fiind recomandată.

### VII.2.1. Configurația A

Are la bază un varistor tip **ISKRA V250D32S**, parametrii acestuia fiind descriși în subcapitolul VI.2. Configurația este cea mai simplă posibilă, fiind alcătuită doar din varistorul propriu-zis.

Dimensiunile geometrice precum și secțiunea în care se efectuează modelarea sunt prezentate în figura VII.4:

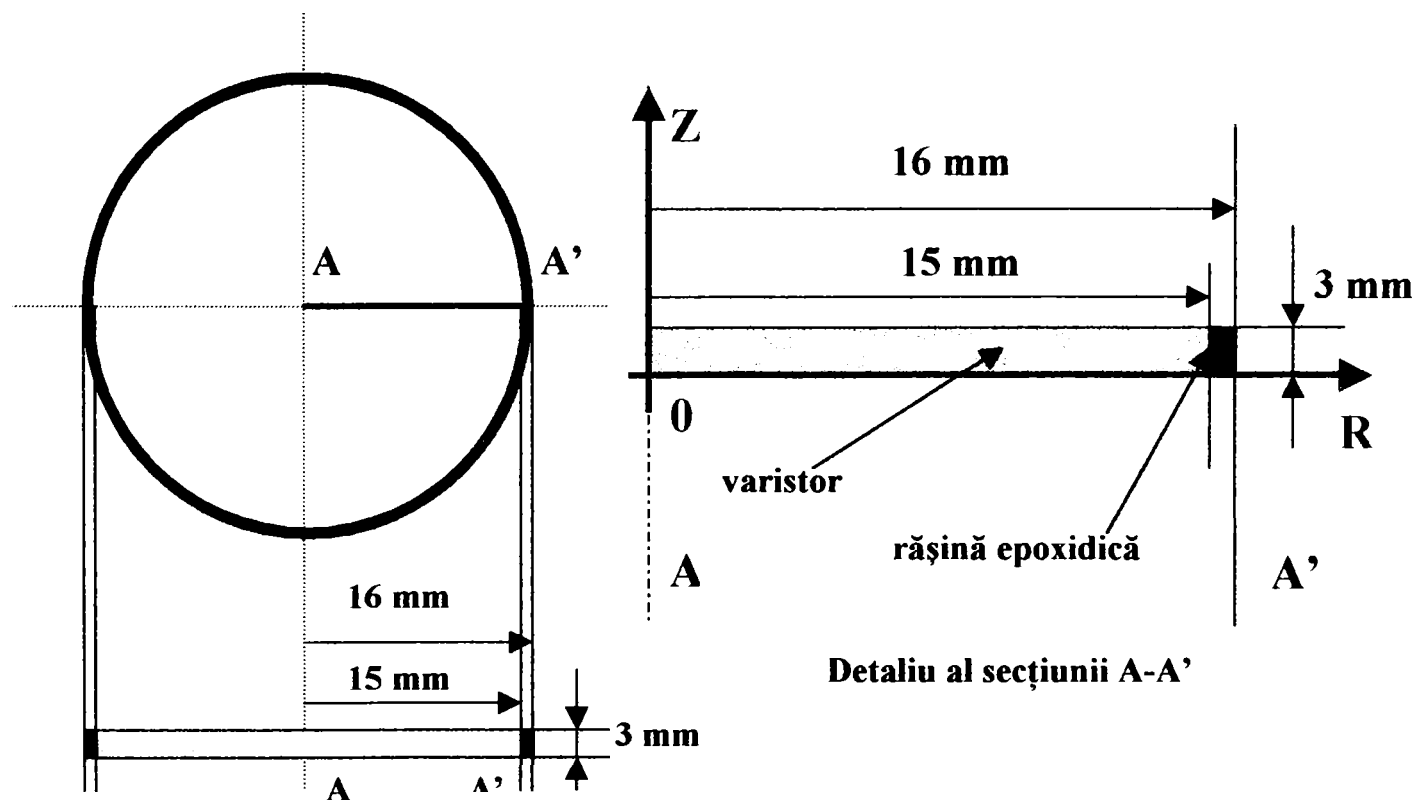


Figura VII.4: Configurația A. Detaliu al secțiunii considerate.

Diametrul varistorului este de cca. 32 mm, miezul varistorului având 30 mm în diametru. Varistorul este înconjurat de un inel de rășină epoxidică, cu o grosime de cca. 1 mm, care are rolul de a evita fenomenele de conturare în cazul aplicării unui impuls. Rășina epoxidică este întărită la cald. Parametrii fizico-chimici ai celor două materiale vor fi prezentați ulterior.

Înălțimea discului varistor este de cca. 3 mm, ea fiind dată de tensiunea nominală și cea de prag. Pe fețele superioară și inferioară, varistorul este acoperit cu un strat de metalizare (Ag într-un solvent organic), cu rolul de a reduce rezistența electrică de contact. Grosimea lui este cu 3 ordine de mărime mai mică decât cea a varistorului și, având și proprietăți termice asemănătoare cu cele ale mediului varistor, poate fi total neglijat.



Varistorul este asamblat în echipament fie între electrozi prevăzuți cu resorturi de comprimare, fie prin intermediul unor fire de legătură. Se va considera varianta cea mai întâlnită la joasă tensiune, anume racordarea prin fire de legătură, de masă și influență neglijabilă.

Datorită simetriei cilindrice, în jurul axei  $OZ$ , constatăm că modelarea transferului termic poate fi făcută numai în secțiunea  $A-A'$ , concluziile putând fi generalizate prin extrapolare. Mai mult chiar, din punct de vedere matematic, modelarea poate fi realizată numai pe jumătatea superioară a secțiunii  $A-A'$ . Am preferat modelarea pe întreaga secțiune din considerente de simplificare a condițiilor la limită și mai ales în ipoteza în care vom prezenta și modelarea transferului termic al ansamblului varistor + masă adițională, conform configurațiilor **B,C,D** dispuse asimetric, pe partea superioară.

S-au introdus punctele de coordonate  $(0,0)$ ;  $(15,0)$ ;  $(16,0)$ ;  $(16,3)$ ;  $(15,3)$ ;  $(0,3)$ .

Subdomeniile de discretizare corespund materialelor (varistor – roșu, rășină epoxidică - albastru). Domeniile de frontieră sunt cele două fețe ale varistorului precum și frontiera dintre izolația de rășină și aer.

Rețeaua de discretizare a secțiunii considerate este prezentată în figura VII.5:



**Figura VII.5: Rețeaua de discretizare cu elemente finite pentru configurația A.**

Rețeaua generată conține 1943 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 906 în interiorul domeniilor
- 115 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);

## VII.2.2. Configurația B

Are la bază tot un varistor tip **ISKRA V250D32S**, parametrii acestuia fiind descriși în subcapitolul VI.2.

Soluția constructivă **B**, care are dimensiunile prezentate în figura VII.6. are în plus un cilindru de alamă cu diametrul de 20 mm și înălțimea de 5 mm, lipit pe fața superioară a varistorului.

Simetria cilindrică se menține și, ca urmare, geometria pe care se va efectua modelarea fiind secțiunea  $A - A'$ .

Geometric, punctele extreme ale domeniilor sunt, în coordonate cilindrice **R-Z**:  $(0,0)$ ;  $(0,3)$ ;  $(15,0)$ ;  $(15,3)$ ;  $(16,0)$ ;  $(16,3)$ ;  $(0,8)$ ;  $(10,8)$ ;  $(10,3)$ .

Subdomeniile de discretizare corespund materialelor considerate:

- varistor – (colorat în roșu);
- rășină epoxidică – (colorat în albastru);
- alamă (colorat în galben);

Domeniile de frontieră sunt:

- frontiera alamă – aer;
- porțiunea rămasă în contact cu aerul de pe fața superioară a varistorului;
- frontiera rășină epoxidică – aer;
- fața inferioară a varistorului;
- frontiera varistor - alamă;
- frontiera varistor – rășină epoxidică;

Rețeaua de discretizare a secțiunii considerate este prezentată în figura VII.7:

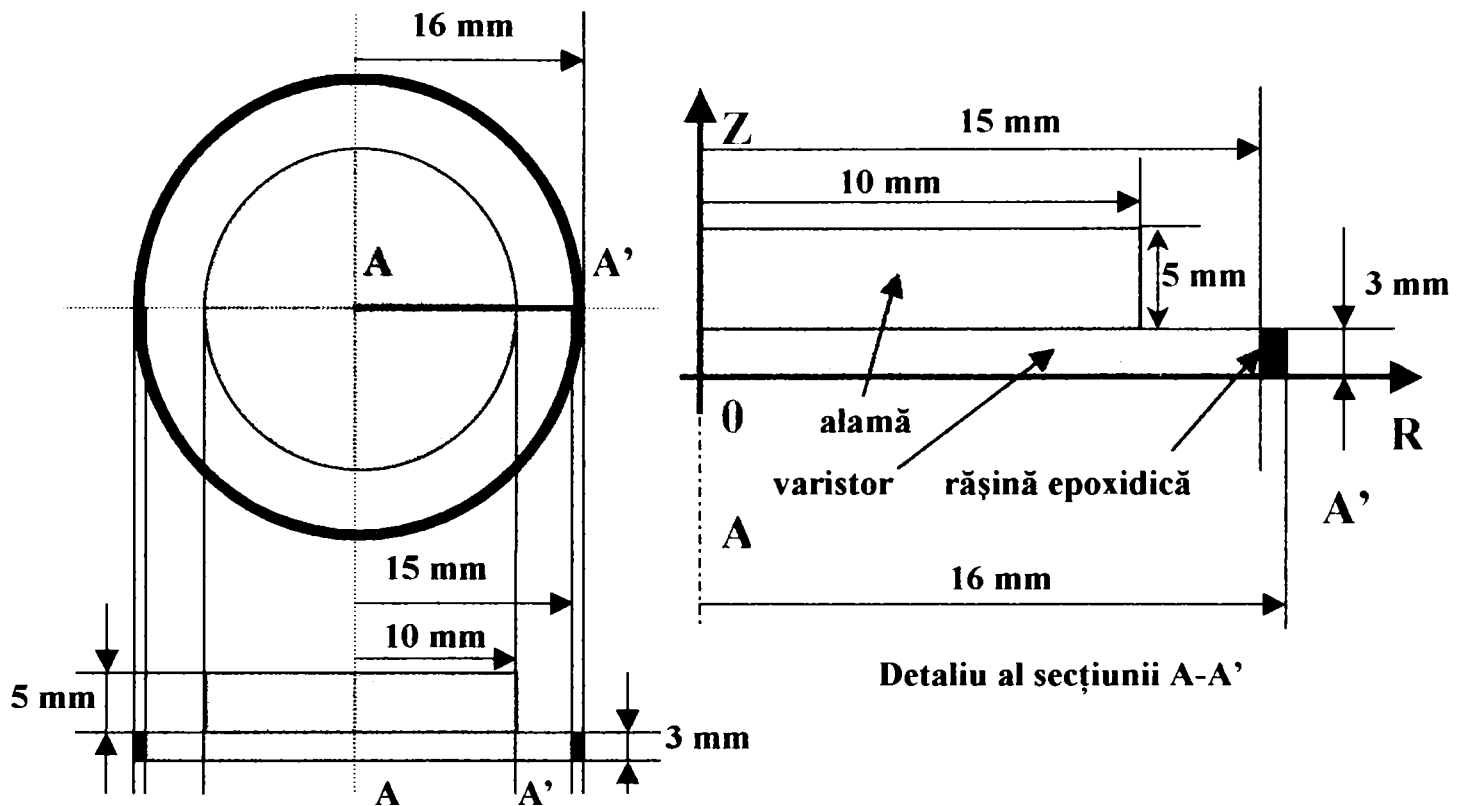


Figura VII.6: Configurația B. Detaliu al secțiunii considerate.

Rețeaua generată conține 1983 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 928 în interiorul domeniilor
- 104 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);

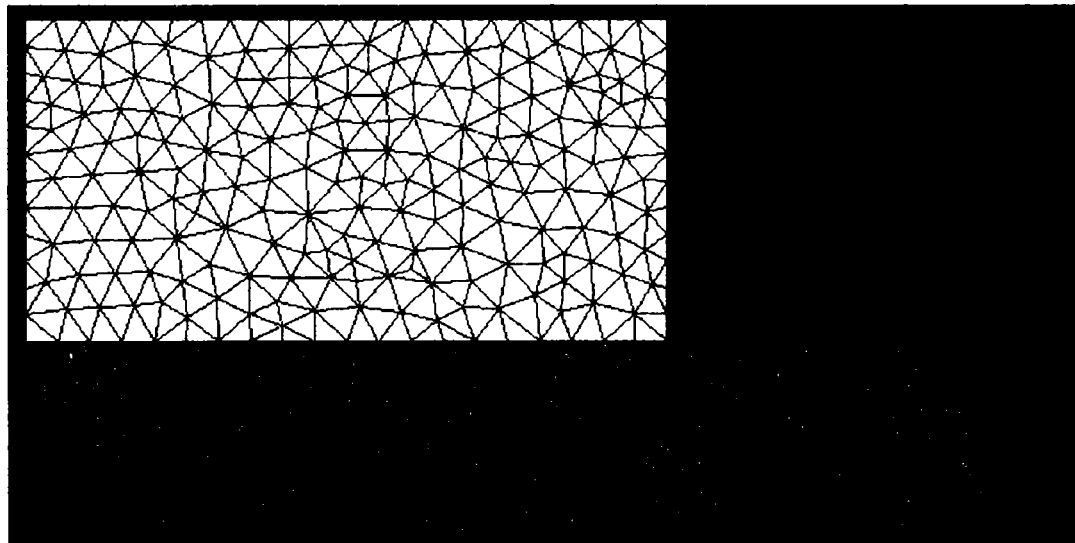


Figura VII.7: Rețeaua de discretizare cu elemente finite pentru configurația B.

### VII.2.3. Configurația C

Are la bază tot un varistor tip ISKRA V250D32S, parametrii acestuia fiind descriși în subcapitolul VI.2.

Soluția constructivă C, care are dimensiunile prezentate în figura VII.8. are un cilindru de alamă cu diametrul de 30 mm și înălțimea de 5 mm, lipit pe fața superioară a varistorului pe care o acoperă integral.





Simetria cilindrică se menține și, ca urmare, geometria pe care se va efectua modelarea fiind secțiunea  $A - A'$ .

Geometric, punctele extreme ale domeniilor sunt, în coordonate cilindrice  $R-Z$ :  $(0,0)$ ;  $(0,3)$ ;  $(15,0)$ ;  $(15,3)$ ;  $(16,0)$ ;  $(16,3)$ ;  $(0,8)$ ;  $(15,8)$ .

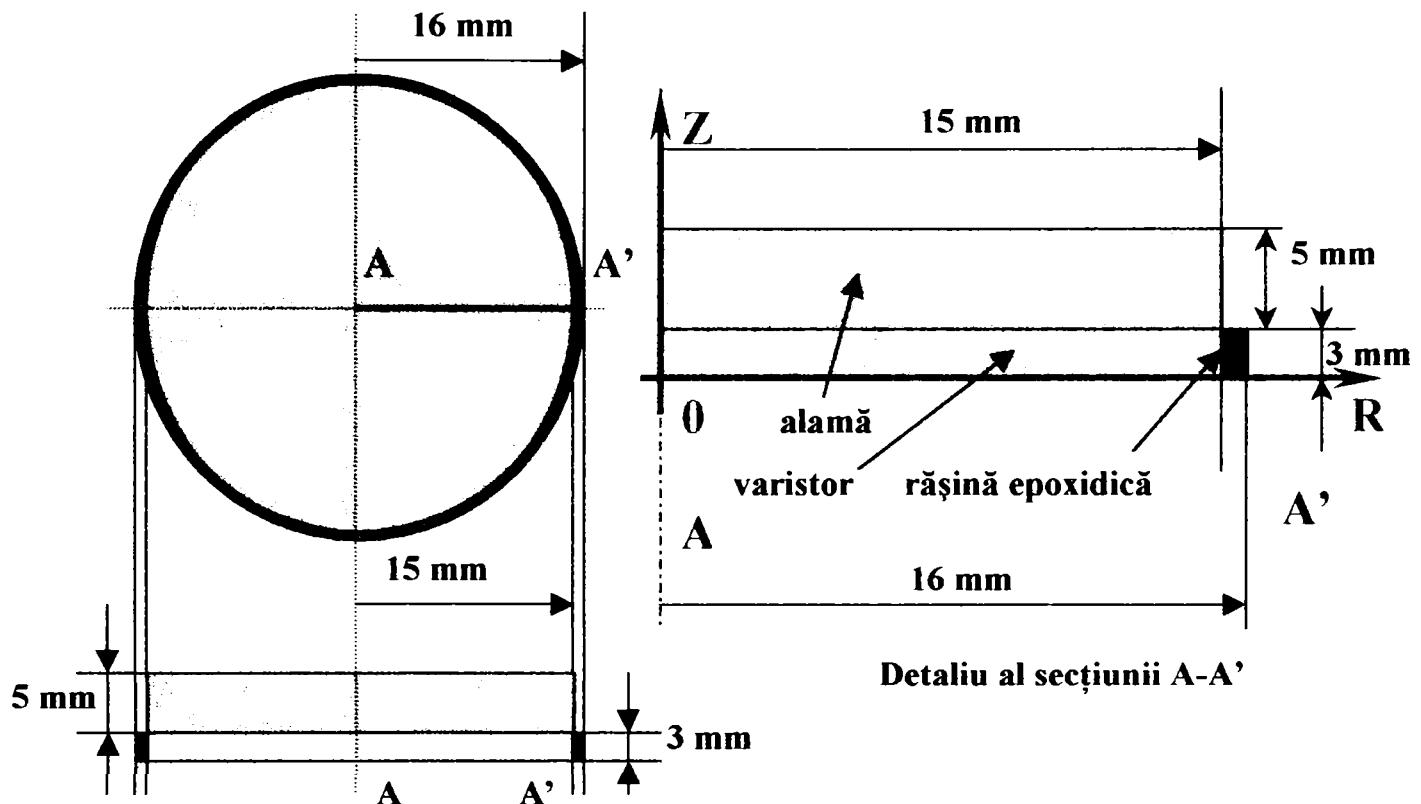


Figura VII.8: Configurația C. Detaliu al secțiunii considerate.

Subdomeniile considerate sunt tot aceleași, cu precizarea că acum cilindrul de alamă are un diametru mai mare. Ca domenii de frontieră, remarcăm, față de varianta anterioară, lipsa porțiunii de contact varistor - aer, acesta din urmă acoperind complet varistorul.

Rețeaua de discretizare cu elemente finite este prezentată în figura VII.9.

Conține 1943 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 918 în interiorul domeniilor
- 87 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);

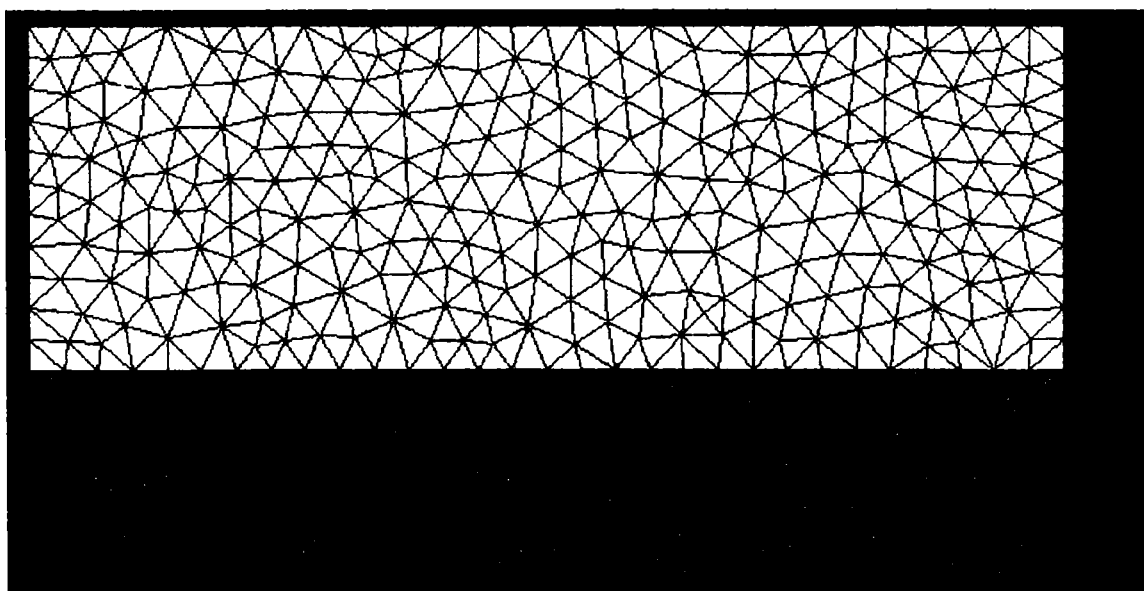


Figura VII. 9: Rețeaua de discretizare cu elemente finite pentru configurația C.



## VII.2.4. Configurația D

Are la bază tot un varistor tip **ISKRA V250D32S**, parametrii acestuia fiind descriși în subcapitolul VI.2.

Soluția constructivă **D**, care are dimensiunile prezentate în figura VII.10. are un cilindru de alamă cu diametrul de 20 mm și înălțimea de 10 mm, lipit pe fața superioară a varistorului.

Simetria cilindrică se menține și, ca urmare, geometria pe care se va efectua modelarea fiind secțiunea  $A - A'$ .

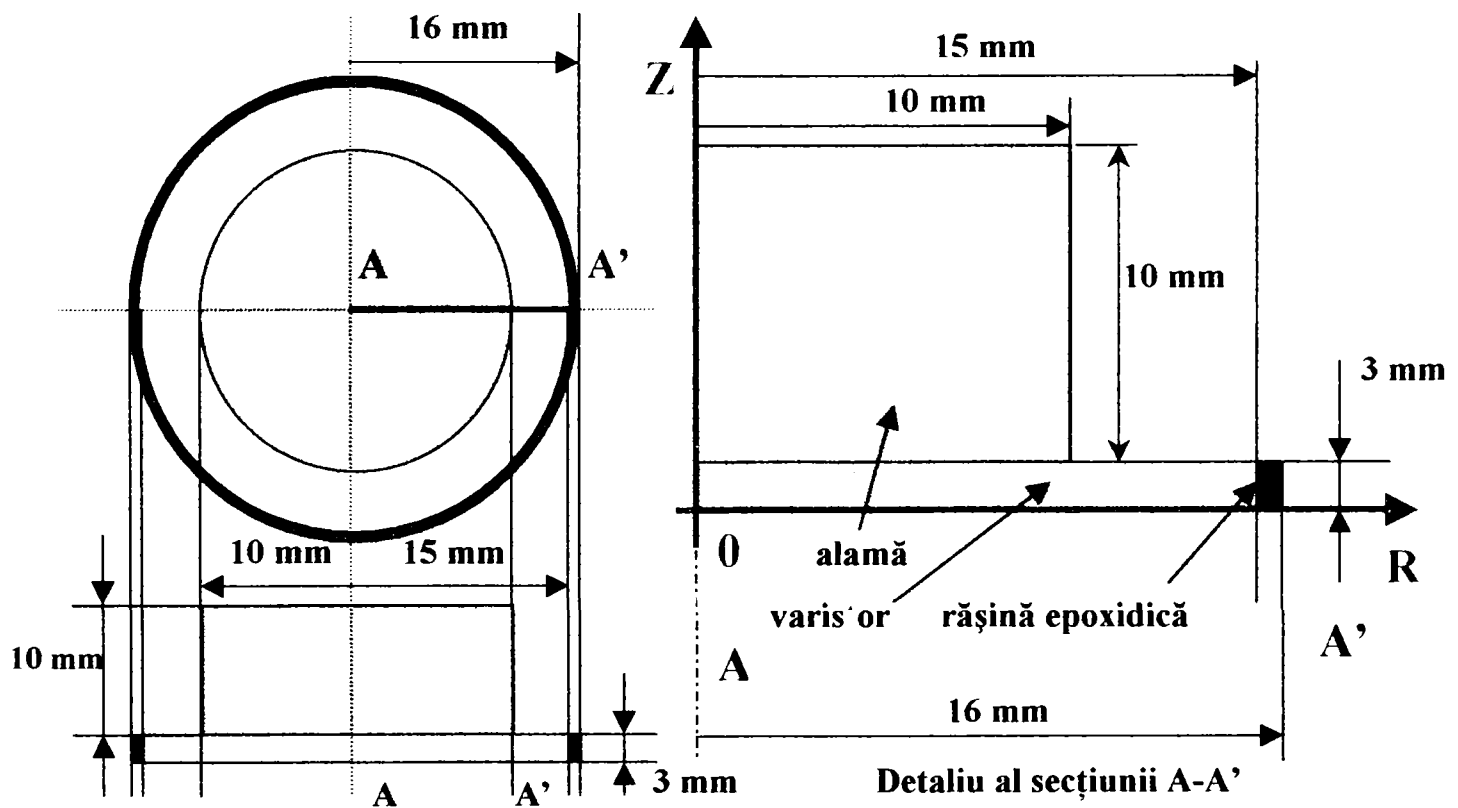


Figura VII.10: Configurația D. Detaliu al secțiunii considerate.

Geometric, punctele extreme ale domeniilor sunt, în coordonate cilindrice  $R-Z$ :  $(0,0)$ ;  $(0,3)$ ;  $(15,0)$ ;  $(15,3)$ ;  $(16,0)$ ;  $(16,3)$ ;  $(0,13)$ ;  $(10,13)$ ;  $(10,3)$ .

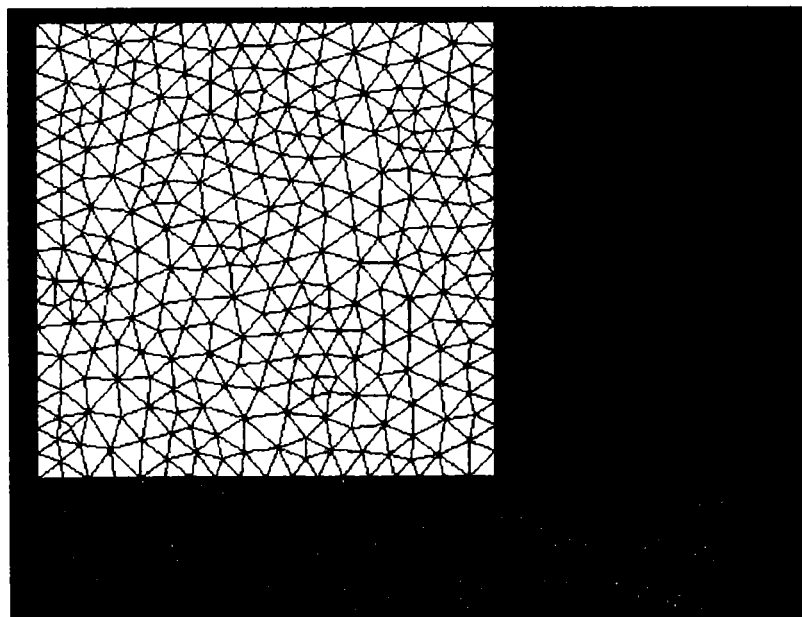


Figura VII.11: Rețeaua de discretizare cu elemente finite pentru configurația D.



Subdomeniile considerate sunt tot aceleași, cu precizarea că acum cilindrul de alamă are o înălțime mai mare decât în configurația B. Ca domenii de frontieră remarcăm aceleași curbe (suprafețe) ca și în configurația B.

Rețeaua de discretizare cu elemente finite este prezentată în figura VII.11.

Conține 1944 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 913 în interiorul domeniilor
- 91 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);

### VII.2.5. Configurația E

Are la bază tot un varistor tip **ISKRA V250D32S**, parametrii acestuia fiind descriși în subcapitolul VI.2.

Soluția constructivă E, care are dimensiunile prezentate în figura VII.12. are doi cilindri (două discuri) de alamă cu diametrul de 30 mm și înălțimea de 5 mm fiecare, lipiți simetric pe fața superioară și inferioară a varistorului.

Simetria cilindrică se menține și, ca urmare, geometria pe care se va efectua modelarea fiind secțiunea A - A'.

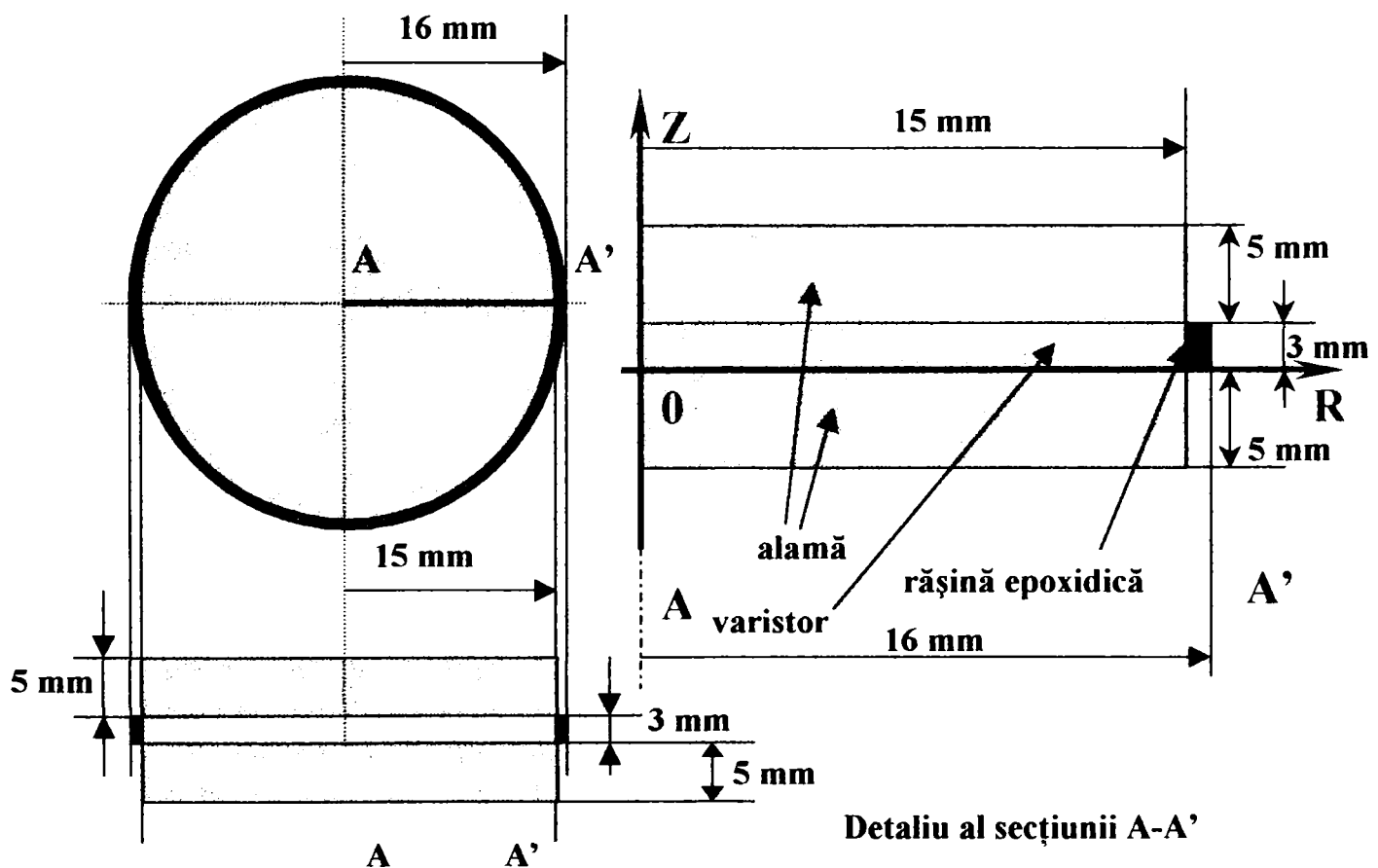


Figura VII.12: Configurația E. Detaliu al secțiunii considerate.

Subdomeniile considerate sunt tot aceleași, cu precizarea că acum există doi cilindri de alamă cu aceleași dimensiuni ca în configurația C. Ca domenii de frontieră remarcăm aceleași curbe (suprafețe) ca și în configurația C, cu precizarea că de data aceasta mediul varistor nu mai e în contact direct cu aerul și apare încă o frontieră între varistor și cilindrul de alamă inferior.

Punctele esențiale ale conturului sunt (0,0); (0,3); (0,-5); (0,8); (10,0); (10,3); (10,-5); (10,8); (15,3); (16,3); (15,0); (16,0).

Rețeaua de discretizare cu elemente finite este prezentată în figura VII.13.

Conține 1983 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 928 în interiorul domeniilor
- 98 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);

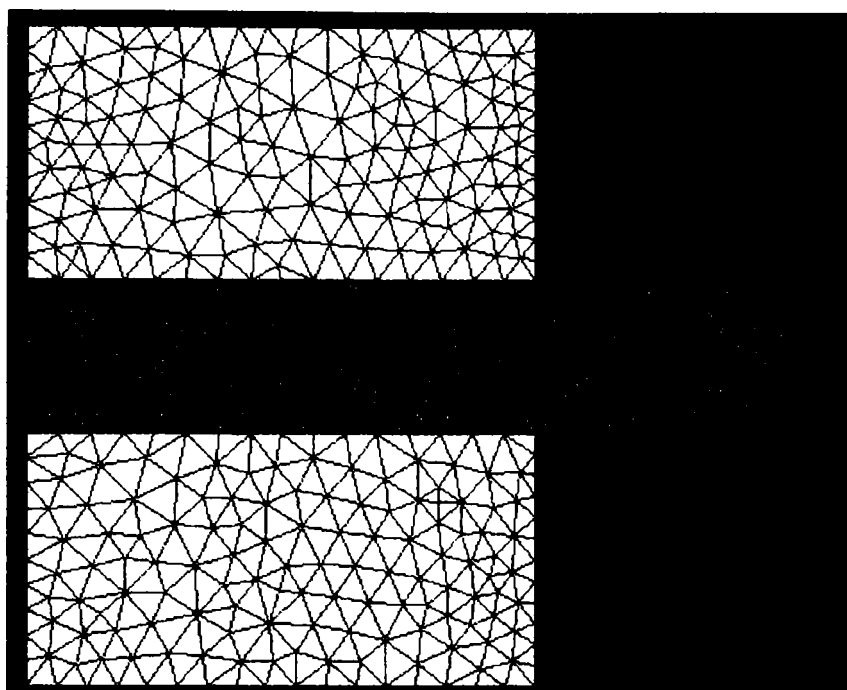


Figura VII.13: Rețeaua de discretizare cu elemente finite pentru configurația E.

### VII.2.6. Configurația M

Are la bază un varistor tip **ISKRA V420D32S**.

Configurația este cea mai simplă posibilă, fiind alcătuită doar din varistorul propriu-zis.

Dimensiunile geometrice precum și secțiunea în care se efectuează modelarea sunt prezentate în figura VII.4:

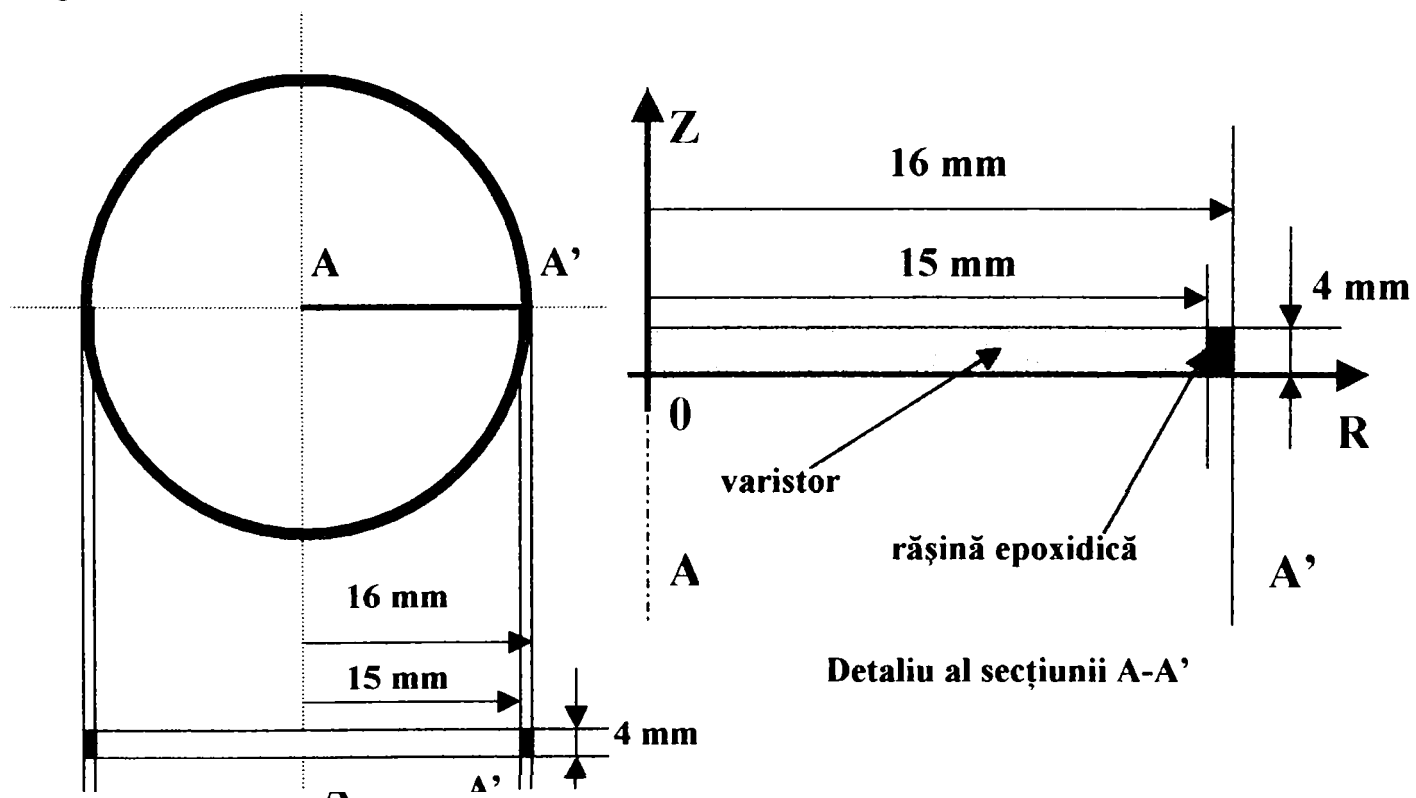


Figura VII.14: Configurația A. Detaliu al secțiunii considerate.

Simetria cilindrică se menține și, ca urmare, geometria pe care se va efectua modelarea fiind secțiunea  $A - A'$ .

Subdomeniile sunt definite la fel ca și în cazul variantei A.



Varistorul are același diametru ca și **ISKRA V250D32S** (fac parte din aceeași serie). Înălțimea diferă, fiind de 4 mm.

S-au introdus punctele de coordonate (0,0); (15,0); (16,0); (16,4); (15,4); (0,4).

Datele de catalog ale acestuia sunt [79]:

|                      |              |
|----------------------|--------------|
| $U_{RMS}$            | = 420 V      |
| $U_{DC}$             | = 560 V      |
| $P_{max}$            | = 1,2 W      |
| $I_{max}(8/20\mu s)$ | = 25000 A    |
| $W_{max}(2ms)$       | = 615 J      |
| $U_N$                | = 680 V      |
| $\Delta U_N$         | = $\pm 10\%$ |
| $U_C$                | = 1120 V     |
| $I_n$                | = 200 A      |
| $C$                  | = 1300 pF.   |

Notațiile sunt cele standardizate, definite în Cap. II.6.

Rețeaua de discretizare cu elemente finite este prezentată în figura VII.15.

Conține 1959 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 920 în interiorul domeniilor
- 108 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);

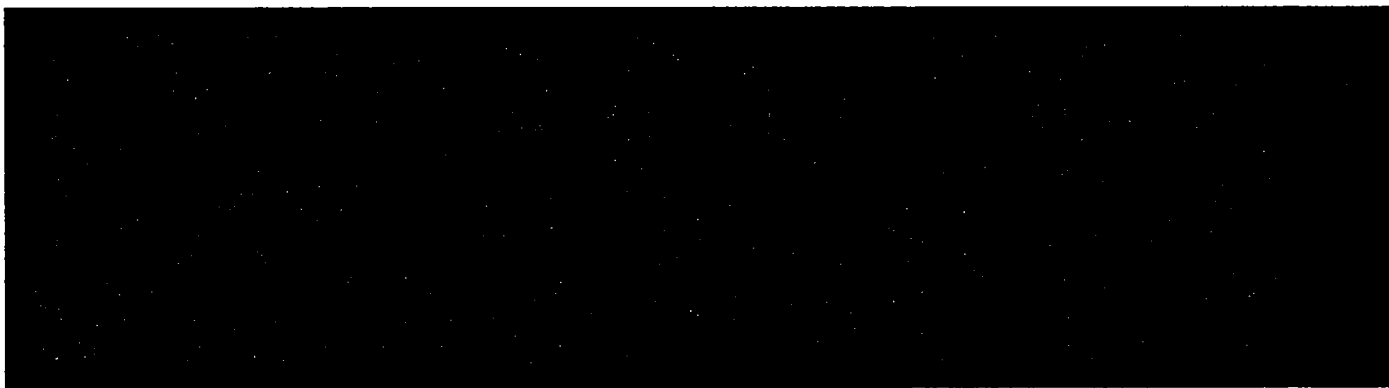


Figura VII.15: Rețeaua de discretizare cu elemente finite pentru configurația M.

### VII.2.7. Configurația N

Are la bază tot un varistor tip **ISKRA V420D32S**.

Parametrii acestui varistor au fost descriși mai sus.

Soluția constructivă N, care are dimensiunile prezentate în figura VII.16., are în plus față de varianta M un cilindru de alamă cu diametrul de 20 mm și înălțimea de 5 mm, lipit pe fața superioară a varistorului. Este asemănătoare cu configurația B, cu precizarea că varistorul este mai gros (4 mm).

Simetria cilindrică se menține și, ca urmare, geometria pe care se va efectua modelarea fiind secțiunea A - A'.

Geometric, punctele extreme ale domeniilor sunt, în coordonate cilindrice R-Z: (0,0); (0,4); (15,0); (15,4); (16,0); (16,4); (0,9); (10,9); (10,4).

Subdomeniile de discretizare sunt similare celor din configurația B. La fel și domeniile de frontieră.

Rețeaua de discretizare a secțiunii considerate este prezentată în figura VII.17:

Conține 1959 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 920 în interiorul domeniilor
- 108 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);



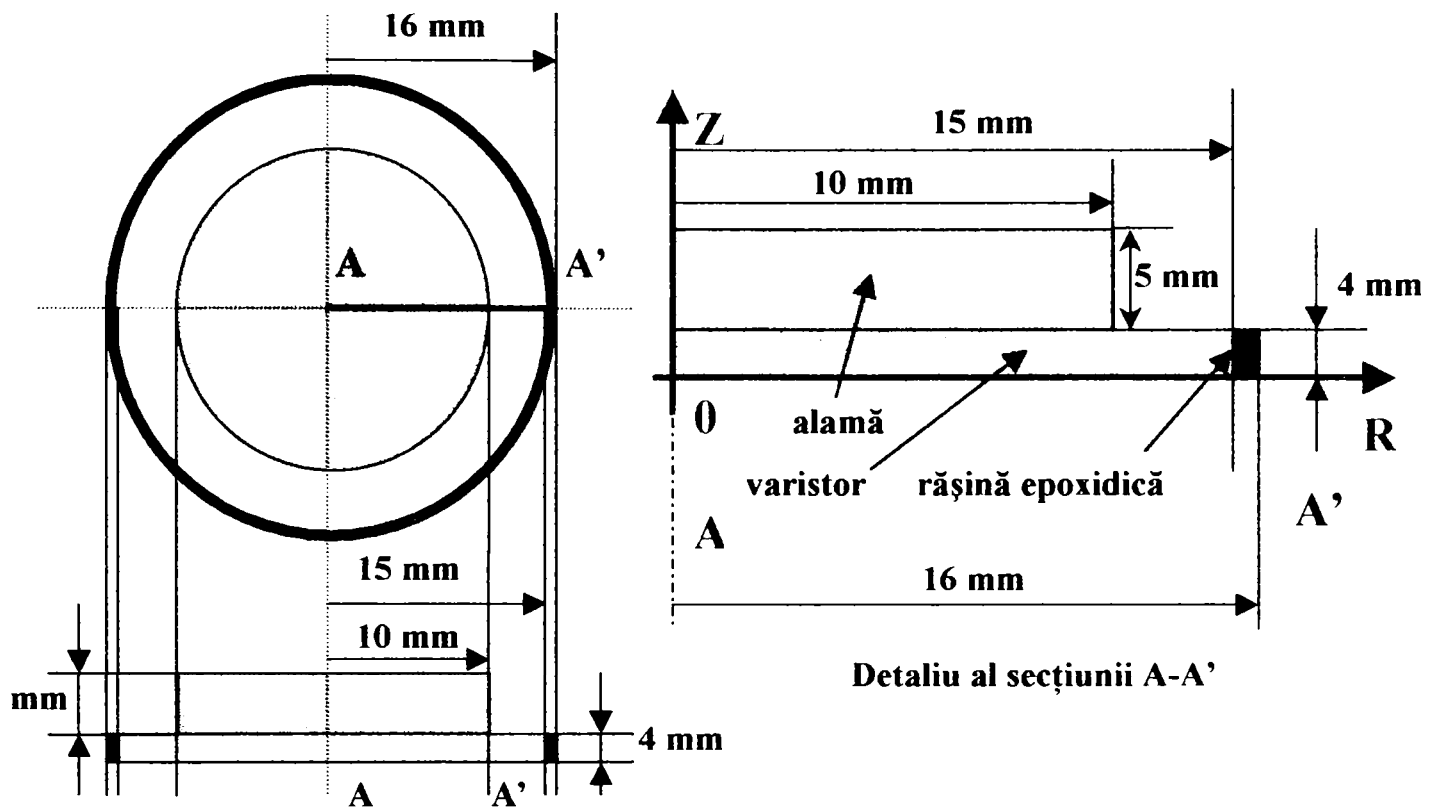


Figura VII.16: Configurația N. Detaliu al secțiunii considerate.

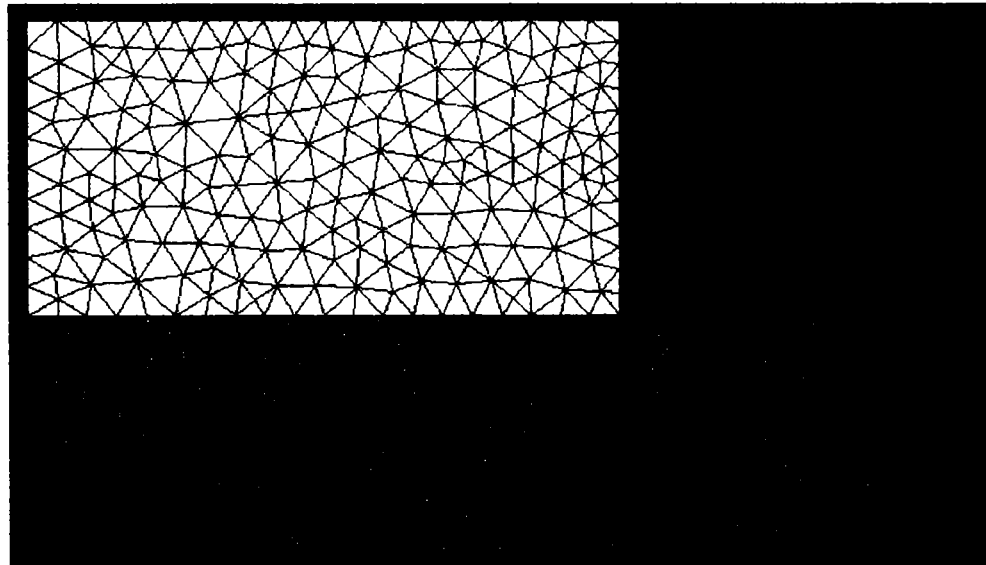


Figura VII.17: Rețeaua de discretizare cu elemente finite pentru configurația N.

### VII.2.8. Configurația P

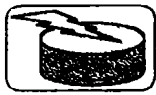
Are la bază tot un varistor tip **ISKRA V420D32S**.

Parametrii acestui varistor au fost descriși mai sus.

Soluția constructivă N, care are dimensiunile prezentate în figura VII.18., are în plus față de varianta M un cilindru de alamă cu diametrul de 20 mm și înălțimea de 10 mm, lipit pe fața superioară a varistorului. Este asemănătoare cu configurația D, cu precizarea că varistorul este mai gros (4 mm).

Simetria cilindrică se menține și, ca urmare, geometria pe care se va efectua modelarea fiind secțiunea A - A'.

Geometric, punctele extreme ale domeniilor sunt, în coordonate cilindrice **R-Z**: (0,0); (0,4); (15,0); (15,4); (16,0); (16,4); (0,14); (10,14); (10,4).



Subdomeniile de discretizare sunt similare celor din configurația D. La fel și domeniile de frontieră.

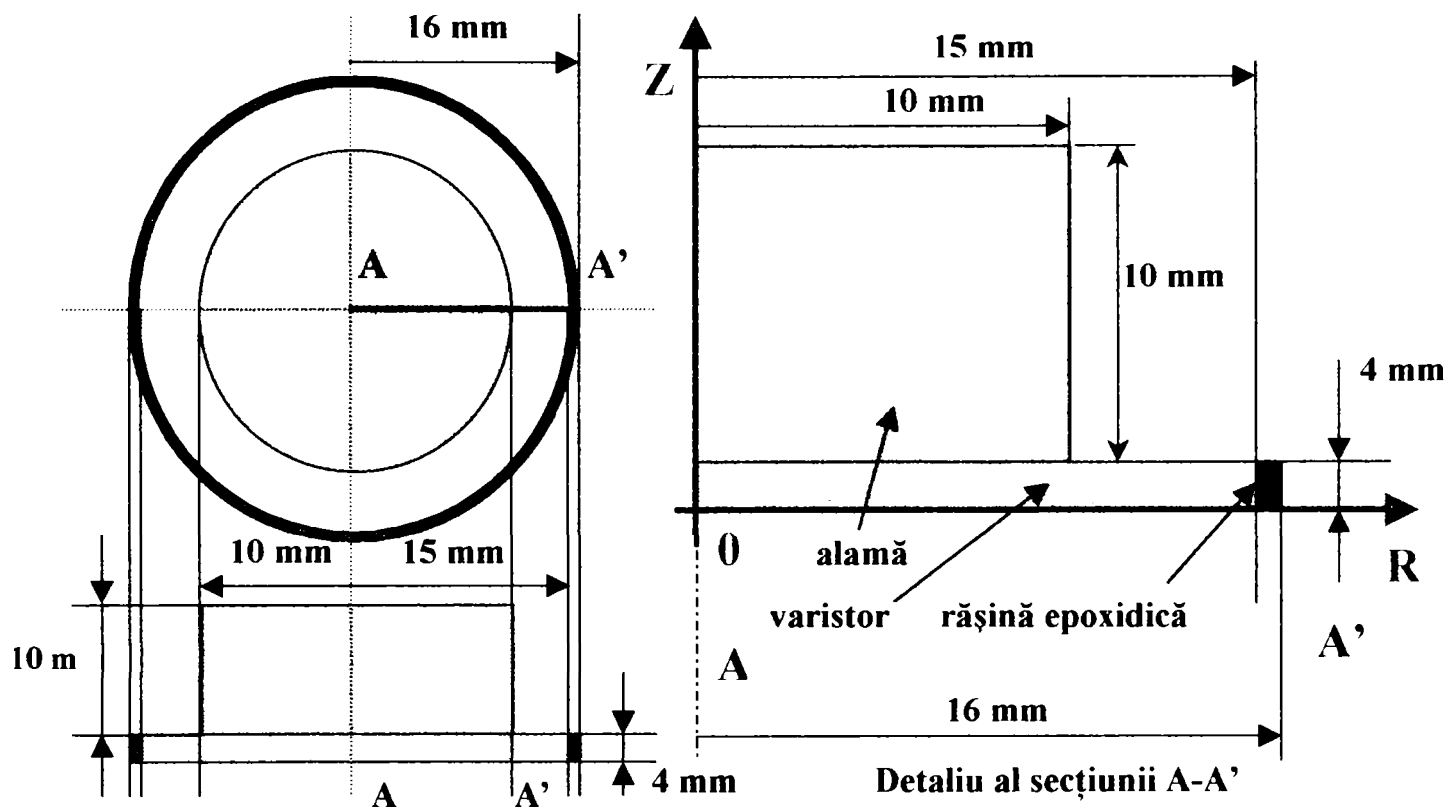


Figura VII.18: Configurația D. Detaliu al secțiunii considerate.

Singura deosebire față de configurația D este grosimea varistorului (4 mm).  
Rețeaua de discretizare a secțiunii considerate este prezentată în figura VII.19:

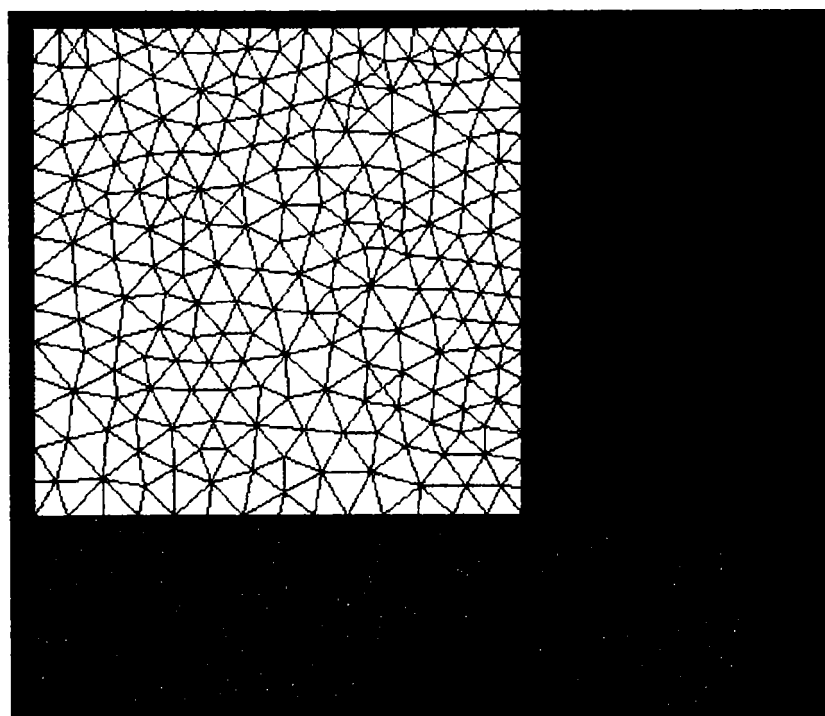


Figura VII.19: Rețeaua de discretizare cu elemente finite pentru configurația N.

Conține 1993 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 934 în interiorul domeniilor
- 100 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);



### VII.3. Baza de date cu proprietățile materialelor utilizate

Următoarea etapă în implementarea metodei elementelor finite cu ajutorul **FLUX 2D** o constituie stabilirea bazei de date cu materialele utilizate ("Materials database").

Așa cum am mai spus, în unele configurații (**A**, **M**) nu operăm decât cu două materiale, anume materialul varistor și rășina epoxidică. Pentru configurațiile cu mase adiționale (**B**, **C**, **D**, **E**, **N**, **P**) vom considera suplimentar parametrii alamei.

Parametrii de material corespunzători vor fi atribuiți fiecărui domeniu de studiu în parte.

Parametrii care prezintă interes din punct de vedere al modelării sunt:

- conductivitatea termică ( $\lambda$ ), în  $[\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$ , introdusă în program prin variabila "*iso K*";
- coeficientul de schimb al căldurii prin radiație ( $\varepsilon_r$ ), adimensional, variabila "*Rad R*";
- transmisivitatea termică prin convecție ( $\alpha_c$ ) în  $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$ , variabila "*Conv R*";
- căldura specifică volumică ( $c_v$ ), în  $[\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})]$ , variabila "*RoCp*".

Relația ei de definire este:  $c_v = \rho \cdot c_m$ ,

unde  $\rho$  este densitatea masică, în  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ;

$c_m$  reprezintă căldura specifică masică, în  $[\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$ .

Pe lângă simpla declarare a lor, **FLUX 2D** admite și declararea legii de variație a fiecăruia dintre aceștia în funcție de temperatură, de regulă variația fiind acceptată ca liniară [51], [52].

Căldura specifică a materialului este importantă doar în ipoteza studiului de regim tranzitoriu.

#### VII.3.1. Materialul varistor

Pentru mediul *varistor* parametrii termici cei mai importanți sunt [13], [16]:

- **conductivitatea termică** ( $\lambda$ ), are valoarea [13], [16]:

$$\lambda = 0,0136 [\text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})],$$

ceea ce conduce, efectuând transformările de rigoare ( $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$ ,  $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$ ) la

$$\text{iso K} = 5,692 \text{ în } [\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$$

Apreciem că nu avem o variație semnificativă a conductivității termice în funcție de temperatură pe intervalul luat în calcul ( $20^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ ).

- **coeficientul de schimb al căldurii prin radiație** ( $\varepsilon_r$ ), are valoarea [13], [16], [24]:

$$\varepsilon_r = 0,85 [\text{adimensional}],$$

evident, fără a opera nici o transformare

$$\text{Rad R} = \varepsilon_r = 0,85 [\text{adimensional}]$$

Materialul varistor este într-adevăr cenușiu și poros, cu multe rugozități. Chiar acoperit cu stratul de Ag al electrozilor, valoarea coeficientului de radiație nu se modifică semnificativ. Variația în funcție de temperatură a acestui coeficient este neglijabilă.

- **coeficientul de schimb al căldurii prin convecție** ( $\alpha$ ), denumit și transmisivitate termică prin convecție are valoarea [13], [24]:

$$\text{- la } 0^\circ\text{C} \quad \alpha_c = 9 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})];$$

$$\text{- la } 40^\circ\text{C} \quad \alpha_c = 15 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})];$$



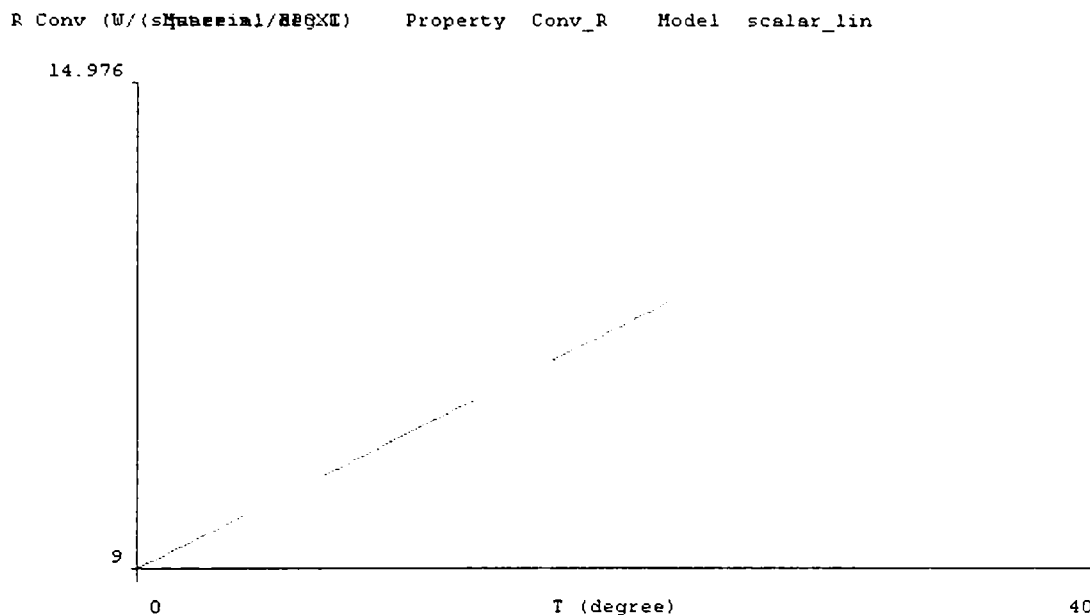
Între aceste valori apreciem o variație liniară a transmisivității termice prin convecție, care conduce la legea de variație:

$$\alpha_c = 9 \cdot (1 + 0.0166 \cdot \theta) \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}, \theta \text{ fiind temperatura în [°C]}$$

și în acest caz nu este necesar să operăm vreo transformare, deci:

$$\text{Conv } R = \alpha_c = 9 \cdot (1 + 0.0166 \cdot \theta) \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}, \theta \text{ fiind temperatura în [°C]}$$

Legea de variație în funcție de temperatură a transmisivității termice, pentru materialul varistor, este prezentată în figura VII.20:



**Figura VII.20: Legea de variație în funcție de temperatură a transmisivității termice prin convecție pentru materialul varistor și pentru rășina epoxidică.**

Putem face observația că în cazul majorității echipamentelor de protecție cu varistoare pe bază de ZnO destinate a funcționa la joasă tensiune, convecția este naturală, existând o ușoară ventilație naturală, aparatele fiind în general realizate în variantă necapsulată. Cum aceste echipamente funcționează în general în interior, temperatura ambiantă este în jurul a 20 °C.

- **căldura specifică volumică ( $c_v$ )** intervine doar în procesele termice tranzitorii [13], [16]. Pentru a o defini, pornim de la căldura specifică masică  $c_m$ :

- la 0 °C s-a determinat[2]:  $c_m = 0,15 \text{ [cal/(g} \cdot \text{°C)]}$ ;

- la 200 °C s-a determinat[2]:  $c_m = 0,4 \text{ [cal/(g} \cdot \text{°C)]}$ ;

Între cele două valori s-a apreciat o variație liniară a căldurii specifice.

Având în vedere că relația ei de definire este:  $c_v = \rho \cdot c_m$ ,

unde  $\rho$  este densitatea masică, în  $[\text{kg/m}^3]$ ;

$c_m$  reprezintă căldura specifică masică, în  $[\text{J/(kg} \cdot \text{°C)]}$ .

Vom obține, în urma calculelor, legea de variație a căldurii specifice volumice:

$$c_v = 3,516 \cdot 10^6 \cdot (1 + 8,33 \cdot 10^{-3} \cdot \theta), \text{ [J/(m}^3 \cdot \text{°C)]}, \theta \text{ fiind temperatura în [°C]}.$$

S-au utilizat valoarea densității masice a mediului varistor [2], anume

$$\rho = 5600 \text{ [kg/m}^3\text{]}, \text{ valoarea determinată de autor fiind [3]}$$

$$\rho = 5660 \text{ [kg/m}^3\text{]}, \text{ precum și transformarea}$$

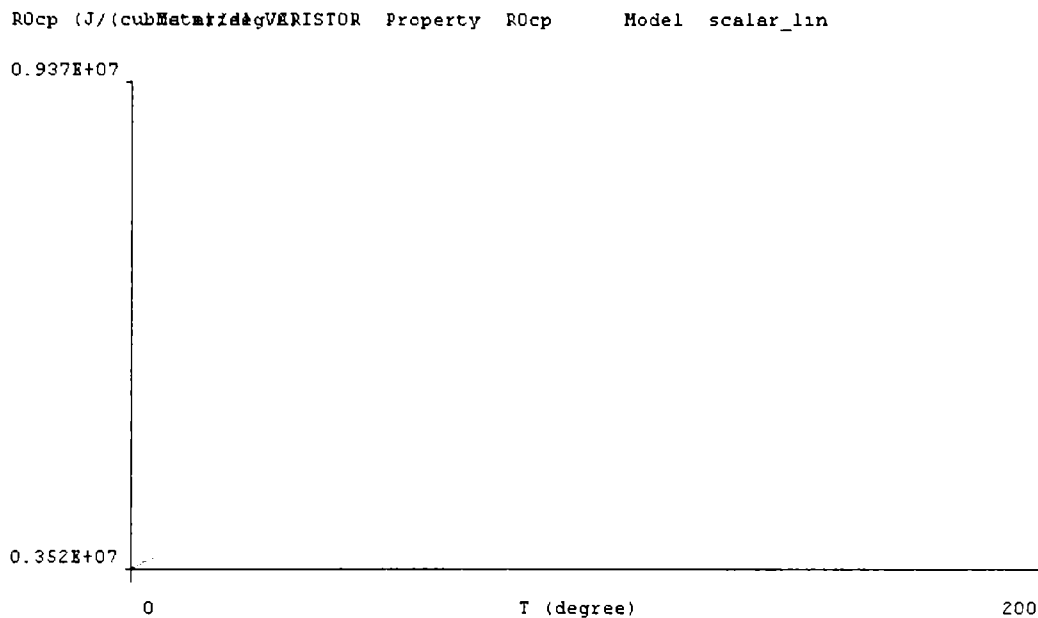
$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$



În urma efectuării acestor calcule, variabila "RoCp" va avea legea de variație:

$$RoCp = c_v = 3,516 \cdot 10^6 \cdot (1 + 8,33 \cdot 10^{-3} \cdot \theta), [\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})], \theta \text{ fiind temperatura în } [^\circ\text{C}]$$

Legea de variație, așa cum este implementată în baza de date a materialelor utilizate de pachetul CAD FLUX 2D, este prezentată în figura VII.21:



**Figura VII.21: Legea de variație a căldurii specifice a varistorului în funcție de temperatură.**

În cazul căldurii specifice a trebuit să luăm în calcul și variația în funcție de temperatură (destul de semnificativă).

### VII.3.2. Rășina epoxidică

Rășina epoxidică este un izolator care se aplică foarte ușor pe varistor [13]. Se prezintă sub forma unui praf, în care este introdus varistorul în stare caldă, la peste 125 °C. Porțiunea care nu va fi izolată se acoperă. Reacția de polimerizare are loc destul de rapid.

Pentru izolația din *rășină epoxidică*, întărită la cald, cei mai importanți parametri termici sunt:

- **conductivitatea termică ( $\lambda$ )**, are valoarea [13], [16]:

$$\lambda = 0,15 [\text{Kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})],$$

ceea ce conduce, efectuând transformările de rigoare ( $1 \text{ Kcal} = 4186 \text{ J}$ ,  $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ ) la

$$\text{iso } K = 0,174 [\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})]$$

Apreciem că nu avem o variație semnificativă a conductivității termice în funcție de temperatură pe intervalul luat în calcul (20 °C – 100°C). Se observă că acest izolator electric este practic și un izolator termic.

- **coeficientul de schimb al căldurii prin radiație ( $\epsilon_r$ )**, are valoarea [13], [16], [24]:

$$\epsilon_r = 0,9 [\text{adimensional}],$$

evident, fără a opera nici o transformare

$$\text{Rad } R = \epsilon_r = 0,9 [\text{adimensional}]$$

Izolația din rășină epoxidică se comportă și ea ca un corp cenușiu.





- **coeficientul de schimb al căldurii prin convecție ( $\alpha_c$ )**, denumit și transmisivitate termică prin convecție are valoarea [13], [16]:

- la 0 °C  $\alpha_c = 9 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$ ;

- la 40 °C  $\alpha_c = 15 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$ ;

Între aceste valori apreciem o variație liniară a transmisivității termice prin convecție, care conduce la legea de variație:

$$\alpha_c = 9 \cdot (1 + 0.0166 \cdot \theta) \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}, \theta \text{ fiind temperatura în [°C]}$$

și în acest caz nu este necesar să operăm vreo transformare, deci:

$$\text{Conv } R = \alpha_c = 9 \cdot (1 + 0.0166 \cdot \theta) \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}, \theta \text{ fiind temperatura în [°C]}$$

Legea de variație a transmisivității termice cu temperatura pentru rășina epoxidică este aceeași ca și cea determinată pentru mediul varistor și este prezentată în figura VII.20.

Putem face observația anterioară, anume, în cazul majorității echipamentelor de protecție cu varistoare pe bază de ZnO destinate a funcționa la joasă tensiune, convecția este naturală, existând o ușoară ventilare naturală, aparatele fiind în general realizate în variantă necapsulată. Cum aceste echipamente funcționează în general în interior, temperatura ambiantă este în jurul a 20 °C. Marginea de izolație epoxidică este ușor mai bine ventilată decât materialul varistor.

- **căldura specifică volumică ( $c_v$ )** intervine doar în procesele termice tranzitorii [13], [16]. Pentru a o defini, pornim de la căldura specifică masică  $c_m$ :

- la 20 °C s-a determinat[2]:  $c_m = 0,35 \text{ [kcal/(kg} \cdot \text{°C)]}$ ;

Având în vedere că relația ei de definire este:  $c_v = \rho \cdot c_m$ ,

unde  $\rho$  este densitatea masică, în  $\text{[kg/m}^3\text{]}$ ;

$c_m$  reprezintă căldura specifică masică, în  $\text{[J/(kg} \cdot \text{°C)]}$ .

Vom obține, în urma calculelor, legea de variație a căldurii specifice volumice:

$$c_v = 1,9 \cdot 10^6 \text{ [J/(m}^3 \cdot \text{°C)]}.$$

S-au utilizat valoarea densității masice a izolației epoxidice [16], anume

$$\rho = 1300 \text{ [kg/m}^3\text{]},$$

$$1 \text{ Kcal} = 4186 \text{ J}$$

În urma efectuării acestor calcule, variabila "RoCp" va avea valoarea:

$$\text{RoCp} = c_m = 1,9 \cdot 10^6 \text{ [J/(m}^3 \cdot \text{°C)]}.$$

În acest caz apreciem ca și constantă variația în funcție de temperatură a căldurii specifice.

### VII.3.3. Alama

În situația în care efectuăm și modelarea câmpului termic pentru configurațiile care au și masă adițională din alamă, trebuie introduse și valorile parametrilor de material ai acestui aliaj.

Pentru **alamă**, principalii parametri termici sunt:

- **conductivitatea termică ( $\lambda$ )**, are valoarea [13], [16]:

$$\lambda = 0,26 \text{ [cal/(cm} \cdot \text{s} \cdot \text{°C)]},$$

ceea ce conduce, efectuând transformările ( $1 \text{ Kcal} = 4186 \text{ J}$ ,  $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$ ,  $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m}$ ) la



$$iso K = 108,8 \text{ [W/(m} \cdot \text{°C)]}$$

Apreciem că nu avem o variație semnificativă a conductivității termice în funcție de temperatură pe intervalul luat în calcul (20 °C – 40°C). Se observă că alama este un excelent conductor termic, lucru bine cunoscut din practică

- **coeficientul de schimb al căldurii prin radiație ( $\epsilon_r$ )**, are valoarea [13], [16]:

$$\epsilon_r = 0,2 \text{ [adimensional]},$$

implicit, fără a opera nici o transformare

$$Rad R = \epsilon_r = 0,2 \text{ [adimensional]}$$

Alama se comportă, evident, ca un metal.

- **coeficientul de schimb al căldurii prin convecție ( $\alpha_c$ )**, denumit și transmisivitate termică prin convecție are valoarea [13], [16]:

$$\text{- la } 0 \text{ °C } \alpha_c = 5 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]};$$

$$\text{- la } 40 \text{ °C } \alpha_c = 9 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]};$$

Între aceste valori apreciem o variație liniară a transmisivității termice prin convecție, care conduce la legea de variație:

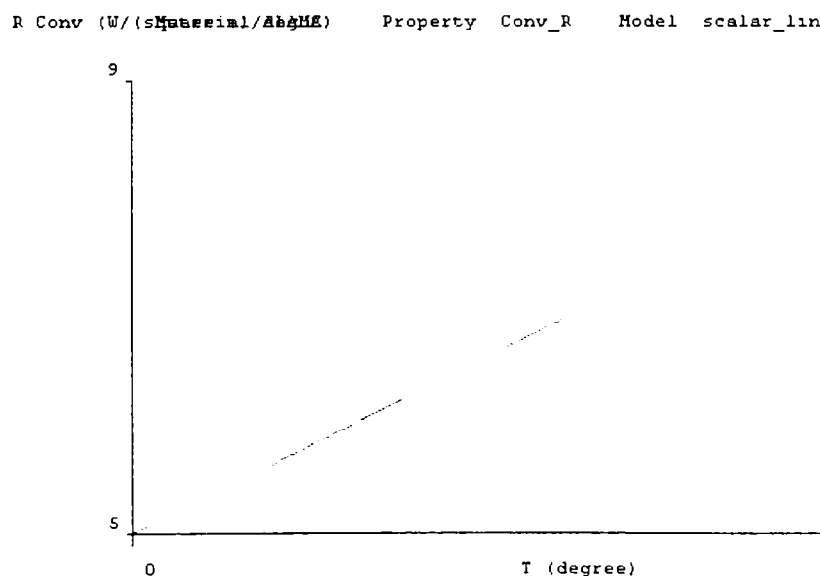
$$\alpha_c = 5 \cdot (1 + 0.02 \cdot \theta) \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}, \theta \text{ fiind temperatura în [°C]}$$

și în acest caz nu este necesar să operăm vreo transformare, deci:

$$Conv R = \alpha_c = 9 \cdot (1 + 0.0166 \cdot \theta) \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}, \theta \text{ fiind temperatura în [°C]}$$

Putem repeta observația anterioară, anume, în cazul majorității echipamentelor de protecție cu varistoare pe bază de ZnO destinate a funcționa la joasă tensiune, convecția este naturală, existând o ușoară ventilare naturală, aparatele fiind în general realizate în variantă necapsulată. Cum aceste echipamente funcționează în general în interior, temperatura ambiantă este în jurul a 20 °C. Convecția pe suprafața alamei este ușor favorizată.

Legea de variație a transmisivității termice prin convecție, în funcție de temperatură, este prezentată în figura VII.22:



**Figura VII.22: Legea de variație a transmisivității termice prin convecție, în funcție de temperatură, pentru alamă.**



▪ **căldura specifică volumică ( $c_v$ )** intervine doar în procesele termice tranzitorii [13], [16]. Pentru a o defini, pornim de la căldura specifică masică  $c_m$ :

- la 20 °C s-a determinat[2]:  $c_m = 0,0917$  [kcal/(kg · °C)];

Având în vedere că relația ei de definiție este:  $c_v = \rho \cdot c_m$ ,

unde  $\rho$  este densitatea masică, în [kg/m<sup>3</sup>];

$c_m$  reprezintă căldura specifică masică, în [J/(kg · °C)].

Vom obține, în urma calculelor, legea de variație a căldurii specifice volumice:

$$c_v = 3,224 \cdot 10^6 \text{ [J/(m}^3 \cdot \text{°C)]}.$$

S-au utilizat valoarea densității masice a alamei [2], anume

$$\rho = 8400 \text{ [kg/m}^3\text{]},$$

$$1 \text{ Kcal} = 4186 \text{ J}$$

În urma efectuării acestor calcule, variabila “RoCp” va avea valoarea:

$$RoCp = c_m = 3,224 \cdot 10^6 \text{ [J/(m}^3 \cdot \text{°C)]}.$$

Acest parametru este destul de apropiat de valoarea obținută pentru mediul varistor. Presupunem acest parametru ca invariant în timp.

Următoarea etapă în modelarea cu elemente finite o reprezintă rularea programului “Physical” [73], [74], care permite descrierea problemei din punct de vedere fizic.

În acest sens, vom analiza două regimuri termice ale varistorului, anume:

- regimul de serviciu permanent, la o anumită tensiune mai mică decât cea de prag;
- regimul tranzitoriu de răcire a varistorului, după aplicarea unui impuls [8].

Datele obținute pe calea modelării numerice vor fi confruntate cu rezultatele experimentale.

Se va analiza atât situația varistorului singur cât și situația varistorului cu masă adițională din alamă, măsurătorile reale fiind făcute la o temperatură ambientă de 24 °C.

Un prim calcul se impune a fi făcut, pentru a putea determina intervalul de timp pe care putem efectua măsurătorile și simulările, anume calculul constantei termice de timp, care se va calcula cu binecunoscuta formulă:

$$T = \frac{c_m \cdot m}{\alpha \cdot S_l}$$

unde:

- $c_m = 0,7534$  [J/(g · °C)] este căldura specifică masică la 24 °C;
- $m = 12$  [g] este masa varistorului singur;
- $\alpha = 17$  [W/(m<sup>2</sup> · °C)] este transmisivitatea termică globală, la 24 °C;
- $S_l = 1,91 \cdot 10^{-3}$  [m<sup>2</sup>] este aria laterală totală a discului varistor (includem și izolația).

Ca urmare, vom obține pentru  $T$  o valoare de aproximativ 300 s (5 – 6 minute). Această valoare trebuie luată în considerare atât la încălzire cât și la răcire, știut fiind faptul că procesele tranzitorii se consideră practic terminate la trecerea a 4 constante termice de timp, în cazul nostru după 25 – 30 de minute minimum.

Această valoare a constantei termice de timp ne dă o imagine informativă despre timpul care trebuie luat în calcul pentru a obține o valoare staționară a temperaturii. Valoarea constantei de timp variază destul de mult, între 5 și 10 minute în timpul proceselor de răcire și încălzire, datorită variației cu temperatura a căldurii specifice masice  $c_m$  și a transmisivității termice globale  $\alpha$ .



## VII.4. Descrierea și rezolvarea problemei fizice analizate

Datele problemei fizice care urmează să fie analizată sunt introduse în cadrul procedurii **PROPHY**, după ce s-au introdus datele referitoare la geometria pieselor utilizate precum și la proprietățile materialelor luate în calcul, locul și rolul acestei procedurii în algoritmul modelării numerice cu **FLUX 2D** fiind prezentat în figura VII.2.

Această procedură constă doar în introducerea de date, fără nici un fel de bloc decizional sau de calcul, orice modificare a parametrilor introduși fiind posibilă doar prin apelarea unei proceduri similare ca structură, denumită **MODPRO**.

În cadrul procedurii **PROPHY** se au în vedere următoarele aspecte [73], [74]:

- Inventarierea domeniilor geometriei utilizate (suprafețe, curbe puncte, semispații);
- Atribuirea pentru fiecare domeniu considerat a unor proprietăți ale unui material din baza de date cu materialele utilizate;
- Introducerea datelor privind sursele de căldură din fiecare domeniu (valoare a puterii produse, lege de variație a acesteia etc.), dacă acestea există;
- Introducerea datelor privind temperatura unor anumite domenii (valoarea ei, legea de variație etc.), dacă se constată necesitatea precizării ei;
- Introducerea celorlalte condiții inițiale și la limită, conform cerinței utilizatorului.

După introducerea și validarea datelor principale ale problemei se poate trece la rezolvarea acesteia. Acest lucru este posibil utilizând procedura **RESGEN**. Locul acestei proceduri în întreg ansamblul programului este precizat în figura VII.2.

Schema logică pentru algoritmul acestei proceduri este prezentată în figura VII.23.

În esență, datele care trebuie introduse în această procedură sunt:

- Durata în timp a întregului proces tranzitoriu studiat;
- Pasul de timp utilizat (intervalul de timp între două evaluări succesive ale temperaturii);
- Posibilitatea modificării pasului de timp de-a lungul calculelor (la sugestia operatorului uman sau în baza unui algoritm intern al procedurii);
- Fixarea numărului limită de pași care trebuie efectuați;
- Precizarea numărului de iterații necesare, la fiecare pas, pentru rezolvarea sistemului de aproape 2000 de ecuații care are ca rezultat matricea temperaturilor în fiecare nod;
- Introducerea preciziei fiecărei iterații.

Următorul pas important în aplicarea metodei elementelor finite utilizând programul **FLUX 2D** îl reprezintă evaluarea rezultatelor obținute în urma derulării procedurii **RESGEN**.

Acest lucru este posibil utilizând procedura **EXPGEN**, al cărei loc și rol este precizat în figura VII.23.

Pentru explicitarea rezultatelor, utilizatorul are posibilitatea de a obține:

- Trasarea curbelor izoterme pentru întreaga geometrie la un anumit moment;
- Valoarea temperaturii într-un anumit punct într-un anumit moment;
- Valoarea parametrilor de material (parametrii care sunt introduși în procedura **CSLMAT**), în funcție de temperatură, într-un anumit punct sau pentru întreaga geometrie analizată, într-un anumit moment;
- Evoluția în timp a temperaturii într-un anumit punct;
- Variația în timp a densității de flux termic pentru întreaga geometrie;
- Evoluția în timp a valorii parametrilor de material într-un anumit punct;

Ca urmare, observăm că pachetul CAD **FLUX 2D** reprezintă un instrument foarte util pentru modelarea fenomenelor termice, oferind o gamă variată de modalități de interpretare a rezultatelor în funcție de cerințele specifice ale aplicației considerate precum și o flexibilitate sporită în exploatare.

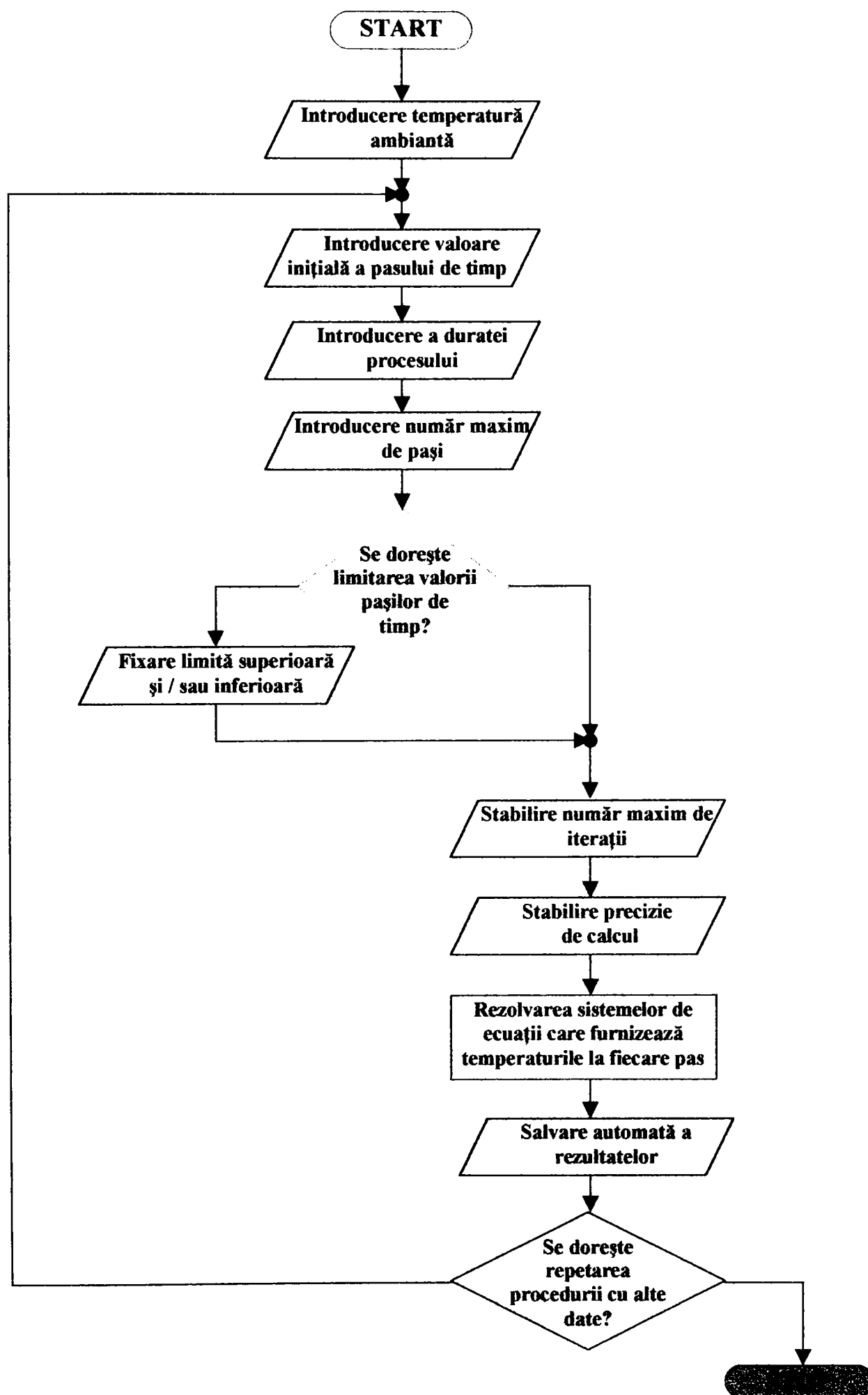


Figura VII.23: Schema logică a algoritmului procedurii RESGEN.





## VII.5. Concluzii

Așa cum am afirmat anterior, pachetul CAD **FLUX 2D** este un program performant, destinat a satisface necesitățile oricărui utilizator. Chiar dacă operează sub Windows 95<sup>®</sup>, comunicarea cu utilizatorul amintește oarecum de programele mai vechi, care operează sub DOS, fără ca acest lucru să îi scadă din performanțe.

Datorită simetriei cilindrice a pieselor utilizate, nu a fost necesară utilizarea unui pachet CAD pentru modelare tridimensională (de exemplu **FLUX 3D**, realizat tot de către firma **CEDRAT**), analiza câmpului de temperatură într-o semisectiune transversală fiind edificatoare.

Modul de structurare (cu interconexiunile dintre procedurile componente ale programului) este extrem de simplu și eficient, transferarea datelor de la o procedură la alta fiind realizată automat prin intermediul unor fișiere specifice, în care utilizatorul consimte să stocheze rezultatele obținute în acea etapă.

Versiunea didactică a acestui program, chiar dacă are o limitare la 2000 a numărului de noduri, realizează o modelare excelentă a transferului termic în situația unor geometrii relativ simple, așa cum sunt cele descrise în acest capitol.

Utilizarea unui pachet CAD modular, asemănător **FLUX 2D**, în modelarea proceselor termice, reprezintă o etapă necesară în proiectarea oricărui echipament electric care este sensibil relativ la evoluția temperaturii sale sau a mediului ambiant. Este mult mai indicat ca utilizatorul să își procure un asemenea utilitar software de pe piață, concepția lui fiind extrem de dificilă, fiind foarte greu de realizat un utilitar similar, în timp real, de către potențialul utilizator lucrând singur, datorită complexității modelului matematic și a evoluțiilor rapide din domeniul tehnologiei informației.

## VII.6. Contribuții personale și originale

Acest capitol este, în cea mai mare parte a sa, rezultatul contribuțiilor originale ale autorului, dintre care amintim:

- Familiarizarea cu mediul de programare **FLUX 2D**;
- Schițarea algoritmilor pe care se bazează acest pachet CAD;
- Identificarea rolului fiecărei proceduri și descrierea în detaliu a acestora;
- Sinteza principalelor particularități ale acestui utilitar software, pe baza manualelor de operare și a implementării practice a acestora pe calculator;
- Propunerea unui număr de 8 geometrii, realizate și fizic, destinate analizei stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO;
- Discretizarea domeniilor acestora în elemente finite;
- Identificarea principalilor parametri de material implicați în studiul stabilității termice, precum și stabilirea valorilor sau legilor de variație ale acestora;
- Stabilirea condițiilor inițiale și la limită pentru problemele studiate;
- Identificarea posibilităților de obținere și evaluare a rezultatelor furnizate de către **FLUX 2D**;
- Analiza performanțelor utilitarului **FLUX 2D**.



## CAPITOLUL VIII

### Montarea în paralel a varistoarelor cuplate termic prin conducție

După cum am arătat în capitolul VI, montarea în paralel a varistoarelor, însoțită de cuplajul termic al acestora, reprezintă o soluție tehnică menită a îmbunătăți stabilitatea termică a acestora și implicit a echipamentelor de protecție contra supratensiunilor care le înglobează.

Ca urmare, vom prezenta în continuare un studiu menit să demonstreze acest lucru.

Pentru acest studiu s-au folosit două varistoare fabricate de către autor, după tehnologia prezentată în capitolul III, în cadrul Laboratorului "Génie Electrique" al Universității "PAUL SABATIER" din Toulouse. Toate determinările experimentale au fost de asemenea realizate tot în cadrul aceluiași laborator.

#### VIII.1. Prezentarea varistoarelor utilizate

Varistoarele fabricate de către autor au fost denumite **R** și **S**.

Caracteristicile electrice  $I(U)$  ale acestor varistoare, determinate în stare rece, pentru curenți între 0 și 10 mA, sunt prezentate în Anexa 1.

Tensiunile de prag (la 1 mA) sunt:

- 560 V pentru **R**;
- 554 V pentru **S**.

Se observă că cele două caracteristici electrice, chiar dacă nu sunt identice, sunt suficient de apropiate.

Dimensiunile fiecăruia dintre varistoare sunt prezentate în figura VIII.1:

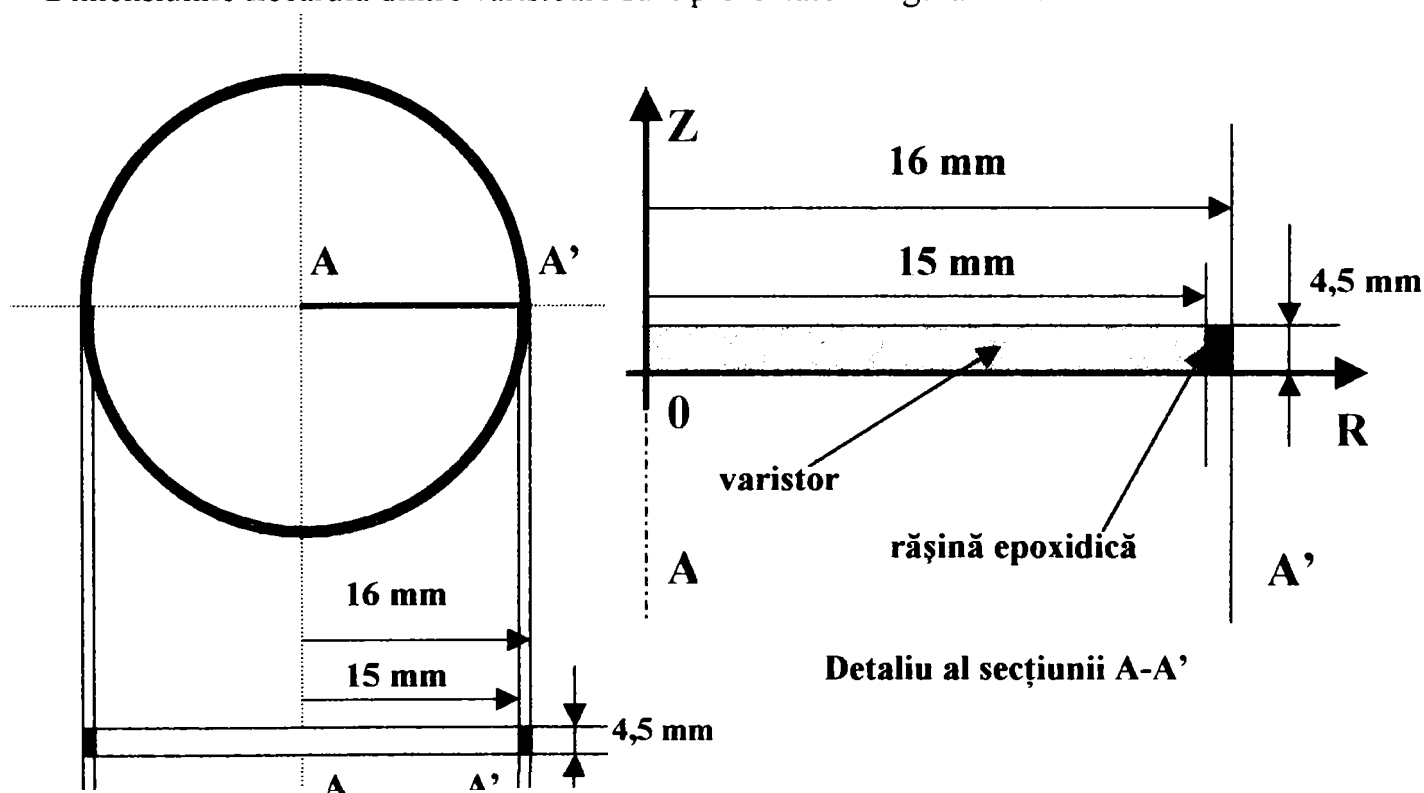


Figura VIII.1: Configurațiile **R** și **S**. Detaliu al secțiunii considerate în fiecare caz.



S-a preferat prezentarea geometriei acestor varistoare independent de geometria celorlalte, dat fiind specificul acestora și scopul pentru care au fost realizate.

Datorită simetriei cilindrice, în jurul axei  $OZ$ , constatăm că modelarea transferului termic poate fi făcută numai în secțiunea  $A-A'$ , concluziile putând fi generalizate prin extrapolare. Mai mult chiar, din punct de vedere matematic, modelarea poate fi realizată numai pe jumătatea superioară a secțiunii  $A-A'$ . Am preferat modelarea pe întreaga secțiune din considerente de simplificare a condițiilor la limită.

S-au introdus punctele de coordonate  $(0,0)$ ;  $(15,0)$ ;  $(16,0)$ ;  $(16,4,5)$ ;  $(15,4,5)$ ;  $(0,4,5)$ .

Subdomeniile de discretizare corespund materialelor (varistor – roșu, rășină epoxidică - albastru). Domeniile de frontieră sunt cele două fețe ale varistorului precum și frontiera dintre izolația de rășină și aer.



**Figura VIII.2: Rețeaua de discretizare pentru configurațiile R și S.**

Rețeaua de discretizare a secțiunii considerate este prezentată în figura VIII.2: Conține 1932 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

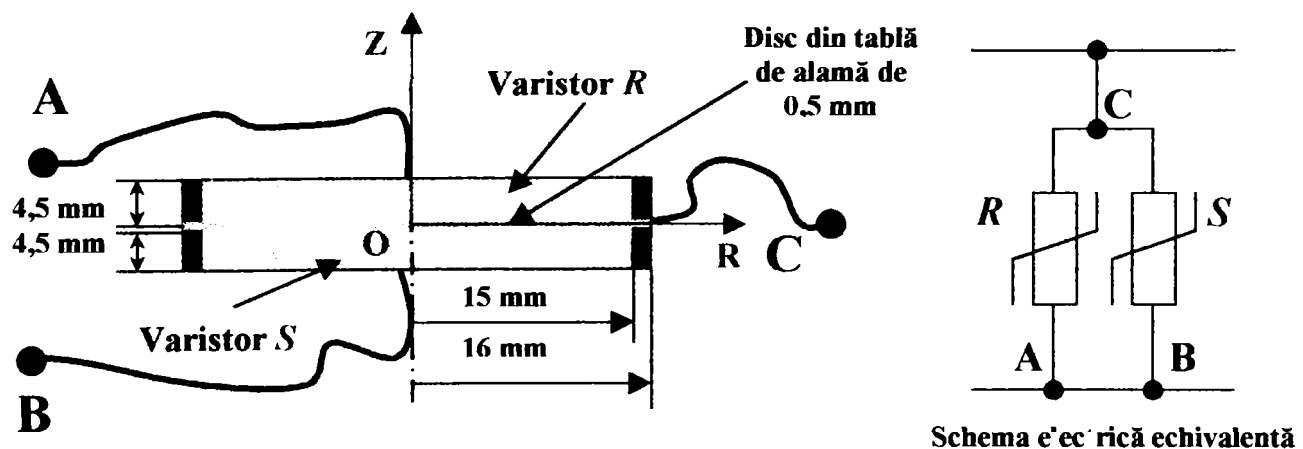
- 909 în interiorul domeniilor
- 101 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);

Aceasta este configurația în care varistoarele operează singure, fără cuplaj termic sau mase adiționale de alamă.

Esența acestui întreg capitol este cuplarea termică a varistoarelor montate în paralel.

Soluția tehnică propusă în acest sens constă în lipirea celor două varistoare pe fețele unei foite din tablă de alamă cu grosimea de 0,5 mm, în formă de disc, având diametrul de 32 mm, care să joace și rolul de electrod comun.

Ansamblul este prezentat în figura VIII.3.



**Figura VIII.3: Ansamblul celor două varistoare R și S, sudate pe un disc din tablă de alamă.**

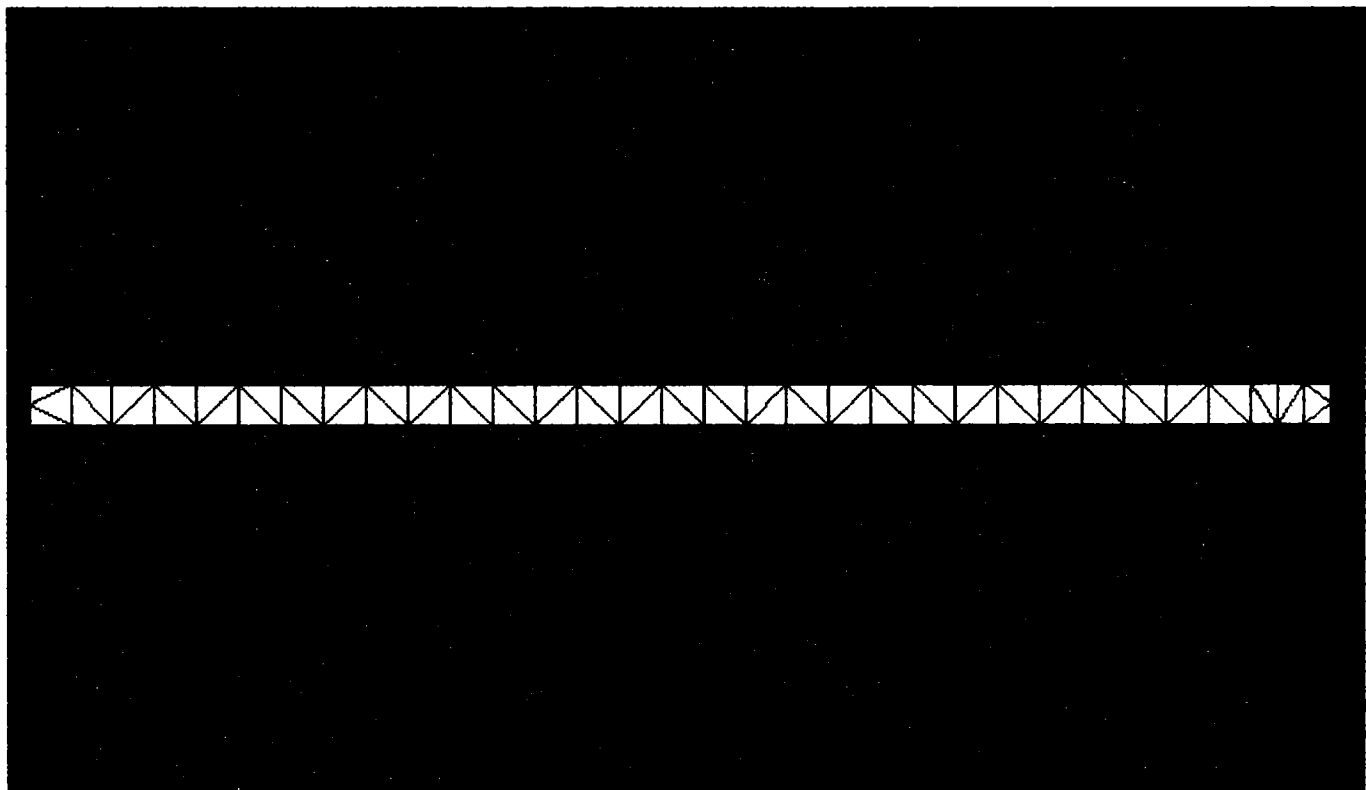


Aparent, această structură nu prezintă nici un avantaj, deoarece fiecare din cele două varistoare a "pierdut" una din fețe, utilizate ca suprafețe de disipare a căldurii. În schimb, ansamblul se comportă ca un varistor cu masă dublă, dar parcurs de un curent aproximativ de două ori mai mic (în cazul aplicării unui impuls).

Dacă cele două caracteristici  $I(U)$  sunt diferite, (în cazul de față foarte puțin diferite) curenții care vor trece prin varistoare vor fi diferiți, varistorul care are tensiunea de prag  $U_N$  cea mai scăzută urmând să suporte curentul (și implicit încălzirea) cea mai mare. Dacă se realizează acest cuplaj termic, prin intermediul discului-electrod din alamă, se va realiza, în mod forțat, egalarea temperaturilor celor două varistoare.

Fenomenul este în realitate mult mai complex, deoarece în cazul creșterii temperaturii varistorului mai rece vom asista și la o creștere a curentului prin acesta. Dacă diferența dintre tensiunile de prag ale celor două varistoare este sub 3 %, putem spune fără a greși, (lucru confirmat experimental de către autor [16]), că asistăm la o egalizare forțată a curenților, în regim permanent, chiar dacă varistoarele sunt expuse la aceeași tensiune.

Pentru a putea demara studiul stabilității termice a acestui montaj, s-a conceput un model geometric, implementat cu ajutorul FLUX 2D. Rețeaua de discretizare obținută pe acest model este prezentată în figura VIII.4.



**Figura VIII.4: Rețeaua de discretizare în elemente finite, obținută în cazul montajului varistoarelor R și S în paralel.**

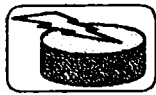
Rețeaua are 1945 de noduri, elementele finite fiind situate după cum urmează:

- 924 în interiorul domeniilor
- 78 pe contururile domeniilor (elemente de frontieră);

Analiza stabilității termice a ansamblului va fi făcută:

- în regim de serviciu permanent;
- în regim de serviciu de avarie (la aplicarea unui impuls).

Datele obținute din modelări vor fi confruntate cu rezultatele experimentale. S-a preferat prezentarea în paralel a rezultatelor modelărilor și a rezultatelor experimentale, pentru o mai bună evidențiere și comparare a acestora, fără a introduce o barieră artificială între modelul teoretic și realitatea fizică.



## VIII.2. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent

Instalația experimentală pentru măsurători în regim de serviciu permanent, cu polarizare la o anumită tensiune este prezentată în figura VIII.5.

Schema de principiu a acestei instalații este prezentată în figura VIII.6:

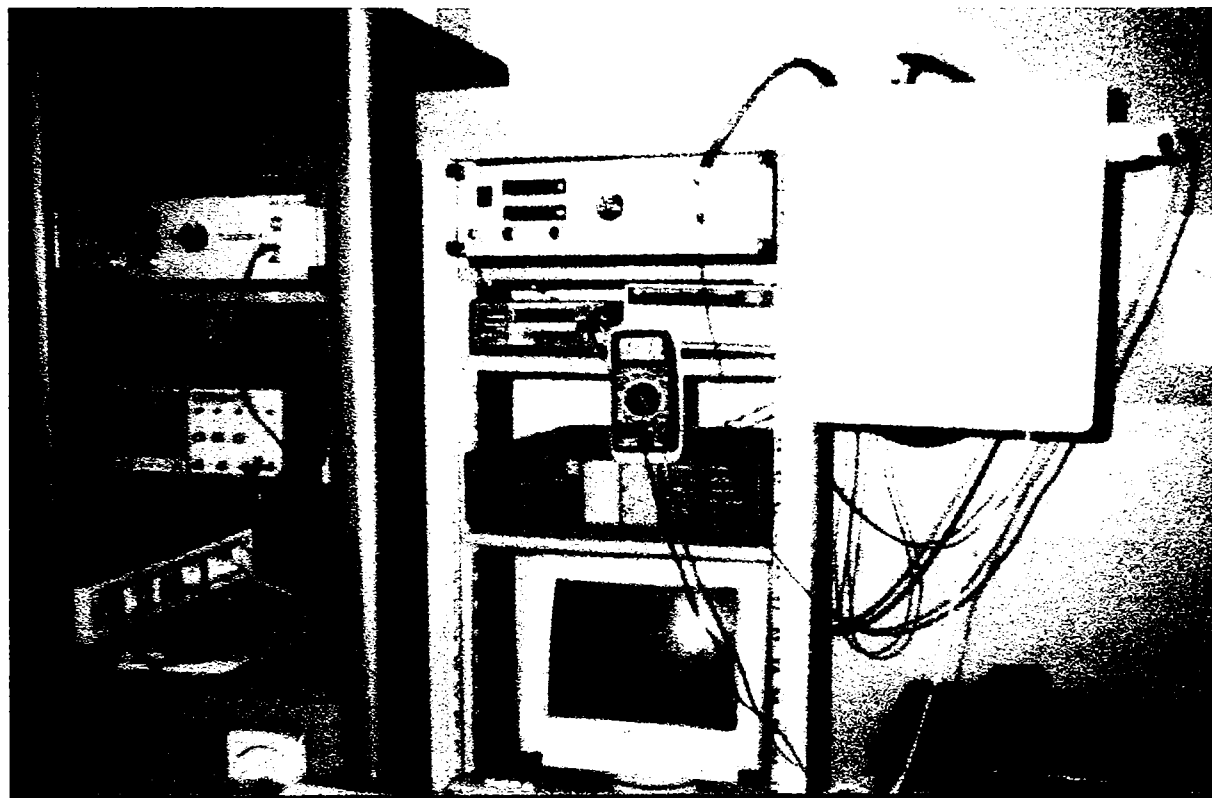


Figura VIII.5: Instalația pentru încercări în regimuri permanente.

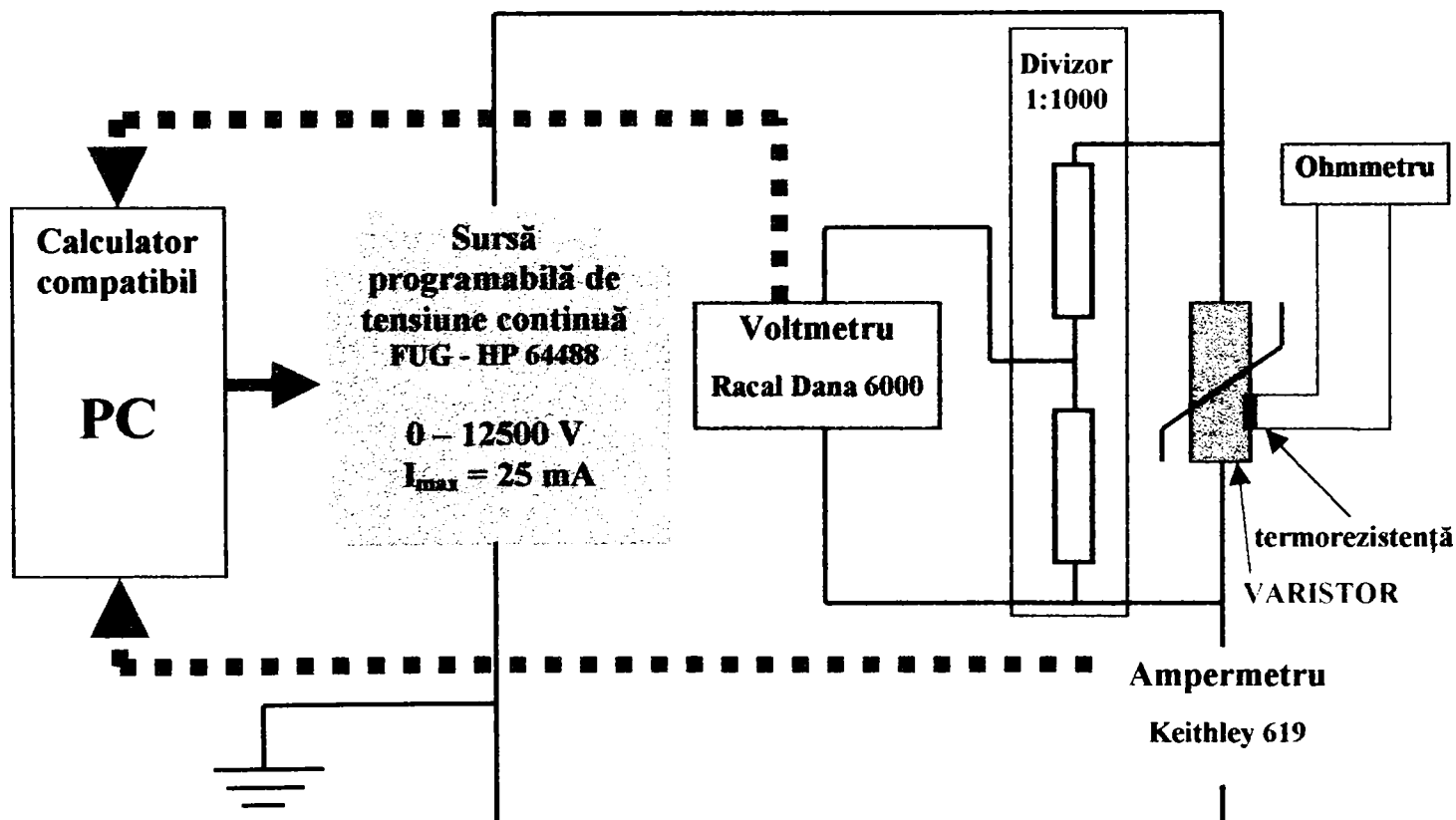


Figura VIII.6: Schema electrică a instalației pentru încercări în regimuri permanente.





Instalația, așa cum este prezentată în figura VIII.6. este aceeași ca și cea prezentată în Capitolul al VI-lea, singura deosebire fiind lipsa etuvei.

Deoarece toate încercările vor fi făcute la temperatura ambiantă, care are o valoare în jur de  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , prezența etuvei nu este necesară. Eșantioanele care urmează să fie analizate sunt dispuse într-o incintă închisă (cutia metalică suspendată care apare în figură). Prin urmare, influența curenților de convecție din cameră este exclusă.

Pentru a avea aceeași valoare a transmisivității termice prin convecție  $\alpha_c$ , pe ambele fețe, eșantioanele sunt dispuse vertical. Valorile transmisivității termice globale (prin convecție și radiație), sunt, conform [38]:

$$\alpha = 17 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})] \text{ pentru mediul varistor și izolația de rășină epoxidică}$$

$$\alpha = 15 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})] \text{ pentru alamă.}$$

Scopul fundamental al măsurătorilor și modelărilor efectuate este de a studia comportamentul montajului prezentat în figura VIII.3, de a compara această soluție tehnică cu situația varistoarelor care funcționează în paralel, dar independente unul de celălalt.

### VIII.2.1. Analiza regimului de serviciu permanent pentru un varistor singur

În această primă etapă ne propunem să realizăm o modelare numerică a câmpului de temperaturi, în regim permanent în fiecare din cele două varistoare, în situația în care acestea nu sunt cuplate termic și funcționează independent.

Măsurătorile se vor efectua la o tensiune  $U = 460\text{ V}$ , ceea ce corespunde unor coeficienți de utilizare la limita de stabilitate termică staționară:

- $C = 0,821$  pentru **R** și,
- $C = 0,83$  pentru **S**,

unde, după cum am precizat în capitolele anterioare,  $C = U / U_N$

În urma măsurătorilor efectuate s-au determinat valorile curenților de regim staționar ca fiind:

- $I = 6,6 \cdot 10^{-4}\text{ A}$  pentru **R** și,
- $I = 6,8 \cdot 10^{-4}\text{ A}$  pentru **S**.

Puterile disipate în regim staționar ( $P = U \cdot I$ ) vor fi, prin urmare:

- $P = 0,303\text{ W}$  pentru **R** și,
- $P = 0,308\text{ W}$  pentru **S**.

Suprafața totală de disipare a căldurii (cele două fețe + suprafața laterală) este:

$$S_l = 2,06 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2.$$

Se observă că, practic cele două puteri sunt egale, ca urmare este suficientă analiza numai a unuia dintre varistoare, de exemplu **S**.

Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$ , este, conform formulelor anterior prezentate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha \cdot S_l} = \frac{0,308}{17 \cdot 2,06 \cdot 10^{-3}} = 8,79\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8.1)$$

Vom considera că la trecerea a  $3600\text{ s}$  de la conectarea varistorului, regimul termic tranzitoriu de încălzire a acestuia s-a terminat, varistorul intrând în regim termic permanent.

În figura VIII.7 se prezintă repartitia câmpului de temperatură în interiorul varistorului la trecerea a  $10\text{ de s}$  de la începerea procesului de încălzire.

În figura VIII.8 se prezintă repartitia câmpului de temperatură în interiorul varistorului la trecerea a  $3600\text{ s}$  de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

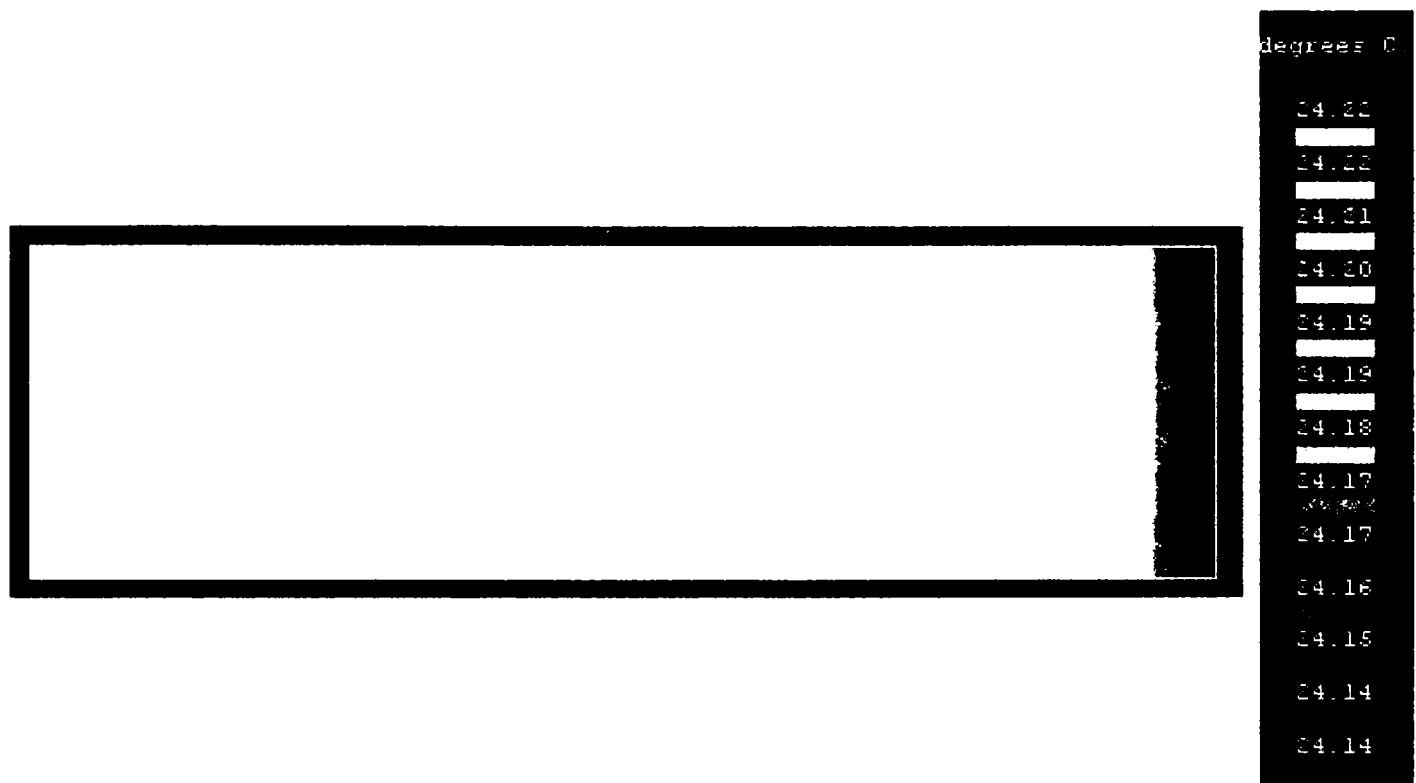


Figura VIII.7: Repartiția temperaturii în varistorul S la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

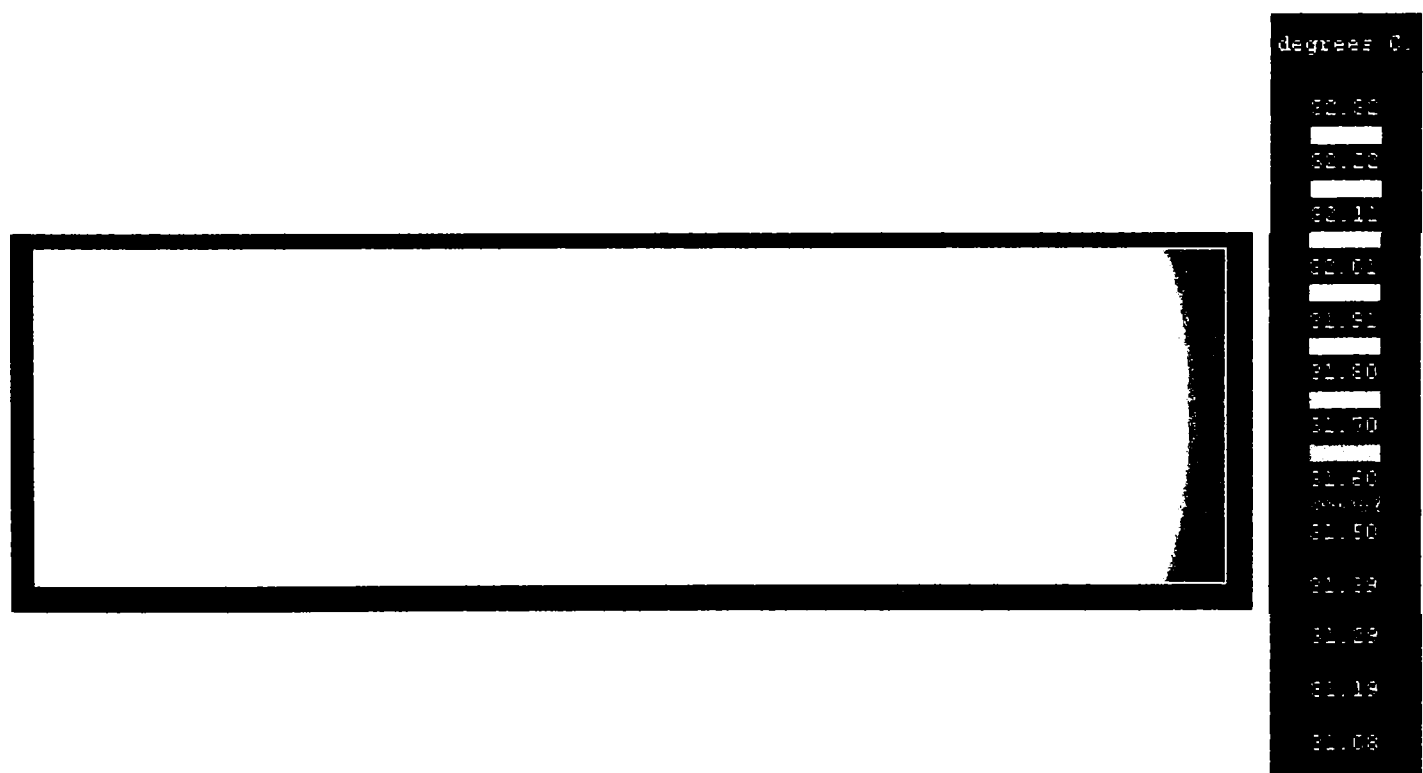
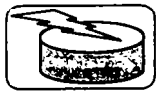


Figura VIII.8: Repartiția temperaturii în varistorul S la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.

Se observă că cea mai ridicată valoare a temperaturii în interiorul varistorului este de cca. 32,32 °C și este atinsă, evident, în zona centrală a varistorului. Cea mai redusă valoare a temperaturii este de cca. 31,08 °C și este localizată la marginea izolației de rășină epoxidică. Se observă că diferența dintre ele nu este spectaculos de mare, fiind de maximum 2 °C.

Cea mai mare supratemperatură staționară rezultată din modelare este:

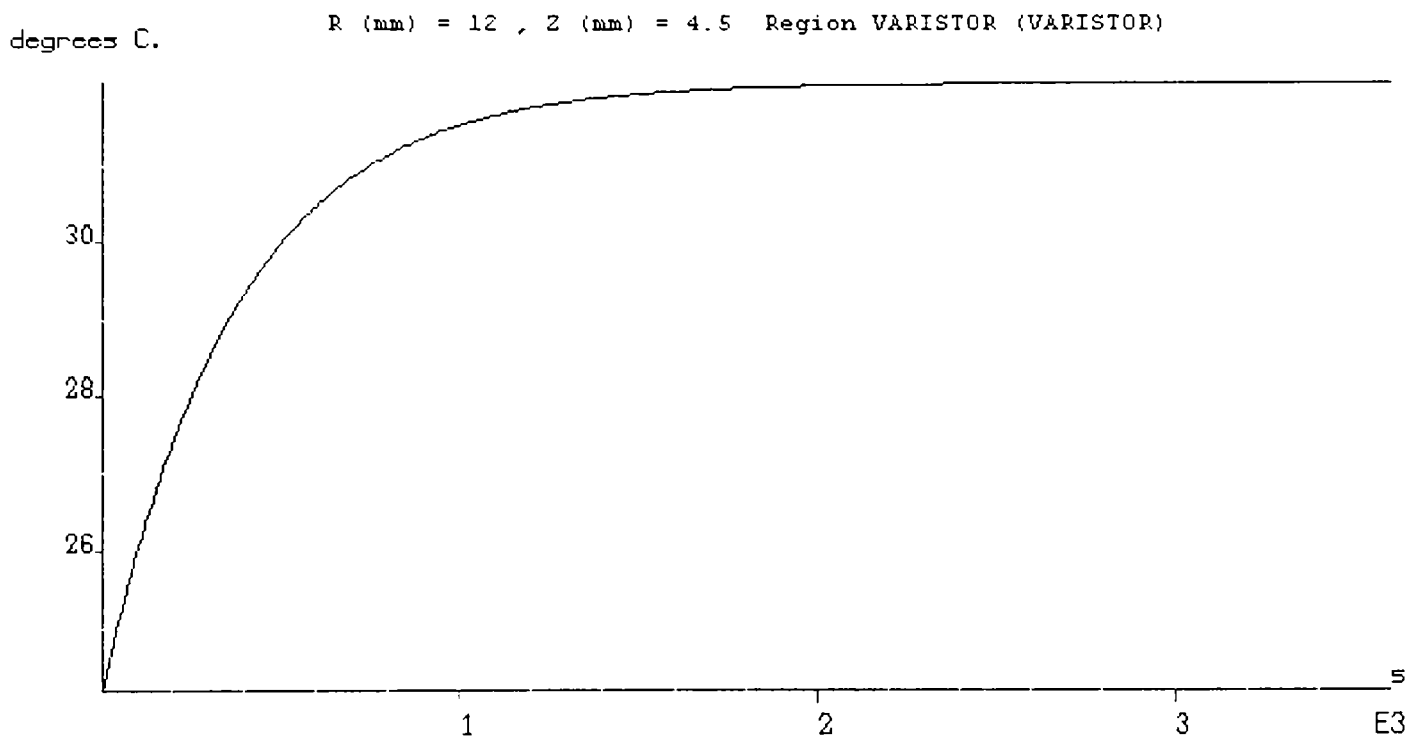
$$\tau_{sm} = 8,32 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{8.2}$$



Pentru a putea prezenta evoluția temperaturii în cursul procesului de încălzire, până la atingerea regimului staționar, vom considera un punct de pe fața superioară a varistorului situat la:

$R = 12$  mm și  $Z = 4,5$  mm.

Evoluția în timp a temperaturii în acest punct este prezentată în figura VIII.9:



**Figura VIII.9: Evoluția în timp a temperaturii într-un punct de coordonate (12, 4,5).**

Graficul de mai sus este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În analiza regimului staționar ne interesează mai puțin evoluția temperaturii în timp, aceasta fiind ușor diferită de cea prezentată în graficul anterior, mai ales din cauza variației puterii dezvoltate în varistor, presupusă anterior ca fiind constantă. Puterea dezvoltată variază în funcție de temperatură datorită influenței pe care o are temperatura asupra curentului care trece prin varistor, acesta fiind la început cu un ordin de mărime mai mic decât la sfârșitul procesului. Această observație privind variația puterii dezvoltate este valabilă pe durata primelor 500 - 1000 s ale procesului.

În continuare vom prezenta, în tabelul VIII.1, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic:

| Coordonatele punctului | Supratemperatura rezultată în urma modelării [°C] | Supratemperatura măsurată [°C] |
|------------------------|---|--------------------------------|
| (12, 4,5)              | 8,11  | 8,3                            |
| (12, 0)                | 8,11  | 8,25                           |
| (15, 4,5)              | 7,6   | 8,06                           |
| (15,0)                 | 7,6   | 8,12                           |
| (1, 4,5)               | 8,32  | 8,35                           |
| (1, 0)                 | 8,32  | 8,3                            |

**Tabelul VIII.1: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru varistorul S.**

Se observă că valorile măsurate sunt foarte apropiate de cele rezultate în urma modelării (8.2). Aceste valori sunt apropiate și de valoarea estimată (8.1), care are valoarea  $\tau_{sc} = 8,79$ .

Diferența dintre aceste temperaturi poate fi cauzată de neomogenitatea materialului, imprecizia măsurătorilor, conducția termică în firele de legătură, etc.



## VIII.2.2. Analiza regimului de serviciu permanent al varistoarelor montate în paralel și cuplate termic

Vom prezenta mai întâi rezultatele modelărilor numerice.

În figura VIII.10 se prezintă repartiția câmpului de temperatură în interiorul ansamblului varistoarelor R și S, la trecerea a 10 s de la începerea procesului de încălzire.

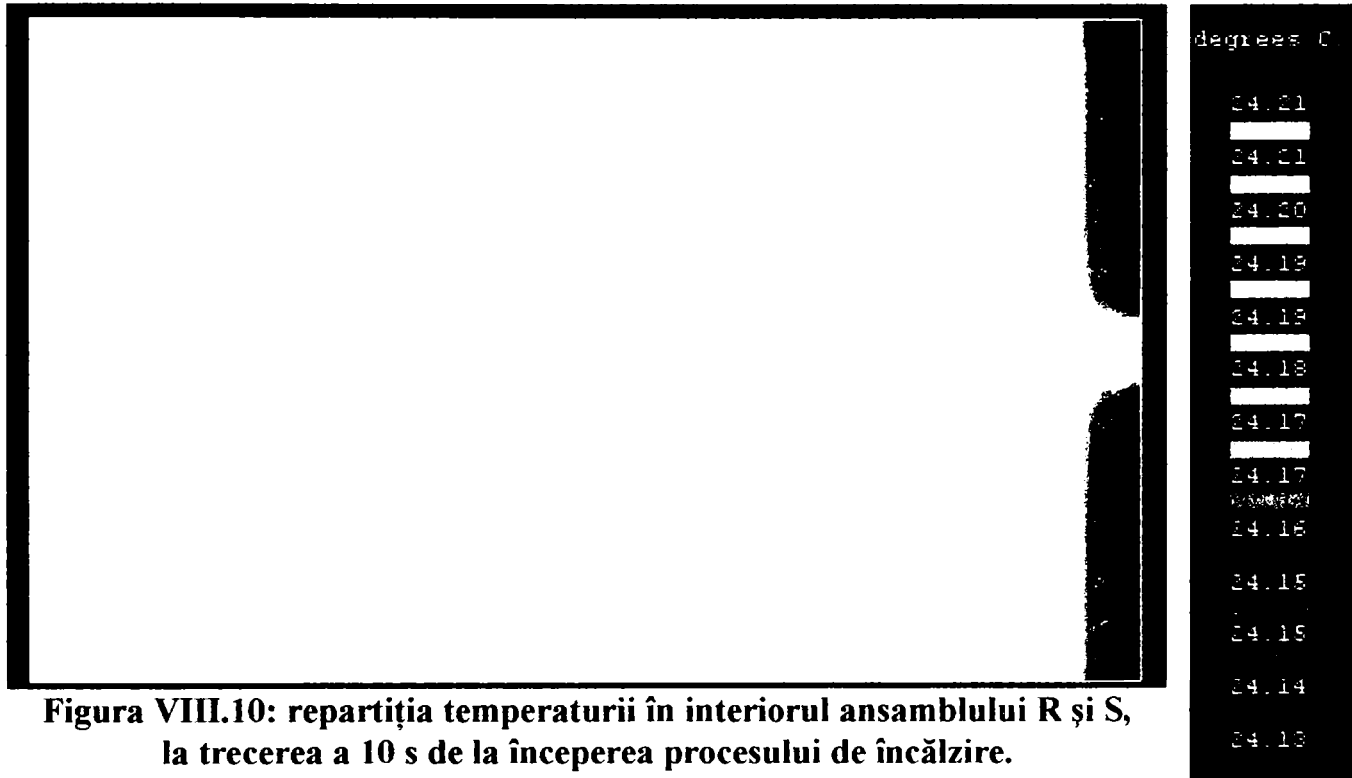


Figura VIII.10: repartiția temperaturii în interiorul ansamblului R și S, la trecerea a 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura VIII.11 se prezintă repartiția câmpului de temperatură în interiorul ansamblului varistoarelor R și S, la trecerea a 3600 s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

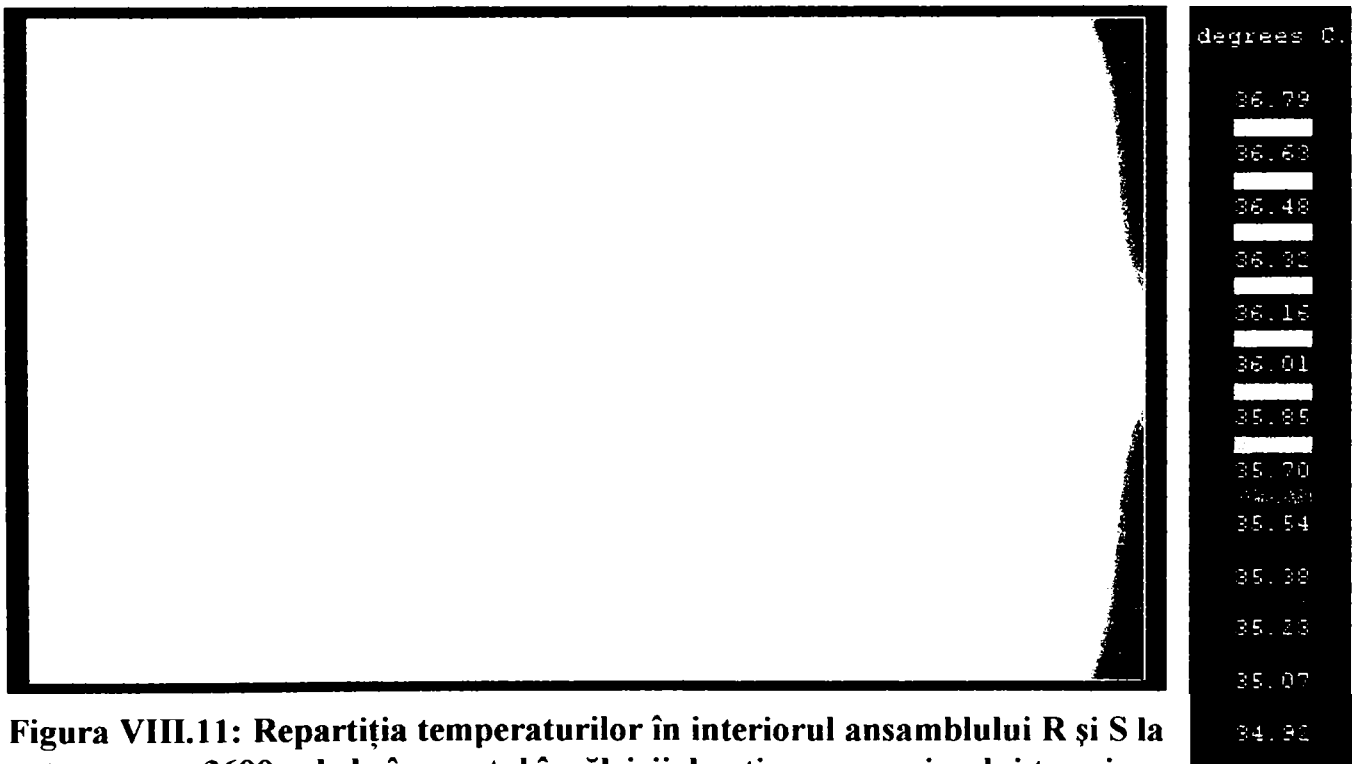
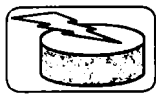


Figura VIII.11: Repartiția temperaturilor în interiorul ansamblului R și S la trecerea a 3600 s de la începutul încălzirii, la atingerea regimului termic permanent.



Suprafața totală de disipare a căldurii (cele două fețe + suprafața laterală) este:

$$S_1 = 2,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$ , este, conform formulelor anterior prezentate:

$$\tau_{se} = \frac{P_R + P_S}{\alpha \cdot S_1} = \frac{0,308 + 0,303}{17 \cdot 2,56 \cdot 10^{-3}} = 13,9 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.3)$$

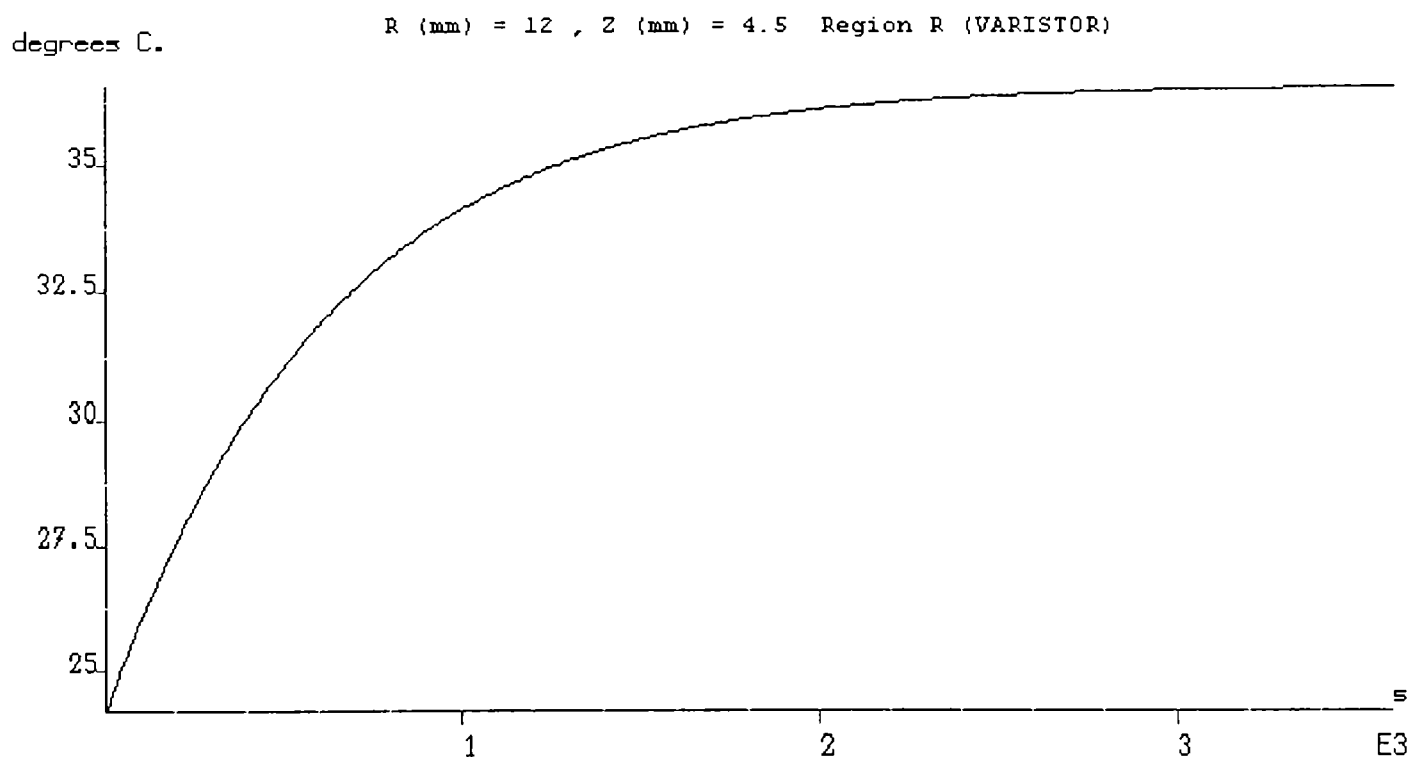
Se observă că cea mai ridicată valoare a temperaturii în interiorul varistorului este de cca. 36,79 °C și este atinsă, evident, în zona centrală a varistorului. Cea mai redusă valoare a temperaturii este de cca. 34,92 °C și este localizată la marginea izolației de rășină epoxidică. Se observă că diferența dintre ele nu este nici în acest caz spectaculos de mare, fiind de maximum 2 °C.

Cea mai mare supratemperatură staționară rezultată din modelare este:

$$\tau_{sm} = 12,79 \text{ }^\circ\text{C} \quad (8.4)$$

Pentru a putea prezenta evoluția temperaturii în cursul procesului de încălzire, până la atingerea regimului staționar, vom considera un punct de pe fața superioară a varistorului R, situat la: R = 12 mm și Z = 4,5 mm.

Evoluția în timp a temperaturii în acest punct este prezentată în figura VIII.12:



**Figura VIII.12: Evoluția în timp a temperaturii pentru un punct de coordonate (12, 4,5).**

În continuare vom prezenta, în tabelul VIII.2, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic:

| Coordonatele punctului | Supratemperatura rezultată în urma modelării [°C] | Supratemperatura măsurată [°C] |
|------------------------|---|--------------------------------|
| (12, 4,5)              | 12,48   | 12,2                           |
| (12, -5)               | 12,48   | 12,35                          |
| (1, 4,5)               | 12,79   | 13,05                          |
| (1, -5)                | 12,79   | 12,9                           |

**Tabelul VIII.2: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru ansamblul varistoarelor R și S.**





Se observă că valorile măsurate sunt foarte apropiate de cele rezultate în urma modelării. Aceste valori sunt apropiate și de valoarea estimată (8.3), care are valoarea  $\tau_{sc} = 13,9$

Diferența dintre aceste temperaturi poate fi cauzată de neomogenitatea materialului, imprecizia măsurătorilor, conducția termică în firele de legătură, variația parametrilor de material, a temperaturii ambiante, etc.

### VIII.3. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls

După cum am arătat anterior, analiza stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO (și implicit a echipamentelor care le înglobează) este necesar să fie făcută și în regim de impuls.

Așa cum am precizat și în cazul modelării numerice, regimul termic nestaționar cel mai evident este cel traversat de un varistor în timpul și după aplicarea unui impuls.

Impulsurile au fost aplicate varistorului fără a avea o tensiune de polarizare prealabilă, varistorul fiind inițial la temperatura camerei, adică la cca. 24 °C.

În realitate, varistorul rămâne polarizat la tensiunea nominală și după trecerea undei de supracurent, dar influența acestei polarizări asupra temperaturii varistorului rămâne neglijabilă, la fel ca în regimul de serviciu permanent, la tensiunea nominală a rețelei. Ca urmare, pentru studiul evoluției supratemperaturii varistorului în timpul și după aplicarea unui impuls, nu este necesară polarizarea în prealabil a acestuia. Există standarde care prevăd și asemenea încercări combinate, care presupun instalații destul de sofisticate.

În figura VIII.13 se prezintă o vedere de ansamblu a generatorului de impuls, așa cum se află instalat la Laboratorul “Génie Electrique” al Universității “Paul Sabatier” din Toulouse.

Schema electrică a generatorului de impuls este prezentată în figura VIII.14.

Generatorul furnizează o undă de impuls biexponențială, în curent, de tip 8/20  $\mu$ s, standardizată conform CEI 60-2.

Tensiunea la care se încarcă condensatorul de 180  $\mu$ F prezentat în figura VIII.14 este de cca. 2000 V c.c., valoarea maximă a tensiunii aplicate varistorului fiind ceva mai mică, între 1700 și 1900 V.

Simularea comportamentului generatorului de impuls a fost realizată de către autor utilizând un program propriu, “GIT-RE.exe”. Acest program a fost conceput în limbajul Borland C și este prezentat în întregime în Anexa 2. Scopul acestui program este de a estima valoarea maximă a tensiunii aplicate varistorului, pornind de la tensiunea la care se încarcă condensatorul sus – amintit.

Durata de aplicare a undei fiind de ordinul zecilor de microsecunde, procesul poate fi considerat adiabatic, varistorul nu mai are timp să cedeze căldura în mediul ambiant. Întreaga energie a impulsului rămâne stocată în corpul varistorului, producând extrem de repede creșterea temperaturii acestuia. Modul în care se calculează supratemperatura la care ajunge varistorul sau ansamblul varistor + masă adițională a fost prezentat în capitolul VI.

Energia stocată în condensatorul de 180  $\mu$ F din figura VIII.14, încărcat la 2000 V în cazul încercărilor noastre, este aplicată apoi varistorului, provocând încălzirea lui [2]. Putem spune fără a greși că pierderile în interiorul instalației sunt neglijabile [2]. Expresia acestei energii este dată de formula:

$$Q = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

cu valorile de mai sus ale parametrilor, va rezulta o energie de cca. 360 J.

Aplicarea unui impuls de asemenea energie asupra varistorului produce încălzirea acestuia.

Pentru a surprinde exact atât valoarea cât și forma de undă a tensiunii aplicate, respectiv a curentului stabilit prin varistor s-a utilizat un osciloscop digital tip Tektronix TDS 310, cu două canale de achiziție:

- Canalul 1, pentru achiziția tensiunii, printr-o sondă 1/1000;
- Canalul 2, pentru achiziția curentului, printr-o sondă 0,01 V/A.

Oscilogramele impulsurilor aplicate celor două varistoare sunt prezentate în Anexa 3

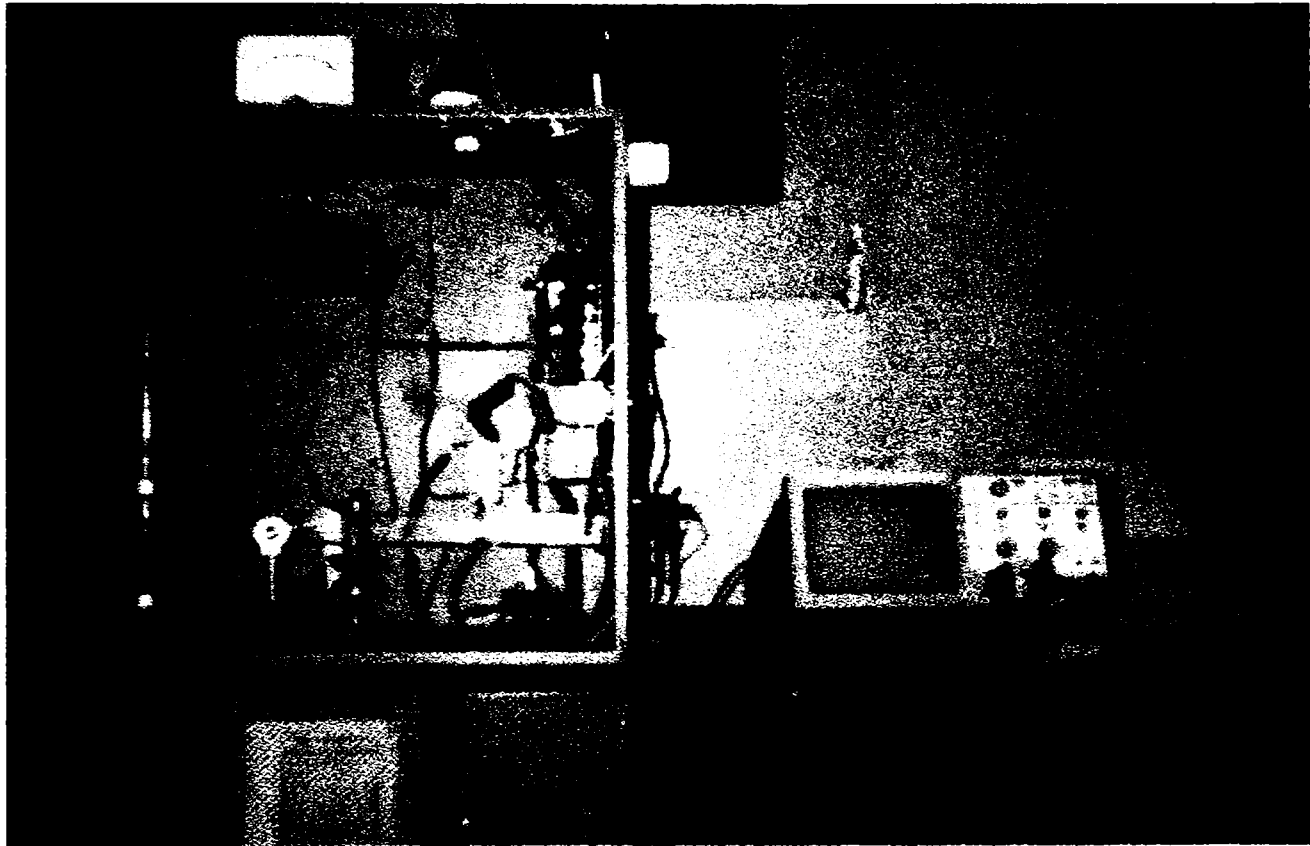


Figura VIII.13: Imagine de ansamblu a generatorului de impulsuri.

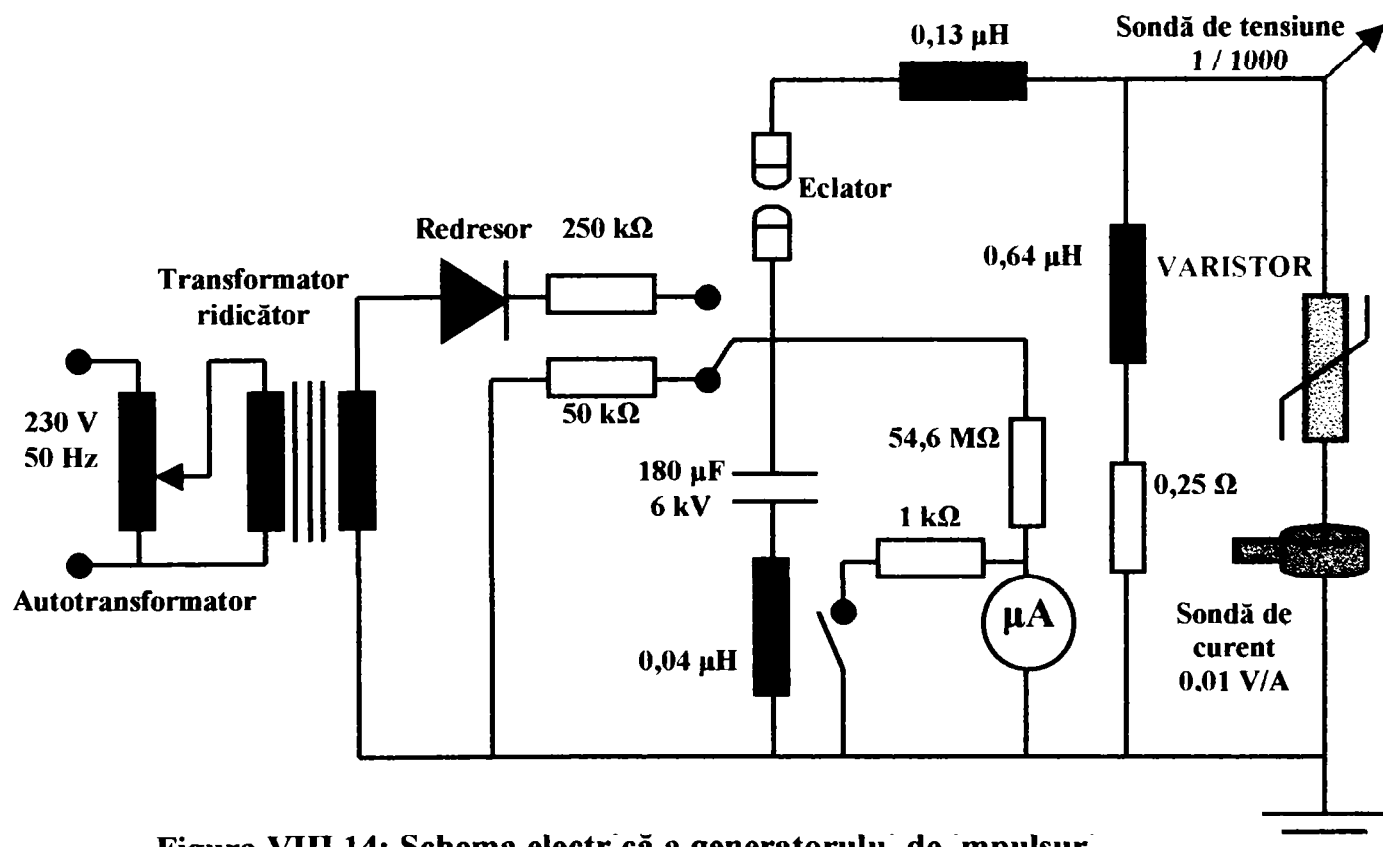


Figura VIII.14: Schema electrică a generatorului de impulsuri.



### VIII.3.1. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls, pentru un varistor singur

Vom prezenta mai întâi rezultatele modelărilor în situația varistorului independent, care nu este conectat în paralel cu nici un altul.

După încălzirea instantanee cauzată de aplicarea impulsului, urmează o răcire a varistorului, care este important să fie analizată, mai ales în situația în care există riscul aplicării unui alt impuls, la un interval de timp scurt (la mai puțin de 10 min).

În figura VIII.15 este prezentată repartiția temperaturilor în varistorul R la 60 s de la aplicarea impulsului.

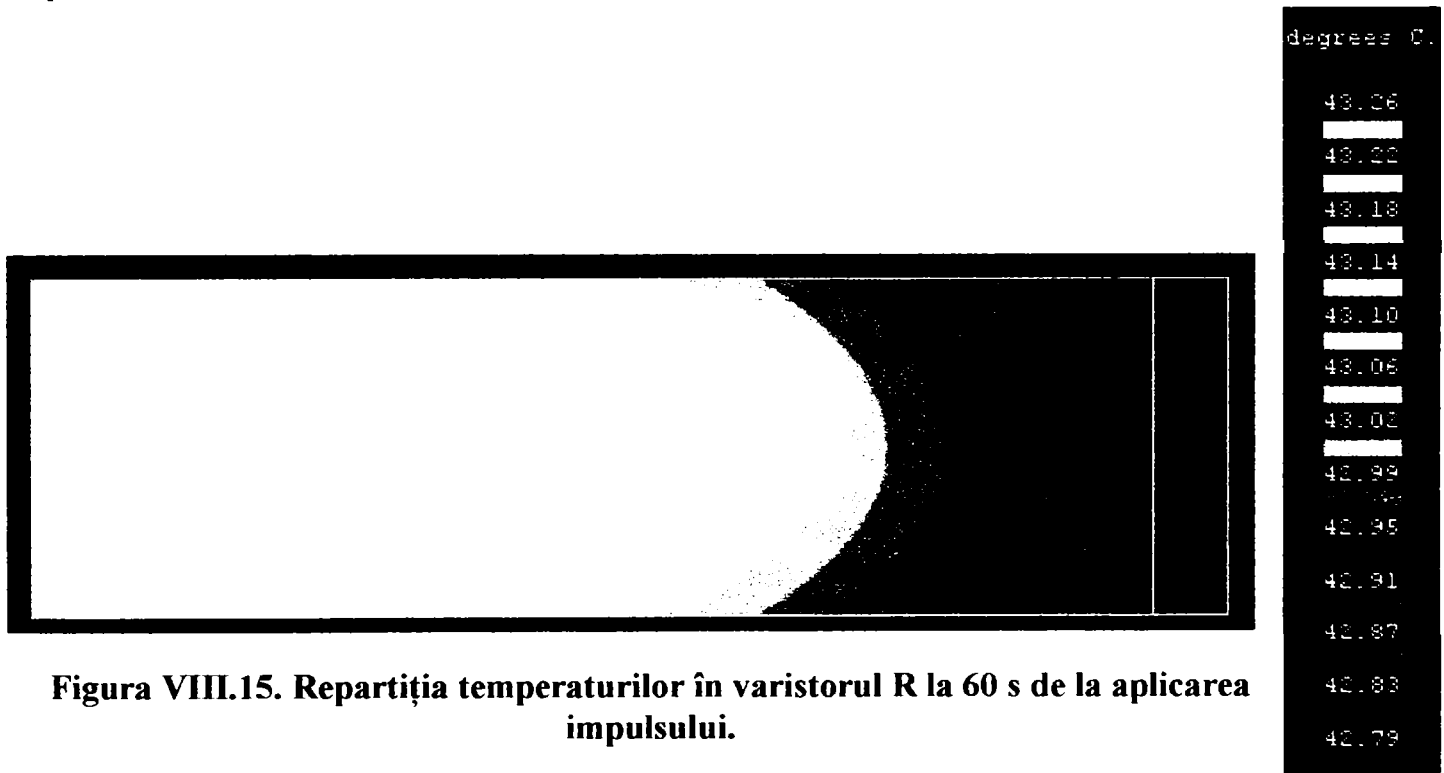


Figura VIII.15. Repartiția temperaturilor în varistorul R la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura VIII.16 se prezintă repartiția temperaturilor în varistorul R la 600 s de la aplicarea impulsului:

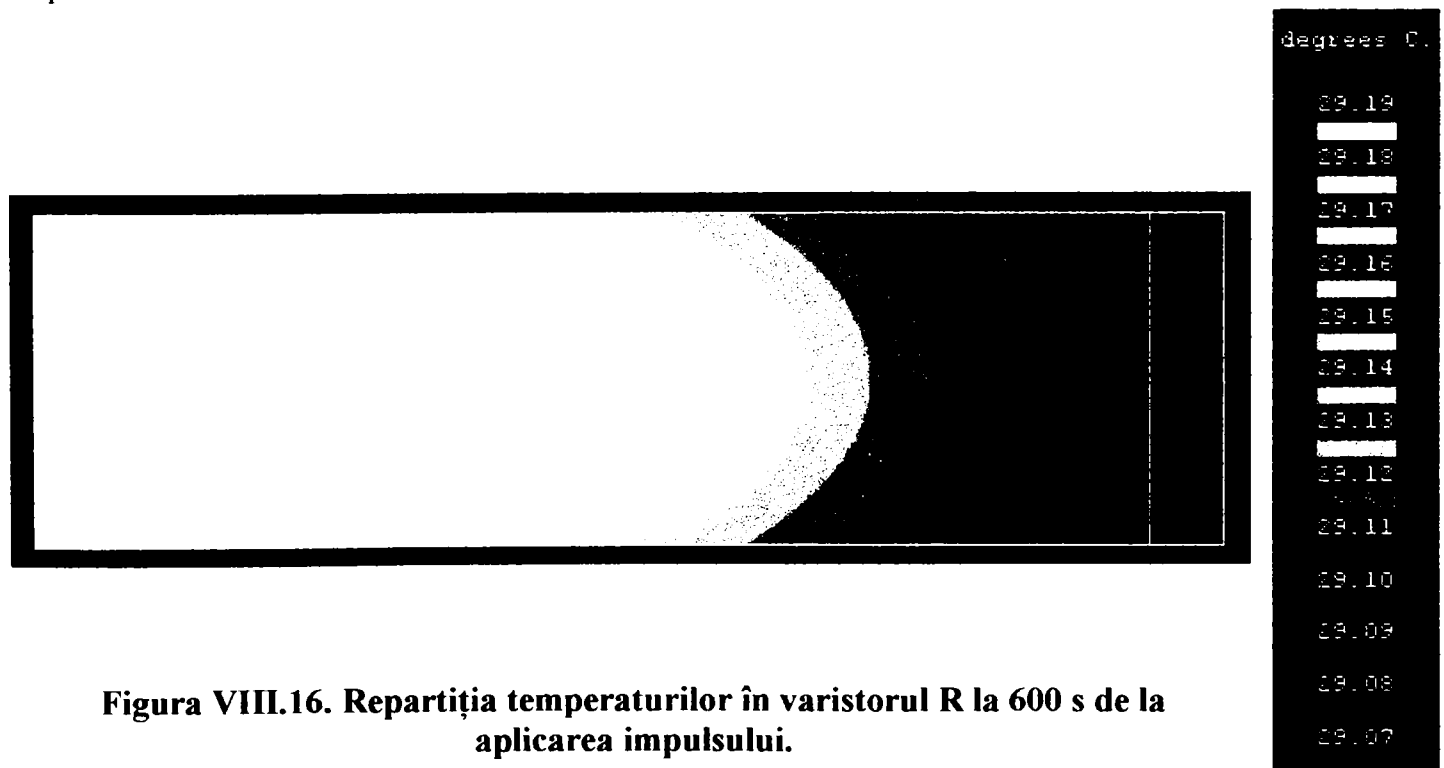


Figura VIII.16. Repartiția temperaturilor în varistorul R la 600 s de la aplicarea impulsului.



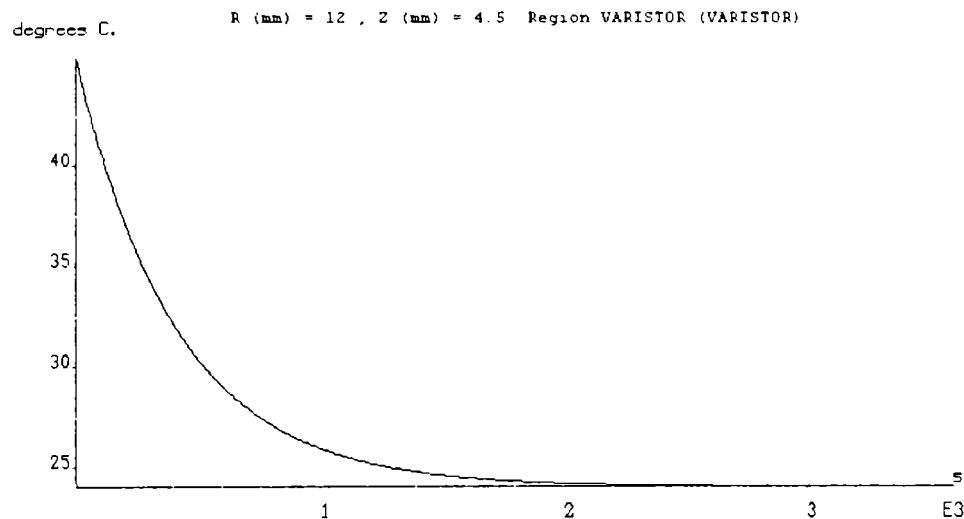
Supratemperatura maximă estimată a fi atinsă în timpul încălzirii este:

$$\tau = \frac{Q}{m_v \cdot c_v} = \frac{360}{20,4 \cdot 0,7534} = 23,89^\circ\text{C}, \text{ de unde: } \theta = 24 + 23,89 = 47,89^\circ\text{C} \quad (8.5)$$

S-a utilizat valoarea căldurii specifice a varistorului la  $20^\circ\text{C}$ , anume  $c_v = 0,7534 \text{ [J / (g} \cdot ^\circ\text{C)]}$

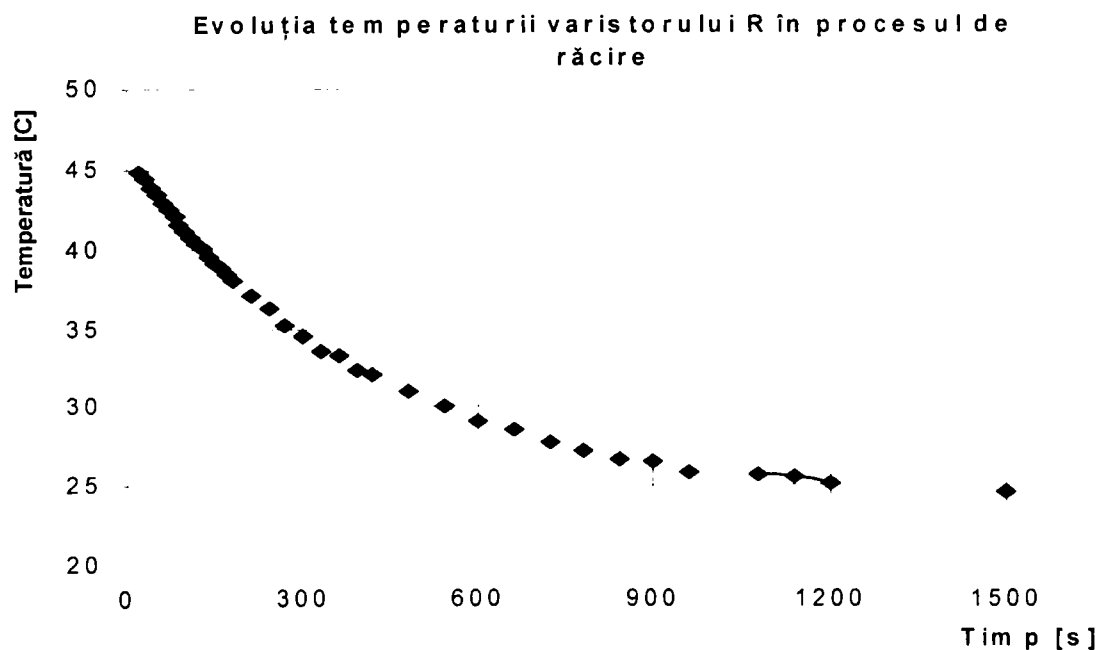
Supratemperatura măsurată, imediat după aplicarea impulsului, într-un punct situat pe fața superioară a varistorului, la  $R = 12 \text{ mm}$ , care este  $\tau = 22,23^\circ\text{C}$ , ceea ce corespunde unei temperaturi  $\theta = 24 + 22,23 = 46,23^\circ\text{C}$ .

În figura VIII.17 prezentăm evoluția în timp, în procesul de răcire, a temperaturii în punctul de coordonate:  $R = 12 \text{ mm}$  și  $Z = 4,5 \text{ mm}$ , așa cum rezultă în urma modelării cu **FLUX 2D**.



**Figura VIII.17: Evoluția în timp, rezultată în urma modelării numerice, a temperaturii varistorului R, într-un punct de coordonate (12, 4,5), în procesul de răcire.**

În figura VIII.18 prezentăm, pentru comparare, evoluția în timp a temperaturii, măsurată în același punct de coordonate  $R = 12, Z = 4,5$ :



**Figura VIII.18: Evoluția în timp, măsurată, a temperaturii varistorului R, într-un punct de coordonate (12, 4,5), în procesul de răcire.**

Comparând cele două grafice constatăm că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate, prin urmare rezultatele experimentale confirmă modelările numerice.



### VIII.3.2. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls, pentru varistoarele montate în paralel și cuplate termic

Vom începe prin a prezenta rezultatele modelărilor numerice.

În figura VIII.19 este prezentată repartiția temperaturilor în ansamblul varistoarelor R și S, la 60 s de la aplicarea impulsului.

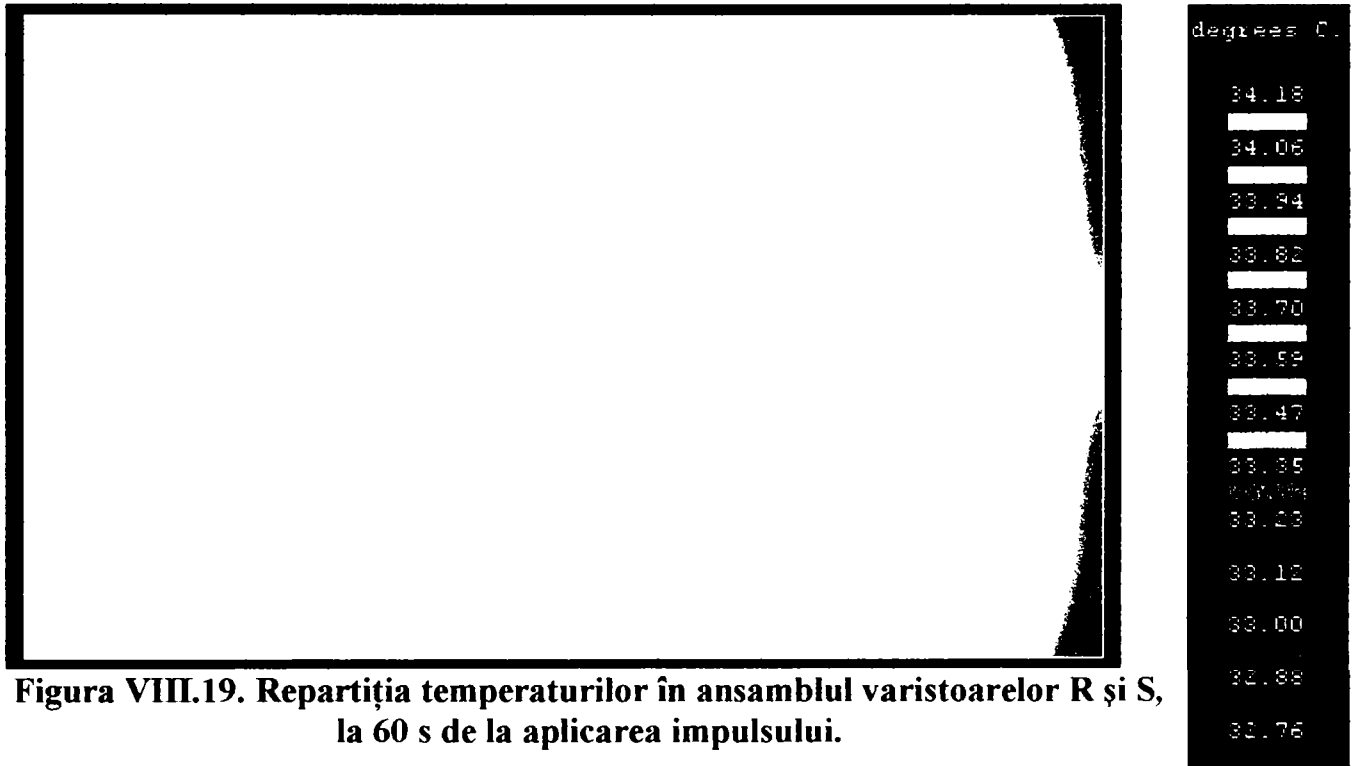


Figura VIII.19. Repartiția temperaturilor în ansamblul varistoarelor R și S, la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura VIII.20 este prezentată repartiția temperaturilor în ansamblul varistoarelor R și S, la 600 s de la aplicarea impulsului:

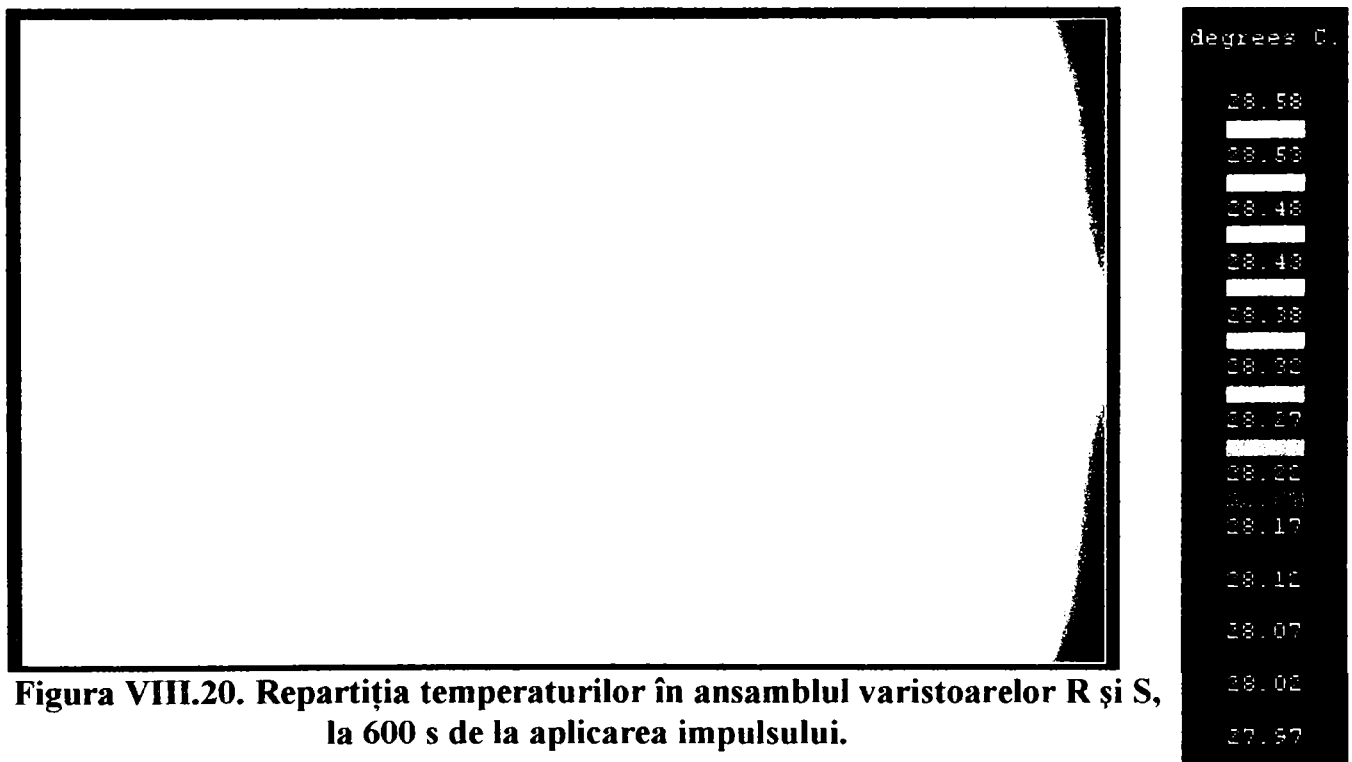


Figura VIII.20. Repartiția temperaturilor în ansamblul varistoarelor R și S, la 600 s de la aplicarea impulsului.

Procesul de răcire al varistoarelor poate fi considerat terminat după cca. 1800 – 2000 s, dar modelarea numerică a fost realizată pe un interval de 3600 s.

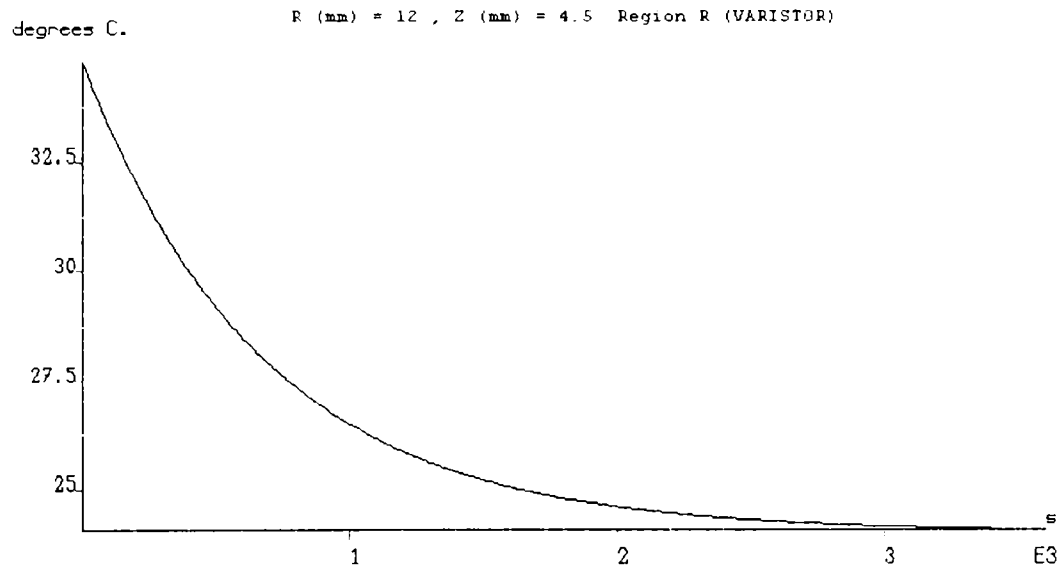




Și în acest caz, la fel ca în situația anterioară, s-au prezentat două repartiții ale temperaturii, obținute în timpul răcirii, la momente în care avem diferențe de temperatură apreciabile între diversele puncte ale ansamblului.

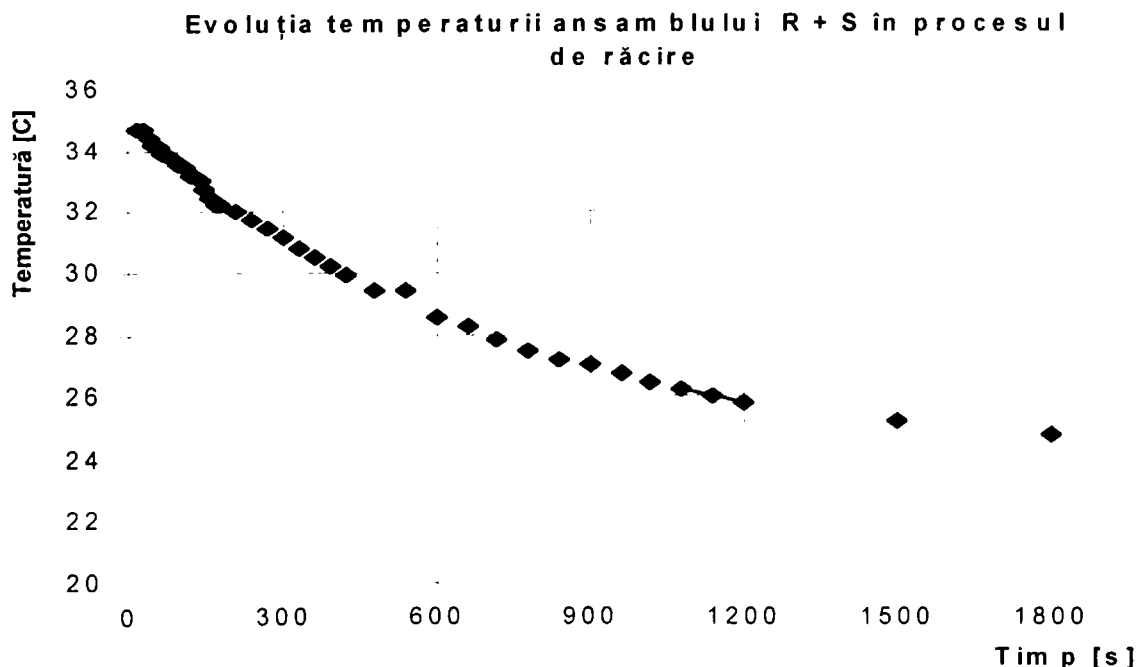
Supratemperatura măsurată, imediat după aplicarea impulsului, într-un punct situat pe fața superioară a varistorului, la  $R = 12$  mm, care este  $\tau = 10,9^\circ\text{C}$ , ceea ce corespunde unei temperaturi  $\theta = 24 + 10,9 = 34,9^\circ\text{C}$ .

În figura VIII.17 prezentăm evoluția în timp, în procesul de răcire, a temperaturii în punctul de coordonate:  $R = 12$  mm și  $Z = 4,5$  mm, așa cum rezultă în urma modelării cu **FLUX 2D**.



**Figura VIII.21: Evoluția în timp, rezultată în urma modelării numerice, a temperaturii ansamblului varistoarelor  $R$  și  $S$ , într-un punct de coordonate (12, 4,5), în procesul de răcire.**

În figura VIII.22 prezentăm, pentru comparare cu graficul anterior, evoluția în timp, măsurată experimental, a temperaturii ansamblului varistoarelor  $R$  și  $S$ , în procesul de răcire, într-un punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4,5$  mm.



**Figura VIII.22: Evoluția în timp, măsurată, a temperaturii ansamblului varistoarelor  $R$  și  $S$ , într-un punct de coordonate (12, 4,5), în procesul de răcire.**

Supratemperatura maximă estimată a fi atinsă în timpul încălzirii este:



$$\tau_c = \frac{Q}{2 \cdot m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}} = \frac{360}{2 \cdot 20,4 \cdot 0,7534 + 3,37 \cdot 0,383} = 11,23 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8.6)$$

$$\text{de unde} \quad \theta_c = 24 + 11,23 = 35,23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

S-a utilizat valoarea căldurii specifice a varistorului la 20°C, anume  $c_v = 0,7534 \text{ [J / (g} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)]}$  precum și căldura specifică a alamei la 20°C, anume  $c_{al} = 0,383 \text{ [J / (g} \cdot \text{ } ^\circ\text{C)]}$ .

Se observă că, și în acest caz, rezultatele experimentale sunt foarte apropiate de rezultatele modelărilor.

#### VIII.4. Concluzii

Conectarea în paralel a varistoarelor poate fi o soluție tehnică demnă de luat în considerare, doar în anumite condiții.

În regim de serviciu permanent, conectarea în paralel a varistoarelor nu aduce nici o îmbunătățire în funcționarea acestora. Mai mult chiar, în situația cuplajului termic între varistoare, prin pierderea unei fețe ca suprafață de disipare a căldurii, se ajunge la funcționarea varistorului la o temperatură mai mare decât în cazul în care ar funcționa independent.

În regim de serviciu de impuls, energia impulsului se repartizează celor două varistoare, în funcție de caracteristicile electrice ale fiecăruia. Din punct de vedere teoretic, dar și experimental, dacă cele două varistoare au caracteristici electrice apropiate, supratemperatura ajunge aproape la jumătate din valoarea care ar fi avut-o în cazul existenței unui singur varistor. Dacă între cele două varistoare nu există cuplaj termic, disiparea căldurii acumulate va avea loc mai rapid. Ca urmare soluția tehnică a funcționării varistoarelor în paralel fără cuplaj termic crește semnificativ stabilitatea termică a echipamentului în care sunt înglobate, cu condiția ca varistoarele să aibă performanțe aproape identice.

Cuplajul termic între varistoare devine util numai în situația în care caracteristicile electrice ale celor două varistoare sunt diferite (în primul rând există diferențe de până la 5% între tensiunile de prag  $U_N$  ale celor două). Chiar dacă pierderea unei suprafețe radiante îngreunează răcirea, cuplajul termic prin conducție conduce la egalizarea temperaturilor în cele două varistoare și determină astfel repartiția uniformă a energiei în masa celor două varistoare. În caz contrar varistorul care are tensiunea de prag cea mai redusă va prelua cea mai mare parte a energiei impulsului, care va duce la încălzirea nejustificată a acestuia, existând apoi chiar riscul ambalării termice, după trecerea impulsului, varistorul rămânând polarizat la tensiunea nominală a rețelei, dar la o temperatură care determină un curent sensibil mai mare decât curentul de scurgere nominal  $I_r$ . Ambalarea termică se poate instaura și la aplicarea unor impulsuri succesive, la intervale de timp mai mici de 10 minute, varistorul care primește impulsul fiind deja la o temperatură ridicată.

#### VIII.5. Contribuții personale și originale

Întreg acest capitol este realizat în baza contribuțiilor personale ale autorului, dintre care amintim:

- Propunerea și analiza soluției tehnice originale privind cuplajul termic a două varistoare conectate în paralel;
- Realizarea modelărilor numerice, atât în situația regimului de serviciu permanent, cât și în situația regimului de serviciu de impuls, pentru varistoarele funcționând independent, dar și pentru varistoarele funcționând în montate în paralel și cuplate termic;
- Conceperea programului în limbajul Borland C intitulat GIT-RE, prezentat în Anexa 3, care simulează funcționarea generatorului de impuls;
- Fabricarea celor două varistoare utilizate, conform tehnologiei prezentate în Capitolul III.
- Realizarea montajelor experimentale și a măsurătorilor, în toate situațiile enumerate mai sus;
- Analiza rezultatelor și obținerea unor concluzii privind soluția tehnică originală propusă:



## CAPITOLUL IX

### Analiza comparativă a stabilității termice, în regim de serviciu permanent pentru soluțiile tehnice propuse

Analiza stabilității termice în regim permanent, alături de analiza stabilității termice în regim de impuls, trebuie avute în vedere în conceperea și proiectarea echipamentelor de protecție contra supratensiunilor care utilizează varistoare pe bază de ZnO. Proiectantul de asemenea echipamente trebuie să evite apariția fenomenului de ambalare termică a varistoarelor, datorat alimentării acestora în regim permanent la o tensiune prea mare.

Configurațiile care vor fi analizate sunt cele prezentate în Capitolul VII.

Configurațiile **A,B,C,D,E** au la bază varistorul tip **ISKRA V250D32S**.

Configurațiile **M,N,P** au la bază varistorul tip **ISKRA V420D32S**.

Pentru fiecare configurație se va realiza o modelare numerică a procesului de încălzire, până la atingerea regimului termic permanent. Se vor prezenta și măsurători experimentale. Modelarea numerică se va efectua pe o durată a procesului de încălzire de 3600 s. Se vor lua în calcul 360 de pași de timp, durata unui pas de timp fiind de 10 s. Pentru fiecare pas de timp se vor efectua 5 iterații, precizia fiind de 0,001.

Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent se va face în condițiile de exploatare specificate de către fabricantul de varistoare ca fiind cele mai dificile, prin alimentarea acestora în curent continuu, la o tensiune corespunzătoare coeficientului limită de utilizare, anume  $C = U / U_N = 0,82$ . Prin urmare:

- Pentru configurațiile **A,B,C,D,E**, tensiunea corespunzătoare pentru  $C = 0,82$  va fi de 320 V c.c.
- Pentru configurațiile **M,N,P** tensiunea corespunzătoare pentru  $C = 0,82$  va fi de 560 V c.c.

Curenții care se stabilesc prin varistoare în regim de serviciu permanent vor fi determinați experimental. Valoarea acestora va fi utilizată și în modelările numerice, în calculul puterii disipate.

În situația analizei stabilității termice în regim de serviciu permanent, evoluția în timp a temperaturii sau a curentului nu interesează decât într-o mică măsură. Prezintă interes temperatura (supratemperatura) de regim termic permanent precum și curentul de regim permanent. Practic, puterea dezvoltată în varistor nu este constantă pe durata întregului proces de încălzire până la atingerea regimului termic staționar, ea crescând o dată cu creșterea curentului, fenomen valabil mai ales în primele 1500 – 1800 s.

Instalația experimentală pentru încercări în regim de serviciu permanent a fost prezentată în capitolele anterioare. Nu se va folosi etuva, temperatura ambiantă la care se efectuează modelările și măsurătorile va fi precizată pentru fiecare caz în parte. Varistoarele sunt plasate vertical, pentru a avea aceeași transmisivitate termică pe ambele fețe. Deoarece varistoarele sunt dispuse într-o incintă etanșă, curenții de aer din laborator nu influențează deloc transferul termic.

Transmisivitățile termice globale (convecție + conducție) vor fi [24]:

- $\alpha_v = 17 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$  pentru materialul varistor și izolația de rășină epoxidică;
- $\alpha_{al} = 15 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$  pentru masele adiționale de alamă;

Se va reprezenta repartiția temperaturilor în interiorul fiecăreia din configurațiile analizate, la 10 s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire precum și la 3600 s, când acest proces este încheiat, deci s-a trecut la regimul termic permanent. Se va calcula o supratemperatură de regim permanent estimată,  $\tau_{se}$ , conform formulelor enunțate în capitolele anterioare. Evoluția în timp a temperaturii într-un punct oarecare, așa cum rezultă în urma modelării, va fi reprezentată grafic.

Se vor prezenta comparativ, pentru diverse puncte de pe suprafața de contact cu aerul:

- supratemperaturile de regim permanent obținute în urma modelării numerice;
- supratemperaturile de regim permanent obținute în urma măsurătorilor experimentale;



## IX.1. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația A

Configurația A a fost prezentată în Subcapitolul VII.2.1.

Curentul de regim staționar, determinat experimental, este  $I = 7,1 \cdot 10^{-4}$  A.

Temperatura ambiantă luată în calcul este de 24 °C

În figura IX.1. se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul configurației A, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

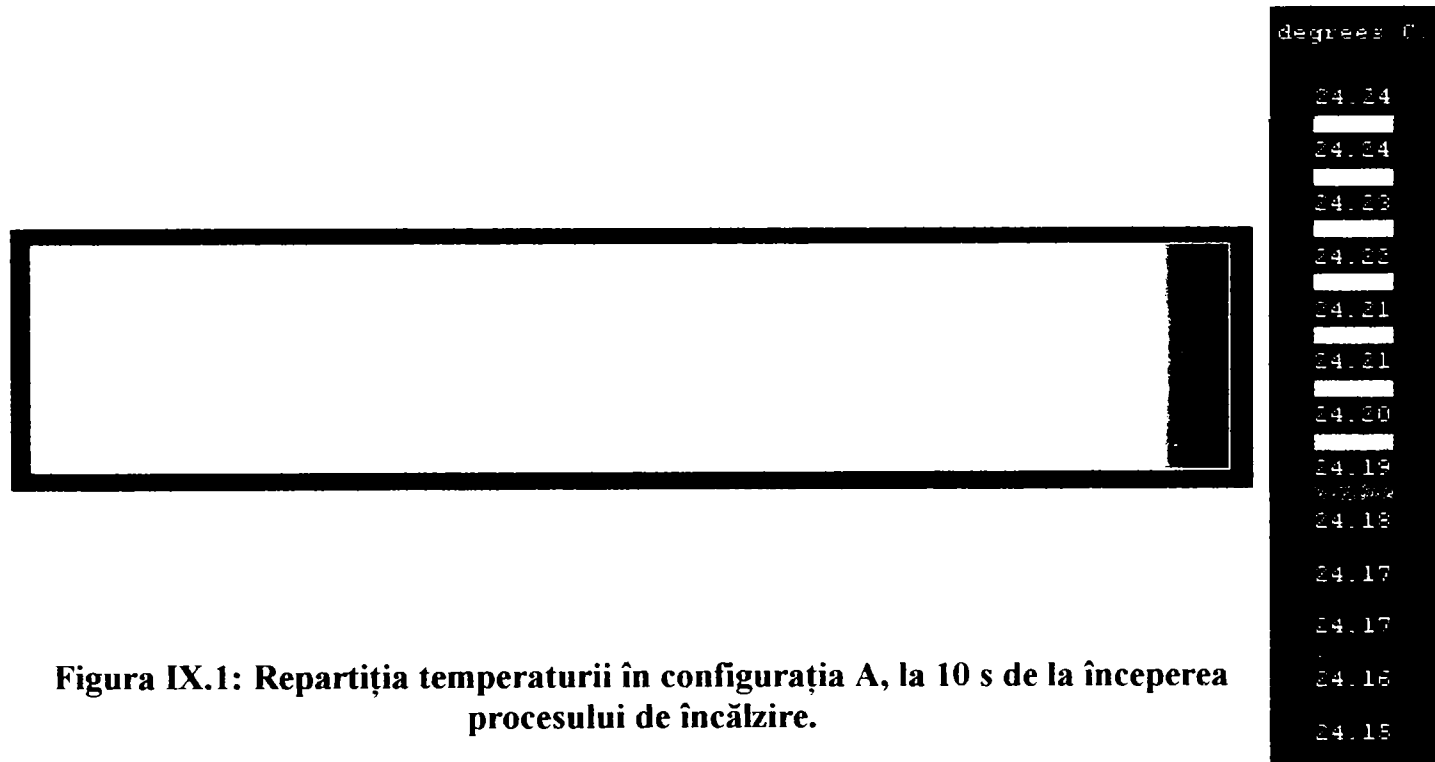


Figura IX.1: Repartiția temperaturii în configurația A, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura IX.2 se prezintă repartiția temperaturilor în interiorul configurației A, la trecerea a 3600 de s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

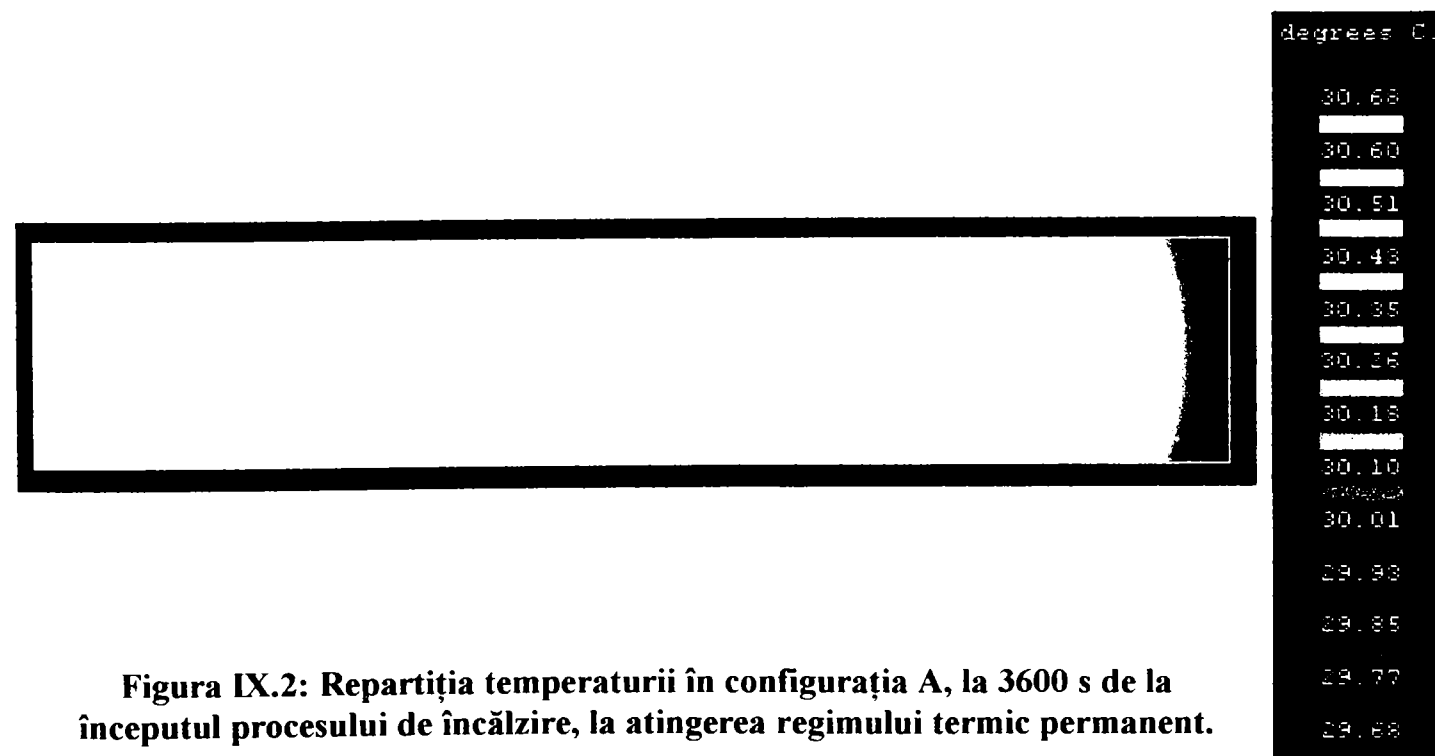


Figura IX.2: Repartiția temperaturii în configurația A, la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației A, în regim permanent, nu depășește 1 °C, observație confirmată și experimental.

Suprafața laterală a varistorului este  $S_{lv} = 1,91 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Configurația A nu are masă adițională din alamă.

Puterea disipată are valoarea  $P = U \cdot I = 320 \cdot 7,1 \cdot 10^{-4} = 0,227 \text{ W}$ .

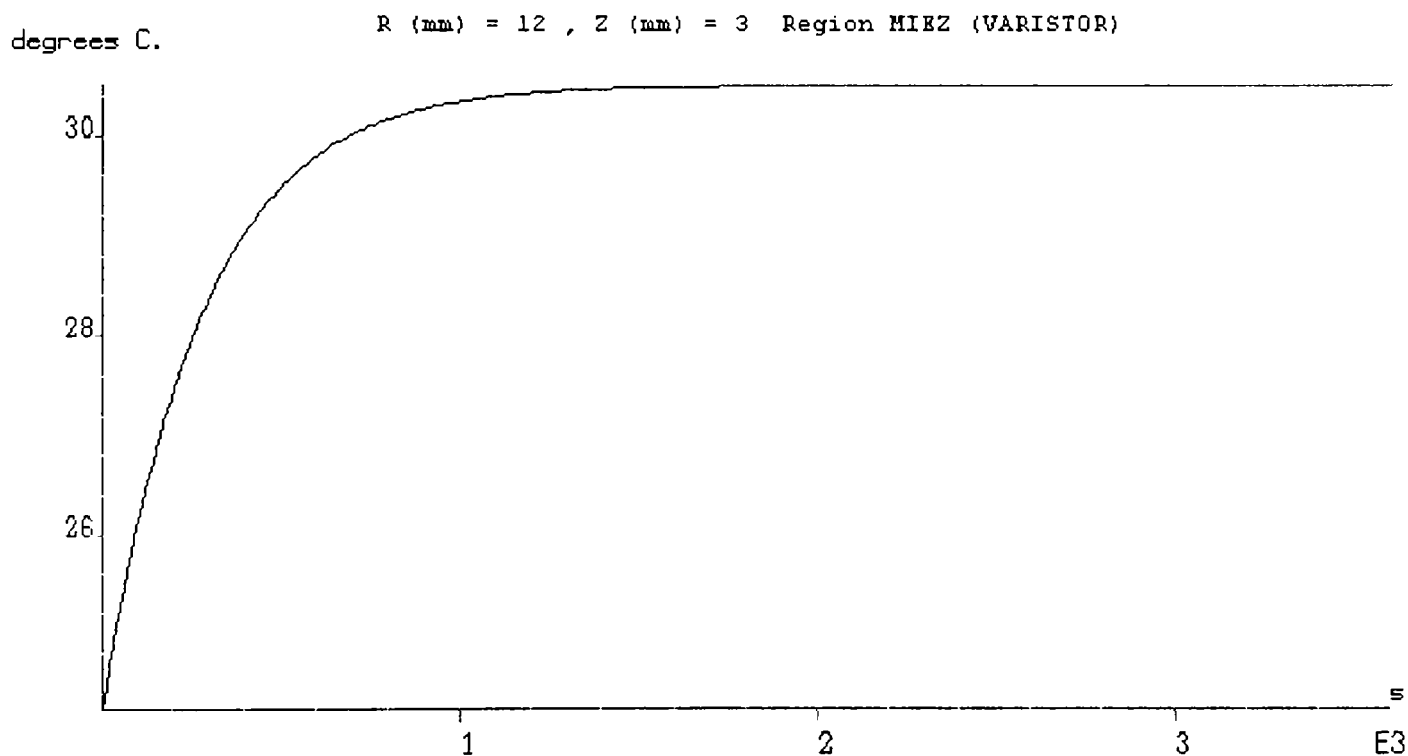
Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$  este, în baza formulelor anterior determinate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha_v \cdot S_{lv}} = \frac{0,227}{17 \cdot 1,91 \cdot 10^{-3}} = 6,99 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.1)$$

Cea mai mare supratemperatură întâlnită în urma modelării regimului permanent, în configurația A este:

$$\tau = 6,68 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.2)$$

În figura IX.3 este prezentată evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării numerice a procesului de încălzire, într-un punct de coordonate  $R = 12 \text{ mm}$ ,  $Z = 3 \text{ mm}$ .



**Figura IX.3: Evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării procesului de încălzire, pentru un punct de coordonate (12, 3) aparținând configurației A.**

Graficul este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În continuare vom prezenta, în tabelul IX.1, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic, pentru câteva puncte de pe suprafața aflată în contact direct cu aerul:

| Coordonatele punctului [mm] | Supratemperatura rezultată în urma modelării [°C] | Supratemperatura măsurată [°C] |
|-----------------------------|---|--------------------------------|
| (12, 3)                     | 6,51  | 6,43                           |
| (12, 0)                     | 6,51  | 6,35                           |
| (1, 3)                      | 6,68  | 6,74                           |
| (1, 0)                      | 6,68  | 6,62                           |

**Tabelul IX.1: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru configurația A.**

Se observă că rezultatele experimentale confirmă destul de bine rezultatele modelării numerice.





## IX.2. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația B

Configurația B a fost prezentată în Subcapitolul VII.2.2.

Curentul de regim staționar, determinat experimental, este  $I = 7,2 \cdot 10^{-4}$  A.

Temperatura ambiantă luată în calcul este de 24 °C

În figura IX.4. se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul configurației B, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

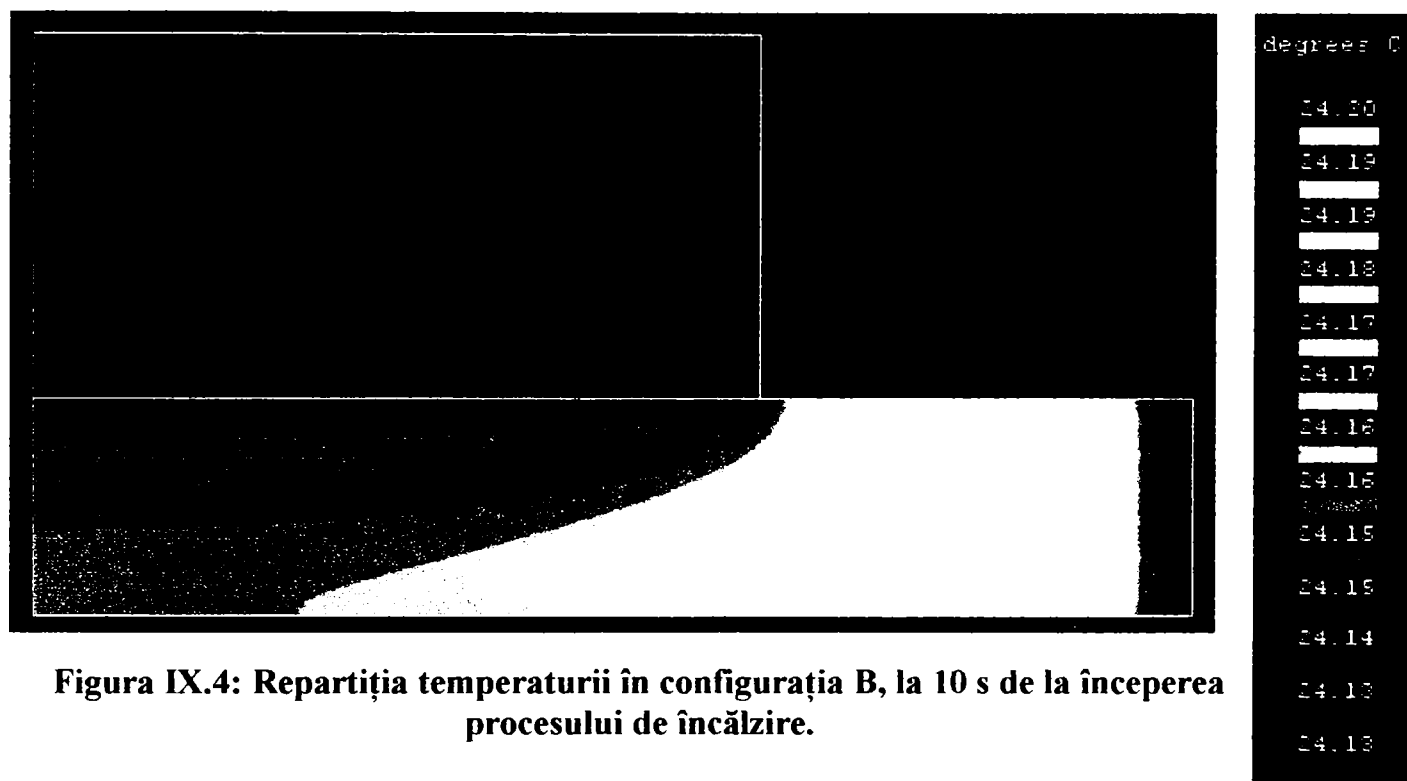


Figura IX.4: Repartiția temperaturii în configurația B, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura IX.5 se prezintă repartiția temperaturilor în interiorul configurației B, la trecerea a 3600 de s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

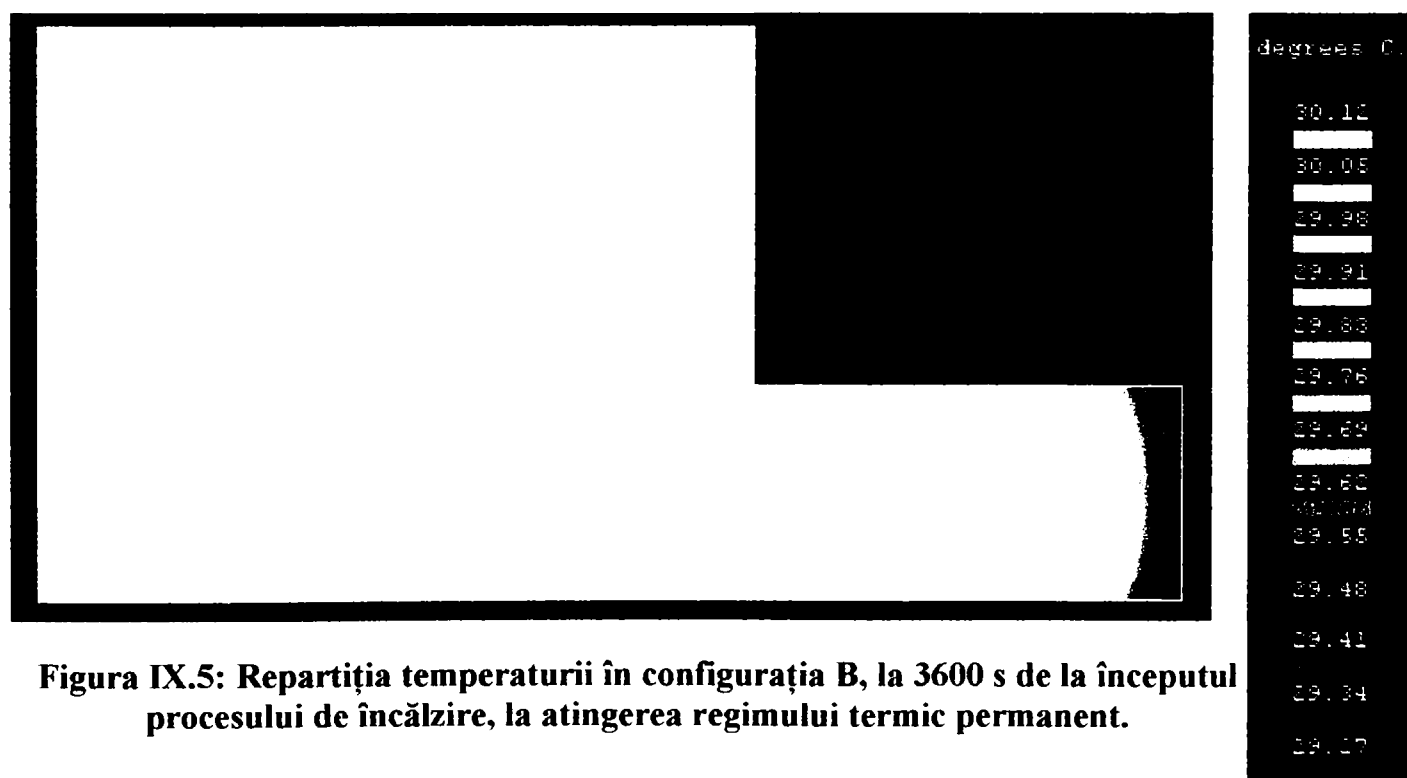


Figura IX.5: Repartiția temperaturii în configurația B, la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației **B**, în regim permanent, nu depășește  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , observație confirmată și experimental.

Suprafața laterală rămasă varistorului este  $S_{lv} = 1,595 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2$ .

Suprafața laterală în contact cu aerul pentru alamă este  $S_{lal} = 0,628 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2$

Puterea disipată are valoarea  $P = U \cdot I = 320 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} = 0,230\text{ W}$ .

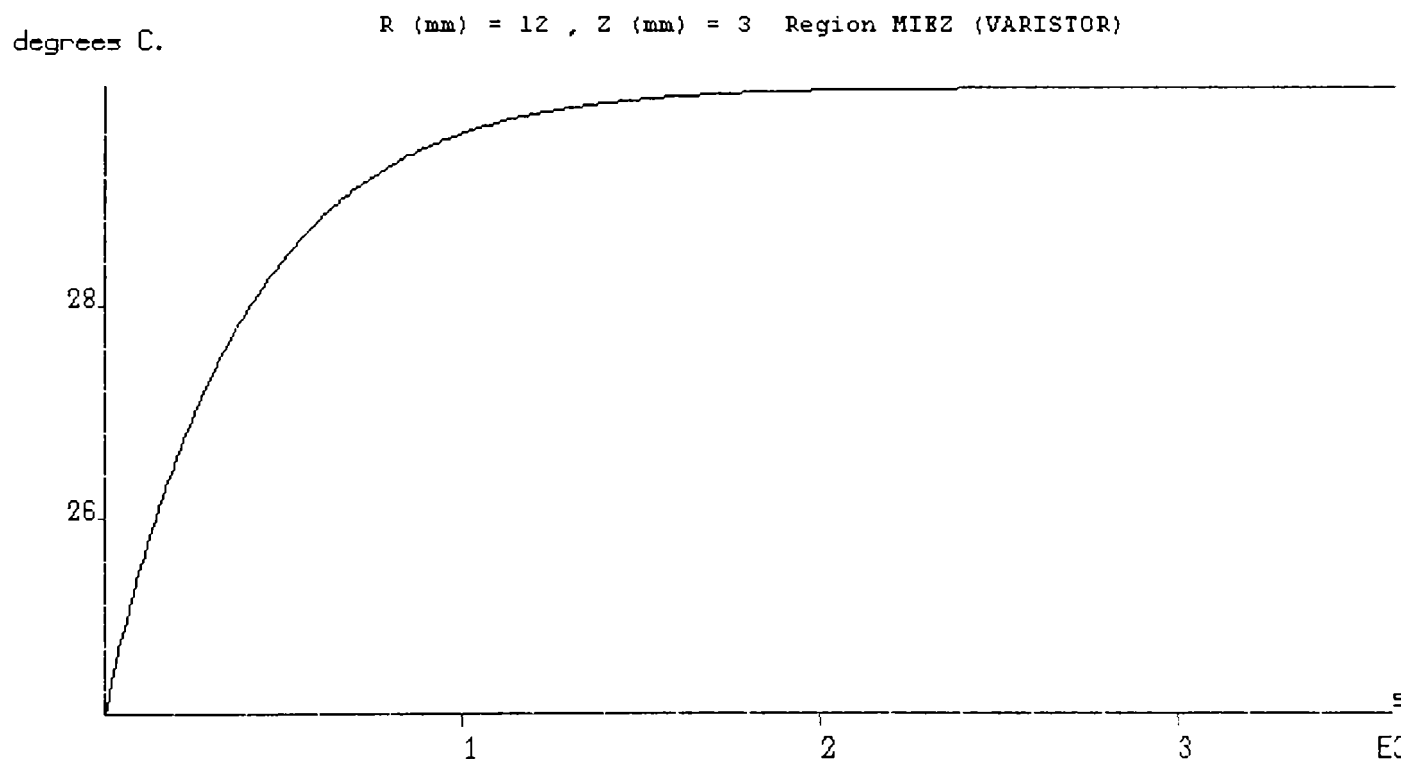
Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$  este, în baza formulelor anterior determinate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{lal}} = \frac{0,227}{17 \cdot 1,595 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 0,628 \cdot 10^{-3}} = 6,29\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (9.3)$$

Cea mai mare supratemperatură întâlnită în urma modelării regimului permanent, în configurația **B** este:

$$\tau = 6,12\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (9.4)$$

În figura IX.6 este prezentată evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării numerice a procesului de încălzire, într-un punct de coordonate  $R = 12\text{ mm}$ ,  $Z = 3\text{ mm}$ .



**Figura IX.6: Evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării procesului de încălzire, pentru un punct de coordonate (12, 3) aparținând configurației B.**

Graficul este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În continuare vom prezenta, în tabelul IX.2, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic, pentru câteva puncte de pe suprafața aflată în contact direct cu aerul:

| Coordonatele punctului [mm] | Supratemperatura rezultată în urma modelării [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Supratemperatura măsurată [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|-----------------------------|---|--|
| (12, 3)                     | 6,05  | 5,88   |
| (12, 0)                     | 6,05  | 6,15   |
| (1, 8)                      | 6,12  | 5,94   |
| (1, 0)                      | 6,12  | 6,24   |

**Tabelul IX.2: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru configurația B.**

Se observă că rezultatele experimentale confirmă destul de bine rezultatele modelării numerice.



### IX.3. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația C

Configurația C a fost prezentată în Subcapitolul VII.2.3.

Curentul de regim staționar, determinat experimental, este  $I = 7,1 \cdot 10^{-4}$  A.

Temperatura ambiantă luată în calcul este de 25 °C

În figura IX.7. se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul configurației C, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

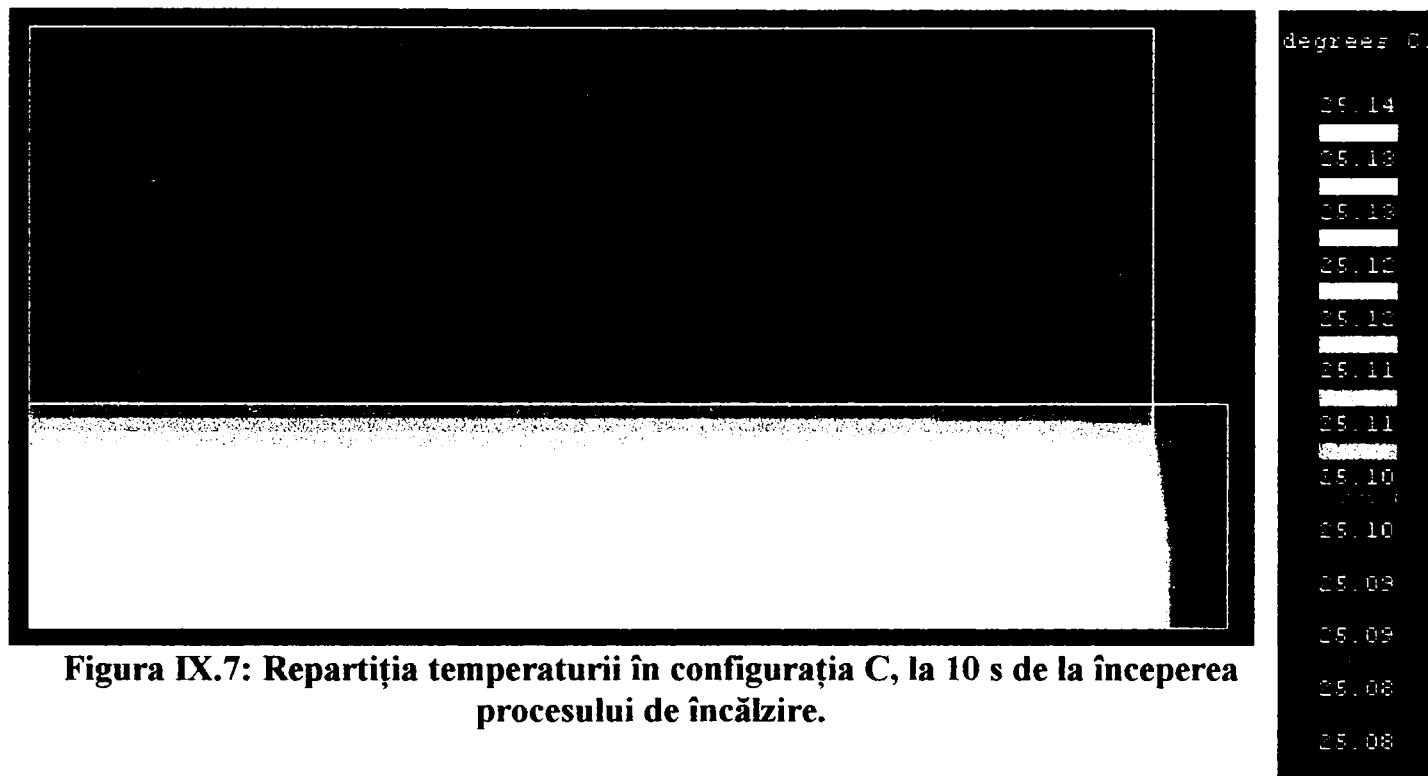


Figura IX.7: Repartiția temperaturii în configurația C, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura IX.8 se prezintă repartiția temperaturilor în interiorul configurației C, la trecerea a 3600 de s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

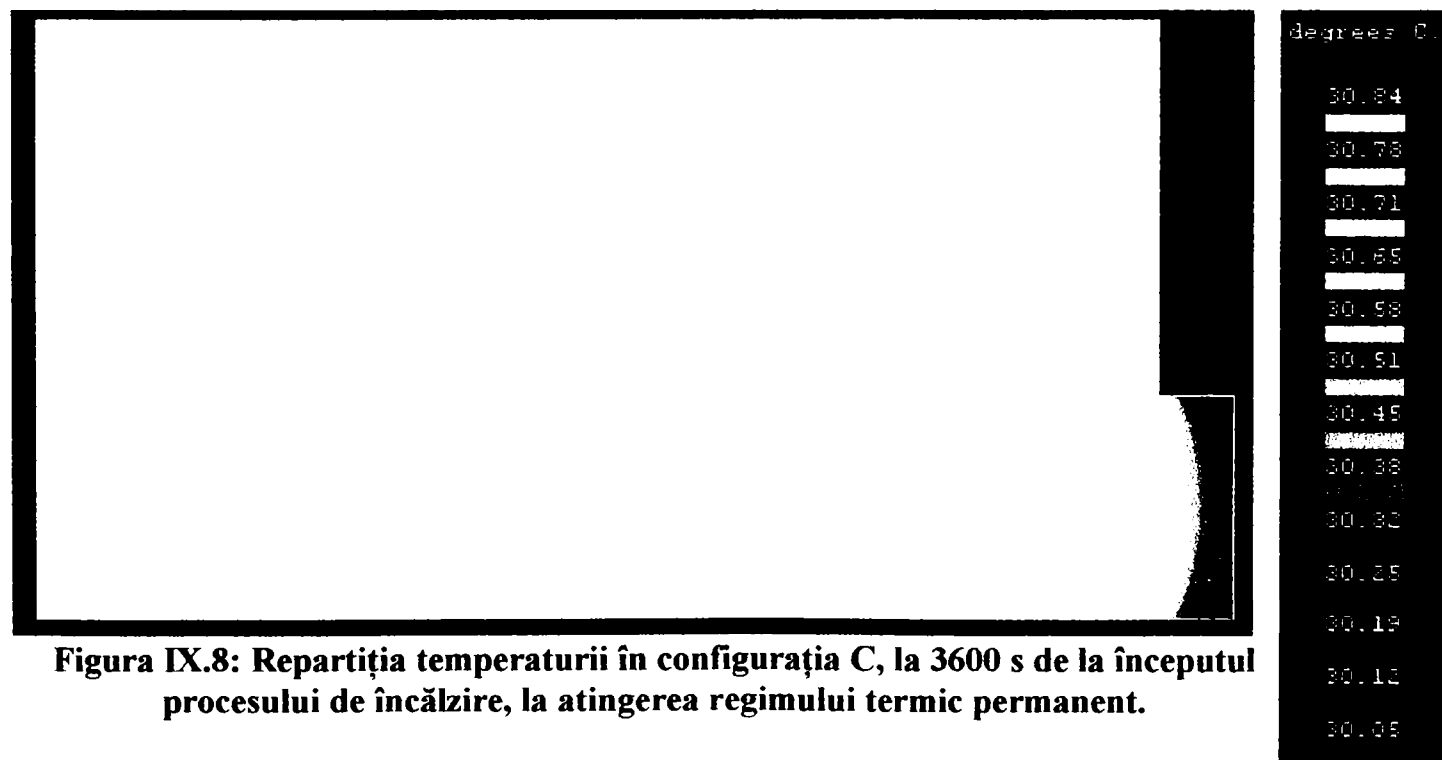


Figura IX.8: Repartiția temperaturii în configurația C, la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației C, în regim permanent, nu depășește 1 °C, observație confirmată și experimental.

Suprafața laterală rămasă varistorului este  $S_{lv} = 1,203 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Suprafața laterală în contact cu aerul pentru alamă este  $S_{lal} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Puterea disipată are valoarea  $P = U \cdot I = 320 \cdot 7,1 \cdot 10^{-4} = 0,227 \text{ W}$ .

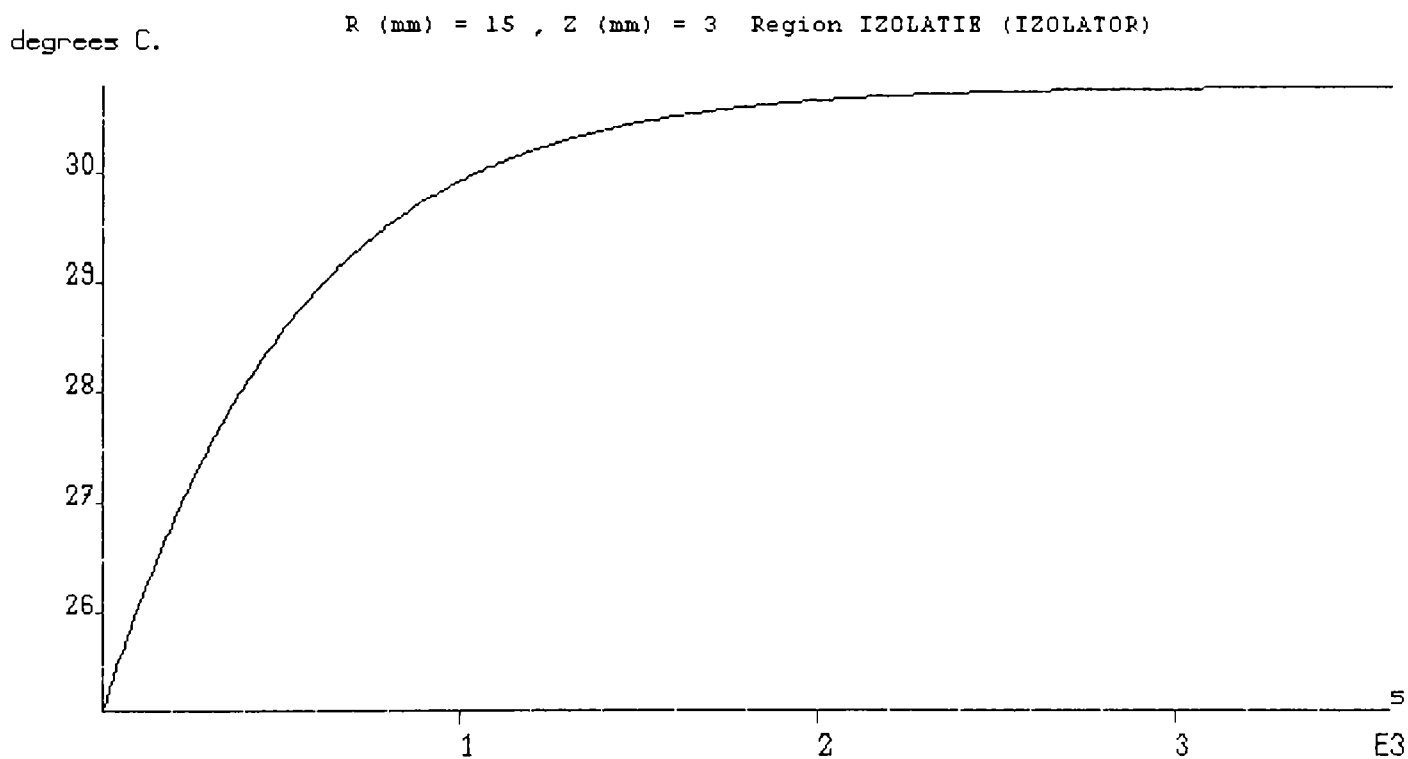
Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$  este, în baza formulelor anterior determinate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{lal}} = \frac{0,227}{17 \cdot 1,203 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 1,17 \cdot 10^{-3}} = 6,05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.5)$$

Cea mai mare supratemperatură întâlnită în urma modelării regimului permanent, în configurația C este:

$$\tau = 5,84 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.6)$$

În figura IX.9 este prezentată evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării numerice a procesului de încălzire, într-un punct de coordonate  $R = 15 \text{ mm}$ ,  $Z = 3 \text{ mm}$ .



**Figura IX.9: Evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării procesului de încălzire, pentru un punct de coordonate (15, 3) aparținând configurației C.**

Graficul este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În continuare vom prezenta, în tabelul IX.3, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic, pentru câteva puncte de pe suprafața aflată în contact direct cu aerul:

| Coordonatele punctului [mm] | Supratemperatura rezultată în urma modelării [°C] | Supratemperatura măsurată [°C] |
|-----------------------------|---|--------------------------------|
| (12, 8)                     | 5,84  | 5,65                           |
| (12, 0)                     | 5,84  | 5,7                            |
| (1, 8)                      | 5,84  | 5,65                           |
| (1, 0)                      | 5,84  | 5,92                           |

**Tabelul IX.3: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru configurația C.**

Se observă că rezultatele experimentale confirmă destul de bine rezultatele modelării numerice.



### IX.4. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația D

Configurația D a fost prezentată în Subcapitolul VII.2.4.

Curentul de regim staționar, determinat experimental, este  $I = 7,1 \cdot 10^{-4}$  A.

Temperatura ambiantă luată în calcul este de 24 °C.

În figura IX.10. se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul configurației D, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

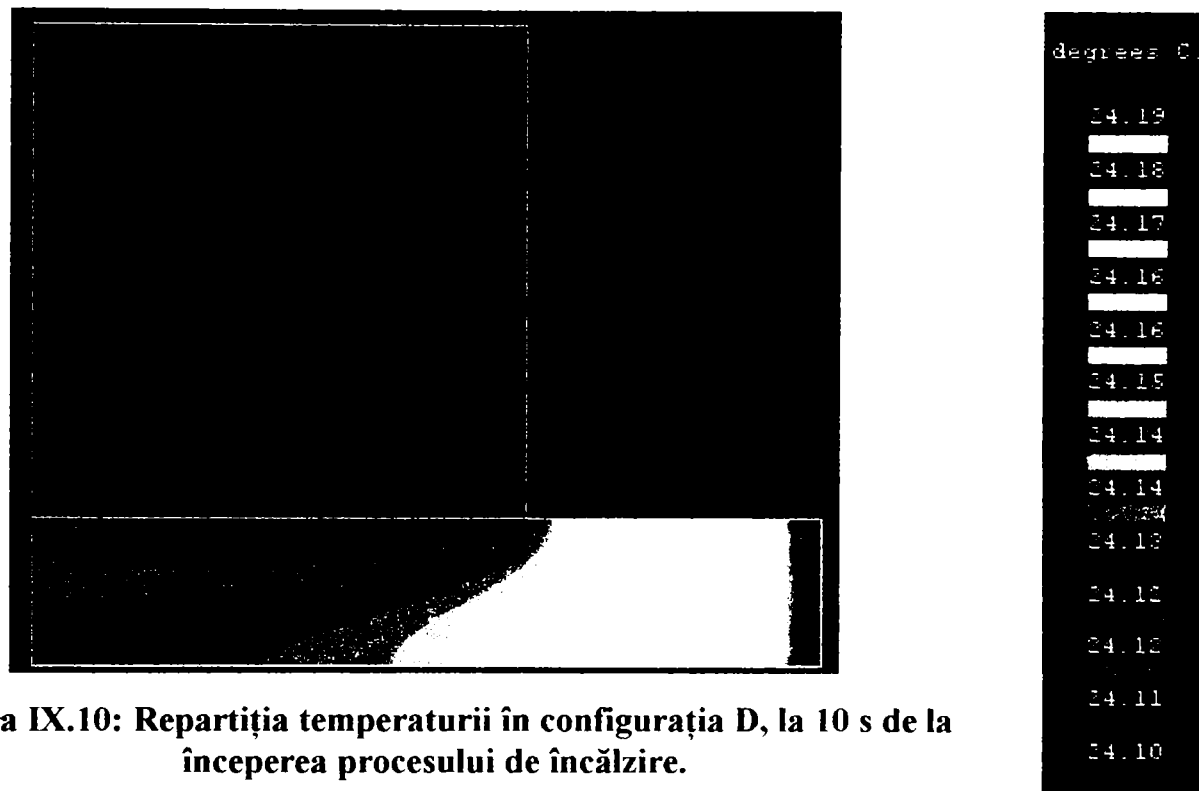


Figura IX.10: Repartiția temperaturii în configurația D, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura IX.11 se prezintă repartiția temperaturilor în interiorul configurației D, la trecerea a 3600 de s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

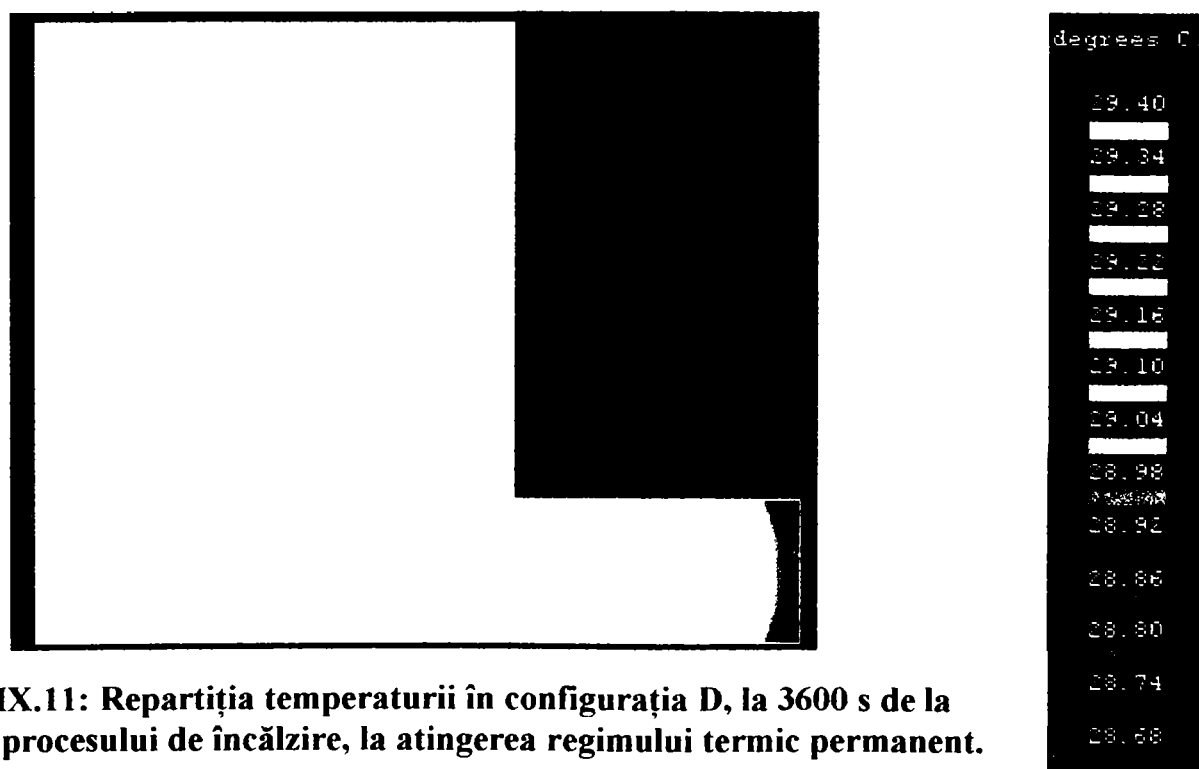


Figura IX.11: Repartiția temperaturii în configurația D, la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.





Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației **D**, în regim permanent, nu depășește  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , observație confirmată și experimental.

Suprafața laterală rămasă varistorului este  $S_{lv} = 1,595 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2$ .

Suprafața laterală în contact cu aerul pentru alamă este  $S_{lal} = 0,942 \cdot 10^{-3}\text{ m}^2$

Puterea disipată are valoarea  $P = U \cdot I = 320 \cdot 7,1 \cdot 10^{-4} = 0,227\text{ W}$ .

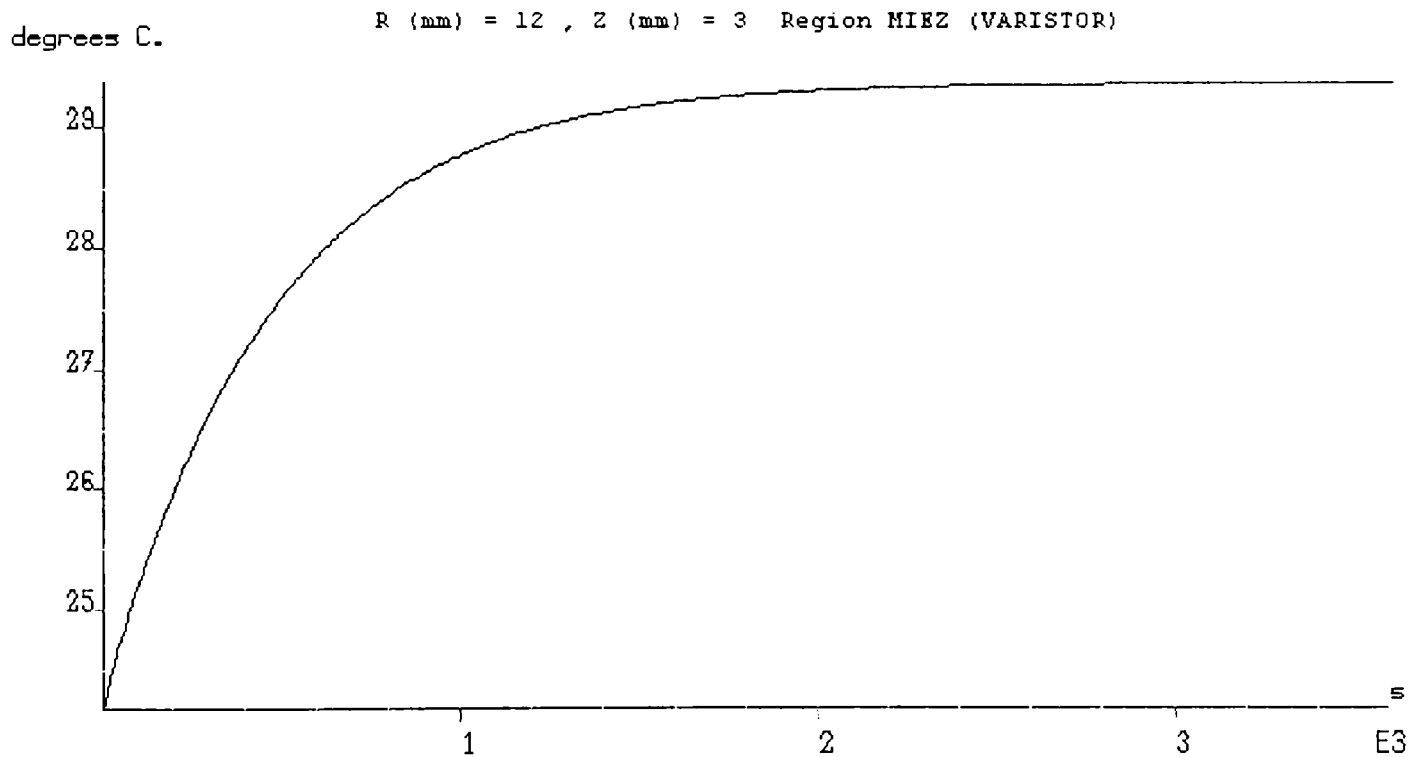
Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$  este, în baza formulelor anterior determinate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{lal}} = \frac{0,227}{17 \cdot 1,595 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 0,942 \cdot 10^{-3}} = 5,576\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (9.7)$$

Cea mai mare supratemperatură întâlnită în urma modelării regimului permanent, în configurația **D** este:

$$\tau = 5,4\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (9.8)$$

În figura IX.12 este prezentată evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării numerice a procesului de încălzire, într-un punct de coordonate  $R = 12\text{ mm}$ ,  $Z = 3\text{ mm}$ .



**Figura IX.12: Evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării procesului de încălzire, pentru un punct de coordonate (12, 3) aparținând configurației **D**.**

Graficul este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În continuare vom prezenta, în tabelul IX.4, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic, pentru câteva puncte de pe suprafața aflată în contact direct cu aerul:

| Coordonatele punctului [mm] | Supratemperatura rezultată în urma modelării [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Supratemperatura măsurată [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|-----------------------------|---|--|
| (12, 3)                     | 5,4   | 5,31   |
| (12, 0)                     | 5,4   | 5,48   |
| (1, 8)                      | 5,4   | 5,23   |
| (1, 0)                      | 5,4   | 5,52   |

**Tabelul IX.4: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru configurația **D**.**

Se observă că rezultatele experimentale confirmă destul de bine rezultatele modelării numerice.



## IX.5. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația E

Configurația E a fost prezentată în Subcapitolul VII.2.5.

Curentul de regim staționar, determinat experimental, este  $I = 7 \cdot 10^{-4}$  A.

Temperatura ambiantă luată în calcul este de 24 °C.

În figura IX.13. se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul configurației E, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

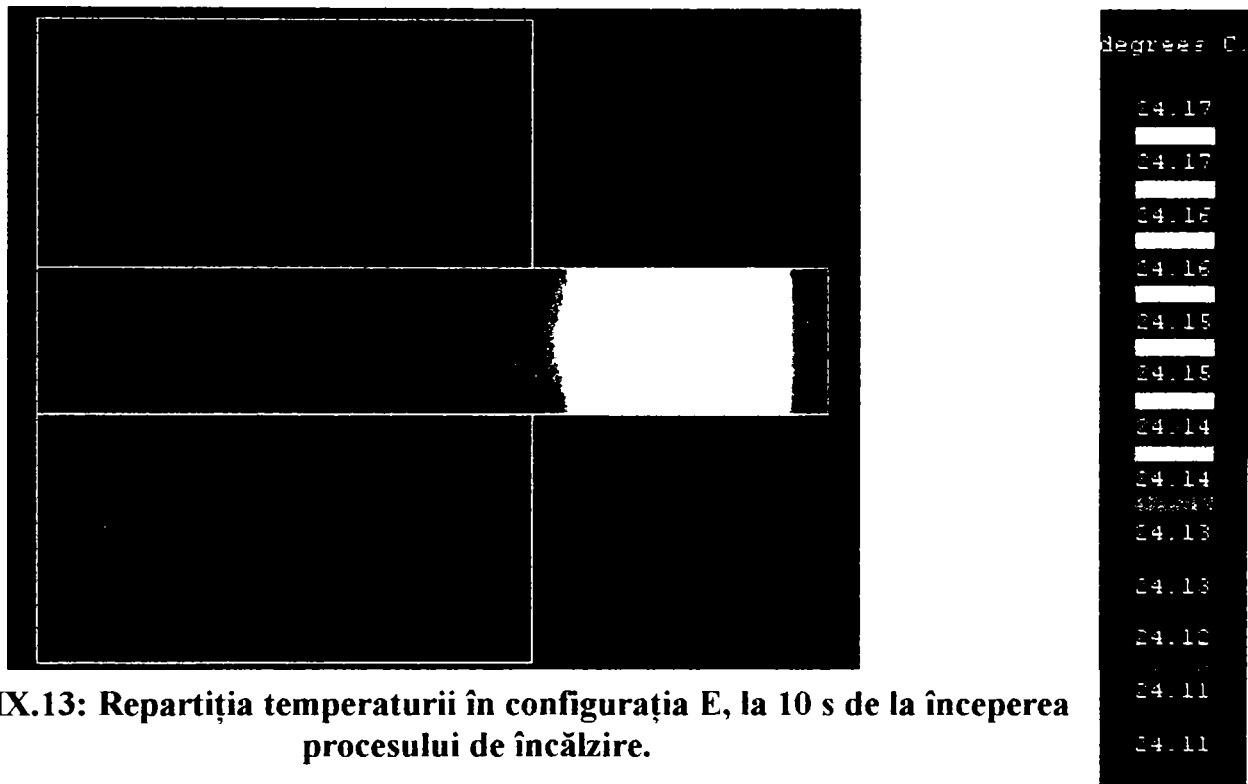


Figura IX.13: Repartiția temperaturii în configurația E, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura IX.14 se prezintă repartiția temperaturilor în interiorul configurației E, la trecerea a 3600 de s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

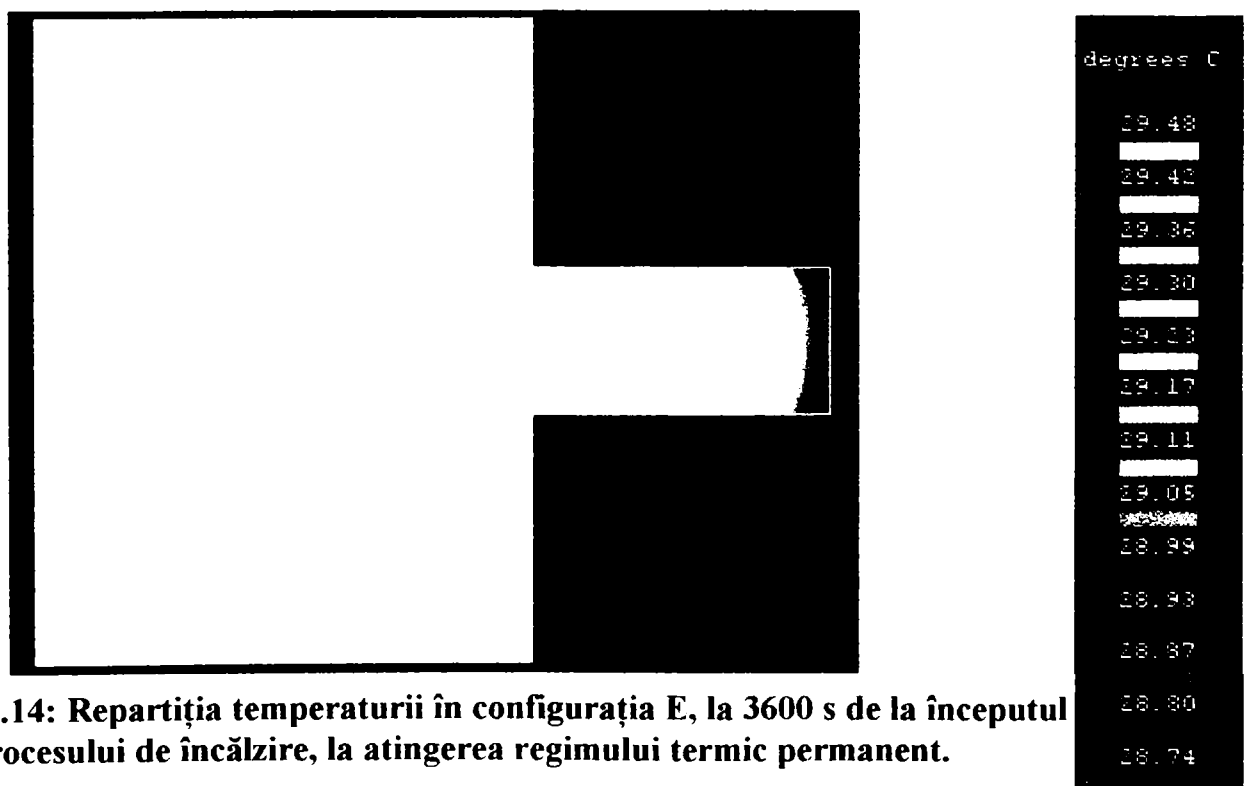


Figura IX.14: Repartiția temperaturii în configurația E, la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației E, în regim permanent, nu depășește 1 °C, observație confirmată și experimental.

Suprafața laterală rămasă varistorului este  $S_{lv} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Suprafața laterală în contact cu aerul pentru alamă este  $S_{lal} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Puterea disipată are valoarea  $P = U \cdot I = 320 \cdot 7 \cdot 10^{-4} = 0,224 \text{ W}$ .

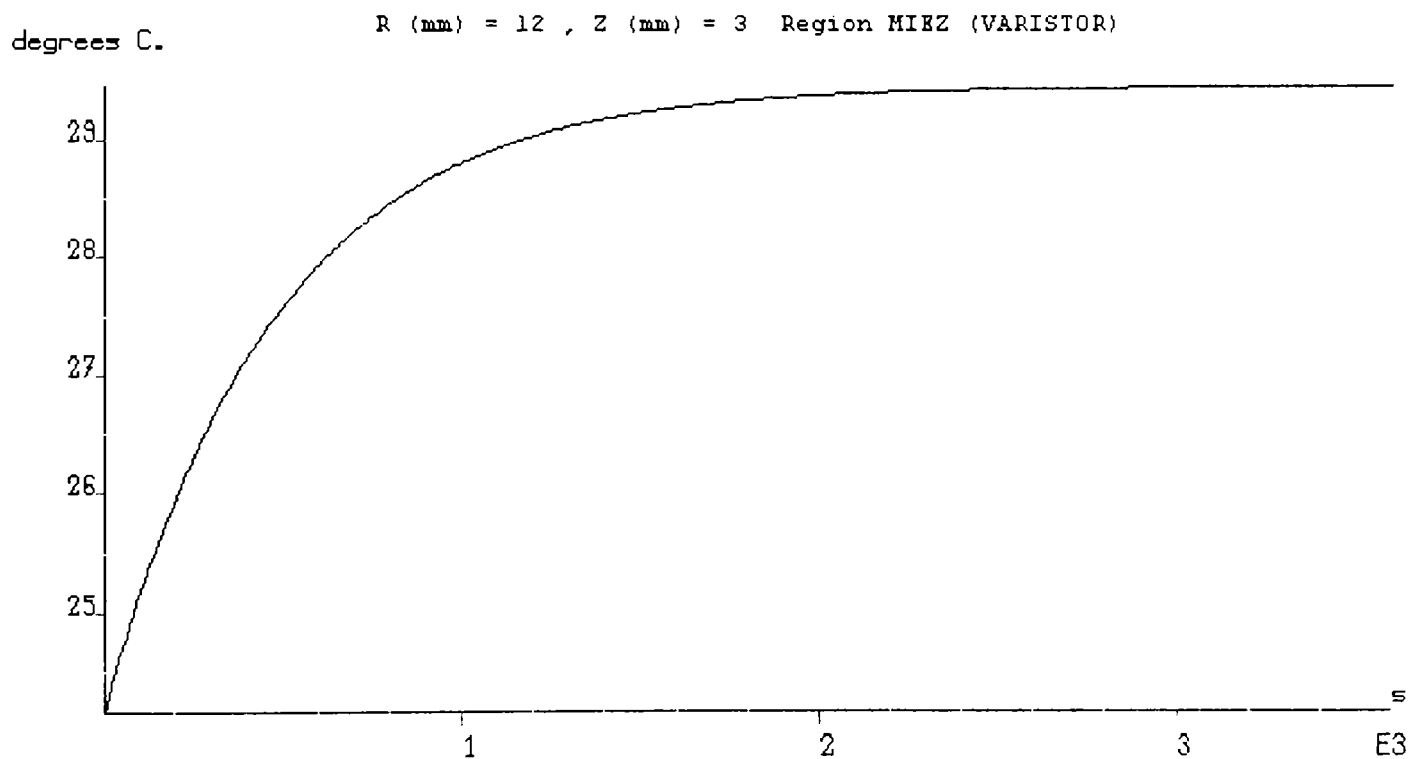
Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$  este, în baza formulelor anterior determinate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{lal}} = \frac{0,224}{17 \cdot 1,28 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}} = 5,52 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.9)$$

Cea mai mare supratemperatură întâlnită în urma modelării regimului permanent, în configurația E este:

$$\tau = 5,48 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.10)$$

În figura IX.15 este prezentată evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării numerice a procesului de încălzire, într-un punct de coordonate  $R = 12 \text{ mm}$ ,  $Z = 3 \text{ mm}$ .



**Figura IX.15: Evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării procesului de încălzire, pentru un punct de coordonate (12, 3) aparținând configurației E.**

Graficul este furnizat de către programul FLUX 2D.

În continuare vom prezenta, în tabelul IX.5, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic, pentru câteva puncte de pe suprafața aflată în contact direct cu aerul:

| Coordonatele punctului [mm] | Supratemperatura rezultată în urma modelării [°C] | Supratemperatura măsurată [°C] |
|-----------------------------|---|--------------------------------|
| (12, 3)                     | 5,48  | 5,35                           |
| (12, 0)                     | 5,48  | 5,3                            |
| (1, 8)                      | 5,48  | 5,21                           |
| (1, -5)                     | 5,48  | 5,18                           |

**Tabelul IX.5: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru configurația E.**

Se observă că rezultatele experimentale confirmă destul de bine rezultatele modelării numerice.



## IX.6. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația M

Configurația M a fost prezentată în Subcapitolul VII.2.6.

Curentul de regim staționar, determinat experimental, este  $I = 6,8 \cdot 10^{-4}$  A.

Temperatura ambiantă luată în calcul este de 25 °C.

În figura IX.16. se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul configurației M, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

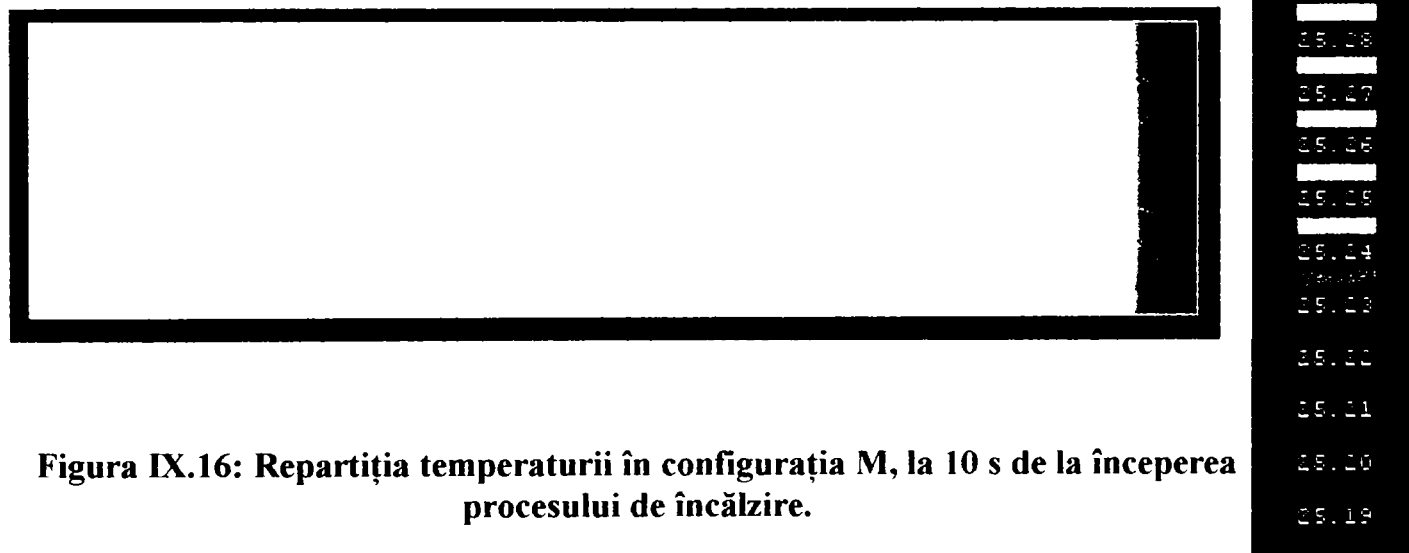


Figura IX.16: Repartiția temperaturii în configurația M, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura IX.17 se prezintă repartiția temperaturilor în interiorul configurației M, la trecerea a 3600 de s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

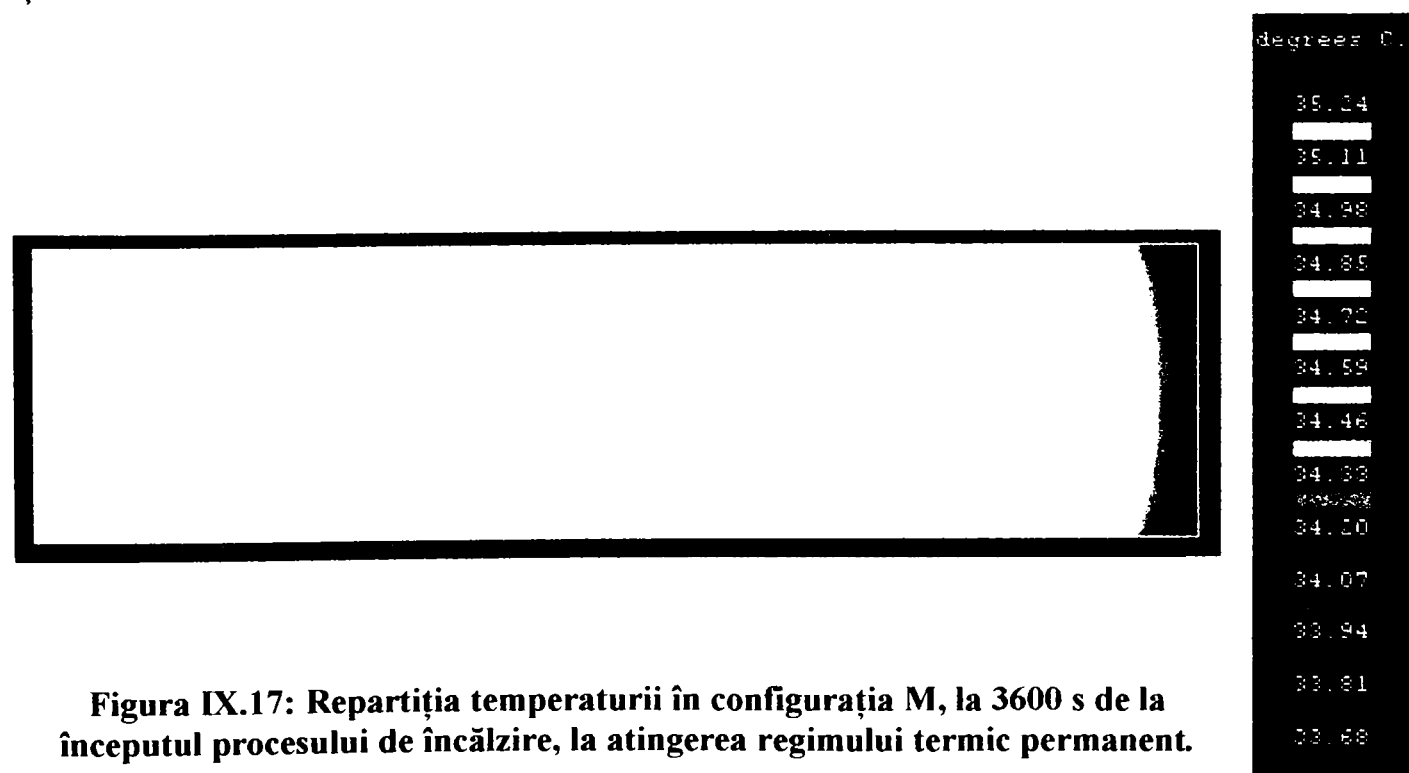


Figura IX.17: Repartiția temperaturii în configurația M, la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației **M**, în regim permanent, nu depășește 2 °C, observație confirmată și experimental.

Suprafața laterală a varistorului este  $S_{lv} = 2,01 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Configurația **M** nu are masă adițională din alamă.

Puterea disipată are valoarea  $P = U \cdot I = 560 \cdot 6,8 \cdot 10^{-4} = 0,380 \text{ W}$ .

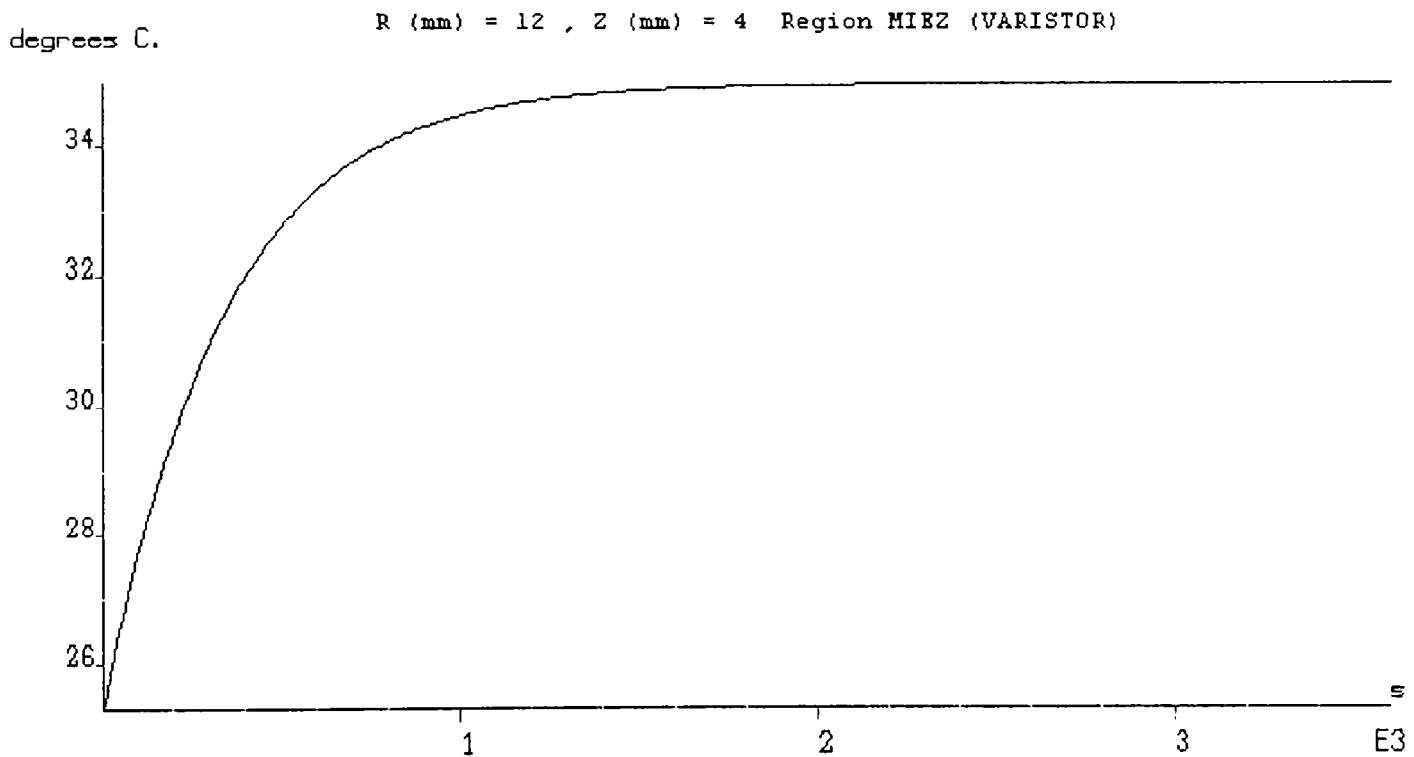
Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$  este, în baza formulelor anterior determinate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha_v \cdot S_{lv}} = \frac{0,380}{17 \cdot 2,01 \cdot 10^{-3}} = 11 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.11)$$

Cea mai mare supratemperatură întâlnită în urma modelării regimului permanent, în configurația **M** este:

$$\tau = 10,24 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.12)$$

În figura IX.18 este prezentată evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării numerice a procesului de încălzire, într-un punct de coordonate  $R = 12 \text{ mm}$ ,  $Z = 4 \text{ mm}$ .



**Figura IX.18: Evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării procesului de încălzire, pentru un punct de coordonate (12, 4) aparținând configurației M.**

Graficul este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În continuare vom prezenta, în tabelul IX.6, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic, pentru câteva puncte de pe suprafața aflată în contact direct cu aerul:

| Coordonatele punctului [mm] | Supratemperatura rezultată în urma modelării [°C] | Supratemperatura măsurată [°C] |
|-----------------------------|---|--------------------------------|
| (12, 4)                     | 9,98  | 10,43                          |
| (12, 0)                     | 9,98  | 10,32                          |
| (1, 4)                      | 10,24   | 10,85                          |
| (1, 0)                      | 10,24   | 10,72                          |

**Tabelul IX.6: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru configurația M.**

Se observă că rezultatele experimentale confirmă destul de bine rezultatele modelării numerice.





## IX.7. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația N

Configurația N a fost prezentată în Subcapitolul VII.2.7.

Curentul de regim staționar, determinat experimental, este  $I = 6,8 \cdot 10^{-4}$  A.

Temperatura ambiantă luată în calcul este de 25 °C.

În figura IX.19. se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul configurației N, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

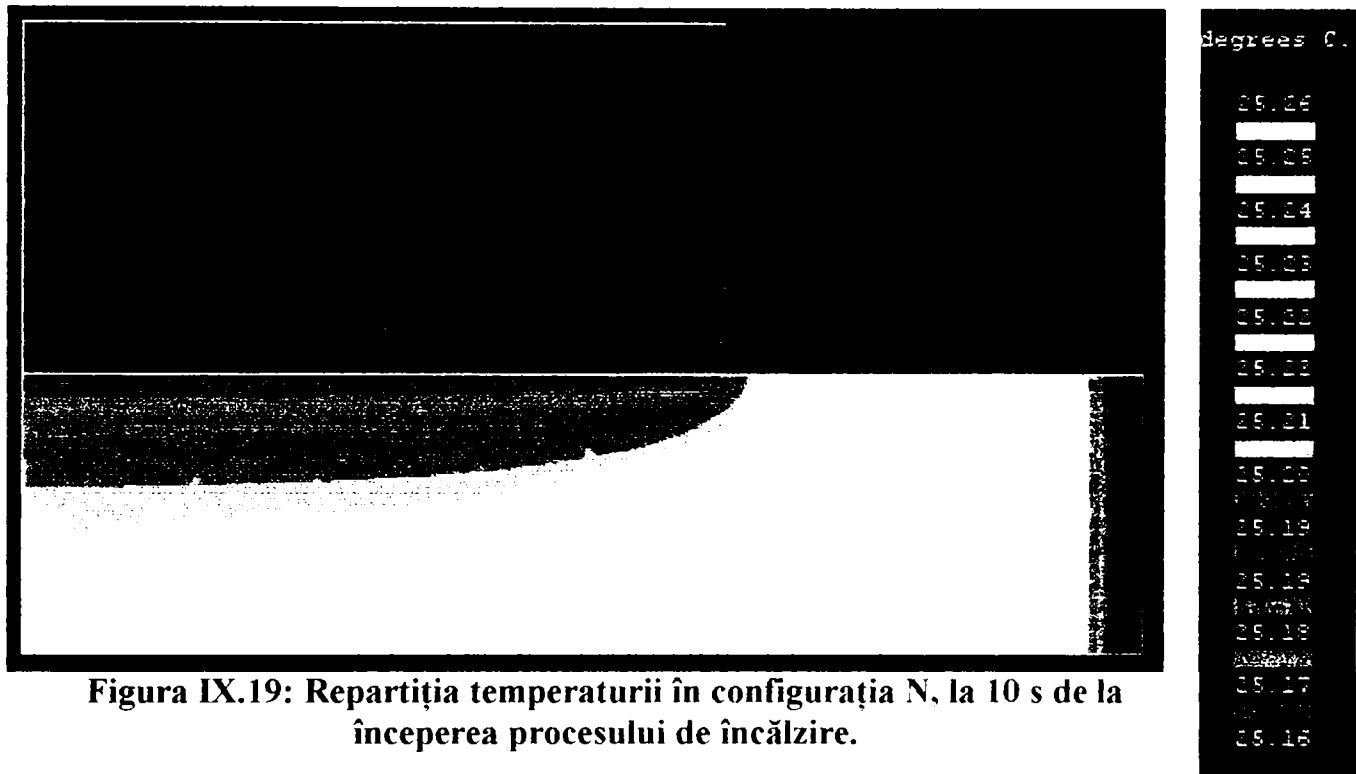


Figura IX.19: Repartiția temperaturii în configurația N, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura IX.20 se prezintă repartiția temperaturilor în interiorul configurației N, la trecerea a 3600 de s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

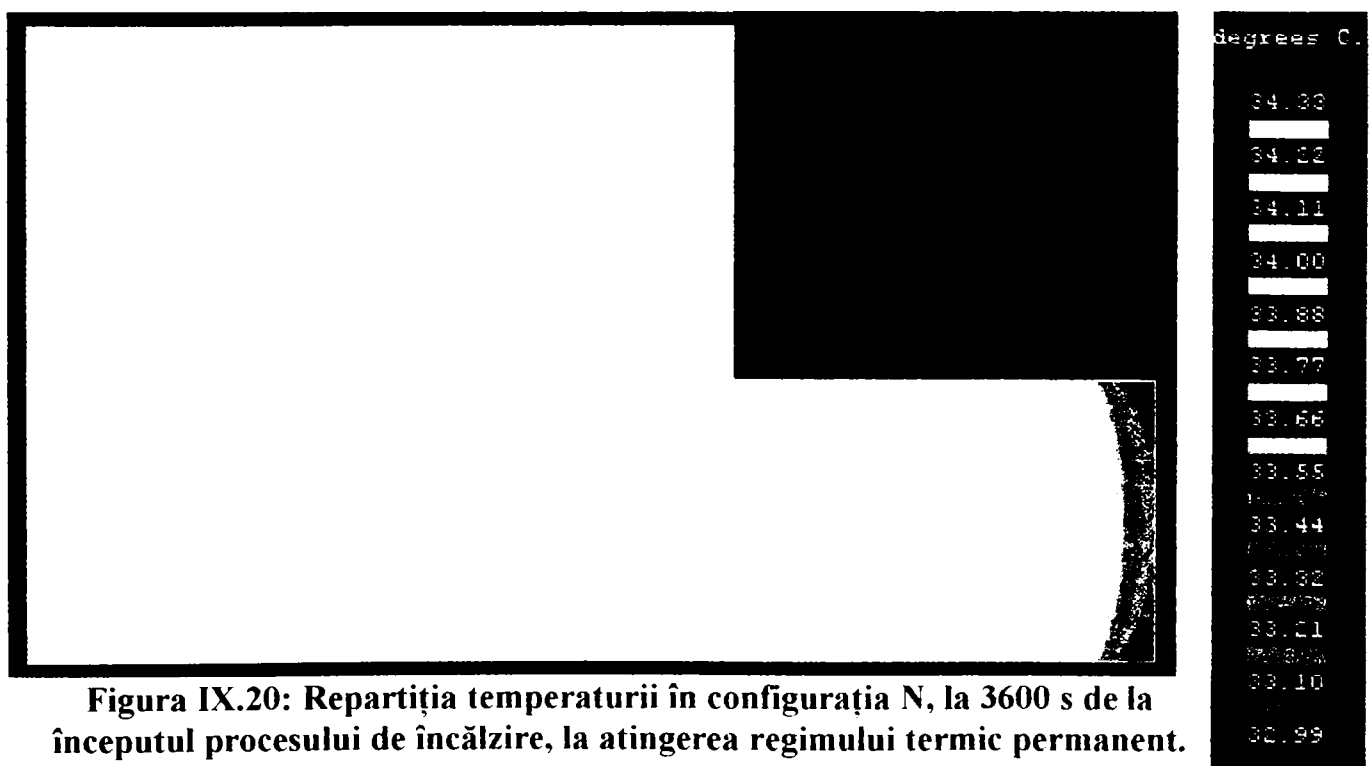


Figura IX.20: Repartiția temperaturii în configurația N, la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației N, în regim permanent, nu depășește 2 °C, observație confirmată și experimental.

Suprafața laterală rămasă varistorului este  $S_{lv} = 1,69 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Suprafața laterală în contact cu aerul pentru alamă este  $S_{lal} = 0,628 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Puterea disipată are valoarea  $P = U \cdot I = 560 \cdot 6,8 \cdot 10^{-4} = 0,380 \text{ W}$ .

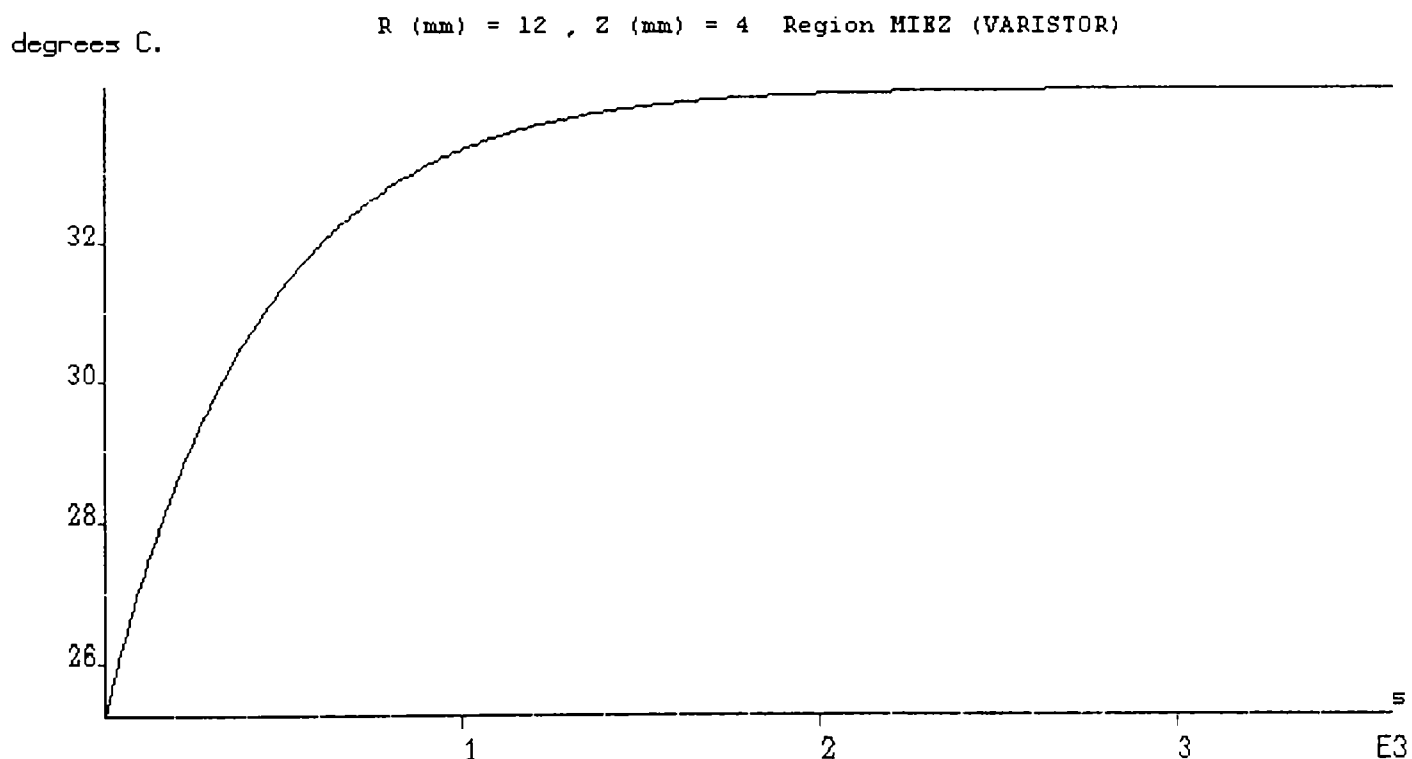
Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$  este, în baza formulelor anterior determinate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{lal}} = \frac{0,380}{17 \cdot 1,69 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 0,628 \cdot 10^{-3}} = 9,96 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.13)$$

Cea mai mare supratemperatură întâlnită în urma modelării regimului permanent, în configurația N este:

$$\tau = 9,33 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.14)$$

În figura IX.21 este prezentată evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării numerice a procesului de încălzire, într-un punct de coordonate  $R = 12 \text{ mm}$ ,  $Z = 4 \text{ mm}$ .



**Figura IX.21: Evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării procesului de încălzire, pentru un punct de coordonate (12, 4) aparținând configurației N.**

Graficul este furnizat de către programul FLUX 2D.

În continuare vom prezenta, în tabelul IX.7, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic, pentru câteva puncte de pe suprafața aflată în contact direct cu aerul:

| Coordonatele punctului [mm] | Supratemperatura rezultată în urma modelării [°C] | Supratemperatura măsurată [°C] |
|-----------------------------|---|--------------------------------|
| (12, 4)                     | 9,22  | 9,0                            |
| (12, 0)                     | 9,22  | 9,18                           |
| (1, 9)                      | 9,33  | 9,24                           |
| (1, 0)                      | 9,33  | 9,12                           |

**Tabelul IX.7: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru configurația N.**

Se observă că rezultatele experimentale confirmă destul de bine rezultatele modelării numerice.



### IX.8. Analiza stabilității termice în regim de serviciu permanent pentru configurația P

Configurația P a fost prezentată în Subcapitolul VII.2.8.

Curentul de regim staționar, determinat experimental, este  $I = 6,9 \cdot 10^{-4}$  A.

Temperatura ambiantă luată în calcul este de 24 °C.

În figura IX.22, se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul configurației P, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

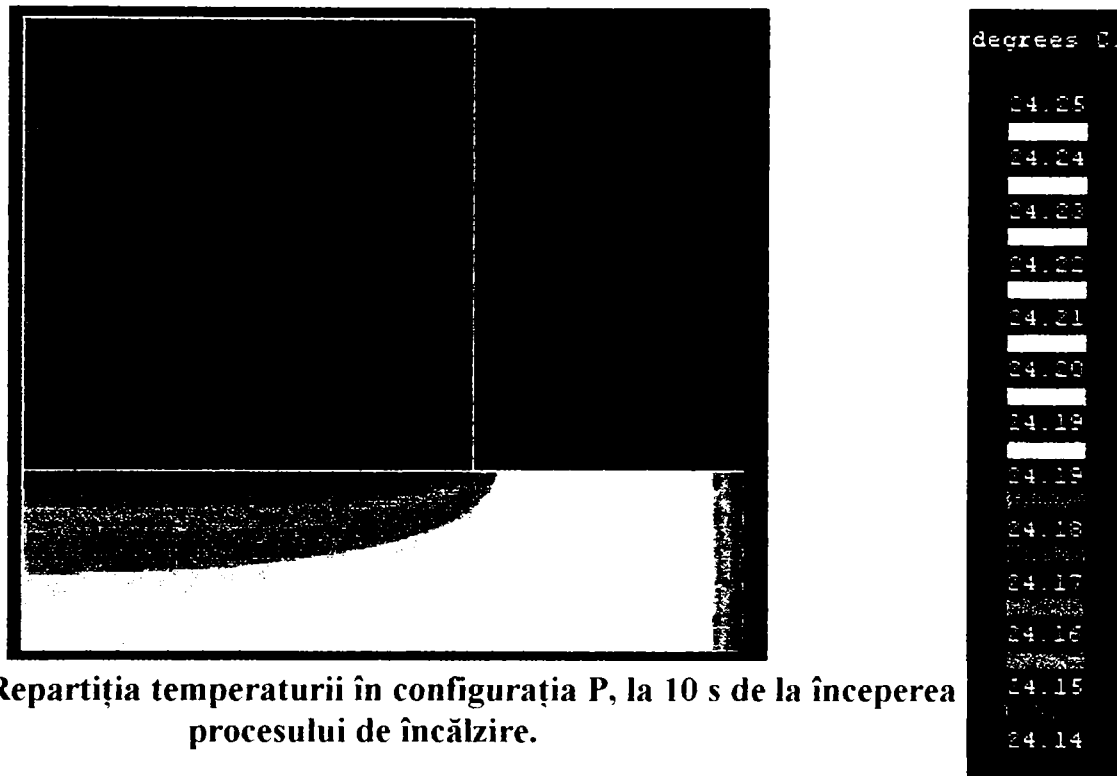


Figura IX.22: Repartiția temperaturii în configurația P, la 10 s de la începerea procesului de încălzire.

În figura IX.23 se prezintă repartiția temperaturilor în interiorul configurației P, la trecerea a 3600 de s de la începerea procesului tranzitoriu de încălzire, când, practic s-a atins regimul staționar.

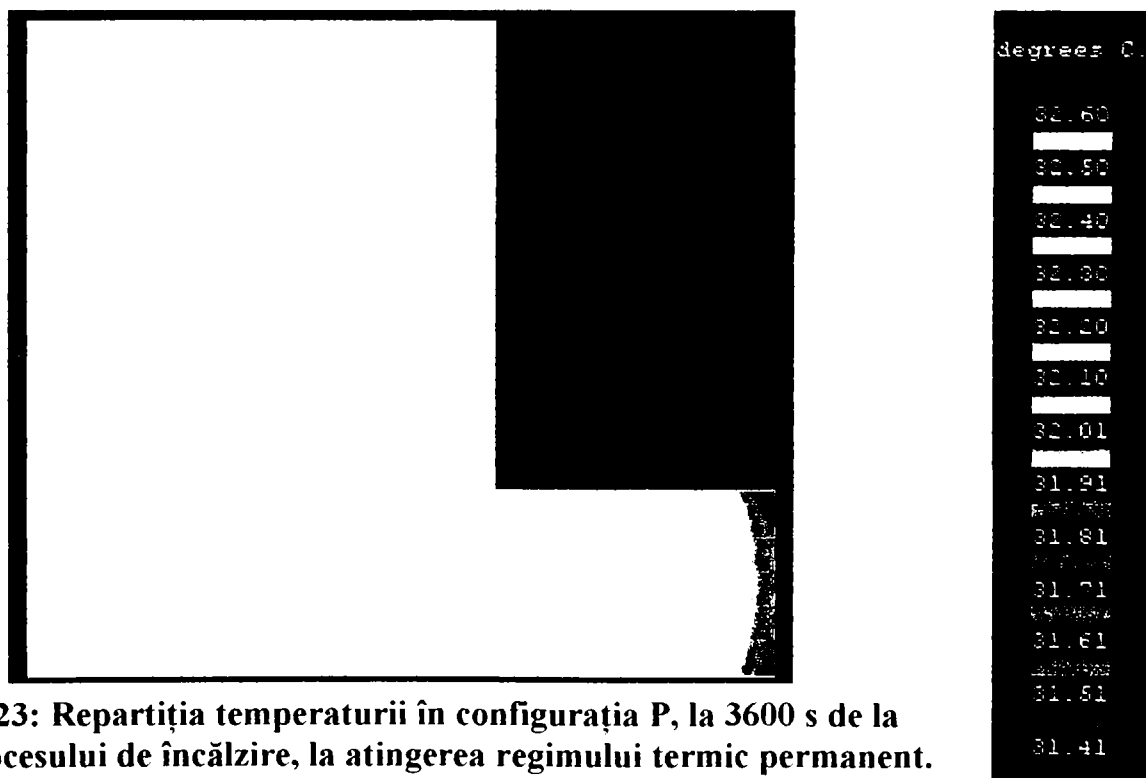


Figura IX.23: Repartiția temperaturii în configurația P, la 3600 s de la începutul procesului de încălzire, la atingerea regimului termic permanent.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației P, în regim permanent, nu depășește 2 °C, observație confirmată și experimental.

Suprafața laterală rămasă varistorului este  $S_{lv} = 1,69 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Suprafața laterală în contact cu aerul pentru alamă este  $S_{lal} = 0,942 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$

Puterea disipată are valoarea  $P = U \cdot I = 560 \cdot 6,9 \cdot 10^{-4} = 0,386 \text{ W}$ .

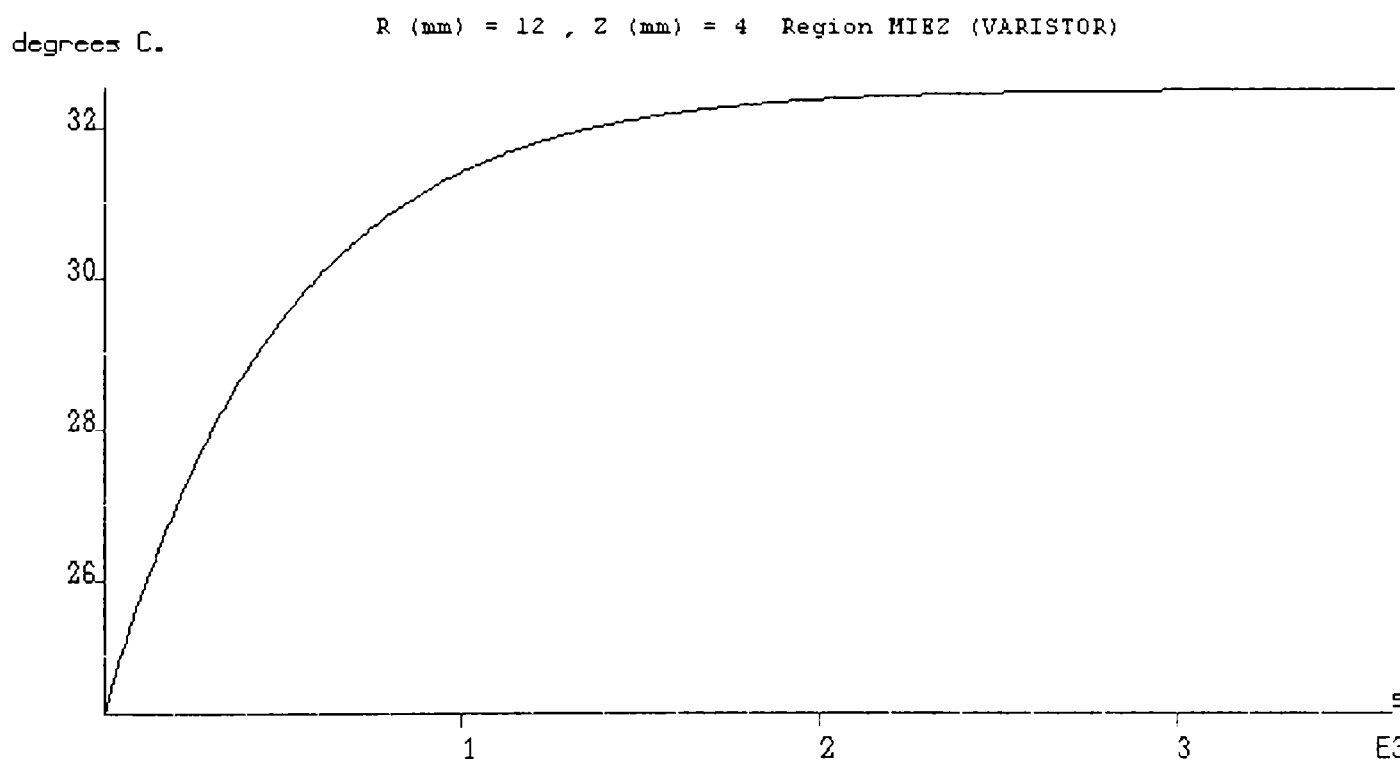
Supratemperatura de regim staționar estimată  $\tau_{se}$  este, în baza formulelor anterior determinate:

$$\tau_{se} = \frac{P}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{lal}} = \frac{0,386}{17 \cdot 1,69 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 0,942 \cdot 10^{-3}} = 9 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.15)$$

Cea mai mare supratemperatură întâlnită în urma modelării regimului permanent, în configurația N este:

$$\tau = 8,6 \text{ }^\circ\text{C} \quad (9.16)$$

În figura IX.24 este prezentată evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării numerice a procesului de încălzire, într-un punct de coordonate  $R = 12 \text{ mm}$ ,  $Z = 4 \text{ mm}$ .



**Figura IX.24: Evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă în urma modelării procesului de încălzire, pentru un punct de coordonate (12, 4) aparținând configurației P.**

Graficul este furnizat de către programul FLUX 2D.

În continuare vom prezenta, în tabelul IX.8, o comparație între datele experimentale și cele rezultate din modelarea numerică a transferului termic, pentru câteva puncte de pe suprafața aflată în contact direct cu aerul:

| Coordonatele punctului [mm] | Supratemperatura rezultată în urma modelării [°C] | Supratemperatura măsurată [°C] |
|-----------------------------|---|--------------------------------|
| (12, 4)                     | 8,60  | 8,18                           |
| (12, 0)                     | 8,60  | 8,1                            |
| (1, 4)                      | 8,60  | 8,45                           |
| (1, 14)                     | 8,50  | 8,24                           |

**Tabelul IX.8: Comparație între valorile măsurate ale supratemperaturii și cele rezultate din modelare, pentru configurația P.**

Se observă că rezultatele experimentale confirmă destul de bine rezultatele modelării numerice.



## IX.9. Concluzii

În urma comparării rezultatelor experimentale cu cele obținute în urma modelărilor s-a constatat că acestea sunt apropiate unele de celelalte, cea mai mare abatere fiind sub 5%. Aceasta dovedește că aproximațiile parametrilor de material au fost bine făcute precum și condițiile impuse modelării au fost corect alese.

Se constată că nu sunt mari diferențe de temperatură între punctele din interiorul fiecărei configurații, în regim termic permanent, acestea fiind mai mici de 2°C, indiferent de configurație.

Așa cum este de așteptat, masele adiționale au o rezistență electrică total neglijabilă, ele putând fi asimilate practic cu medii fără surse interne de căldură. Prezența lor conduce la uniformizarea temperaturii varistorului în porțiunea care intră în contact direct cu acestea.

În regim de serviciu permanent (termic permanent), mase adiționale montate pe varistoare joacă rolul unor radiatoare, asigurând, prin creșterea suprafeței de schimb a căldurii, o mai bună răcire a varistorului. Acest lucru se observă comparând supratemperaturile obținute pentru configurația **A** cu cele obținute pentru **B,C,D** și **E**, respectiv **M** cu **N** și **P**, atât prin măsurare directă, cât și prin modelare numerică.

Această scădere a supratemperaturii de regim staționar nu este spectaculoasă, deoarece suprafețele cilindrului de alamă sunt comparabile cu cea a varistorului. Cu cât înălțimea cilindrului de alamă este mai mare, pentru același diametru, în mod evident răcirea este mai bună (de exemplu configurațiile **N** și **P** sau **B** și **D**).

Disponerea maselor adiționale pe ambele fețe ale varistoarelor este, evident o soluție tehnică mult mai bună, asigurând o răcire mai eficientă (configurația **E** comparativ cu **B**).

Creșterea diametrului cilindrului de alamă în condițiile menținerii înălțimii constante oferă o mai bună răcire (**C** față de **B**). Diametrul cilindrului de alamă poate fi crescut până la limita izolației, pentru a asigura sudarea uniformă și a evita conturnările.

Nu există o recomandare privind un anumit diametru sau o anumită înălțime a cilindrului de alamă. Cu cât suprafața exterioară a cilindrului este mai mare, răcirea va fi mai bună. Limitările constructive apar doar din considerente de gabarit.

## IX. 10. Contribuții personale și originale ale autorului

Întreg acest capitol este realizat în baza contribuțiilor personale ale autorului, dintre care amintim:

- Propunerea și analiza soluțiilor tehnice originale privind montarea maselor adiționale cu rol de radiator, în regim termic permanent, soluții descrise pe larg în Capitolul VII;
- Realizarea modelărilor numerice în situația regimului de serviciu permanent;
- Compararea rezultatelor modelării cu cele obținute experimental;
- Realizarea montajelor experimentale și a măsurătorilor, în toate situațiile enumerate mai sus;
- Analiza comparativă a rezultatelor și obținerea unor concluzii privind soluțiile tehnice originale propuse.



## CAPITOLUL X

### **Analiza comparativă a stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru soluțiile tehnice propuse**

Așa cum am arătat în capitolele anterioare, analiza stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO și a echipamentelor care le înglobează, efectuată doar în regim de serviciu permanent, este necesară, dar nu suficientă. Analiza funcționării acestor dispozitive în regim de serviciu de impuls este obligatorie. Studiul va fi făcut utilizând tot cele opt configurații care au fost descrise pe larg în capitolele anterioare. Pentru fiecare configurație se va realiza o modelare numerică a procesului de răcire, după aplicarea unui impuls. Se vor prezenta și măsurători experimentale. Modelarea numerică se va efectua pe o durată a procesului de încălzire de 1800 s, deoarece constantele termice de timp au valori în jurul a 250-500 s. Se vor lua în calcul 180 de pași de timp, durata unui pas de timp fiind de 10 s. Pentru fiecare pas de timp se vor efectua 5 iterații, precizia fiind de 0,001.

Instalația experimentală pentru încercări în regim de serviciu de impuls a fost prezentată în capitolele anterioare. Varistoarele sunt plasate vertical, pentru a avea aceeași transmisivitate termică pe ambele fețe. Deoarece și în acest caz varistoarele sunt dispuse într-o incintă etanșă, curenții de aer din laborator nu influențează deloc transferul termic. Etuva nu va fi folosită, fiind de altfel deosebit de dificil de introdus în ansamblul generatorului de impulsuri, măsurătorile fiind efectuate la temperatura ambiantă. Valorile transmisivității termice globale sunt aceleași, anume:

- $\alpha_v = 17 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$  pentru materialul varistor și izolația de rășină epoxidică;
- $\alpha_{al} = 15 \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{°C)]}$  pentru masele adiționale de alamă;

Impulsurile vor fi aplicate fără a avea o polarizare în tensiune a varistoarelor, acestea având temperatura ambiantă. Energia stocată în condensatorul de 180  $\mu\text{F}$  din figura VIII.14, este aplicată apoi varistorului, provocând încălzirea lui [2]. Putem spune fără a greși că pierderile în interiorul

instalației sunt neglijabile [2]. Expresia acestei energii este dată de formula:  $Q = \frac{C \cdot U^2}{2}$

Tensiunile la care va fi încărcat condensatorul sunt:

- 1000 V pentru configurațiile **A,B,C,D,E**, care au la bază varistorul tip **ISKRA V250D32S**, ceea ce corespunde unei energii de 90 J;
- 1500 V pentru configurațiile **M,N,P**, care au la bază varistorul tip **ISKRA V420D32S**, ceea ce corespunde unei energii de 202,5 J.

Aceste tensiuni sunt alese sub nivelul de protecție garantat de fabricantul de varistoare pentru fiecare din cele două categorii, pentru a nu distruge varistorul, scopul încercărilor fiind evaluarea comportamentului termic al lui, nu evaluarea performanțelor electrice. Durata de aplicare a undei fiind de ordinul zecilor de microsecunde, procesul poate fi considerat adiabatic, varistorul nu mai are timp să cedeze căldura în mediul ambiant. Întreaga energie a impulsului rămâne stocată în corpul varistorului, producând extrem de repede creșterea temperaturii acestuia. Modul în care se calculează supratemperatura la care ajunge varistorul sau ansamblul varistor + masă adițională a fost prezentat în capitolul VI. Valorile căldurii specifice luate în calcul sunt (la 25 °C) [13]:

- $c_v = 0,7534 \text{ [J/(g} \cdot \text{°C)]}$  pentru materialul varistor;
- $c_{al} = 0,383 \text{ [J/(g} \cdot \text{°C)]}$  pentru alamă;

Se va prezenta repartiția temperaturilor în interiorul fiecăreia dintre configurațiile analizate la 60 s și, respectiv, la 600 s de la aplicarea impulsului. Evoluția în timp a temperaturii într-un anumit punct, așa cum rezultă în urma modelării cu **FLUX 2D**, va fi prezentată alături de rezultatele măsurătorilor experimentale efectuate. Se va face și un calcul estimativ al supratemperaturii la care se ajunge în urma aplicării impulsului precum și un calcul al valorii constantei termice de timp pentru fiecare configurație în parte.





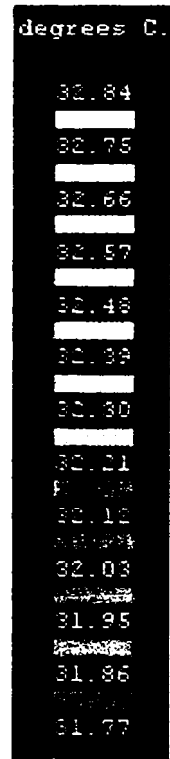
## X.1. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația A

Configurația A este descrisă în Subcapitolul VII.2.1.

Temperatura ambiantă este  $\theta_a = 25^\circ\text{C}$ .

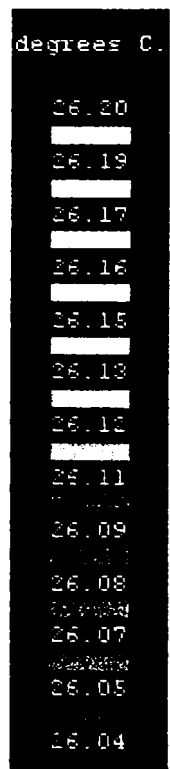
Energia impulsului aplicat este de 90 J.

În figura X.1 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației A, la 60 s de la aplicarea impulsului.



**Figura X.1: Repartiția temperaturii în interiorul configurației A, la 60 s de la aplicarea impulsului.**

În figura X.2 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației A, la 600 s de la aplicarea impulsului.



**Figura X.2: Repartiția temperaturii în interiorul configurației A, la 600 s de la aplicarea impulsului.**



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației A, în procesul de răcire, nu depășește 1 °C, observație confirmată și experimental.

Oscilograma impulsului aplicat este prezentată în figura X.3.

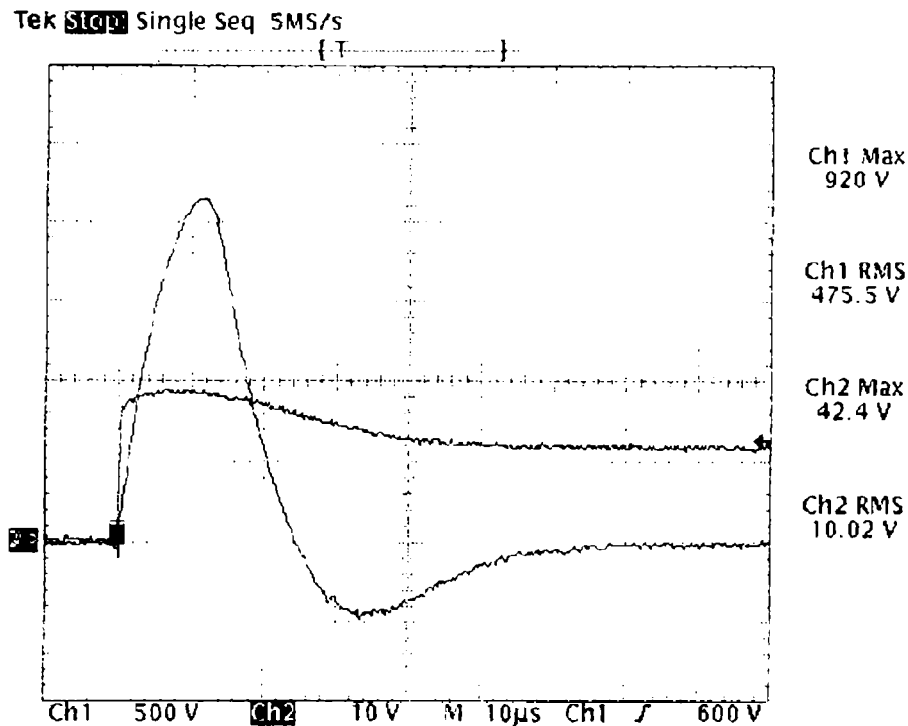


Figura X.3: Oscilograma impulsului aplicat configurației A.

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate a fost de 920 V (canalul 1).

Valoarea de vârf a curentului care s-a stabilit este de 4240 A (canalul 2, prin divizorul 1/100).

Masa varistorului este  $m_v = 12$  g.

Suprafața laterală de disipare a căldurii este, pentru varistor,  $S_{lv} = 1,91 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>.

Varistorul nu este prevăzut, în această configurație, cu masă suplimentară din alamă.

Transferul termic are loc pe ambele fețe ale varistorului.

Supratemperatura estimată,  $\tau_e$ , care ar urma să fie atinsă după aplicarea impulsului este:

$$\tau_e = \frac{Q}{m_v \cdot c_v} = \frac{90}{12 \cdot 0,7534} = 9,95 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.1)$$

Aceasta corespunde unei valori a temperaturii maxime:

$$\theta_c = \theta_a + \tau_e = 25 + 9,95 = 34,95 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.2)$$

Valoarea calculată a constantei termice de timp, pentru configurația A, la 25 °C, este:

$$T = \frac{m_v \cdot c_v}{\alpha_v \cdot S_{lv}} = \frac{12 \cdot 0,7534}{17 \cdot 1,91 \cdot 10^{-3}} = 278 \text{ s} \quad (10.3)$$

Ca urmare putem spune că procesul de răcire poate fi considerat ca terminat după 1500 s.

Temperatura maximă măsurată este:

$$\theta = 34,44 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.4)$$

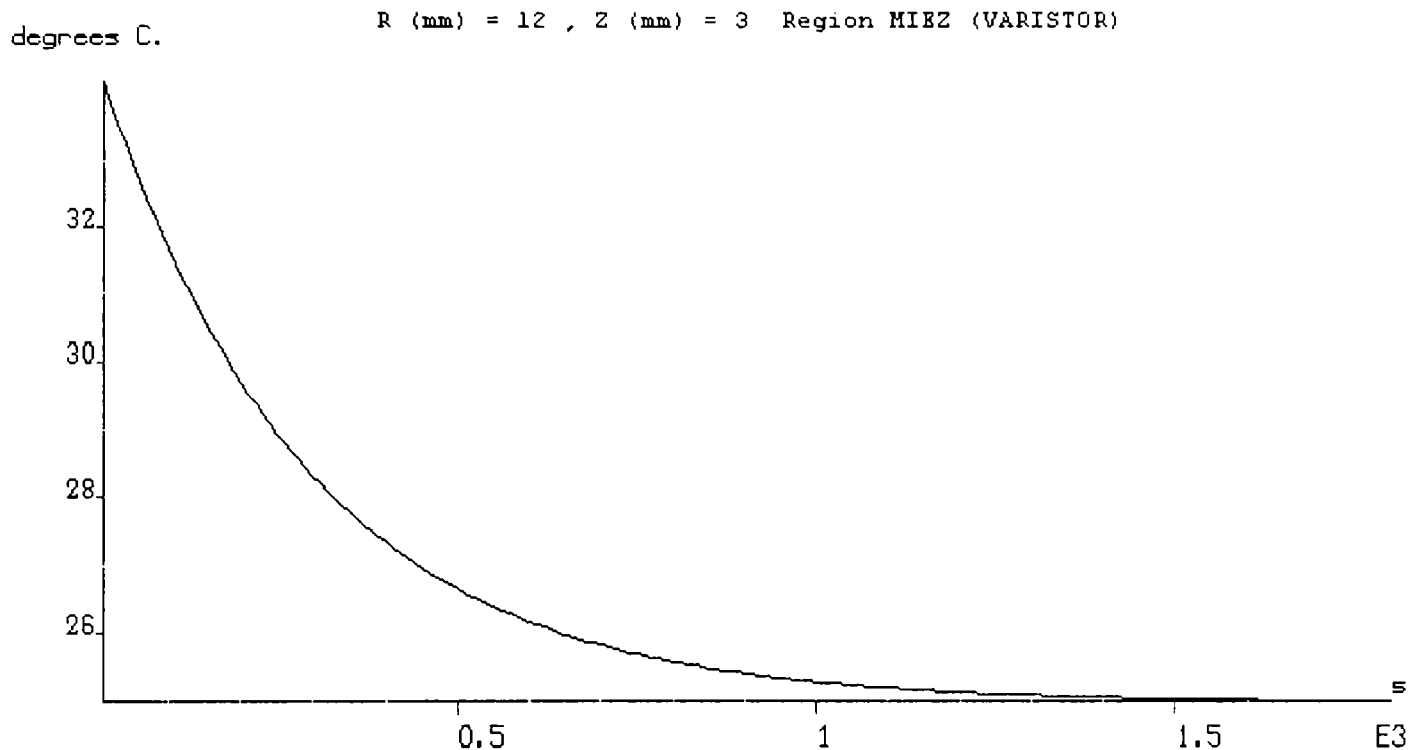
Supratemperatura măsurată este:

$$\tau = \theta - \theta_a = 34,44 - 25 = 9,44 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.5)$$

Se constată că valoarea supratemperaturii măsurate (10.5) este foarte aproape de cea estimată, (10.1) ceea ce confirmă exactitatea măsurătorilor și corectitudinea modelului matematic considerat.



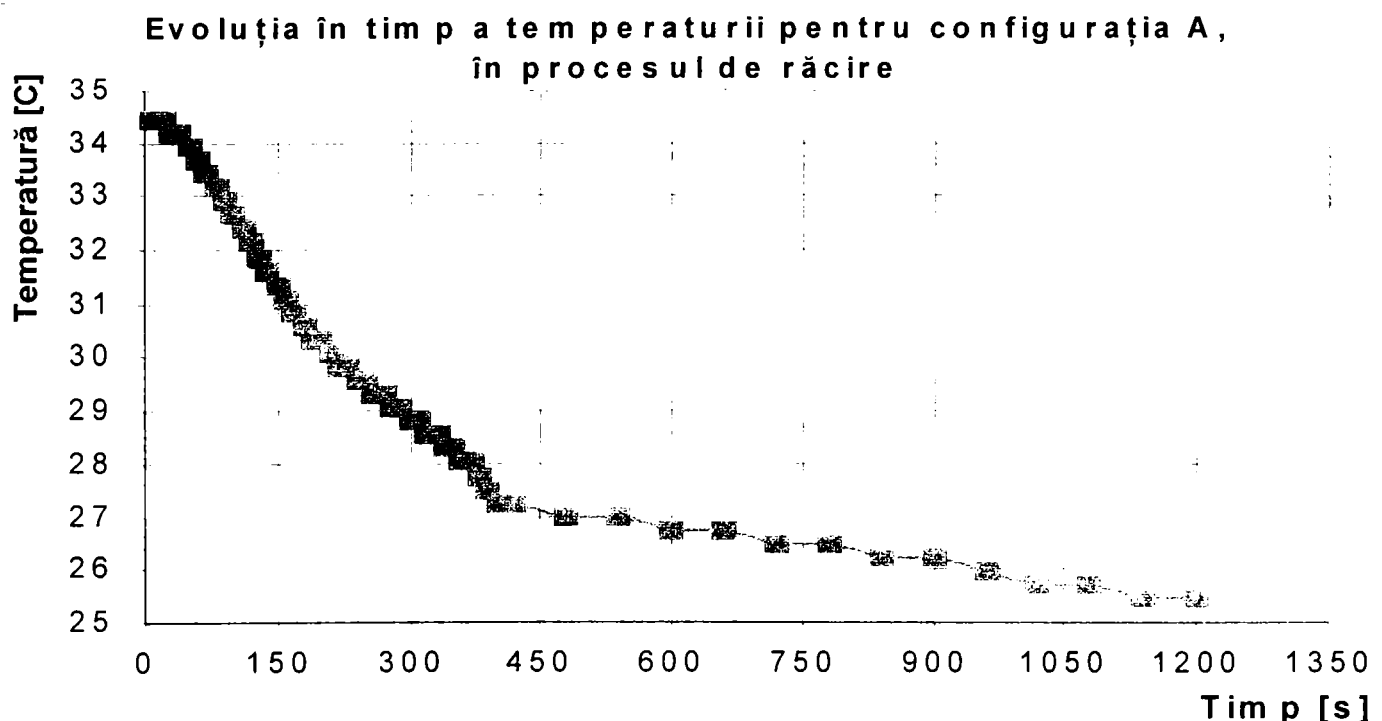
În figura X.4 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, în procesul de răcire, în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm, așa cum rezultă în urma modelării numerice.



**Figura X.4: Evoluția în timp a temperaturii în procesul de răcire, pentru un punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm, aparținând configurației A.**

Graficul este furnizat de către programul FLUX 2D.

În figura X.5 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă din măsurători, în același punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm.



**Figura X.5: Evoluția în timp a temperaturii măsurate în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm aparținând configurației A.**

Se constată că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate.

În Anexa 4A sunt prezentate evoluția în timp a temperaturii pentru configurația A, în cazul unor impulsuri repetate la 3 minute unul după altul precum și oscilogramele acestor impulsuri.



## X.2. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația B

Configurația **B** este descrisă în Subcapitolul VII.2.2.

Temperatura ambiantă este de  $\theta_a = 26\text{ }^\circ\text{C}$ .

Energia impulsului aplicat este de 90 J.

În figura X.6 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației **B**, la 60 s de la aplicarea impulsului.

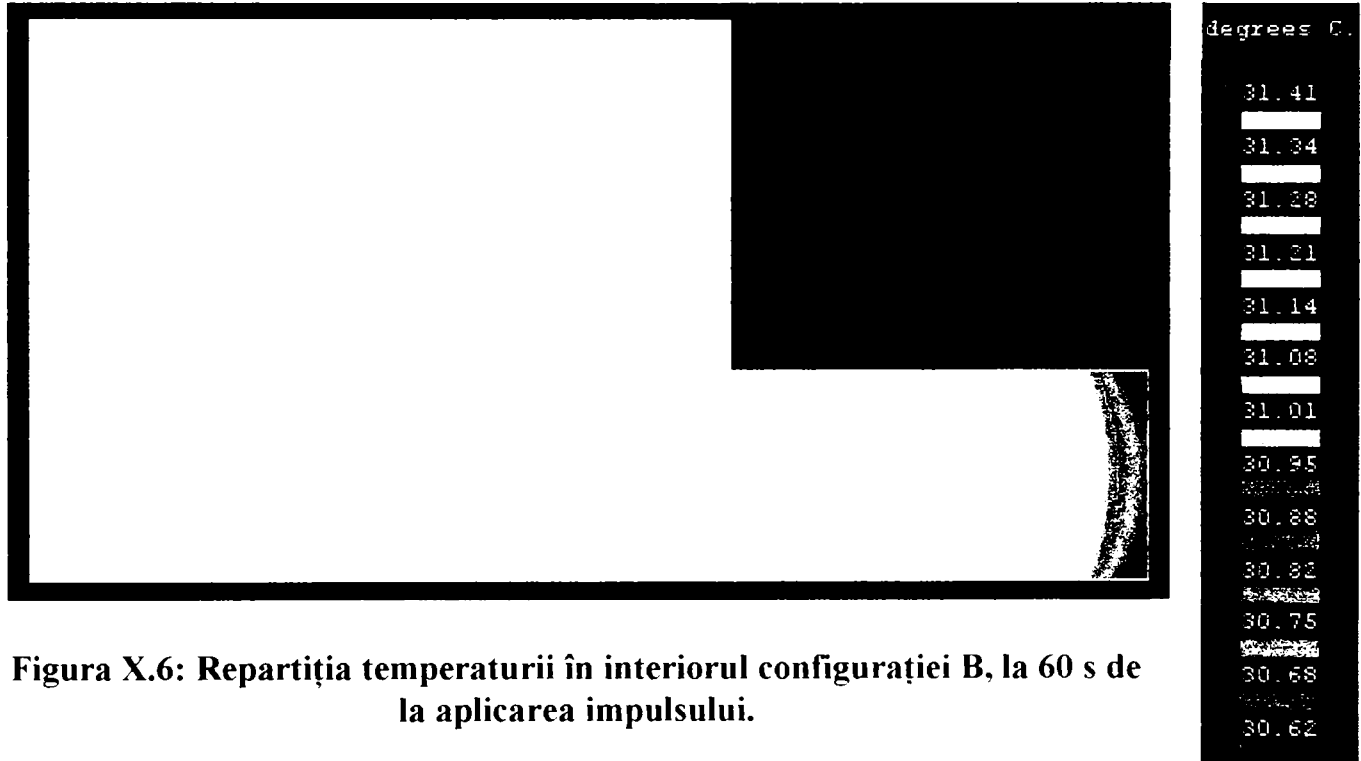


Figura X.6: Repartiția temperaturii în interiorul configurației B, la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura X.7 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației **B**, la 600 s de la aplicarea impulsului.

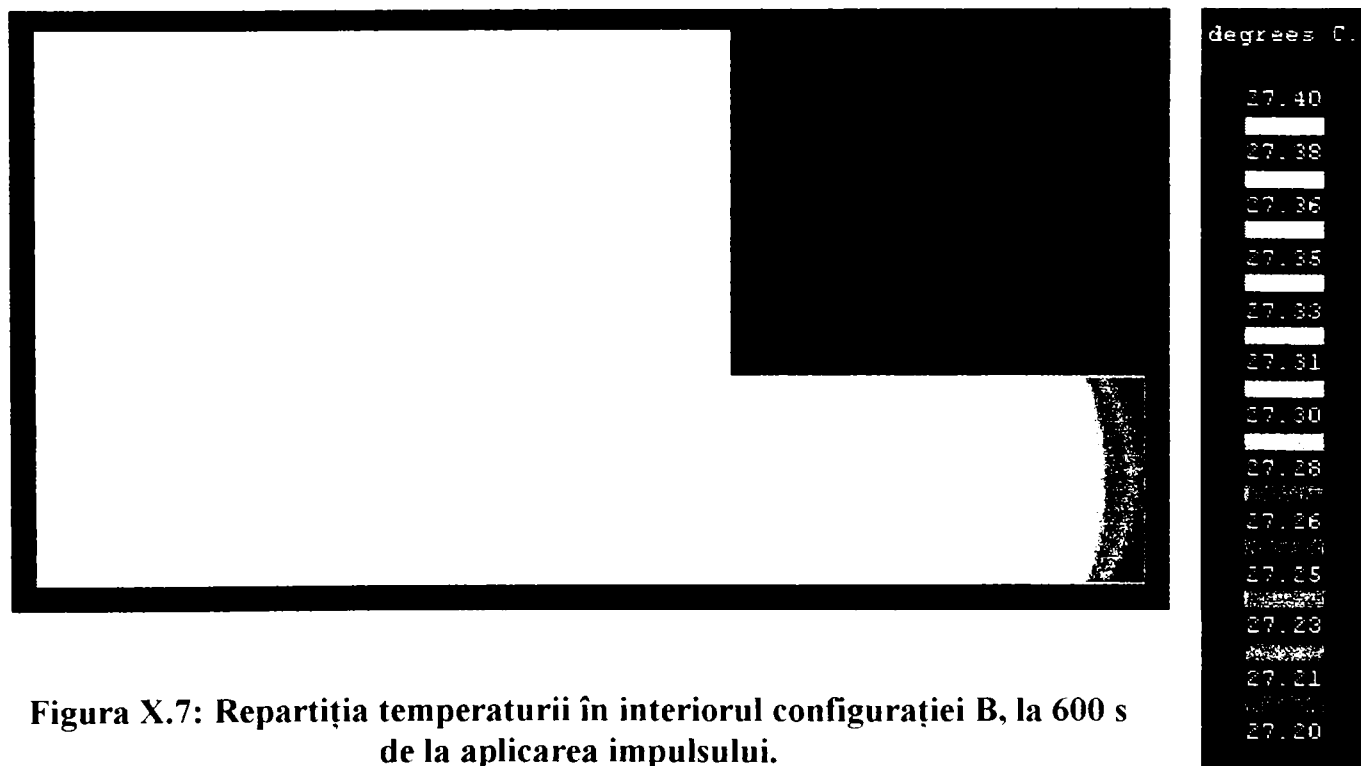


Figura X.7: Repartiția temperaturii în interiorul configurației B, la 600 s de la aplicarea impulsului.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației B, în procesul de răcire, nu depășește 1 °C, observație confirmată și experimental.

Oscilograma impulsului aplicat este prezentată în figura X.8.

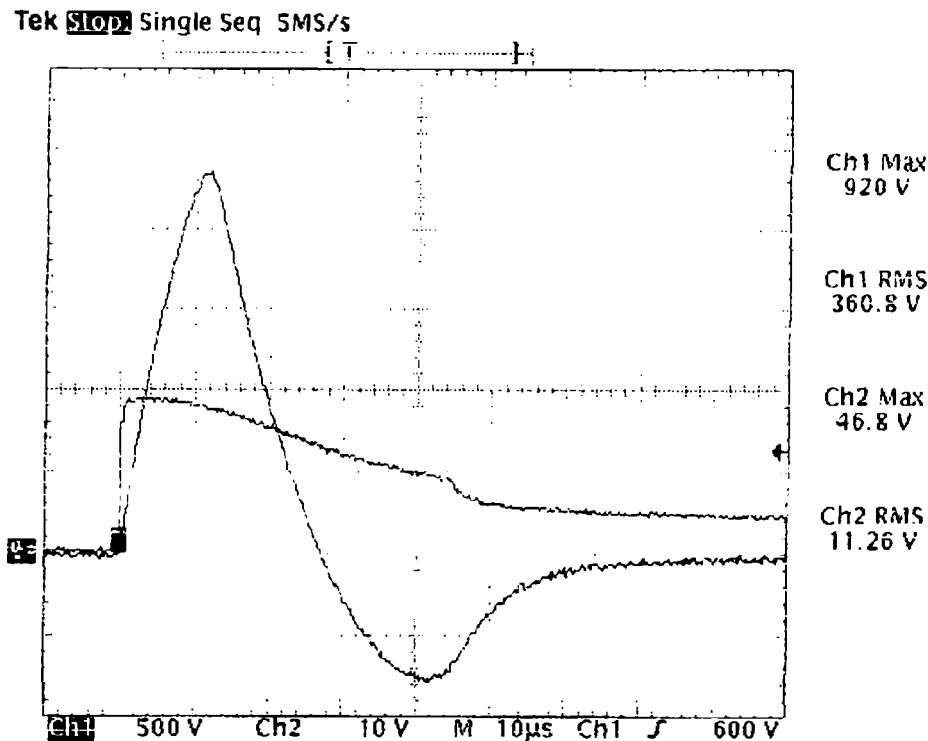


Figura X.8: Oscilograma impulsului aplicat configurației B.

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate a fost de 920 V (canalul 1).

Valoarea de vârf a curentului care s-a stabilit este de 4680 A (canalul 2, prin divizorul 1/100).

Masa varistorului este  $m_v = 12$  g.

Suprafața laterală de disipare a căldurii este, pentru varistor,  $S_{lv} = 1,595 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Masa suplimentară de alamă este  $m_{al} = 13,19$  g.

Suprafața în contact cu aerul este, pentru alamă  $S_{al} = 0,628 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Supratemperatura estimată,  $\tau_e$ , care ar urma să fie atinsă după aplicarea impulsului este:

$$\tau_e = \frac{Q}{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}} = \frac{90}{12 \cdot 0,7534 + 13,19 \cdot 0,383} = 6,38 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.6)$$

Aceasta corespunde unei valori a temperaturii maxime:

$$\theta_e = \theta_a + \tau_e = 26 + 6,38 = 32,38 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.7)$$

Valoarea calculată a constantei termice de timp, pentru configurația B, la 25 °C, este:

$$T = \frac{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{la}} = \frac{12 \cdot 0,7534 + 13,19 \cdot 0,383}{17 \cdot 1,91 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 0,628 \cdot 10^{-3}} = 385 \text{ s} \quad (10.8)$$

Ca urmare putem spune că procesul de răcire poate fi considerat ca terminat după 1500 s.

Temperatura maximă măsurată este:

$$\theta = 32,13 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.9)$$

Supratemperatura măsurată este:

$$\tau = \theta - \theta_a = 32,13 - 26 = 6,13 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.10)$$

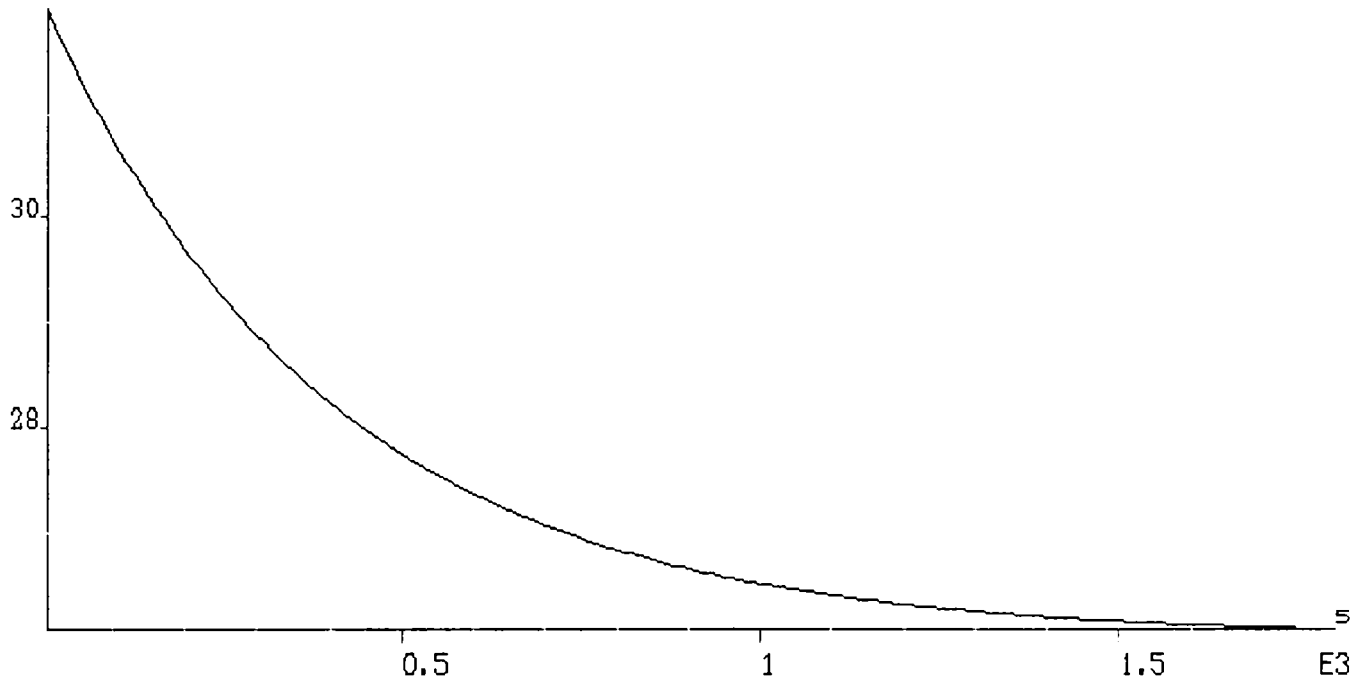
Se constată că valoarea supratemperaturii măsurate (10.10) este foarte aproape de cea estimată, (10.6) ceea ce confirmă exactitatea măsurătorilor și corectitudinea modelului matematic considerat.



În figura X.9 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, în procesul de răcire, în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm, așa cum rezultă în urma modelării numerice.

degrees C.

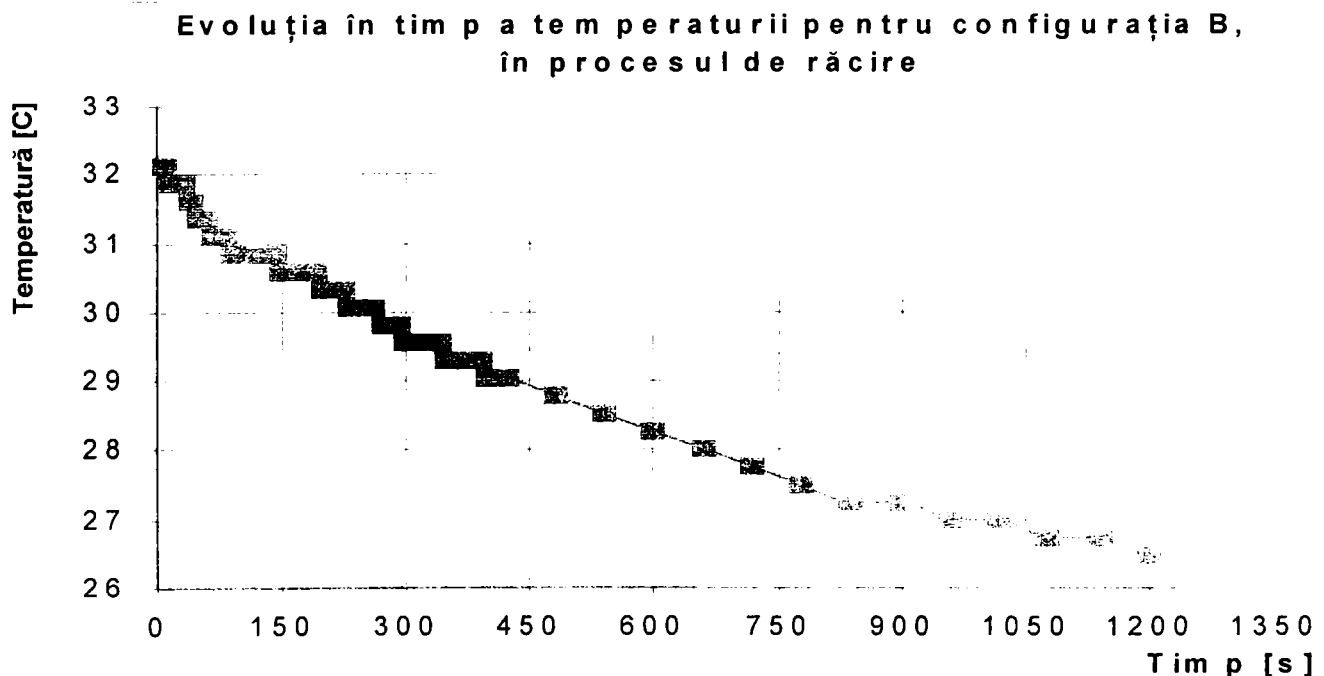
R (mm) = 12 , Z (mm) = 3 Region MIBZ (VARISTOR)



**Figura X.9: Evoluția în timp a temperaturii în procesul de răcire, pentru un punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm, aparținând configurației B.**

Graficul este furnizat de către programul FLUX 2D.

În figura X.10 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă din măsurători, în același punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm.



**Figura X.10: Evoluția în timp a temperaturii măsurate în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm aparținând configurației B.**

Se constată că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate.

În Anexa 4B sunt prezentate evoluția în timp a temperaturii pentru configurația B, în cazul unor impulsuri repetate la 3 minute unul după altul precum și oscilogramele acestor impulsuri.





### X.3. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația C

Configurația C este descrisă în Subcapitolul VII.2.3.

Temperatura ambiantă este  $\theta_a = 25^\circ\text{C}$ .

Energia impulsului aplicat este de 90 J.

În figura X.11 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației C, la 60 s de la aplicarea impulsului.

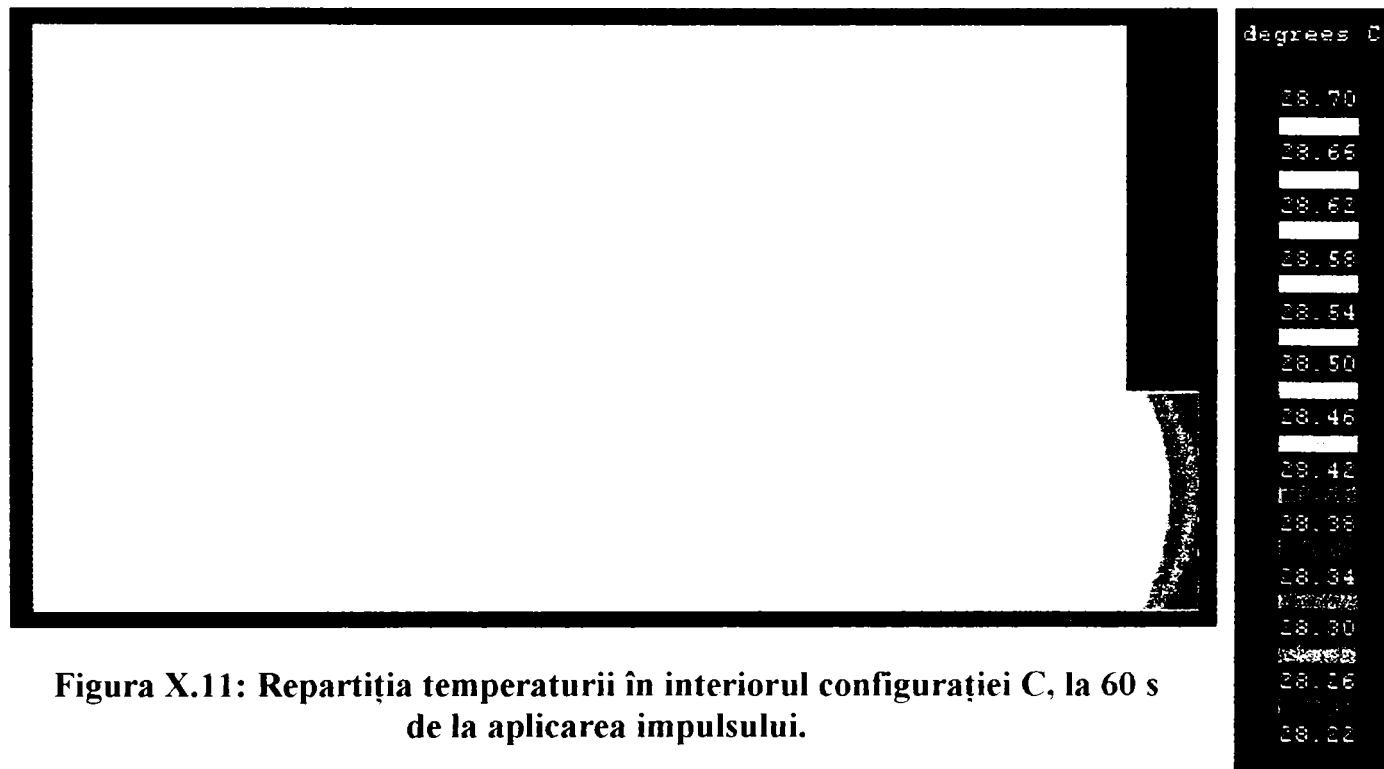


Figura X.11: Repartiția temperaturii în interiorul configurației C, la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura X.12 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației C, la 600 s de la aplicarea impulsului.

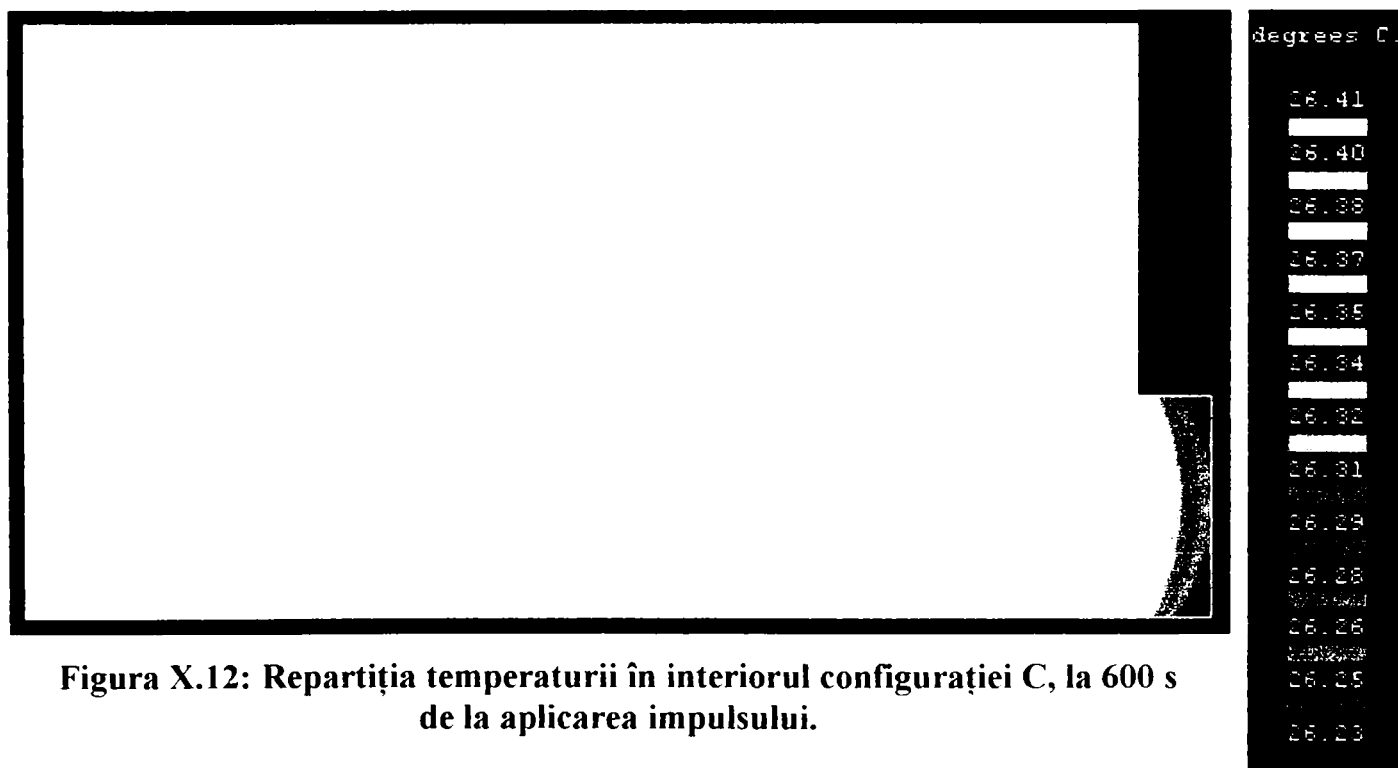


Figura X.12: Repartiția temperaturii în interiorul configurației C, la 600 s de la aplicarea impulsului.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației C, în procesul de răcire, nu depășește 1 °C, observație confirmată și experimental.

Oscilograma impulsului aplicat este prezentată în figura X.13.

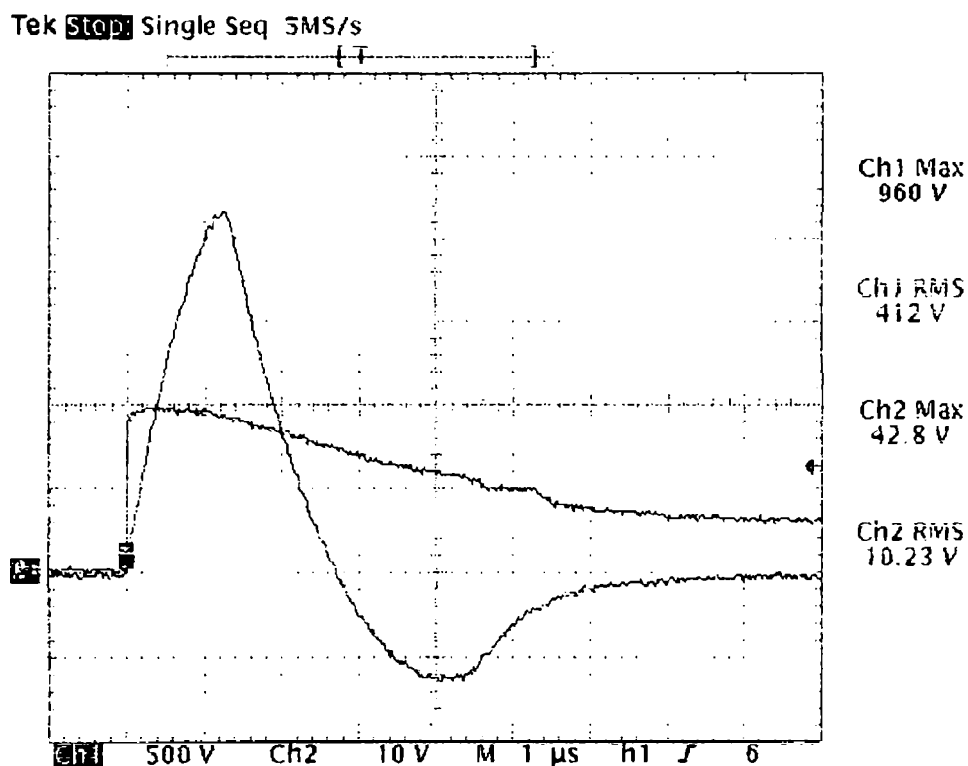


Figura X.13: Oscilograma impulsului aplicat configurației C.

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate a fost de 960 V (canalul 1).

Valoarea de vârf a curentului care s-a stabilit este de 4120 A (canalul 2, prin divizorul 1/100).

Masa varistorului este  $m_v = 12$  g.

Suprafața laterală de disipare a căldurii este, pentru varistor,  $S_{lv} = 1,203 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Masa suplimentară de alamă este  $m_{al} = 29,68$  g.

Suprafața în contact cu aerul este, pentru alamă  $S_{al} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Supratemperatura estimată,  $\tau_e$ , care ar urma să fie atinsă după aplicarea impulsului este:

$$\tau_e = \frac{Q}{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}} = \frac{90}{12 \cdot 0,7534 + 29,68 \cdot 0,383} = 4,40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.11)$$

Aceasta corespunde unei valori a temperaturii maxime:

$$\theta_e = \theta_a + \tau_e = 25 + 4,40 = 29,40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.12)$$

Valoarea calculată a constantei termice de timp, pentru configurația C, la 25 °C, este:

$$T = \frac{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{la}} = \frac{12 \cdot 0,7534 + 26,38 \cdot 0,383}{17 \cdot 1,203 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 1,17 \cdot 10^{-3}} = 537 \text{ s} \quad (10.13)$$

Ca urmare putem spune că procesul de răcire poate fi considerat ca terminat după 1500 s.

Temperatura maximă măsurată este:

$$\theta = 29,04 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.14)$$

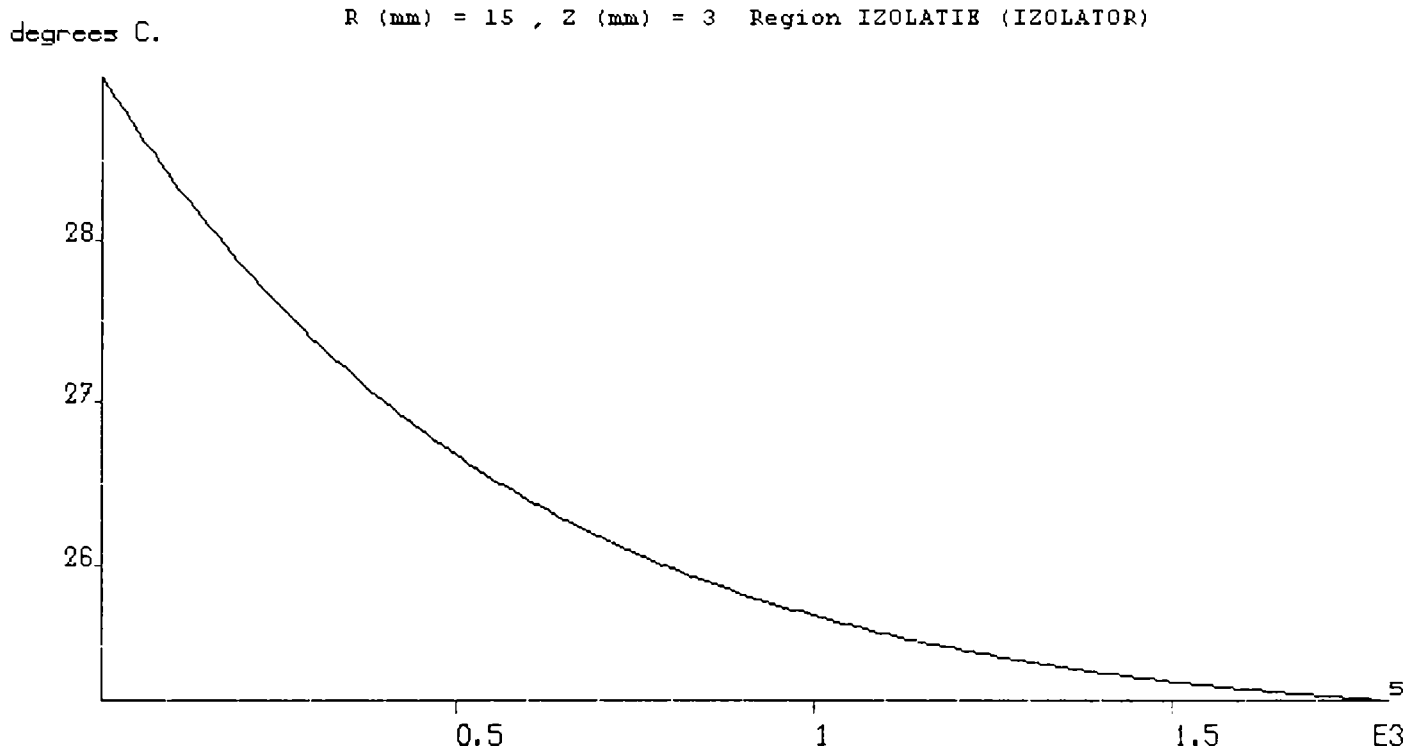
Supratemperatura măsurată este:

$$\tau = \theta - \theta_a = 29,04 - 25 = 4,04 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.15)$$

Se constată că valoarea supratemperaturii măsurate (10.15) este foarte aproape de cea estimată (10.11), ceea ce confirmă exactitatea măsurătorilor și corectitudinea modelului matematic considerat.



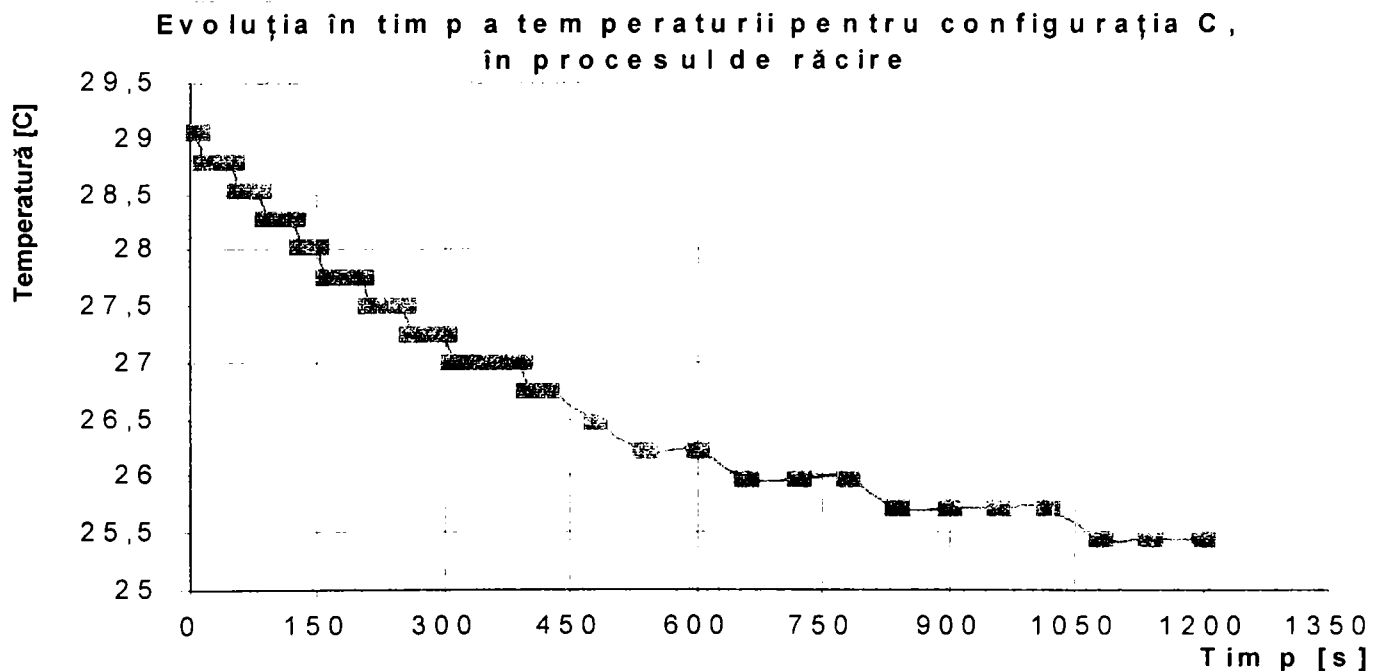
În figura X.14 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, în procesul de răcire, în punctul de coordonate  $R = 15$  mm și  $Z = 3$  mm, așa cum rezultă în urma modelării numerice.



**Figura X.14: Evoluția în timp a temperaturii în procesul de răcire, pentru un punct de coordonate  $R = 15$  mm și  $Z = 3$  mm, aparținând configurației C.**

Graficul este furnizat de către programul FLUX 2D.

În figura X.15 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă din măsurători, în același punct de coordonate  $R = 15$  mm și  $Z = 3$  mm.



**Figura X.15: Evoluția în timp a temperaturii măsurate în punctul de coordonate  $R = 15$  mm și  $Z = 3$  mm aparținând configurației C.**

Se constată că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate.

În Anexa 4C sunt prezentate evoluția în timp a temperaturii pentru configurația C, în cazul unor impulsuri repetate la 3 minute unul după altul precum și oscilogramele acestor impulsuri.



#### X.4. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația D

Configurația **D** este descrisă în Subcapitolul VII.2.4.

Temperatura ambiantă este  $\theta_a = 25\text{ }^\circ\text{C}$ .

Energia impulsului aplicat este de 90 J.

În figura X.16 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației **D**, la 60 s de la aplicarea impulsului.

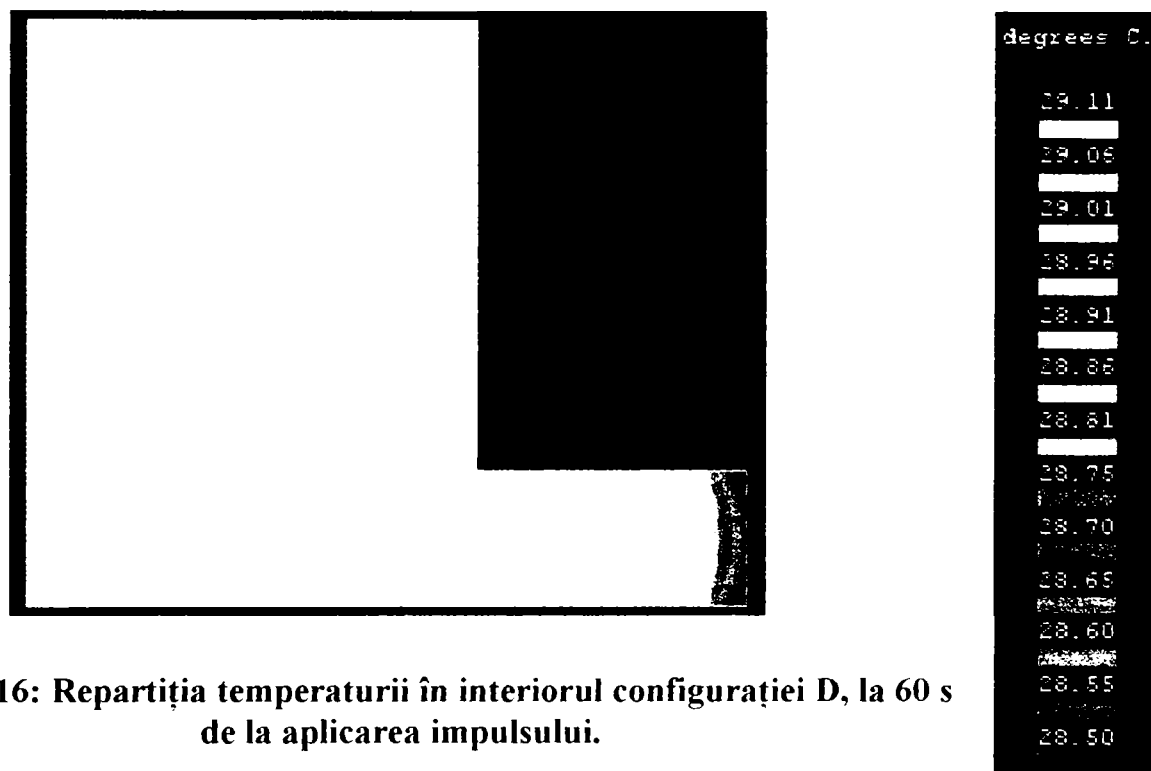


Figura X.16: Repartiția temperaturii în interiorul configurației **D**, la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura X.17 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației **D**, la 600 s de la aplicarea impulsului.

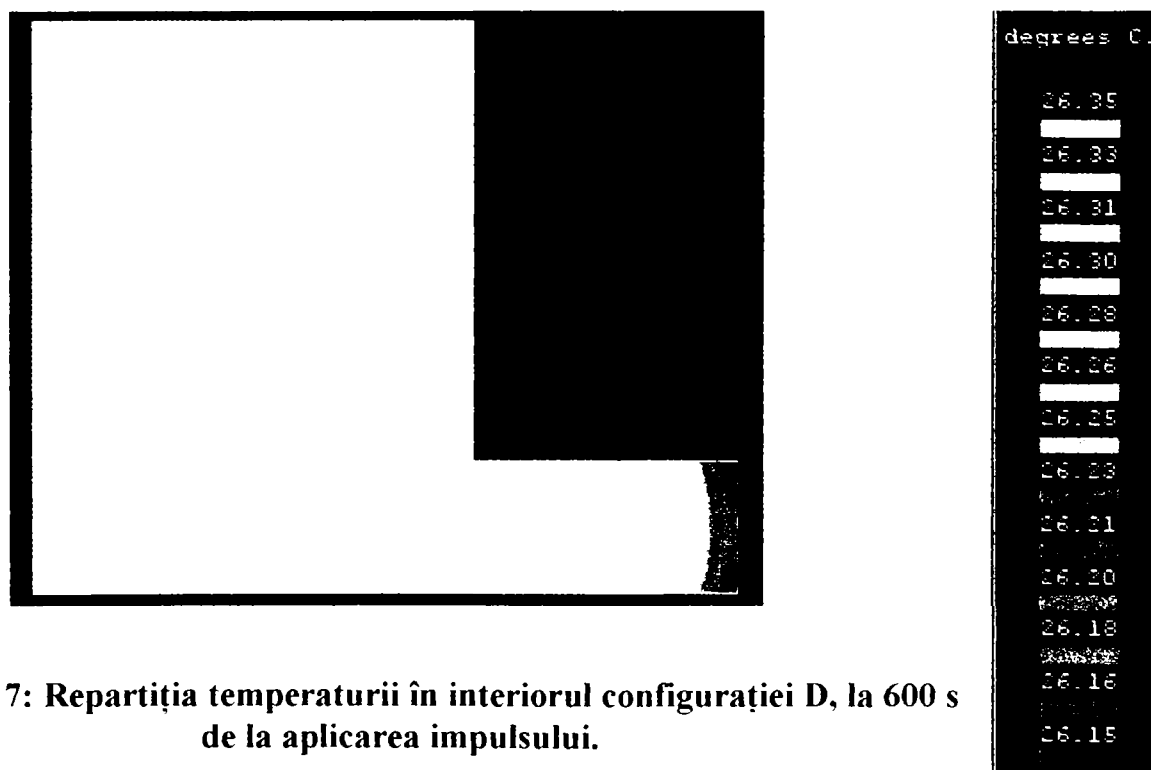
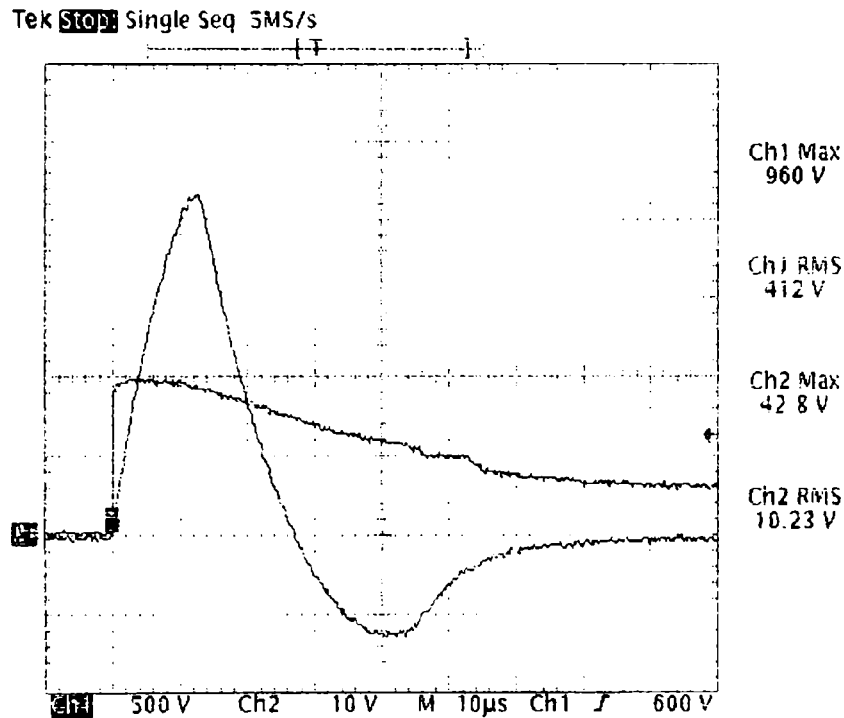


Figura X.17: Repartiția temperaturii în interiorul configurației **D**, la 600 s de la aplicarea impulsului.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației **D**, în procesul de răcire, nu depășește  $1^\circ\text{C}$ , observație confirmată și experimental.

Oscilograma impulsului aplicat este prezentată în figura X.18.



**Figura X.18: Oscilograma impulsului aplicat configurației D.**

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate a fost de 960 V (canalul 1).

Valoarea de vârf a curentului care s-a stabilit este de 4280 A (canalul 2, prin divizorul 1/100).

Masa varistorului este  $m_v = 12$  g.

Suprafața laterală de disipare a căldurii este, pentru varistor,  $S_{lv} = 1,595 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Masa suplimentară de alamă este  $m_{al} = 26,38$  g.

Suprafața în contact cu aerul este, pentru alamă  $S_{al} = 0,942 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Supratemperatura estimată,  $\tau_e$ , care ar urma să fie atinsă după aplicarea impulsului este:

$$\tau_e = \frac{Q}{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}} = \frac{90}{12 \cdot 0,7534 + 26,38 \cdot 0,383} = 4,70^\circ\text{C} \quad (10.16)$$

Aceasta corespunde unei valori a temperaturii maxime:

$$\theta_e = \theta_a + \tau_e = 25 + 4,70 = 29,70^\circ\text{C} \quad (10.17)$$

Valoarea calculată a constantei termice de timp, pentru configurația **D**, la  $25^\circ\text{C}$ , este:

$$T = \frac{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{la}} = \frac{12 \cdot 0,7534 + 26,38 \cdot 0,383}{17 \cdot 1,595 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 0,942 \cdot 10^{-3}} = 464 \text{ s} \quad (10.18)$$

Ca urmare putem spune că procesul de răcire poate fi considerat ca terminat după 1500 s.

Temperatura maximă măsurată este:

$$\theta = 29,56^\circ\text{C} \quad (10.19)$$

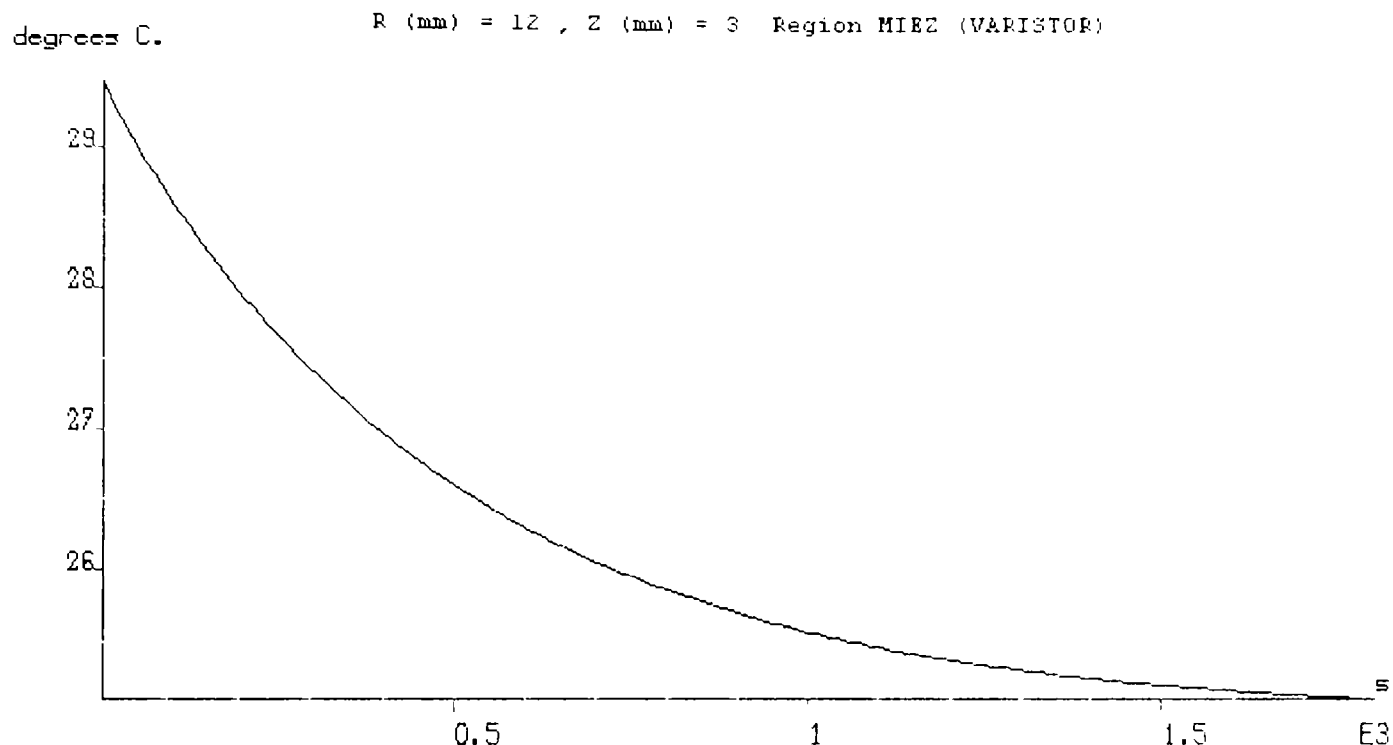
Supratemperatura măsurată este:

$$\tau = \theta - \theta_a = 29,56 - 25 = 4,56^\circ\text{C} \quad (10.20)$$

Se constată că valoarea supratemperaturii măsurate (10.20) este foarte aproape de cea estimată (10.16), ceea ce confirmă exactitatea măsurătorilor și corectitudinea modelului matematic considerat.



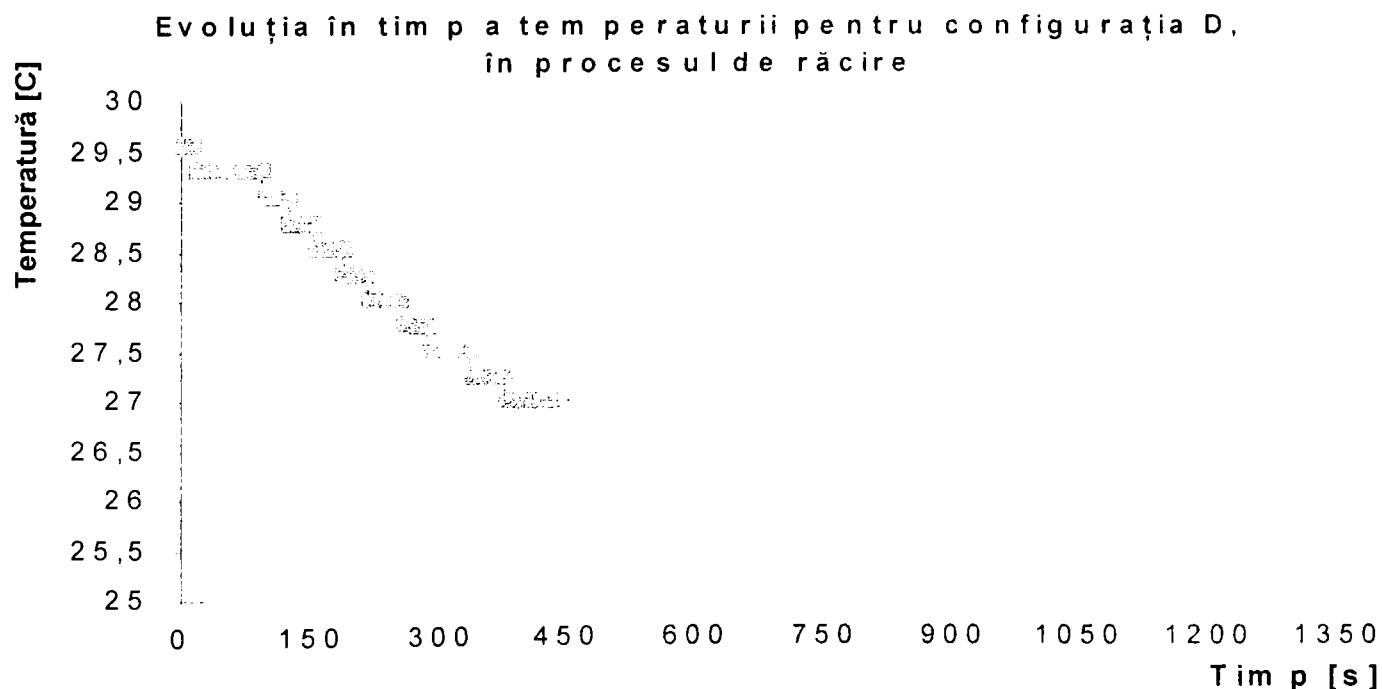
În figura X.19 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, în procesul de răcire, în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm, așa cum rezultă în urma modelării numerice.



**Figura X.19: Evoluția în timp a temperaturii în procesul de răcire, pentru un punct de coordonate  $R = 15$  mm și  $Z = 3$  mm, aparținând configurației D.**

Graficul este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În figura X.20 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă din măsurători, în același punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm.



**Figura X.20: Evoluția în timp a temperaturii măsurate în punctul de coordonate  $R = 15$  mm și  $Z = 3$  mm aparținând configurației D.**

Se constată că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate.

În Anexa 4D sunt prezentate evoluția în timp a temperaturii pentru configurația D, în cazul unor impulsuri repetate la 3 minute unul după altul precum și oscilogrammele acestor impulsuri.





## X.5. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația E

Configurația E este descrisă în Subcapitolul VII.2.5.

Temperatura ambiantă este  $\theta_a = 26^\circ\text{C}$

Energia impulsului aplicat este de 90 J.

În figura X.21 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației E, la 60 s de la aplicarea impulsului.

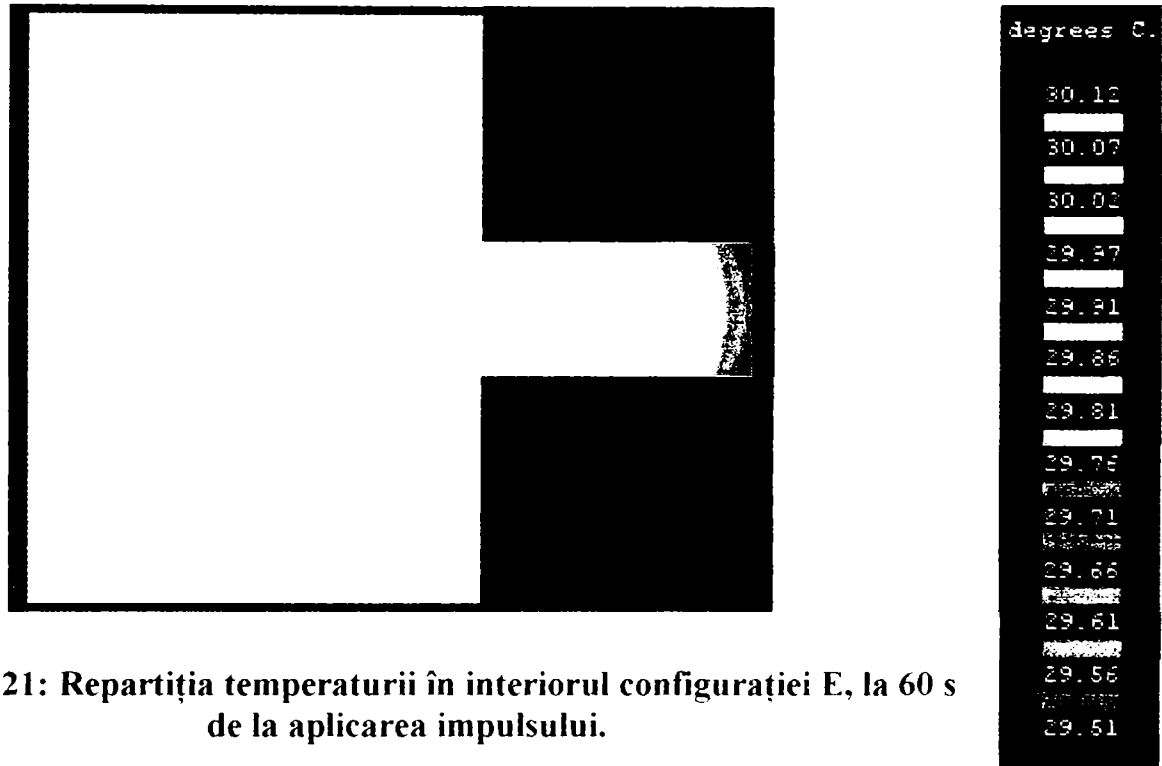


Figura X.21: Repartiția temperaturii în interiorul configurației E, la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura X.22 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației E, la 600 s de la aplicarea impulsului.

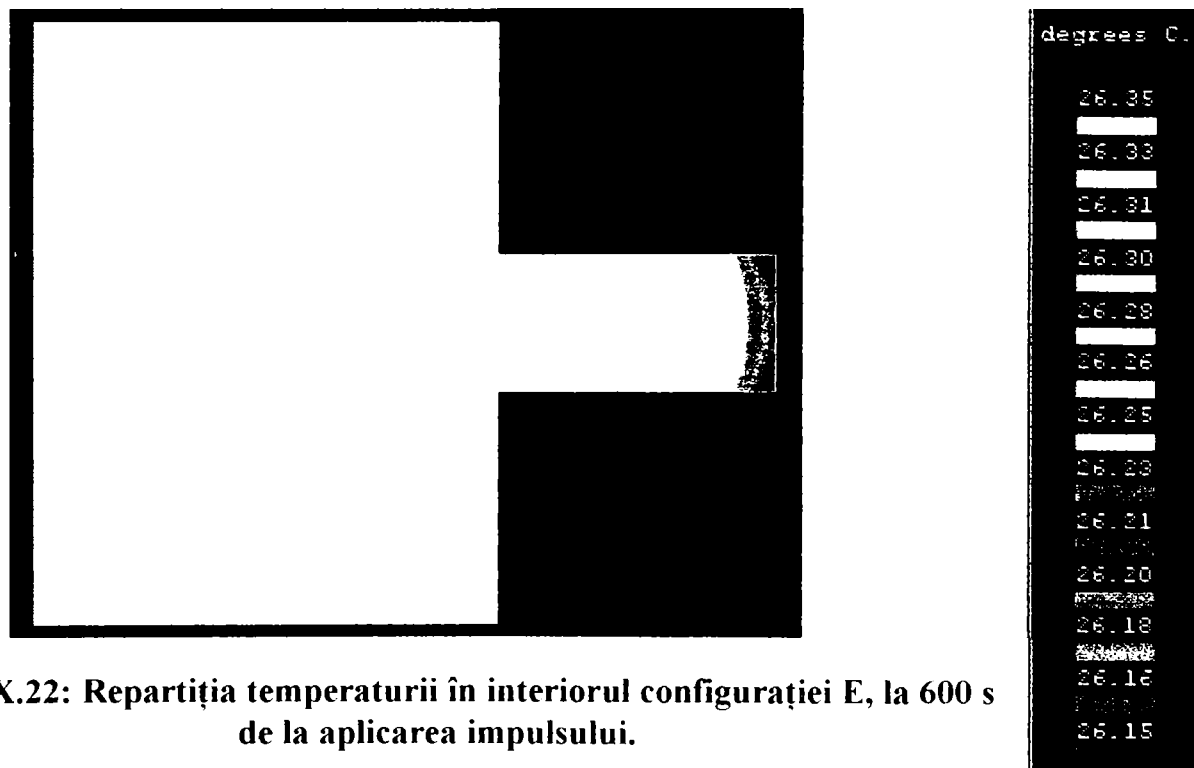


Figura X.22: Repartiția temperaturii în interiorul configurației E, la 600 s de la aplicarea impulsului.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației E, în procesul de răcire, nu depășește 1 °C, observație confirmată și experimental.

Oscilograma impulsului aplicat este prezentată în figura XI.23.

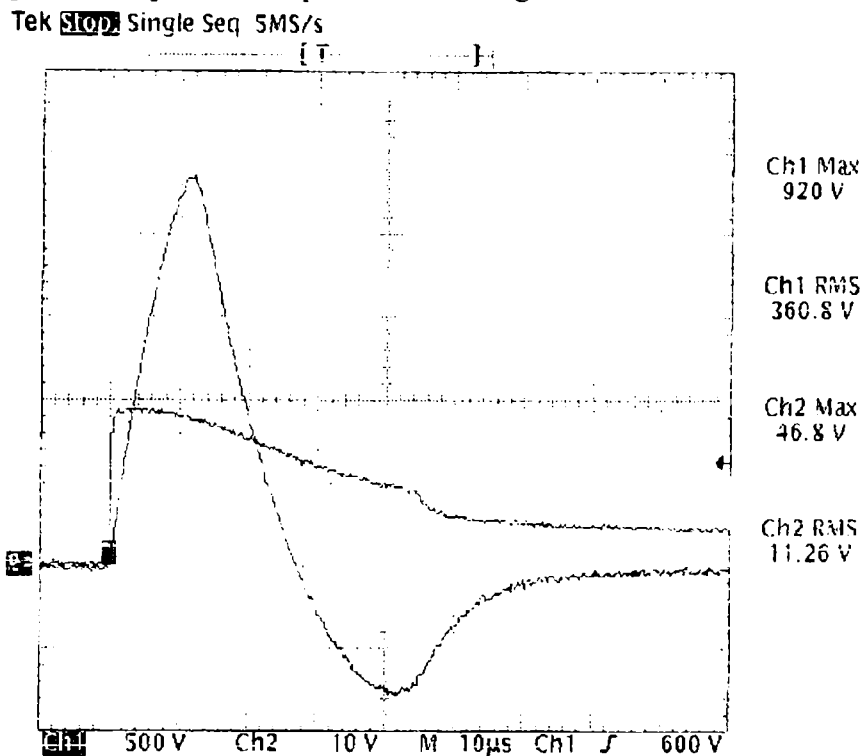


Figura X.18: Oscilograma impulsului aplicat configurației D.

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate a fost de 920 V (canalul 1).

Valoarea de vârf a curentului care s-a stabilit este de 4680 A (canalul 2, prin divizorul 1/100).

Masa varistorului este  $m_v = 12$  g.

Suprafața laterală de disipare a căldurii este, pentru varistor,  $S_{lv} = 1,25 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>.

Masa suplimentară de alamă este  $m_{al} = 26,38$  g.

Suprafața în contact cu aerul este, pentru alamă  $S_{al} = 1,28 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>.

Supratemperatura estimată,  $\tau_e$ , care ar urma să fie atinsă după aplicarea impulsului este:

$$\tau_e = \frac{Q}{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}} = \frac{90}{12 \cdot 0,7534 + 26,38 \cdot 0,383} = 4,70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.21)$$

Aceasta corespunde unei valori a temperaturii maxime:

$$\theta_e = \theta_a + \tau_e = 25 + 4,70 = 29,70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.22)$$

Valoarea calculată a constantei termice de timp, pentru configurația E, la 25 °C, este:

$$T = \frac{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{la}} = \frac{12 \cdot 0,7534 + 26,38 \cdot 0,383}{17 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 1,28 \cdot 10^{-3}} = 473 \text{ s} \quad (10.23)$$

Ca urmare putem spune că procesul de răcire poate fi considerat ca terminat după 1500 s.

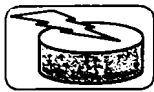
Temperatura maximă măsurată este:

$$\theta = 30,59 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.24)$$

Supratemperatura măsurată este:

$$\tau = \theta - \theta_a = 30,56 - 26 = 4,59 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.25)$$

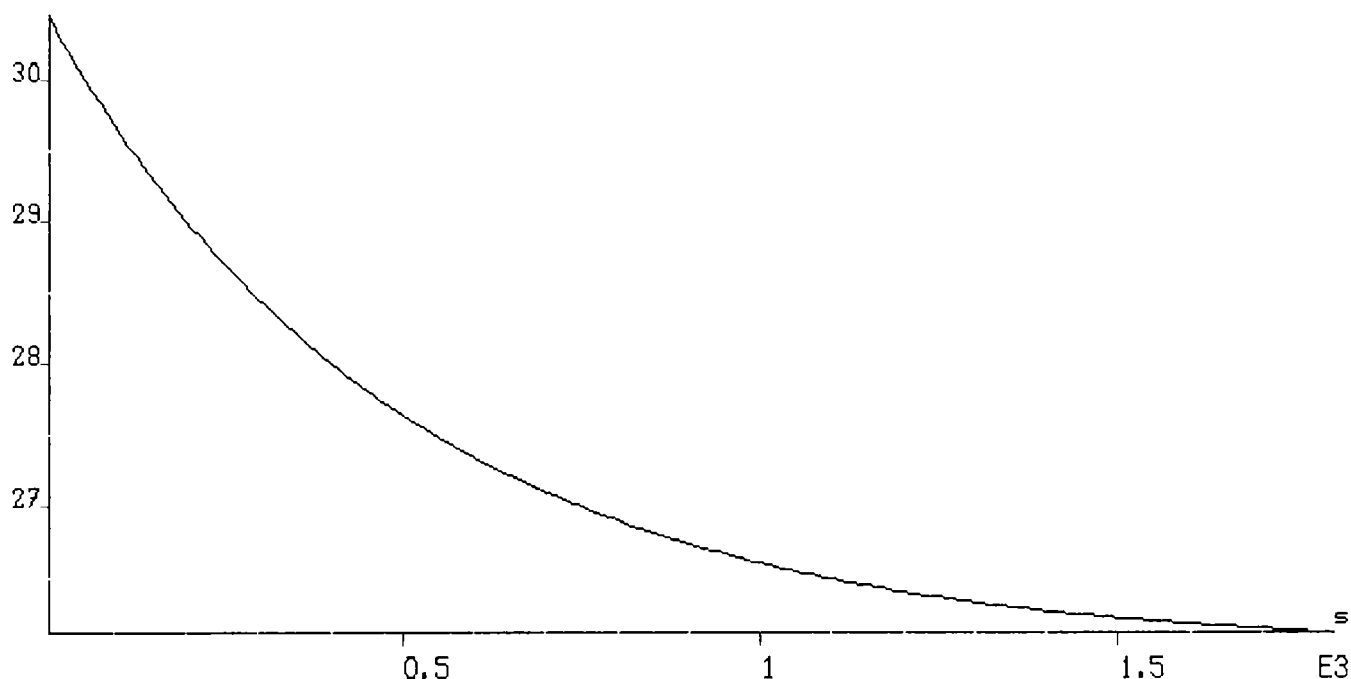
Se constată că valoarea supratemperaturii măsurate (10.25) este foarte aproape de cea estimată (10.21), ceea ce confirmă exactitatea măsurărilor și corectitudinea modelului matematic considerat.



În figura X.24 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, în procesul de răcire, în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm, așa cum rezultă în urma modelării numerice.

degrees C.

R (mm) = 12 , Z (mm) = 3 Region MIEZ (VARISTOR)

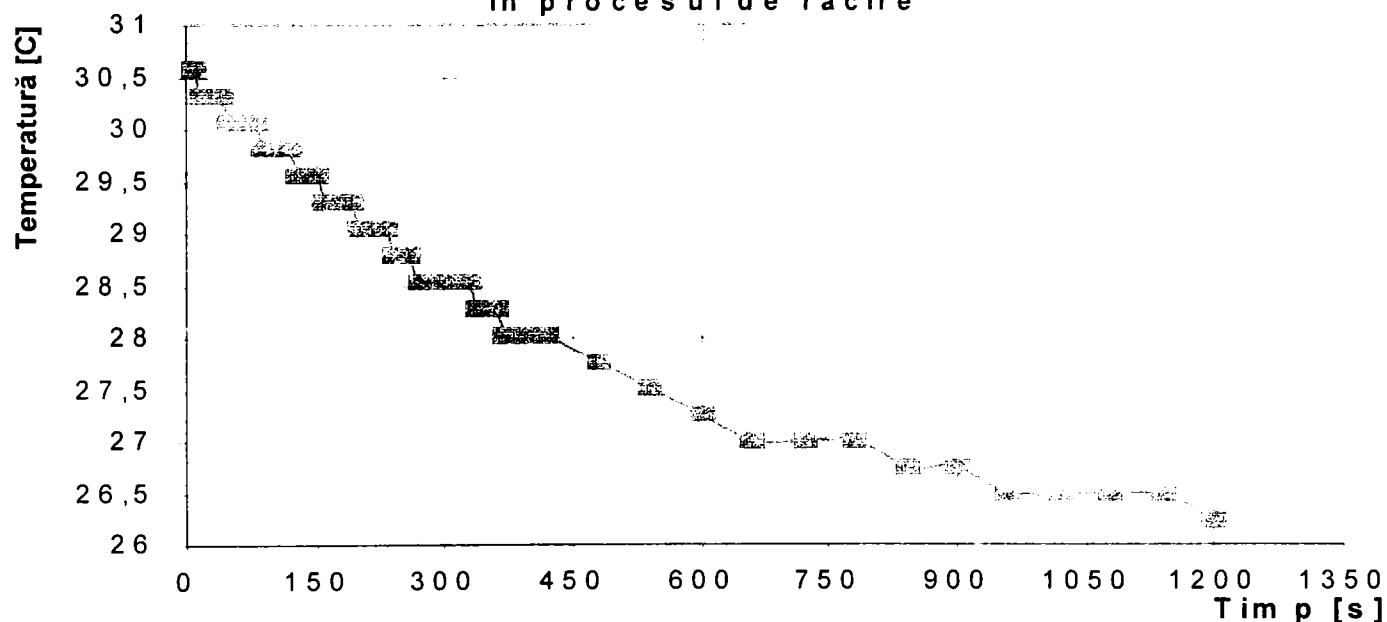


**Figura X.24: Evoluția în timp a temperaturii în procesul de răcire, pentru un punct de coordonate  $R = 15$  mm și  $Z = 3$  mm, aparținând configurației E.**

Graficul este furnizat de către programul FLUX 2D.

În figura X.25 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă din măsurători, în același punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm.

**Evoluția în timp a temperaturii pentru configurația E, în procesul de răcire**



**Figura X.25: Evoluția în timp a temperaturii măsurate în punctul de coordonate  $R = 15$  mm și  $Z = 3$  mm aparținând configurației E.**

Se constată că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate.

În Anexa 4E sunt prezentate evoluția în timp a temperaturii pentru configurația E, în cazul unor impulsuri repetate la 3 minute unul după altul precum și oscilogrammele acestor impulsuri.



## X.6. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația M

Configurația M este descrisă în Subcapitolul VII.2.6.

Temperatura ambiantă este  $\theta_a = 27^\circ\text{C}$ .

Energia impulsului aplicat este de 202,5 J.

În figura X.26 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației M, la 60 s de la aplicarea impulsului.

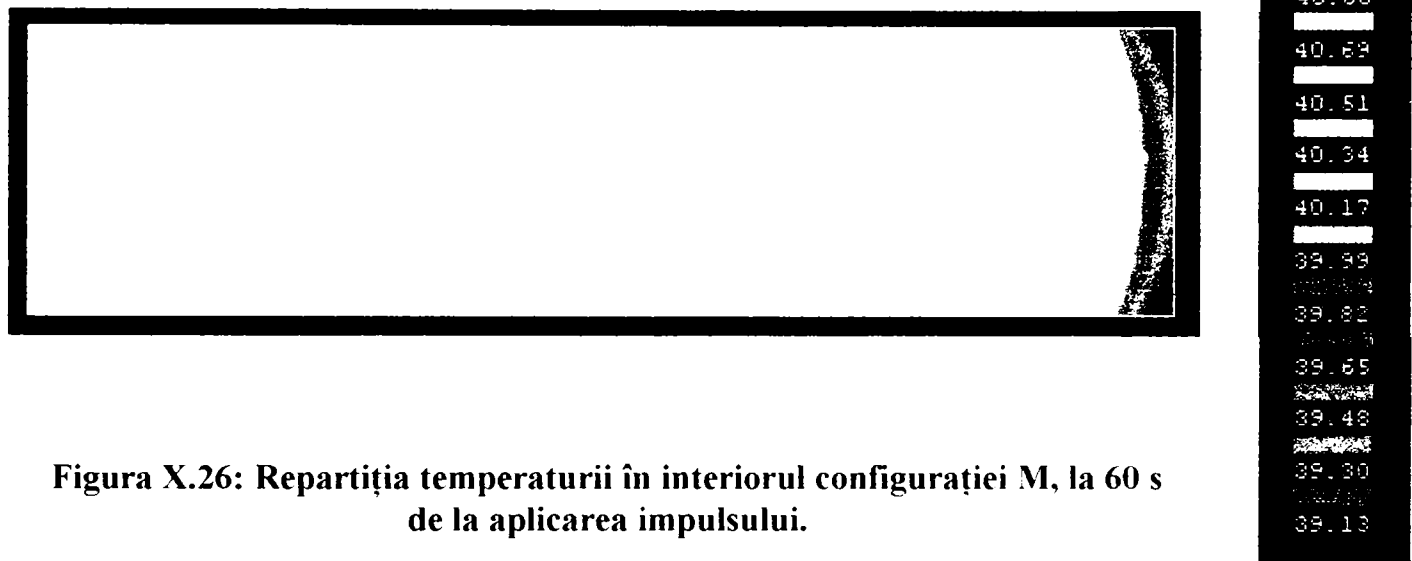


Figura X.26: Repartiția temperaturii în interiorul configurației M, la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura X.27 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației M, la 600 s de la aplicarea impulsului.

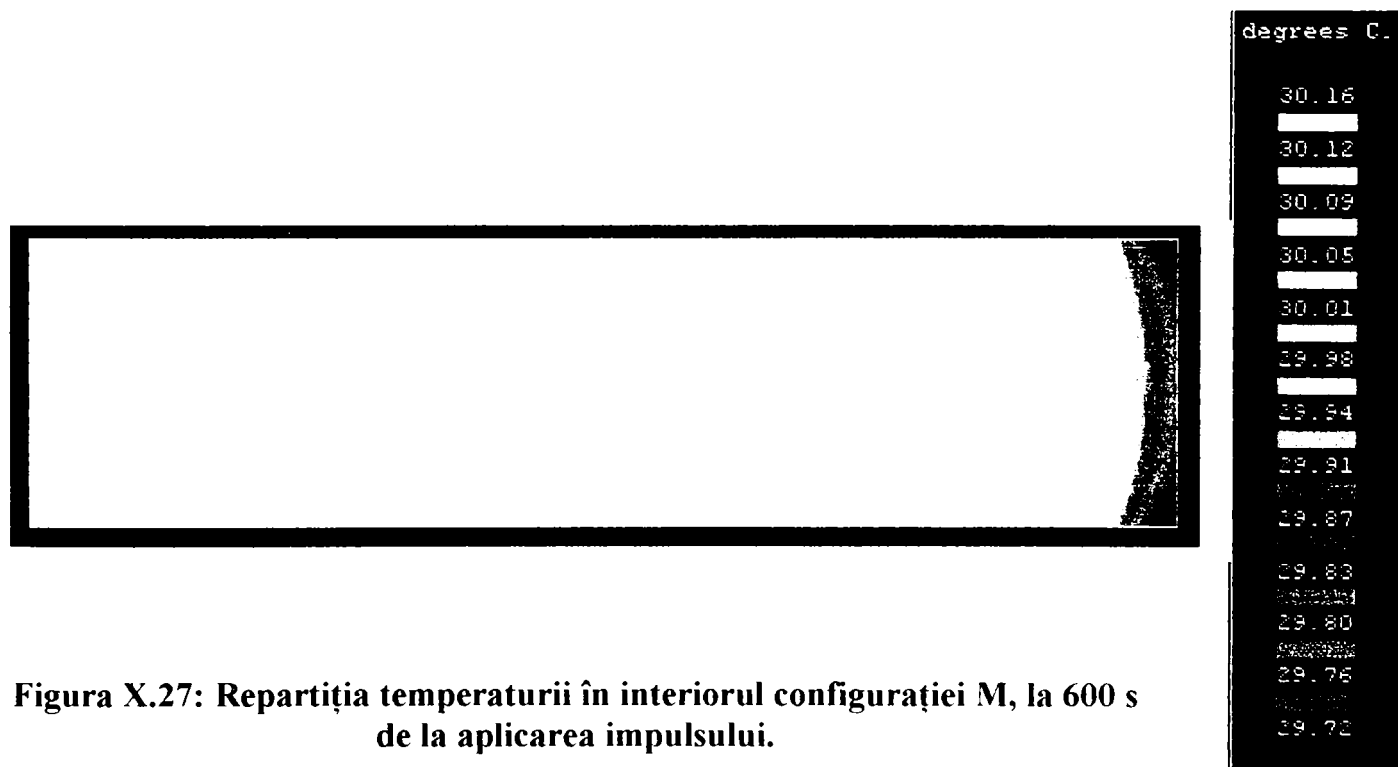


Figura X.27: Repartiția temperaturii în interiorul configurației M, la 600 s de la aplicarea impulsului.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației M, în procesul de răcire, nu depășește 2 °C, observație confirmată și experimental.

Oscilograma impulsului aplicat este prezentată în figura X.28.

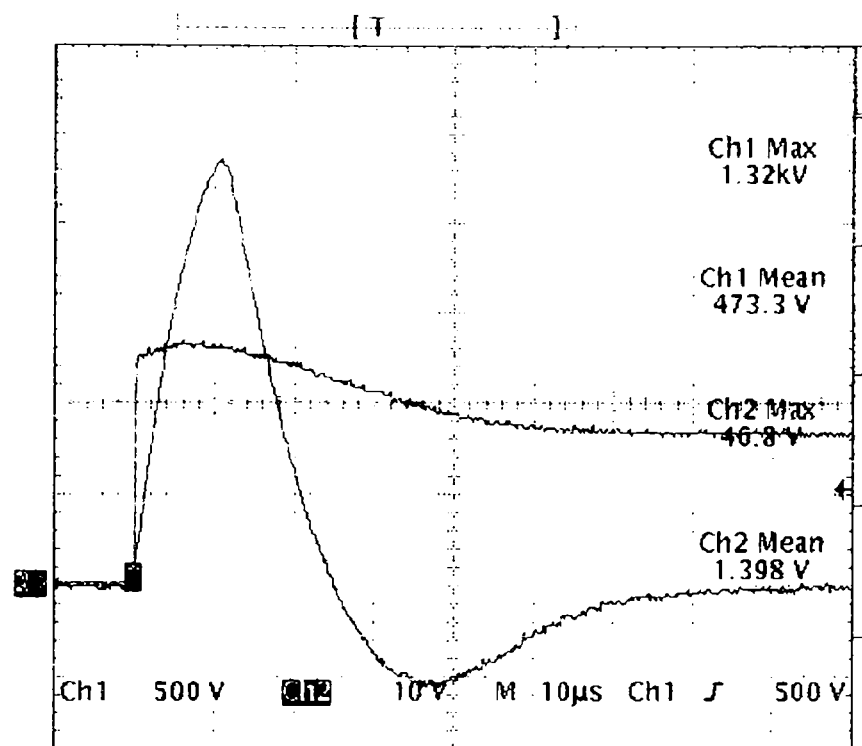


Figura X.28: Oscilograma impulsului aplicat configurației M.

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate a fost de 1320 V (canalul 1).

Valoarea de vârf a curentului care s-a stabilit este de 4680 A (canalul 2, prin divizorul 1/100).

Masa varistorului este  $m_v = 16$  g.

Suprafața laterală de disipare a căldurii este, pentru varistor,  $S_{lv} = 2,01 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>.

Varistorul nu este prevăzut, în această configurație, cu masă suplimentară din alamă.

Transferul termic are loc pe ambele fețe ale varistorului.

Supratemperatura estimată,  $\tau_e$ , care ar urma să fie atinsă după aplicarea impulsului este:

$$\tau_e = \frac{Q}{m_v \cdot c_v} = \frac{202,5}{16 \cdot 0,7534} = 16,79 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.26)$$

Aceasta corespunde unei valori a temperaturii maxime:

$$\theta_e = \theta_a + \tau_e = 27 + 16,79 = 43,79 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.27)$$

Valoarea calculată a constantei termice de timp, pentru configurația M, la 25 °C, este:

$$T = \frac{m_v \cdot c_v}{\alpha_v \cdot S_{lv}} = \frac{16 \cdot 0,7534}{17 \cdot 2,01 \cdot 10^{-3}} = 352,7 \text{ s} \quad (10.28)$$

Ca urmare putem spune că procesul de răcire poate fi considerat ca terminat după 1500 s.

Temperatura maximă măsurată este:

$$\theta = 43,44 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.29)$$

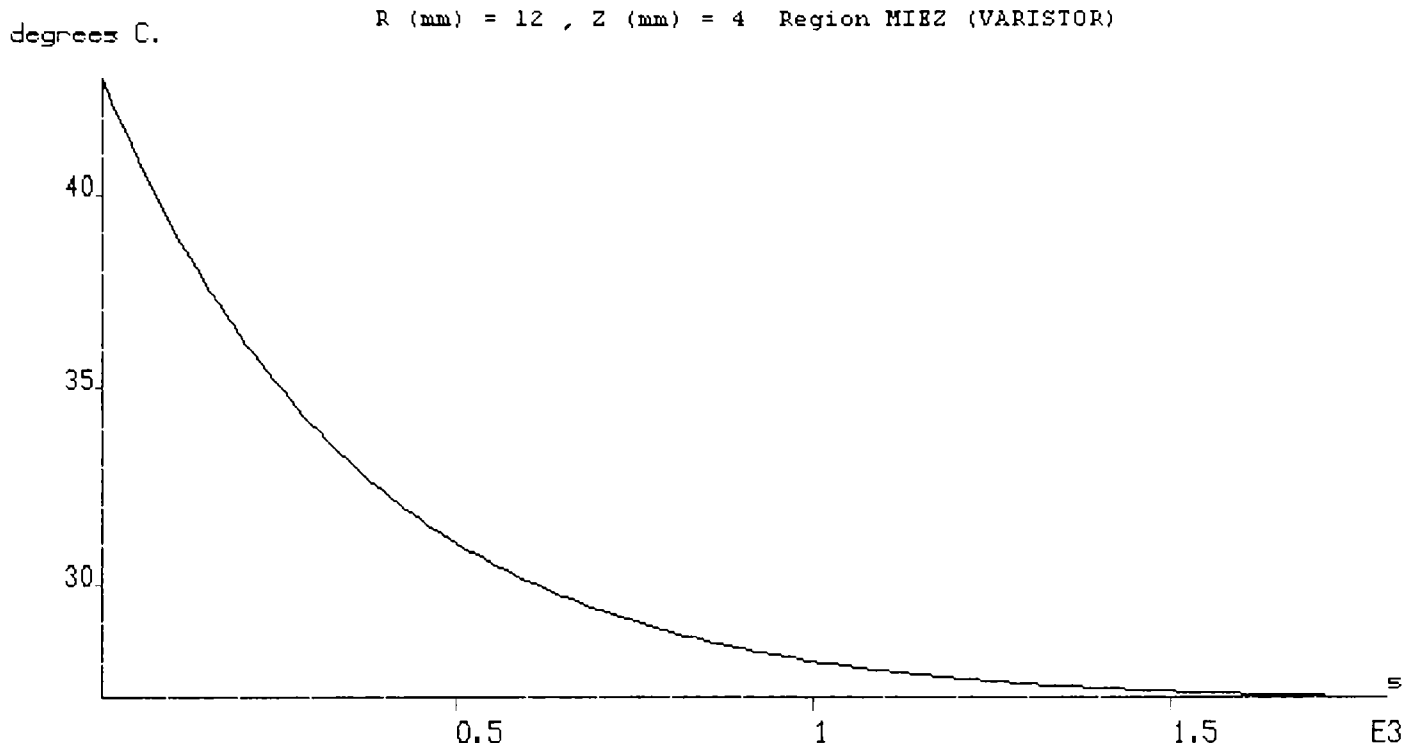
Supratemperatura măsurată este:

$$\tau = \theta - \theta_a = 43,44 - 27 = 16,44 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.30)$$

Se constată că valoarea supratemperaturii măsurate (10.30) este foarte aproape de cea estimată (10.26), ceea ce confirmă exactitatea măsurătorilor și corectitudinea modelului matematic considerat.



În figura X.4 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, în procesul de răcire, în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm, așa cum rezultă în urma modelării numerice.

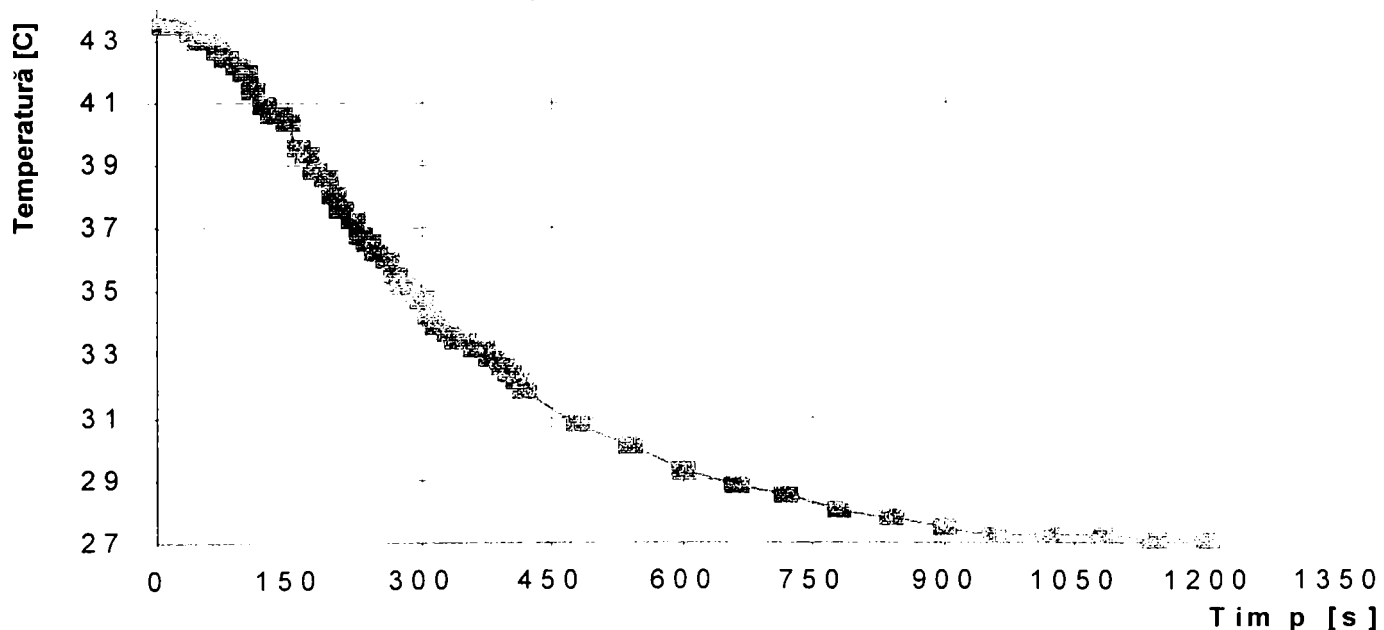


**Figura X.29: Evoluția în timp a temperaturii în procesul de răcire, pentru un punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm, aparținând configurației M.**

Graficul este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În figura X.5 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă din măsurători, în același punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm.

**Evoluția în timp a temperaturii pentru configurația M, în procesul de răcire**



**Figura X.30: Evoluția în timp a temperaturii măsurate în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 3$  mm aparținând configurației M.**

Se constată că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate.

În Anexa 4M sunt prezentate evoluția în timp a temperaturii pentru configurația M, în cazul unor impulsuri repetate la 3 minute unul după altul precum și oscilogramele acestor impulsuri.





## X.7. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația N

Configurația N este descrisă în Subcapitolul VII.2.7.

Temperatura ambiantă este  $\theta_a = 28^\circ\text{C}$ .

Energia impulsului aplicat este de 202,5 J.

În figura X.31 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației N, la 60 s de la aplicarea impulsului.

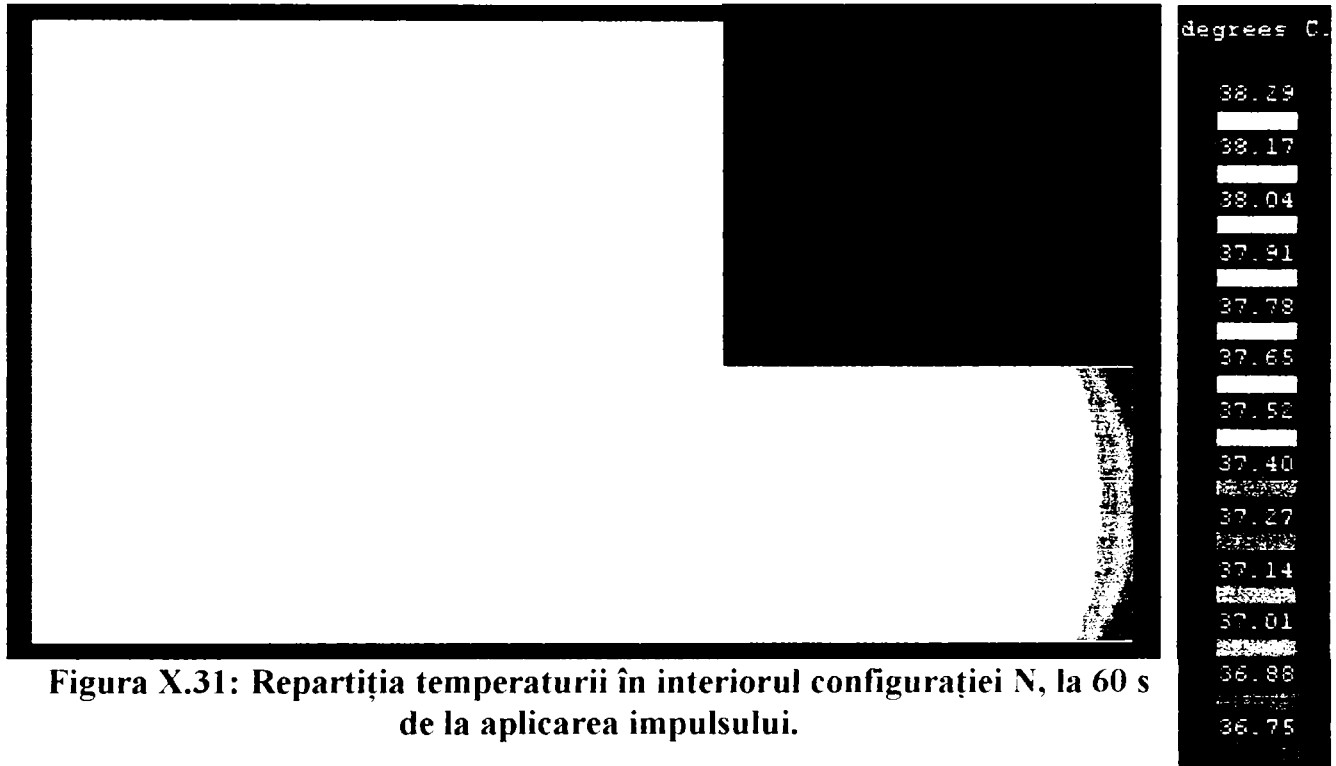


Figura X.31: Repartiția temperaturii în interiorul configurației N, la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura X.32 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației N, la 600 s de la aplicarea impulsului.

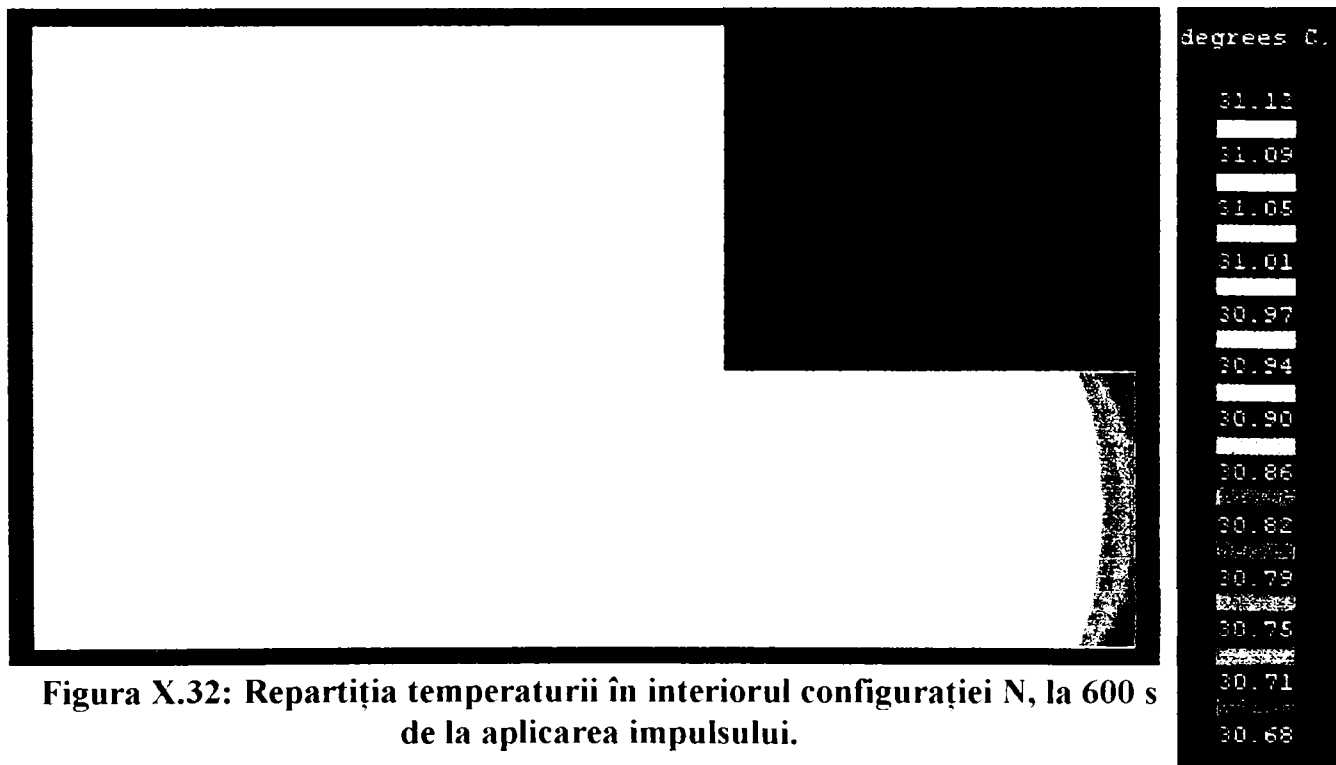


Figura X.32: Repartiția temperaturii în interiorul configurației N, la 600 s de la aplicarea impulsului.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației N, în procesul de răcire, nu depășește 2 °C, observație confirmată și experimental.

Oscilograma impulsului aplicat este prezentată în figura XI.33.

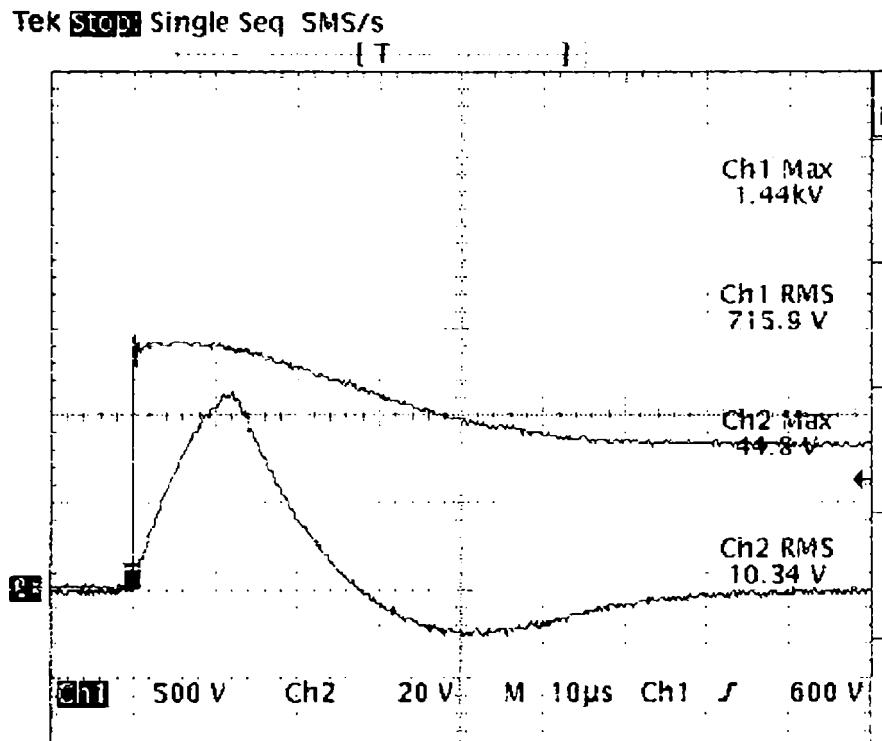


Figura X.33: Oscilograma impulsului aplicat configurației N.

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate a fost de 1440 V (canalul 1).

Valoarea de vârf a curentului care s-a stabilit este de 4480 A (canalul 2, prin divizorul 1/100).

Masa varistorului este  $m_v = 16$  g.

Suprafața laterală de disipare a căldurii este, pentru varistor,  $S_{lv} = 1,69 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Masa suplimentară de alamă este  $m_{al} = 13,19$  g.

Suprafața în contact cu aerul este, pentru alamă  $S_{al} = 0,628 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ .

Supratemperatura estimată,  $\tau_e$ , care ar urma să fie atinsă după aplicarea impulsului este:

$$\tau_e = \frac{Q}{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}} = \frac{202,5}{16 \cdot 0,7534 + 13,19 \cdot 0,383} = 11,83 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.31)$$

Aceasta corespunde unei valori a temperaturii maxime:

$$\theta_e = \theta_a + \tau_e = 28 + 11,83 = 39,83 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.32)$$

Valoarea calculată a constantei termice de timp, pentru configurația N, la 25 °C, este:

$$T = \frac{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{la}} = \frac{16 \cdot 0,7534 + 13,19 \cdot 0,383}{17 \cdot 1,69 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 0,628 \cdot 10^{-3}} = 448 \text{ s} \quad (10.33)$$

Ca urmare putem spune că procesul de răcire poate fi considerat ca terminat după 1500 s.

Temperatura maximă măsurată este:

$$\theta = 39,58 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.34)$$

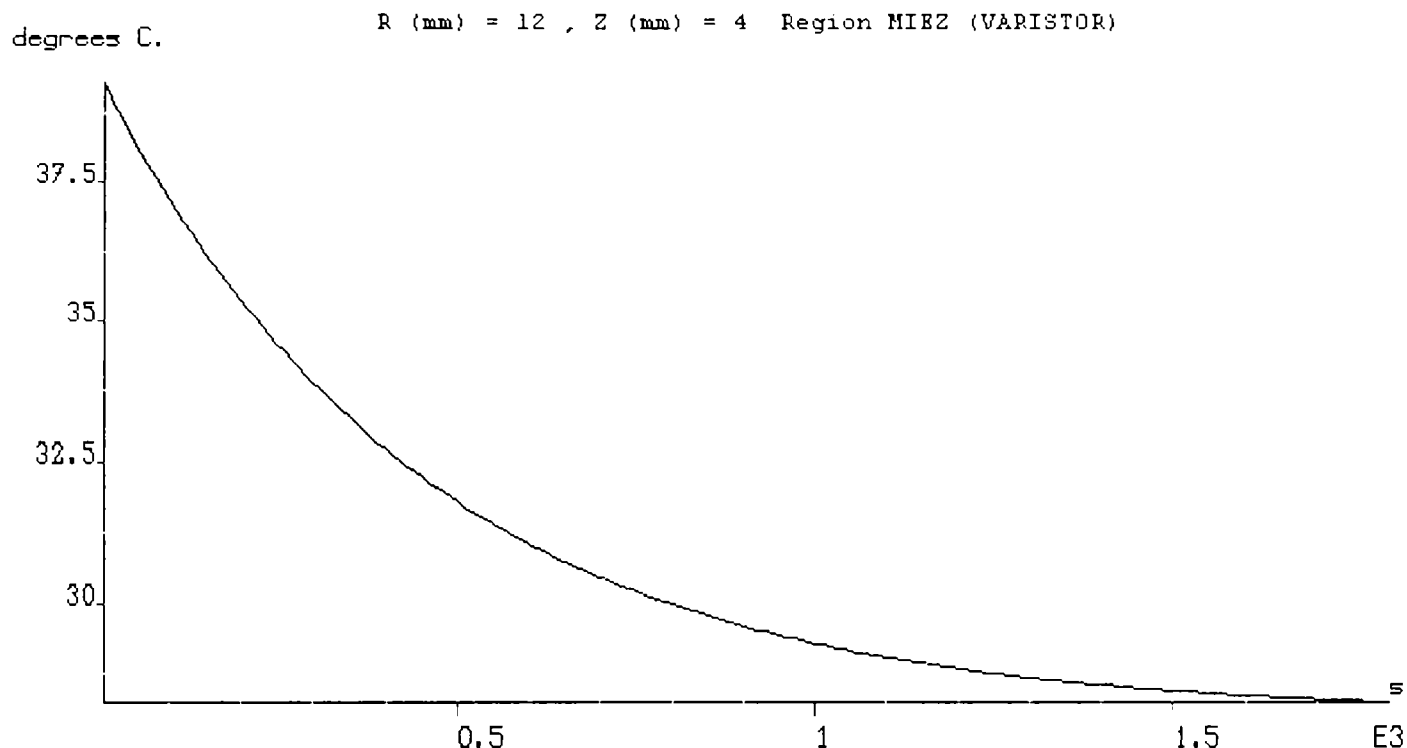
Supratemperatura măsurată este:

$$\tau = \theta - \theta_a = 39,58 - 28 = 11,58 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.35)$$

Se constată că valoarea supratemperaturii măsurate (10.35) este foarte aproape de cea estimată (10.31), ceea ce confirmă exactitatea măsurătorilor și corectitudinea modelului matematic considerat.



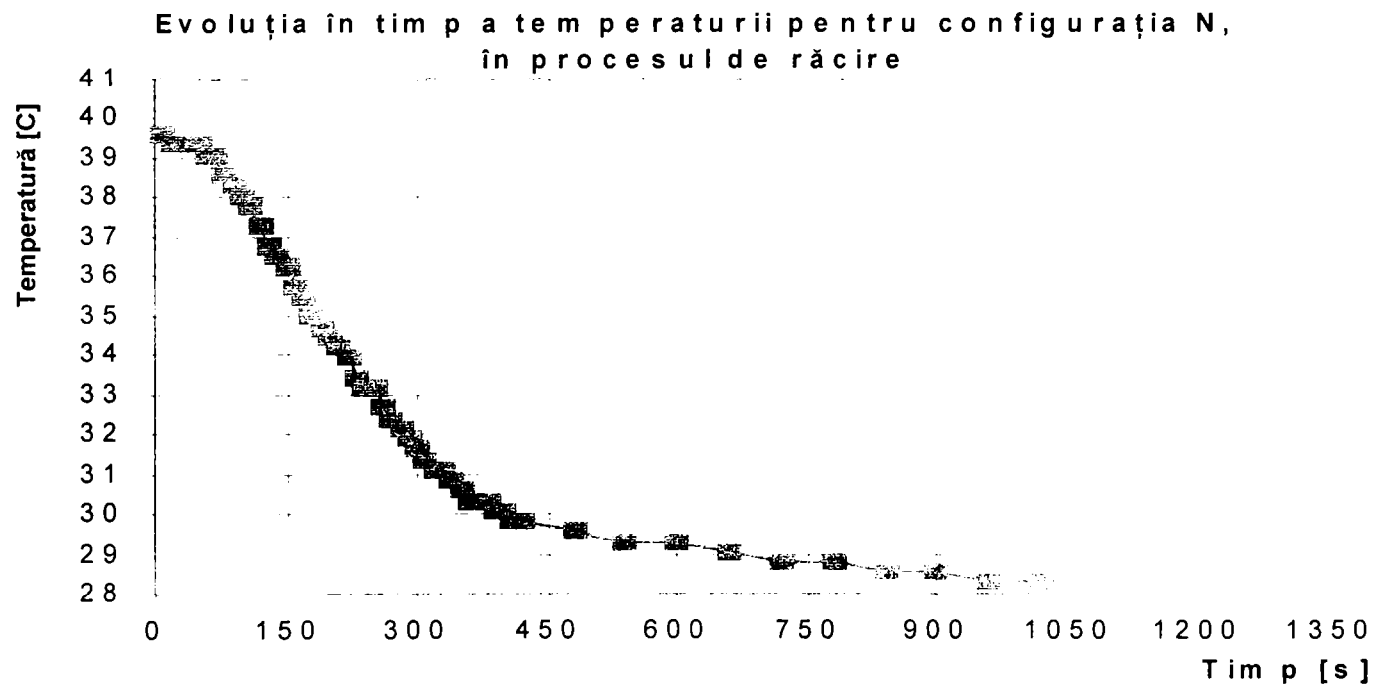
În figura X.34 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, în procesul de răcire, în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm, așa cum rezultă în urma modelării numerice.



**Figura X.34: Evoluția în timp a temperaturii în procesul de răcire, pentru un punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm, aparținând configurației N.**

Graficul este furnizat de către programul FLUX 2D.

În figura X.35 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă din măsurători, în același punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm.



**Figura X.35: Evoluția în timp a temperaturii măsurate în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm aparținând configurației N.**

Se constată că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate.

În Anexa 4N sunt prezentate evoluția în timp a temperaturii pentru configurația N, în cazul unor impulsuri repetate la 3 minute unul după altul precum și oscilogramele acestor impulsuri.



### X.8. Analiza stabilității termice în regim de serviciu de impuls pentru configurația P

Configurația P este descrisă în Subcapitolul VII.2.8.

Temperatura ambiantă este  $\theta_a = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Energia impulsului aplicat este de 202,5 J.

În figura X.36 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației P, la 60 s de la aplicarea impulsului.

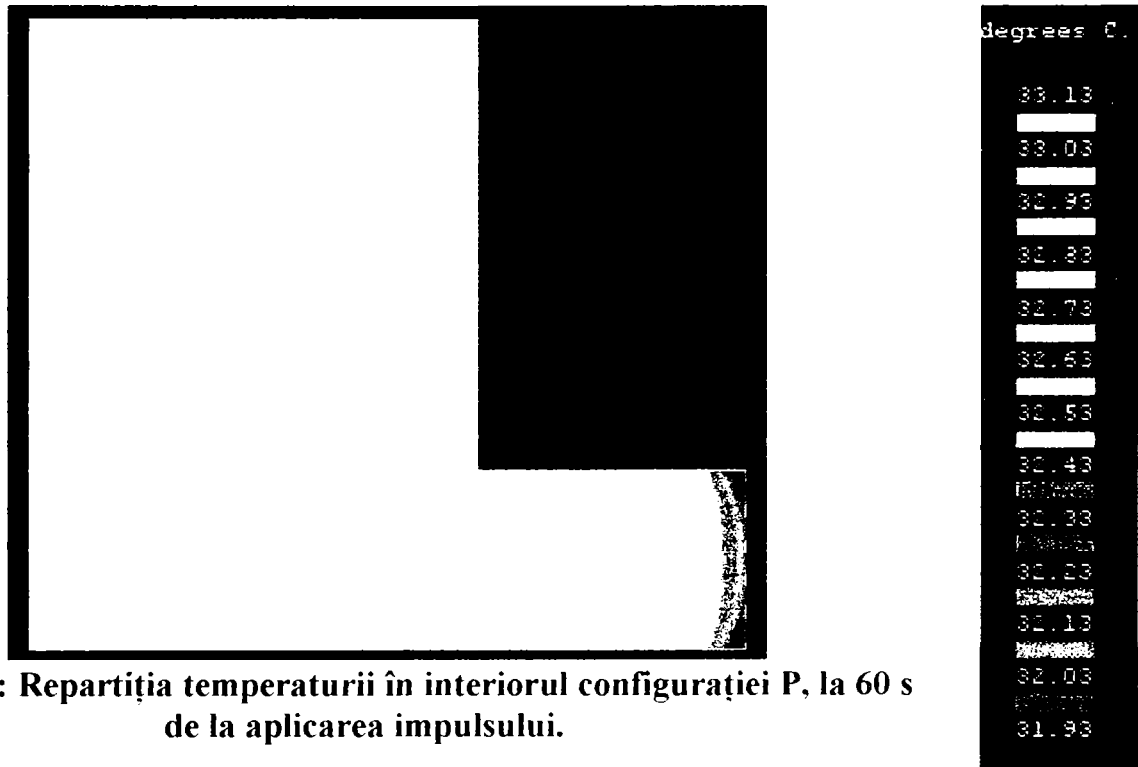


Figura X.36: Repartiția temperaturii în interiorul configurației P, la 60 s de la aplicarea impulsului.

În figura X.37 este prezentată repartiția temperaturii în interiorul configurației P, la 600 s de la aplicarea impulsului.

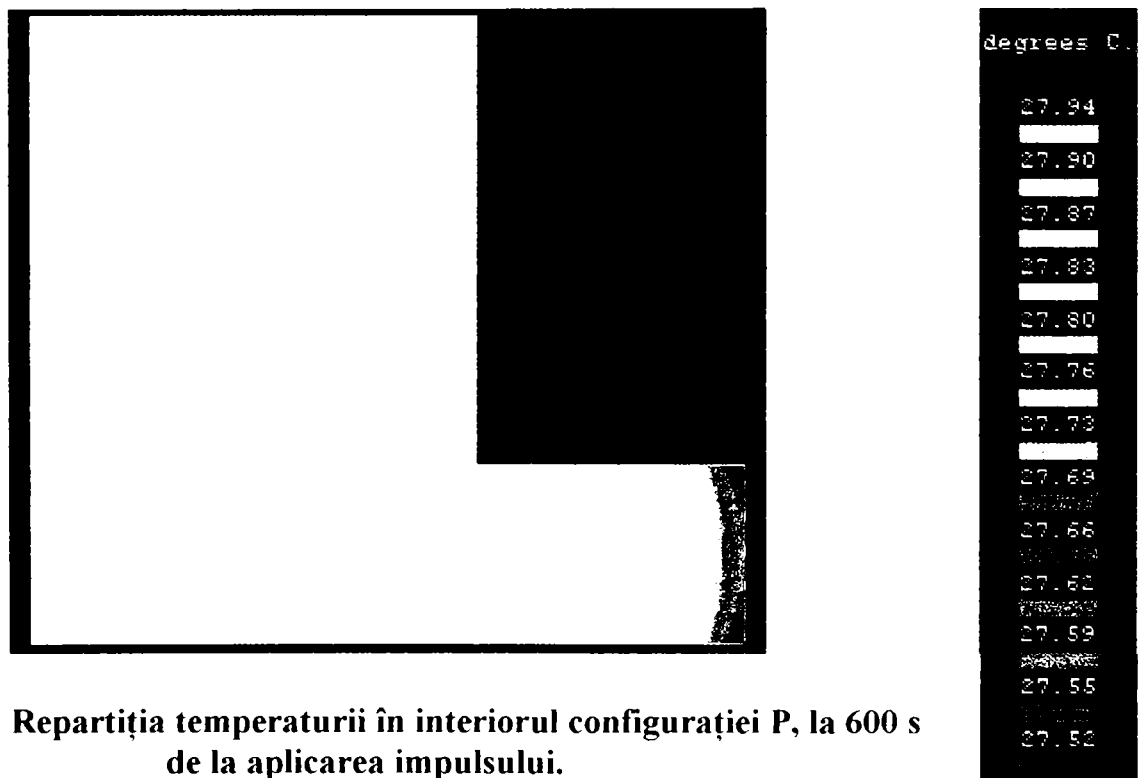


Figura X.37: Repartiția temperaturii în interiorul configurației P, la 600 s de la aplicarea impulsului.



Se constată că cea mai mare diferență de temperatură între punctele configurației P, în procesul de răcire, nu depășește 2 °C, observație confirmată și experimental.

Oscilograma impulsului aplicat este prezentată în figura XI.38.

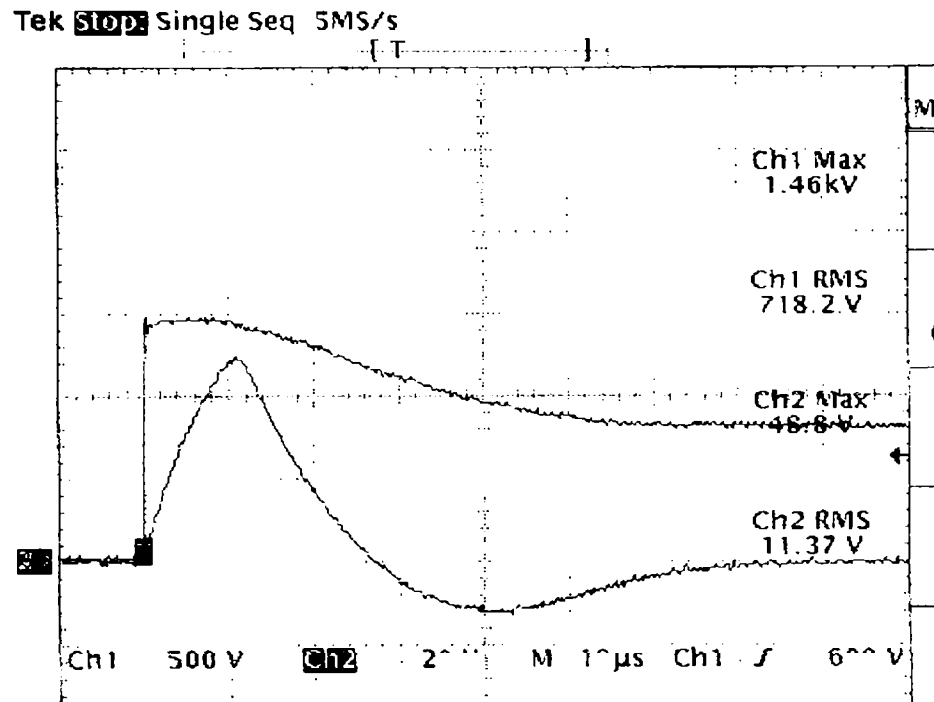


Figura X.38: Oscilograma impulsului aplicat configurației P.

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate a fost de 1460 V (canalul 1).

Valoarea de vârf a curentului care s-a stabilit este de 4880 A (canalul 2, prin divizorul 1/100).

Masa varistorului este  $m_v = 16$  g.

Suprafața laterală de disipare a căldurii este, pentru varistor,  $S_{lv} = 1,69 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>.

Masa suplimentară de alamă este  $m_{al} = 26,38$  g.

Suprafața în contact cu aerul este, pentru alamă  $S_{al} = 0,942 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>.

Supratemperatura estimată,  $\tau_e$ , care ar urma să fie atinsă după aplicarea impulsului este:

$$\tau_e = \frac{Q}{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}} = \frac{202,5}{16 \cdot 0,7534 + 26,38 \cdot 0,383} = 9,13 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.36)$$

Aceasta corespunde unei valori a temperaturii maxime:

$$\theta_e = \theta_a + \tau_e = 25 + 9,13 = 34,13 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.37)$$

Valoarea calculată a constantei termice de timp, pentru configurația P, la 25 °C, este:

$$T = \frac{m_v \cdot c_v + m_{al} \cdot c_{al}}{\alpha_v \cdot S_{lv} + \alpha_{al} \cdot S_{la}} = \frac{16 \cdot 0,7534 + 26,38 \cdot 0,383}{17 \cdot 1,69 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 0,942 \cdot 10^{-3}} = 517 \text{ s} \quad (10.38)$$

Ca urmare putem spune că procesul de răcire poate fi considerat ca terminat după 1500 s.

Temperatura maximă măsurată este:

$$\theta = 33,93 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.39)$$

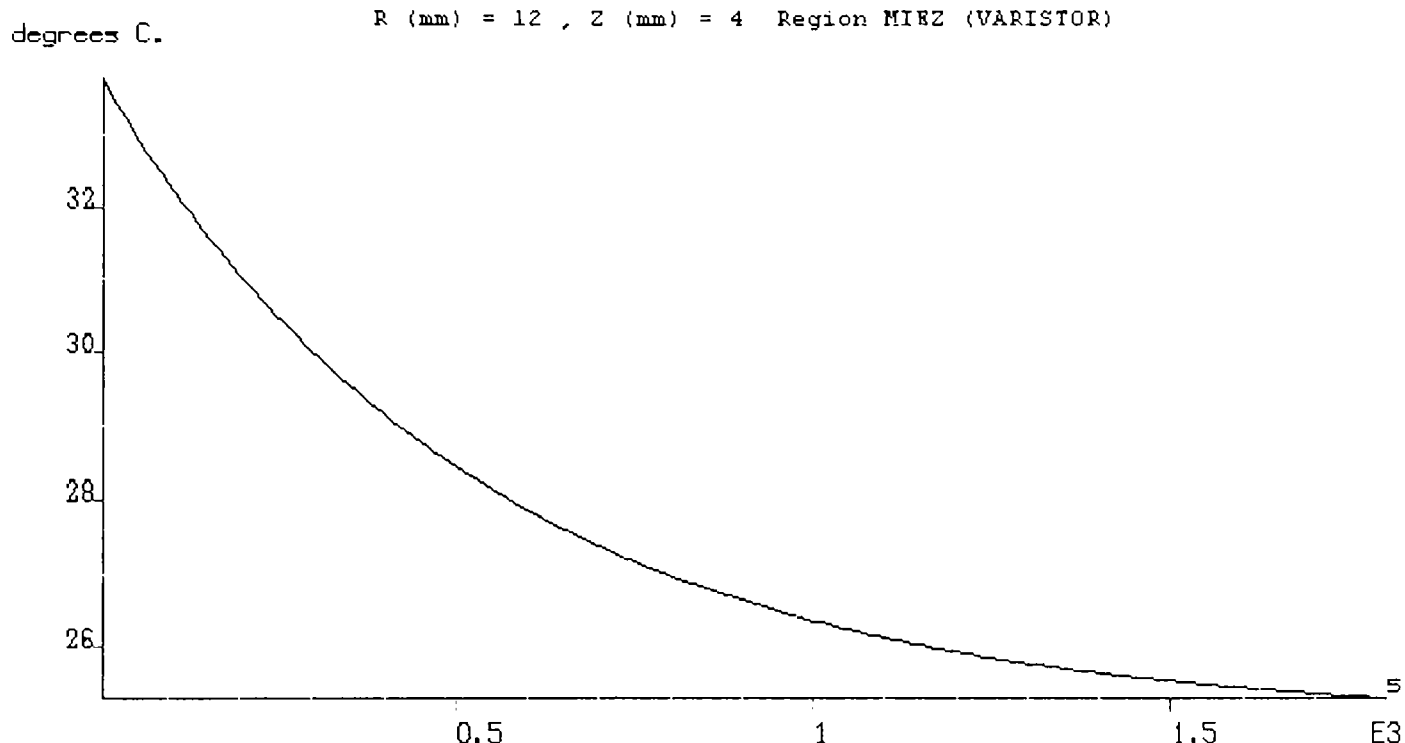
Supratemperatura măsurată este:

$$\tau = \theta - \theta_a = 33,93 - 25 = 8,93 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10.40)$$

Se constată că valoarea supratemperaturii măsurate (10.40) este foarte aproape de cea estimată (10.36), ceea ce confirmă exactitatea măsurătorilor și corectitudinea modelului matematic considerat.



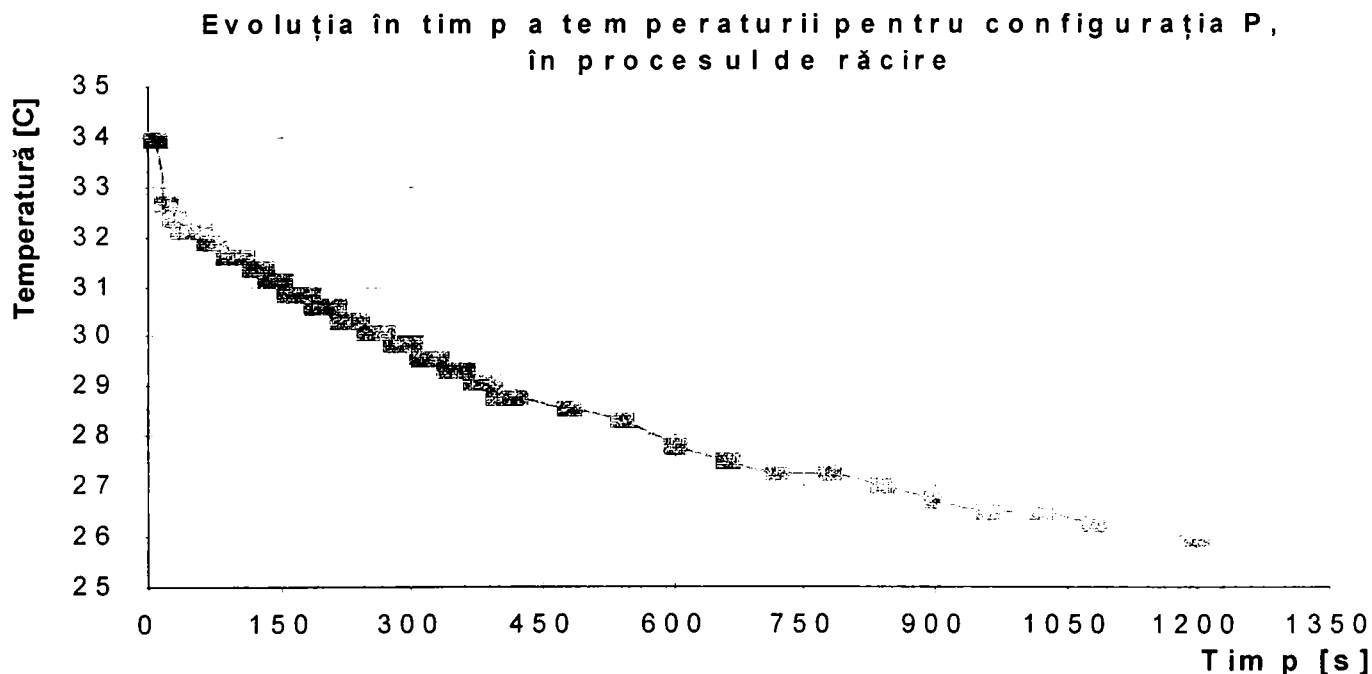
În figura X.39 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, în procesul de răcire, în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm, așa cum rezultă în urma modelării numerice.



**Figura X.39: Evoluția în timp a temperaturii în procesul de răcire, pentru un punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm, aparținând configurației P.**

Graficul este furnizat de către programul **FLUX 2D**.

În figura X.40 se prezintă evoluția în timp a temperaturii, așa cum rezultă din măsurători, în același punct de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm.



**Figura X.40: Evoluția în timp a temperaturii măsurate în punctul de coordonate  $R = 12$  mm și  $Z = 4$  mm aparținând configurației P.**

Se constată că cele două curbe (cea rezultată în urma modelării și cea determinată experimental) sunt destul de apropiate.

În Anexa 4P sunt prezentate evoluția în timp a temperaturii pentru configurația P, în cazul unor impulsuri repetate la 3 minute unul după altul precum și oscilogrammele acestor impulsuri.





## X.9. Concluzii

În regim de serviciu de impuls, soluția utilizării maselor adiționale este benefică, asigurându-se astfel reducerea temperaturii la care ajunge varistorul în urma aplicării impulsului. Această diferență este vizibilă prin compararea temperaturilor obținute pentru configurația **A** față de **B,C,D** și **E** și, respectiv **M**, față de **N** și **P**. Ca urmare, având în vedere și rezultatele capitolului anterior, putem formula concluzia generală că masele adiționale reprezintă soluția tehnică cea mai simplă și eficientă de îmbunătățire a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO, atât în regim de serviciu permanent, cât și mai ales în regim de serviciu de impuls.

Așa cum se observă din toate modelările realizate, masa adițională dispusă pe varistor contribuie la uniformizarea temperaturii varistorului în zona de contact dintre cele două, iar în interiorul fiecărei configurații, cele mai mari diferențe de temperatură între două puncte nu depășesc 1 – 2 °C. Rezultatele experimentale confirmă în foarte mare măsură rezultatele modelărilor numerice, abaterea medie pătratică fiind în fiecare din cele 8 cazuri sub 5 %.

Cu cât masa adițională dispusă pe varistor este mai mare, cu atât temperatura la care ajunge varistorul după aplicarea impulsului este mai redusă. Acest lucru se poate vedea foarte ușor, comparând temperaturile obținute pentru configurația **B** față de **C,D** și chiar **E** sau, respectiv, **N** față de **P**.

Creșterea masei adiționale conduce la valori mari ale constantei termice de timp, lucru evidențiat pentru toate configurațiile analizate. Cu alte cuvinte, răcirea ansamblului se face mai greu, inerția termică fiind mai mare. Acest lucru nu afectează prea mult echipamentul, deoarece temperatura inițială de la care are loc răcirea are o valoare mai mică, acesta fiind marele avantaj al dispunerii maselor adiționale.

Dispunerea aceleiași mase adițională sub forma a două piese identice, pe ambele fețe ale varistorului asigură un comportament termic în procesul de răcire care nu diferă prea mult de situația unei singure mase adiționale care are același volum cu suma celor două, dar dispusă numai pe una din fețe. Acest lucru este evidențiat prin compararea rezultatelor obținute pentru configurația **E** cu cele obținute pentru **D**.

Montarea a două mase adiționale identice, pe ambele fețe în loc de una singură de același tip pe una din fețe este benefică. Chiar dacă acest lucru duce la mărirea constantei termice de timp, reducerea temperaturii la care se ajunge după aplicarea impulsului este semnificativă. În plus, comportamentul termic în regim de serviciu permanent este și el ușor îmbunătățit. Acest lucru se constată analizând comparativ configurațiile **B** și **E**.

## X. 10. Contribuții personale și originale ale autorului

Întreg acest capitol este realizat în baza contribuțiilor personale ale autorului, dintre care amintim:

- Propunerea și analiza soluțiilor tehnice originale privind montarea maselor adiționale cu rol de “acumulator termic”, în regim de serviciu de impuls, soluții descrise pe larg în Capitolul VII;
- Realizarea modelărilor numerice în situația regimului de serviciu de impuls;
- Compararea rezultatelor modelării cu cele obținute experimental;
- Realizarea montajelor experimentale și a măsurărilor, în toate situațiile enumerate mai sus;
- Analiza comparativă a rezultatelor și obținerea unor concluzii privind soluțiile tehnice originale propuse.



## CAPITOLUL XI

### Concluzii și perspective

#### XI.1. Rezultatele cercetării

În cadrul acestui capitol rezervat concluziilor vom prezenta mai întâi rezultatele cercetării, urmând ca apoi să expunem concluziile și contribuțiile personale ale autorului.

##### Rezultatele studiilor teoretice

Dintre cele mai importante rezultate ale studiilor teoretice efectuate amintim:

- clasificarea, în baza unui studiu bibliografic, a supratensiunilor care pot apărea în rețelele electrice, după diverse criterii;
- sinteza principalelor standarde internaționale privind încercările echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO;
- prezentarea, în baza unui studiu al principalelor produse existente pe piața națională și internațională, a celor mai noi echipamente de protecție contra supratensiunilor pentru aplicații la joasă tensiune, în relație directă cu standardele în baza cărora au fost proiectate;
- sinteza principalelor avantaje ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO (un posibil răspuns la întrebarea “De ce varistoare pe bază de ZnO?”);
- definirea principalelor mărimi care caracterizează varistoarele ZnO și echipamentele care le înglobează, așa cum rezultă ele din standardele internaționale, precum și modul de alegere al acestora pentru o anumită aplicație;
- prezentarea tehnologiei de fabricație a varistoarelor pe bază de ZnO, însoțită și de evidențierea influenței unor etape ale procesului tehnologic asupra calității varistoarelor;
- studiul fenomenului de degradare a varistoarelor pe bază de ZnO, în baza unor sinteze bibliografice;
- studiul bibliografic al solicitărilor termice la care sunt supuse aceste echipamente, pornind de la definirea modurilor de transmisie termică (prin conducție, convecție, radiație), a ecuației bilanțului termic, toate aceste elemente teoretice fiind în directă legătură cu obiectul temei;
- prezentarea succintă a elementelor matematice care stau la baza modelării prin metoda elementelor finite;
- expunerea metodei globale de analiză a stabilității termice a echipamentelor de protecție cu varistoare pe bază de ZnO;

##### Rezultatele cercetării aplicative

Cele mai importante aplicații ale studiilor teoretice sunt:

- dezvoltarea și evaluarea metodei globale de analiză a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO;
- determinarea tensiunii limită de funcționare a unui varistor în funcție de temperatura mediului ambiant;
- stabilirea unor legi de variație liniară a parametrilor de material implicați în modelarea numerică;
- elaborarea algoritmilor necesari pentru modelarea numerică utilizând **FLUX 2D**;
- elaborarea programului “GIT\_RE.exe” (în limbaj **Borland C**), pentru simularea undelor date de către generatorul de impulsuri;



- estimarea supratemperaturii varistoarelor în regim de serviciu permanent și în regim de serviciu de impuls precum și a constantelor termice de timp;
- realizarea modelărilor numerice pentru regimul de serviciu permanent și regimul de serviciu de impuls al varistoarelor montate în paralel și cuplate termic;
- realizarea modelărilor numerice ale regimului de serviciu permanent, pentru toate configurațiile propuse;
- realizarea modelărilor numerice ale regimului de serviciu de impuls, pentru toate configurațiile propuse;

## Rezultatele tehnice și experimentale

Cele mai importante soluții tehnice propuse, sau realizări practice și experimentale, sunt:

- concepția și proiectarea de către autor, în premieră în România, în colaborare cu S.C. PROTENERGO S.A. din Timișoara, a unui modul de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO înglobat într-un bloc multipriză prelungitor;
- fabricarea de către autor a unei serii reduse de varistoare, în cadrul Laboratorului “Génie Electrique” al Universității PAUL SABATIER din Toulouse, după tehnologia franceză, varistoare utilizate pentru experimentele cu varistoare în paralel cuplate termic;
- propunerea unor soluții tehnice inedite referitoare la ameliorarea stabilității termice, pornind de la metoda globală de analiză a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO și anume:
  - montarea în paralel a varistoarelor cuplate termic;
  - montarea de mase adiționale din alamă pe varistor, cu rol de “acumulator termic” și în mai mică măsură de radiator;
- elaborarea, în cursul anului 1999, a unei cereri de brevet de invenție privind un “varistor pe bază de ZnO cu capacitate mărită de absorbție în energie”;
- stabilirea metodelor de măsurare utilizate experimental;
- adaptarea instalațiilor existente în cadrul Laboratorului “Génie Electrique” din Toulouse pentru necesitățile concrete ale măsurătorilor efectuate;
- dimensionarea și construcția fiecăreia din configurațiile propuse;
- evidențierea experimentală a fenomenului de ambalare termică;
- analiza experimentală a stabilității termice pentru varistoarele montate în paralel și cuplate termic, în ambele regimuri de funcționare;
- analiza experimentală a stabilității termice în regim de serviciu permanent;
- analiza experimentală a stabilității termice în regim de serviciu de impuls;

## XI.2. Concluziile principale

Așa cum se observă din structura tezei, fiecare capitol are în încheiere un subcapitol care detaliază principalele concluzii specifice capitolului respectiv. De aceea nu vom insista asupra tuturor concluziilor, ci doar asupra celor mai importante dintre ele, relevante pentru întregul demers.

Dintre acestea enumerăm:

- echipamentele de protecție contra supratensiunilor care utilizează varistoare pe bază de ZnO sunt cele mai moderne și eficiente soluții tehnice aplicabile și în domeniul de joasă tensiune, datorită unor avantaje evidente;
- datorită lipsei momentane a unor standarde naționale adecvate privind protecția contra supratensiunilor a instalațiilor electrice de joasă tensiune, utilizarea unor standarde europene și internaționale (care în perspectivă vor fi adoptate și în România), este absolut necesară;
- tehnologia de fabricație a varistoarelor pe bază de ZnO, destul de complicată și pretențioasă, a ajuns într-un stadiu de “saturație” în care este foarte dificil a încerca ameliorarea performanțelor termice fără a diminua simțitor performanțele electrice;



- studiul transferului termic în situația varistoarelor pe bază de ZnO nu poate fi efectuat în ipotezele teoriei clasice, datorită variației parametrilor de material în funcție de tensiunea aplicată și de temperatură, a neuniformității materialului, etc.;
- modelarea numerică prin metoda elementelor finite poate constitui un instrument eficient pentru studiul transferului termic în funcționarea varistoarelor pe bază de ZnO;
- rezultatele modelării numerice prin metoda elementelor finite, așa cum sunt furnizate de către pachetul CAD FLUX 2D 7.40, asigură necesarul de informații privind transferul termic în situația varistoarelor pe bază de ZnO;
- metoda globală de analiză a stabilității termice oferă răspunsuri privind stările de echilibru termic stabil și instabil ale varistoarelor pe bază de ZnO. Pornind de la această metodă, se pot avansa soluții tehnice privind ameliorarea comportamentului termic al varistoarelor pe bază de ZnO;
- curentul care trece prin varistor este foarte dependent de temperatura acestuia. Dacă nu se iau măsuri de realizare a echilibrului termic, curentul poate crește în mod necontrolat, provocând “ambalarea termică” a varistorului;
- cuplajul termic prin conducție, între două varistoare montate în paralel devine util numai în situația în care caracteristicile electrice ale celor două varistoare sunt ușor diferite (în primul rând există diferențe de până la 5 % între valorile tensiunii de prag  $U_N$ ). Chiar dacă fiecare varistor pierde o suprafață radiativă, temperaturile și curenții corespunzători sunt forțate să se egalizeze;
- montarea pe varistor a unor mase suplimentare din alamă are consecințe benefice privind ameliorarea stabilității termice a ansamblului, în regim de serviciu permanent ele acționează într-o mică măsură ca radiatoare, iar în regim de serviciu de impuls au rolul unor “acumulatoare termice”, preluând o parte din căldura dezvoltată în varistor în urma aplicării impulsului;
- rezultatele experimentale au confirmat în totalitate modelările numerice și estimările teoretice.

### XI.3. Contribuțiile personale și originale

Deoarece, așa cum se observă și din structura tezei, fiecare capitol se încheie cu un subcapitol dedicat contribuțiilor personale și acolo unde este cazul, chiar originale, nu vom mai insista asupra fiecăreia dintre contribuțiile evidențiate în capitolele tezei.

În plus, la începutul acestui capitol s-au enumerat rezultatele cercetării, acestea toate fiind consecințe directe ale contribuțiilor personale ale autorului.

Se va face doar o prezentare succintă a contribuțiilor personale cele mai importante, alături de o descriere a demersului efectuat.

Lucrarea a debutat cu un amplu studiu teoretic, cu dimensiunea a două capitole, care a vizat surprinderea elementelor esențiale în problematica echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO destinate a opera la joasă tensiune.

S-a încercat găsirea unor răspunsuri la întrebările:

“Ce sunt supratensiunile în rețelele electrice?”;

“Ce mijloace de protecție contra supratensiunilor există la ora actuală?”

“De ce varistoare pe bază de ZnO?”

Cele mai importante contribuții personale ale autorului sunt date de sinteza bibliografică și analiza critică a soluțiilor tehnice existente sau a standardelor în domeniu.

Studiile bibliografice au vizat:

- supratensiunile care pot apărea în rețelele electrice;
- standardele internaționale și naționale privind încercările echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO;





- compararea celor mai moderne soluții tehnice existente privind protecția contra supratensiunilor a rețelelor de joasă tensiune și sinteza principalelor avantaje ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO;
- mărimile care caracterizează varistoarele ZnO și echipamentele care le înglobează, așa cum rezultă ele din standardele internaționale, precum și modul de alegere al acestora pentru o anumită aplicație;
- prezentarea critică și detaliată a tehnologiei de fabricație a varistoarelor pe bază de ZnO, însoțită și de evidențierea influenței unor etape ale procesului tehnologic asupra calității varistoarelor;
- degradarea varistoarelor pe bază de ZnO;

Cea mai importantă contribuție originală a autorului în aceste două capitole o constituie concepția și proiectarea, în premieră în România, în colaborare cu S.C. PROTENERGO S.A. din Timișoara, a unui modul de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO înglobat într-un bloc multipriză prelungitor, denumit *Bloc Multipriză protejat la Supratensiuni BMS-01*;

Următoarele două capitole au încercat să dea unele răspunsuri la întrebările:

*“Care sunt solicitările termice la care sunt supuse varistoarele pe bază de ZnO ?”*

*“Care este instrumentul matematic cel mai adecvat pentru studiul solicitărilor termice în situația acestor varistoare și a echipamentelor care le înglobează ?”*

În capitolele care tratează solicitările termice ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor și modelarea numerică transferului termic, în situația acestora, contribuțiile personale ale autorului se constituie de asemenea în realizarea unor sinteze bibliografice sau emiterea unor concluzii critice privind problematica tratată.

După expunerea acestor elemente s-a trecut la prezentarea metodei globale de analiză a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO.

S-a încercat găsirea unui răspuns la întrebarea:

*“Care sunt solicitările limită care pot apare în exploatarea varistoarelor pe bază de ZnO, astfel încât să nu se ajungă la degradarea acestora ?”*

Ponderea contribuțiilor personale și originale ale autorului devine dominantă. Dintre acestea amintim pe cele mai relevante, anume:

- dezvoltarea metodei globale de analiză a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO;
- determinarea tensiunii limită de funcționare a unui varistor în funcție de temperatura mediului ambiant;
- propunerea unor soluții tehnice inedite și originale, referitoare la ameliorarea stabilității termice, pornind de la metoda globală de analiză a stabilității termice a varistoarelor pe bază de ZnO:
  - montarea în paralel a varistoarelor cuplate termic;
  - montarea de mase adiționale din alamă pe varistor, cu rol de “acumulator termic” și în mai mică măsură de radiator;
- elaborarea, în cursul anului 1999, a unei cereri de brevet de invenție privind un “Varistor pe bază de ZnO cu capacitate mărită de absorbție în energie”;

Pentru realizarea modelărilor numerice s-a apelat la programul (pachetul CAD) **FLUX 2D**. Un întreg capitol își propune să răspundă la întrebările:

*“De ce FLUX 2D ?”*

*“Cum operează FLUX 2D în condițiile problemelor specifice temei de cercetare ?”*

Ponderea contribuțiilor personale și originale ale autorului este și aici dominantă. Dintre acestea vom aminti pe cele mai importante:

- stabilirea unor legi de variație (în general liniară) a parametrilor de material implicați în modelarea numerică;
- elaborarea algoritmilor necesari pentru modelarea numerică utilizând **FLUX 2D**;
- dimensionarea și construcția fiecăreia din configurațiile propuse;

Rezultatele modelărilor numerice și ale estimărilor teoretice, în situația fiecăreia din configurațiile propuse, fac obiectul ultimelor capitole.

Vom prezenta seria de întrebări la care s-a încercat găsirea unor răspunsuri :



“Care este repartiția temperaturilor în interiorul configurațiilor analizate, în regim de serviciu permanent și în regim de serviciu de impuls?”

“Rezultatele modelărilor numerice sunt confirmate de către măsurătorile experimentale?”

Putem spune că aceste capitole sunt realizate integral în baza unor contribuții originale ale autorului, dintre care cele mai importante sunt, așa cum le-am enunțat mai devreme:

- elaborarea unui program, intitulat “GIT\_RE.exe” (în limbaj **Borland C**), pentru simularea și etimarea parametrilor formelor de undă date de către generatorul de impulsuri;
- estimarea supratemperaturii varistoarelor în regim de serviciu permanent și în regim de serviciu de impuls precum și a constantelor termice de timp;
- realizarea modelărilor numerice pentru regimul de serviciu permanent și regimul de serviciu de impuls al varistoarelor montate în paralel și cuplate termic;
- realizarea modelărilor numerice corespunzătoare regimului de serviciu permanent și a celor corespunzătoare regimului de serviciu de impuls, pentru toate configurațiile propuse;
- adaptarea instalațiilor existente în cadrul Laboratorului “Génie Electrique” din Toulouse pentru necesitățile concrete ale măsurătorilor efectuate;
- analiza experimentală a stabilității termice pentru varistoarele montate în paralel și cuplate termic, în ambele regimuri de funcționare;
- analiza experimentală a stabilității termice în regim de serviciu permanent și în regim de serviciu de impuls;

#### XI.4. Perspective ale continuării studiului

Chiar dacă în paginile acestei teze s-au oferit anumite soluții tehnice privind ameliorarea stabilității termice a echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO, lista acestora rămâne încă deschisă. Progresul tehnic în acest domeniu (ca de altfel în toate domeniile tehnicii) este un fenomen continuu și permanent. Prin urmare, generarea unor noi metode de analiză a stabilității termice și propunerea unor noi soluții tehnice, menite a aduce îmbunătățiri funcționale, rămâne o preocupare constantă a autorului precum și a altor ingineri, tehnicieni, fizicieni sau chimiști direct implicați în domeniul varistoarelor pe bază de ZnO și al echipamentelor de protecție care le înglobează.

Concluziile expuse în această lucrare pot fi generalizate pentru întreaga gamă de varistoare pe bază de ZnO, indiferent de nivelul de tensiune sau aplicația specifică, știut fiind faptul că problemele legate de stabilitatea termică sunt comune.

Valorificarea rezultatelor cercetării prin implementarea lor în activitatea de producție a unor echipamente de protecție contra supratensiunilor performante reprezintă o altă direcție de continuare a activității întreprinse. Finalitatea economică este scopul oricărei cercetări bine fundamentate. În perspectivă se dorește menținerea colaborării cu S.C. PROTENERGO S.A. din Timișoara. Pentru anul 2002 autorul preconizează realizarea, în colaborare cu această firmă, a unor module destinate protecției echipamentelor electronice de pe autoturisme și a unor module de protecție contra supratensiunilor care să funcționeze independent în rețeaua de joasă tensiune. Prin dispunerea acestor module în zona prizelor (clasa D) se va putea elimina necesitatea existenței unor protecții selective (clasele A,B,C), o soluție extrem de utilă în condițiile lipsei acestora din marea majoritate a instalațiilor de joasă tensiune din România. Modulele respective, concepute ca adevărate “bariere împotriva șocurilor electrice” vor îngloba soluțiile tehnice apărute ca rezultate ale cercetărilor efectuate până acum.

Se dorește și menținerea colaborării excelente cu Laboratorul “Génie Electrique” al Universității PAUL SABATIER din Toulouse, în scopul continuării studiilor privind varistoarele pe bază de ZnO și al identificării unor posibile direcții de cercetare comune în viitor.



## Referințe bibliografice

- [1] ANDEA, P., FRIGURĂ, F., "An Estimation for the Electrical Contact Resistance", Buletinul Științific al Universității POLITEHNICA din Timișoara. Tomul 44 (58). Fascicola 2, Timișoara 1999
- [2] ANDRONESCU, P., "Bazele electrotehnicii", Volumele I și II, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1972
- [3] BUI, A., LEBEY, T., VASILIEVICI, AI., MOLDOVAN, L., BUTA, A., ANDEA, P., ȘURIANU, F., D., "Matériaux diélectriques et matériel électrique", Editura Tehnică, București, 1997
- [4] BUI, A., LOUBIERE, A., PENCHENAT, G., "Etude comparative des modules de protection pour installation domestique basse tension", Université PAUL SABATIER, Toulouse. 1993
- [5] COMINI, G., ș.a. "Finite Element Analysis in Heat Transfer – Basic Formulation and Linear Problems" Taylor & Francis Publishers, Bristol, Marea Britanie, 1994
- [6] DELEȘEGA, I., "Aparate Electrice", Editura "Orizonturi Universitare", Timișoara. 1999
- [7] DORLANNE, O., "Contribution à l'étude du joint de grains dans la céramiques électriques: Applications aux varistances à base d'oxyde de zinc", Thèse de docteur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1986
- [8] DRĂGAN, G., "Supratensiuni atmosferice în instalațiile electroenergetice", Editura Academiei Române, București, 1992
- [9] DRĂGAN, G., "Supratensiuni interne în sistemele electroenergetice", Editura Tehnică București, 1975
- [10] DRĂGAN, G., "Tehnica tensiunilor înalte, Vol.II", editura Academiei Române, Editura AGIR, București, 2001
- [11] EMTAGE, P. R., "Physics of Zinc Oxide Varistors", Journal of Applied Physics, vol. 48, no. 10, 1975
- [12] ENTWISTLE, K., M., "Basic Principles of the Finite Element Method", Alden Press Oxford, Marea Britanie, 1999
- [13] FAKKAR, A. "Contribution à l'étude du comportement thermique des varistances à base de oxyde de zinc; Simulation et mesures, application aux parafoudres moyenne et haute tension", Thèse présentée pour obtenir le titre de docteur de l'Université PAUL SABATIER de Toulouse, 1994
- [14] FAKKAR, A., BUI, A., LOBIERE, A., PENCHENAT, G., "Modelisation thermique des varistances à base d'oxyde de zinc", Revue générale de l'Electricité, no.1, Franța, 1993

- [15] **FELEA, I.**, "*Ingineria fiabilității în electroenergetică*", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1996
- [16] **FRIGURĂ, F.**, "*Contribution à l'étude de l'amélioration de la tenue en énergie des varistances*". Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur de l'U.P.T., Toulouse, 1998
- [17] **FRIGURĂ, F., TITIHAZAN O.,T.**, "*Varistor cu oxid de zinc cu capacitate mărită de limitare a supratensiunilor*", Cerere de brevet de invenție nr. 99-00813 din 15.07.1999, O.S.I.M. București
- [18] **FRIGURĂ, F., VĂTĂU, D.**, "*Studiul pluridisciplinar al fenomenelor legate de stabilitatea termică a varistoarelor pe bază de ZnO, utilizate în echipamentele de protecție contra supratensiunilor*". Proceeding-ul simpozionului "Tinerii și cercetarea multidisciplinară". Timișoara, 1998
- [19] **FRIGURĂ, F., VĂTĂU, D.**, "*Metodă globală de analiză a stabilității termice a varistoarelor utilizate în echipamentele de protecție contra supratensiunilor*", Analele Universității "Eftimie Murgu" din Reșița, 1998
- [20] **FRIGURĂ, F., VĂTĂU, D.**, "*Asupra rolului radiatoarelor termice în funcționarea echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO*", Analele Universității din Oradea, Fascicola Energetică, volumul I, Oradea, 2001
- [21] **FRIGURĂ, F., VĂTĂU, D.**, "*Electrodynamical Forces into Ferromagnetical Slots*", Proceedings of the Third International Power Systems Conference, Vol.I, pag. 44 –50, Timișoara, 1999
- [22] **GUPTA, T.,K., CARLSON, W.,G.**, "*Application of Zinc Oxide Varistors*", Journal of the American Ceramic Society, 73 (7), 1990
- [23] **HASSANZADEH, M., BUI, A., DORLANNE, O., LOUBIERRE, A.**, "*Propriétés électriques des varistances à oxyde de zinc en couches épaisses*", Journal of Applied Physics, 25, 1995
- [24] **HORTOPAN, Gh.**, "*Aparate electrice de comutație*", Vol. I- Principii, Editura Tehnică, București, 2000
- [25] **HORTOPAN, G.**, "*Principii și tehnici de compatibilitate electromagnetică*", Editura Tehnică, București, 1998
- [26] **IEEE Work Group 3.4.11**, "*Modelling of Metal Oxide Surge Arresters*", IEE Transactions on Power Delivery, PWRD – 7, 1992, nr.1
- [27] **IONESCU, F., MIHALACHE, C.**, "*Experimental Tests for Varistor Electrical Model Improvement*", Simpozion ICPE, București, 2000
- [28] **IONESCU, F., SIX, J.-P., BUI, A., BAUSIERE, R.**, "*Composants semi-conducteurs de puissance*", Editura Tehnică, București, 1997
- [29] **LAT, M., V.**, "*Thermal Properties of Metal Oxyde Surge Arresters*", IEEE Transactions on Apparatus and Systems, vol. PAS 102, no. 7, 1983

- [30] **LAT, M., V.**, "Analytical Method for Prediction of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Apparatus and Systems, vol PAS 104, no. 10, 1985
- [31] **LEWIS, R., W., MORGAN, K.**, "The Finite Element Method in Heat Transfer Analysis", John Wiley & Sons Ltd., Baffins Lane, Marea Britanie, 1996
- [32] **MAKOTO, Y., ș.a.**, "Development of an Advanced Arrester for GIS from 66 kV to 500 kV", Electrical Engineering in Japan, Vol.131, No. 3, Tokyo, 2000
- [33] **MATSUOKA, M.**, "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics", Japan. Journal of Applied Physics. 10, N° 6 p. 736-746. Tokyo, 1971
- [34] **MIGNARDOT, D.**, "Règles d'installation des parafoudres basse tension", REE, Numéro 6, Juin 1998, Franța
- [35] **MIHALACHE, C.**, "Contribuții la studiul comportării varistoarelor cu oxid de zinc ca elemente de protecție ale dispozitivelor semiconductoare de putere din cadrul convertoarelor statice", Teză de doctorat, Universitatea POLITEHNICA din București. 2001
- [36] **MIHALACHE, C., IONESCU, F., BUI, A., FLORICĂU, D.**, "Comportement thermique de la varistance en considérant le gradient axial de la température", Proceeding SEEPCI'99, Oujda, Maroc, 1999
- [37] **MODINE F. A., WHEELER R. B.**, "Pulse Response Characteristics of ZnO Varistors", Journal of Applied Physics 67(10), 15 May 1990
- [38] **MOLDOVAN, L., VĂTĂU, D.**, "Elemente moderne în domeniul echipamentelor electrice de comutație", Editura AGIR, București, 2001
- [39] **NĂSTĂSIE, S.**, "Contribuții la studiul și dimensionarea descărcătoarelor cu oxizi metalici în vederea implementării lor în sistemele de tracțiune electrică", Teză de doctorat, Universitatea POLITEHNICA din Timișoara, 1998
- [40] **NĂSTĂSIE, S., BLEY, V.**, "Implementarea descărcătoarelor cu oxizi metalici în instalațiile electrice, premisă pentru creșterea calității protecției la supratensiuni", Analele Universității din Oradea, 1998
- [41] **NGUYEN, H.**, "Varistance à base d'oxyde de zinc à champ de seuil élevé" Thèse de docteur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1995
- [42] **NGUYEN, H.,T., BUI, A., LOUBIERE, A.**, "La tenue aux chocs des varistances ZnO a haut champ de seuil", Journal of Applied Physics 28, 1995;
- [43] **NGUYEN, H.,T., BUI, A., LOUBIERE, A.**, "Role of Additives in the High-field ZnO based Varistors", International Conference on Electronic Ceramics, Aachen, Germania, 1994
- [44] **NISHIWAKI, S., ANDOH, H.**, "Failure Mechanisms and Recent Improvements in ZnO Arrester Elements", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 16, No. 1, January / February 2000

- [45] **NISHIWAKI, S.**, “*Study of Thermal Runaway/equivalent Prorated Model of a ZnO surge Arrester*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS – 103, No. 2, February 1984
- [46] **OLARIU, V., BRĂTIANU, C.**, “*Modelare numerică cu elemente finite*”, Editura Tehnică, București, 1986
- [47] **PENCHENAT, G.**, “*Contribution à l'étude de dispositifs de protection à base de varistances à l'oxyde de zinc et d'éclateurs pour installations basse-tension*”, Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur C.N.A.M., Toulouse, 1992
- [48] **PHILIPP, H., R., LEVINSON, M.**, “*High-temperature Behavior of ZnO-based Ceramic Varistors*”, Journal of Applied Physics 50(1), January, 1979
- [49] **POPESCU, M., O., POPESCU C., POPA, L., BUI, A.**, “*A Failure Mechanism of the Zinc Oxide Low Voltage Varistors*”, Buletinul Științific al Universității Tehnice “Gh. Asachi” din Iași, Tomul XLV. Fascicola 5, Iași, 1999;
- [50] **SAHA, K.,T., DARVENIZA, M.**, “*Surface Flashovers on Metal – Oxide Varistor Blocks*”, IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, June 22-25, 1998, Suedia
- [51] **SERRANO, M., S.**, “*Etude du comportement électrique et thermique des parafoudres au ZnO*”, Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, 1988
- [52] **SHEN, C., Y., WU, L.**, “*Effect of Additions on Conduction Properties of ZnO Varistors*”, Japanese Journal of Applied Physics, vol. 32, 1993.
- [53] **SUCIU, I.**, “*Aparate electrice*”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1968
- [54] **SUCIU, I.** “*Bazele calculului solicitărilor termice ale aparatelor electrice*”. Editura Tehnică, București, 1980
- [55] **ȘORA, I.**, “*Electrotermie și electrotehnologii. Vol. I: Electrotermie*”, Editura Tehnică, București, 1998
- [56] **ȘURIANU, F., D.**, “*Rețele electrice industriale*”. Editura “Orizonturi Universitare”. Timișoara, 1999
- [57] **TALHI, C., BUI, A., LOUBIERE, A.**, “*Dimensionnement d'un parafoudre a base de ZnO pour lignes a courant continu*”, Annales de Chimie et Science des Matériaux, édition Masson III, Vol.19, no. 7-8, 1995;
- [58] **TOMINAGA, S., ș. a.** “*Stability and Long Term Degradation of Metal Oxide Surge Arresters*”, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS 99 no.4, 1980
- [59] **TRUȘCĂ, V., POPESCU, M., O.**, “*Tehnologia de fabricație a aparatelor electrice*”, Editura ICPE, București, 1996

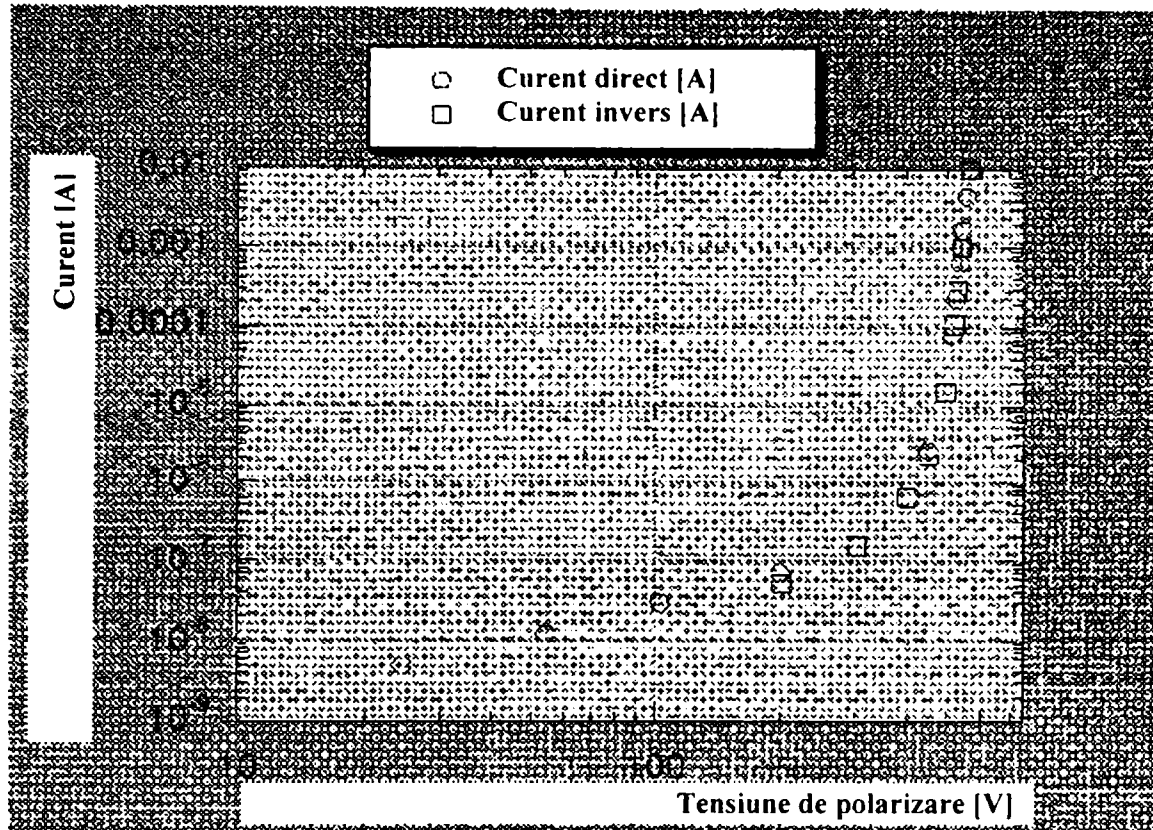
- [60] **TRUȘCĂ, V., POPESCU, M., O., POPESCU, C.**, “*ZnO Low Voltage Varistors Characteristics Measurements*”, Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Universitatea POLITEHNICA din București, volumul Electrical Apparatus and Power Static Converters. București, 1998
- [61] **VASILIEVICI, AL., ANDEA, P.**, “*Aparate și echipamente electrice*”, Editura “Orizonturi universitare”, Timișoara, 2000
- [62] **VASILIEVICI, AL., FRIGURĂ, F.**, “*Influența temperaturii mediului ambiant asupra funcționării echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO*”, Analele Universității din Oradea, Fascicola Energetică, volumul I, Oradea, 2001
- [63] **VĂTĂU, D., FRIGURĂ, F.**, “*Méthode pour l'automatisation du contrôle de la qualité*”, Buletinul Științific al Universității POLITEHNICA din Timișoara, Tomul 43 (57), Fascicola 2, Timișoara, 1998
- [64] **VĂTĂU, D., FRIGURĂ, F.**, “*Aspecte legate de controlul “on-line” al proceselor electroenergetice. Aplicații utilizând logica fuzzy*”, Proceeding-ul Simpozionului internațional “Cercetarea multidisciplinară regională”, Timișoara, 2000
- [65] **VĂTĂU, D., FRIGURĂ, F.**, “*Asupra dificultății diagnosticului industrial în domeniul echipamentelor electrice*”, Analele Universității din Oradea. Fascicola Energetică, volumul I, Oradea, 2001
- [66] **VICAUD, A., LEROY, G., HENNEBIQUE, I.**, “*Parafoudres à oxyde métallique dans les réseaux alternatifs*” EPURE/EDF-DER, 07/1984-3
- [67] **VITET, S. ș.a.**, “*Thermal Stress on ZnO Surge Arresters in Polluted Conditions*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992
- [68] **WANG, H., ș.a.**, “*Nonuniform Heating in Zinc Oxide Varistors Studied by Infrared Imaging and Computer Simulation*”, Journal of American Ceramic Society, Vol. 81, No. 8, August 1998
- [69] \* \* \*, **ABB Energie S.A.**, “*Parafoudre oxyde de zinc XCL 24 S HN 65 S 20*”, Prospect , ABB Franța, 1999
- [70] \* \* \*, **CONEL – S. C. ELECTRICA S. A.** “*Varistoare cu oxizi metalici. Aplicații*”, București, 1999
- [71] \* \* \*, **DEHN + SÖHNE GmbH.**, “*Overvoltage Protection – Main Catalogue* , Germania, 1996
- [72] \* \* \*, **DEHN+SÖHNE GmbH.**, “*Overvoltage Protection – Main Catalogue* , Germania, 2000
- [73] \* \* \*, “*FLUX 2D<sup>®</sup> Version 7.40 – Steady State and Transient Thermal Tutorial*”, **CEDRAT** France, June 1999
- [74] \* \* \*, “*FLUX 2D<sup>®</sup> Version 7.40 – User’s Guide*”, **CEDRAT** France, July 1999
- [75] \* \* \*, **Global Lightning Technologies Pty. Ltd.**, “*Lightning and Transient Protection for a Typical Telecommunications or Cellular Radio Facility*” Hobart, Australia, 1996

- [76] \* \* \*, “*Guide UTE C15-443: Protection des installations électriques basse tension contre les surtensions d’origine atmosphérique*”, Franța, 1995
- [77] \* \* \*, **I.C.P.E. București**, “*Ceramic Materials and Products*”, catalog, România, 1998
- [78] \* \* \*, “*INGESCO – Products Catalogue*” **Dena Desarrollos S.L.** Spania 2000
- [79] \* \* \*, “*Metal Oxide (ZnO) Varistors*”, Catalog **ISKRA Varistor**, Ljubljana, Slovenia, 2001
- [80] \* \* \*, **MURATRON S.A.**, “*Catalogue 2000*”, Franța, 2000
- [81] \* \* \*, “*Norme NFC 15-100, sections 443 et 534: Installations électriques à basse tension*” Franța, 1995
- [82] \* \* \*, “*Norme NFC 61740 (de juillet 1995): Parafoudres pour installations à basse tension*”, Franța, 1995
- [83] \* \* \*, “*Norme NFC 83-280 (Décembre 1978): Système CENELEC d’assurance de la qualité. Varistances*”
- [84] \* \* \*, Norme CEI 664-1980, “*Coordonarea izolațiilor în rețelele electrice*”
- [85] \* \* \*, Norme CEI 60-2-1994, “*Tehnica încercărilor la înaltă tensiune*”
- [86] \* \* \*, “*Recommendations for lightning arresters, Part 1: Non-linear resistor-type arresters*”. IEC Publication 99-1 A, 1985
- [87] \* \* \*, **S.C. PROTENERGO S.A. Timișoara**, “*Fișa tehnică a produsului Bloc Multipriză protejat la Supratensiuni tip BMS 01*”, România, 2001
- [88] \* \* \*, **SIEMENS A.G.**, “*Protection Enclosed - Catalogue*”, Germania, 1999
- [89] \* \* \* **SR CEI 60536: 1995**, “*Clasificarea echipamentelor electrice și electronice din punct de vedere al protecției împotriva șocurilor electrice*”, ASRO București, România, 1995
- [90] \* \* \* **SR CEI 60536-2: 1995**, “*Partea 2: Instrucțiuni privind aplicarea prescripțiilor de protecție împotriva șocurilor electrice*”, ASRO București, România, 1995
- [91] \* \* \* **SR CEI 60364 – 4 – 443: 1999**, “*Instalații electrice în construcții. Partea 4: Măsuri de protecție pentru asigurarea securității. Capitolul 44: Protecția împotriva supratensiunilor. Secțiunea 443: Protecția împotriva supratensiunilor de origine atmosferică sau de comutație*”, ASRO București, România, 1999
- [92] \* \* \* **SR CEI 60446: 1993**, “*Identificarea conductoarelor prin culori sau repere numerice*”, ASRO București, România, 1993
- [93] \* \* \* **SR CEI 60884+A1: 1997**, “*Fișe și prize pentru uz casnic și similar. Partea 1: Prescripții generale*”, ASRO București, România, 1997
- [94] \* \* \* **SR EN 60950 + A1: 1996**, “*Securitatea echipamentelor pentru tehnologia informației (inclusiv a echipamentelor electronice de birou)*”, ASRO București, România, 1996

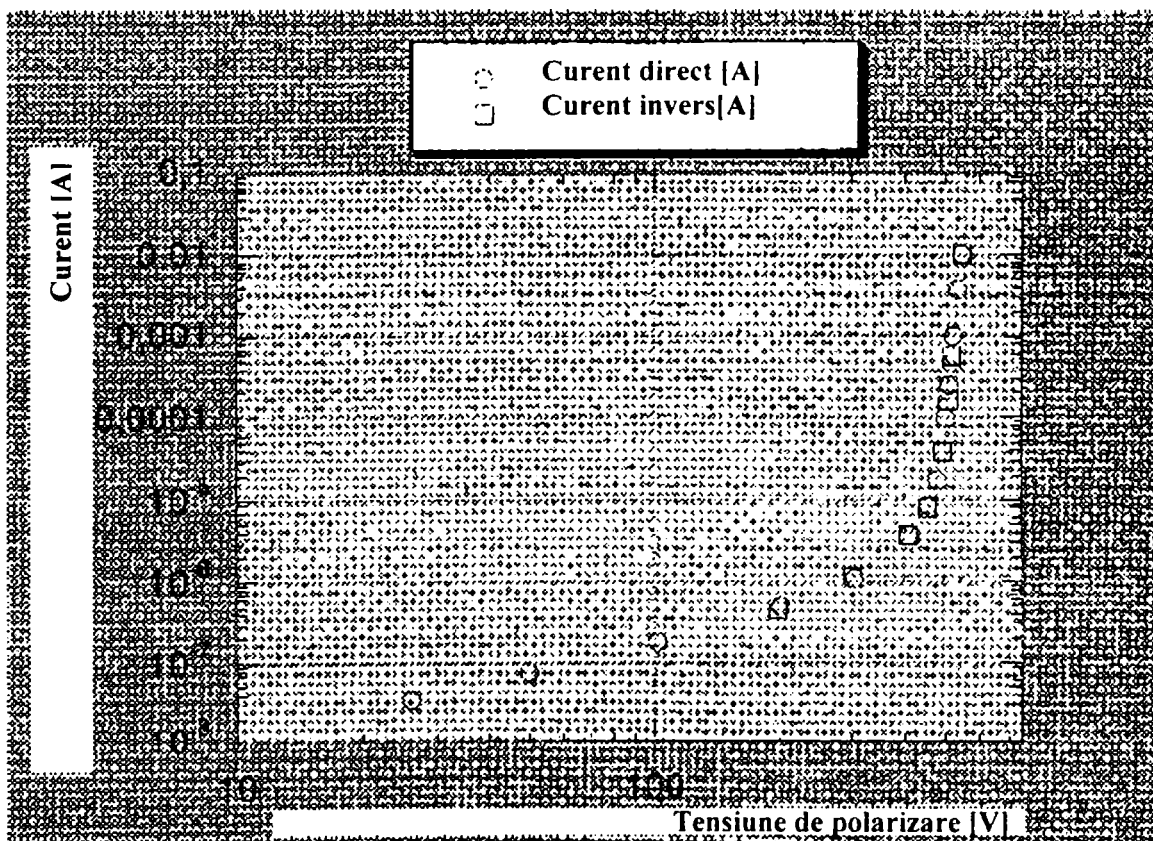


- [95] \* \* \* **SR EN 60950 + A2: 1997**, "*Securitatea echipamentelor pentru tehnologia informației (inclusiv a echipamentelor electronice de birou)*", ASRO București, România, 1997
- [96] \* \* \* **SR EN 60950 + A3: 1997**, "*Securitatea echipamentelor pentru tehnologia informației (inclusiv a echipamentelor electronice de birou)*", ASRO București, România, 1997
- [97] \* \* \* **SR EN 60099 – 4: 1998**, "*Descărcătoare. Partea 4: Descărcătoare cu oxizi metalici fără eclatoare pentru rețele de curent alternativ*" ASRO București, România, 1998
- [98] \* \* \* **SR EN 60099 – 5: 1998**, "*Descărcătoare. Partea 5: Recomandări pentru alegere și utilizare*" ASRO București, România, 1998
- [99] \* \* \* **STAS 3184/3-85**, "*Prize, fișe și cuple pentru instalații electrice până la 380 V c.a. și 250 V c.c. și până la 25 A. Forme și dimensiuni*", Standard de Stat, România, 1985
- [100] \* \* \* **STAS 3184/4-88**, "*Calibre de verificare a prizelor și fișelor până la 250 V și până la 16 A*", Standard de Stat, România, 1988
- [101] \* \* \*, **UNION TECHNIQUE de l'ELECTRICITE**, "*Guide pratique- Protection des installations électriques basse tension contre les surtensions d'origine atmosphérique*", Paris, 1996
- [102] \* \* \*, "*Varistances. Spécifications et guide pour applications*", versiunea în franceză, editată de **Power Development Ltd**, Marea Britanie, 1996

# ***ANEXE***



Caracteristica curent – tensiune, în domeniul 0 – 10 mA, pentru varistorul R.



Caracteristica curent – tensiune, în domeniul 0 – 10 mA, pentru varistorul S.

```
# include <stdio.h>
# include <conio.h>
# include <dos.h>
# include <process.h>
# include <graphics.h>
# include <math.h>
void simulare(void);
void ingraf(void);
void generic(void);
void schema(void);
int u2(int);
float n,tu,tf,c1,c2,r2,r1,t1,t2,stim,stu;
int mx,my,bx,by,cx,cy;
void main(void)
{
    int gdrv,gmod,s,i;
    ingraf();
    detectgraph(&gdrv,&gmod);
    setgraphmode(gmod);
    mx=getmaxx();
    my=getmaxy();
    generic();
    getch();
    clrscr();
    gotoxy(10,5);
    printf("Introduceti capacitatea C1 (de soc) in nF: ");
    scanf("%f",&c1);
    gotoxy(10,7);
    printf("Introduceti capacitatea C2 (de sarcina) in nF: ");
    scanf("%f",&c2);
    gotoxy(10,9);
    printf("Introduceti rezistenta R1 (de amortizare),in kOhmi: ");
    scanf("%f",&r1);
    gotoxy(10,11);
    printf("Introduceti rezistenta R2 (de sarcina) ,in kOhmi: ");
    scanf("%f",&r2);
    getch();
    schema();
    getch();
    cleardevice();
    simulare();
    getch();
    t1=(c1+c2)*(r1+r2);
    t2=(c1*c2*r1*r2)/t1;
    tf=3.25*t2;
    n=(c1*r2)/t1;
    tu=0.7*t1;
    stim=tu/(5*mx/7);
    stu=(5*my/7)/200;
    cleardevice();
    setbkcolor(1);
    setcolor(14);
    for (i=0;i<10;i++)
        rectangle(1+2*i,1+2*i,mx-1-2*i,my-1-2*i);
    bx=ceil(mx/7);
    by=ceil(my/7);
    cx=ceil((6*mx)/7);
    cy=ceil((6*my)/7);
    rectangle(bx,by,cx,cy);
    for(i=2;i<6;i++)
    {
        line(ceil(i*mx/7),by,ceil(i*mx/7),cy);
        line(bx,ceil(i*my/7),cx,ceil(i*my/7));
    }
    setcolor(4);
    for(i=bx;i<ceil(6*mx/7);i++)
        line(i,cy-u2(i),i+5,cv-u2(i-1));
```

```

gotoxy(15,4);
printf(" C1=%f, C2=%f, R1=%f, R2=%f",c1,c2,r1,r2);
gotoxy(18,25);
printf(" tf=%f, tu=%f ,n=%f ",tf,tu,n);
getch();
closegraph();
}
void ingraf()
{
int gdrv=DETECT,gmod,coder;
initgraph(&gdrv,&gmod,"c:\\borlandc\\bgi");
coder=graphresult();
if (coder!=grOk)
{
cputs("\n Eroare grafica!!\n");
cputs(grapherrormsg(coder));
getch();
exit(1);
}
}
void generic()
{
int mx,my,pu,pv,i;
for(i=1;i<5;i++)
{
mx=getmaxx();
my=getmaxy();
pu=ceil(mx/2);
pv=ceil(my/2);
cleardevice();
setbkcolor(1);
setcolor(14);
settextstyle(0,0,4+2*i);
settextjustify(1,1);
outtextxy(pu,pv,"G.I.T.");
settextstyle(1,0,3);
sound(100*i);delay(100*i);nosound();
}
outtextxy(pu,300,"Generator de impuls de inalta tensiune");
setcolor(14);
rectangle(2,2,mx-2,my-2);
setfillpattern(0,4);
bar(3,400,mx-3,440);
settextstyle(1,0,2);
outtextxy(pu,460,"COPYRIGHT 2001 by FRIGURA FLAVIU");
bar(3,40,mx-3,80);
}
void schema()
{
int mx,my,pu,pv,i;
mx=getmaxx();
my=getmaxy();
cleardevice();
setbkcolor(2);
setcolor(5);
for(i=0;i<10;i++)
rectangle(1+2*i,1+2*i,mx-1-2*i,my-1-2*i);
setcolor(4);
line(100,300,100,350);
line(100,350,530,350);
line(530,350,530,300);
line(90,300,110,300);
line(90,295,110,295);
line(520,300,540,300);
line(520,295,540,295);
line(100,295,100,245);
line(100,245,155,245);
circle(160,245,5);
circle(180,245,5);
line(185,245,225,245);
rectangle(225,240,250,250);
line(250,245,530,245);
line(530,245,530,295);

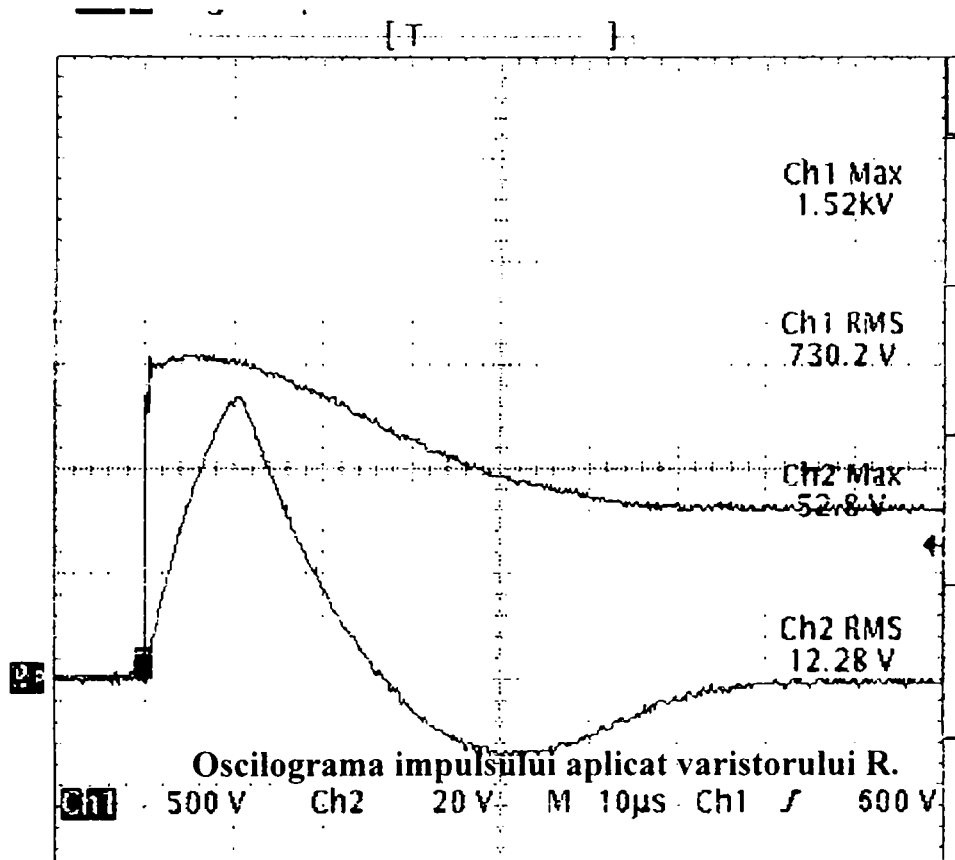
```

```

line(360,245,360,280);
rectangle(355,280,365,305);
line(360,305,360,350);
line(530,350,530,370);
line(80,250,80,340);
line(550,250,550,340);
line(545,255,550,250);
line(555,255,550,250);
line(75,255,80,250);
line(85,255,80,250);
for(i=1;i<6;i++)
line(530-i,380-2*i,530+i,380-2*i);
settextstyle(1,0,2);
outtextxy(125,297,"C1");
outtextxy(495,297,"C2");
outtextxy(230,200,"R1");
outtextxy(310,297,"R2");
outtextxy(170,200,"E");
settextstyle(0,0,2);
outtextxy(40,297,"U1");
outtextxy(570,297,"U2");
settextstyle(4,0,5);
settextjustify(1,1);
pu=ceil(mx/2);
pv=ceil(my/2);
outtextxy(pu,70,"Schema generatorului de impuls");
outtextxy(pu,110,"de inalta tensiune");
settextstyle(5,0,3);
outtextxy(pu,430,"Copyright 2001 by Frigura Flaviu");
}
int u2(int i)
{
float tenr;
int ten;
tenr=my*n*(exp(-(stim*i)/t1)-exp(-(stim*i)/t2));
ten=ceil(stu*tenr);
return(ten);
}
void simulare(void)
{
int i;
for(i=8;i>3;i=i-1)
{
cleardevice();
settextstyle(1,0,2+i);
outtextxy(mx/2,my/2,"SIMULARE");
sound(500+50*i);delay(100+50*i);nosound();
}
rectangle(mx/6,my/6,5*mx/6,5*my/6);
for(i=0;i<10;i++)
rectangle(1+2*i,1+2*i,mx-1-2*i,my-1-2*i);
}

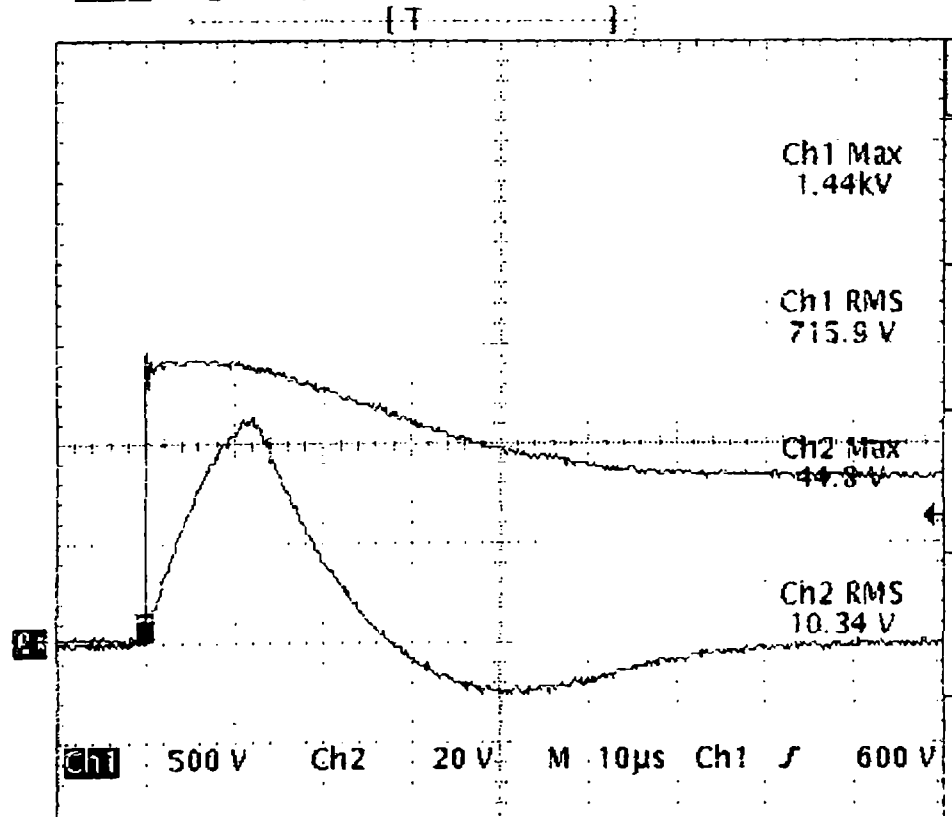
```





Oscilograma impulsului aplicat varistorului R.

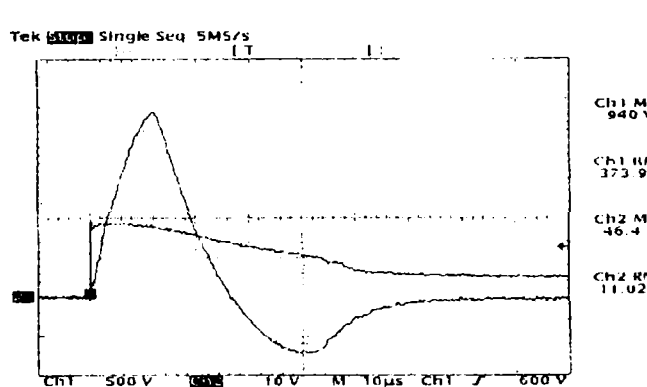
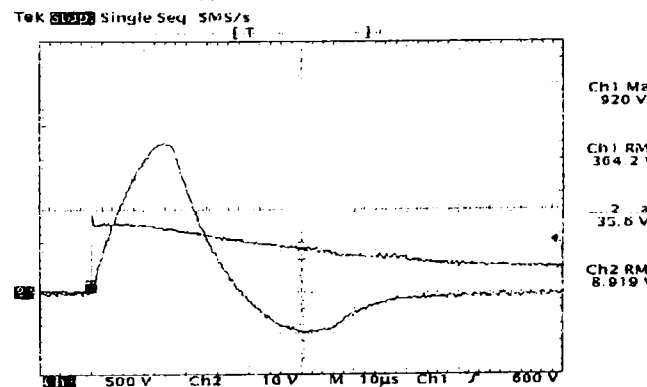
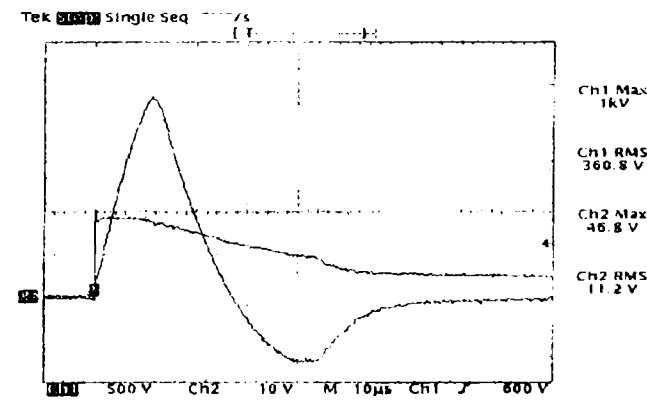
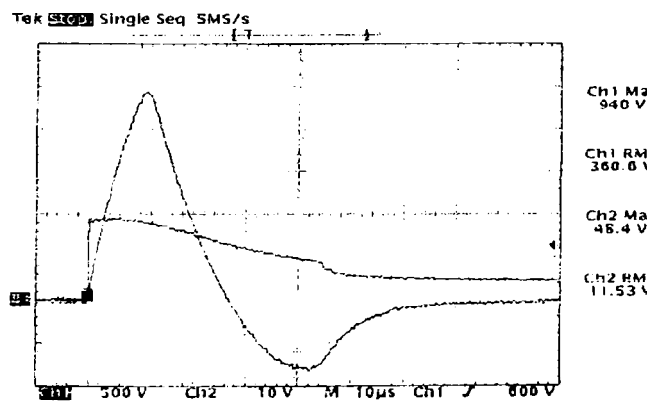
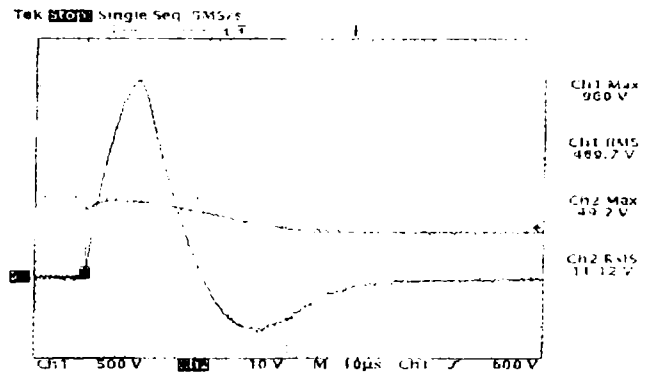
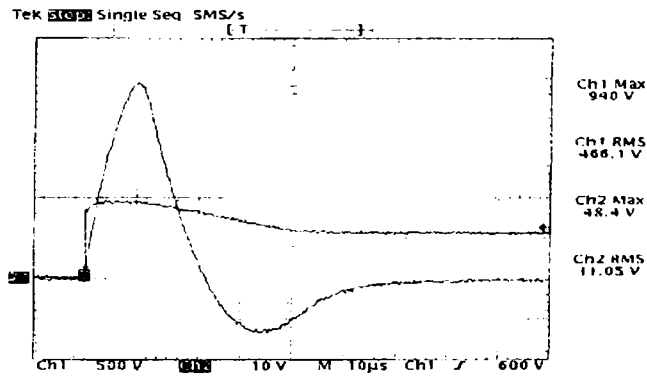
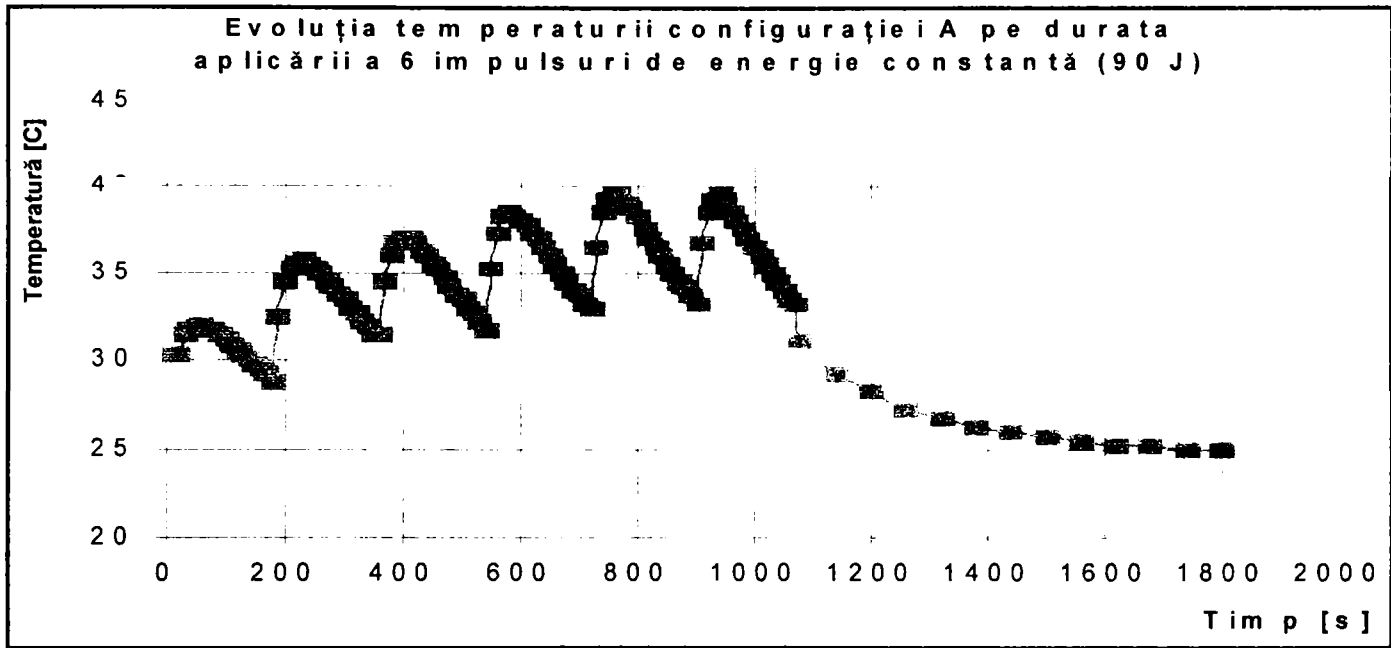
Tek Stop Single Seq SMS/s



Oscilograma impulsului aplicat varistorului S.

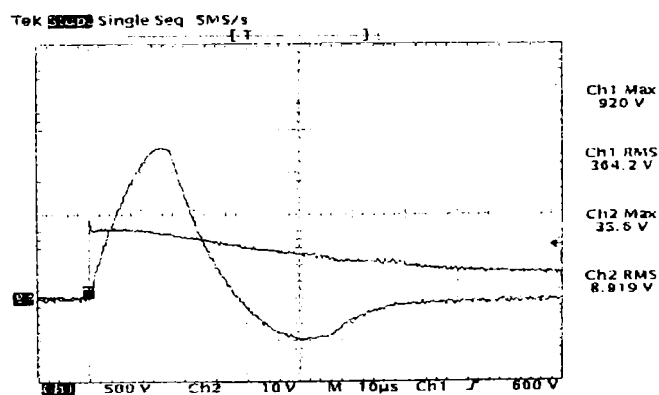
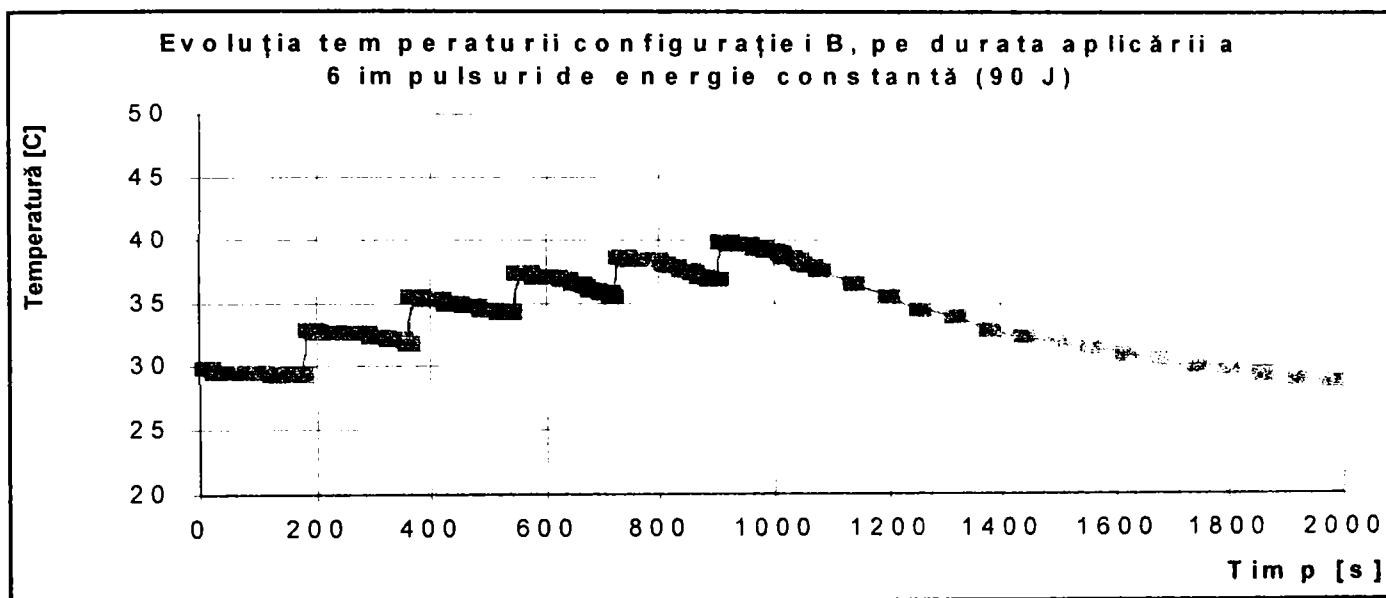
# ANEXA 4A

*Evoluția în timp a temperaturii pe durata aplicării a 6 impulsuri succesive, pentru configurația A.  
Oscilogramele impulsurilor aplicate.*

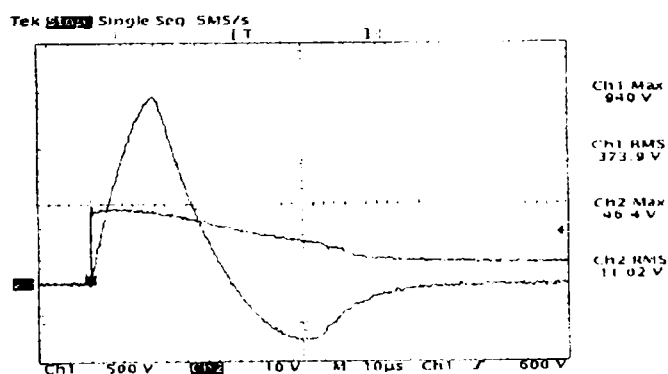


# ANEXA 4B

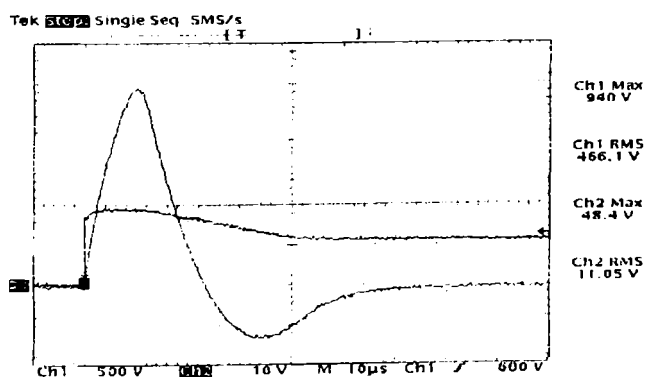
*Evoluția în timp a temperaturii pe durata aplicării a 6 impulsuri succesive, pentru configurația B.  
Oscilogramele impulsurilor aplicate.*



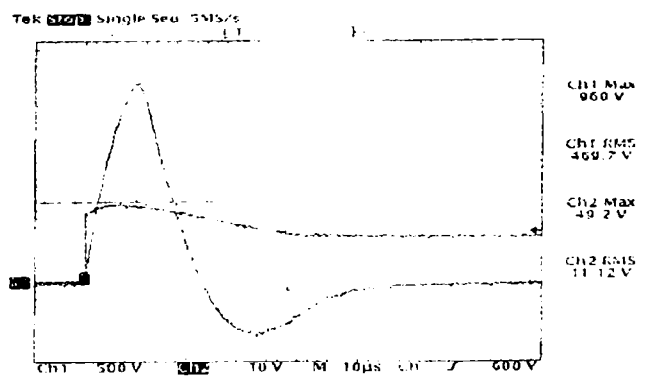
Oscilograma impulsului nr. 1.



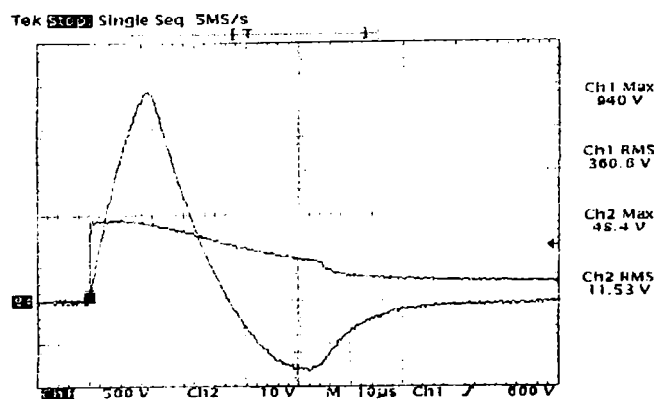
Oscilograma impulsului nr. 2.



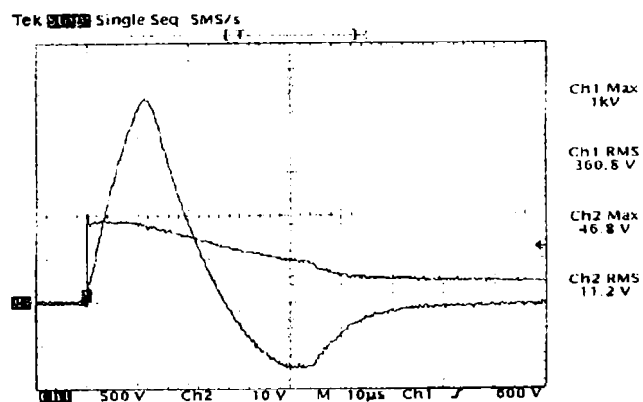
Oscilograma impulsului nr. 3.



Oscilograma impulsului nr. 4.



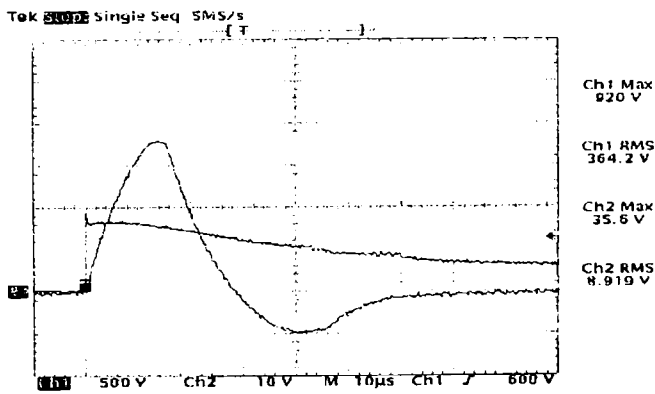
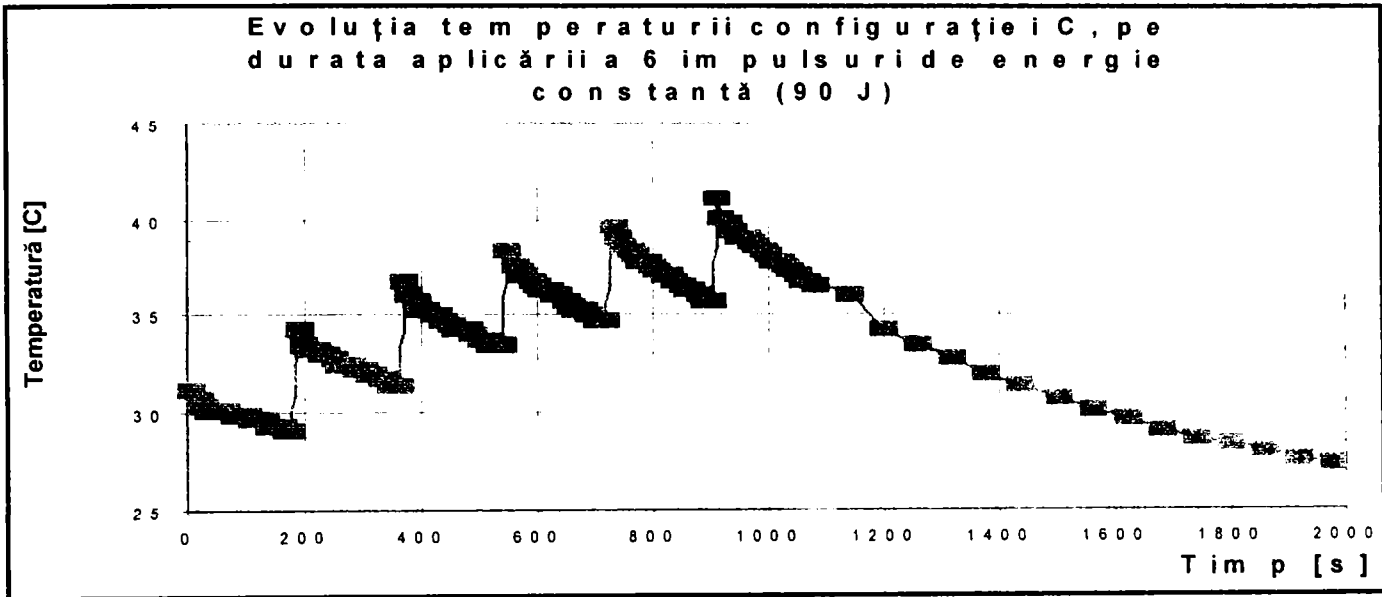
Oscilograma impulsului nr. 5.



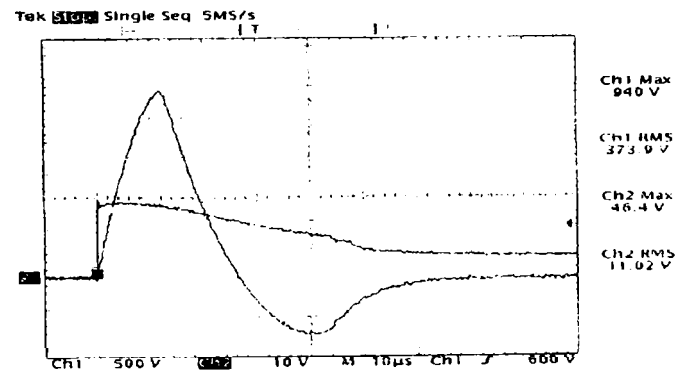
Oscilograma impulsului nr. 6.

# ANEXA 4C

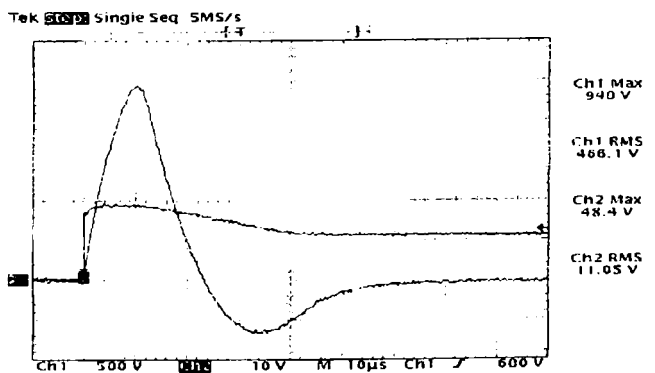
*Evoluția în timp a temperaturii pe durata aplicării a 6 impulsuri succesive, pentru configurația C.  
Oscilogramele impulsurilor aplicate.*



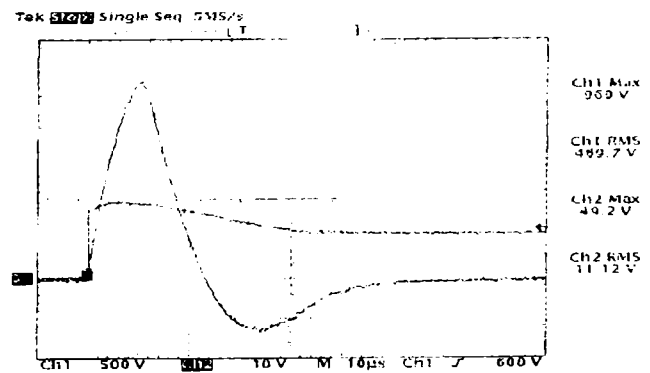
Oscilograma impulsului nr. 1.



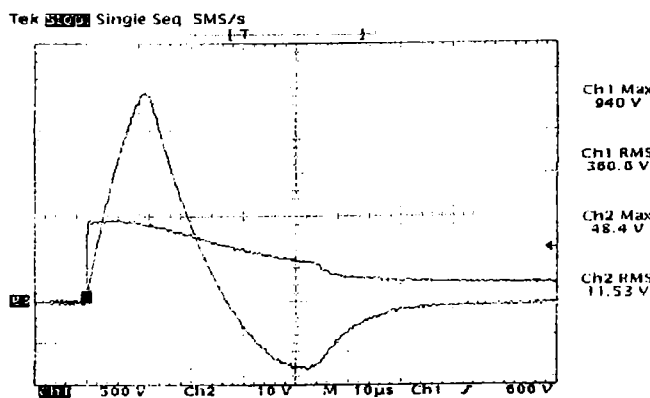
Oscilograma impulsului nr. 2.



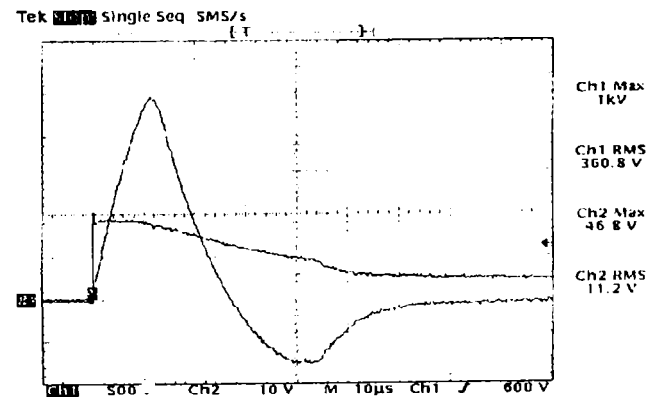
Oscilograma impulsului nr. 3.



Oscilograma impulsului nr. 4.



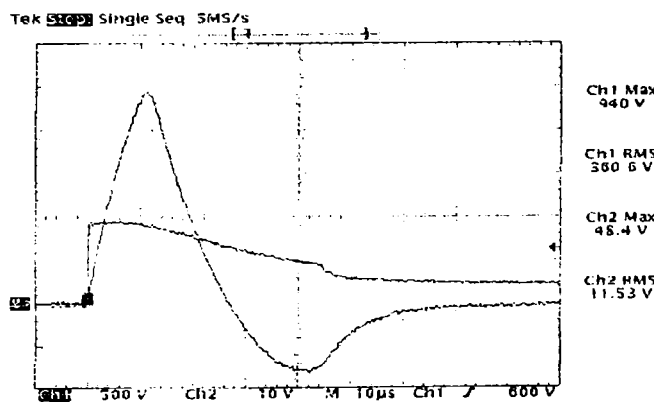
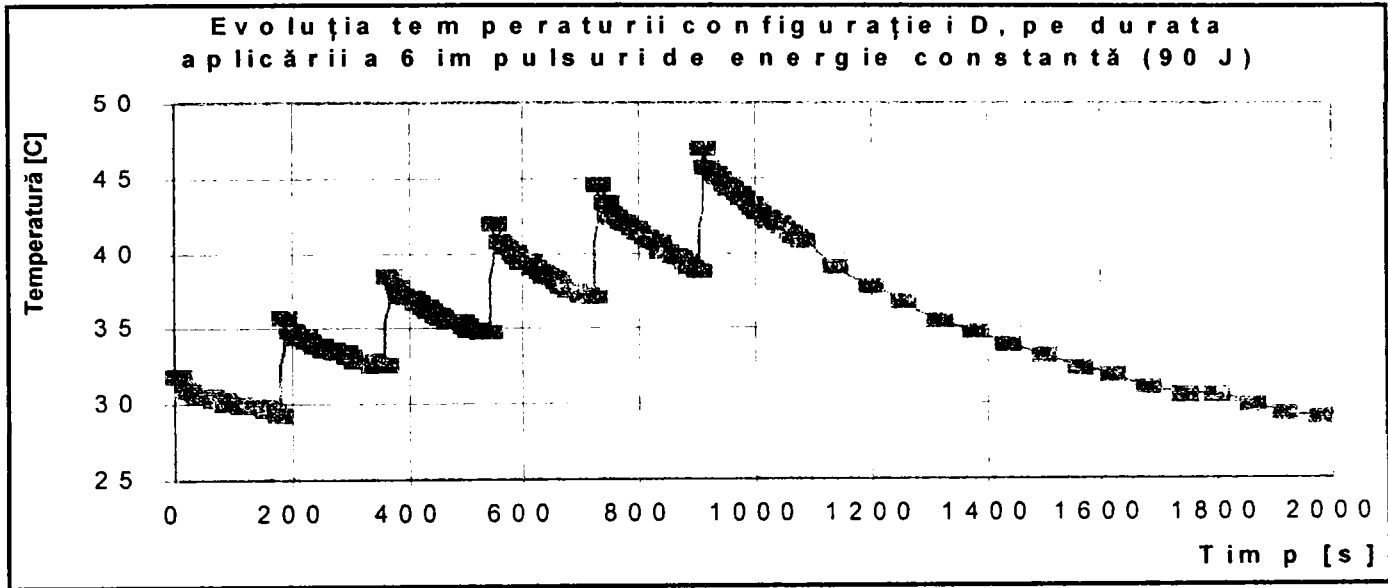
Oscilograma impulsului nr. 5.



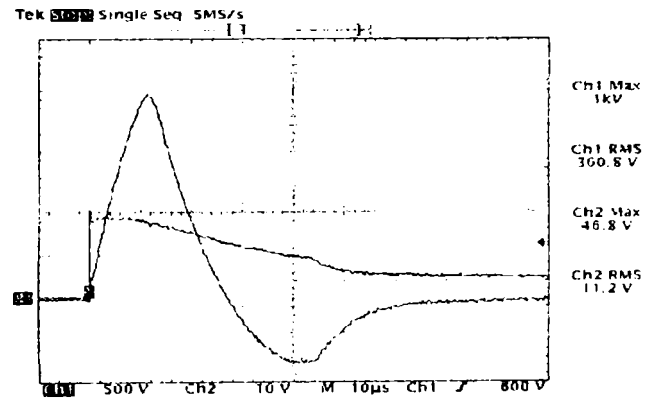
Oscilograma impulsului nr. 6.

# ANEXA 4D

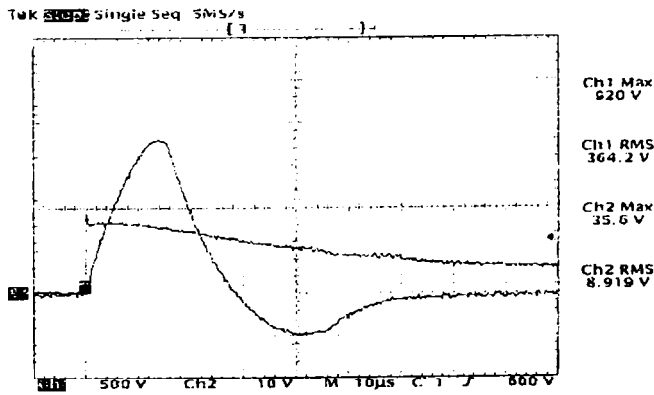
*Evoluția în timp a temperaturii pe durata aplicării a 6 impulsuri succesive, pentru configurația D.  
Oscilogramele impulsurilor aplicate.*



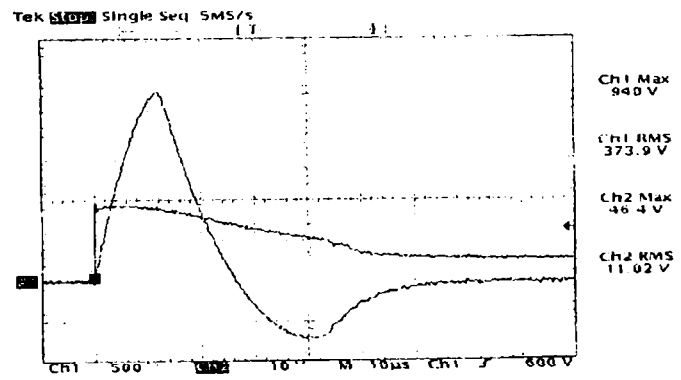
Oscilograma impulsului nr. 1.



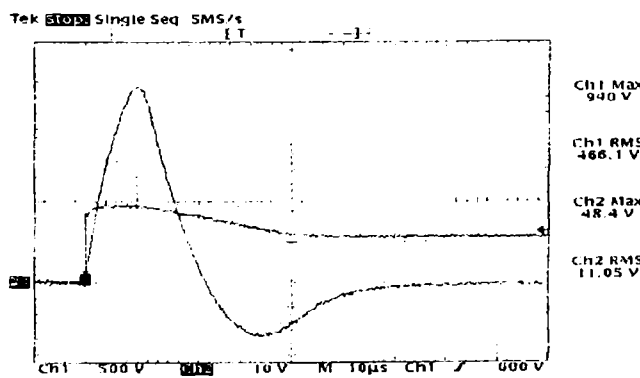
Oscilograma impulsului nr. 2.



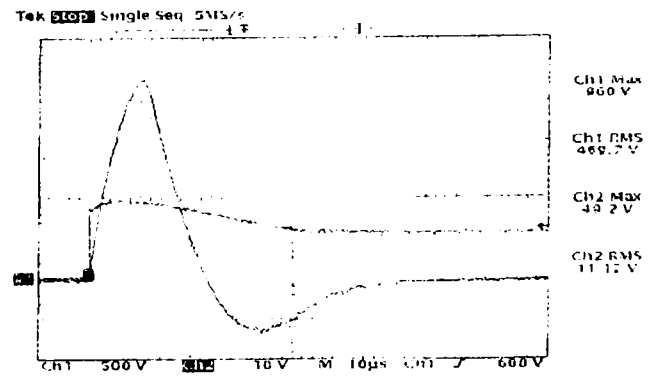
Oscilograma impulsului nr. 3.



Oscilograma impulsului nr. 4.

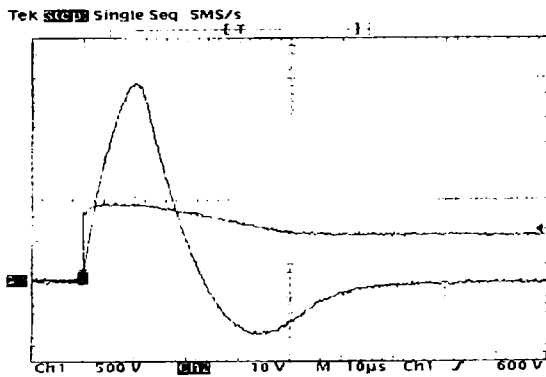
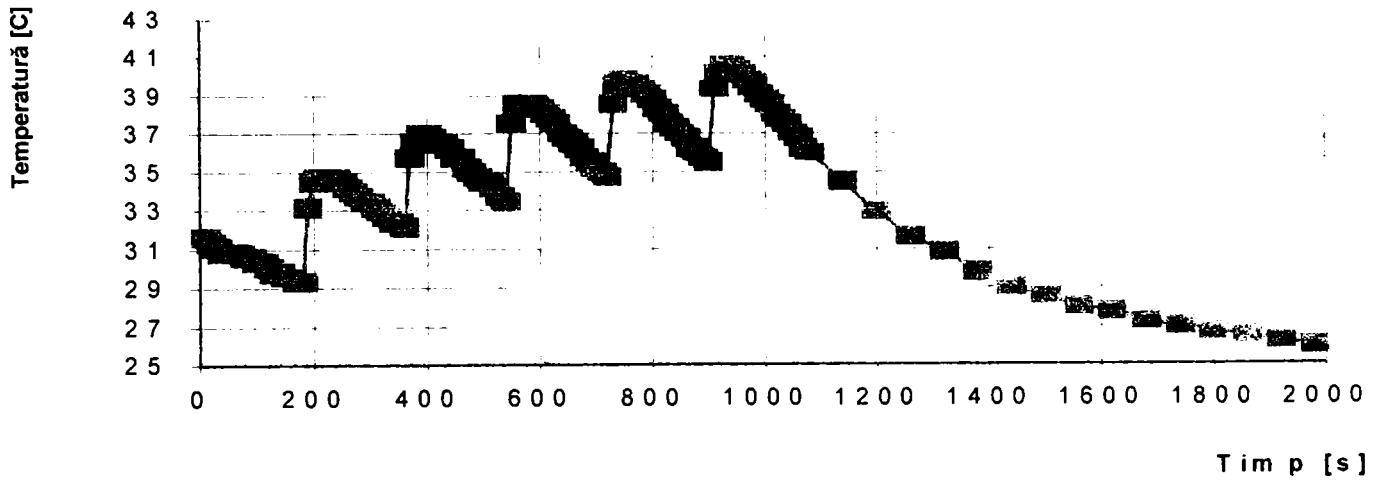


Oscilograma impulsului nr. 5.

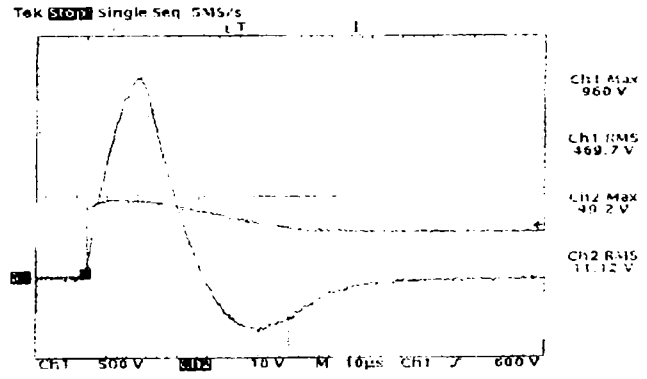


Oscilograma impulsului nr. 6.

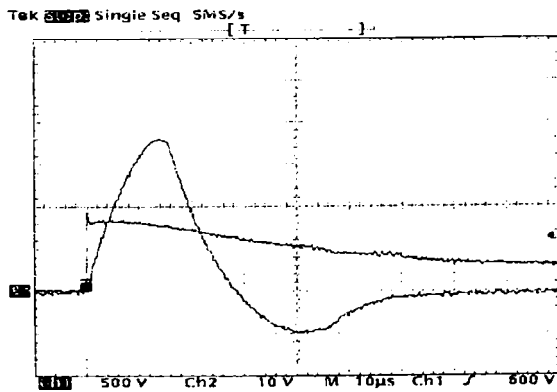
Evoluția temperaturii configurației E, pe durata aplicării a 6 impulsuri de energie constantă (90 J)



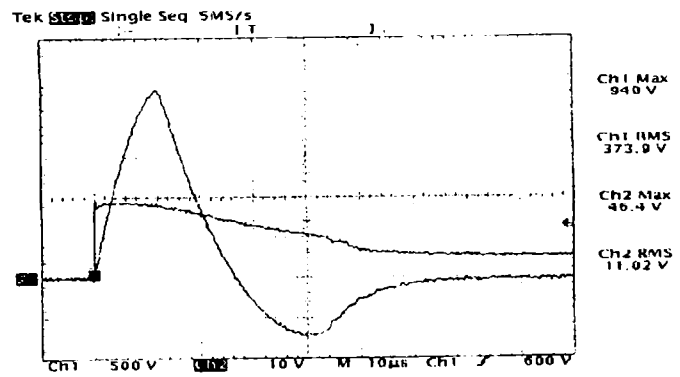
Oscilograma impulsului nr. 1.



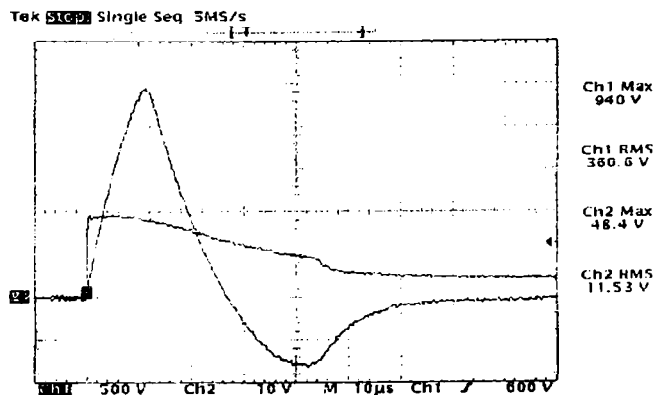
Oscilograma impulsului nr. 2.



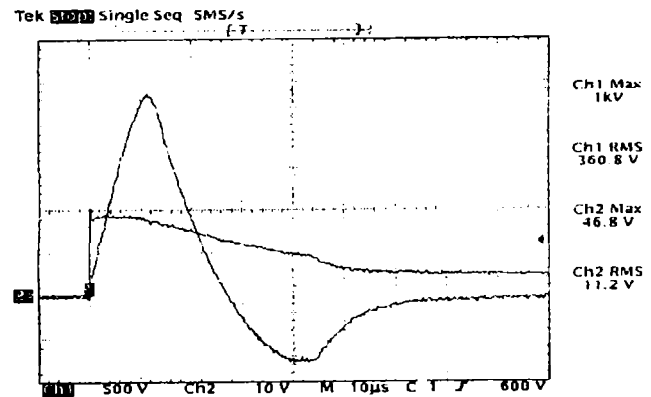
Oscilograma impulsului nr. 3.



Oscilograma impulsului nr. 4.

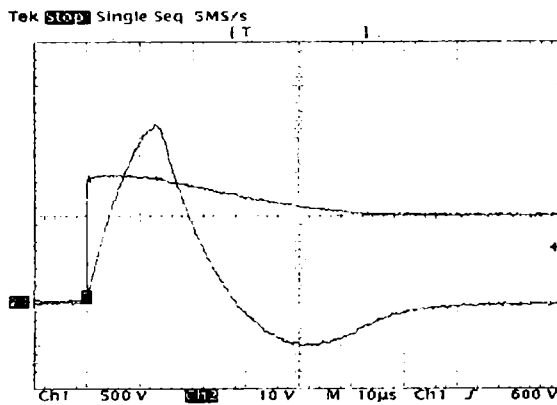
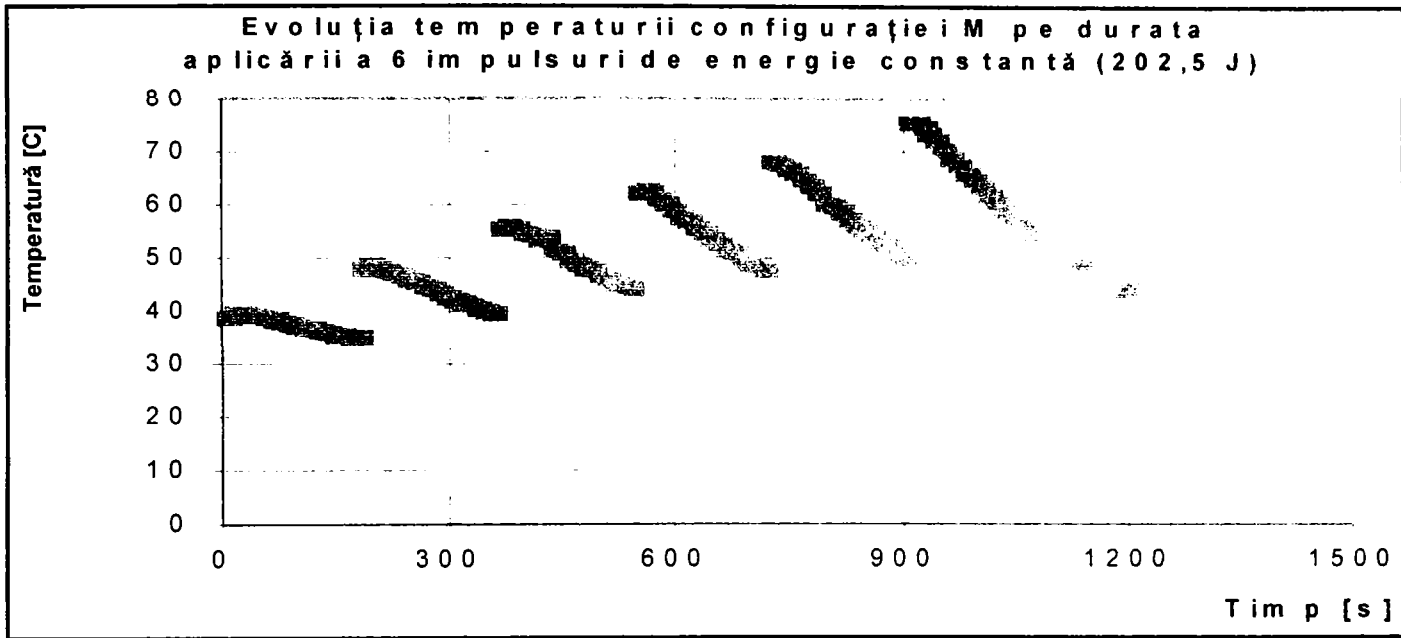


Oscilograma impulsului nr. 5.

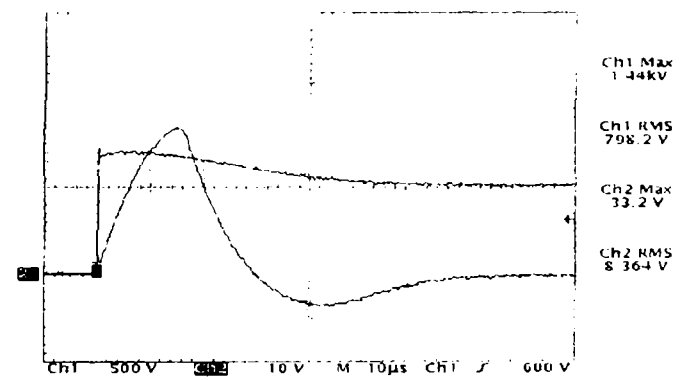


Oscilograma impulsului nr. 6.

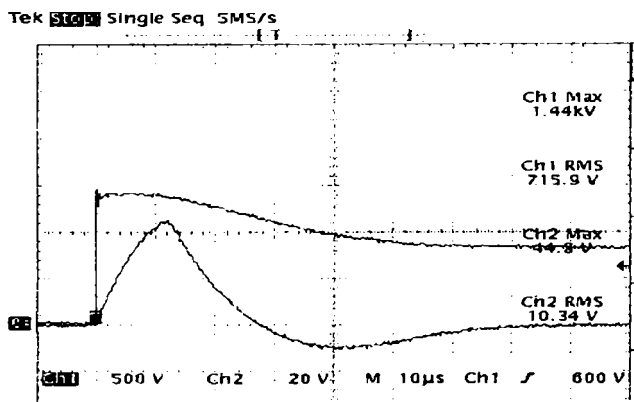




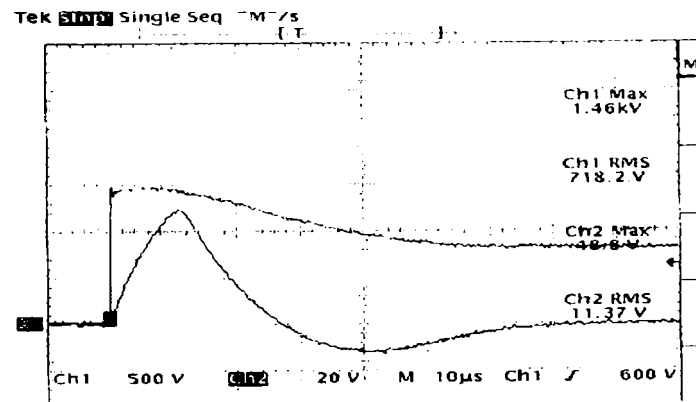
Oscilograma impulsului nr. 1.



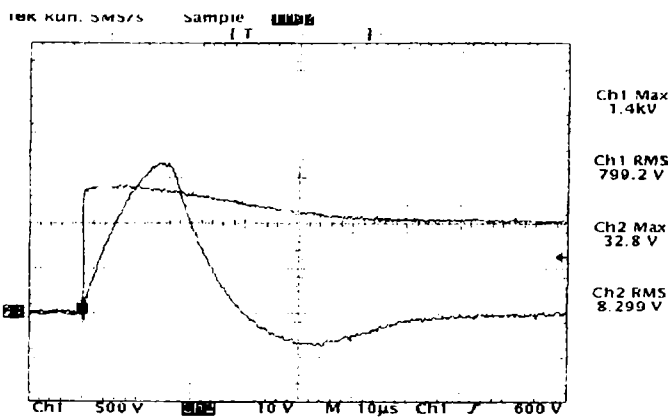
Oscilograma impulsului nr. 2.



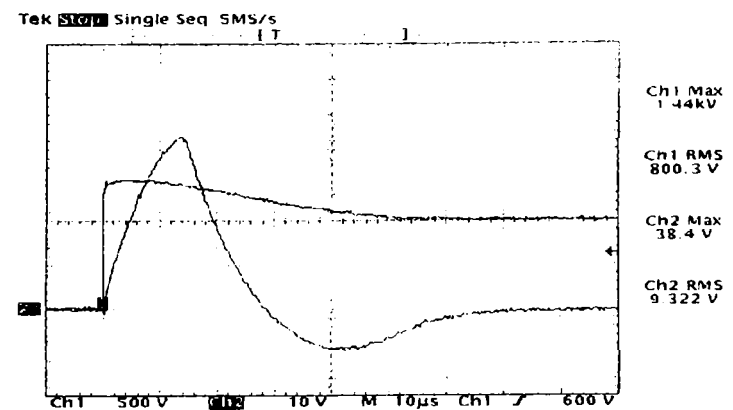
Oscilograma impulsului nr. 3.



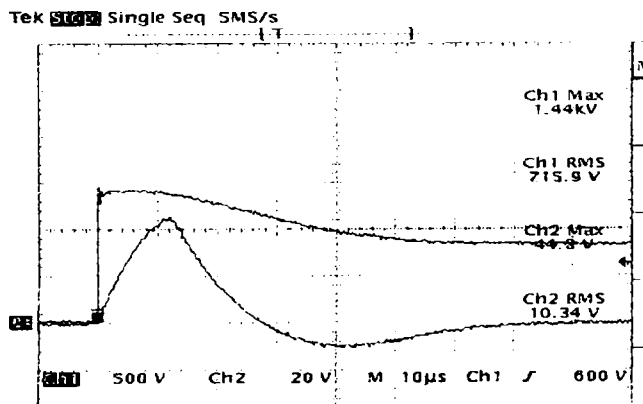
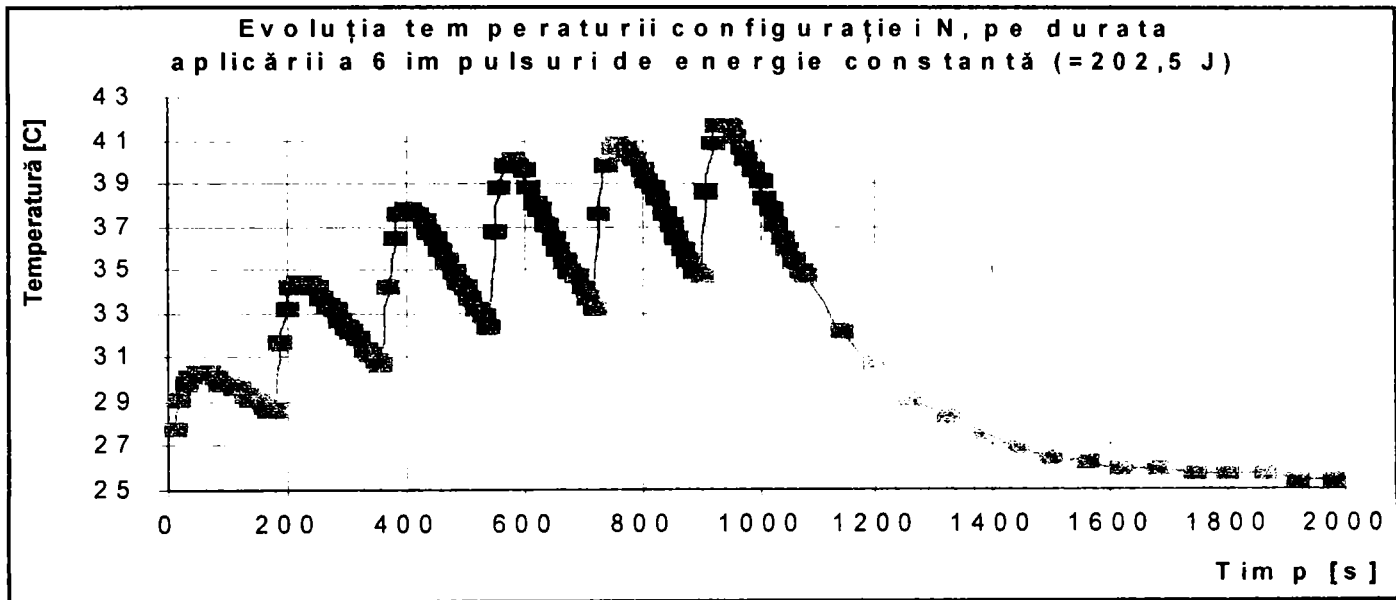
Oscilograma impulsului nr. 4.



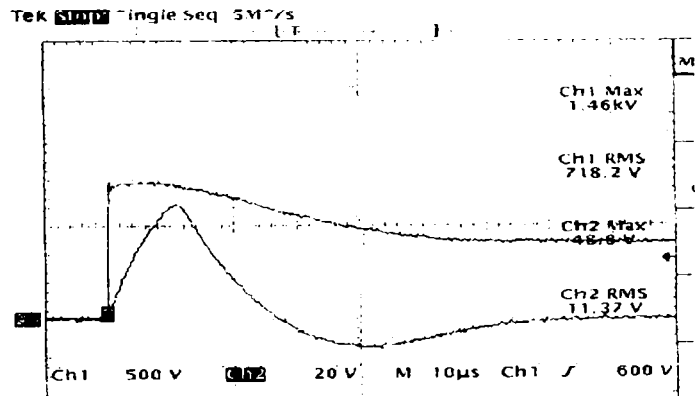
Oscilograma impulsului nr. 5.



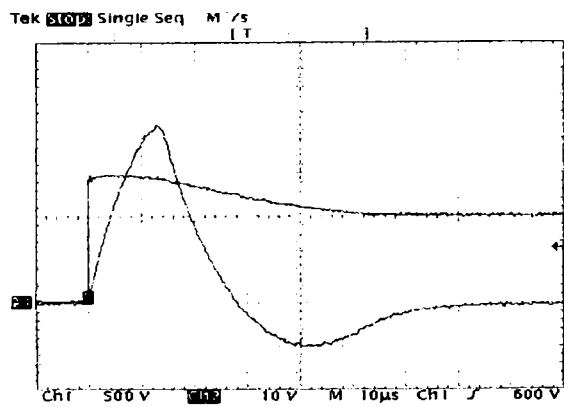
Oscilograma impulsului nr. 6.



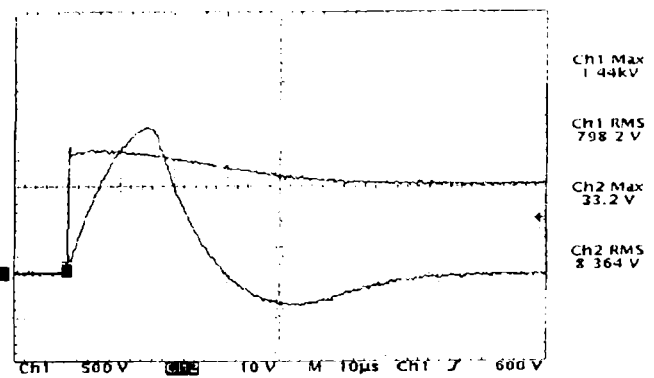
**Oscilograma impulsului nr. 1.**



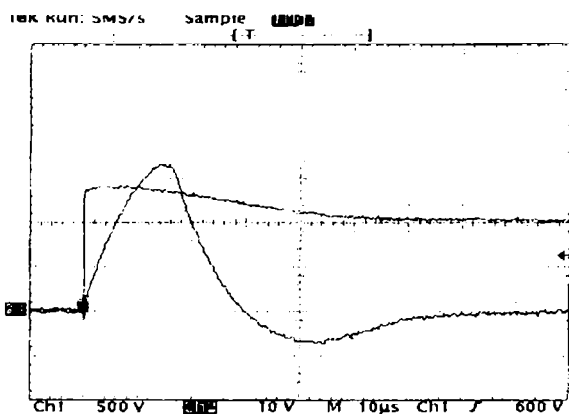
**Oscilograma impulsului nr. 2.**



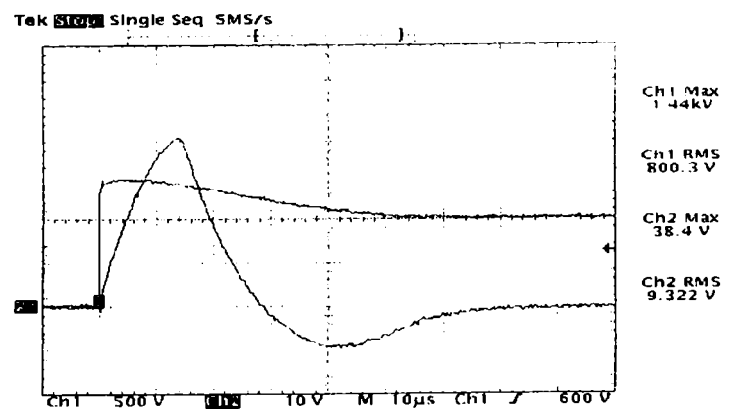
**Oscilograma impulsului nr. 3.**



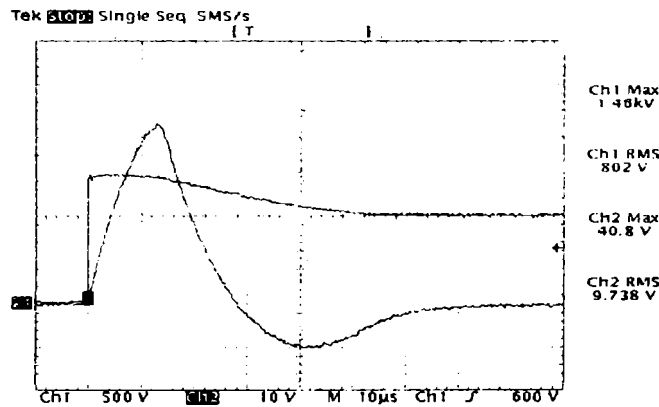
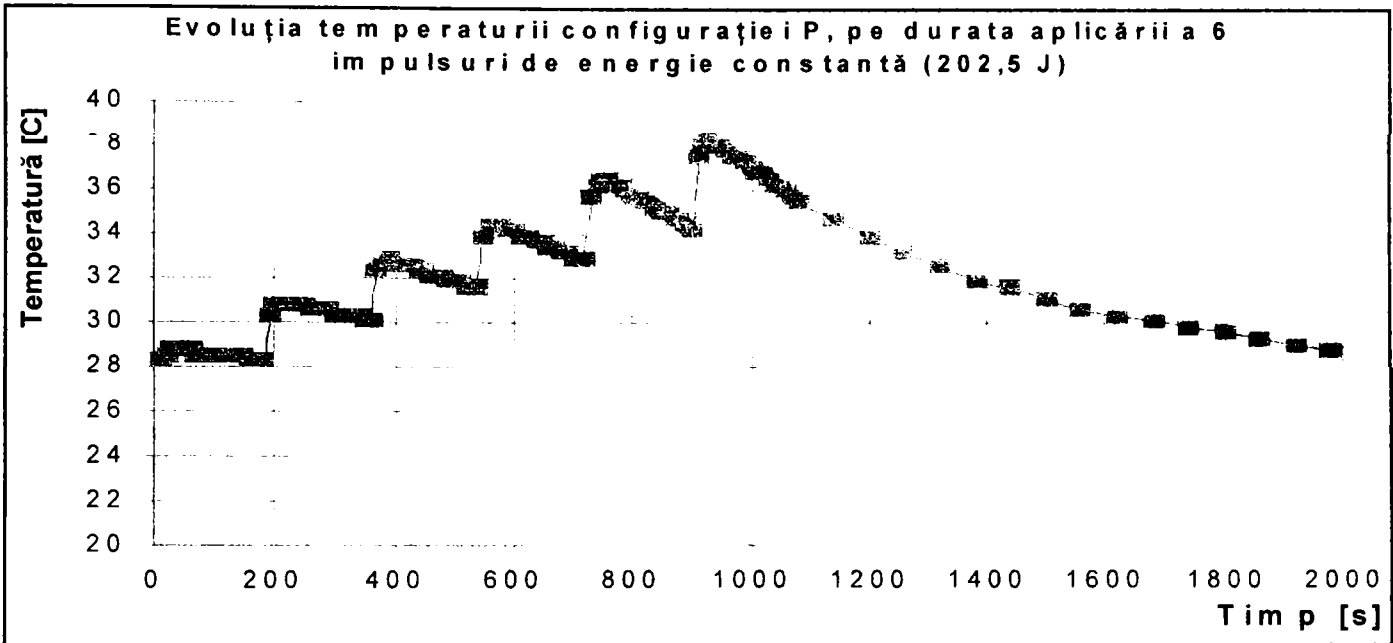
**Oscilograma impulsului nr. 4.**



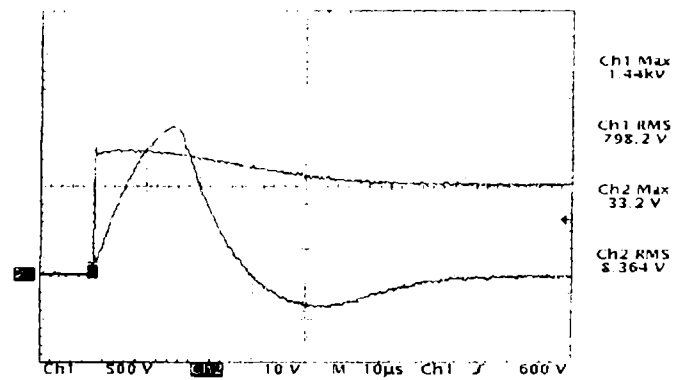
**Oscilograma impulsului nr. 5.**



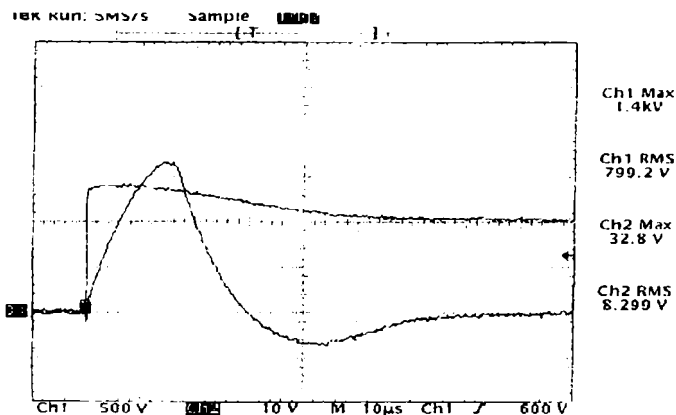
**Oscilograma impulsului nr. 6.**



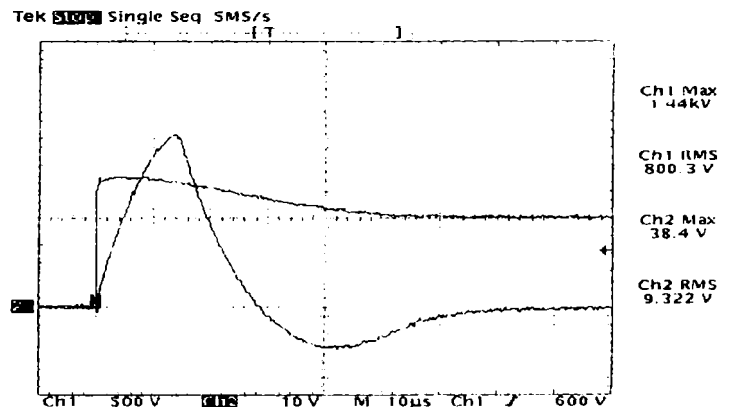
**Oscilograma impulsului nr. 1.**



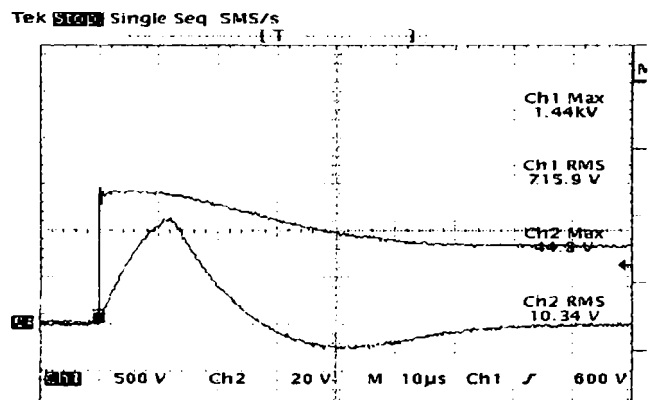
**Oscilograma impulsului nr. 2.**



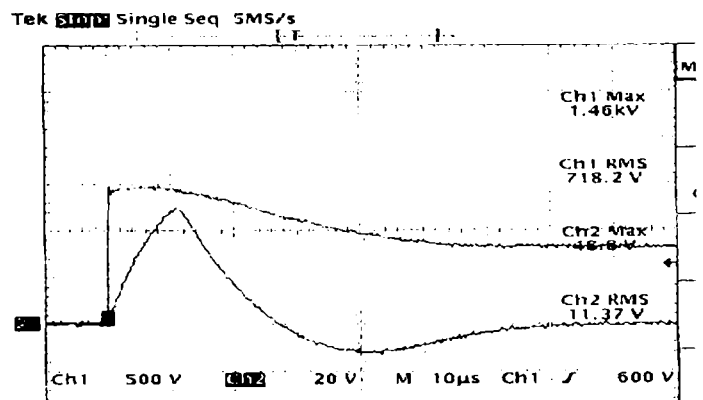
**Oscilograma impulsului nr. 3.**



**Oscilograma impulsului nr. 4.**



**Oscilograma impulsului nr. 5.**



**Oscilograma impulsului nr. 6.**

## ***Despre autor***



*M-am născut în data de 22 aprilie 1975 în Municipiul Reșița.*

*Cursurile elementare precum și cele liceale le-am urmat în cadrul Liceului "Traian Lalescu" din Reșița, pe care l-am absolvit în 1993 ca șef de promoție.*

*În anul 1998 am absolvit Facultatea de Electrotehnică din cadrul Universității POLITEHNICA din Timișoara, profilul "Inginerie Electrică", tot ca șef de promoție, având media generală 10 pentru toți anii de studii.*

*În anul următor am urmat cursurile modulului de studii aprofundate "Echipamente pentru electrotehologii și aparate electrice", pe care l-am absolvit în cursul anului 1999.*

*Încă de la terminarea facultății mi-am desfășurat activitatea în cadrul Catedrei de Electroenergetică de la Facultatea de Electrotehnică a Universității POLITEHNICA din Timișoara, mai întâi ca preparator (între 1998 și 2001), iar începând din 2001 ca asistent.*

*Ca principale repere ale activității mele în toți acești 3 ani amintesc:*

- *Publicarea în calitate de autor unic sau coautor a 22 lucrări științifice sau articole;*
- *Participarea la 4 programe europene tip TEMPUS sau SOCRATES-ERASMUS;*
- *Participarea la numeroase sesiuni de comunicări, simpozioane;*

*Principalele direcții de cercetare abordate până în prezent sunt:*

- *Stabilitatea termică a echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO;*
- *Sisteme de protecție contra supratensiunilor;*
- *Fiabilitatea și mentenanța aparatelor și echipamentelor utilizate în electroenergetică;*
- *Implementarea în cadrul unor aplicații a echipamentelor de comandă cu logică programată;*
- *Probleme legate de solicitările termice care apar în echipamentele electrice;*
- *Forțele electrodinamice care apar în aparatele și echipamentele electrice;*
- *Studiul rezistențelor electrice de contact;*

***Timișoara,  
Octombrie 2001***

***Flaviu Mihai FRIGURĂ - ILIASA***