

CONTRIBUȚII LA IMPLEMENTAREA PROTECȚIILOR ÎMPOTRIVA SUPRATENSIUNILOR ÎN ECHIPAMENTELE DE TELECOMUNICAȚII

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE ELECTRICĂ
de către

Ing. Florentin Munteanu

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Alexandru Vasilevici
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Florin Ionescu
prof.univ.dr.ing. Ioan Felea
prof.univ.dr.ing. Iuliu Deleşega

Ziua susținerii tezei: 26.10.2007

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

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 și Electroenergetică din Timișoara, în cadrul Laboratorului "Génie Electrique" al Universității PAUL SABATIER din Toulouse precum și în cadrul Departamentului R&D de la Alcatel Timișoara.

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 colectivul 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, domnului prof.dr.ing. Iuliu DELESEGA, domnului conf.dr.ing. Doru VĂTĂU precum și colegilor și prietenilor mei s.l.dr.ing. Flaviu FRIGURA și s.l.dr.ing. Emil Cazacu carora 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 Alcatel-Lucent S.A. Romania pentru încrederea acordată.

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 2007**

Florentin MUNTEANU

In meomoria tatălui meu, Munteanu Vasile.
Soției și fiicei mele, Ioana.

Munteanu, Florentin

**Contribuții la implementarea protecțiilor împotriva
supratensiunilor în echipamentele de telecomunicații**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 6, Nr. 3, Editura Politehnica,
2007, 198 pagini, 82 figuri, 11 tabele.

ISSN: 1842-7022

ISBN: 978-973-625-518-2

Cuvinte cheie:

Protecții, Supratensiuni, Varistoare, ZnO, Telecomunicații.

Rezumat,

Lucrarea a debutat cu un amplu studiu teoretic, 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, în structura surselor de alimentare modulare din domeniul telecomunicațiilor. S-a prezentat tehnologia de fabricație a varistoarelor pe bază de ZnO și s-a analizat principale metode de proiectare a varistoarelor pe bază de ZnO; S-a propus un algoritm propriu, având trei pași, pentru proiectarea varistoarelor pe bază de ZnO; In baza lui s-au realizat in cadrul L.G.E. Toulouse 4 serii de varistoare, pentru aplicațiile specifice telecomunicațiilor. S-au analizat metodele de măsurare a impedanței varistoarelor pe bază de ZnO și s-a stabilit teoretic și experimental ca modelul Cole-Cole este cel mai adecvat pentru determinările impedanței complexe. Varistoarele astfel obținute au fost integrate in module și montate pe centrala telefonică. S-au conceput dialoguri de alarmă, s-a verificat funcționarea reala și filtrajul in cazul perturbațiilor. In ultimul capitolul s-a facut o sinteză a întregii lucrari și s-au menționat concluzii privitoare la studiile teoretice și la cercetările aplicative.

Cuprins

Capitolul I Introducere	9
I.1. Obiectul și actualitatea temei	9
I.2. Obiectivele și structura tezei	12
Capitolul II Supratensiunile și echipamentele de protecție împotriva acestora.....	16
II.1. Generalități privind supratensiunile din rețelele de alimentare cu energie electrică și de telecomunicații.....	16
II.2. Standarde specifice pentru echipamentele de protecție împotriva supratensiunilor	22
II.2.1. Impulsuri standardizate de tensiune	22
II.2.2. Mărimi specifice standardizate.....	25
II.2.3. Clase standardizate de echipamente de protecție împotriva supratensiunilor	31
II.3. Concluzii.....	35
II.4. Contribuții personale și originale.....	35
Capitolul III Implementarea varistoarelor pe bază de ZnO în schemele de protecție ale echipamentelor de telecomunicații	36
III.1. Probleme actuale existente în domeniul protecțiilor împotriva supratensiunilor pentru echipamentele de telecomunicații	36
III.2. Posibilități de amplasare a echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor pentru sursele modulare de alimentare din domeniul telecomunicațiilor	39
III.3. Soluții tehnice pentru sistemele de protecție împotriva supratensiunilor pentru echipamente de telecomunicații	42
III.4. Dispozitive de protecție împotriva supratensiunilor bazate pe varistoare cu oxizi metalici	46
III.4.1. Caracteristica statică curent-tensiune pentru un varistor pe bază de ZnO.....	49
III.4.2. Module de protecție la joasă tensiune bazate pe varistoare ZnO	53
III.5. Concluzii	62
III.6. Contribuții personale și originale.....	62
Capitolul IV Elemente privind proprietățile fizico-chimice ale varistoarelor utilizate și tehnologia lor de fabricație	63
IV.1. Proprietățile fizico-chimice ale varistoarelor pe bază de ZnO.....	63
IV.2. Tehnologia de fabricație a varistoarelor pe bază de ZnO și influența acestora asupra proprietăților materialului finit	70
IV.2.1. Etapele și operațiile procesului de fabricație	70
IV.3. Mecanismele conducției pentru varistoarele pe bază de ZnO	78
IV.3.1. Modelul M. Matsuoka	79
IV.3.2. Modelul J.D. Levine	79
IV.3.3. Modelul lui G.E. Pike și C.H. Seager.....	80
IV.3.4. Modelul L.M. Levinson, H.R. Philip, G.D. Mahan.....	81
IV.3.5. Modelul J. Bernasconi	82
IV.3.6. Modelul O. Dorlanne.....	82

IV.4. Mecanismele degradării la varistoarele pe bază de ZnO	86
IV.4.1. Modelul K. Eda și colaboratorii	87
IV.4.2. Modelul T.K. Gupta și colaboratorii	89
IV.4.3. Modelul C.G. Shirley și W.M. Paulson	89
IV.5. Distrugerea	90
IV.6. Concluzii	91
IV. 7. Contribuții personale și originale	93
Capitolul V Alegerea și verificarea varistoarelor utilizate.....	94
V.1. Dimensionarea varistoarelor utilizate	94
V.1.1. Pasul I (calculul electric)	94
V.1.2. Pasul II (calculul termic)	99
V.1.3. Pasul III (calculul de siguranță)	112
V.2. Încercări specifice ale varistoarelor utilizate.....	118
V.2.1. Caracteristica curent-tensiune	118
V.2.2. Verificarea încălzirii varistoarelor.....	125
V.3. Concluzii	129
V.4. Contribuții personale și originale	131
Capitolul VI Determinarea impedanței complexe a Varistoarelor	132
VI.1. Definirea impedanței complexe a varistoarelor.....	132
VI.2. Modele pentru studiul relaxației dielectrice	137
VI.2.1. Modelul Debye.....	137
VI.2.2. Modelul Cole-Cole	138
VI.2.3. Funcția de distribuție a timpilor de relaxație	139
VI.3. Determinarea experimentală a impedanței complexe.....	143
VI.3.1. Determinarea unghiului de descentraj θ prin metoda regresiei circulare	148
VI.3.2. Calculul timpului mediu de relaxație și reprezentarea funcției de distribuție a timpilor de relaxație	151
VI.4. Determinarea capacității varistorului la frecvența de 50 Hz	156
VI.5. Concluzii	159
VI.6. Contribuții personale și originale	161
Capitolul VII. Implementarea modulelor de protecție împotriva supratensiunilor în instalațiile de telecomunicații	162
VII.1. Descrierea și amplasarea modulelor de protecție	162
VII.1.1. Modulul trifazat pentru 230 Vef.....	162
VII.1.2. Modulul monofazat pentru 230 Vef.....	164
VII.1.3. Modulul de 48 Vcc.....	165
VII.2. Verificarea modulelor de protecție din punct de vedere al supratensiunilor.....	167
VII.2.1. Programarea alarmelor declanșate de supratensiuni	167
VII.2.2. Verificarea alarmelor definite anterior la aplicarea unor supratensiuni	170
VII.3. Verificarea modulelor de protecție din punct de vedere al filtrajului ...	173
VII.3.1. Stabilirea perturbațiilor specifice și a parametrilor de testare	173
VII.3.2. Teste perturbatorii fără montarea a nici unui modul de protecție.....	175

VII.3.3. Teste perturbatorii cu montarea tuturor modulelor de protecție.....	176
VII.4. Concluzii.....	177
VII.5. Contribuții personale și originale.....	180
Capitolul VIII. Concluzii și perspective	181
VIII.1. Rezultatele cercetării.....	181
VIII.2. Concluziile principale.....	183
VIII.3. Contribuții personale și originale.....	184
VIII.4. Perspective ale continuării studiului	186
Referințe bibliografice	187

Capitolul I Introducere

I.1. Obiectul și actualitatea temei

Putem afirma că ultimii douăzeci de ani au produs o revoluție în domeniul telecomunicațiilor, pe măsură ce s-au dezvoltat sistemele digitale bazate pe sateliți, rețele de fibră optică, secolul actual fiind secolul informației. Societatea a suferit transformări radicale datorită extinderii modalităților de comunicare și a creșterii volumului de informații vehiculate (este suficient să amintim doar apariția Internet-ului sau a telefoniei mobile). Mai nou, soluțiile VoIP (voice over IP) sau Voice Over Cable și NGN (next generation network - SIP, BICC, H248) au cucerit piața, ele fiind adoptate de majoritatea companiilor, soluțiile fiind ieftine și bazându-se pe rețeaua deja existentă. Astfel, rețelele fixe de telecomunicații nu numai că sunt, în continuare, necesare, ele trebuind chiar să fie extinse și modernizate.

În paralel, asistăm și la liberalizarea piețelor de telecomunicații și a ridicării monopolurilor naționale ale vechilor companii de telecomunicații (care aveau ca acționar principal statul și, cam peste tot în lume, ele erau privite ca având o însemnătate deosebită, fiind considerate chiar un pol de securitate). Astfel, au apărut o mulțime de noi operatori de telefonie fixă și mobilă, care oferă soluții mai ieftine și servicii diversificate clienților de pe piață, iar numărul lor este în continuă creștere.

În situația României, monopolul pentru telefonia fixă a fost ridicat în 2003, iar de atunci, pe lângă operatorul național Romtelecom au apărut și s-au dezvoltat rapid încă 3 operatori mari de telefonie: RDS, UPC și ATLAS Telecom. În plus, alți operatori au dezvoltat servicii de transport al informației.

Infrastructura aferentă rețelelor noilor operatori de pe piață este, de multe ori, minimală, ieftină și executată în grabă, dorința justificată a acestora fiind cucerirea rapidă a pieții cu costuri investiționale reduse. Aceștia au efectuat investiții masive în echipamente (NGN, VoIP, fibră optică, PCM...), echipamente plasate de cele mai multe ori în locuri descoperite, în containere, pe acoperișul blocurilor sau în interiorul clădirilor, fără a avea o protecție sporită împotriva supratensiunilor sau descărcărilor electrice. Nici chiar infrastructura mai veche nu dispune de protecții eficiente. De multe ori centrele satelit, centralele, gateway-urile și toate echipamentele terminale au fost alimentate direct de la rețeaua civilă de tensiune (inclusiv în situația operatorilor de telefonie mobilă).

Cu toate acestea, situația infrastructurii din România este mult mai bună decât cea din zonele deșertice sau slab populate (Angola, Mauritania, Ghana, Yemenetc.), unde echipamentele sunt de obicei concentrate în jurul unui site (oaze) cu alimentări prin cabluri de tensiune supraterane. Această soluție de alimentare le face, în mod evident, vulnerabile supratensiunilor atmosferice și nu numai, care sunt aplicate surselor de alimentare ale echipamentelor de comunicație.

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 (și chiar 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.

Avariile care apar la modulele de telecomunicație ca urmare a supratensiunilor atmosferice care se propagă pe linia de alimentare nu pot fi eliminate prin simpla utilizare a siguranțelor fuzibile sau a releelor de protecție, fie ele ultrarapide. Defecțiunile ireversibile apărute pe plăcile cu componente electronice sunt de cele mai multe ori străpungeri dielectrice, fie ale plăcii propriu-zise, fie ale pieselor montate pe aceasta (condensatoare, semiconductori, circuite integrate, etc.).

Dacă rețeaua de alimentare dispune de echipamente de protecție adecvate, energia reziduală transportată de unda de șoc nu este excesiv de mare. În consecință, în majoritatea cazurilor, deteriorarea ireversibilă a componentelor electronice sensibile se produce ca urmare a expunerii materialelor la câmpuri electrice intense (străpungere dielectrică), și nu ca urmare a încălzirii excesive.

Străpungerea dielectrică este un fenomen extrem de violent, care constă în trecerea directă a curentului electric prin masa unui dielectric așezat între doi electrozi metalici la o anumită valoare a intensității câmpului electric exterior. Străpungerea dielectrică este, practic, un fenomen instantaneu, având o durată de cca. 10^{-6} ... 10^{-8} s.

Costurile cauzate de scoaterea din uz a unei centrale telefonice sunt extrem de mari. Costul echipamentelor distruse de trăsnete nu este substanțial; producătorii fiind chiar bucuroși să raporteze o cifră tot mai mare de afaceri, problema constă de fapt în paralizarea comunicațiilor într-un anumit sector (zonă de abonați). Un singur centru satelit numeric de abonați poate deservi până la 10.000 de abonați; dacă ne gândim că de la un singur trăsnet 10.000 de abonați pot rămâne fără serviciu de date și telefonie, atunci ne dăm seama de importanța fenomenului. Intervenția de înlocuire a plăcilor distruse de trăsnete poate fi deseori o operație complicată și care necesită timp. În tot acest timp, abonații nu vor mai avea acces la serviciul de comunicații. La o utilizare de 20 % a centralei, cu un cost mediu de 10 eurocenți pe minut (telefonie fixă sau mobilă, transmisie de date etc.), rezultă o pierdere minimă de 200 Euro pentru fiecare minut în care centrala este scoasă din uz. Aceasta este o estimare favorabilă, centralele noilor operatori apăruți pe piață fiind, în marea majoritate a zilelor lucrătoare, încărcate la 100 %. Fără a exagera, putem spune că pierderile cauzate de scoaterea din uz a centrului de comunicație ca urmare a reparațiilor necesare după apariția unei supratensiuni, sunt, de multe ori, mai mari decât costul înlocuirii modulelor distruse.

O altă constatare pe care o putem face este că firmele producătoare de asemenea echipamente scumpe sau extrem de importante (pentru telecomunicații, tehnică medicală etc.) nu montează în interiorul acestora nici un dispozitiv de protecție, avariile aparaturii fiind surse suplimentare de venituri, fie din service, fie din achiziția unui nou aparat. Deci supratensiunile sunt o „mină de aur” pentru producătorii de echipamente electronice. Prin montarea unui singur varistor corect ales pe alimentarea acestora prețul final ar urca cu câteva zeci de eurocenți, pentru un aparat de mii (zeci și chiar sute de mii) de euro.

De cealaltă parte, companiile de electricitate asigură un nivel grosier de protecție al consumatorului casnic sau similar împotriva supratensiunilor. Valorile reziduale ale șocurilor de tensiune pot depăși deseori 6000 V, pentru o banală priză de 230 Vef. Oricum, pentru astfel de incidente tip lovitură de trăsnet, conform legislației românești sau europene, nu pot fi acționate în justiție, nefiind vorba de neglijență sau rea voință, ci de o catastrofă naturală. Furnizorul de electricitate montează, de regulă, echipamente de protecție la supratensiuni care să protejeze aparatură și rețeaua din proprietatea sa (și, în mod accidental, aleatoriu sau colateral instalația clientului).

Prin urmare, consumatorul este lăsat pradă intemperiiilor, de multe ori fără să intuiască, neavând cunoștințe de specialitate. În prize, sunt lăsate conectate, fără nici un fel de protecție, echipamente de zeci de mii de euro. Dacă totuși consumatorul conștientizează că la o lovitură de trăsnet aplicată rețelei de alimentare siguranța fuzibilă e prea lentă și că ar trebui să monteze o protecție specială, este descurajat de complexitatea acesteia și de prețul prohibitiv (de regulă consumatorul neavizat conștientizează acest lucru după un incident).

Legislația română (și nici cea din multe țări UE, din SUA, din Japonia etc.) nu obligă consumatorul (casnic sau similar) să monteze protecții la supratensiuni, deoarece daunele le suportă oricum numai acesta. Cu atât mai mult, operatorul de telefonie este lăsat singur să ia această decizie, nefiind deloc familiarizat cu problematica supratensiunilor.

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 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 performant privind protecția rețelelor electrice de joasă tensiune împotriva supratensiunilor (și, cu atât mai mult, a rețelelor de telecomunicații). 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.

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.

Lucrarea de față își propune să ofere unele soluții simple privind câteva echipamente de protecție împotriva supratensiunilor aplicabile în domeniul echipamentelor de telecomunicații, în primul rând pentru sursele de alimentare ale centralelor telefonice digitale (care sunt utilizate atât de operatorii de telefonie fixă, cât și de cei de telefonie mobilă). Scopul principal este de a demonstra că, printr-o investiție minimă, o centrală care valorează zeci sau chiar sute de mii de euro poate

fi protejată eficient împotriva supratensiunilor care apar pe partea de alimentare, sau sunt create de electronica de putere a sursei. Mai mult chiar, soluția de protecție aplicată, bazată pe varistoarele cu ZnO oferă și avantajul unei filtrări a perturbațiilor care apar pe linia de alimentare.

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. Domeniul telecomunicațiilor este și el într-o continuă expansiune, prin urmare actualitatea temei este evidentă.

I.2. Obiectivele și structura tezei

Obiectivul principal, urmărit în cadrul tezei, este studiul implementării 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 echipamentelor din domeniul telecomunicațiilor.

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. În plus, se va avea în vedere și funcția colaterală de filtraj al perturbațiilor apărute pe rețeaua de alimentare, perturbații care ar putea dăuna calității serviciilor de telecomunicații.

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 utiliza varistoarele pe bază de ZnO în domeniul telecomunicațiilor?".

Întregul demers teoretic și aplicativ este realizat prin perspectiva operatorului de telecomunicații care poate deveni utilizator de echipamente electrice de protecție contra supratensiunilor care utilizează varistoare pe bază de ZnO. 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;
- sublinierea unor particularități specifice aplicațiilor din telecomunicații;

- prezentarea unor aspecte privind influența tehnologiei de fabricație a varistoarelor asupra calității și performanțelor acestora, în scopul evidențierii limitelor tehnologice;
- producerea unor serii limitate de varistoare, în scopul realizării unor echipamente (module) de protecție împotriva supratensiunilor, precum și testarea acestora în condiții la limită;
- dezvoltarea unei metode simple și originale de proiectare a echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO pentru aplicațiile la joasă tensiune, utilizabilă atât pentru domeniul telecomunicațiilor, cât și pentru aplicațiile electrocasnice sau similare;
- conceperea, proiectarea, execuția și testarea acestor echipamente;
- analiza solicitărilor electrice la care sunt supuse aceste echipamente;
- expunerea instrumentului matematic pe care se bazează studiul impedanței complexe a varistoarelor pe bază de ZnO;
- evidențierea algoritmului utilizat în modelarea impedanței complexe prin diagrama Cole-Cole;
- efectuarea de măsurători în scopul determinării impedanței complexe a varistoarelor pe bază de ZnO utilizate pentru modulele de protecție;
- propunerea unor soluții tehnice în vederea ameliorării performanțelor de filtrare ale varistoarelor pe bază de ZnO;
- efectuarea unor măsurători experimentale, pentru fiecare soluție tehnică propusă, în fiecare regim de funcționare;
- compararea măsurărilor 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 8 capitole (incluzând Introducerea și Concluziile), la care se adaugă un scurt "Cuvânt înainte", Referințele bibliografice, precum și 2 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. În final, pe baza unui studiu bibliografic, se fac anumite comentarii privind valabilitatea, corectitudinea, precum și aplicabilitatea unor standarde românești din domeniu.

Capitolul III este rezervat explicării problematicei actuale a echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor aplicabile în domeniul telecomunicațiilor. Capitolul debutează cu o descriere a unei surse de alimentare modulară pentru centrale digitale tip SAM. Sunt analizate principalele soluții tehnice existente la ora actuală, precum și unele scheme de montare a echipamentelor de protecție la

supratensiuni, anumite configurații și arhitecturi specifice. În final este descris un modul de protecție împotriva supratensiunilor, pentru alimentarea în trifazat a centralei, realizat după o soluție tehnică originală.

Pe parcursul Capitolului IV sunt conturate principalele proprietăți fizico-chimice ale varistoarelor pe bază de ZnO, împreună cu principalele elemente legate de proprietățile fizico-chimice ale acestora. Se acordă o importanță deosebită interdependenței dintre procesul tehnologic de fabricație și proprietățile electrice ale materialului rezultat. Se descrie întregul proces de fabricație al varistoarelor considerate. Sunt enumerate și principalele mecanisme care încearcă să explice degradarea lor.

Dimensionarea varistoarelor utilizate pentru construcția modulelor de protecție împotriva supratensiunilor este detaliată în Capitolul V. Această metodă este absolut originală și se bazează pe un algoritm simplu bazat pe trei pași, anume alegerea înălțimii, a diametrului și calculul solicitărilor (verificarea proprietăților). Varistoarele astfel dimensionate au fost verificate din punct de vedere al solicitărilor care pot apărea în exploatare.

Capitolul VI conține descrierea metodelor utilizate pentru determinarea impedanței complexe a varistoarelor pe bază de ZnO, precum și a instalațiilor experimentale aferente. Sunt prezentate, atât formulele matematice de calcul, cât și rezultatele finale ale determinărilor experimentale. La finalul capitolului este descrisă o metodă simplă și originală pentru determinarea parametrilor de material, care oferă rezultate satisfăcătoare pentru situația utilizării modulelor de protecție pentru aplicații la frecvența de 50 Hz.

Implementarea modulelor de protecție împotriva supratensiunilor concepute anterior în structura centralei telefonice digitale este înfățișată în Capitolul VII. Este avută în vedere atât montarea acestora pe instalația telefonică, cât și modul de interacțiune cu echipamentele centralei. Ca un avantaj colateral al montării varistoarelor în instalația de telecomunicații, perturbațiile apărute pe alimentarea sursei centralei sunt parțial filtrate de către aceste module. Sunt descrise și secvențele software pentru implementarea alarmelor cauzate de supratensiuni și pentru testarea funcționării centrale.

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

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

Ea reflectă unele preocupări actuale ale colectivului disciplinelor de Aparare și Echipamente Electrice, Materiale Electrotehnice și Tehnica Tensiunilor Înalte din cadrul Catedrei de Electroenergetică a Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara și anume studiul posibilităților de implementare a unor echipamente și materiale noi în domenii conexe electroenergeticii, precum și optimizarea proiectării unor echipamente moderne de protecție contra supratensiunilor.

Alegerea telecomunicațiilor ca domeniu de aplicație al acestor tehnologii nu este întâmplătoare, autorul desfășurându-și activitatea în acest sector, în cadrul Alcatel-Lucent Timișoara, în cadrul acestei societăți efectuând numeroase stagii de specializare în străinătate. Autorul a intrat în contact cu problemele exploatarei centralelor telefonice digitale atât la noi în țară, cât mai ales în țări unde

infrastructura este deficitară, iar instalațiile telefonice sunt expuse unor riscuri și perturbații majore.

Realizarea practică a acestei teze a fost posibilă în baza relațiilor de colaborare existente, în cadrul unor programe europene TEMPUS, COPERNICUS sau, mai nou 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 1998. Acest stagiu a permis și o bună documentare bibliografică privind problematica varistoarelor pe bază de ZnO și a echipamentelor care le înglobează.

Capitolul II Supratensiunile și echipamentele de protecție împotriva acestora

II.1. Generalități privind supratensiunile din rețelele de alimentare cu energie electrică și de telecomunicații

Prin supratensiune se înțelege orice creștere a tensiunii specifice de funcționare, peste valoarea maximă a tensiunii de serviciu, indiferent de valoare și de durată.

Fiecare piesă electrică sau electronică, fiecare dispozitiv, aparat, echipament sau instalație electrică sunt concepute să opereze la o anumită tensiune nominală, ceea ce corespunde unui anumit nivel de izolație. Pe durata funcționării, el este alimentat la o tensiune de serviciu, apropiată foarte mult de tensiunea nominală.

Supratensiunile pot conduce la solicitări anormale ale izolațiilor tuturor componentelor rețelei electrice de alimentare (izolatori ai rețelei, transformatoare, întreruptoare, și alte aparate și echipamente din stațiile electrice), sau ai rețelei electrice de telecomunicații, iar în lipsa unor mijloace de protecție adecvate, pot ajunge chiar până la terminale, cu consecințe imprevizibile asupra echipamentelor consumatorilor sau abonaților conectați la rețea, asupra vieții sau sănătății operatorilor umani.

Cele mai grave consecințe ale supratensiunilor sunt:

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

În Figura 2.1 este prezentată o analiză statistică a principalelor cauze ale avariilor din rețelele electrice [60], realizată ca urmare a unui studiu a cca. 9600 de asemenea incidente.

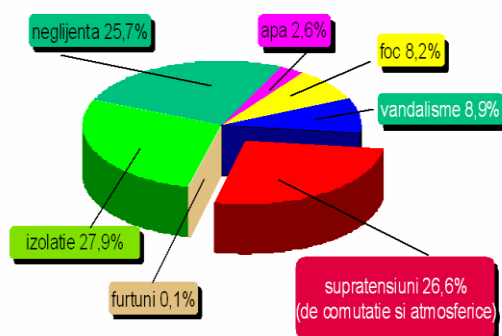


Figura 2.1: Repartiția cauzelor principale ale defecțiunilor din sistemul electroenergetic.

Studiul a fost efectuat de către firma DEHN, pentru situația rețelelor din Germania. În România credem că repartiția este modificată; neglijența, furturile, vandalismele și alte asemenea cauze au o pondere ceva mai mare. Și supratensiunile intervin cu un procentaj mai mare, deoarece țara noastră are un indice keraunic (numărul de zile cu tunete) superior mediei europene, iar echipamentele de protecție sunt învechite sau lipsesc. Foarte puține rețele din România au echipamentele adecvate pentru protecție împotriva supratensiunilor

Consumatorii cei mai sensibili la supratensiuni sunt, în general, cei electronici, cum ar fi aparatura TV-video, audio Hi-Fi, tehnica de calcul, aparatele electrocasnice, aparatura de măsurare, automatizare și control, tehnica medicală, centralele și posturile de telecomunicații etc. Aceștia sunt consumatorii casnici având și prețul cel mai ridicat. În egală măsură, aceștia sunt consumatorii cei mai frecvent afectați atât de supratensiuni, cât și de lipsa alimentării. Nici consumatorii industriali nu sunt feriți de consecințele acestor defecțiuni, care conduc la avarii importante, întreruperile în alimentarea cu electricitate cauzate de supratensiuni producând și mari pierderi financiare sau distrugerii ireversibile ale mijloacelor de producție. Pentru a înlătura efectele supratensiunilor se cunosc două direcții [21]:

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

Apariția unor supratensiuni periculoase într-un anumit punct este o problemă de probabilitate. Există posibilitatea ca protecțiile să lipsească și să nu se întâmple nimic, sau poate exista numai o parte din sistemul de protecție recomandat (care să fie suficient) sau poate exista sistemul complet, fără a avea parte de supratensiuni. 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;

Supratensiunile pot apărea în orice rețea electrică, 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 final nu trebuie să fie afectat de aceste supratensiuni.

Conceperea, proiectarea și execuția unor echipamente eficiente de protecție împotriva supratensiunilor reprezintă o preocupare constantă a specialiștilor care lucrează în domeniul rețelelor, aparatelor și echipamentelor electrice și nu numai.

În cadrul preocupărilor generale și globale de a asigura calitatea serviciilor de furnizare a energiei electrice dar și a serviciilor de telecomunicații prin metode electromagnetice, pe plan internațional a fost definit un concept extrem de larg denumit compatibilitate electromagnetică. Acesta include toate categoriile de perturbații electromagnetice pe care receptoarele electrice le pot emite în funcționarea lor sau la care sunt supuse după conectarea lor la o rețea aflată în funcțiune [60].

18 Supratensiunile și echipamentele de protecție împotriva acestora - 2

Pentru toate categoriile de receptoare electrice au fost definiți parametri de emisii și cei referitori la factorii poluanți din punct de vedere electromagnetic și, respectiv, parametri care definesc imunitatea receptoarelor la perturbațiile electromagnetice exterioare. Din acest punct de vedere, echipamentele de protecție împotriva supratensiunilor pot fi considerate ca elemente de reducere a poluării electromagnetice.

Capitolele principale ale CEM sunt următoarele:

- Interferența de Joasă Frecvență =IJF;
- Impulsuri Electromagnetice =IEM;
 - Impulsuri Electromagnetice de Trăsnet = IEMT (descărcarea atmosferică);
 - Impulsuri Electromagnetice Nucleare = IEMN (fenomene nucleare);
- Defecțiuni electrostatice =DES;
- Interferența de Frecvență Radio = IFE.

Trăsnetele, prin câmpurile electromagnetice puternice, și curentul de trăsnet care însoțesc descărcarea electrică provoacă clădirilor civile și industriale, rețelelor electrice de alimentare cu energie electrică, și, respectiv, receptoarelor electrice, pagube însemnate.

Definirea reglementărilor privind emisia și imunitatea la poluarea electromagnetică degrevează producătorii de echipamente electronice sensibile de grija (și costurile) aferente unor protecții împotriva supratensiunilor care vin dinspre rețea, această îndatorire revenind exclusiv echipamentelor de protecție. La ora actuală, pe plan mondial, aceste chestiuni sunt standardizate.

Supratensiunile din rețelele electrice pot fi clasificate, în primul rând, după originea și locația lor [69],[16] în:

♦ *supratensiuni interne* (care depind de factorii interni ai rețelei);

♦ *supratensiuni externe* (care nu sunt cauzate de factori interni ai rețelei);

Supratensiunile interne sunt cauzate de procesele tranzitorii care apar la comutație, ca urmare a variației rapide a parametrilor rețelei. Pot fi clasificate în:

a) *supratensiuni temporare* cauzate de:

- ♦ 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 impedanțe 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 și pot fi:

- a) *directe* (descărcarea electrică sub formă de trăsnet lovește direct linia);
- b) *indirecte* (descărcarea lovește un stâlp sau un conductor de gardă și afectează linia prin cuplaj electric).

Referitor la durata de aplicare a supratensiunilor se poate prezenta următoarea clasificare, diferită de cea anterioară [9],[10]:

- ◆ *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 μ s);
- ◆ *supratensiuni atmosferice* (între 3 și 10 μ 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.

Supratensiunile temporare pot fi la rândul lor clasificate [9],[10],[11] în:

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

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

Supratensiunile interne [9],[10],[11] pot fi clasificate în supratensiuni:

- de comutație;
- de rezonanță.

Supratensiunile de durată [9],[10],[11] se pot clasifica în:

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

Supratensiunile externe (atmosferice) [9],[10].

Sunt cele mai violente solicitări ale rețelelor și echipamentelor electrice (excepând impulsul nuclear electromagnetic). 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 [9]. 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 (trăsnete). Practic există două tipuri de trăsnete, 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 [79]. În cazul rețelelor de medie tensiune, valoarea supratensiunilor atmosferice poate depăși de 10 ori tensiunea nominală a rețelei.

Tabelul 2.1. prezintă tensiunile induse pe liniile electrice de către loviturile directe de trăsnet produse la 100 m, 1 km și 10 km de tronsonul analizat [60].

Distanța față de lovitura de trăsnet [km]	Câmpul electric [V/m]	Tensiunea indusă într-un cablu de 1 m [V]
10	110	20
1	1100	200
0,1	11000	2000

Tabelul 2.1. Efectele loviturilor de trăsnet indirecte.

Din tabelul de mai sus se remarcă efectele deosebit de grave pe care le au descărcările electrice în apropierea instalațiilor prin tensiunile pe care le induc în circuitele electrice. În rețelele de medie tensiune, efectele trăsnetelor sunt cel mai ușor de observat, fiecare furtună însoțită de descărcări electrice provoacă ieșirea din funcțiune a unui număr impresionant de linii electrice de medie tensiune care sunt declanșate sub acțiunea protecțiilor maxime de curent.

Protecțiile de joasă tensiune acționează ca urmare a conturnării izolației sau, de cele mai multe ori, prin intrarea în conducție a descărcătoarelor montate în LEA. 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 [80] 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. Armamentul de tip electromagnetic poate scoate temporar (sau permanent) din funcțiune infrastructura de alimentare cu energie electrică și telecomunicații din teritoriul atacat. Această categorie de armament nuclear de mică putere nu este reglementată de tratatele internaționale și a fost utilizată cu succes în ultimii ani. În urma exploziilor nucleare în spațiul atmosferic sau extraatmosferic se induce, datorită efectului Compton în principal, 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). Testele nucleare din Deșertul Nevada, din anii 1940-1950 au lăsat orașul luminilor Las Vegas în beznă, chiar dacă era localizat la peste 200 km de poligonul de testare. Chiar dacă exploziile nucleare la suprafață și în spațiul extraatmosferic sunt actualmente interzise prin tratate internaționale, pericolul "terorismului electromagnetic" rămâne [82].

Problema impulsurilor accidentale de tensiune se pune și mai acut în situația rețelelor de telecomunicații, mult mai sensibile decât cele de transport și distribuție.

Aceste sisteme de telecomunicație trebuie protejate și pe partea de alimentare cu electricitate, care, în general, este preluată din rețeaua publică. Mărimea supratensiunilor, indiferent de natura lor, este dată în unități relative (u.r.).

Aceasta se definește ca: $u.r. = \sqrt{2} \cdot \frac{U_m}{\sqrt{3}}$, unde U_m este valoarea efectivă a

tensiunii nominale între faze (de linie), la funcționare în regim permanent [93].

Practic, din punct de vedere al proiectantului de echipamente de protecție contra supratensiunilor și referindu-ne numai la criteriile amplitudine și durată de aplicare [93], [46], [47], [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 μ 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 μ s);
- *supratensiuni temporare* (amplitudine redusă la 1,7 u.r., dar durată de aplicare de ordinul secundelor).

Scenariile de apariție a supratensiunilor în situația unei clădiri sunt exemplificate în Figura 2.2 [60].

Scenarii de apariție a supratensiunilor atmosferice

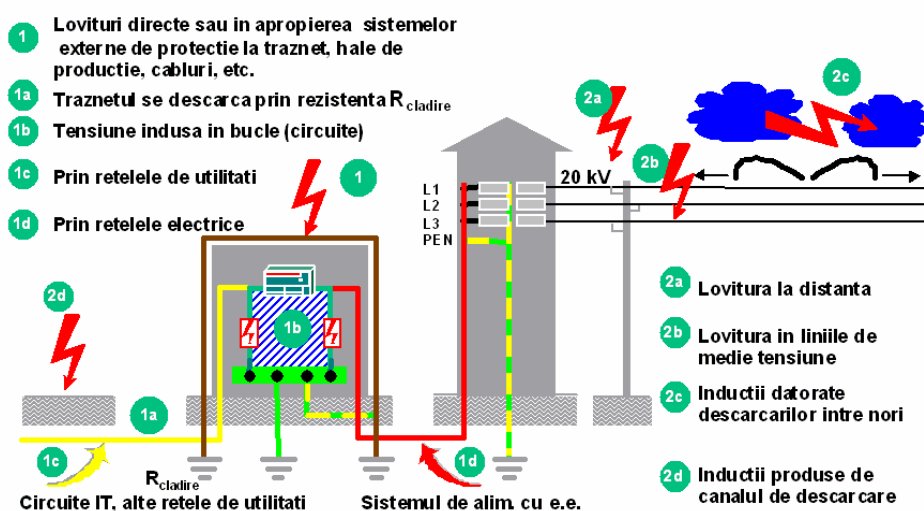


Figura 2.2 Supratensiunile aplicate unei clădiri

II.2. Standarde specifice pentru echipamentele de protecție împotriva supratensiunilor

II.2.1. Impulsuri standardizate de tensiune

Pentru testarea izolațiilor echipamentelor electrice în regim de impuls, se utilizează forme de undă standardizate [91], [92], care încearcă să modeleze a supratensiunilor din rețelele electrice, pentru toate domeniile de tensiune.

Aceste impulsuri standardizate sunt:

- pentru tensiune: impulsul de tensiune $1.2/50 \mu\text{s}$;
- pentru curent: impulsul de curent $8/20 \mu\text{s}$ sau $10/350 \mu\text{s}$.

Cele două unde de impuls standardizate sunt prezentate în Figura 2.3.

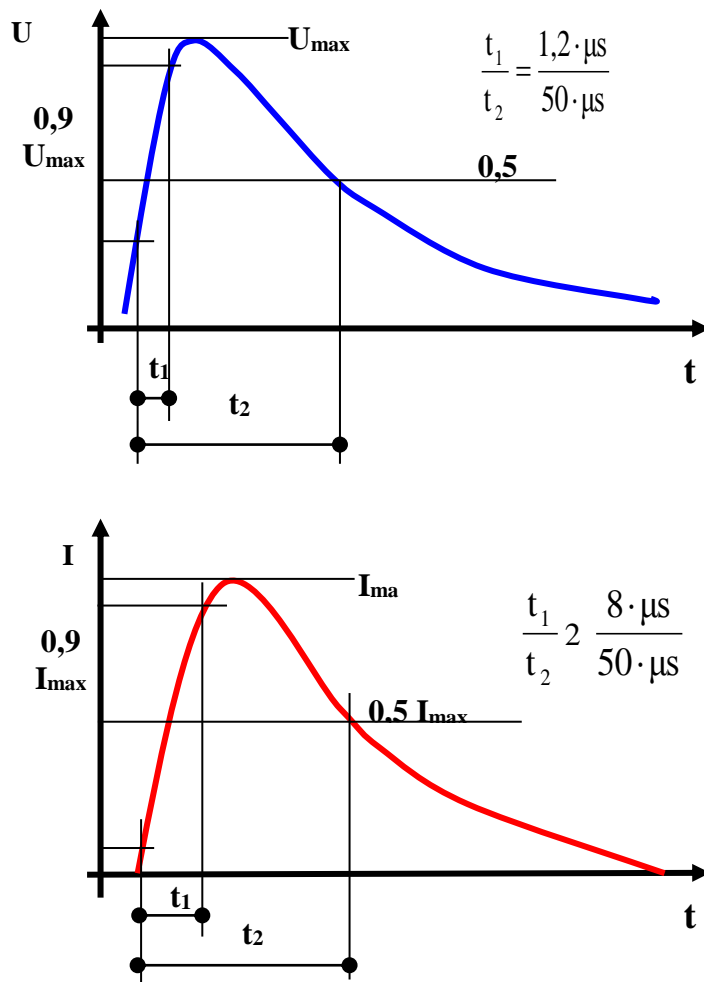


Figura 2.3: Forme de undă standardizate.

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 [86], [81]. 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 μs, dar având raportul 10/1000 μs, 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.

Cele trei unde de curent care simulează lovitura de trăsnet, în domeniul aplicațiilor la joasă tensiune, împreună cu standardele aferente sunt sintetizate în Figura 2.4 [60]. Așa cum am stabilit anterior, de exemplu, numărul 10 oferă panta curbei = di/dt, iar 350 oferă timpul de înjumătățire, în microsecunde.

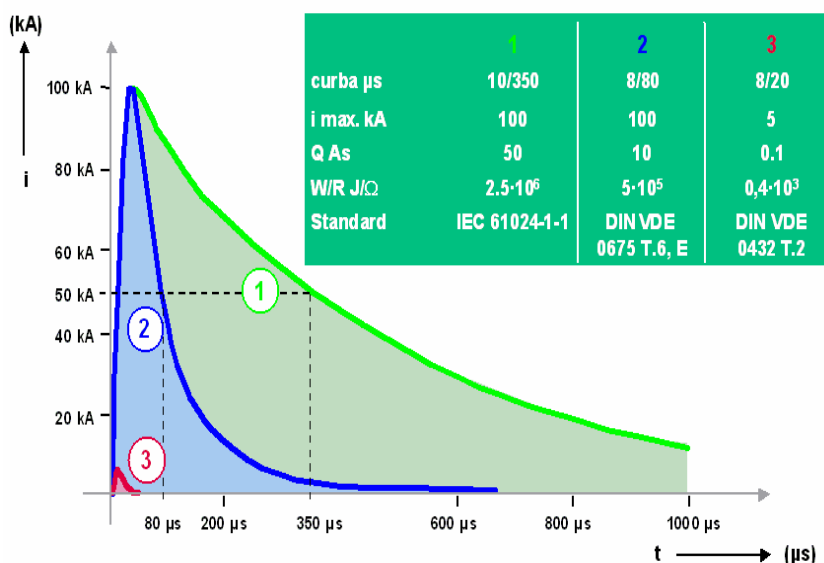


Figura 2.4. Analiza comparativă a impulsurilor de curent.

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 [90], după examinarea a mai multor oscilograme ale unor supratensiuni oscilatorii,

un nou tip de formă de undă, denumită $0,5\mu\text{s} - 100\text{ kHz}$. Această formă de undă este prezentată în Figura 2.5. :

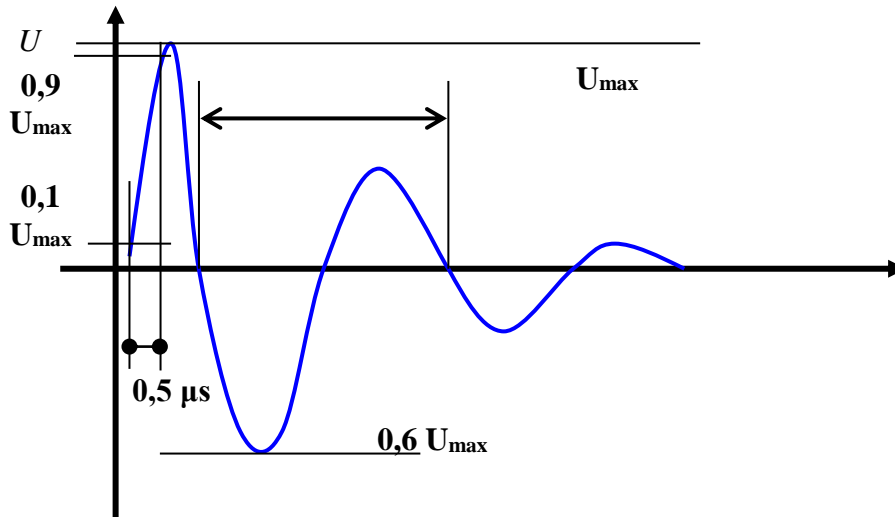


Figura 2.5: Unda normalizată de tensiune $0,5\mu\text{s} - 100$

Această undă are un front foarte rapid de $0,5\mu\text{s}$, urmat de o oscilație rapidă 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) [92], acest impuls de curent este prezentat în Figura 2.6 Este utilizat pentru estimarea performanțelor energetice ale varistoarelor pe bază de ZnO.

Durata convențională a frontului este de maximum $0,1\text{ ms}$. 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 $0,2\text{ ms}$ și de maximum 2 ms . În practică există numeroase alte tipuri de forme de undă folosite încercarea aparatelor și echipamentelor electrice. S-au prezentat doar 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.

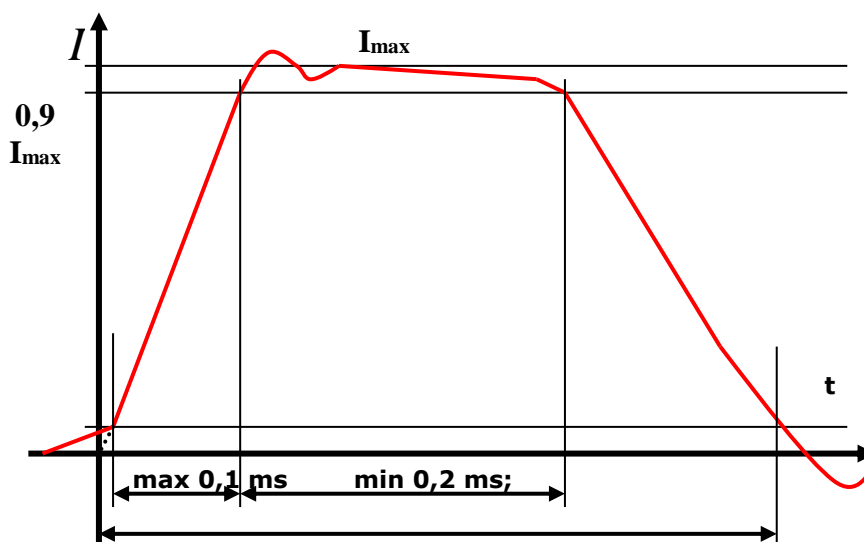


Figura 2.6: Formă de undă de șoc în curent rectangulară.

Și în rețelele de telecomunicații, care au nivele de tensiune mult mai mici, pot apărea supratensiuni cauzate de [82]:

- contact 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.2.2. Mărimi specifice standardizate

Pentru a putea dimensiona sau alege un echipament de protecție împotriva supratensiunilor și pentru a-l putea integra într-un sistem 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, măsurile și terminologia europeană, care sunt, sau unele, probabil, vor fi adoptate în viitor și de România, mai ales ca urmare a aderării la Uniunea Europeană. Toți parametrii la care ne vom referi în continuare sunt amplu descriși în normele UTE. NFC 61740 [89] și CEI 664-1980 [91]. Aceștia sunt dați ca și date de catalog pentru fiecare tip de echipament de protecție împotriva supratensiunilor.

Acești parametrii sunt [89], [93]:

- U_N – tensiunea de prag a varistorului (descărcătorului), reprezintă tensiunea continuă măsurată la bornele echipamentului de protecție la supratensiuni în mod convențional cu referire la un curent de 1 mA, în [V curent continuu]. Fabricantul echipamentului de protecție la supratensiuni 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 echipamentului de protecție la supratensiuni, 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 echipamentului de protecție la supratensiuni, 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 echipamentului de protecție la supratensiuni, 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 μs , de amplitudine dată.
- U_c – tensiunea reziduală dată de echipamentul de protecție la supratensiuni, 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 μs , utilizat pentru testarea echipamentului de protecție la supratensiuni. Pentru aplicațiile de joasă tensiune este de 100 A, conform CECC 42000 Test C2.1;
- I_{max} – curentul maxim al echipamentului de protecție la supratensiuni, reprezintă valoarea de vârf, dată de constructor, a unei impuls de curent, tip 8/20 μs , 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 echipamentul de protecție la supratensiuni atunci când este alimentat cu tensiunea nominală U_n , având în situația varistoarelor pe bază de ZnO o altă accepțiune decât în cazul descărcătoarelor cu eclatoare, având o valoare mai mică de 100 μA pentru aplicațiile la joasă tensiune unde $U_n = 220-230$ Vef.;
- N_p – nivelul de protecție, parametru ce caracterizează performanțele protecției 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 $t_1/t_2 = 1,2/50 \mu\text{s}$;
- 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 echipamentul de protecție la supratensiuni, definit prin tensiunea de ținere la șoc, ce corespunde tensiunii de conturare a izolației instalației la unda de tensiune $1,2/50 \mu\text{s}$, în [V];

Nivelul de izolație **N_i** este o caracteristică a izolației care trebuie protejată. Nivelul de protecție **N_p** este un parametru care caracterizează performanțele protecției și este fixat de către utilizator, corespunzător unui grad de securitate dorit. În general, coeficientul de siguranță, definit ca raportul dintre **N_i** și **N_p** are valori cuprinse între 1,1 și 1,2 [21]. În plus, putem defini un factor de calitate al echipamentului de protecție la supratensiuni, care reprezintă raportul dintre tensiunea reziduală la **I_n** și tensiunea de prag:

$$Q = \frac{U_c}{U_N} \quad (2.2)$$

Acest factor furnizează informații despre calitatea echipamentului de protecție la supratensiuni. Performanțele unui varistor (descărcător) sunt cu atât mai bune cu cât raportul dintre cele două mărimi este mai apropiat de unitate. În mod normal, acest raport este între 1,5 și 2,5.

Fenomenul de ambalare termică apare dacă, după o funcționare de durată care a produs o anumită încălzire a echipamentului de protecție la supratensiuni, curentul care îl traversează crește în timp atunci când varistorul este alimentat cu tensiunea de serviciu, în condiții neschimbate de mediu. Poate conduce la distrugerea echipamentului de protecție la supratensiuni.

Cuantificarea posibilității apariției fenomenului de ambalare termică este făcută prin coeficientul de utilizare **C**, exprimat ca raportul dintre tensiunea nominală a rețelei, ca amplitudine ($= 230 \times 1,41$) și cea de prag a varistorului (echipamentului de protecție la supratensiuni) Se poate exprima și în funcție de valoarea efectivă a tensiunii nominale, anume **U_n**:

$$C = \frac{U_{n\max}}{U_N} \quad (2.3)$$

În condiții ideale de asigurare a răcirii de protecție la supratensiuni se poate obține un coeficient de utilizare de până la 0,8, fără riscul apariției ambalării termice. În mod normal, acest coeficient are valori în jurul lui 0,5. Valoarea ideală a acestui coeficient este de 1, adică varistorul (descărcătorul) se "deschide" la cea mai mică creștere a tensiunii.

În Figura 2.7 este prezentată o ierarhizare a tuturor acestor tensiuni:

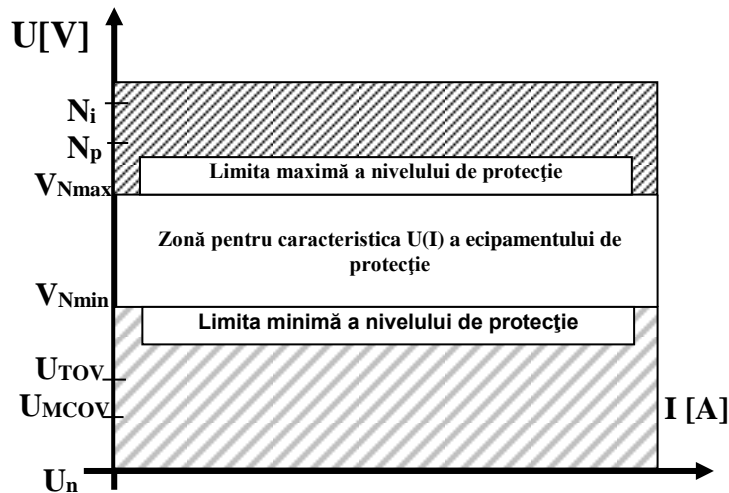


Figura 2.7: Corelarea nivelurilor de tensiune.

Pentru a avea putea vorbi de o protecție eficientă este necesar, în mod ideal, ca tensiunea U_r a descărcătorului să fie mai mică decât tensiunea U_{TOV} , impusă de instalația de protejat, aceasta din considerente de protecție la supratensiuni temporare. La fel, U_c a descărcătorului trebuie să fie mai mică decât U_{MCOV} impusă de instalația de protejat, pentru a asigura o protecție eficientă la supratensiunile de durată. La limită, putem considera perechile de tensiuni ca egale.

Raportul U_r / U_c este în general 1,25 pentru majoritatea varistoarelor (descărcătoarelor). Pentru instalațiile electrice, raportul U_{TOV} / U_{MCOV} are valori ușor mai mari.

Mulți fabricanți de echipamente de protecție la supratensiuni introduc ca și date de catalog mărimile:

- U_{ref} tensiunea de referință;
- I_{ref} curentul de referință;

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 [82].

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 μ s;
 - Undă de impuls de curent 10/1000 μ s;
 - Undă tip treaptă de impuls, cu durata de 2 ms;
- Capacitatea electrică, în [pF], în regim tranzitoriu, la frecvența de 1kHz.

Tot în categoria datelor furnizate de către fabricantul de echipamente de protecție împotriva supratensiunilor 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 .

Standardele internaționale vizează în mod direct domeniul de IT și telecomunicații, deoarece aceste echipamente sunt extrem de sensibile la impulsurile electrice. În România, cel mai utilizat normativ în acest domeniu este I 7-98 [3]. Tratarea problemelor privind echipamentele IT este realizată sumar, existând o singură recomandare, la art. 4.4.1., anume: „Protecția împotriva supratensiunilor se va face, după caz, prin măsuri de amplasare a instalațiilor astfel încât să se evite pericolul ce ar putea interveni în timp datorită îmbătrânirii izolațiilor sau altor cauze și prin aparate limitatoare de tensiune (de ex. releu maximal de tensiune)” [3]. Alegerea și utilizarea limitatoarelor de tensiune se va face respectându-se prevederile din standardul CEI 664 care a fost adoptat cu modificări ca standard european HD 625.1 S1:1996 și preluat apoi ca standard românesc SR HD 625.1 S1: 2001 (fiind armonizat sub directiva de joasă tensiune): Coordonarea izolației echipamentelor în rețelele de joasă tensiune. Partea 1: Principii, prescripții și încercări [3].

În normativul I 20-2000, care se referă la protecția clădirilor, în capitolul 3, subcapitolul 3.12, sunt date câteva prescripții privind protecția instalațiilor AMC cu circuite electronice pentru prelucrarea sau transmiterea informației [3]:

"În instalațiile respective se recomandă să se ia în afara protecției la supratensiuni prevăzută de producătorii echipamentelor sau aparatelor și următoarele măsuri:

- aparatele se ecranează sau se aleg de tip cu ecran împotriva influențelor inductive și capacitive;
- se folosesc cabluri și conducte cu ecran metalic, poduri metalice pentru pozarea cablurilor electrice, iar armăturile cablurilor se leagă electric și continuu între ele;
- între părțile active ale instalațiilor electrice și priza de pământ se intercalează aparate de protecție la supratensiuni.
- în afara acestor măsuri se aplică și acelea prevăzute în normele specifice pentru instalarea și exploatarea echipamentelor și aparatelor respective sau în instrucțiunile producătorilor acestora."

Ambele normative conțin formulări extrem de generale, incomplete și inadecvate cerințelor și tehnologiilor actuale. Chiar și după revizuirea acestora, în perioada 2002-2003, ele rămân în continuare deficitare.

Prevederile acestor normative sunt și confuze, și, uneori, chiar în contradicție cu legislația europeană. De exemplu, există un capitol intitulat *Protecția împotriva supratensiunilor de origine atmosferică sau de comutație (manevră)*, unde se precizează că: "trebuie asigurată protecția utilizatorilor și a bunurilor și continuitatea instalațiilor electrice împotriva tensiunilor care pot să apară la originea unei instalații ținându-se seama de indicele keraunic al zonei și de amplasamentul și caracteristicile dispozitivelor de protecție împotriva supratensiunilor"[3].

Exprimarea de mai sus lasă loc să se înțeleagă faptul că există o obligativitate a asigurării protecției, deși acest lucru nu este stipulat de reglementările europene decât în anumite condiții speciale.

În standardul SR CEI 61622+A1: 2000, „Evaluarea riscului de avariere asociat loviturilor de trăsnet”, există precizarea mai clară, conform căreia, "dacă avariile nu implică nici un element uman, cultural sau referitor la mediul înconjurător, proiectantul poate prevedea măsuri de protecție pe considerente strict economice, comparând costul anual al măsurilor de protecție cu costul anual previzibil în cazul pierderilor cauzate de trăsnet"[3].

O serie de standarde europene din domeniu au fost deja adoptate ca și standarde naționale, cum ar fi:

30 Supratensiunile și echipamentele de protecție împotriva acestora - 2

- SR CEI 61312-1: 2000, Protecția împotriva impulsului electromagnetic generat de trăsnet. Partea 1: Principii generale.
- SR CEI 61312-2: 2000, Protecția împotriva impulsului electromagnetic generat de trăsnet (IEMT). Partea 2: ecranarea structurilor, echipotențializarea în interiorul acestora și legarea la pământ.
- SR CEI 61312-4: 2000, Protecția împotriva impulsului electromagnetic generat de trăsnet. Partea 4: Protecția echipamentelor în structurile existente.

Observăm că, standardul IEC 61312-3 nu a fost adoptat până în prezent ca standard românesc (IEC 61312-3: Protection against lightning electromagnetic impulse-Part 3: Requirements of surge protective devices), deși, poate ar fi fost util.

Standardul SR CEI 61312-1: 2000 furnizează informații privitoare la proiectarea, realizarea, verificarea, întreținerea și probele instalațiilor eficiente de protecție a sistemelor informatice din interiorul structurilor sau de pe acestea. Echipamentul din care este formată instalația nu este tratat în acest standard. Totuși, acesta dă indicații de natură să permită cooperarea între realizatorul sistemului informatic și realizatorul instalației de protecție împotriva impulsului electromagnetic generat de trăsnet pentru a asigura eficacitatea optimă a protecției. Sunt definite zonele de protecție împotriva trăsnetului și sunt precizate condițiile referitoare la legarea la pământ, la ecranare, destinate reducerii efectelor datorate inducției și condiții referitoare la legăturile de echipotențializare (la nivelul limitelor zonelor de protecție împotriva trăsnetului și în interiorul volumului de protejat) [60].

Standardul SR CEI 61312-2: 2000 cuprinde metode de evaluare a eficacității dispozitivelor de ecranare împotriva impulsului electromagnetic generat la căderea trăsnetului în vecinătatea sau direct pe structurile care conțin echipamente informatice. De asemenea, sunt indicate reguli privind măsurile de echipotențializare din interiorul structurilor și metodele de legare la pământ pentru protecție împotriva impulsului electromagnetic generat de trăsnet. Sunt prezentate și prescripții referitoare la ecranele tridimensionale de tip grilă (în cazul unei lovituri de trăsnet apropiate, în cazul unei lovituri directe de trăsnet) și la sistemul de legare la pământ și de asigurare a echipotențializării. În anexe sunt prezentate relațiile de calcul pentru determinarea tensiunilor și curenților induși în buclele instalațiilor precum și calculul câmpului magnetic în interiorul ecranelor tip grilă [3].

Standardul SR CEI 61312-4: 2000 conține indicații pentru protecția echipamentelor de tehnologia informației împotriva impulsului electromagnetic generat de trăsnet în structurile existente și include metodele corespunzătoare pentru structurile noi. Lista verificărilor din capitolul 2 ajută la determinarea cazurilor specifice și la alegerea celor mai economice măsuri de protecție. Această listă facilitează analiza riscurilor și alegerea măsurilor de protecție corespunzătoare. Sunt prezentate măsuri de protecție determinate de instalația exterioară de protecție împotriva trăsnetului a structurii, măsuri de protecție determinate de modul de pozare al cablurilor electrice, măsuri de protecție determinate de instalația de alimentare cu energie electrică, măsuri de protecție în cazul în care în exterior sunt instalate antene și alte echipamente, precum și măsuri de protecție pe liniile de transmisie de date, telefonice și de măsurare și control localizate între clădiri [3].

Standardul IEC 61312-3, care încă nu este adoptat, conține prescripții referitoare la dispozitivele de protecție la supratensiuni (DPS) care urmează a fi instalate în conformitate cu zonele de protecție împotriva trăsnetului specificate în SR CEI 61312-1. Acest standard conține elemente fundamentale privind coordonarea între diferite DPS sau între DPS și instalația de protejat [3].

Chiar dacă aceste standarde sunt introduse (uneori confuz și incomplet) și în România, ele practic sunt necunoscute publicului și chiar specialiștilor, iar în mare parte acestea sunt neaplicate.

II.2.3. Clase standardizate de echipamente de protecție împotriva supratensiunilor (pentru aplicații la joasă tensiune)

Chiar dacă, pentru moment echipamentele de protecție la supratensiuni pentru aplicații la joasă tensiune sunt rar întâlnite în instalațiile electrice, 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.

O problemă, specifică instalațiilor electrice domestice la joasă tensiune în primul rând, este **coordonarea nivelului de protecție** în diferitele puncte ale instalației [33], [82], [88], [89].

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

În Figura 2.8. [60] 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.

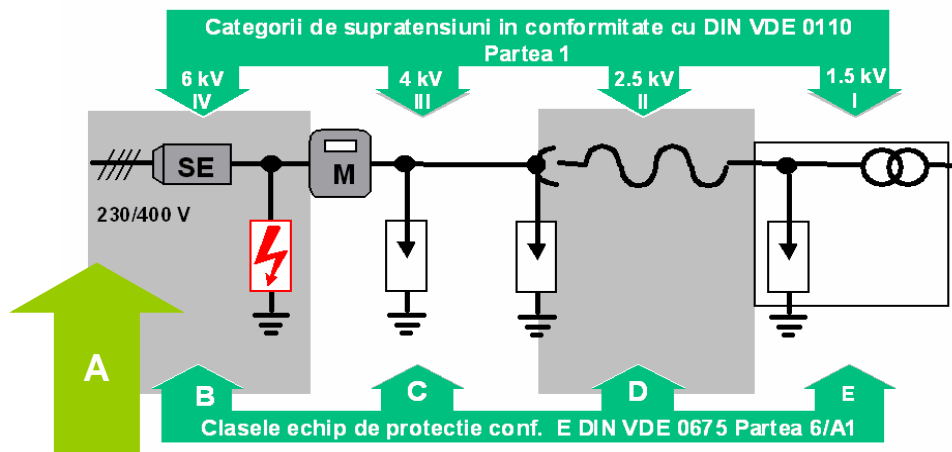


Figura 2.8. Clasele echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor.

Rezumând, putem spune că, din punct de vedere al rețelei de alimentare, există 4+1 clase de echipamente de protecție împotriva supratensiunilor, anume:

- clasa A - destinată montării în rețelele electrice de distribuție;
- clasa B - destinată montării în tablourile principale de distribuție ale clădirilor civile și industriale
- clasa C - destinată montării în tablourile secundare ale clădirilor ;

32 Supratensiunile și echipamentele de protecție împotriva acestora - 2

- clasa D - destinată protecției exterioare a receptoarelor electrice montându-se imediat în amonte de acestea, în apropierea punctului, sau chiar în punctul de racordare la circuitele electrice de alimentare.
- SUPPLEMENTAR, clasa E - sistem de protecție prin eclatori, care se realizează în interiorul unor aparate electrice sensibile.

Din clasificarea de mai sus se remarcă asocierile dintre clasa de scară largă și tipul curbei de încercare astfel: A 8/20 μ s, B 10/350 μ s, C 8/80 μ s, D 8/20 μ s

Se constată că încercarea cu forma de undă de curent 10/350 μ s este cea mai dură, deoarece variația curentului este rapidă, iar descărcarea durează de 4 ÷ 17,5 ori mai mult decât în cazul celorlalte clase. Și amplitudinea curentului la care trebuie să reziste descărcătoarele de clasă B este impresionantă, 100 kA. De fapt descărcătoarele de clasa B se numesc și descărcătoare de curent de trăsnet, datorită misiunii de a descărca cea mai mare parte a energiei care însoțește lovitura de trăsnet. O concluzie interesantă se desprinde din analiza parametrilor ceruți pentru descărcătorul de clasă A. Constatăm că acesta, în ceea ce privește curentul, are performanțe similare descărcătoarelor de clasă C, net inferioare celor cerute pentru clasa B. Descărcătoarele de clasă A,C și D sunt definite ca descărcătoare de supratensiuni. Informațiile culese despre descărcătoarele de clasa A sunt sumare.

Celelalte clase B,C,D, funcționează ca un sistem integrat și eficient de protecție la supratensiuni atmosferice și de comutație (STA/C).

Din figura 2.4 remarcăm cerințele privind supratensiunile admisibile și supratensiunile reziduale pentru clasele B,C,D de descărcătoare. Remarcăm că descărcătoarele de clasă B trebuie să gestioneze supratensiuni de până la 6 kV și să asigure în aval supratensiuni reziduale de maxim 4 kV. Descărcătoarele de clasa C admit supratensiuni de 4 kV și trebuie să asigure în aval supratensiuni reziduale de maxim 2,5 kV. Precizăm că descărcătoarele de clasa D sunt realizate într-o formă foarte mare de tipuri, adaptată constructiv pentru fiecare tip de rețea electrică, de forță sau de telecomunicații, care poate intra într-o clădire fiind de asemenea dimensionate pentru o gamă foarte largă de trepte de tensiuni reziduale corelate cu cerințe foarte diferite de imunitate ale diverselor tipuri de receptoare electrice .

Un aspect discutabil poate fi legat de locul în care este montat descărcătorul de tip B și, implicit, în sarcina cui cade responsabilitatea montării acestuia . Descărcătorul de clasă B se amplasează din locul din care se dorește asigurarea protecției unei instalații . De regulă, el se amplasează cât mai aproape de intrarea circuitelor electrice dintr-o clădire [60] .

Amplasarea descărcătoarelor rezultă în urma unei analize tehnico-economice, fiind în sine un rezultat al proiectării instalației electrice a clădirii respective. Dacă dorim ca descărcătoarele să protejeze inclusiv grupul de măsură, atunci în amonte de acestea trebuie amplasate alte descărcătoare . Prin urmare, în cazul imobilelor individuale, descărcătoarele de clasă B pot fi amplasate în blocul de măsură și protecție sau în primul tablou de distribuție din interiorul clădirii.

Furnizorul de energie electrică, după caz ,ar trebui să informeze clientul asupra existenței echipamentelor de protecție la STA/C astfel încât acesta să ia în deplină cunoștință de cauză decizia finanțării acestei protecții, sau să-și asume conștient riscurile lipsei acestor măsuri de protecție [60] .

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 modului;
- Curentul de scurgere nominal, în valoare de vârf, (1,5 sau 5 kA);

Trecerea curentului prin corpul uman poate periclita viața sau sănătatea persoanei respective. Prin urmare, sunt necesare măsuri de protecție împotriva șocurilor electrice în fiecare instalație electrică [60]. Aceste măsuri trebuie corelate cu cele legate de protecția împotriva supratensiunilor. Curenții de șoc pot apărea în timpul funcționării normale, când persoanele intră în contact cu părțile sub tensiune. Această situație poate fi prevenită folosind izolarea electrică, carcasarea de protecție, îngrădirile de protecție sau amplasamente. Aceste măsuri de protecție sunt numite "protecție împotriva atingerii directe".

Protecția împotriva șocurilor, în cazul unor defecțiuni, este numită și "protecție împotriva atingerii indirecte". De regulă, limitele tensiunii de atingere convenționale U_a sunt de 50 V în c.a. și de 120 V în c.c.

În circuite cu un curent nominal de până la 35 A și în circuite cu echipament portabil de clasă I, acționate în general manual, tensiunile de atingere mai mari, care cresc în cazul unor defecțiuni, trebuie oprite automat în 0,2 s. În circumstanțe de siguranță, pentru celelalte tipuri de rețele este permisă o durată de până la 5 s, pentru deconectarea automată [60].

Standardul internațional IEC 364-4-41 cuprinde măsurile de protecție împotriva atingerii indirecte folosind conductori de protecție. Dispozitivele de protecție trebuie să aibă asemenea caracteristici încât, dacă apare o defecțiune oriunde în instalație, alimentarea să fie întreruptă automat într-un timp specificat, sau să fie indicată defecțiunea.

Această măsură de protecție necesită coordonare între tipul sistemului de legare la pământ și caracteristicile conductorilor de protecție și ale dispozitivelor de protecție. Conform IEC 364-4-41: 1992, o rețea de distribuție de joasă tensiune este caracterizată, în general, de la sursa de alimentare la echipamentul terminal, de către:

- sistemul de legare la pământ al sursei de alimentare (de exemplu , terminalul de joasă tensiune al transformatorului rețelei locale) și,
- sistemul de legare la pământ al părților conductoare neizolate din instalațiile electrice ale consumatorilor .

În principal, există trei rețele de distribuție : rețeaua TN, rețeaua TT și rețeaua IT.

Semnificația literelor folosite este :

- T cu legare directă la pământ a unui punct al sursei de energie electrică (in mod normal , punctul neutru al secundarului transformatorului);
- I cu izolarea față de pământ a tuturor părților sub tensiune sau conectarea unui punct al sursei de alimentare la pământ printr-o impedanță;

A doua literă descrie sistemul de legare la pământ al părților conductoare neizolate .

- T masele instalației legate direct la pământ, independent de eventuala legare la pământ a unui punct al alimentării;
- N legătura directă a maselor la nulul de lucru al rețelei.

Următoarele litere **C** și **S** se referă la nulul de lucru și la nulul de protecție :

- C nulul de lucru este comun cu nulul de protecție
- S nulul de lucru și cel de protecție sunt separați unul de celălalt.

Există trei versiuni ale rețelelor TN: rețea TN-S, rețea TN-C și rețea TN-C-S.

Următoarele dispozitive de protecție pot fi instalate în diferite rețele:

- dispozitiv de protecție împotriva supracurentului;
- dispozitiv de protecție împotriva curentului rezidual;
- dispozitiv de supraveghere a izolației ;
- dispozitiv de protecție împotriva utilizării greșite a tensiunii .

34 Supratensiunile și echipamentele de protecție împotriva acestora - 2

Conform celor descrise anterior , trebuie corelat tipul sistemului de legare la pământ cu caracteristicile conductorilor de protecție și ale dispozitivelor de protecție. Următoarele dispozitive pot fi aplicate la diferite rețele:

Pentru rețea TN:

- dispozitiv de protecție împotriva supracurentului.
- dispozitiv de protecție împotriva curentului rezidual.

Pentru rețea TT:

- dispozitiv de protecție împotriva supracurentului ;
- dispozitiv de protecție împotriva curentului rezidual;
- dispozitiv de protecție împotriva utilizării greșite a tensiunii .

Pentru rețea IT:

- dispozitiv de protecție împotriva supracurentului;
- dispozitiv de protecție împotriva curentului rezidual;
- dispozitiv de supraveghere a izolației;
- dispozitiv de protecție împotriva utilizării greșite a tensiunii.

Măsurile de protecție a personalului trebuie să fie prioritare la realizarea instalațiilor electrice, inclusiv a celor destinate alimentării rețelelor de telecomunicații. Măsurile de protecție ale persoanelor nu trebuie întrerupte pe durata interacțiunii între DPS-uri (Dispozitivele de Protecție împotriva Supracurenților) și curenții cauzăți de trăsnet sau de supratensiune. Trebuie luată în considerare orice posibilitate de defectare a DPS-ului , deși acest lucru e aproape imposibil. Acest aspect este foarte important, deoarece DPS-urile de curenți de trăsnet și de supratensiune sunt întotdeauna legate la neutrul de protecție.

În practica internațională, decizia privind locul de amplasare al descărcătoarelor de clasa B este apanajul companiilor furnizoare de energie electrică. Vom detalia, în continuare, modul de instalare al acestor dispozitive în rețelele descrise mai sus [60].

Dispozitivele de protecție împotriva supracurentului și dispozitivele de protecție împotriva curentului rezidual sunt permise în cadrul rețelelor TN pentru "protecție împotriva atingerii directe" . Aceasta înseamnă că DPS-urile de curent de trăsnet și de supratensiune vor fi instalate doar pe partea de sarcină a dispozitivului de protecție pentru "protecție împotriva atingerii indirecte", cu funcția de a asigura protecția persoanelor și în cazul unei defecțiuni a DPS-ului.

La fixarea unui DPS de clasa B sau C pe partea de sarcina a dispozitivului de protecție împotriva curentului rezidual, trebuie luat în considerare faptul că supracurentul deviat spre conductorul de protecție PE este recunoscut de dispozitivul de protecție împotriva curentului rezidual ca un curent de scurgere la pământ. Prin urmare, circuitul este întrerupt de dispozitivul de protecție împotriva curentului rezidual. Mai mult , la instalarea DPS-urilor de clasă B trebuie presupus că dispozitivul de protecție împotriva curentului rezidual va fi distrus mecanic datorită solicitărilor electrodinamice asociate curentului de trăsnet. Aceasta ar conduce la dezactivarea măsurilor de protecție a persoanelor. Situația de mai sus trebuie evitată, astfel încât atât un DPS de clasă B, cât și un DPS de clasă C să poată fi instalate pe partea de forță a dispozitivului de protecție împotriva curentului rezidual. De aceea, la instalarea DPS-urilor de clasă B și C se pot folosi doar dispozitive de protecție împotriva supracurentului pentru "protecție împotriva atingerii indirecte". Instalarea unei siguranțe fuzibile auxiliare în ramificația de circuit a DPS-ului depinde de valoarea nominală a siguranței fuzibile auxiliare principale a rețelei și de siguranța auxiliara admisă pentru DPS. Pentru instalarea unui DPS de clasă B.C și D în rețelele TN, se utilizează următoarea relație cu privire

la tensiune nominală: $U_c \geq 1.1 \times U_N$. De unde rezultă că, în rețelele de 230/400 V [60], $U_c \geq 1.1 \times 230$ V; $U_c \geq 253$ V.

În general DPS-urile de clasă D sunt instalate pe partea de sarcină a dispozitivului de protecție împotriva curentului rezidual fiind proiectate pentru o capacitate nominală de descărcare de 1,5 kA.

Curenții de suprasarcină nu pot declanșa dispozitivele de protecție împotriva curentului rezidual cu temporizare (temporizarea întreruptorului diferențial de tip S, în conformitate cu IEC 1008-1) și nici nu le pot distruge mecanic.

II.3. Concluzii

Acest capitol conține o prezentare generală a problemelor legate de apariția și manifestarea supratensiunilor în rețelele electrice de alimentare cu energie electrică (de joasă tensiune) și de telecomunicații precum și o succintă enumerare a mijloacelor de protecție folosite pentru a limita consecințele produse de aceste fenomene.

În primul subcapitol s-a prezentat o clasificare a supratensiunilor după locul și durata lor de manifestare.

În al doilea subcapitol s-au descris principalele standarde și forme de undă standardizate care simulează undele de supratensiune, în conformitate cu normele europene și internaționale. În baza unei documentări bibliografice s-a realizat o analiză a situației aplicării acestor standarde în România. Una dintre concluziile fundamentale ale acestui studiu este necesitatea armonizării legislației din România precum și a standardelor autohtone cu practica europeană și internațională.

Tot în acest subcapitol s-au analizat sistemele de protecție contra supratensiunilor existente la ora actuală pentru domeniul de joasă tensiune și telecomunicații precum și principalele avantaje ale echipamentelor de protecție contra supratensiunilor cu varistoare pe bază de ZnO.

În continuare s-a făcut o referire la principalele mărimi utilizate în proiectarea și exploatarea echipamentelor de protecție contra supratensiunilor, așa cum sunt definite acestea în standardele europene și internaționale.

II.4. Contribuții personale

Acest capitol este un capitol introductiv, rezervat prezentării generale a problematicii studiate. Prin urmare, contribuțiile originale ale autorului sunt:

- Sinteza principalelor standarde europene și internaționale privind echipamentele de protecție contra supratensiunilor în instalațiile electrice de joasă tensiune, analiza unor standarde românești, în vederea armonizării normelor de specialitate din România cu cele din Uniunea Europeană;
- Sublinierea unor lacune ale legislației românești în domeniul protecției împotriva supratensiunilor, precum și elaborarea unor propuneri de îndepărtare a acestora;
- Prezentarea detaliată și obiectivă a soluțiilor tehnice existente în acest moment în domeniul protecției contra supratensiunilor în rețelele de joasă tensiune și de telecomunicații;

Capitolul III Implementarea varistoarelor pe bază de ZnO în schemele de protecție ale echipamentelor de telecomunicații

III.1. Probleme actuale existente în domeniul protecțiilor împotriva supratensiunilor pentru echipamentele de telecomunicații

În ultimii ani, odată cu liberalizarea piețelor de telecomunicații și a ridicării monopolurilor naționale ale vechilor companii de telecomunicații au apărut o mulțime de noi operatori de telefonie fixă și mobilă, care oferă soluții mai ieftine și servicii diversificate clienților de pe piață.

Până acum 4-5 ani, companiile de telecomunicații din întreaga lume aveau ca acționar principal statul și, cam peste tot în lume, ele erau privite ca având o însemnătate deosebită, fiind considerate chiar un pol de securitate. În prezent în majoritatea țărilor ele au ieșit de sub tutela guvernelor și au fost privatizate. Astfel, s-a ajuns la situația ca într-o țară să fie 4 sau 5 companii de telecomunicații importante și alte câteva zeci de companii mici.

Dacă ne gândim la România, monopolul pentru telefonie fixă a fost ridicat în 2003, iar de atunci, pe lângă operatorul național Romtelecom au apărut și s-au dezvoltat rapid încă 3 operatori mari de telefonie: RDS, UPC și ATLAS Telecom.

Noii operatori de pe piață au început investițiile masive în echipamente (NGN, VoIP, fibră optică, PCM...); echipamente pe care le plasau în locuri descoperite, în containere, pe acoperișul blocurilor sau în clădiri civile, fără a avea o protecție sporită împotriva supratensiunilor sau descărcărilor electrice.

În tendința de a acoperi o arie cât mai mare de clienți, centrele satelit, gateway-urile și toate echipamentele terminale au fost alimentate direct de la rețeaua civilă de tensiune. În zonele deșertice sau slab populate (Angola, Mauritania, Ghana, Yemen, ...etc.), echipamentele sunt de obicei concentrate în jurul unui site (oaze) cu alimentări prin cabluri de tensiune supraterane. Această soluție de alimentare le face, în mod evident, vulnerabile supratensiunilor atmosferice și nu numai. Mai nou, soluțiile VoIP (voice over IP) sau Voice Over Cable și NGN (next generation network - SIP, H248) au cucerit piața, ele fiind adoptate de majoritatea companiilor, soluțiile fiind ieftine și bazându-se pe rețeaua de IP deja existentă.

În ultimi 2-3 ani s-a observat tot mai mult că echipamentele sunt afectate de supratensiunile din rețeaua datorare trăsnetelor, care, la rândul lor, datorită schimbărilor climatice, sunt tot mai puternice. Avariile care apar la modulele de telecomunicație ca urmare a supratensiunilor atmosferice care se propagă pe linia de alimentare nu pot fi eliminate prin simpla utilizare a siguranțelor fuzibile sau a releelor de protecție, fie ele ultrarapide.

Defecțiunile ireversibile apărute pe plăcile cu componente electronice sunt de cele mai multe ori străpungeri dielectrice, fie ale plăcii propriu-zise, fie ale pieselor montate pe aceasta (condensatoare, semiconductori, circuite integrate etc.). Dacă rețeaua de alimentare dispune de echipamente de protecție adecvate, energia reziduală transportată de unda de șoc nu este excesiv de mare. În consecință, în majoritatea cazurilor, deteriorarea ireversibilă a componentelor electronice sensibile se produce ca urmare a expunerii materialelor la câmpuri electrice intense (străpungere dielectrică), și nu ca urmare a încălzirii excesive.

Străpungerea dielectrică este un fenomen extrem de violent, care constă în trecerea directă a curentului electric prin masa unui dielectric așezat între doi electrozi metalici la o anumită valoare a intensității câmpului electric exterior. Trecerea curentului prin dielectric are loc ca urmare a distrugerii rețelei dielectricilor solizi, descompunerii prin ionizare a dielectricilor lichizi sau ionizării în avalanșă a dielectricilor gazoși. Curentul I din circuitul dielectricului va fi limitat doar de parametrii sursei de alimentare. Tensiunea U_s se numește *tensiune de străpungere*. Raportul între tensiunea de străpungere U_s și distanța dintre electrozii între care este plasat dielectricul este *rigiditatea dielectrică*. Determinată în condiții date ea este o constantă de material [74].

$$E_s = \frac{U_s}{d} \left[\frac{\text{kV}_{ef}}{\text{m}} \right] \quad (3.1)$$

La câmpuri electrice intense (10^2 - 10^3 Kv/cm) se produce străpungerea dielectricilor solizi fie pe cale pur electrică, fie pe cale electrică și termică. Pentru înțelegerea procesului străpungerii, este convenabil ca cele două feluri de străpungere pur electrică și termică să fie considerate separat.

- a). **Străpungerea pur electrică** se realizează la solicitări de scurtă durată când dielectricul nu-și modifică temperatura sub acțiunea câmpului electric exterior.
- b). **Străpungerea termică** apare și se suprapune peste cea electrică dacă dielectricul se încălzește sub acțiunea câmpului electric (așa cum este totdeauna în exploatare). Deci tensiunea de străpungere termică este mai mică decât cea pur electrică. În proiectarea echipamentelor electrice sau electronice se consideră totdeauna tensiunea de străpungere termică.

În Figura 3.1 se poate vedea o placă convertizoare de tensiune afectată de trăsnet:

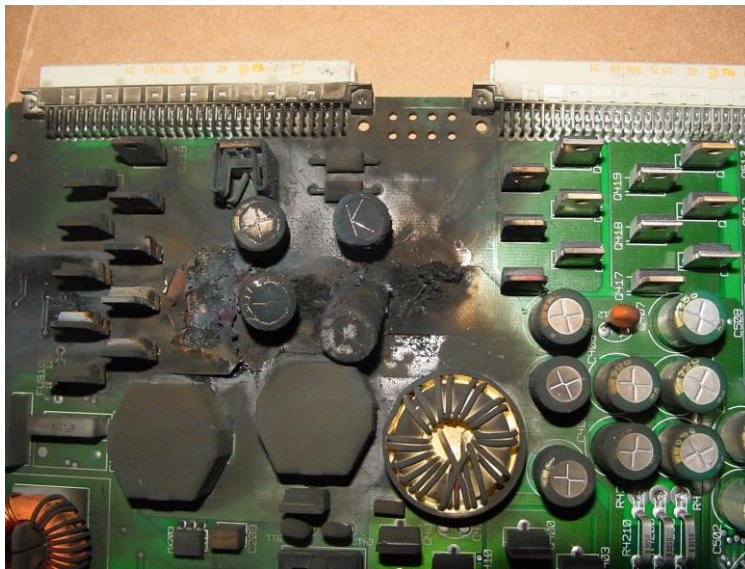


Figura 3.1: Placă electronică străpunsă la o lovitură de trăsnet

Indiferent de natura fizică a străpunerii materialelor electronice sensibile, acest fenomen se produce aproape instantaneu, în câteva zeci de nanosecunde, din momentul aplicării câmpului electric intens (supratensiunii cauzate de unda de șoc a loviturii de trăsnet). Lovitura de trăsnet, așa cum am arătat în capitolele anterioare, are o durată de câteva microsecunde, iar cele mai performante echipamente fuzibile au nevoie de 10^{-4} secunde pentru a acționa...Prin urmare, acestea sunt ineficiente în situația unei lovituri de trăsnet care este cu cca. 2 ordine de mărime mai rapidă decât fuzibilele, în condițiile în care străpungerea materialului dielectric este aproape instantanee.

Costul echipamentelor distruse de trăsnete nu este substanțial; producătorii fiind chiar bucuroși să raporteze o cifră tot mai mare de afaceri, problema constă de fapt în paralizarea comunicațiilor într-un anumit sector (zonă de abonați). Un singur centru satelit numeric de abonați poate deservi până la 10.000 de abonați; dacă ne gândim că de la un singur trăsnet 10.000 de abonați pot rămâne fără serviciu de date și telefonie, atunci ne dăm seama de importanța fenomenului. Intervenția de înlocuire a plăcilor distruse de trăsnete poate fi deseori o operație complicată și care necesită timp. În tot acest timp, abonații nu vor mai avea acces la serviciul de comunicații.

Deși majoritatea echipamentelor sunt realizate modular (pe bază de plăci înfipte într-un back-rack), în urma unei supratensiuni poate fi afectat și tot back-rack-ul. Prin back-rack se face legătura între toate plăcile din acel echipament, iar schimbarea lui este cea mai costisitoare operațiune. În figura de mai jos se poate observa cum un trăsnet a afectat și back-rack-ul echipamentului:

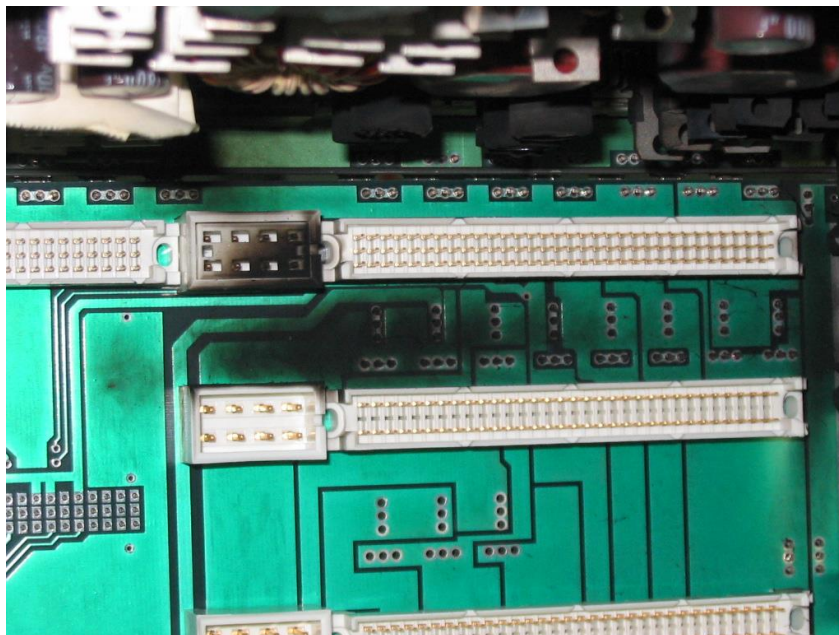


Figura 3.2: Back-rack distrus de un impuls electric

În aceste situații se simte tot mai des nevoia de o protecție suplimentară la supratensiuni, iar soluțiile nu pot fi complicate sau costisitoare; soluția propusă în aceasta lucrare este de folosii varistoarele ca element de protecție și filtrare,

varistoare alese (sau fabricate special în Laboratorul „Génie Electrique” al Universității PAUL SABATIER din Toulouse, actualmente LAPLACE Toulouse) special pentru aceste surse modulare de tensiune ale echipamentelor de telecomunicații.

Fără a greși, putem spune că pierderile cauzate de scoaterea din uz a centrului de comunicație ca urmare a reparațiilor necesare după apariția unei supratensiuni sunt uneori mai mari decât costul înlocuirii modulelor distruse.

O altă observație „cinică” pe care o putem face este că firmele producătoare de asemenea echipamente și aparate nu montează în interiorul acestora nici un dispozitiv de protecție, avariile aparaturii fiind surse suplimentare de venituri, fie din service, fie din achiziția unui nou aparat. Deci supratensiunile sunt o „mină de aur” pentru producătorii de echipamente electronice. Prin montarea unui singur varistor corect ales pe alimentarea acestora prețul final ar urca cu câteva zeci de eurocenți, pentru un aparat de mii de euro. Dar aparatul ar deveni prea fiabil...

Companiile de electricitate asigură un nivel grosier de protecție al consumatorului casnic sau similar împotriva supratensiunilor. Valorile reziduale ale șocurilor de tensiune pot depăși deseori 6000 V, pentru o banală priză de 230 Vef. Oricum, pentru astfel de incidente nu pot fi acționate în justiție.

Prin urmare, consumatorul este lăsat pradă intemperiilor (trăsnetelor...la propriu), de multe ori fără să intuiască, neavând cunoștințe de specialitate. În prize, sunt lăsate conectate, fără nici un fel de protecție, echipamente de zeci de mii de euro. Dacă totuși consumatorul conștientizează că la o lovitură de trăsnet aplicată rețelei de alimentare siguranța fuzibilă e prea lentă și că ar trebui să monteze o protecție specială, este descurajat de complexitatea acesteia și de prețul prohibitiv (de regulă consumatorul neavizat conștientizează acest lucru după un incident). Legislația română (și nici cea din multe țări UE) nu obligă consumatorul să monteze protecții la supratensiuni, deoarece daunele le suportă oricum numai acesta.

III.2. Posibilități de amplasare a echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor pentru sursele modulare de alimentare din domeniul telecomunicațiilor

Pentru început vom prezenta structura unei surse de alimentare modulară (SAM) neîntreruptibilă, destinată a alimenta o centrală telefonică digitală sau un centru satelit numeric distant [53]. Această sursă de alimentare modulară realizează:

- conversia energiei electrice;
- stocarea energiei electrice (în acumulatori);
- distribuirea energiei electrice în funcție de cerințe către echipamentele de telecomunicație.

Această sursă modulară preia energia de la o instalație monofazată sau trifazată (de la rețeaua publică), pe care o convertește în funcție de cerințele consumatorului. Poate oferi atât tensiune continuă stabilizată de 48 V, cât și tensiune alternativă de 230 V, în funcție de modulele montate pe back-rack.

Funcțiile principale ale acestei surse sunt:

- Conversia de tensiune alternativă în tensiune continuă (prin redresoare);
- Generarea unei tensiuni alternative de 230 V efectiv (prin invertoare), chiar și când alimentarea de la rețeaua publică a căzut temporar, pentru câțiva consumatori de mică putere;

40 Implementarea varistoarelor pe bază de ZnO în schemele de protecție - 3

- Stocarea energiei și asigurarea continuității în alimentare chiar și atunci când rețeaua publică de alimentare a căzut;
- Distribuirea tensiunii continue sau alternative prin surse separate protejate cu elemente fuzibile.

Schema bloc a acestei surse este prezentată în Figura 3.3. După cum se observă și din această figură, singurele elemente de protecție sunt fuzibilele (care, așa cum am mai precizat, oferă doar o protecție la supracurenți). La fel ca majoritatea surselor neîntreruptibile tip UPS (Uninterruptible Power Source) pentru aplicații la joasă tensiune, funcția de protecție la supratensiuni este neglijată. Nu vom realiza o descriere detaliată a sursei, ci numai o vedere de ansamblu a acesteia, scopul întregului demers fiind familiarizarea cu arhitectura și funcțiile acesteia, mai puțin cu problemele de concepție.

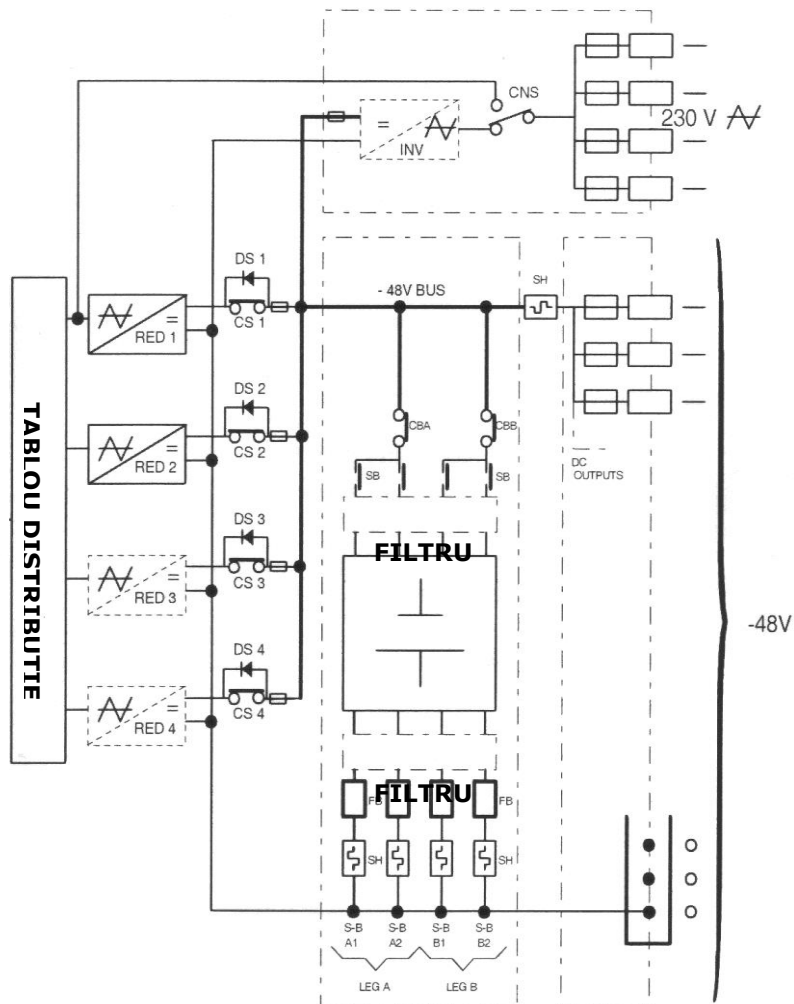


Figura 3.3: Arhitectura sursei de alimentare modulară

Notațiile din figură reprezintă:

CS:	Contactele comandabile la distanță;
DS:	Diodele de cuplare în paralel cu CS (protejează la supratensiunile de comutație);
CB:	Contactele comandabile la distanță pentru bornele A și B ale bateriei;
SB:	Contacte deconectare baterie;
SH:	Șunturi de măsurare pentru fiecare linie și pentru bara de -48 V;
CNS:	Comutatorul pentru back-up.

Ca elemente suplimentare de protecție sunt prevăzute declanșatoare pe fiecare întreruptor. Vom detalia, pe scurt, fiecare componentă a schemei sursei de alimentare modulată.

Funcția de redresor:

Este realizată prin intermediul a 2 sau 4 redresoare care pot furniza, în funcție de configurație, între 25 și 75 A.

Fiecare redresor dispune de o alimentare pe 400 V trifazat (pentru 75 A) și 230 V monofazat pentru 25 A, prin intermediul tabloului de distribuție, având o ieșire de 54 V efectiv, care va fi stabilizată la 48 V c.c. Redresorul este conceput ca un modul demontabil.

Funcția de invertor:

Este realizată de către un singur invertor. Acesta este conectat la bara de 48 V, furnizând o tensiune monofazată de 230 V efectiv, la frecvența de 50 sau 60 Hz, în funcție de zona de utilizare. Tensiunea este furnizată prin intermediul a 4 terminale prevăzute cu protecții tip fuzibil.

Funcția de acumulator:

Este realizată prin cuplarea unor baterii de acumulatori. Sistemul este alimentat pe două căi, A și B, fiecare fiind conectată la rack prin una sau două trasee.

S-a prevăzut și un filtru (care lipsește în cazul aplicațiilor localizate într-un container, unde bateriile sunt montate în afara șasiului principal (rack), în imediata vecinătate a instalației.

Funcția de control al temperaturii:

Temperatura ambiantă în partea superioară a rack-ului este monitorizată, la fel ca și temperatura în vecinătatea bateriilor, în scopul informării operatorului în caz de defecțiune.

Funcția de management al rack-ului

Este asigurată de către o unitate centrală de procesare care monitorizează și controlează sistemele de pe rack. Principalele funcții implementate sunt:

- monitorizarea și verificarea bateriilor și redresoarelor;
- monitorizarea întregului rack, incluzând nivelele de temperatură;
- dialogul cu utilizatorul.

Puterea absorbită de către acest tip de surse variază între 600 W și 20 kW, în funcție de regimul de operare, configurația și tipul sursei.

Observăm, așa cum am mai precizat, că nu există nici un fel de protecție la supratensiuni pe acest tip de surse de alimentare modulare. Evident, fiind

alimentate, în marea majoritate a cazurilor, de la rețeaua publică, ele sunt expuse riscurilor apariției de supratensiuni cauzate în primul rând de descărcările atmosferice, impulsurile electromagnetice, interferențe etc., dar și supratensiunilor de durată.

Locația cea mai favorabilă pentru montarea echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor este, în consecință, intrarea în sursa de alimentare, la interfața dintre rețeaua publică și sursă. Pentru a spori gradul de protecție al sursei electrice de alimentare modulară, se pot monta protecții și pe ieșirile de 48 V c.c. și 230 V c.a.

Modul de amplasare și tipul al acestor dispozitive electronice de protecție va fi detaliat în capitolele următoare. Aceste dispozitive nu fac parte din setul de accesorii propuse de către fabricant și nici nu se găsesc disponibile pe piață, având un scop dedicat. Alegere și testarea funcțională a acestor echipamente fac, de asemenea, obiectul prezentei lucrări, știut fiind că, pe lângă funcția de protecție la supratensiuni, aceste echipamente pot funcționa ca și filtre, asigurând o impedanță redusă pentru anumite frecvențe. Se va încerca și verificarea răspunsului modulului la anumite frecvențe perturbatoare, în scopul testării capacității de filtrare, deosebit de importantă în telecomunicații.

III.3. Soluții tehnice pentru sistemele de protecție împotriva supratensiunilor pentru echipamente de telecomunicații

Sistemele de telecomunicații (telefonie) au evoluat în ultimii ani, de la sistemele clasice tip POTS (Plain Old Telephone System), la ISDN (Integrated Services Digital Network), xDSL (Digital SubscriberLine), Ethernet, FTTC (Fiber to the Curb), FTTH (Fiber to the House) și multe altele.

Cu cât arhitectura și gradul de complexitate al acestora este mai mare și, indiferent de suportul de vehiculare al datelor (cupru sau fibră optică), aceste echipamente rămân vulnerabile la supratensiuni, atât pe partea de rețea de transmisie, cât și pe partea de convertoare, relee, centrale etc. În consecință, implementarea unor echipamente de protecție împotriva supratensiunilor este imperativă.

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 de telecomunicații s-au utilizat și se utilizează încă:

- protecții serie (filtre LC, disjunctoare, fuzibile);
- protecții paralele (eclatoare, diode supresoare și descărcătoare de toate tipurile).

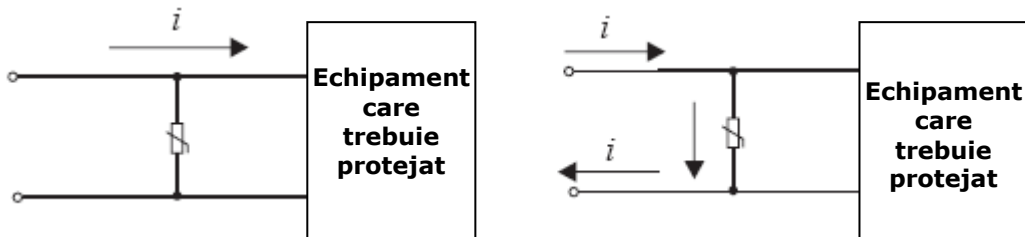
Protecțiile serie, indiferent de tipul lor, realizează întreruperea furnizării de semnal, fapt nedorit de către utilizator. În plus, permit apariția, chiar și pentru o perioadă scurtă de timp, a unei tensiuni ridicate la bornele utilizatorului.

O protecție eficientă a instalațiilor de telecomunicații 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 3.4.



a). în condiții normale

b). la supratensiuni

Figura 3.4: Principiul de funcționare a unei protecții paralele

În general, protecțiile serie sunt utilizate ca protecții la supracurenți, iar protecțiile paralele, ca protecții la supratensiuni. Practic, doar în situația utilizării releelor de tensiune maximală, putem vorbi de protecții serie. Cele două categorii de protecții sunt complementare și nu se exclud una pe alta.

În Figura 3.5. este prezentată o sinteză a principalelor tipuri de protecții utilizate în telecomunicații:

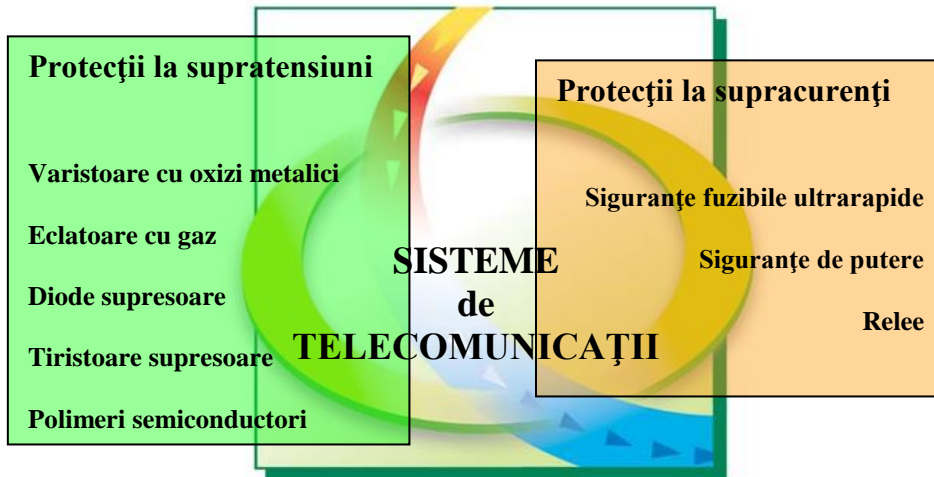


Figura 3.5: Sinteza principalelor tipuri de protecții din rețelele de telecomunicații

Cerințele unui sistem de paralel de protecție sunt [16], [64], [72]:

- 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, dar și în telecomunicații, amintim [74],[69],[16]:

- eclatoarele;
- descărcătoarele cu coarne (numai pe partea de alimentare);
- descărcătoarele tubulare cu fibră (numai pe partea de alimentare);
- 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** [69]. 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.

Sunt utilizate numai pe partea de conexiune cu rețeaua electrică și pentru aplicații la medie tensiune și mai puțin la joasă tensiune.

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**.

Realizarea unor protecții eficiente contra supratensiunilor în instalațiile de joasă tensiune și mai ales în domeniul consumatorilor casnici sau a aparaturii electronice (tehnică 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 (incluzând și rețelele de telecomunicații), la ora actuală, se utilizează, așa cum am mai exemplificat combinate sau singure următoarele tipuri de protecții paralele [21]:

- 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 (numai pe partea de alimentare);
- varistoare pe bază de ZnO.

Diodele sunt polarizate și pot fi utilizate doar în curent continuu. Se pot asocia două diode Zener pentru a obține o caracteristică simetrică ce ar permite utilizarea acestora și în regim alternativ. Alese corespunzător, aceste elemente pot asigura și protecția sistemelor de alimentare, dar și de telecomunicație.

Circuitele electronice sunt deseori distruse de supratensiuni tranzitorii generate chiar de circuit sau transmise din exterior prin rețea. Valoarea acestor supratensiuni poate varia de la câteva sute la mii de volți. Supratensiunile cele mai violente sunt mai puțin frecvente. De exemplu: pentru un circuit ce lucrează la o tensiune de 24V, deschiderea unui releu produce o supratensiune de ordinul 1kV timp de câteva milisecunde, ceea ce face ca punerea sub tensiune să producă o supratensiune de 100V timp de 50ms.

Componentele semiconductoare în special sunt vulnerabile la regimul tranzitoriu. Pentru protecția lor au fost aplicate mai multe soluții: asocieri rezistență-capacitate, diode Zener, eclatoare cu gaz, varistoare pe bază de oxid de zinc. Mai mulți parametrii (precum costul, dimensiunile, timpul de răspuns, posibilitatea de absorbție de energie) condiționează alegerea elementelor de protecție. Varistoarele pe bază de oxid de zinc par a fi bine adaptate cazurilor cele mai frecvente în care timpul de răspuns nu trebuie să fie mai mic de câteva nanosecunde, așa cum am explicat în capitolele anterioare.

III.4. Dispozitive de protecție împotriva supratensiunilor bazate pe varistoare cu oxizi metalici (varistoare tip ZnO)

Varistorul este o componentă electrică a cărei rezistență variază cu un parametru impus din exterior. Varistoare sunt considerate, oarecum incomplet, în practică, doar acele componente a căror rezistență variază cu inversa tensiunii aplicate. Varistorul este descris foarte bine de norma franceză NF C03-101 care îl definește ca fiind „rezistența de variabilitate intrinsecă neliniară ce depinde de tensiune”.

Aceste componente prezintă, așa cum am mai spus, din punct de vedere practic, un interes foarte mare pentru protecția circuitelor electrice contra supratensiunilor ultrarapide.

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. Acestea sunt reprezentate prin simbolul din Figura 3.6

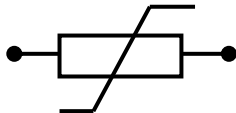


Figura 3.6:
Simbolul varistorului

Caracteristica statică curent-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].

Această caracteristică va fi prezentată în subcapitolul următor.

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 [46].

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. Cercetările din fosta U.R.S.S. au vizat tocmai protecția rețelelor de telecomunicații militare împotriva impulsului nuclear electromagnetic. Primele echipamente au apărut pe piață la începutul anilor '70, iar primul brevet de invenție în acest domeniu aparținând companiei japoneze Matsushita Electric Industrial Co., a fost acordat în 1968.

Majoritatea companiilor gigante din domeniul electrotehnic (ABB, Siemens, General Electric, Matsushita Electric etc.) au inclus în programele lor de fabricație asemenea echipamente [51], [52], 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.

În Figura 3.7. se prezintă, cu titlu de exemplu, gama de tipuri și dimensiuni de varistoare pentru aplicații la joasă tensiune produsă de către Varsi d.o.o. Slovenia.

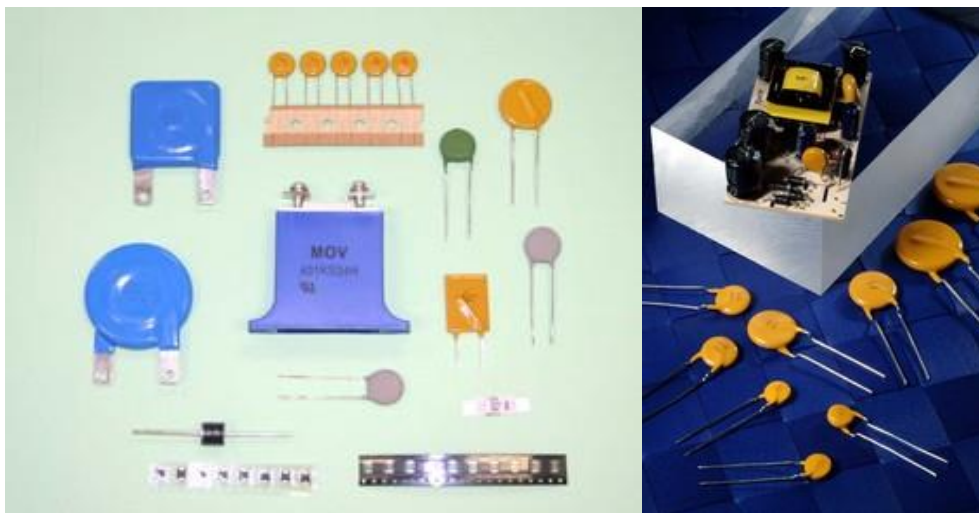


Figura 3.7: Varistoare pe bază de ZnO pentru aplicații la joasă tensiune

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 α (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 $E > 200 \text{ J/cm}^3$), 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], [79]:

- *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 (cel puțin teoretic) curentul în mod 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 situația utilizării acestora la înaltă tensiune.

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;
- 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.

Varistoarele pe bază de oxid de zinc pot fi considerate componente pasive relativ noi, deoarece comercializarea lor datează din anii 1970. ele aduc o soluție originală pentru problemele de protecție: modul lor de realizare, raportat la cel al componentelor pasive, permite obținerea unui material ale cărui proprietăți electrice sunt foarte apropiate de cele ale componentelor active.

III.4.1. Caracteristica statică curent-tensiune pentru un varistor pe bază de ZnO

Dependența neliniară dintre curentul (densitatea de curent) și tensiunea (intensitatea câmpului aplicat) la bornele varistorului este dată [8] de relația:

$$J = K \cdot E^a \quad (3.2)$$

unde:

- J este densitatea curentului 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;
- a 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 curentul care trece prin varistor și tensiunea aplicată:

$$I = B \cdot U^a \quad (3.3)$$

- I este curentul prin varistor [A];
- U este tensiunea aplicată la bornele varistorului [V];
- B este o altă constantă;
- a este coeficientul de neliniaritate;

Protecția rețelelor și echipamentelor este cu atât mai eficientă cu cât coeficientul de neliniaritate a are o valoare mai mare [99]. Spre deosebire de varistoarele cu SiC, la care $a = 3 - 6$, varistoarele cu ZnO au obișnuit un $a = 25$ până la 70 și un curent de scurgere mult mai scăzut decât celelalte [58].

Cele mai performante varistoare pot ajunge și la un $a = 200$.

Caracteristica curent-tensiune a unui varistor [16] este reprezentată în Figura 3.8. 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.

Valoarea coeficientului de neliniaritate caracterizează în totalitate eficacitatea protecției. De exemplu, pentru a disipa un supracurent I de 100A într-o rețea de 230V se utilizează un varistor a cărui tensiune de prag U_N este de 400V (U_N definită pentru un curent $I_f = 1mA$).

Supratensiunea reziduală la bornele elementului protejat, U_{rez} , va fi [2]:

$$U_{rez} = U_N(I / I_f)^{1/a}$$

unde: $U_{rez} \approx 587$ dacă $a = 30$

$$U_{rez} \approx 1005 \text{ dacă } a = 10.$$

Găsirea unui coeficient a mare a făcut obiectul unor lucrări importante. Însuși inventatorul, M. Matsuoka, a publicat în 1969 două tabele ce rezumau influența compoziției chimice, respectiv a tratamentului termic asupra neliniarității varistoarelor pe bază de oxid de zinc.

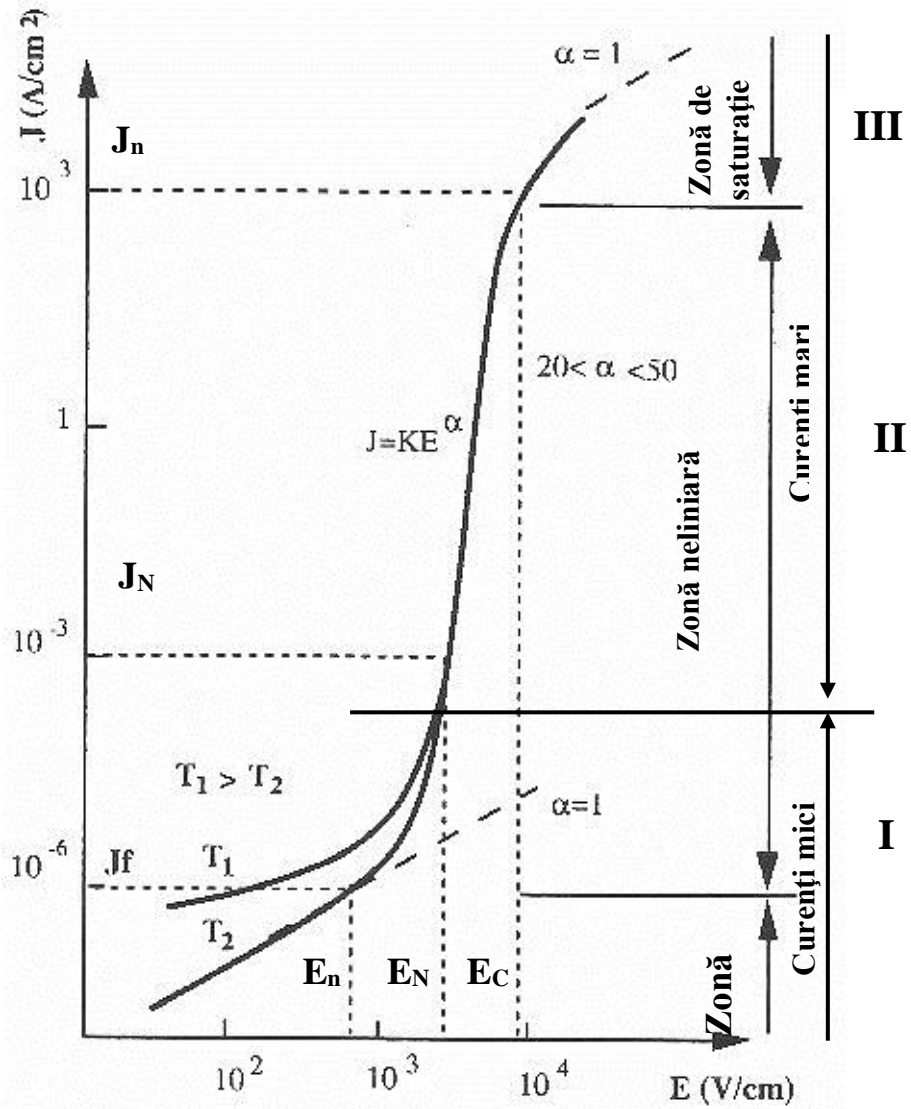


Figura 3.8: Caracteristica J(E) a unui varistor cu ZnO

Caracteristica curent-tensiune prezintă trei zone importante, fiecare fiind caracterizată prin proprietăți de conducție particulare [8],[16], [95] :

▪ **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 3.4 [2]:

$$J = A(U) \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{q_e \cdot \varphi(U)}{k \cdot T}} \quad (3.4)$$

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/(m²·K⁴)]);
- T – temperatura absolută (pe scară Kelvin);
- $\varphi(U)$ – 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 (3.2) și (3.3).

Coeficientul de neliniaritate poate fi deci asimilat cu panta caracteristicii și calculat cu formula 3.5 (cu logaritm zecimal, sau natural):

$$\alpha = \frac{d(\log(I))}{d(\log(U))} \quad (3.5)$$

Valorile normale ale coeficientului de neliniaritate α 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/cm², 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 α este variabilă de-a lungul caracteristicii și nu se poate considera o valoare prestabilită, determinarea lui α 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 3.6. De fapt această relație este dedusă prin estimarea diferențialelor relației 3.5 ca diferențe finite, ceea ce conduce la următoarea relație pentru α (prin explicitarea diferențialelor ca diferențe finite):

$$\alpha = \frac{\ln I_2 - \ln I_1}{\ln U_2 - \ln U_1} \quad (3.6)$$

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 tunel, conform [32] sau prin generalizarea mecanismului termoelectronic [8].

▪ 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 $0,5 \times 10^{-2}$ [Ωm]. 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:

$$U = R_g I \quad (3.7)$$

sau:

$$E = \rho_g J \quad (3.8)$$

Unde mărimile reprezintă: R_g – rezistența electrică a granulelor de ZnO;
 ρ_g – rezistivitatea electrică a granulelor de ZnO;

Proprietățile 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.

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.

Observăm că în cazul varistorului pe bază de ZnO, caracteristica de funcționare la temperaturi normale este suficient de aplatizată în zona de curent redus (10^{-3} ... 10^{-4} A). Rămâne destul de aplatizată și în zona supratensiunilor de

manevră, însoțite de curenți de sute de amperi și rămâne aplatizată chiar și în zona supratensiunilor atmosferice care produc curenți de 10 kA și mai mult.

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

III.4.2. Module de protecție la joasă tensiune bazate pe varistoare ZnO

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. Înainte de a prezenta clasificarea acestor module după locul de amplasare și câteva soluții tehnice existente, vom prezenta variantele de asociere a varistoarelor pe bază de ZnO cu eclatori miniaturali cu gaze precum și justificarea tehnică a asocierii celor două dispozitive într-un modul.

Cele 4 module analizate [1] sunt prezentate în Figura 3.9 a,b,c,d. Ele au fost realizate experimental de către autor, în cadrul stagiului efectuat la Laboratorul „Génie Electrique” al Universității Paul Sabatier din Toulouse.

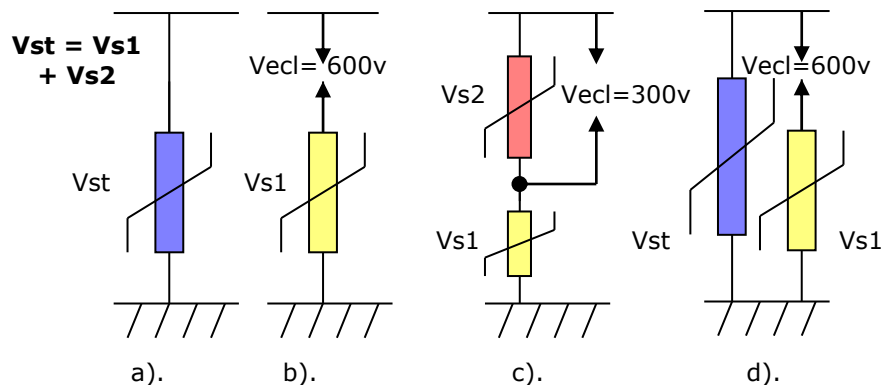


Figura 3.9: Module de protecție împotriva supratensiunilor

Modulele prezentate au același nivel de protecție de 1,5 kV (tensiune maximă admisă) iar tensiunea de serviciu este de 230 V, iar din punct de vedere al specificațiilor tehnice sunt identice. Modulul a). este format dintr-un varistor simplu, de rezistență variabilă, V_{st} modulul b). dintr-un varistor V_{s1} asociat cu un eclator cu gaz în serie, modulul c). este alcătuit din două varistoare V_{s1} și V_{s2} , astfel încât în orice moment se poate scrie relația dintre rezistențele variabile $V_{st} = V_{s1} + V_{s2}$. Modulul d). reprezintă punerea în paralel a lui a). și b).

În urma unor încercări în regim tranzitoriu (șocuri care simulează supratensiuni atmosferice) și permanent (polarizare la tensiunea de serviciu și teste la supratensiuni de valori reduse dar durată mare de aplicare) s-au stabilit performanțele fiecărui modul și anume:

Modulul a).

Un varistor singur, la joasă tensiune nu poate răspunde următoarelor cerințe:

- să aibă un nivel de protecție în regim tranzitoriu cât mai apropiat de tensiunea de serviciu;

- să suporte în regim permanent supratensiuni temporare;
- să își mențină tensiunea de deschidere constantă în timp, datorită "îmbătrânirii";

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 în regim de ambalare termică. Varistorul are nevoie de un dispozitiv care să îl conecteze doar când e nevoie.

Modulul b).

În acest montaj varistorul are rolul de a absorbi energia și a limita curentul de însoțire. Amorsarea este dată de eclatorul cu gaz Rolul acestuia este:

- în regim permanent fixează tensiunea de amorsare a modulului pentru supratensiuni temporare și se comportă ca un întreruptor, deconectând varistorul în regimul de serviciu;
- în regim tranzitoriu prezintă un inconvenient major, datorită timpului de răspuns mult mai mare decât al varistorului;

Modulul c).

În regim permanent:

- cele două varistoare serie asigură o bună comportare la aplicarea unor supratensiuni temporare și se reduce astfel curentul de pierdere;
- Eclatorul montat în paralel pe varistorul 2 fixează tensiunea de amorsare și răspunsul la supratensiuni temporare, amorsând înaintea varistorului;

În regim tranzitoriu:

- Varistorul 1 asigură nivelul de protecție pentru un curent de scurgere de 5 kA;
- Varistorul 2 preia tensiunile care apar la bornele eclatorului, fiind mai rapid în acțiune;

Dimensionarea modulului este foarte complicată, mai ales datorită corelării caracteristicilor eclatorului și varistorului, pentru a obține efectul prezentat anterior.

Modulul d).

Are o comportare similară cu modulul c).

Concluziile care se desprind sunt:

- Este necesară asocierea varistorului cu un eclator cu gaz cu rol de întreruptor în regim permanent, astfel se întârzie procesul de îmbătrânire și riscul de ambalare termică;
- Modulele 3 și 4 au o comportare excelentă la toate tipurile de solicitări;

Toate aceste module pot fi utilizate pentru protecții în telecomunicații. Putem vorbi de două mari categorii de protecții împotriva supratensiunilor în rețelele de telecomunicații, în funcție de locația unde sunt amplasate acestea:

- Protecții primare;
- Protecții secundare.

Protecțiile primare

Trebuie amplasate în punctele unde perechile de cabluri intră în incinte. Acestea ar trebui să fie furnizate de către compania de telecomunicații. În absența oricărei reglementări în acest sens, ele sunt opționale și foarte rar montate.

Pot fi clasificate ca:

- protecții de abonat (amplasate pe o pereche de fire);
- protecții de intrare în clădire (amplasate pe zeci de fire);
- protecții în tabloul de conexiuni.

Protecțiile de abonat destinate unei clădiri cu un singur post telefonic sunt localizate în punctul de demarcație între instalația utilizatorului și cea a companiei. Celelalte categorii sunt localizate fie la intrarea, fie în interiorul tabloului de conexiuni interne al clădirii. Toate aceste echipamente ar trebui să reziste, fără a pierde din proprietăți, la cca. 10000 șocuri de 100 A val. maximă. Evident, sunt utilizate la rețelele POTS.

În Figura 3.10. sunt reprezentate astfel de protecții, fără filtre și cu filtre montate în serie.

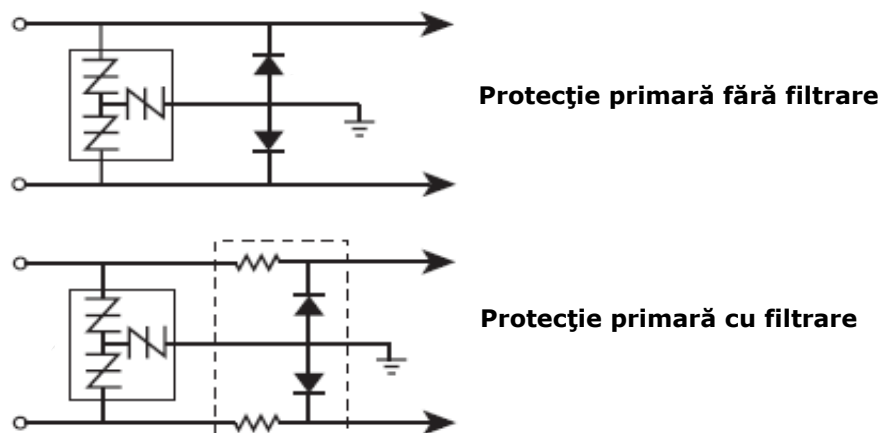


Figura 3.10: Protecții primare

Protecțiile secundare

Sunt dispozitive suplimentare integrate sau nu în sursele UPS sau în construcția postului telefonic sau a terminalului de telecomunicații. Acestea ar trebui să poată prelua cca. 10000 șocuri de 100 A și 800 V. Sunt prezentate, ca mod de amplasare, în Figura 3.11.

În continuare vom detalia soluțiile de protecție care vizează partea de alimentare cu energie electrică a centralelor sau echipamentelor de telecomunicații. Soluțiile care sunt descrise succint, mai jos, sunt general valabile pentru orice categorie de consumator electrocasnic sensibil, nefiind decât în parte specifice alimentării echipamentelor de telecomunicații.

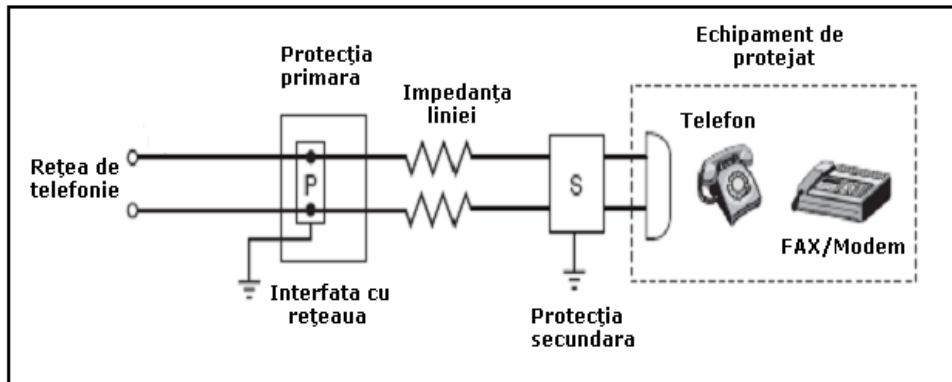


Figura 3.11: Amplasarea protecției secundare

Schema detaliată a protecției secundare este prezentată în Figura 3.12.

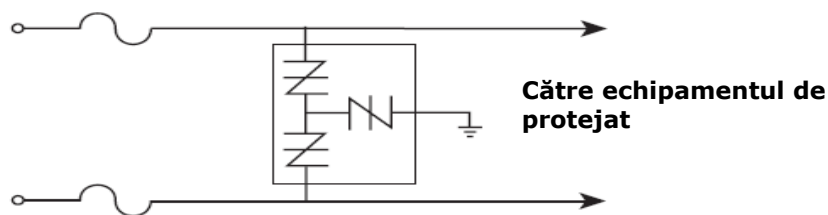


Figura 3.12: Schema protecției secundare

Protecții pentru rețelele de alimentare cu energie electrică

Aceste protecții, în mod evident, nu sunt specifice domeniului de telecomunicații, ci domeniului electroenergetic. Soluțiile clasice adoptate în situația protecției liniilor electrice de joasă tensiune sunt aplicabile în totalitate și surselor de alimentare din domeniul telecomunicațiilor.

Ca și principiu general, protecția cu varistoare a rețelilor electrice monofazate (sau de curent continuu), respectiv trifazate, se realizează în modul următor:

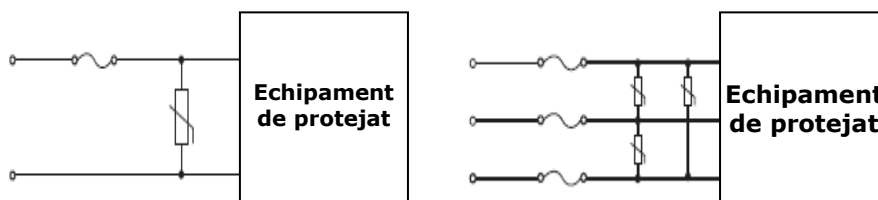


Figura 3.13. Protecția cu varistoare a unei rețele monofazate și trifazate

Varistoarele se amplasează între toate conductoarele disponibile, fiind alese în conformitate cu nivelele și tipurile de tensiune vizate.

Dacă instalația protejată este prevăzută cu un neutru de protecție, soluția cea mai simplă este montarea varistoarelor înseriate cu un element de deconectare (siguranță fuzibilă, microreleu bimetalic etc.), care să realizeze deconectarea varistorului în cazul unei supratensiuni consistente și de durată. În caz contrar, varistorul fie se distruge, fie realizează un scurtcircuit permanent între fază și neutru de protecție. Distrugerea lui cauzează, evident, tot un scurtcircuit permanent. Soluția aceasta este detaliată în Figura 3.14, atât pentru rețeaua monofazată, cât și pentru cea trifazată [21].

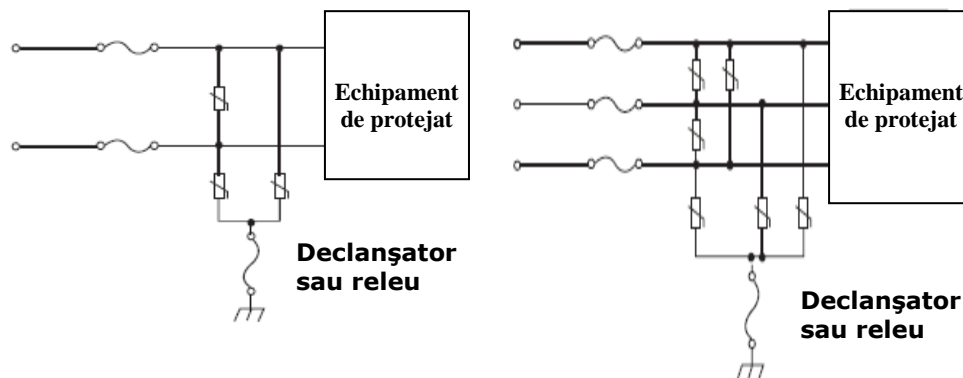


Figura 3.14: Protecții cu varistoare pentru rețele cu neutru de protecție

Pentru echipamentele electronice ultrasensibile se recomandă utilizarea unei soluții de protecție bazată pe schema din Figura 3.15.

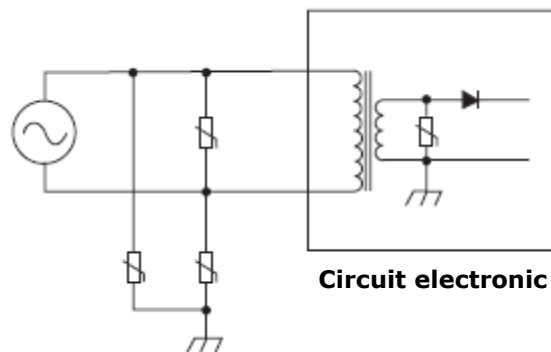


Figura 3.15: Protecție cu varistoare a unui circuit electronic sensibil

Modulul rezultat este un modul clasa E, fiind localizat în interiorul consumatorului electronic sensibil. Remarcăm faptul că aceasta este o protecție complementară protecției cu varistoare deja instalată pe rețeaua de joasă tensiune.

În această situație trebuie respectate criteriile de selectivitate a protecției de tensiune, astfel încât cele două scheme să opereze corespunzător.

Această situație se întâlnește frecvent în cazul echipamentelor de telecomunicații.

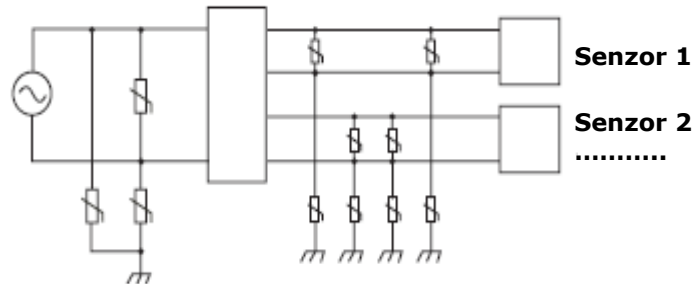


Figura 3.16: Protecția unei rețele de achiziție de date

În Figura 3.16 este prezentată schema de protecție pentru o instalație de securitate sau de achiziție de date, prevăzută cu doi senzori (pot fi și mai mulți). La capetele liniei de comunicație, pe traseul conductoarelor de semnal, sunt montate varistoare legate la pământ. Și în acest caz (asemănător cu cel al rețelelor de telecomunicații) se remarcă existența protecției generale a instalației [83].

Figura 3.17 prezintă o schemă de protecție specifică unei rețele de transmisie de date pe 4 canale, fiecare fiind protejat în mod independent de către un varistor.

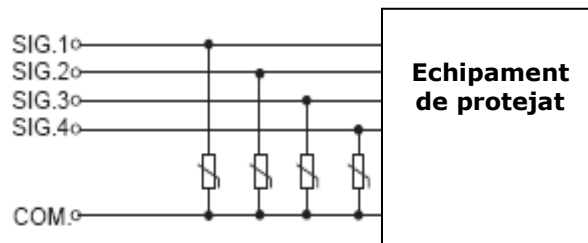


Figura 3.17: Protecția unei rețele de transmisie de date

Acestea sunt doar schemele principale ale unor module de protecție destinate a funcționa și în domeniul telecomunicațiilor. Din păcate, aceste scheme care par simple, nu sunt aplicate aproape de loc în domeniul echipamentelor de telecomunicație civile (dar sunt aplicate pe scară foarte largă în sectorul telecomunicațiilor terestre militare), din considerentele pe care le-am detaliat anterior.

În continuare vom prezenta un modul de protecție simplu, dezvoltat de către autor, pentru protecția unor rețele electrice trifazate, care pot alimenta surse modulare pentru telecomunicații.

Acest modul oferă o protecție completă a unei rețele trifazate. Folosește ca element de bază un cablaj conceput de către S.C. PROTENERGO S.A. Timișoara, încă

din 2001, pus la dispoziție prin amabilitatea conducerii societății, dar care prezintă o serie de deosebiri funcționale radicale. Firma amintită produce un modul monofazat de protecție împotriva supratensiunilor, vândut în mii de exemplare, dar nu dispune de un modul de protecție trifazat [83].

Schema noului modul, care va fi propus pentru producție în cadrul S.C. PROTENERGO S.A., în viitor, este prezentată în Figura 3.18. Acest modul poate realiza protecția oricărui tip de rețea electrică trifazată, având tensiunea de linie de 400 V, dar montajul este recomandat pentru alimentarea echipamentelor de telecomunicații, deoarece prezintă un număr mult mai mare de varistoare, aparent nejustificat din punct de vedere economic și este destul de voluminos [94].

Numărul mare de varistoare este cerut de necesitatea asigurării unei protecții eficiente a acestor echipamente sensibile, modulul asigurând și rolul unui filtru pentru perturbațiile propagate pe rețeaua de alimentare.

Se observă că acest modul respectă prescripțiile anterioare ale firmei PROTENERGO S.A., conform cărora, în situația instalațiilor electrice din România, există riscul ca neutrul de protecție al instalației să nu fie legat la pământ, prin urmare, rolul de cale de scurgere a curentului de șoc către pământ să fie luat de către neutrul rețelei. Analizând montajul constatăm că acesta funcționează chiar mai bine în situația în care neutrul de protecție lipsește, când, practic, avem un varistor mare în paralel cu un montaj serie având un alt varistor mare și unul mai mic.

Acest lucru asigură o capacitate mai mare de absorbție în energie întregului ansamblu. Schema acestuia este prezentată în Figura 3.18.a., iar în Figura 3.18.b. sunt prezentate fotografiile ale modulului.

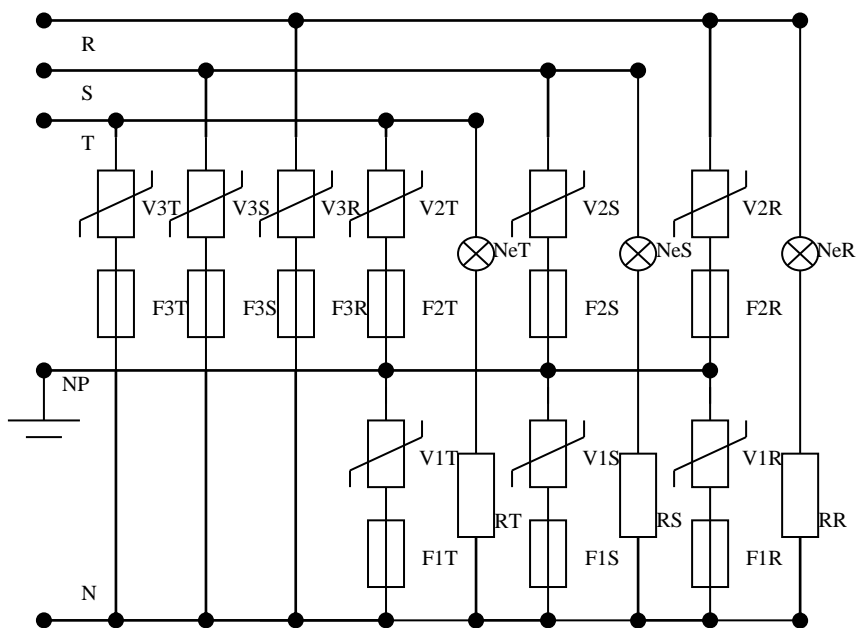


Figura 3.18. a: Schema completă a modulului de protecție la supratensiuni pentru conexiune trifazată, la 400 V c.a.

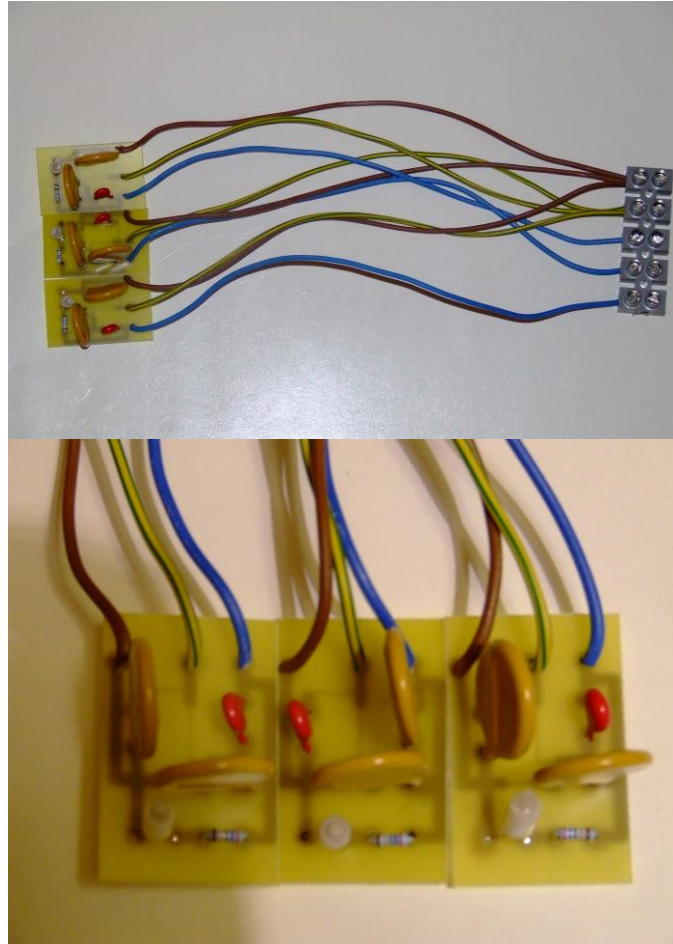


Figura 3.18.b: Fotografii ale modului de protecție la supratensiuni pentru conexiune trifazată, la 400 V c.a.

Datele tehnice principale sunt:

Tensiune nominală:	220 – 250 V (pe fază, în Y)
Curent nominal maxim:	10 A
Putere vehiculată maximă:	3000 W (limitată de conductoare)
Frecvența nominală de alimentare:	50 Hz
Curent de scurgere (serviciu permanent):	< 50 μ A
Nivel de protecție (undă 8/20 μ s):	2,5 kV
Timp de răspuns:	< 20 ns (valoare estimată)
Capacitate de absorbție (undă 8/20 μ s):	600 J
Temperatură de exploatare:	-20 °C...+40 °C (valoare estimată)
Clasă B sau C, conform SR CEI 61312-3 și DIN VDE 0675	

Ansamblul poate fi înglobat într-o carcasă de material plastic, de tipul celor utilizate pentru dozele de distribuție. Dimensiunea însumată a cablajelor este de 50 x 90 mm. Ansamblul este conceput modular, existând trei module elementare, câte unul pentru fiecare fază. Elementele constituente ale montajului sunt, pentru fiecare dintre fazele R,S,T:

- Varistoarele V1R, V1S, V1T, înseriate cu fuzibilele F1R, F1S, F1T;
- Varistoarele V2R, V2S, V2T, înseriate cu fuzibilele F2R, F2S, F2T;
- Varistoarele V3R, V3S, V3T, înseriate cu fuzibilele F3R, F3S, F3T;
- Lămpile cu neon NeR, NeS și NeT, înseriate cu rezistoarele RR, RS și, respectiv, RT.

Varistoarele din familia V1 sunt de 230 Vef., diametru 7 mm, montate între neutrul rețelei N și neutrul de protecție NP. Varistoarele din familia V2 și cele din familia V3 sunt de 230V ef., diametru 20 mm, montate între fază și neutrul de protecție NP, respectiv neutrul rețelei N. Dimensionarea, fabricarea și încercarea acestora va fi descrisă ulterior.

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 modulului, 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.

Lampa cu neon este destinată semnalizării prezenței tensiunii pe fază. Tensiunea nominală de funcționare a lămpilor de neon în familia Ne 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 Ω , pentru a asigura nivelul de tensiune de 60 Vca, la un curent limitat la 0,8 mA. Rezistențele R sunt de 200 k Ω , 0,5 W.

Dacă neutrul rețelei N și neutrul de protecție NP sunt legate în mod corespunzător la pământ, rolul varistoarelor de tip V1 dispăre. De aceea acestea au fost alese ca fiind mai mici, având o capacitate mai redusă de absorbție în energie. Practic, în situația unei conectări corecte la pământ, montajul conține două varistoare în paralel. În situația des întâlnită în cazul clădirilor vechi, în care lipsește neutrul de protecție, descărcarea este preluată integral de către varistoarele tip V3, legate în paralel cu ansamblul varistoarelor V1 și V2.

Ambele tipuri de varistoare au tensiunea nominală de 250 V c.a.

Pentru conexiunea între neutrul rețelei și neutrul de protecție s-a optat pentru un varistor având diametrul (capacitatea de absorbție în energie) mai redus, dar o sensibilitate sporită.

Această soluție este posibilă, deoarece, în situația rețelelor trifazate se cunoaște poziția fiecărui conductor și rolul acestuia.

Domeniul de utilizare al acestui modul vizează și consumatorii casnici, cu puteri sub 3000 W și având numeroase (și sensibile) alte receptoare: motoare de

putere medie, instalații de aer condiționat, frigidere, instalații de iluminat, aparatură electronică, TV, audio, video, HiFi, tehnică de calcul, cuptoare și aparate electrocasnice de încălzit.

III.5. Concluzii

Acest capitol dorește să facă o analiză a soluțiilor tehnice existente pentru protecția rețelelor de telecomunicații împotriva supratensiunilor de orice fel.

O primă concluzie șocantă este lipsa oricărui tip de asemenea protecție în instalațiile de telecomunicații, care sunt lăsate astfel pradă intemperiilor. Fabricanții de echipamente de telecomunicații nu au nici un interes în a proteja produsele lor împotriva supratensiunilor. Practic, aceste incidente sunt surse suplimentare de venituri, din service și din înlocuirea componentelor defecte.

Numai companiile de telecomunicații pot fi interesate de montarea acestor dispozitive, deoarece pierderile înregistrate ca urmare a scoaterii din uz a unui centru de telecomunicații sunt uneori mai mari decât cele cauzate de înlocuirea componentelor defecte.

În România, datorită dezvoltării rapide și expansioniste a pieții de telecomunicații, aceste echipamente sunt montate și exploatate în condiții improprii, ceea ce sporește riscul de deteriorare a acestora în caz de supratensiuni. În plus, nici legislația în domeniu nu este bine conturată.

Protecțiile la supratensiuni se montează mai ales în cazul surselor modulare de alimentare cu electricitate a echipamentelor de telecomunicații, dar și pe partea de telefonie în cupru, dacă aceasta există.

Dintre toate soluțiile tehnice existente, varistoarele pe bază de ZnO reprezintă soluția cea mai completă pentru protecția oricărei instalații de joasă tensiune (și, implicit, și de telecomunicații, împotriva oricărui tip de supratensiuni. Aceste dispozitive semiconductoare au o serie de avantaje în exploatare, care au fost evidențiate în acest capitol.

Există o mare varietate de module de protecție la supratensiuni destinate a funcționa în rețele trifazate de 400 V, dar cele care utilizează trei varistoare montate între neutru și fază, neutru și neutru de protecție, fază și neutru de protecție, sunt cele mai fiabile și recomandabile pentru domeniul de telecomunicații.

III.6. Contribuții personale și originale

Acest capitol conține un număr mare de contribuții personale ale autorului. Dintre acestea evidențiem:

- Analiza stării rețelelor de telecomunicații din România, din punct de vedere al protecției la supratensiuni;
- Sinteza bibliografică a principalelor probleme privind protecțiile la supratensiuni;
- Identificarea posibilităților de protejare a acestor instalații;
- Elaborarea unor sugestii privind modul de amplasare al protecțiilor împotriva supratensiunilor;
- Evidențierea avantajelor varistoarelor pe bază de ZnO;
- Implementarea varistoarelor pe bază de ZnO ca soluție de protecție și în situația echipamentelor de telecomunicații;
- Realizarea integrală a unui modul de protecție trifazat pentru echipamentele de telecomunicații.

Capitolul IV Elemente privind proprietățile fizico-chimice ale varistoarelor utilizate și tehnologia lor de fabricație

IV.1. Proprietățile fizico-chimice ale varistoarelor pe bază de ZnO

Din punct de vedere fizico-chimic, un varistor pe bază de oxizi metalici este un sistem policomponent, care este extrem de greu de analizat și studiat, indiferent de metodologia de cercetare. Această lucrare nu își propune să realizeze un tratat de inginerie chimică sau de fizica materialelor, ci doar să prezinte proprietățile fizico-chimice ale acestor materiale, în corelație cu tehnologia lor de fabricație și domeniul de utilizare (în cazul nostru domeniul de joasă tensiune).

În esență, varistoarele pe bază de ZnO sunt niște ceramici policristaline cu proprietăți semiconductoare (semiconductori de tip „n”), conductivitatea lor fiind de natură:

- intrinsecă – datorată atomilor de Zn interstițiali și a lacunelor de oxigen;
- extrinsecă – datorată dopajului cu Co sau Mn de exemplu;

Așa cum am mai amintit, aceste ceramici au fost descoperite inițial în fosta U.R.S.S. în anii 1950-1960 (primele articole apărute în revistele de specialitate fiind scrise de către Kh. S.Valeiev, V. A.Knazaiev în 1961). Posibilitatea utilizării acestor materiale pentru electronica militară a fost sesizată încă de la început, ceea ce a condus la „uitarea” lor.

În 1968, M. Matsuoka, inginer al companiei Matsushita (Panasonic, Technics, etc.) Electronic Ltd. din Japonia le „redescoperă” accidental și realizează primul brevet de invenție în domeniu, patentând tehnologia de fabricație a acestora. 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).

Următoarea mare companie interesată de către această invenție a fost General Electric, care s-a ocupat în primul rând de aplicațiile acestor materiale și mai puțin de tehnologia lor de fabricație. De atunci, pe piața electronicii de putere au apărut numeroși fabricanți de astfel de componente semiconductoare, rolul principal fiind jucat de către marile companii transnaționale și institutele și universitățile de profil.

În România se produc experimental varistoare destinate aplicațiilor la joasă tensiune, la I.C.P.E. București, conform S.F. 64/1996, pe baza unei tehnologii dezvoltate în colaborare cu Laboratorul „Génie Electrique” al Universității PAUL SABATIER din Toulouse. Aceste varistoare erau concepute pentru a fi utilizate în construcția telefoanelor din cabinele publice, dar producătorul Intrarom S.A., ca urmare a declinului vizibil al producției de aparate publice, a renunțat la echiparea acestora [21].

Structura acestor ceramici este relativ simplă, formată din granule de ZnO separate prin spații intergranulare. Figura 4.1. prezintă ceramica policristalină, așa cum este observabilă ea la microscopul electronic [32].

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

Observațiile la microscop au evidențiat trei părți componente în structura unui varistor [21]:

- 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_2O_3 , a cărei dimensiune variază între 10^{-3} și 10^{-1} 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, datorăți dopajului cu Co și Mn.

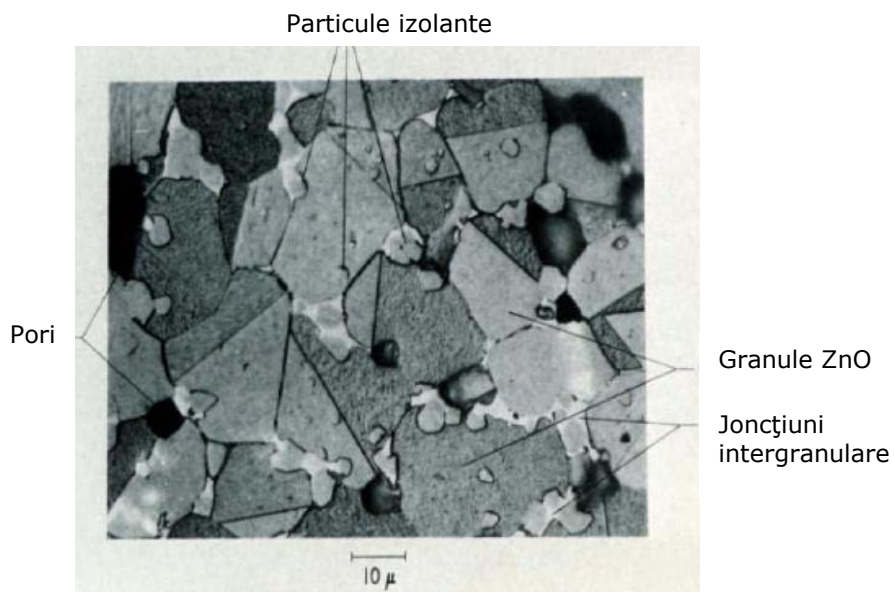


Figura 4.1: Microstructura unui varistor pe bază de ZnO văzută la microscopul electronic

Proprietățile fizice ale rețelei cristaline rezultate sunt, (măsurate la 20°C) [12]:

- | | |
|--------------------------|---|
| ▪ Rețea: | hexagonală; |
| ▪ Constantele rețelei: | $a = 3,24 \text{ \AA}$; $c = 5,19 \text{ \AA}$; $c/a = 1,6$; |
| ▪ Masa molară: | 81,37 g/mol; |
| ▪ Densitatea volumică: | $5,4 \pm 0,08 \text{ g/cm}^3$; |
| ▪ Căldura specifică: | 0,7 J/(g·grad) la 300 K; |
| ▪ Temperatura de topire: | 2300 K; |

- Lărgimea benzii interzise: 3,2 V;
- Densitatea atomilor donori: 10^{17} cm^{-3} ;
- Mobilitatea electronică: $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$;
- Rezistivitatea electrică: $0,5 \text{ } \Omega\text{cm}$;

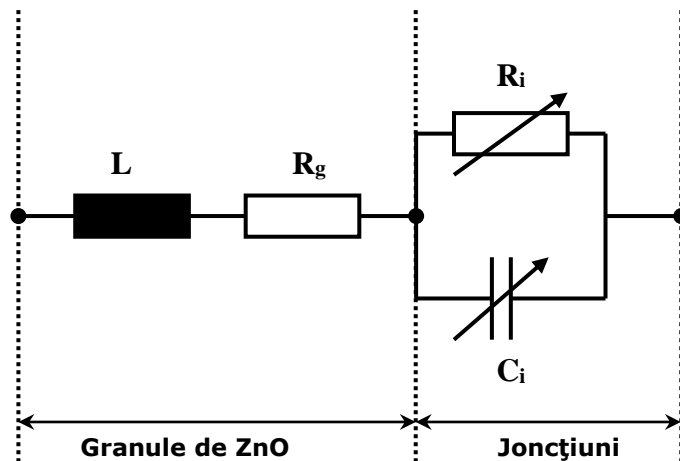


Figura 4.2: Schema echivalentă a unui varistor elementar

Izolația din jurul 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 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.

Schema electrică echivalentă pentru un microvaristor (o granulă de ZnO înconjurată de spațiul izolant intergranular) la nivel microscopic, se poate reprezenta ca în Figura 4.2.

Pentru ansamblul materialului varistor sau pentru componenta de circuit vom detalia alte scheme echivalente.

Schema electrică echivalentă pentru întregul varistor se poate obține prin combinații de asemenea scheme elementare în paralel și în serie. Acest subiect va fi detaliat în capitolele următoare.

Prezența inductanței în schemă nu a putut fi explicată încă de nici o teorie [16]. Această inductanță însă 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 4.3 [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.

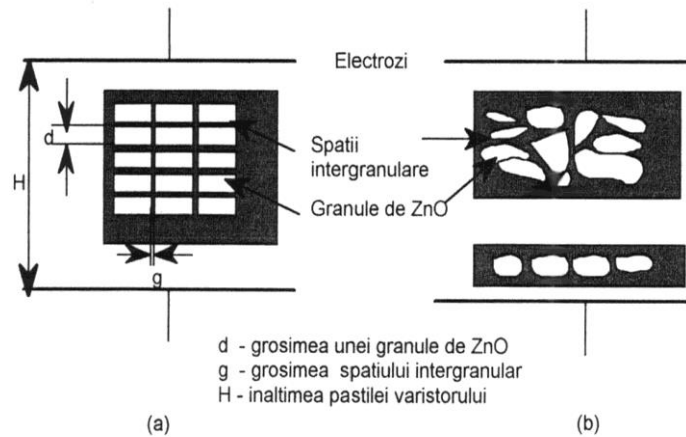


Figura 4.3: Microstructura unui varistor pe bază de ZnO: a). teoretică (idealizată); b) reală.

Compoziția chimică aproximativă a unui varistor fabricat după tehnologia pusă la punct de către L.G.E. Toulouse, după terminarea tuturor operațiunilor de fabricație este dată în tabelul 4.1 [93], împreună cu proprietățile fizico-chimice ale fiecărui constituent major. Cifrele sunt informative și se referă la seriile de varistoare pentru 230 Vef.

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

Oxizi	Compoziția procentuală [% molare]	Cantitate la 10 g produs [g]	Masa molară [g]	Densitate a [g/cm ³]	Temp. de topire [°C]
ZnO	97,0	9,117	81,37	5,70	2000
Bi ₂ O ₃	0,5	0,269	496,96	8,90	820
MnO ₂	0,5	0,050	86,94	5,03	535
Co ₃ O ₂	0,5	0,139	240,80	6,07	1935
Cr ₂ O ₃	0,5	0,088	151,99	5,21	2435
Sb ₂ O ₃	1,0	0,337	291,50	5,20	656

Tabelul 4.1: Compoziția chimică finală a unui varistor și proprietățile fizico-chimice ale fiecărui constituent (5 oxizi aditivi)

Pentru seria de varistoare având doar doi oxizi aditivi, specifici pentru aplicațiile din electronică și telecomunicații, compoziția chimică finală este diferită. Aceasta este prezentată în Tabelul 4.2.

Compoziția chimică diferă de la un producător la altul.

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 sulfații (0,01 %), arsenicul (0,005 %), plumbul (0,005 %), azotul (0,001 %), clorul (0,001 %), calciul (0,001 %). Rolul acestor aditivi va fi detaliat în capitolul acesta.

Oxizi	Compoziția procentuală [% molare]	Cantitate la 10 g produs [g]	Masa molară [g]	Densitate a [g/cm ³]	Temp. de topire [°C]
ZnO	99,0	9,6682	81,37	5,70	2000
Bi ₂ O ₃	0,5	0,2796	496,96	8,90	820
MnO ₂	0,5	0,0522	86,94	5,03	535

Tabelul 4.2: Compoziția chimică finală a unui varistor și proprietățile fizico-chimice ale fiecărui constituent (2 oxizi aditivi)

Fabricantul și utilizatorul de varistoare trebuie să cunoască 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:

$$u_N = U_{bi} \approx 3 V \quad (4.1)$$

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 , (în Figura 4.3.a este notat cu d),

$$n = H/d_g. \quad (4.2)$$

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:

$$V_N = n \cdot u_N = \frac{H}{d_g} \cdot u_N = \frac{H}{d_g} \cdot U_{bi} = \frac{H}{d_g} \cdot 3[V] \quad (4.3)$$

Această tensiune de 3 V (de fapt o tensiune între 3 și 4 V) se regăsește în toate articolele privind varistoarele pe bază de ZnO. Un studiu statistic din anii 1990 arată că, pentru 200 de granule de ZnO studiate în condiții de laborator s-a regăsit această valoare a tensiunii de prag pe joncțiune [38].

Diametrul mediu al uni granule este între 10 și 25 μm , dar variază foarte mult datorită compoziției chimice și a tehnologiei de fabricație.

O altă provocare tehnologică este realizarea unor varistoare pentru tensiuni nominale sub 20 ...30 V. Nu numai grosimea extrem de mică a stratului varistor pune probleme, ci și neliniaritatea accentuată a caracteristicilor la foarte joasă tensiune. Din punct de vedere tehnologic este mult mai simplu să se producă un varistor pentru 230 V sau unul pentru medie tensiune, decât varistoare pentru telefonie sau industria electronicii auto, care necesită procedee fizico-chimice mult mai elaborate și mai complexe.

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 4.4 prezentăm o secțiune de principiu, realizată printr-un varistor gata fabricat, de grosime micrometrică [16].

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.

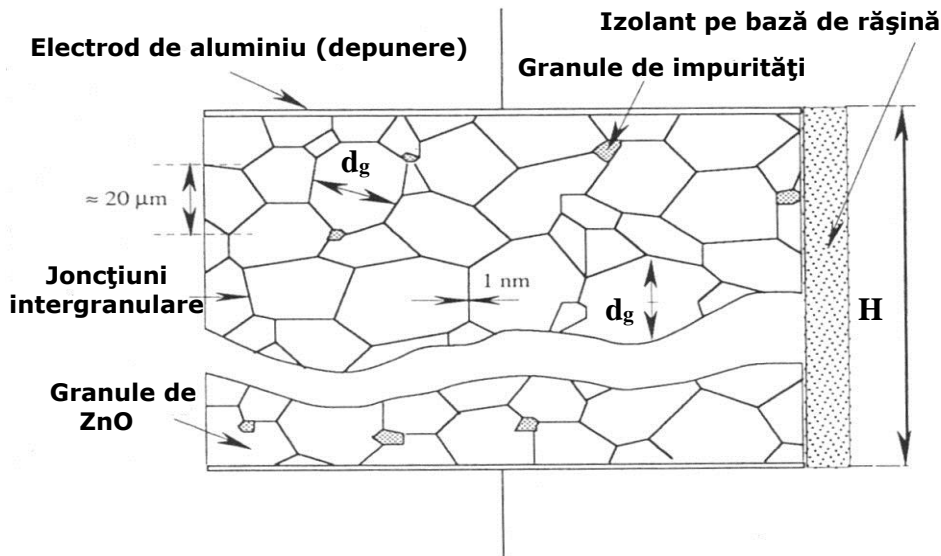


Figura 4.4: Secțiune de principiu printr-un varistor

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) [86], 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;

În Figura 4.5 prezentăm pe scurt realizarea compromisului între cele două [30]:

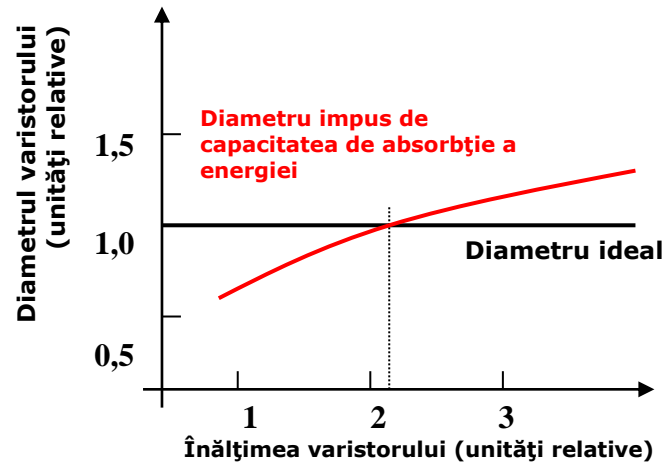


Figura 4.5: Alegerea diametrului varistorului.

Se observă că până la un raport între înălțime și diametrul real (impus) 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 violente și a putea absorbi energia acestora, este mai mare decât cel corespunzător începutului de serie. În consecință se impune trecerea la un nou diametru. Se poate genera o serie nouă cu acest diametru inițial (calculat, prin metode specifice, pentru primul varistor din serie). Se realizează serii de varistoare, care diferă doar prin înălțime (tensiune U_N), diametrul fiind identic.

În Figura 4.6.a este prezentat un varistor tip semipătrat, apoi în Figura 4.6.b este prezentată o serie de varistoare tip disc pentru domeniul de joasă tensiune, având diametrele de 25, 32 și 40 mm, în Figura 4.6.c este exemplificată o serie de varistoare rectangulare pentru aplicații în electronica auto, iar în Figura 4.6.d sunt prezentate varistoare tip disc cu electrozi atașați, acoperite complet cu rășină epoxidică, având diametrele de 14 și 20 mm, cele cu 3 electrozi fiind polistratificate.

Indiferent de tehnologia de fabricați sau de domeniul de utilizare, varistoarele se îmbracă total sau parțial în rășină epoxidică [86].



Figura 4.6: Tipuri constructive și serii de varistoare de joasă tensiune

IV.2. Tehnologia de fabricație a varistoarelor pe bază de ZnO și influența acestora asupra proprietăților materialului finit

Fiecare producător de componente electronice dispune de propriile 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 pentru electronică și telecomunicații, utilizate pentru experimentele ulterioare.

Cerințele 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;
- Capacitate cât mai ridicată de absorbție în energie;
- Capacitate electrică (parazită) cât mai redusă (pentru aplicațiile din telecomunicații);
- Îmbătrânire cât mai lentă;
- Preț cât mai redus;
- Posibilitatea fabricării la scară industrială;

Evident, aceste cerințe care reprezintă „caietul de sarcini minimal al unui varistor” sunt ideale. Practic nu există un asemenea varistor, iar procedeul de fabricație al varistoarelor trebuie să țină seama de realizarea compromisului între toate aceste proprietăți.

Tensiunea de prag depinde în mod esențial de dimensiunea granulației pulberii de oxid metalic. 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 (purtate, 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;

IV.2.1. Etapele și operațiile procesului de fabricație

Fabricarea varistoarelor face apel la un proces ceramic convențional. Este o succesiune de operații simple în care un număr mare de parametri sunt susceptibili de a influența calitatea produsului finit. Modul de fabricare a varistoarelor pe bază de oxid de zinc a suferit puține modificări de la momentul descoperirii lor. În schimb, studiile din domeniul ceramicilor, chimiei și ingineriei electrice au permis optimizarea caracteristicilor electrice și performanțelor termice.

Majoritatea datelor procesului tehnologic de fabricație au fost obținute empiric. Ulterior au apărut și modele care să explice (total sau parțial) complexul proces de fabricație al varistoarelor pe bază de amestecuri de oxizi metalici. Chiar dacă, pentru moment, tehnologia de fabricație a varistoarelor pe bază de oxizi metalici este într-un proces de ușoară saturație, pe viitor se așteaptă noi elemente care să optimizeze performanțele acestora pornind din faza de fabricare.

La ora actuală, în lume, sunt în serviciu peste un miliard de varistoare, având tensiuni de operare de la 10 V la 10 kV (și chiar mai mult), utilizate în primul rând ca supresoare de tensiune, dar și ca regulatoare de tensiune.

Indiferent de tipul, dimensiunea, domeniul de aplicație și compoziția varistoarelor, operațiile procesului de fabricație sunt identice.

Tensiunea de prag depinde de asemenea și de granulometria medie a microcristalelor de oxid de zinc din ceramică. Este deci esențial să putem controla mărimea acestora, fapt care necesită studierea a două tipuri de parametri:

- diversele proporții de oxid adăugate, adică compoziția chimică globală;
- fazele succesive ale tratamentului ceramic și în special tratamentul termic al sintezei.

Dintre toți oxizii susceptibili de a intra în compoziția varistoarelor, cei mai mulți au efect direct asupra granulometriei. În ceea ce privește sinteza se poate observa un comportament clasic în ceramică: granulometria medie crește cu palierul de temperatura de coacere.

În aceste condiții este posibil să se varieze mărimea granulelor de oxid de zinc între 3 și 80 μm .

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 μm , cristalele de ZnO fiind baza compoziției. Etapele fabricației sunt prezentate în diagrama din Figura 4.7.

Aceste etape sunt:

- Prepararea amestecului de pudre;
- Obținerea materialului pentru corpul varistorului;
- Definitivarea varistorului.

Așa cum observăm și în Figura 4.7, fiecărei etape a procesului de fabricație îi corespund o serie de operații specifice.

Operațiile procesului tehnologic sunt:

(Toate referirile se fac la tehnologia pusă la punct în Laboratorul „Génie Electrique” al Universității PAUL SABATIER din Toulouse și aplicată de către autor în scopul realizării unor serii de varistoare utilizate în experimentele ulterioare.

Operațiile procesului tehnologic sunt [38], [39], [40]:

Cântărirea

Cântărirea componentelor se efectuează cu o balanță electronică tip METTLER, care poate cântări mase mai mari de 0,1 mg. Operația este relativ simplă, deoarece toate ingredientele sunt livrate sub formă de pudre, pentru care granulometria este bine determinată.

Compoziția chimică inițială a unui varistor având 5 oxizi aditivi este prezentată în tabelul 4.3. [16], conform unei rețete obținută la L.G.E. Toulouse, masele fiind raportate la 500 g de amestec. Rolul fiecărui component va fi detaliat ulterior.

În tabel se remarcă prezența mai multor oxizi. Rolul ultimilor 4 oxizi nu este important pentru proprietățile electrice ale materialului, aceștia fiind utilizați pentru formarea și creșterea cristalului.

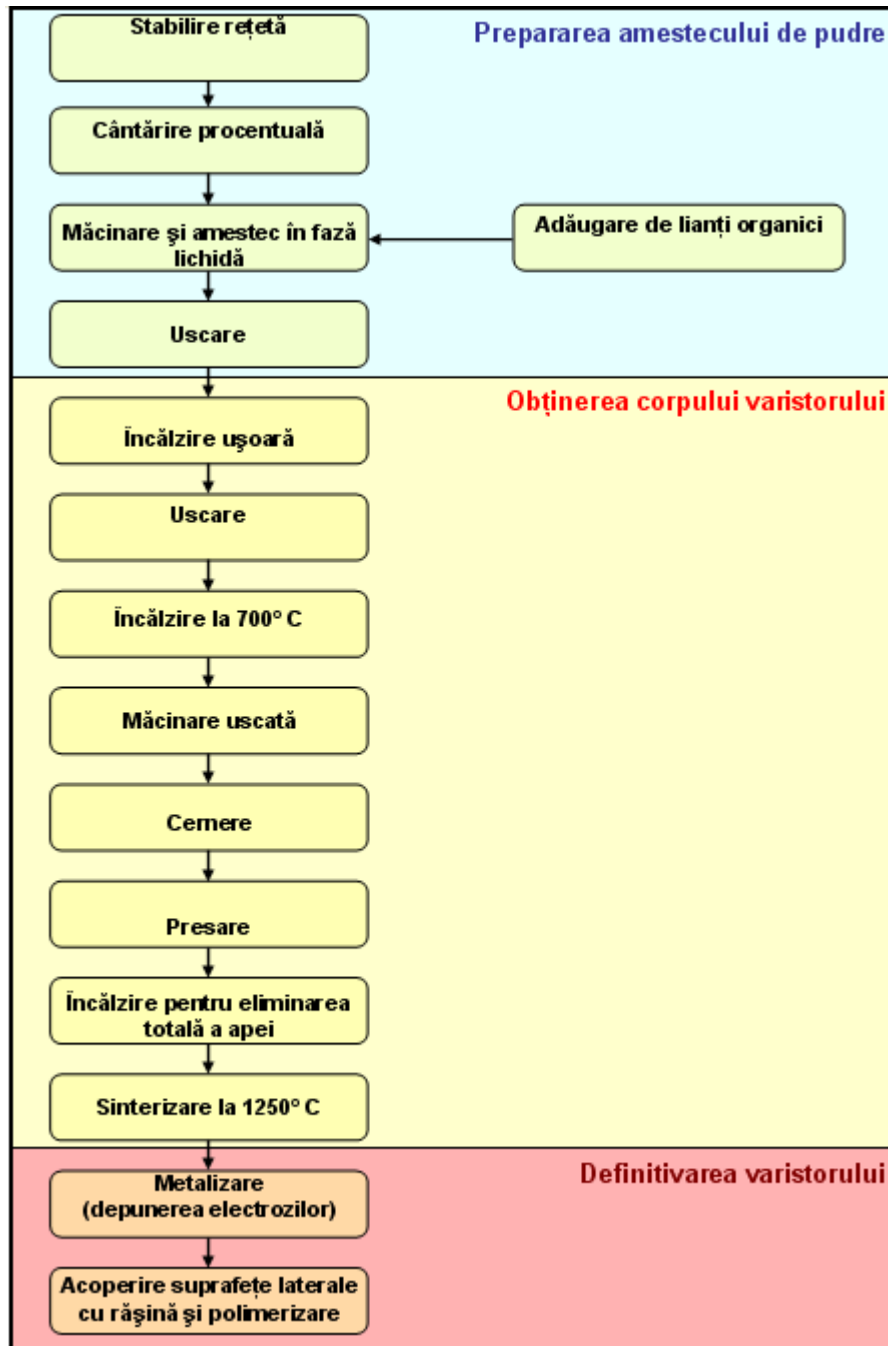


Figura 4.7: Procesul de fabricare a unui varistor

Substanță	Procentaj [%]	Masă [g] la 500 g amestec
ZnO	82,25	411,28
MnO ₂	0,75	3,75
Cr ₂ O ₃	1,32	6,601
Co ₃ O ₄	2,09	10,457
NiO	0,648	3,244
Bi ₂ O ₃	4,047	20,235
Sb ₂ O ₃	8,862	44,345
B ₂ O ₃	0,0756	0,378
MgO	0,0438	0,219
Al(NO ₃) ₉	0,0260	0,130

Tabelul 4.3. Compoziția chimică inițială a unui varistor (5 oxizi aditivi)

Compoziția chimică inițială a unui varistor având 2 oxizi aditivi (având o capacitate electrică redusă, ceea ce îl face utilizabil în electronică și telecomunicații) este prezentată în Tabelul 4.4., masele fiind raportate la 500 g de amestec. Se observă că doar masa Sb₂O₃ a suferit modificări.

Substanță	Procentaj [%]	Masă [g] la 500 g amestec
ZnO	87,45	437,25
MnO ₂	1,843	9,215
Cr ₂ O ₃	1,515	7,575
Sb ₂ O ₃	9,0466	45,233
B ₂ O ₃	0,0756	0,378
MgO	0,0438	0,219
Al(NO ₃) ₉	0,0260	0,130

Tabelul 4.4. Compoziția chimică inițială a unui varistor (2 oxizi aditivi)

Insistăm asupra faptului că aceasta este compoziția inițială a amestecului de oxizi, înainte de a fi introduși în instalația de omogenizare. După terminarea procesului de fabricație, ultimii 4 oxizi dispar ca urmare a descompunerii și evaporării, pe parcursul diferitelor faze intermediare ale formării cristalelor. Compoziția chimică finală a fost detaliată în tabelele 4.1. și 4.2.

Măcinarea

Este vorba, de fapt, de o uniformizare a amestecului de oxizi. Măcinarea este necesară pentru a facilita acest lucru. 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. Se produc cantități reduse de material, datorită capacității limitate a malaxorului cu bile (maximum 3 kg).

Încălzirea ușoară, uscarea și măcinarea uscată

Materialul rezultat în etapa anterioară este vâscos, asemănător plastilinei. 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 are o granulație neuniformă. Prin urmare, trebuie din nou măcinată, dar de această dată se face o măcinare uscată care durează, în medie, 8-10 ore.

Înainte de măcinare pudra este din nou supusă unei încălziri „ușoare”, de data aceasta la peste 700 °C.

Cernerea

Chiar dacă măcinarea uscată a condus la o granulozitate în mare parte acceptabilă, după măcinarea uscată se face cernerea, cu scopul de a separa granulele din pudră cu o dimensiune mai mare de 200 μm. Aceasta operație facilitează umplerea 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 (și, evident, ale matrițelor de presare), sunt stabilite în funcție de curentul nominal (diametrul) și tensiunea de prag (înălțimea pastilei) ce se doresc a fi asigurate. S-a optat pentru diametrele utile de 20 mm și 30 mm, varistoare disc, având 3 mm înălțime. Criteriile de alegere ale acestor dimensiuni vor fi detaliate ulterior.

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.

Parametrii ciclului termic sunt deosebiți de la un fabricant de varistoare la altul. Însă, ca ordin de mărime, sunt identici.

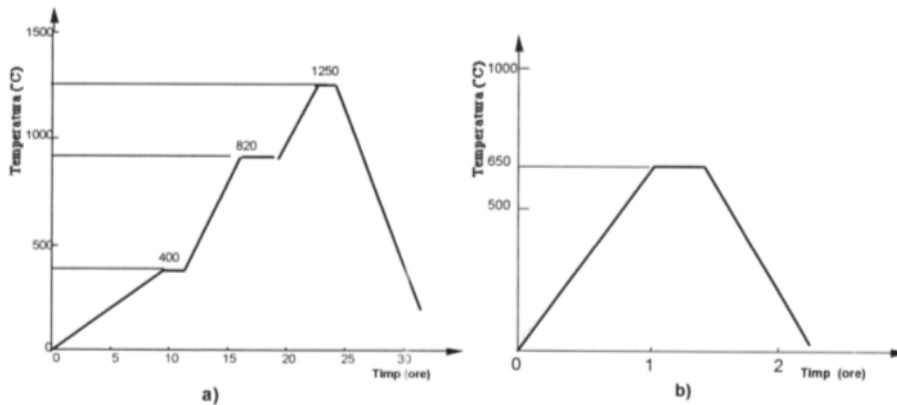
În prima fază are loc o creștere cu un gradient mic a temperaturii (în 10 ore), până la 400°C, temperatură care se menține constantă timp de 3 ore. În această fază are loc eliminarea oricăror urme de apă. Urmează apoi creșterea până la 840°C, cu un palier de cel puțin o oră la această temperatură. În 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.

Indiferent de compoziția chimică a varistoarelor produse la L.G.E. Toulouse, parametrii ciclului termic sunt aceiași.

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/m³. 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, conform tehnologiei de la L.G.E. Toulouse în Figura 4.8 a), și b).



a). Ciclul termic de sinterizare;

b). Ciclul termic de recoacere.

Figura 4.8: Parametrii ciclului termic

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

Pasta depusă anterior are în compoziția sa un polimer organic. 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 4.8.b). Se realizează astfel îndepărtarea solventului și polimerizarea pe suprafața electrozilor, Ag și Al fiind înglobați în structura polimerului. Pe stratul astfel format se pot adăuga prin lipire sau sudare firele de legătură.

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.

Rășina epoxidică poate să îmbrace integral varistorul sau poate să fie depusă numai pe suprafața laterală a acestuia. Pentru varistoarele disc de 30 mm s-a optat pentru această soluție, iar pentru cele de 20 mm s-a realizat acoperirea integrală.

Grosimea stratului de rășină epoxidică este de cca. 1 mm pentru domeniul de joasă tensiune.

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

În Figura 4.9 sunt prezentate efectele acestor faze ale procesului tehnologic de fabricație asupra varistoarelor cu diametrul de 20 mm, produse de către autor la L.G.E.T. Se remarcă faptul că aceste varistoare sunt realizate relativ grosier și artisanal, neputând fi scoase pe piață. Cu toate acestea, proprietățile lor electrice sunt suficient de bune.

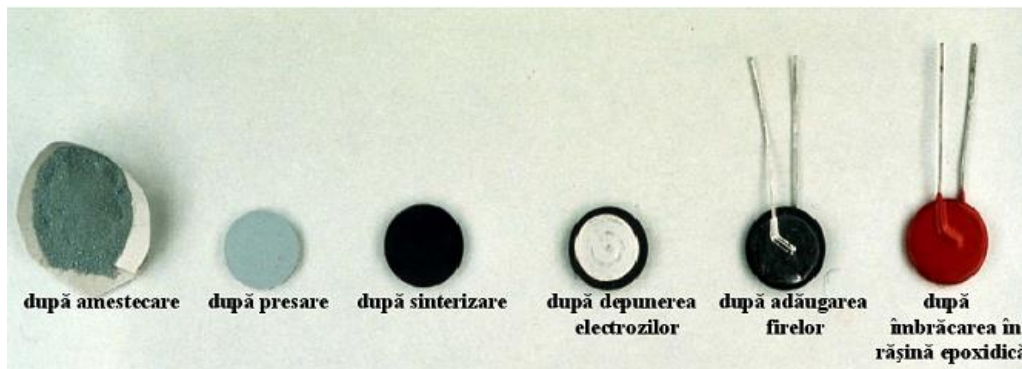


Figura 4.9. Rezultatul fazelor principale ale procesului tehnologic

În industrie, aceste faze ale procesului tehnologic sunt, în principiu, aceleași. Diferă doar scara la care sunt realizate și, uneori, metoda industrială de realizare. De exemplu, cantitățile de amestec sunt de ordinul tonelor, produsele finite sunt verificate pentru planimetrie, formă, dimensiuni, electrozii sunt depuși prin jet de plasmă, firele sunt adăugate prin sudură multipunct sau cu ultrasunete, etc.

IV.2.2. Influența tehnologiei de fabricație asupra proprietăților varistoarelor

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

Aditivii cei mai importanți sunt cei precizați în Tabelul 4.3 și 4.4., 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 4.5. 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 nitrării și oxizii săi diminuează rezistivitatea materialului, pe când Li are un efect contrar. În esență chiar conducția electrică a varistorului este determinată de barierele de potențial care se formează la nivelul spațiilor intergranulare [63].

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

Tabelul 4.6. [2] rezumă evoluția coeficientului de neliniaritate α în funcție de numărul de aditivi și temperatura de sinterizare a ciclului termic.

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.

Componentul	Utilitatea
	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 electric de ZnO, asigurând o izolație electrică eficientă. Concentrația de Bi_2O_3 în pulberea inițială influențează valoarea curentului de scurgere (I_f) și a exponentului de neliniaritate α
Co_3O_4 MnO_2	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_2O_3	Oxidul de stibiu are rolul de a fixa Bi_2O_3 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 4.5: Influența unor aditivi asupra proprietăților varistorului

Aditivi (în concentrație molară de 0,5 % fiecare)	Temperatura de sinterizare [°C]	Intensitatea electrică de prag E_s [V/mm]	α
Bi_2O_3	1150	10	4
Bi_2O_3 Sb_2O_3	1150	65	3
Bi_2O_3 CoO	1250	30	13
Bi_2O_3 MnO	1350	50	18
Bi_2O_3 MnO CoO	1350	30	22
Bi_2O_3 MnO CoO Cr_2O_3	1250	48	21
Bi_2O_3 MnO CoO Cr_2O_3 Sb_2O_3	1350	135	50

Tabelul 4.6: Dependența caracteristicilor electrice de concentrația aditivilor și temperatura de sinterizare

Se observă că, în situația varistoarelor cu doi oxizi aditivi, temperatura de sinterizare este cu cca. 200 °C mai redusă decât în cazul amestecului de 5 oxizi aditivi. 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 α și curentul de scurgere la tensiunea de serviciu (I_f) sunt influențați de proporția oxizilor suplimentari folosiți ca lianți sau ca dopanți.

S-a demonstrat teoretic [21], printr-o abordare de tip statistic, că tensiunea de prag u_s a unui microvaristor elementar este o medie statistică a tensiunii de

prag u_s a microvaristoarelor elementare considerate izolat, adică introducând un coeficient statistic σ , este dată de relația:

$$u_s' = (1 - \sigma)u_s \quad (4.4)$$

unde:

σ - este un coeficient statistic care reprezintă abaterea minimă pătratică a tensiunii de prag elementare datorată dimensiunilor granulelor;

u_s - reprezintă tensiunea de prag a unui microvaristor, teoretic egală cu lărgimea benzii interzise, conform semiconductorilor.

$$u_s = V_{bi} \approx 3 \text{ V} \quad (4.5)$$

De fapt, (4.5) este explicația teoretică a relației (4.1). Presupunând că trecerea curentului se face prin n microvaristoare înseriate pe înălțimea acestuia și considerând că acestea au dimensiuni și proprietăți identice, atunci tensiunea de prag a unui varistor va fi:

$$U_s = n u_s' = n (1 - \sigma) u_s \quad (4.6)$$

Considerând că toate granulele de ZnO au același diametru mediu d_g , atunci $\sigma = 0$:

$$n = H/d_g. \quad (4.7)$$

Detaliind această abordare statistică, (și, reconfirmând relația 4.3), realizăm importanța dimensiunii granulelor asupra performanțelor materialului varistor. Nu numai dimensiunile granulelor sunt importante, cât și, în egală măsură, omogenitatea dimensiunilor lor.

După cum se constată din această ecuație, stabilind tensiunea de prag U_s , necesară varistorului (după criteriile prezentate anterior) 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 μm [43].

De unde, utilizând 4.7, de exemplu pentru o tensiune de prag $U_s = 1500 \text{ V}$ rezultă că înălțimea pastilei trebuie să fie $H \approx 1 \text{ cm}$.

Având în vedere domeniul de utilizare și materialul din care au fost fabricate, varistoarele studiate au o înălțime de 3 mm.

IV.3. Mecanismele conducției pentru varistoarele pe bază de ZnO

De la descoperirea efectului de varistor la începutul anilor '60, foarte multe cercetări au fost consacrate studierii mecanismelor conducției în spațiile interstițiale dintre granulele de ZnO. Practic, putem spune, fără a greși, că există cel puțin 14 modele fizice principale (fără a adăuga și combinațiile și variațiunile acestora), care, începând din 1971, încearcă să explice fenomenul conducției în aceste materiale semiconductoare.

În realitate, nici unul dintre acestea nu reușește. Modelele au la bază sarcinile spațiale, efectul tunel etc. Cele mai complicate sunt bazate exclusiv pe fizica cuantică.

Fenomenul fundamental la care s-a încercat a se găsi o explicație este scăderea bruscă a rezistenței acestor materiale când tensiunea depășește un anumit

prag. S-a căutat pe această cale să se răspundă și la problemele legate de fenomenul de conducție în esența lui.

Majoritatea cercetărilor au condus la obținerea unor modele matematice care se apropie fiecare destul de bine de realitate, fără a avea însă o teorie care să explice complet aceste fenomene.

În acest capitol vom trece în revistă principalele modele existente la ora actuală:

IV.3.1. Modelul M. Matsuoka

În 1971 M. Matsuoka [9] a propus un prim model care explica neliniaritatea varistoarelor. Pornind de la observarea microscopică dimensională a spațiului intergranular, el a exclus de la început posibilitatea conducției prin efect tunel, datorită grosimii mari, de până la $1\mu\text{m}$ a spațiului intergranular.

Mecanismul propus se bazează pe un curent limitat de sarcina spațială din zona intergranulară, generată prin migrarea ionilor din interiorul granulelor de ZnO. Pentru tensiuni scăzute, o parte din electronii injectați de dopanți este capturată și neutralizată în zona intergranulară, neparticipând la conducție. Dacă tensiunea aplicată devine suficient de mare, toți electronii contribuie la conducție, determinând creșterea curentului.

Cu toate că acest model reflecta bine forma generală a caracteristicii $I(U)$, el se bazează pe câteva ipoteze neconforme cu realitatea:

- Analizele fizico-chimice au arătat că grosimea spațiilor intergranulare este în general cuprinsă între 2×10^{-3} și $5 \times 10^{-2} \mu\text{m}$, valori mult mai mici decât cea propusă de autor ($1\mu\text{m}$);
- Dacă limitarea curentului de sarcină spațială explică efectul de varistor, conform acestui model, tensiunea de prag ar trebui să fie dependentă de densitatea acceptorilor, deci de compoziția chimică a spațiului intergranular, lucru care nu este adevărat în realitate, tensiunea de prag fiind determinată de granulația pulberii de ZnO supusă sinterizării;
- Permitivitatea dielectrică relativă propusă este de 170, în realitate experimentele au arătat o valoare măsurată $8,5 < \epsilon_r < 10$.

IV.3.2. Modelul J.D. Levine

J.D. Levine a fost primul care a propus ca mecanism al conducției emisia termoelectronică printr-o dublă barieră Schottky. În 1975, autorul prezintă o diagramă energetică a ansamblului granule ZnO – spațiu intergranular, prezentată în Figura 4.10.

El presupune că electronii liberi dintr-o parte și alta a spațiului intergranular migrează către acesta, unde vor fi reținuți captivi. Vor rezulta astfel în vecinătatea suprafețelor de separație zone părăsite, sărace în electroni (încărcate cu sarcină spațială pozitivă), între care se situează sarcinile de suprafață negative, ceea ce conduce la apariția barierei de potențial de înălțime Φ . Sarcinile de suprafață sunt exprimate printr-o distribuție N_s ce depinde exponențial de câmpul electric aplicat E și este independentă de nivelele de energie ale benzilor de conducție E_c și de valență E_v .

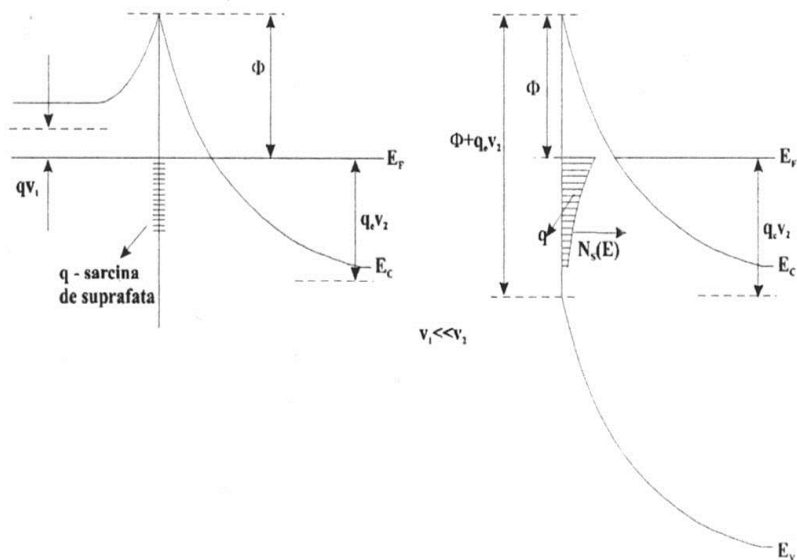


Figura 4.10: Modelul teoretic al lui J.D. Levine

Când tensiunea aplicată crește, scade înălțimea barierei de potențial, favorizând conducția la nivelul joncțiunii (spațiului intergranular) [74].

Într-o primă etapă Levine a determinat variația înălțimii barierei de potențial Φ și numai după aceea o introduce într-o ecuație relativă la efectul termoelectric la care face apel pentru a explica efectul de neliniaritate al varistorului.

Observațiile critice aduse acestui model sunt:

- Neglijarea sarcinilor celorlalte granule adiacente spațiului intergranular;
- Variația cu temperatura a lui α din teorie nu este confirmată experimental;
- Valorile lui α obținute teoretic (3-6) sunt mult prea mici față de valoarea reală (în jurul a 50);

IV.3.3. Modelul lui G.E. Pike și C.H. Seager

Modelul acestora ameliorează modelul Levine prin considerarea unei zone în spațiul intergranular, de grosime $t \ll r_1$, cu o distribuție de sarcină pozitivă N_g (goluri) spre care se vor migra electronii din interiorul granulei de ZnO.

Autorii presupun că golurile sunt create în avalanșă datorită ionizării sub efectul câmpului electric, în regiunea sărăcită în electroni.

Neliniaritatea este datorată recombinării golurilor cu electronii de la suprafața de separație dintre granule și spațiul intergranular.

În relația de stabilire a legăturii dintre curentul de conducție și tensiunea de polarizare, Pike consideră variația nivelului Fermi cu această tensiune luând în considerare granulele adiacente de ZnO dintr-o parte și alta a spațiului intergranular.

Aplicarea unei tensiuni provoacă o lărgire considerabilă a zonei părăsite de sarcina din partea polarizată pozitiv și o restrângere a celei din partea polarizată negativ (granula de ZnO). Modificarea densității de sarcină de la nivelul spațiului intergranular are drept efect coborârea barierei de potențial și trecerea ei mai ușoară de către electronii liberi.

În Figura 4.11. este prezentată esența acestui model.

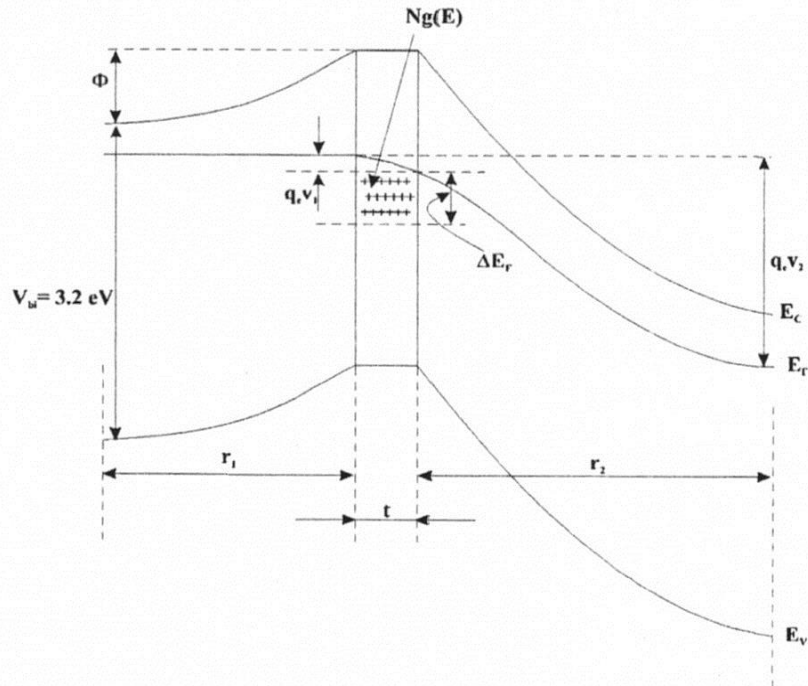


Figura 4.11: Modelul teoretic al lui Pike

IV.3.4. Modelul L.M. Levinson, H.R. Philip, G.D. Mahan

L.M. Levinson și colaboratorii lui au publicat multe lucrări în legătură cu varistoarele.

Modelul original propus de către aceștia pleacă de la diagrama benzilor de energie cu 2 bariere inverse, aplicând în această zonă legile conservării sarcinilor și ale curentului. Conducția este privită ca fiind desfășurată în două etape:

- Dinspre granula din stânga către spațiul intergranular;
- Din spațiul intergranular spre granula din dreapta;

Autorii presupun, referitor la mecanismul conductiei, că atunci când tensiunea este inferioară celei de prag, conducția este determinată prin efect termoelectronic, iar la depășirea acesteia, conducția este realizată prin efect tunel, care determină și neliniaritatea caracteristicii $I(U)$. Autorii mai sus menționați presupun pentru

tensiuni în jurul celei de prag crearea de goluri prin ionizare electronică (datorită bombardamentului electronic ce se manifestă în avalanșă), goluri care neutralizează electronii de la suprafața de separație dintre granula de ZnO și spațiul intergranular [74].

Punctul slab al acestei presupunerii este că efectul tunel simplu nu explică neliniaritatea, curentul datorat acestui efect fiind de 20 de ori mai mic decât cel termoelectronic, recunoscut a fi responsabil cu conducția la tensiuni superioare celei de prag.

IV.3.5. Modelul J. Bernasconi

Acesta face distincție între două componente ale sarcinii spațiale la nivelul granulei de ZnO, anume sarcinile spațiale donoare și cele acceptoare de electroni. Creșterea volumică a celor din urmă antrenează o diminuare a înălțimii barierei de potențial, deci implicit a curentului de scurgere în regim normal de funcționare permanentă. Neliniaritatea caracteristicii se explică prin mișcarea golurilor create prin ionizare, sub influența câmpului electric precum și neutralizarea lor în spațiul intergranular.

Teoria este deficitară în explicarea modului de apariție a golurilor.

De asemenea, expresia teoretică a înălțimii barierei de potențial tinde la zero pentru o tensiune infinită. În realitate, experimental, așa cum am arătat în subcapitolul anterior, s-a dedus valoarea aceasta ca fiind în jurul a 3 V.

Teorii asemănătoare relative la modul de conducție al varistoarelor au fost formulate și de către P.R. Emtage, K. Eda, T.K. Gupta, R. Einzinger și alții. Caracteristica generală a tuturor teoriilor este că admit efectul termoelectronic ca responsabil de mecanismul conducției pentru tensiuni sub cea de prag. Pentru tensiuni superioare valorii de prag se avansează ipoteza conducției prin efect tunel.

IV.3.6. Modelul O. Dorlanne

O abordare de calitate, care se apropie prin rezultatele experimentale de esența teoretică, a fost realizată de O. Dorlanne [2].

Teoria sa se bazează pe modelul propus de J.D. Levine al dublei bariere inverse. În Figura 4.12. se prezintă diagrama energetică a zonei granulelor de ZnO și a spațiului intergranular.

Într-o primă fază Dorlanne determină dependența dintre înălțimea barierei de potențial Φ față de diferența de potențial aplicată V . După ce stabilește această dependență, sunt explicate și cuantificate, cu ajutorul legilor fizicii corpului solid, mecanismele transportului de sarcină, deci ale conducției. În Figura 4.13 prezentăm evoluția teoretică a înălțimii barierei de potențial ϕ cu tensiunea aplicată, care reprezintă esența și scopul declarat al acestui model.

La ora actuală mecanismul conducției termoelectronice este cel mai bine verificat experimental. Conform acestei ipoteze, conducția prin efect tunel este nesemnificativă în raport cu cea termoelectronică [12].

Acest lucru este evidențiat și de caracteristicile $I(U)$ ridicate pentru temperaturi diferite.

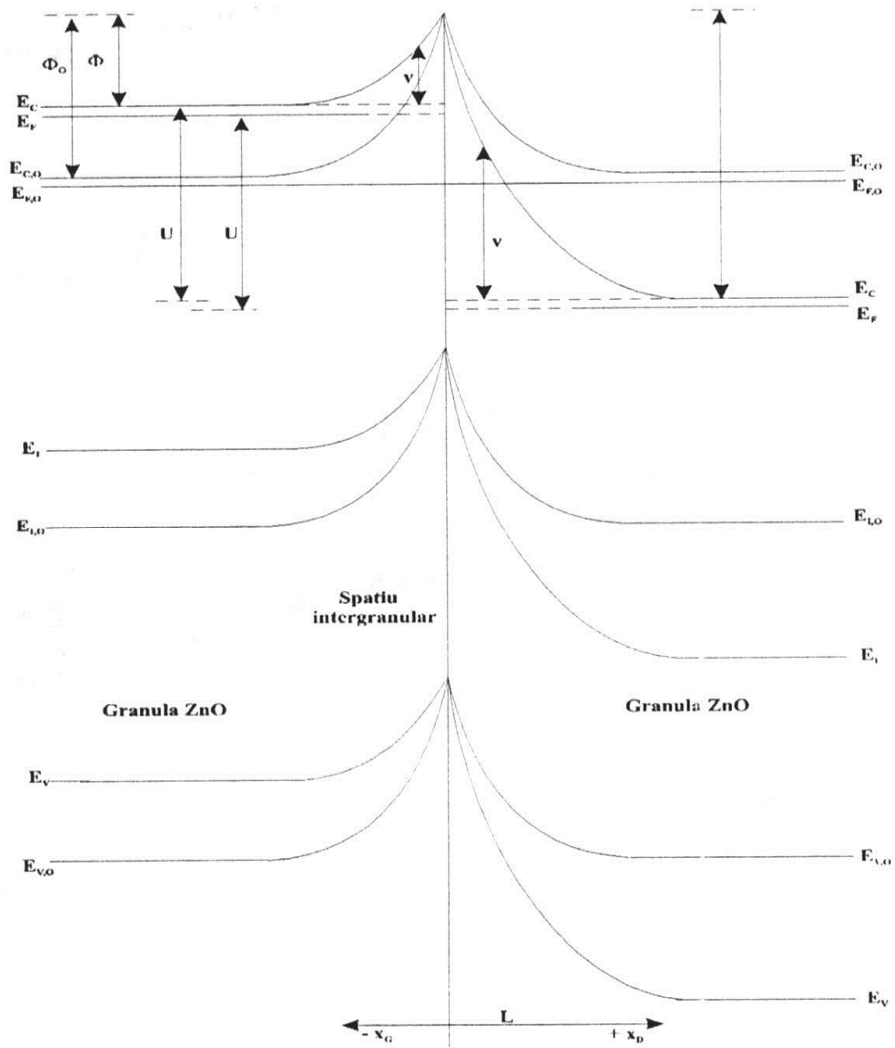


Figura 4.12: Diagrama benzilor de energie (Modelul Dorlanne)

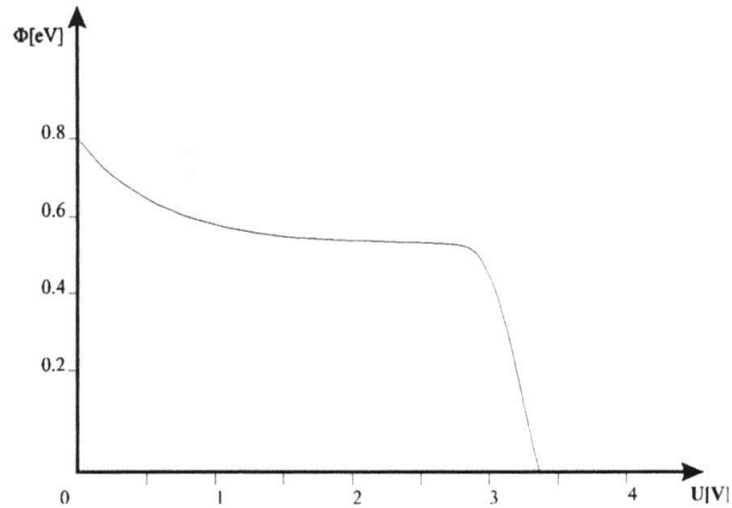


Figura 4.13: Evoluția teoretică a înălțimii barierei de potențial (Φ) cu tensiunea aplicată (U) unui spațiu intergranular

Conform teoriei lui O. Dorlanne [2], cantitatea totală de sarcină spațială din imediata vecinătate a suprafeței de separație dintre două granule (din stânga respectiv din dreapta) este, conform relației (4.8):

$$Q_e = Q_{\text{estanga}} + Q_{\text{edreapta}} = (2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0)^{1/2} \cdot \left\{ \left[\frac{q_e \cdot \Phi}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_e \cdot \Phi}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} + \left[\frac{q_e \cdot (\Phi + U)}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_e \cdot (V_{bi} - (\Phi + U))}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (4.8)$$

Semnificația termenilor principali este următoarea:

- $\frac{q_e \cdot \Phi}{k \cdot T}$ reprezintă atomii donori ai granulei din stânga;
- $e^{-\frac{q_e \cdot \Phi}{k \cdot T}} - 1$ reprezintă electronii din stânga;
- $e^{-\frac{q_e \cdot (V_{bi} - (\Phi + U))}{k \cdot T}}$ reprezintă golurile din dreapta;
- -1 reprezintă electronii din dreapta;

Este de remarcat că dacă $(\Phi + U)$ devine egal cu V_{bi} , numărul de goluri, neglijabil până atunci, crește exponențial perturbând variația lui Q_e cu U .

Semnificația fiecărei mărimi din aceste relații este prezentată mai jos:

- $Q_{estanga}$, $Q_{edreapta}$ reprezintă sarcinile spațiale localizate în stânga respectiv în dreapta joncțiunii;
- q_e reprezintă sarcina elementară a electronului;
- ϵ_r , ϵ_0 sunt permitivitățile relativă a materialului varistor respectiv absolută a vidului;
- n_D este densitatea atomilor donori (egală în general cu cea a atomilor acceptori);
- k reprezintă constanta lui Boltzman;
- T este temperatura absolută (măsurată în grade Kelvin);
- V_{bi} este diferența de potențial corespunzătoare benzii interzise (egală cu 3,2 V pentru varistoarele pe bază de ZnO);
- Φ este înălțimea barierei de potențial, corespunzătoare unei tensiuni U aplicate pe joncțiune;

În această relație, prin neglijarea influenței purtătorilor minoritari, se regăsește expresia la care au ajuns și ceilalți autori:

$$Q_e = (2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0)^{1/2} \cdot [\Phi^{1/2} + (\Phi + U)^{1/2}] \quad (4.9)$$

Determinarea înălțimii barierei de potențial Φ se va face utilizând relația de mai sus sau relația (4.8) și conduce la o relație de tipul:

$$\left[\frac{q_e \cdot \Phi}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_e \cdot \Phi}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} + \left[\frac{q_e \cdot (\Phi + U)}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_e \cdot (\Phi + U)}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} = 2 \cdot \left(\frac{q_e \cdot \Phi}{k \cdot T} - 1 \right)^{1/2} \cdot \left(1 + \frac{U}{2 \cdot V_{bi}} \right) \quad (4.10)$$

Notațiile sunt cele anterioare.

În plus $\Phi_0 = 0,8$ eV, ca o constantă de material pentru varistoarele ZnO.

Relația (4.10) permite determinarea prin calcul numeric a înălțimii barierei de potențial în funcție de tensiunea aplicată, corespunzător graficului din Figura 4.13.

Din această reprezentare grafică se constată o scădere a înălțimii barierei de potențial, pronunțată pentru o tensiune de polarizare care depășește 2,7 V. Această cădere este determinată de apariția în număr mare a golurilor din granula de oxid din dreapta atunci când $\Phi + U = q_e \times V_{bi}$ (adică pentru o tensiune $U = 2,7$ V).

Dacă nu ar fi considerate golurile, ar trebui ca Φ să crească pentru o tensiune $U > 3$ V, ceea ce ar fi în contradicție cu evoluția reală a caracteristicii $I(U)$.

Concluzionând, neliniaritatea puternică ce apare în jurul unei tensiuni de 3 V se explică prin apariția în număr mare a golurilor în partea dreaptă a ansamblului celor două granule de ZnO. Acestea, prin neutralizarea sarcinilor spațiale, produc o micșorare semnificativă a înălțimii barierei de potențial, determinând astfel un proces de ambalare în avalanșă și creștere rapidă și pronunțată a curentului.

IV.4. Mecanismele degradării la varistoarele pe bază de ZnO

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.

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 la solicitări cu tensiuni alternative determină o degradare simetrică.

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

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 [74].

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 și chimice ale mediului înconjurător asupra varistorului.

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 microscopic 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 α 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.

Vom prezenta pe scurt principalele modele care tratează degradarea varistoarelor pe bază de ZnO.

IV.4.1. 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.

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.

Concluziile care se desprind sunt:

1. Pentru solicitări unidirecționale (tensiune continuă):

- Modificarea $I(U)$ la o caracteristică cu tensiune inversă celei cu care a fost degradată, este provocată printr-o migrație a ionilor în regiunea intergranulară bogată în Bi_2O_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 O^{2-}), diminuându-se. În plus, ionii Zn^{2+} interstițiali difuzează către suprafața de separație intergranulară, unde se pot combina cu 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.

Mecanismul migrației de ioni de O^{2-} într-o structură formată din 3 granule de ZnO între care se află spațiul granular bogat în Bi_2O_3 este prezentat în Figura 4.14.

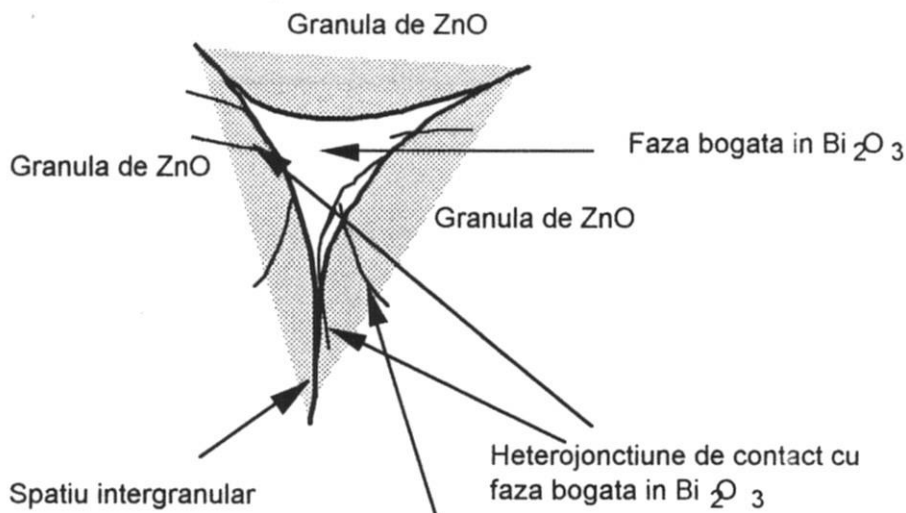


Figura 4.14: Diagrama schematică a pierderilor în oxigen

Migrația poate fi provocată pe două căi:

- Sub acțiunea gradientului de concentrație de-a lungul spațiului intergranular;
- Sub acțiunea câmpului electric aplicat heterocojuncțiunii din stânga asupra Bi_2O_3 , unde o parte din ionii de O^{2-} pot fi neutralizați, altă parte fixându-se pe suprafața din dreapta.

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.

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 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.

Schematic, situația este prezentată în Figura 4.15:

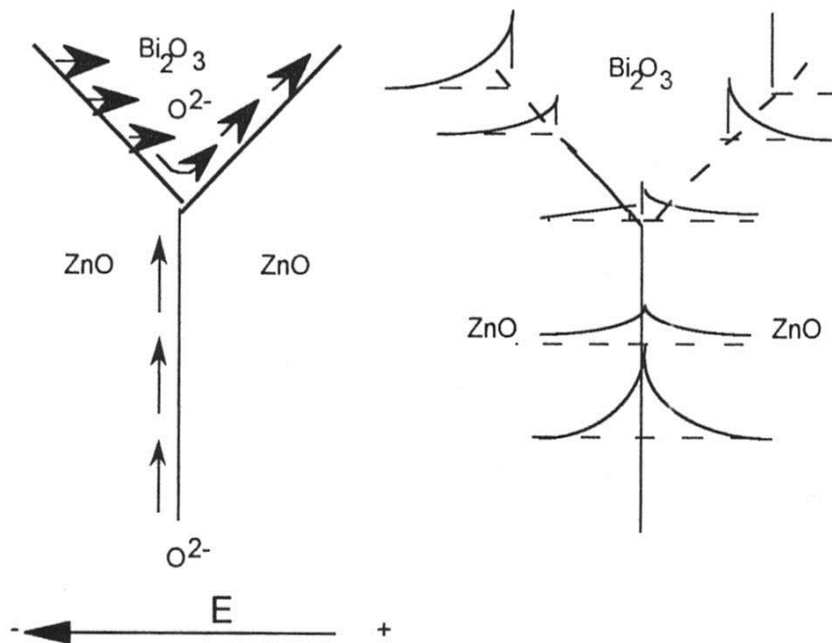


Figura 4.15: Deformarea barierei Schottky datorată câmpului electric și barierele deformate asimetric conform situației anterioare

IV.4.2. Modelul T.K. Gupta și colaboratorii

Autorul explică faptul că barierea 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.

IV.4.3. 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.

Concluzionând, fenomenul de degradare al varistoarelor este un fenomen natural, care poate fi totuși limitat, dar nu eliminat.

IV.5. Distrugerea

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

- Străpungere punctiformă
Dacă un anume 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 Ω). 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 [96].
Oricare din aceste forme de distrugere sunt ireversibile. Varistorul care a suferit asemenea constrângeri trebuie înlocuit din echipament pentru a evita eventuale scurtcircuite cauzate de rezistența mică a varistorului chiar numai sub acțiunea tensiunii nominale a rețelei, sau, în cel mai rău caz, incendii și accidente.

IV.6. Concluzii

Concluziile principale ale acestui capitol sunt:

- Varistoarele pe bază de ZnO sunt ceramici semiconductoare, (practic sunt semiconductori donori de tip n), conductivitatea lor fiind de natură:
 - intrinsecă – datorată atomilor (ionilor) de Zn interstițiali și a lacunelor de oxigen;
 - extrinsecă – datorată dopajului cu Co sau Mn de exemplu;
- Aceste dispozitive semiconductoare prezintă o limitare a conducției de către 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 (4.7). 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 μm . Este posibil să se ajungă la dimensiuni între 3 μm și 150 μm , 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 μm .
- Varistorul pe bază de ZnO prezintă o capacitate electrică neglijabilă, invers proporțională cu numărul de interstiții. Această observație merită luată în seamă mai ales în aplicațiile în curent alternativ. Capacitatea electrică este deosebit de importantă și pentru aplicațiile în domeniul telecomunicațiilor. Pentru reducerea capacității dielectrice se dorește utilizarea unui material cu interstiții cât mai numeroase;
- Pierderile dielectrice sunt foarte reduse ($\text{tg } \delta < 0,03$) și prezintă un maxim la frecvența de 200 kHz. Această frecvență trebuie evitată în aplicațiile din telecomunicații;
- 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/cm³;

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 neliniaritate ale varistoarelor.

Materialul varistor având 5 oxizi aditivi are performanțe bune pentru aplicațiile din instalațiile electrice de alimentare, iar materialul având 2 oxizi aditivi se pretează pentru aplicațiile din domeniul telecomunicațiilor.

Indiferent de tipul, forma sau domeniul de utilizare al varistoarelor, tehnologia lor de fabricație comportă aceleași faze ale procesului tehnologic, descrise succint în acest capitol. Tehnologia pusă la punct la L.G.E. Toulouse este una dintre cele mai performante din lume, la ora actuală.

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;
- Modul de îmbrăcare al corpului varistorului;
- 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 neliniaritate, 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.

Putem rezuma că, la ora actuală, se cunosc cu certitudine următoarele:

- Dimensiunile granulelor de ZnO nu sunt identice, dar, pentru un anumit material, statistic, ele pot fi grupate într-un anumit interval;
- Majoritatea parametrilor de material sunt bine determinați;
- Tipodimensiunile de varistoare sunt clar definite;
- Stabilitatea termică a varistoarelor, la care curentul este activat termic, poate fi îmbunătățită prin metode externe (radiatoare, răcire forțată, etc.);
- Căile de curent în interiorul varistorului sunt aproximativ paralele, ceea ce sugerează o uniformitate destul de mare a materialului;
- Varistoarele pentru aplicații la joasă tensiune și în telecomunicații au o capacitate de absorbție redusă în energie, o capacitate electrică ridicată, precum și o neliniaritate redusă. Acest lucru a îngreunat utilizarea lor în diverse aplicații din domeniul electronicii și telecomunicațiilor;
- Rolul fiecărui element adițional este bine conturat. Totuși, se pot face o serie de noi studii privind proporțiile diferiților aditivi.

În schimb, următoarele aspecte se cunosc insuficient de bine:

- Mecanismele conducției pentru varistoarele pe bază de oxizi metalici;

- Posibilitatea adăugării de noi aditivi în compoziția chimică a varistoarelor, în scopul îmbunătățirii performanțelor acestora;
- Modalitatea de îmbunătățire a procesului tehnologic de fabricație al varistoarelor, sau, chiar conceperea de noi tehnologii;
- Corelațiile dintre diversele mecanisme de conducție și comportamentul fizic al varistoarelor de joasă tensiune;
- Cauza degradării ireversibile graduale (și, în general, mecanismele degradării reversibile și ireversibile);
- Cum se poate îmbunătăți stabilitatea termică a varistoarelor prin simpla modificare a compoziției chimice a acestora sau a procesului tehnologic de fabricație;
- Cum se poate prevedea (și evita) degradarea reversibilă;
- Cum se poate prevedea (și evita) degradarea ireversibilă.

IV. 7. Contribuții personale și originale

Dintre contribuțiile originale cele mai importante, aferente acestui capitol, amintim:

- Elaborarea de către autor a trei serii de câte 6 varistoare, având diametrele utile de 7, 20 și 30 mm utilizate ulterior pentru experimente, după rețeta și în cadrul Laboratorului "Génie Electrique" al Universității PAUL SABATIER din Toulouse (L.G.E.T.). Primele două serii fiind complet îmbrăcate în rășină epoxidică, iar ultima serie fiind o serie de discuri îmbrăcate doar pe lateral, toate cele trei serii având 5 oxizi aditivi. Aceste trei serii sunt destinate funcționării la tensiunea de 230 Vef. O a patra serie a fost concepută pentru a opera la 48 V și are un diametru util de 7 mm, complet îmbrăcată în rășină epoxidică. Are în compoziție doar 2 oxizi aditivi, fiind destinată aplicațiilor electronice, unde este necesară o capacitate electrică mai redusă.
- 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;
- Descrierea succintă a celor mai importante mecanisme care încearcă să explice conducția și degradarea varistoarelor;
- Sinteza normelor europene și internaționale privind fabricarea și calitatea varistoarelor.

Capitolul V Alegerea și verificarea varistoarelor utilizate

V.1. Dimensionarea varistoarelor utilizate

În literatura de specialitate, pe plan mondial, nu există un set complet de algoritmi sau de proceduri de alegere a varistoarelor pentru diferite aplicații sau pentru proiectarea echipamentelor de protecție care le înglobează.

Deci, nu există „manualul minune” care să ne ofere un răspuns la întrebarea „Ce fel de varistor să alegem?” În funcție de experiența sau de rezultatele anterioare, fiecare fabricant de varistoare are propriile soluții de proiectare, de cele mai multe ori empirice, sau neluând în calcul toate aspectele dimensionării.

Articolele sau lucrările științifice de specialitate oferă o viziune parțială asupra acestui subiect, ele intrând foarte mult în detalii legate numai de câte un aspect al dimensionării.

În continuare vom propune un algoritm pentru stabilirea rapidă a tipului de varistoare care trebuie utilizate, luând în calcul majoritatea aspectelor posibile.

Acest algoritm are 3 pași importanți:

1. Stabilirea tipului și tensiunii nominale a varistorului (calculul electric);
2. Calculul (și verificarea) curentului maxim suportabil, al energiei preluate și al căldurii disipate (calculul termic);
3. Compararea tensiunii și a curentului rezidual suportat de echipamentul de protecție la supratensiuni, ca valoare de vârf, cu limita maximală a supratensiunilor temporare care pot apărea în instalația de protejat (calculul de siguranță).

În continuare vom detalia acești pași, cu exemplificare pentru situația concretă. Notațiile și mărimile utilizate în acest capitol sunt în conformitate cu normele internaționale și au fost definite în Capitolul II.

V.1.1. Pasul I (calculul electric)

Este de dorit ca echipamentul de protecție să aibă un nivel de protecție cât mai apropiat de tensiunea nominală a rețelei (care este de 230 Vef pentru rețelele de alimentare și 48 Vcc pentru cele interne ale centralei telefonice).

Se pornește de la cerințele echipamentului de protejat sau ale rețelei în care acesta este montat.

Pentru tensiunea nominală de 230 Vef:

Așa cum am precizat în Capitolul II, se acceptă o posibilă creștere a tensiunii de alimentare la nivelul consumatorului final, cu până la 6 %, la o valoare denumită în standarde U_{MCOV} , definită ca tensiunea maximală de serviciu permanent, care reprezintă limita maximă admisibilă, ca valoare efectivă, sau ca valoare permanentă în curent continuu a tensiunii de alimentare de frecvență industrială (**Maximum Continuous Operating Voltage**, în engl.). Această limită este dată de instalația de protejat. Pentru instalațiile de joasă tensiune se consideră valabilă relația:

$$U_{MCOV} = 230 \times 1,06 = 244 \text{ Vef} \quad (5.1)$$

Totuși, așa cum am evidențiat, recomandăm o valoare echivalentă de 1,1 (creștere de 10 %) pentru coeficientul de siguranță. Chiar dacă toate echipamentele de rezistență din construcție, în mod obligatoriu, la 1,06 x tensiunea nominală, în regim permanent, nelimitat, ele vor rezista și la 1,1 x tensiunea nominală, cel puțin pentru o durată destul de mare de timp;

În realitate, acest coeficient este în jurul a 1,08...1,09.

Deci, valoarea maximă a tensiunii permanente o putem redefini ca fiind:

$$U_{MCOV} = 230 \times 1,1 = 253 \text{ Vef (aprox. 250 Vef)} \quad (5.2)$$

Tensiunea de alimentare accidentală care apare la bornele consumatorului protejat rămâne sinusoidală (cauza cea mai frecventă a apariției acestui tip de avarie o reprezintă un reglaj defectuos al transformatoarelor). Prin urmare, între valoarea efectivă U_{MCOV} și amplitudinea acesteia există relația U_{mMCOV} :

$$U_{mMCOV} = 1,41 \times U_{MCOV} = 357 \text{ (aprox. 360 V)} \quad (5.3)$$

Aceste mărimi fac referiri la parametrii echipamentului de protejat.

Mărirea varistorului care trebuie ajustată este tensiunea de prag U_N . Aceasta trebuie să fie, teoretic mai mare sau cel puțin egală cu valoarea amplitudinii tensiunii sinusoidale permanente (sau cu valoarea tensiunii continue permanente).

Pentru a putea face dimensionarea corespunzătoare echipamentului de protecție, trebuie să avem în vedere și tensiunea U_{RMS} (**la limită = U_{MCOV}**) care reprezintă tensiunea efectivă maximă, în serviciu permanent la bornele echipamentului de protecție la supratensiuni, și care se acceptă ca fiind egală cu U_{MCOV} , cerută de instalația de protejat.

Prin urmare $U_{RMS} = 253 \text{ Vef}$

Iar amplitudinea maximă a acesteia este $U_{mRMS} = 253 \times 1,41 = 357 \text{ V}$

Deci, U_{mRMS} la limită este egal cu U_{mMCOV} , și, evident, cu U_N .

Empiric, raportul U_N / U_{RMS} este recomandat ca fiind 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.). În cazul recomandat de standarde, raportul lor este egal cu $1,06 \times 1,41 = 1,5$. În cazul nostru, pentru început, acest raport are valoarea $1,1 \times 1,41 = 1,55$.

Motivul pentru care se preferă o valoare mai mare a acestui raport este simplu. De fiecare dată când se ajunge, în exploatarea normală, fără a deteriora echipamentul de protejat în jurul valorii maxime tolerate (360 V) a sinusoidalei tensiunii de alimentare (în jurul valorii de amplitudine), există riscul intrării în conducție a varistorului. Acest lucru conduce la solicitarea în mod inutil a acestuia, provocând încălzirea lui și intrarea în conducție accelerată, ceea ce implică o degradare accentuată și o reducere substanțială a duratei de viață, și, în situații limită, la ambalarea termică și distrugere varistorului, însoțită de un scurtcircuit în instalația de protejat.

Al doilea element care trebuie luat în calcul este sensibilitatea varistorului. Este de dorit ca varistorul să fie cât mai sensibil, pentru a răspunde cât mai prompt la cele mai mici solicitări. Evident, acest lucru implică o tensiune de prag cât mai mică, deci, se ajunge în situația intrării premature în conducție a varistorului.

Proiectarea unui echipament eficient de protecție la supratensiuni, bazat pe tehnologia varistoarelor ZnO constă în găsirea compromisului între fiabilitate și sensibilitate.

Pentru aplicațiile din domeniul electronicii, în mod evident, sensibilitatea este primordială. Dar și siguranța în exploatare a centralei de telefonie este esențială. Având în vedere caracteristicile curent-tensiune și definirea coeficientului de neliniaritate, putem trage următoarele concluzii:

Coeficientul de neliniaritate pentru varistoarele propuse fiind $\alpha = 20$, definit prin relațiile (3.2) și (3.3), presupunând că operăm în zona tensiunii de deschidere, calculată la limită ca fiind 357 V, iar curentul fiind de 1 mA (deschiderea varistorului), se poate deduce, pornind de la relația (3.3), o formulă de legătură între creșterea Δu a tensiunii aplicate varistorului și creșterea Δi rezultată pentru curentul prin varistor, dacă în situația inițială tensiunea era $U_{RMS} = 357$ V, iar curentul corespunzător era $i = 1$ mA:

$$[1/(1+\Delta i)] = [U_{RMS}/(U_{RMS} + \Delta u)]^\alpha$$

de unde, ansamblul relațiilor fiind notat cu (5.4), prin rescrierea relației de mai sus rezultă:

$$\Delta i = [(U_{RMS} + \Delta u)/U_{RMS}]^\alpha - 1, \quad \Delta u = U_{RMS} [(1+\Delta i)^{1/\alpha} - 1] \quad (5.4)$$

Pentru situația concretă, $U_N \geq U_{MCOV} = U_{RMS}$

Dublarea curentului ($\Delta i = 1$ mA) ar rezulta ca urmare a unui $\Delta u = 12,56$ V. Evident, căldura disipată în varistor ar crește de 4 ori, ceea ce ar duce la deteriorarea lui.

Compromisul se va realiza prin utilizarea unor varistoare având o diferență între cele două mărimi definite anterior ca fiind de maximum 3-4 V, ceea ce implică o valoare a raportului aproximativ $U_N / U_{RMS} = 1,55 \times 1,01 = 1,56$

În consecință, tensiunea de prag a varistoarelor alese pentru alimentarea la 230 Vef în c.a. este de $253 \times 1,56 = 395$ V (aproximativ).

Evident, producerea unor astfel de varistoare pentru o anumită tensiune de deschidere este extrem de dificilă. În subcapitolele următoare vom detalia performanțele măsurate ale varistoarelor alese.

S-au produs trei serii a câte 6 astfel de varistoare, de 7, 20 și 30 mm. Primele două serii au fost utilizate pentru modulul de protecție trifazat, descris în Capitolul III, montat pe intrarea SAM. Aceste varistoare sunt complet îmbrăcate în rășină epoxidică. Varistoarele tip disc sunt utilizate pentru protecția ieșirilor de 230 Vef necesare serviciilor proprii ale centralei telefonice. Acestea sunt îmbrăcate numai pe lateral în rășină. Calculul diametrelor acestora va fi detaliat la Pasul 2.

În conformitate cu cele detaliate în Capitolul IV, se cunoaște, pentru materialul cu 5 oxizi aditivi, că, tensiunea de prag a unei joncțiuni intergranulare elementare este $u_N = 3,02$ V (aproximativ), iar, prin măsurare cu microscopul electronic, a rezultat că diametrul mediu al unei granule este $d_g = 21$ μ m (aproximativ), de unde, înălțimea fiecărui varistor, indiferent de diametru, va fi dată de relația:

$$H = d_g \times U_N / u_N = 0,021 \times 395 / 3,02 = 2,8 \text{ mm} \quad (5.5)$$

Pentru a obține diametrul final în zona de 2,8 mm, varistorul nesinterizat avea cca. 3,1 mm, și un diametru de cca. 1,1 ori mai mare, pentru ca, la finalul procesului tehnologic să se încadreze în limitele specificate.

Pentru tensiunea de 48 Vcc

În situația tensiunii continue, alegerea varistoarelor se face mult mai simplu, urmând, practic, aceeași pași, mai puțin calculele de tensiune efectivă.

Așa cum am precizat în Capitolul II, se acceptă o posibilă creștere a tensiunii de alimentare la nivelul consumatorului final, cu până la 6 %, la o valoare denumită în standarde **U_{MCOV}**, definită ca tensiunea maximală de serviciu permanent, care reprezintă limita maximă admisibilă, ca valoare efectivă, sau ca valoare permanentă în curent continuu a tensiunii de alimentare de frecvență industrială (**Maximum Continuous Operating Voltage**, în engl.). Această limită este dată de instalația de protejat.

Pentru instalațiile telefonice la 48 Vcc se consideră valabilă relația:

$$\mathbf{U_{MCOV}} = 48 \times 1,06 = 51 \text{ Vcc (aproximativ)} \quad (5.6)$$

Totuși, așa cum am evidențiat, recomandăm o valoare de 1,1 (creștere de 10 %) pentru coeficientul de siguranță.

Chiar dacă toate echipamentele electronice din modulele de comutație ale centralelor rezistă din construcție, în mod obligatoriu, la o supratensiune având 1,06 x tensiunea nominală, în regim permanent, nelimitat, ele vor rezista și la 1,1 x tensiunea nominală, cel puțin pentru o durată destul de mare de timp;

În realitate, la fel ca și în situația aplicațiilor în curent alternativ, acest coeficient este în jurul a 1,08...1,09.

Deci, valoarea maximă a tensiunii permanente o putem redefini ca fiind:

$$\mathbf{U_{MCOV}} = 48 \times 1,1 = 52,8 \text{ Vcc (aprox. 53 Vcc)} \quad (5.7)$$

Aceste mărimi fac referiri la parametrii echipamentului de protejat.

Mărima varistorului care trebuie ajustată este tensiunea de prag **U_N**. Aceasta trebuie să fie, teoretic mai mare sau cel puțin egală cu valoarea amplitudinii tensiunii sinusoidale permanente (sau cu valoarea tensiunii continue permanente).

Pentru a putea face dimensionarea corespunzătoare echipamentului de protecție, trebuie să avem în vedere și tensiunea **U_{DC} (la limită = U_{MCOV})**, care reprezintă tensiunea maximală ca valoare continuă (**Direct Current** în engl.), în serviciu permanent, la bornele echipamentului de protecție la supratensiuni, și, care, la limită este egală cu tensiunea impusă de funcționarea instalației de protejat, în curent continuu. În cazul rețelelor de curent alternativ nu prezintă mare importanță; Aceasta se acceptă ca fiind, la limită, egală cu **U_{MCOV}**, cerută de instalația de protejat.

Prin urmare **U_{DC} = 53 Vcc**.

Deci, **U_{DC}** la limită este egal cu **U_{MCOV}**, și, evident, cu **U_N**. Empiric, raportul **U_N/ U_{DC}** este recomandat ca fiind în jur de 1,1...1,2.. În cazul recomandat de standarde, raportul lor este egal cu 1,06. În cazul nostru, pentru început, acest raport are valoarea 1,1.

Prin urmare, **U_N = 53 x 1,1 = 58,3 V**

Motivul pentru care se preferă o valoare mai mare a acestui raport este simplu. De fiecare dată când se ajunge, în exploatarea normală, fără a deteriora echipamentul de protejat în jurul valorii maxime tolerate (53 Vcc) a tensiunii de alimentare, există riscul intrării în conducție a varistorului. Acest lucru conduce la solicitarea în mod inutil a acestuia, provocând încălzirea lui și intrarea în conducție

accelerată, ceea ce implică o degradare accentuată și o reducere substanțială a duratei de viață, și, în situații limită, la ambalarea termică și distrugere varistorului, însoțită de un scurtcircuit în instalația de protejat.

Al doilea element care trebuie luat în calcul, la fel ca în situația montajului în alternativ, este sensibilitatea varistorului. Este de dorit ca varistorul să fie cât mai sensibil, pentru a răspunde cât mai prompt la cele mai mici solicitări. Evident, acest lucru implică o tensiune de prag cât mai mică, deci, se ajunge în situația intrării premature în conducție a varistorului.

Și pentru aplicațiile în curent continuu, proiectarea unui echipament eficient de protecție la supratensiuni, bazat pe tehnologia varistoarelor ZnO constă în găsirea compromisului între fiabilitate și sensibilitate.

Pentru aplicațiile din domeniul electronicii, în mod evident, sensibilitatea este primordială. Dar și siguranța în exploatare a centralei de telefonie este esențială. Având în vedere caracteristicile curent-tensiune și definirea coeficientului de neliniaritate, putem trage următoarele concluzii, identic cu cele pentru alimentarea în alternativ:

Coeficientul de neliniaritate pentru varistoarele propuse fiind $\alpha = 18$, definit prin relațiile (3.2) și (3.3), și, presupunând că operăm în zona tensiunii de prag, calculată la limită ca fiind 53 V, iar curentul fiind de 1 mA (pragul varistorului), se poate deduce următorul grup de formule, în mod similar cu cele prezentate anterior pentru tensiunea nominală de 230 Vef:

$$[1/(1+\Delta i)] = [U_{DC}/(U_{DC} + \Delta u)]^\alpha$$

de unde, ansamblul relațiilor fiind notat cu (5.8), prin rescrierea relației de mai sus rezultă:

$$\Delta i = [(U_{DC} + \Delta u)/U_{DC}]^\alpha - 1, \quad \Delta u = U_{DC} [(1+\Delta i)^{1/\alpha} - 1] \quad (5.8)$$

În urma acestor calcule elementare rezultă că, dacă în situația inițială tensiunea era de $U_{DC} = 53$ Vcc, iar curentul care trece prin varistor este de 1 mA, atunci dublarea curentului ($\Delta i = 1$ mA) ar rezulta ca urmare a unui $\Delta u = 2,08$ V. În mod corespunzător, căldura disipată în varistor ar crește de 4 ori, ceea ce ar duce la deteriorarea lui.

Compromisul se va realiza prin utilizarea unor varistoare având o diferență între cele două mărimi definite anterior ca fiind de maximum 1 V, ceea ce implică, conform relațiilor (5.8), o creștere a curentului cu 0,4 mA, față de 1 mA. Considerând o diferență de 0,53 V, vom obține o valoare $U_N = 58,53$ V, de unde: $U_N/U_{DC} = 58,83 / 53 = 1,11$, rezultând o creștere de 1,01 ori a acestui raport, față de 1,1.

În consecință, tensiunea de prag a varistoarelor alese pentru alimentarea la 48 Vcc este de $53 \times 1,11 = 58,83$ Vcc. Practic, putem considera rotunjirea acesteia la valoarea de 59 Vcc.

Din punct de vedere tehnologic, în industrie, producerea unor astfel de varistoare dedicate, pentru o anumită tensiune de deschidere, este extrem de dificilă. În subcapitolele următoare vom detalia performanțele măsurate ale varistoarelor alese.

S-a produs o serie a câte 6 astfel de varistoare, de 7 mm. Varistoarele descrise mai sus sunt destinate a opera pe ieșirile în curent continuu la 48 V ale SAM. Aceste varistoare sunt complet îmbrăcate în rășină epoxidică. Calculul diametrelor acestora va fi detaliat la Pasul 2.

În conformitate cu cele detaliate în Capitolul IV, se cunoaște, pentru materialul cu 2 oxizi aditivi, că, tensiunea de prag a unei joncțiuni intergranulare

elementare este $u_N = 3,03$ V (aproximativ), iar, prin măsurare cu microscopul electronic, a rezultat că diametrul mediu al unei granule este $d_g = 44$ μ m (aproximativ), de unde, înălțimea fiecărui varistor, indiferent de diametru, va fi dată, empiric, de relația:

$$H = d_g \times U_N / u_N = 0,044 \times 59 / 3,03 = 0,9 \text{ mm (aproximativ)} \quad (5.9)$$

Pentru a obține diametrul final în zona de 7 mm, varistorul nesinterizat avea cca. 0,9 mm înălțime, și un diametru de cca. 1,1 ori mai mare, pentru ca, la finalul procesului tehnologic să se încadreze în limitele specificate. Diametrul și înălțimea pot fi ajustate și mecanic, după sinterizare. O problemă care poate apărea în situația acestor varistoare este fragilitatea mecanică, datorită înălțimii reduse.

Dimensionarea electrică (Pasul I) ne dă informații despre tipul, tensiunea de deschidere și înălțimea varistorului (dacă nu se utilizează varistoare standardizate din comerț). Pasul I este verificat și corectat doar de Pasul III. Pasul II va oferi informații despre diametrul varistorului.

Această lucrare nu are ambiția de a realiza un „manual de alegere a varistoarelor”, ci își dorește să prezinte doar o metodologie originală, simplă și eficientă pentru selectarea unor varistoare destinate aplicațiilor la joasă tensiune. Foarte puțini fabricanți de echipamente de protecție împotriva supratensiunilor își produc singuri varistoarele sau fac apel la producătorii de varistoare pentru a realiza serii speciale de componente.

În mod evident, majoritatea producătorilor apelează la soluțiile standardizate, existente pe piață. În general, tensiunea de prag (de deschidere) a varistoarelor este ajustată cu o precizie destul de bună de către producătorul de varistoare, astfel încât să se ocupe destul de bine întreaga plajă de valori solicitate de către aplicațiile industriale și domestice, inclusiv telecomunicațiile și industria auto, ceea ce nu exclude și cercetările privind optimizarea performanțelor acestora.

Așa cum am spus anterior, în industrie se practică, din rațiuni tehnologice, ajustări ale înălțimii varistoarelor cu până la 1 mm pentru varistoarele cu tensiune de deschidere superioară valorii de 50 Vcc.

Pentru varistoarele cu aplicație în domeniul de înaltă tensiune, ajustarea este și mai mare, ajungând și la 2-3 mm.

V.1.2. Pasul II (calculul termic)

La Pasul I s-au anticipat diametrele alese, atunci când am descris soluția finală adoptată. În realitate, alegerea diametrului varistorului (deci a capacității sale de absorbție în energie) este făcută în această etapă.

Dimensionarea termică a varistoarelor este o etapă deosebit de importantă, în scopul evitării supraîncălzirii acestora și distrugerii lor prin „ambalare termică”.

La ora actuală există numeroase studii privind dimensionarea termică și creșterea stabilității termice a varistoarelor pe bază de oxizi metalici [21].

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

- domeniul de utilizare și destinația lor (alimentare în trifazat JT și telecomunicații);
- nivelul nominal de tensiune (230 Vef și 48 Vcc);
- tipul (amplitudinea și durata) supratensiunilor care apar la bornele lor (preponderent tranzitorii, tip lovitură de trăznet);

- materialul din componența varistorului (cu 5 și, respectiv 2 oxizi aditivi);
- geometria varistorului și construcția echipamentului (disc simplu sau disc acoperit integral în rășină epoxidică de culoare roșie, galbenă și albastră, parametru important doar în situația analizei în detaliu a cedării de căldură prin radiație termică);
- presiunea de contact a electrozilor pe varistoare și omogenitatea coloanei (electrozi monofilari sudați);
- vârsta și gradul de uzură al echipamentului (echipamente noi);
- modul de amplasare (în execuție deschisă);
- condițiile climatice în care operează (interior, incintă climatizată);
- modul de exploatare și de asigurare a mentenanței (fără mentenanță);
- frecvența apariției supratensiunilor (max. 100 incidente pe an).

În cazul aplicațiilor din această lucrare, parametrii de mai sus trebuie specificați (operație efectuată între paranteze):

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 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.

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 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], [76].

Trecerea din regim termic permanent în regimul termic (tranzitoriu) de ambalare termică se face în următoarele cazuri [16], [49],[21]:

- **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.

Noțiunea de "ambalare termică" se poate defini numai prin stabilirea 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.

În continuare vom detalia calculul termic pentru fiecare regim de funcționare:

a). În regimul de serviciu nominal

În standardele de specialitate se face referire la curentul I_r , care reprezintă curentul de scurgere, adică curentul care se stabilește prin echipamentul de protecție la supratensiuni atunci când este alimentat cu tensiunea nominală U_n , având în situația varistoarelor pe bază de ZnO o altă accepțiune decât în cazul descărcătoarelor cu eclatoare, cu o valoare mai mică de 100 μ A pentru aplicațiile la joasă tensiune unde, în cazul nostru, $U_n = 230 V_{ef}$ sau 48 Vcc;

Trecerea acestui curent nu trebuie să producă ambalare termică. În general, se consideră că riscul de ambalare termică apare după o încălzire cu cca. 20 °C a varistorului [21], ceea ce înseamnă o temperatură cu 20 °C mai mare decât cea a mediului ambiant. Valoarea respectivă a fost determinată analizând expresia curentului electric prin varistor, care, așa cum vom arăta imediat, este activat termic.

Această etapă este doar o etapă preliminară a dimensionării termice, care permite stabilirea unui diametru minimal al varistorului, care va fi ulterior mărit după evaluarea stabilității termice globale, și, la final, o dată varistorul ales, din caracteristica statică se va verifica din nou curentul de scurgere la tensiunea nominală, care va trebui să rămână inferior valorii maxime de 0,1 mA setată inițial.

Toate calculele se efectuează la temperatura ambiantă de 20 °C, ceea ce conduce la o temperatură a varistorului de 40 °C. Metoda aceasta nu 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?", acesta fiind subiectul altor studii [21] mult mai laborioase.

Prin aceste calcule minime se realizează doar proiectarea dispozitivului. Creșterea stabilității termice prin metode specifice nu face obiectul prezentului studiu.

Răspunsul la această întrebare nu este întotdeauna furnizat explicit de către fabricantul 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 al depozitării varistoarelor.

De regulă, temperatura ambiantă de exploatare și de depozitare a varistorului nu trebuie să depășească, pentru varistoarele de joasă tensiune, valoarea de 60 – 70 °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 [21].

În regim de serviciu nominal (permanent) se atinge echilibrul termic între căldura produsă în interiorul varistorului prin trecerea curentului de scurgere și căldura cedată prin transmisie combinată (conducție + convecție), ambele raportate la intervalul de timp.

Pentru modulele varistoarele destinate a funcționa la $U_n = 230$ Vef:

Ecuția acestui echilibru se scrie ca:

$$U_n \cdot I_f = \alpha \cdot S_l \cdot \tau \quad (5.10)$$

Unde:

- U_n este tensiunea nominală (230 Vef);
- I_f este curentul de scurgere (0,1 mA);
- α este transmisivitatea termică globală (prin convecție și radiație, egală cu $17 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ grad})$);
- τ este supratemperatura acceptabilă a varistorului ($\tau(\mathbf{t}) = \theta - \theta_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$);
- S_l este aria laterală de cedare a căldurii. Pentru varistoarele de tip disc rezultă $S_l = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} + \pi \cdot d \cdot h$, d fiind diametrul minim căutat, iar h este înălțimea acestuia, anume 2,8 mm.

În consecință, ecuația (5.10) se va rescrie ca:

$$d^2 + 2dh - \frac{2 \cdot U_n \cdot I_f}{\alpha \cdot \pi \cdot \tau} = 0 \quad (5.11)$$

Care va avea soluția (numai cea pozitivă, evident):

$$d = \frac{-2 \cdot h + \sqrt{4 \cdot h^2 + \frac{8 \cdot U_n \cdot I_f}{\alpha \cdot \pi \cdot \tau}}}{2} \quad (5.12)$$

De unde rezultă:

$$d = 4,33 \text{ mm (aproximativ 5 mm)} \quad (5.13)$$

În conformitate cu acest calcul, rezultă că orice varistor având un diametru mai mare decât 5 mm și o înălțime de 2,8 mm este, până în această etapă, adecvat cerințelor specificate.

Acest calcul este valabil și acoperitor pentru ambele variante de varistoare la 230 Vef, anume cele disc de 30 mm acoperite pe lateral și cele disc de 7 și 20 mm acoperite integral.

Pentru modulele varistoarele destinate a funcționa la $U_n = 48 \text{ Vcc}$:

Ecuția de echilibru termic stabil se scrie, la fel ca și înainte:

$$U_n \cdot I_f = \alpha \cdot S_l \cdot \tau \quad (5.14)$$

Unde:

- U_n este tensiunea nominală (48 Vcc);
- I_f este curentul de scurgere (0,1 mA);
- α este transmisivitatea termică globală (prin convecție și radiație, egală cu $17 \text{ [W / (m}^2 \text{ grad)]}$);
- τ este supratemperatura acceptabilă a varistorului ($\tau(\mathbf{t}) = \theta - \theta_a = 20 \text{ }^\circ\text{C}$);
- S_l este aria laterală de cedare a căldurii. Pentru varistoarele de tip disc rezultă $S_l = 2 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} + \pi \cdot d \cdot h$, d fiind diametrul minim căutat, iar h este înălțimea acestuia, anume 0,9 mm.

În consecință, ecuația (5.14) se va rescrie ca:

$$d^2 + 2dh - \frac{2 \cdot U_n \cdot I_f}{\alpha \cdot \pi \cdot \tau} = 0 \quad (5.15)$$

Care va avea soluția (numai cea pozitivă, evident):

$$d = \frac{-2 \cdot h + \sqrt{4 \cdot h^2 + \frac{8 \cdot U_n \cdot I_f}{\alpha \cdot \pi \cdot \tau}}}{2} \quad (5.16)$$

De unde rezultă:

$$d = 2,23 \text{ mm (aproximativ 3 mm)} \quad (5.17)$$

În conformitate cu acest calcul, rezultă că orice varistor având un diametru mai mare decât 3 mm și o înălțime de 0,9 mm este, până în această etapă, adecvat cerințelor specificate.

Acest calcul este valabil și acoperitor pentru seria de varistoare la 48 Vcc, anume cele tip disc acoperite integral cu rășină epoxidică, având diametrele utile de 7 mm.

Evaluarea stabilității termice a varistorului în regim de serviciu permanent nu este decât o primă etapă, necesară, în evaluarea stabilității termice globale. Datele de până acum constituie punctul de plecare pentru calculele ulterioare.

b). În regimul de serviciu de avarie

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 undei de supratensiune. În realitate, curentul de regim permanent care apare la scurt timp după trecerea undei 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 undei impulsului de curent.

În esență, trecerea undei 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 bine cunoscute. 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 θ , diagramă prezentată în Figura 5.1.[16],[21],[29], [64]:

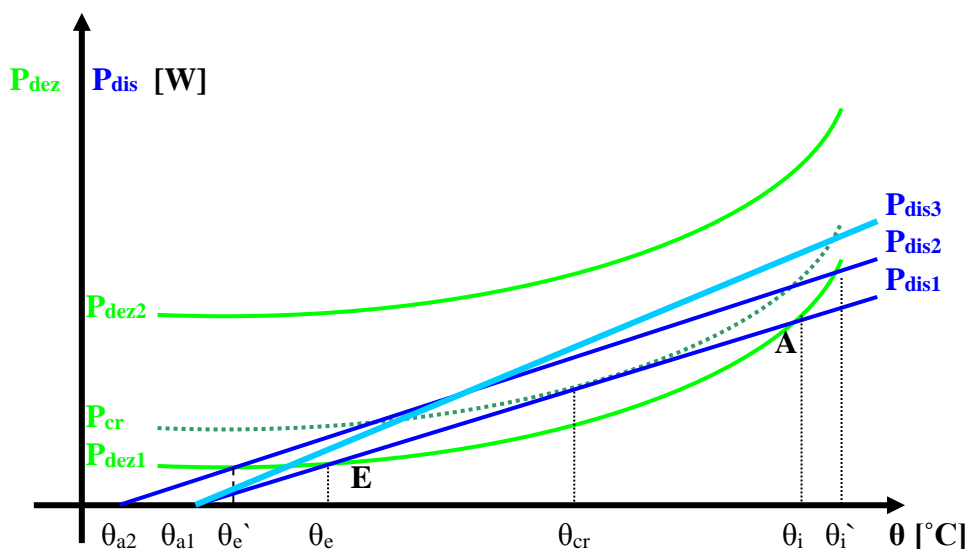


Figura 5.1: Echilibrul termic al unui varistor

Expresiile matematice ale celor două puteri rezultă, utilizând și relația (3.4):

Puterea dezvoltată:

$$P_{dez} = U \cdot I = U \cdot A(U) \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{q_e \cdot \Phi(U)}{k \cdot T}} \quad (5.18)$$

Puterea disipată:

$$P_{dis} = \alpha \cdot S_l \cdot (\theta - \theta_a) \quad (5.19)$$

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 (θ_e) și temperaturii maxime de stabilitate termică (θ_i). La echilibru, temperatura varistorului (θ_e) este destul de apropiată de temperatura mediului ambiant (θ_{a1}), așa cum am arătat anterior, supratemperatura maximă fiind de 20 °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 θ_i , până la acest punct, puterea disipată fiind mult mai mare decât cea produsă; dacă nu se depășește această temperatură, varistorul se răcește și revine la punctul stabil de funcționare din θ_e (după trecerea undei de supratensiune); dacă se depășește însă temperatura θ_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_{dis1}), 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 θ_{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; 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_{dez2} și P_{dis1}), 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 θ_e și θ_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.

Această metodă de dimensionare termică este extrem de eficientă, dar este foarte greu de aplicat, datorită complexității parametrilor care intervin. Practic, numai modelarea numerică a proceselor termice, prin utilizarea metodei globale, poate conduce la o dimensionare eficientă a varistoarelor utilizate [3].

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 5.1, acest lucru poate fi obținut prin:

- Micșorarea temperaturii mediului ambiant. Curba P_{dis1} se translatează în P_{dis2} și ecartul de temperatură:

$$\Delta\theta_{max} = \theta_i - \theta_e \quad (5.20)$$

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 [78], [95]. 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 de 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, $\Delta\theta_1$. 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:

$$W = Q = m_v \cdot c_v \cdot \Delta\theta_1 \quad (5.21)$$

Energia impulsului, regăsită în căldura totală stocată Q , nu poate 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 IV, 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.

Metoda pe care o propunem în continuare este o metodă simplă și eficientă pentru alegerea diametrului varistoarelor utilizate, pornind de la cea mai complexă solicitare termică pe care o suportă acestea, anume impulsul de tensiune (curent).

Așa cum am mai specificat, impulsul de tensiune este un proces de scurtă durată, extrem de violent, care conduce la înmagazinarea de căldură în masa varistorului, căldură care va fi ulterior cedată mediului ambiant. Datorită timpului extrem de redus, procesul este eminent adiabetic.

Prin urmare, este suficient să cunoaștem valoarea estimativă a energiei vehiculate (mărime standardizată) și valoarea maximă admisibilă a supratemperaturii varistorului (mărime de cele mai multe ori determinată experimental), astfel încât după absorbția energiei respective, dispozitivul să nu intre în ambalare termică, rămânând în zona rezervei de stabilitate. Din ecuația de bilanț termic va rezulta masa varistorului, iar apoi, având înălțimea fixată, vom obține diametrul minimal recomandabil.

Relația (5.21) se va reformula ca:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} h \cdot \rho_v \cdot c_v \cdot \Delta\theta = Q \quad (5.22)$$

unde:

- d este diametrul varistorului [m];
- h este înălțimea varistorului [m];
- c_v este căldura specifică masică [J/(kg·°C)] ;
- $\Delta\theta$ este supratemperatura maximă acceptabilă [°C];
- Q este energia maximă vehiculată de unda de șoc [J];
- ρ_v este densitatea masică [kg/m³].

Din relația (5.22) rezultă:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot h \cdot \rho_v \cdot c_v \cdot \Delta\theta}} \quad (5.23)$$

În general se consideră că supratemperatura maximă pe care o poate avea un varistor, după aplicarea impulsului (șocului) de tensiune fără a exista riscul ambalării termice, după trecerea undei de șoc, sub acțiunea doar a tensiunii nominale a rețelei, este de cca. 30 °C (este mai mare decât în cazul regimului permanent de avarie, deoarece tensiunea nominală a rețelei este mai mică decât cea de prag, deci riscul ambalării termice este ușor mai redus, chiar dacă varistorul este cald).

Se va lua în calcul și valoarea căldurii specifice masice a varistorului, la 20 °C, anume $c_v = 0,7534 \text{ J} / (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$

Densitatea masică a varistoarelor este de 5760 kg/m³ pentru varistoarele cu 5 oxizi aditivi și 5740 kg/m³ pentru cele cu doi oxizi aditivi.

Se vor analiza separat cele patru serii de varistoare realizate experimental.

Pentru seria de varistoare de 230 Vef, conectate pe fazele de intrare ale SAM

Așa cum am anticipat în Capitolul IV, aceste varistoare au diametrul util de 20 mm. De fapt, în această etapă se realizează alegerea diametrului util. Sunt realizate din amestec de 5 oxizi aditivi.

Parametrii cunoscuți ai acestor varistoare sunt:

h	este înălțimea varistorului, $h = 2,8$ mm;
c_v	este căldura specifică masică, $c_v = 0,7534$ J / (g · °C);
$\Delta\theta$	este supratemperatura maximă acceptabilă, $\Delta\theta = 30$ °C;
Q	este energia maximă vehiculată de unda de șoc $Q = 110$ J; Având în vedere schema de conexiuni propusă în Capitolul III, energia maximă de 220 J se va repartiza pe două varistoare, fiecare suportând jumătate; S-a considerat o situație total defavorabilă, temperatura maximă a varistorului fiind mult mai mică decât cea maxim suportabilă.
ρ_v	este densitatea masică, $\rho_v = 5760$ kg/m ³ .

Aplicând relația (5.23), vom obține un diametru minim de 19,6 mm. Din acest motiv, s-a ales un diametru de 20 mm pentru aceste varistoare, montate între fază și neutrul rețelei, respectiv neutrul de protecție.

Pentru seria de varistoare de 230 Vef, conectate între neutrul rețelei și neutrul de pământare, la intrarea SAM

Așa cum am anticipat în subcapitolul IV.2.1, aceste varistoare au diametrul util de 7 mm. De fapt, în această etapă se realizează alegerea diametrului util. Sunt realizate din amestec de 5 oxizi aditivi.

Practic, această situație, a conexiunii între neutre, nu a fost analizată până acum, în literatura de specialitate neexistând referiri la acestea. Estimăm, totuși, că energia vehiculată în această situație este de 10 % din cea anterioară, instalația având totuși o posibilitate destul de mare de scurgere a sarcinii suplimentare la pământ.

Parametrii cunoscuți ai acestor varistoare sunt:

h	este înălțimea varistorului $h = 2,8$ mm;
c_v	este căldura specifică masică $c_v = 0,7534$ J / (g · °C);
$\Delta\theta$	este supratemperatura maximă acceptabilă $\Delta\theta = 30$ °C;
Q	este energia maximă vehiculată de unda de șoc $Q = 11$ J; Având în vedere schema de conexiuni propusă în Capitolul III, energia pe care o suportă acestea este practic neglijabilă, considerată ca fiind de 10 ori mai mică. Doar în situația în care neutrul rețelei este complet izolat față de pământ există riscul apariției unor supratensiuni pe această conexiune. S-a considerat o situație total defavorabilă, temperatura maximă a varistorului fiind mult mai mică decât cea maxim suportabilă.
ρ_v	este densitatea masică $\rho_v = 5760$ kg/m ³ .

Aplicând relația (5.23), vom obține un diametru minim recomandat de 6,2 mm. Din acest motiv, s-a ales un diametru de 7 mm pentru aceste varistoare, montate între fază și neutrul rețelei, respectiv neutrul de protecție.

Această conexiune nu este descrisă în standarde, ea asigurând o protecție suplimentară în situația nerespectării normelor de electrosecuritate în proiectarea și execuția instalațiilor electrice interioare.

Pentru seria de varistoare de 230 Vef, conectate pe fazele de ieșire ale SAM

Așa cum am anticipat în subcapitolul IV.2.1, aceste varistoare au diametrul util de 30 mm. De fapt, în această etapă se realizează alegerea diametrului util. Sunt realizate din amestec de 5 oxizi aditivi.

Parametrii cunoscuți ai acestor varistoare sunt:

- h este înălțimea varistorului, $h = 2,8$ mm;
- c_v este căldura specifică masică, $c_v = 0,7534$ J / (g · °C);
- $\Delta\theta$ este supratemperatura maximă acceptabilă, $\Delta\theta = 30$ °C;
- Q este energia maximă vehiculată de unda de șoc $Q = 220$ J;
Având în vedere schema de conexiuni propusă în Capitolul III, energia maximă de 220 J nu se va mai repartiza pe două varistoare; S-a considerat o situație total defavorabilă, temperatura maximă a varistorului fiind mult mai mică decât cea maxim suportabilă.
- ρ_v este densitatea masică, $\rho_v = 5760$ kg/m³.

Aplicând relația (5.23), vom obține un diametru minim de 27,7 mm. Din acest motiv, s-a ales un diametru de 30 mm pentru aceste varistoare, montate între fază și neutrul rețelei, la ieșirile de 230 Vef, după invertoare, ieșiri pentru serviciile proprii ale centralei.

Pentru seria de varistoare de 48 Vcc, conectate pe ieșirile SAM în c.c., către centrală

Așa cum am anticipat în subcapitolul IV.2.1, aceste varistoare au diametrul util de 7 mm. De fapt, în această etapă se realizează alegerea diametrului util. Sunt realizate din amestec de 2 oxizi aditivi. Acest amestec are proprietăți dielectrice excelente (ϵ_r redus, deci capacitate dielectrică redusă).

Parametrii cunoscuți ai acestor varistoare sunt:

- h este înălțimea varistorului $h = 0,9$ mm;
- c_v este căldura specifică masică $c_v = 0,76$ J / (g · °C);
- $\Delta\theta$ este supratemperatura maximă acceptabilă $\Delta\theta = 30$ °C;
- Q este energia maximă vehiculată de unda de șoc (căldura maximă) $Q = 22$ J;
Având în vedere schema de conexiuni propusă în Capitolul III, energia pe care o suportă acestea este practic neglijabilă, considerată ca fiind de 10 ori mai mică. Doar în situația în care neutrul rețelei este complet izolat față de pământ există riscul apariției unor supratensiuni pe această conexiune. S-a considerat o situație total defavorabilă, temperatura maximă a varistorului fiind mult mai mică decât cea maxim suportabilă.
- ρ_v este densitatea masică $\rho_v = 5740$ kg/m³.

Aplicând relația (5.23), vom obține un diametru minim recomandat de 6,2 mm. Din acest motiv, s-a ales un diametru de 7 mm pentru aceste varistoare, montate pe ieșirile de 48 Vcc din SAM către partea comutațională a centralei digitale.

Prin aceste calcule putem spune că s-a definitivat Pasul II din dimensionarea și alegerea varistoarelor, anume calculul termic al acestora și, în primul rând, stabilirea diametrului acestora.

Metoda aleasă pentru alegerea diametrului varistoarelor este extrem de simplă. Se bazează pe unele studii anterioare privind proprietățile materialelor varistoare și pe unele concluzii apărute în lucrările de specialitate, privind limitele încălzirii varistoarelor.

Prin simplitatea ei, ea poate fi în orice moment utilizată de către producătorii de echipamente de protecție la supratensiuni cu aplicații la joasă tensiune.

Elementele teoretice de proiectare au fost verificate în practică, așa cum vom arăta în capitolele următoare.

Metoda de mai sus nu este, însă, extrem de precisă, deoarece nu ia în calcul variația căldurii specifice cu temperatura și nici variația rezistivității varistorului în funcție de temperatură (decât prin intermediul curentului). Totuși, în zona temperaturilor de lucru uzuale (10 °C...30 °C), aceste variații nu sunt spectaculoase și, în consecință, la limită, pot fi considerate ca liniare.

Prin urmare, dependențele lor liniare se pot scrie ca [6], [7]:

$$c_v(\tau) = c_a \cdot (1 + \beta'_a \cdot \tau) \quad (5.24)$$

$$\rho_v(\tau) = \rho_a \cdot (1 + \alpha'_a \cdot \tau) \quad (5.25)$$

Mărimile de mai sus reprezintă:

- c_v este căldura specifică masică în [J / (g • °C)];
- ρ este rezistivitatea electrică, în [$\Omega \cdot m$];
- τ este supratemperatura, în [°C];
- β'_a și α'_a sunt coeficienții de variație cu temperatura ai fiecărei mărimi, în [°C]⁻¹.

Durata extrem de scurtă a unui impuls de tensiune fiind foarte scurtă, putem afirma că este vorba de un proces adiabatic, varistorul nemaiavănd timp suficient pentru a ceda căldura, care, înmagazinată în masa varistorului produce încălzirea acestuia.

Ecuția bilanțului termic se va rescrie ca:

$$P \cdot dt = cM d\tau \text{ adică } R \cdot i^2 \cdot dt = c \cdot M \cdot d\tau \quad (5.26)$$

de unde:

$$\rho_a \cdot (1 + \alpha'_a \cdot \tau) \cdot j^2 \cdot A \cdot l \cdot dt = M \cdot c_a \cdot (1 + \beta'_a \cdot \tau) \cdot d\tau \quad (5.27)$$

Prin integrare rezultă:

$$\int_0^{t_0} j^2(t) \cdot dt = \frac{c_a \cdot M}{\rho_a \cdot a \cdot l} \cdot \int_{\tau_n}^{\tau_s} \frac{1 + \beta'_a \cdot \tau}{1 + \alpha'_a \cdot \tau} \cdot d\tau \quad (5.28)$$

adică:

$$\int_0^{t_0} j^2(t) \cdot dt = \frac{c_a \cdot M}{\rho_a \cdot a \cdot l} \cdot \frac{1}{\alpha_a'^2} \cdot \left[\alpha'_a \cdot \beta'_a \cdot (\tau_s - \tau_n) + (\alpha'_a - \beta'_a) \ln \frac{1 + \alpha'_a \cdot \tau_s}{1 + \alpha'_a \cdot \tau_n} \right] \quad (5.29)$$

O altă problemă care apare aici este evaluarea integralei $\int_0^{t_0} j^2(t) \cdot dt$, care, dată fiind forma greu de reprodus analitic a impulsurilor electrice, poate fi efectuată

numai prin metode numerice, chiar dacă se poate încerca o reprezentare prin două curbe exponențiale.

Prin urmare, în această situație, relațiile (5.22) și (5.23) pot fi modificate și aspectele de mai sus. Cunoscând [6]:

$$Q = M \cdot \int_{\tau_n}^{\tau_s} c_a \cdot (1 + \beta'_a) \cdot d\tau \text{ iar, } M = \rho_v \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h}{4}, \text{ și, efectuând}$$

integrala:

$$\int_{\tau_n}^{\tau_s} (1 + \beta'_a) \cdot d\tau = \left(\tau + \beta'_a \cdot \frac{\tau^2}{2} \right) \Big|_{\tau_n}^{\tau_s} = \tau_s - \tau_n + \frac{\beta'_{a2}}{2} \cdot (\tau_s^2 - \tau_n^2) \quad (5.30)$$

Valoarea recalculată a diametrului va fi:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot h \cdot \rho_v \cdot c_a \cdot (\tau_s - \tau_n) \cdot \left[1 + \frac{\beta'_a}{2} \cdot (\tau_s + \tau_n) \right]}} \quad (5.31)$$

Din relația (5.31), prin înlocuirea $\beta'_a = 0$ se obține, practic, relația (5.23). Se observă că, diametrul calculat cu relația generală (5.31) este mai mic decât cel calculat cu relația (5.23), deci, relația (5.23) este acoperitoare și suficient de simplă, pentru o dimensionare eficientă a varistorului.

V.1.3. Pasul III (calculul de siguranță)

Pasul III este, de fapt, un pas de verificare a soluțiilor tehnice alese anterior. Scopul acestuia este de a verifica dacă varistorul dimensionat după metodele anterioare face față solicitărilor reale pe durata unui impuls de tensiune.

Dacă în urma proiectării, utilizând metoda prezentată anterior, s-a optat pentru varistoare standardizate, se vor verifica următoarele mărimi:

- **I_n**, curentul nominal, care reprezintă valoarea de vârf a curentului de descărcare, la unda tip 8/20 μs, utilizat pentru testarea echipamentului protejat. Pentru aplicațiile de joasă tensiune este de 2,5 kA (aplicațiile din telecomunicații fiind considerate ca fiind de clasă D), conform CECC 42000 Test C2.1; Acesta se va corela cu (va fi mai mic decât) **I_{max}** – curentul maxim al echipamentului de protecție la supratensiuni, care reprezintă valoarea de vârf, dată de constructor, a undei de impuls de curent, tip 8/20 μs, suportată o singură dată de descărcător (Permissible Peak Current în engl.). Are valori de sute sau, mai rar, mii de **[A]** pentru aplicațiile la joasă tensiune; Se vor utiliza formele de undă pentru impulsul de curent 8/20, sau, după caz, alte forme standardizate.
- **N_p** – nivelul de protecție, parametru ce caracterizează performanțele protecției 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;

Această mărime se va corela cu (va fi mai mare decât) N_i – nivelul de izolație; parametru care caracterizează performanțele de izolație ale instalației în care este plasat echipamentul de protecție la supratensiuni, definit prin tensiunea de ținare la șoc, ce corespunde tensiunii de conturare a izolației instalației la unda de tensiune 1,2/50 μ s, în **[V]** În funcție de poziționarea varistorului în instalație, acest parametru are valoarea de 6 kV pentru echipamentele de clasă A, 4 kV pentru cele de clasă B, 2,5 kV pentru cele de clasă C și 1,5 kV pentru cele de clasă D. Așa cum am mai arătat în Capitolul II, putem considera că toate aplicațiile detaliate în această lucrare sunt de clasă D (localizate în zona contactelor fișă-priză);

Se vor utiliza formele de undă pentru impulsul de tensiune 1,2/50, sau, după caz, alte forme standardizate.

Dacă în urma proiectării, utilizând metoda prezentată anterior, s-a optat pentru varistoare realizate artizanal, în serii nestandardizate, acești parametrii maximali de curent și de tensiune trebuie verificați experimental, în scopul confirmării performanțelor specifice.

Pentru instalațiile descrise în această lucrare, procedura de testare este mult mai simplă, fiind suficient un singur tip de încercare, anume impulsul de curent tip 8/20, în conformitate cu standardul european EN DIN VDE 0432 T.2. Acest lucru este posibil, deoarece echipamentele bazate pe varistoarele descrise sunt asimilabile clasei D. Este de dorit ca, pentru varistoarele de 230 Vef, aplicând un impuls de tensiune de 1,5 kV în valoare maximă, curentul să nu treacă de 1,5 kA în valoare maximă. După aplicarea acestui curent, varistorul trebuie să nu se distrugă nici prin străpungere dielectrică, nici prin ambalare termică.

În cazul aplicațiilor descrise în această lucrare s-au efectuat teste, în conformitate cu standardele descrise mai sus, în scopul verificării comportării acestora, pe instalațiile existente în dotarea Laboratorului „Génie Electrique” al Universității „Paul Sabatier” din Toulouse.

În Figura 5.2 se prezintă o vedere de ansamblu a generatorului de impuls, așa cum se află la Laboratorul „Génie Electrique” al Universității „Paul Sabatier” din Toulouse. Schema electrică a generatorului de impuls este prezentată în Figura 5.3.

Generatorul furnizează o undă de impuls biexponențială, în curent, de tip 8/20 μ s, standardizată conform CEI 60-2 și a tuturor celorlalte norme europene. Laboratorul este certificat și acreditat pe plan european pentru asemenea încercări.

Tensiunea la care se încarcă condensatorul de 180 μ F prezentat în Figura 5.3 este de cca. 2000 V c.c., valoarea maximă a tensiunii aplicate varistorului fiind ceva mai mică, între 1440 și 1500 V.

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.

Energia stocată în condensatorul de 180 μ F din Figura 5.3, 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:

$$Q = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (5.24)$$

Cu valorile de mai sus ale parametrilor, va rezulta o energie de cca. 360 J. Această energie este sensibil mai mare decât cea acceptabilă și utilizată în dimensionare. Acest lucru este posibil, fiind vorba de o încercare nedistructivă la limită. Aplicarea unui impuls de asemenea energie asupra varistorului produce încălzirea acestuia peste valoarea de risc a ambalării termice. Totuși, tensiunea de alimentare a rețelei revine imediat la valoarea nominală, iar varistorul, chiar în stare caldă, nu intră în ambalare termică. Evident, dacă impulsul se repetă la mai puțin de 2 minute (necesare răcirii), varistorul va fi distrus.

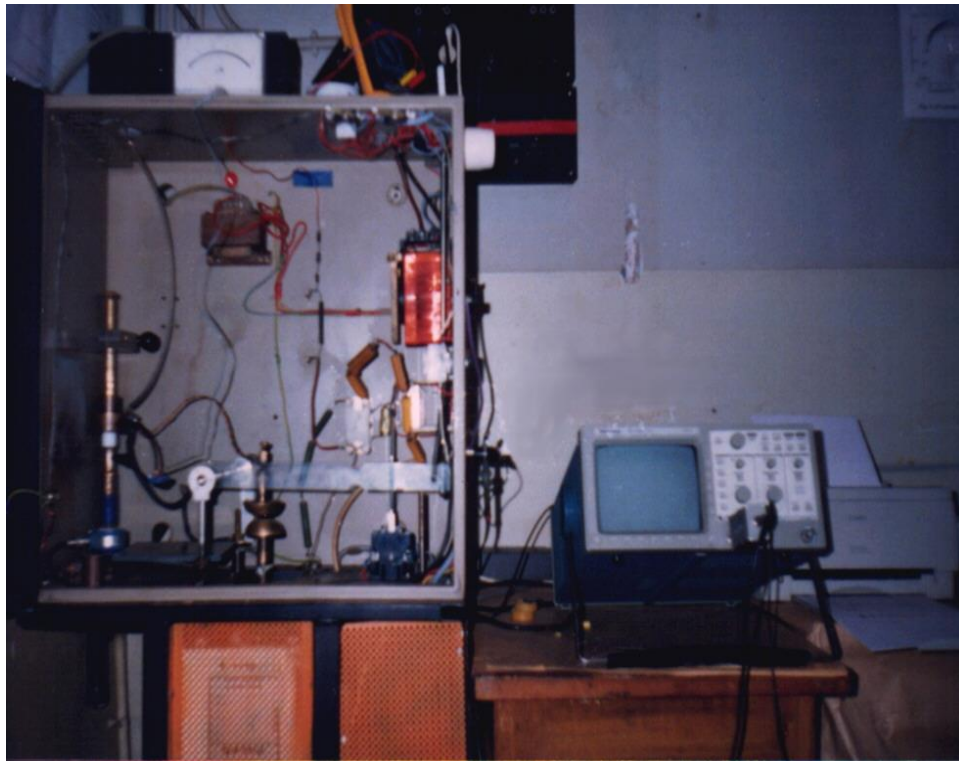


Figura 5.2: Vedere de ansamblu a generatorului de impulsuri

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 varistoarelor sunt prezentate mai jos (scara de curent este de 10 A/V, cea de tensiune este 1/1, prin divizorul 1/1000.:

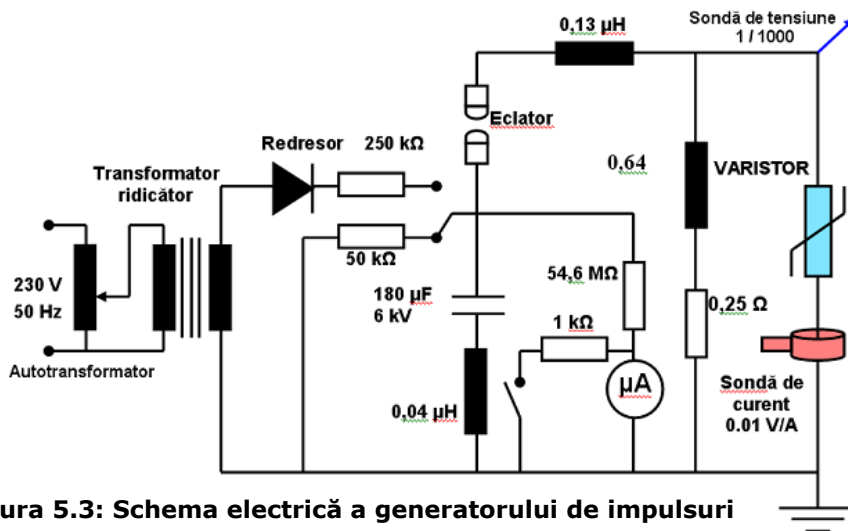


Figura 5.3: Schema electrică a generatorului de impulsuri

Varistoarele disc de 7 mm, 230 Vef:

În Figura 5.4 este prezentată oscilograma impulsului 8/20 aplicat unui varistor de 230 Vef având diametrul de 7 mm.

Din oscilogramă se observă că la o tensiune maximă de 1,44 kV, curentul maxim prin varistor este limitat la 1,48 kA. Deci această serie de varistoare corespunde și cerințelor privind valorile de impuls.

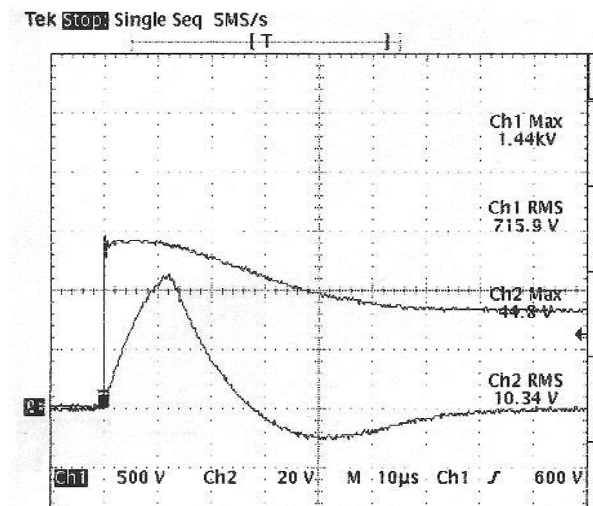


Figura 5.4: Oscilograma impulsului aplicat unui varistor de 230 Vef, diametrul 7 mm

Varistoarele disc de 20 mm, 230 Vef:

În Figura 5.5 este prezentată oscilograma impulsului 8/20 aplicat unui varistor de 230 Vef având diametrul de 20 mm.

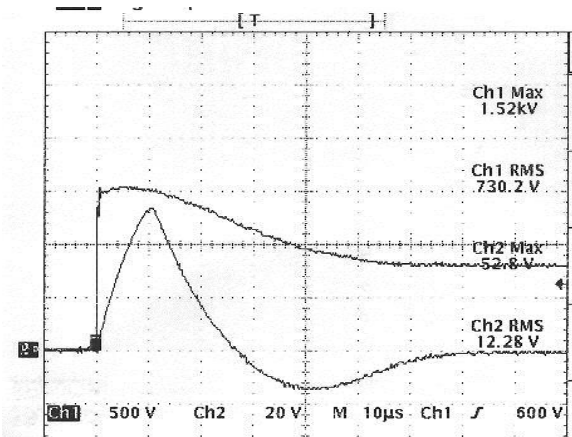


Figura 5.5: Oscilograma unui impuls 8/20 aplicat unui varistor de 230 Vef , diametrul de 20 mm

Din oscilogramă se observă că la o tensiune maximă de 1,52 kV (chiar mai mare decât cea recomandată), curentul maxim prin varistor este limitat la 0,52 kA (mult mai mic decât cel specificat). Deci această serie de varistoare corespunde și cerințelor privind valorile de impuls. Am putea spune că, din acest punct de vedere sunt chiar supradimensionate.

Varistoarele disc de 30 mm, 230 Vef:

În Figura 5.6 este prezentată oscilograma impulsului 8/20 aplicat unui varistor de 230 Vef având diametrul de 30 mm.

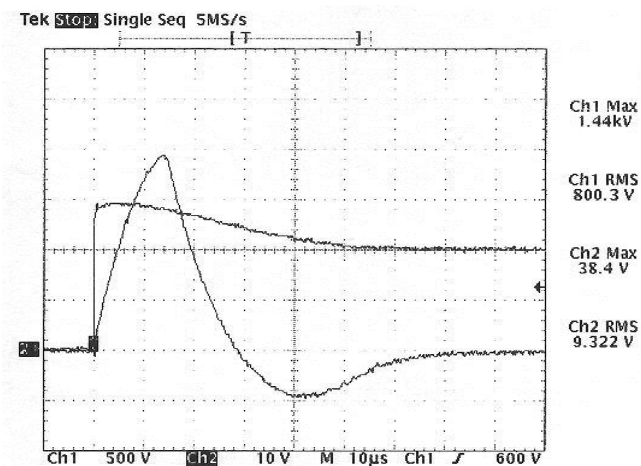


Figura 5.6: Oscilograma unui impuls 8/20 aplicat unui varistor de 230 Vef, diametrul de 30 mm

Din oscilogramă se observă că la o tensiune maximă de 1,44 kV (chiar mai mare decât cea recomandată), curentul maxim prin varistor este limitat la 0,38 kA (mult mai mic decât cel specificat). Deci această serie de varistoare corespunde și cerințelor privind valorile de impuls. Am putea spune că, și varistoarele seriei curente, din acest punct de vedere sunt chiar supradimensionate.

Varistoarele disc de 7 mm, 48 Vcc:

În Figura 5.7 este prezentată oscilograma impulsului 8/20 aplicat unui varistor de 48 Vcc având diametrul de 7 mm.

Acest varistor nu aparține clasei D de protecție, el fiind mai mult asimilabil clasei E. Teoretic, acest varistor ar trebui încercat la o tensiune de 1,5 kV. Dar, în mod evident, acest varistor se va distruge la această tensiune, el având o tensiune de deschidere mult mai mică. Din acest motiv, valoarea maximă a tensiunii la care va fi încercat este de 1 kV.

Standardele nu prevăd încercări specifice pentru varistoarele care operează pe domeniul de tensiune continuă. Considerăm că tensiunea de 1 kV este mai mult decât suficientă pentru încercarea acestui varistor.

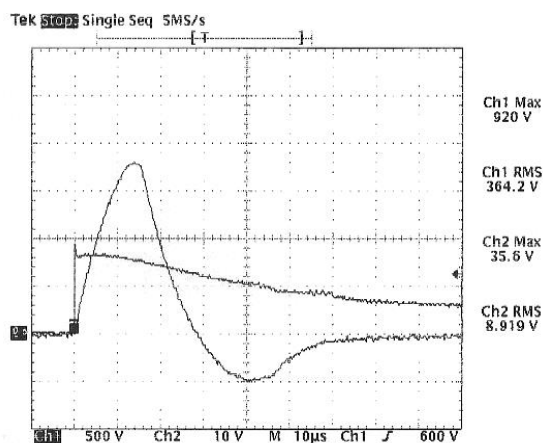


Figura 5.7: Oscilograma unui impuls 8/20 aplicat unui varistor de 48 Vcc,

Din oscilogramă se observă că la o tensiune maximă de 0,92 kV (chiar mai mare decât cea recomandată), curentul maxim prin varistor este limitat la 0,35 kA (mult mai mic decât cel specificat). Putem considera că și această serie de varistoare corespunde și cerințelor privind valorile de impuls. Am putea spune că, și varistoarele seriei curente, din acest punct de vedere sunt chiar supradimensionate. Cerințele privind încercările specifice sunt la latitudinea utilizatorului, în funcție de aplicația scontată. Varistoarele produse experimental în cadrul L.G.E.T. au mai fost supuse și altor încercări specifice, privind determinarea caracteristicii curent – tensiune sau a coeficientului de neliniaritate, pentru a asigura verificarea și caracterizarea completă a acestora, încercări care nu sunt necesare în situația utilizării unor varistoare de fabricație industrială, din comerț, ale căror proprietăți sunt bine specificate de către producătorul lor.

Aceste încercări vor fi detaliate în continuare.

V.2. Încercări specifice ale varistoarelor utilizate

Un prim set de încercări specifice la care au fost supuse varistoarele produse în cadrul Laboratorului "Génie Electrique" al Universității "Paul Sabatier" din Toulouse, destinate pentru protecția împotriva supratensiunilor a centralelor telefonice digitale, constă în stabilirea caracteristicii curent-tensiune a acestora și determinarea, în baza caracteristicilor curent-tensiune, a coeficientului de neliniaritate al acestora. Al doilea set de încercări se referă la încălzirea varistoarelor în regim permanent.

V.2.1. Caracteristica curent-tensiune

Din punct de vedere al utilizatorului de varistoare, este importantă numai prima porțiune a caracteristicii curent - tensiune, așa cum a fost ea descrisă în Capitolul IV. Această zonă se referă la porțiunea până la tensiunea de prag și imediat după aceasta.

De fapt, în această etapă se verifică tensiunea de prag și riscul ambalării termice la o anumită tensiune, în regim permanent.

Fiind vorba de un anumit varistor (specificat), nu vom mai trasa caracteristica materialului $J(E)$ ci chiar caracteristica $I(U)$, referitoare la proprietățile piesei varistor, obținută din acel material, având dimensiunile fizice concrete.

Principiul metodei constă în măsurarea curentului prin varistor la diferite valori ale tensiunii de polarizare. Tensiunile aplicate sunt continue. Curenții mășurați sunt foarte reduși, ceea ce implică utilizarea unor aparate extrem de precise.

Instalația pentru măsurători în regim de polarizare este prezentată în Figura 5.8, așa cum este ea utilizată în cadrul Laboratorului "Génie Electrique" al Universității "Paul Sabatier" din Toulouse.

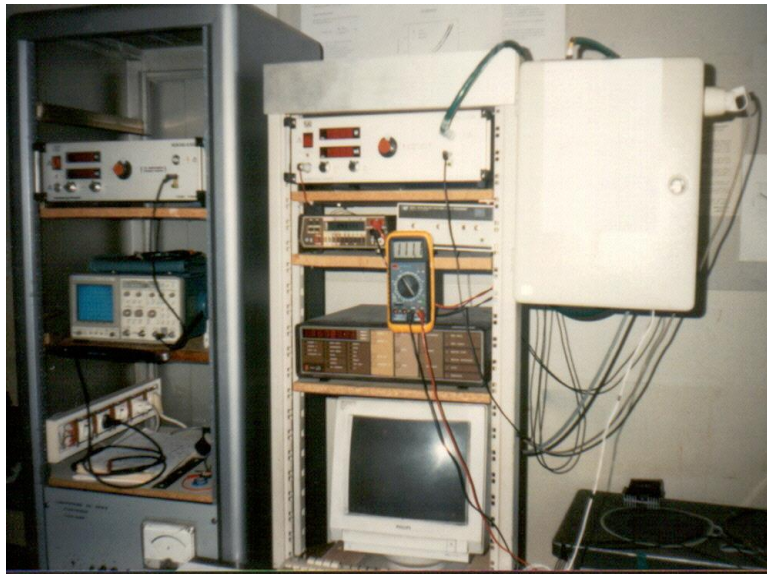


Figura 5.8: Instalația pentru încercări în regimuri

În Figura 5.9 este prezentată schema generală a acestei instalații, care este una destul de performantă, omologată și acreditată pentru încercări specifice.

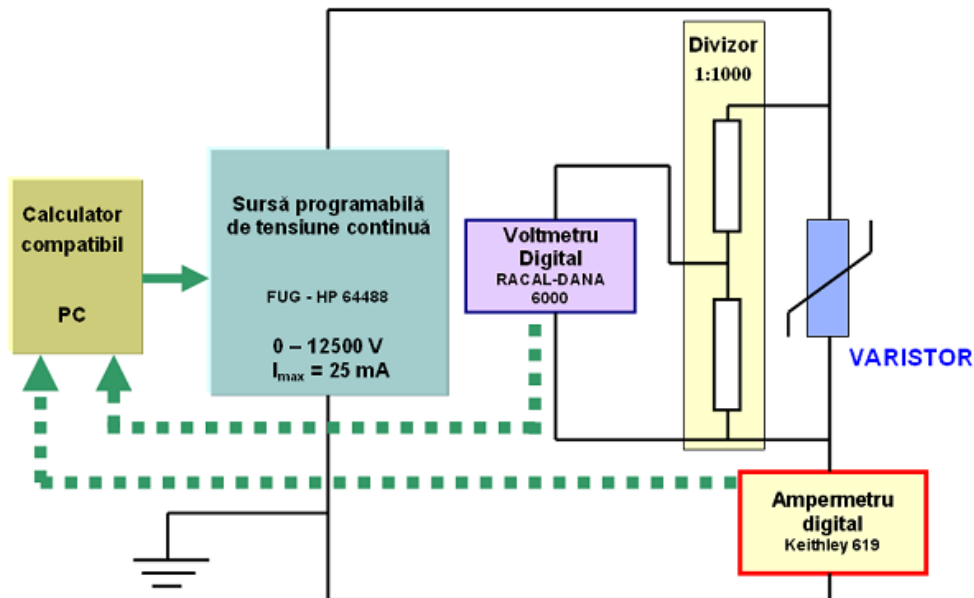


Figura 5.9: Schema electrică a instalației pentru încercări în regimuri permanente

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 α pe ambele fețe, asigurând o răcire optimă.

Elementele schemei instalației de încercări, în regim permanent, așa cum apar în Figura 5.9 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 V, la un curent maxim de 25 mA. Sursa poate fi reglată și manual;
- un (micro)ampermetru digital Keithley 619 înseriat cu varistorul, care permite măsurarea curentilor între $1,9 \cdot 10^{-9}$ și $1,9 \cdot 10^{-3}$ 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 % ;

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.

Instalația poate fi folosită și pentru determinări ale parametrilor varistorului la diverse temperaturi ale mediului ambiant sau ale varistorului însuși. În acel caz,

varistorul este introdus într-o incintă specială, prin care pot trece conductorii de legătură, care apare și în figură. Temperatura în interiorul incintei poate fi ridicată până la cca. 90 °C. Incinta este prevăzută cu rezistoare pentru încălzire și termostat reglabil pentru monitorizarea temperaturii.

Ca traductori de temperatură pentru varistoare (în scopul verificării încălzirii acestora), pot fi utilizate termorezistențe de platină, extrem de sensibile în intervalul de temperatură 20 °C ...100 °C ($\Delta R/R > 1,5\%$ pentru un grad Celsius). Pentru măsurarea rezistenței electrice a acestora se pot utiliza multimetre digitale standard (unul este vizibil în fotografie). În prealabil aceste termorezistențe au fost etalonate de către fabricant și verificate în laborator.

Înregistrarea curbei este făcută în felul următor: se crește în trepte tensiunea cu valori ΔU într-un interval de timp Δt . Măsurătoarea este citită cu o anumită întârziere, pentru a se stabili curenții și a se amortiza curenții tranzitorii de polarizare. Timpul de atenuare a componentei tranzitorii este de câteva minute pentru curenții mai mici de 1 μA și de ordinul secundelor pentru curenții de ordinul mA, corespunzători tensiunilor în jurul tensiunii de prag (U_s). Măsurătorile au fost efectuate la o temperatură ambiantă de 20 °C, respectiv, ridicată la 40 °C.

O altă determinare necesară, obținută în baza caracteristicii curent-tensiune, este cea a coeficientului de neliniaritate α , care reflectă proprietățile electrice ce se așteaptă a fi asigurate de varistor. Cu cât acest exponent va avea o valoare mai ridicată, se poate spune despre caracteristica de protecție a varistorului că se apropie de cea ideală. Exponentul de neliniaritate se determină relativ simplu, observând că acesta reprezintă panta caracteristicii $I(U)$, pentru zona neliniară, în coordonate logaritmice:

$$I = KU^\alpha, \text{ care logaritmată devine } \ln(I) = \ln(K) + \alpha \ln(U) \quad (5.25)$$

Relația de mai sus reprezintă de fapt ecuația unei drepte în care α este panta dreptei. Cum dreapta este determinată prin două puncte, vom considera două puncte de pe caracteristică, de coordonate (I_1, U_1) și (I_2, U_2) , de unde se va determina α :

$$\alpha = \frac{\ln(I_2) - \ln(I_1)}{\ln(U_2) - \ln(U_1)} = \frac{\ln \frac{I_2}{I_1}}{\ln \frac{U_2}{U_1}} = \frac{d \ln(I)}{d \ln(U)} \quad (5.26)$$

În mod convențional, cele două puncte ale caracteristicii necesare determinării lui α se aleg pentru densitățile de curent $J = 1$ și 10 mA/cm². Pentru simplificarea măsurătorilor, am considerat pentru aceasta determinare curenții de la 1 și 10 mA.

Varistoarele disc de 7 mm, 230 Vef:

Caracteristica curent-tensiune a varistoarelor având 7 mm diametru și tensiunea nominală de 230 Vef este prezentată, pentru domeniul curenților slabi, în Figura 5.10.

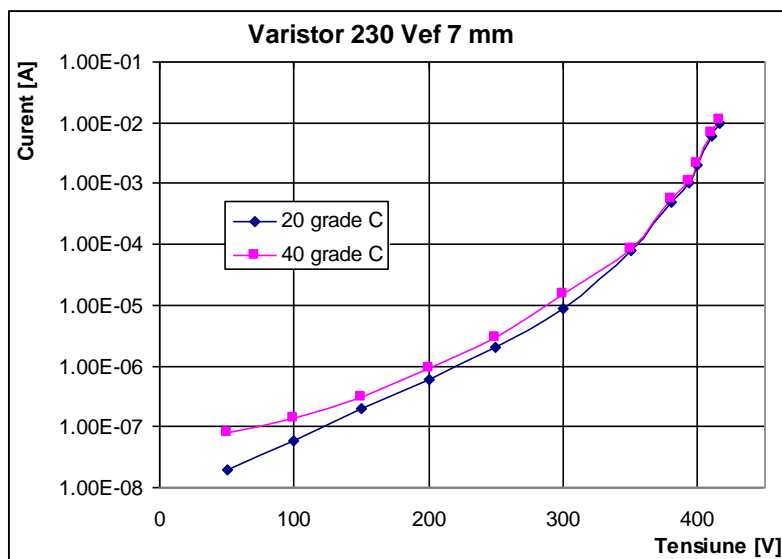


Figura 5.10: Prima parte a caracteristicii curent-tensiune pentru varistoarele de 230 Vef, diametru de 7 mm

Tensiunea de prag măsurată (la 1 mA), pentru acest varistor disc, a fost de 393 V la 20 °C, foarte aproape de tensiunea de prag dorită, de 395 V, rezultată din calcule. Acest lucru demonstrează corectitudinea determinării parametrilor de material. De asemenea, în jurul tensiunii de prag (și a tensiunii nominale), caracteristicile sunt extrem de apropiate, atât la 20 °C, cât și la 40 °C. Măsurătorile până la 150 V au fost extrem de dificil de realizat, fiind la limita sensibilității microampermetrului digital [40].

Coeficientul de neliniaritate este determinat pornind de la valorile:

$U_1 = 393$ V, pentru care $I_1 = 1$ mA (tensiunea de prag), respectiv

$U_2 = 416$ V, pentru care $I_2 = 10$ mA

Aplicând relația (5.26), va rezulta:

$\alpha = 40.47$ (materialul are o calitate foarte bună).

Varistoarele disc de 20 mm, 230 Vef:

Caracteristica curent-tensiune a varistoarelor având 20 mm diametru și tensiunea nominală de 230 Vef este prezentată, pentru domeniul curenților slabi, în Figura 5.11.

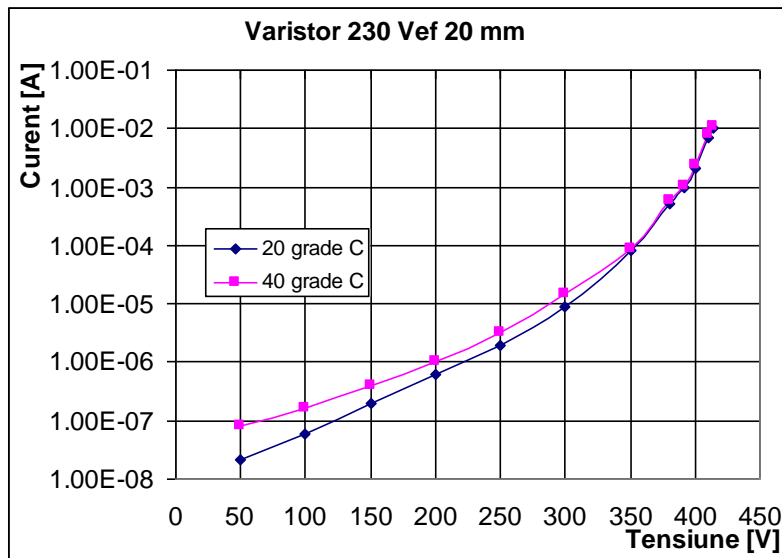


Figura 5.11: Prima parte a caracteristicii curent-tensiune pentru varistoarele de 230 Vef, diametru de 20 mm

Tensiunea de prag măsurată (la 1 mA), pentru acest varistor disc, a fost de 391 V la 20 °C, foarte aproape de tensiunea de prag dorită, de 395 V, rezultată din calcule. Acest lucru demonstrează corectitudinea determinării parametrilor de material. De asemenea, în jurul tensiunii de prag (și a tensiunii nominale), caracteristicile sunt extrem de apropiate, atât la 20 °C, cât și la 40 °C. Măsurătorile până la 150 V au fost extrem de dificil de realizat, fiind la limita sensibilității microampermetrului digital.

Coeficientul de neliniaritate este determinat pornind de la valorile:

$U_1 = 391$ V, pentru care $I_1 = 1$ mA (tensiunea de prag), respectiv

$U_2 = 414$ V, pentru care $I_2 = 10$ mA

Aplicând relația (5.26), va rezulta:

$\alpha = 40,28$ (materialul are o calitate foarte bună).

Această valoare este foarte apropiată de valoarea de 40,47 determinată anterior, ceea ce confirmă parametrii de material.

Varistoarele disc de 30 mm, 230 Vef:

Caracteristica curent-tensiune a varistoarelor având 30 mm diametru și tensiunea nominală de 230 Vef este prezentată, pentru domeniul curenților slabi, în Figura 5.12.

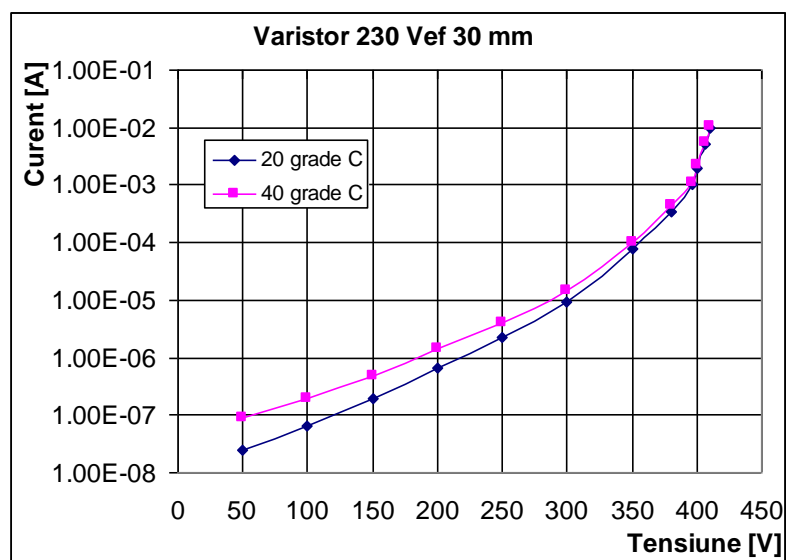


Figura 5.12: Prima parte a caracteristicii curent-tensiune pentru varistoarele de 230 Vef, diametru de 30 mm

Tensiunea de prag măsurată (la 1 mA), pentru acest varistor disc, a fost de 394 V la 20 °C, foarte aproape de tensiunea de prag dorită, de 395 V, rezultată din calcule. Acest lucru demonstrează corectitudinea determinării parametrilor de material. De asemenea, în jurul tensiunii de prag (și a tensiunii nominale), caracteristicile sunt extrem de apropiate, atât la 20 °C, cât și la 40 °C. Măsurătorile până la 150 V au fost extrem de dificil de realizat, fiind la limita sensibilității microampermetrului digital.

Coeficientul de neliniaritate este determinat pornind de la valorile:

$U_1 = 394$ V, pentru care $I_1 = 1$ mA (tensiunea de prag), respectiv

$U_2 = 417$ V, pentru care $I_2 = 10$ mA

Aplicând relația (5.26), va rezulta:

$\alpha = 40,58$ (materialul are o calitate foarte bună).

Această valoare este foarte apropiată de valoarea de 40,47 determinată anterior, respectiv 40,28 ceea ce confirmă parametrii de material.

În baza acestor măsurători, considerăm că, pentru materialul cu 5 oxizi aditivi, valoarea lui α este 41 (un material cu proprietăți neliniare foarte bune, dar nu excepționale). Acest material este, în schimb, relativ, ușor de obținut.

Varistoarele disc de 7 mm, 48 Vcc:

Aceeași metodă de lucru a fost păstrată și în situația varistoarelor de 48 Vcc. Evident, tensiunile la care au fost verificate sunt adaptate corespunzător.

Caracteristica curent-tensiune a varistoarelor având 7 mm diametru și tensiunea nominală de 48 Vcc este prezentată, pentru domeniul curenților slabi, în Figura 5.13.

Tensiunea de prag măsurată (la 1 mA), pentru acest varistor disc, a fost de 57 V la 20 °C, foarte aproape de tensiunea de prag dorită, de 59 V, rezultată din calcule (eroarea fiind în limita tolerabilă a $\pm 5\%$).

Acest lucru demonstrează corectitudinea determinării parametrilor de material. De asemenea, în jurul tensiunii de prag (și a tensiunii nominale), caracteristicile sunt extrem de apropiate, atât la 20 °C, cât și la 40 °C. Măsurătorile până la 30 V au fost extrem de dificil de realizat, fiind la limita sensibilității microampermetrului digital.

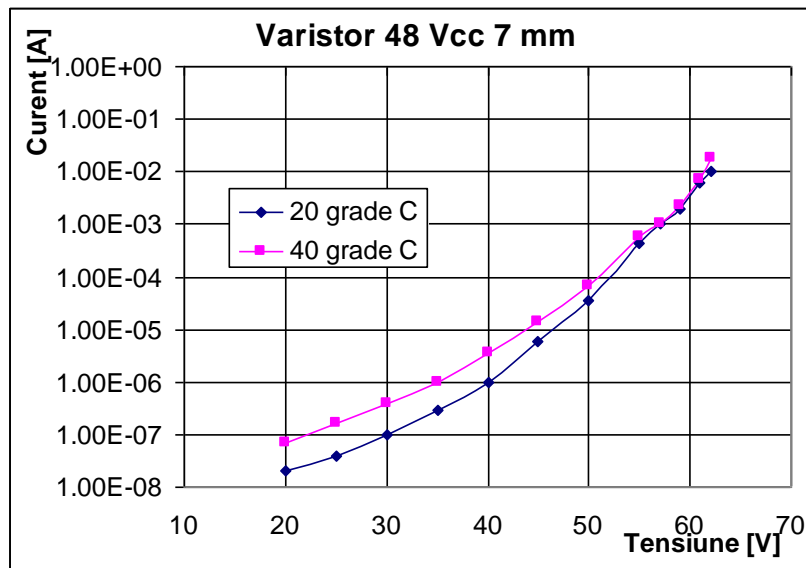


Figura 5.13: Prima parte a caracteristicii curent-tensiune pentru varistoarele de 48 Vcc, diametru de 7 mm

Coeficientul de neliniaritate este determinat pornind de la valorile:

$U_1 = 57$ V, pentru care $I_1 = 1$ mA (tensiunea de prag), respectiv

$U_2 = 62$ V, pentru care $I_2 = 10$ mA

Aplicând relația (5.26), va rezulta:

$\alpha = 27,38$ (materialul are o calitate medie).

În baza acestor măsurători, considerăm că, pentru materialul cu 2 oxizi aditivi, valoarea lui α este 28 (un material cu proprietăți neliniare medii, dar nu foarte bune). Acest material este utilizat pentru capacitatea sa dielectrică redusă, fiind și ușor de obținut.

Prin măsurarea caracteristicii curent-tensiune s-a realizat, în mod practic, verificarea (și confirmarea) proprietăților electrice ale pieselor realizate. Acest lucru era necesar, deoarece varistoarele utilizate au fost produse artizanal, în laborator.

Prin aceste teste s-a verificat materialul varistoarelor și înălțimea aleasă pentru acestea (Pasul I, calculul electric).

V.2.2. Verificarea încălzirii varistoarelor

Prezenta lucrare nu își dorește să facă analiza stabilității termice a varistoarelor. Singurul motiv pentru care s-a efectuat această determinare practică este necesitatea verificării alegerii diametrului optim pentru varistoare.

Deci, în această etapă se va verifica Pasul II (calculul termic), respectiv alegerea diametrului varistoarelor.

Pentru realizarea măsurărilor se vor utiliza tot instalațiile prezentate anterior. Pe una din fețele varistoarelor se va plasa, aproximativ în centru, senzorul de temperatură.

Studiile anterioare [21] au arătat, un lucru care este evident, anume că temperatura maximă atinsă este în zona axei de simetrie a discului, iar diferența între maximul de temperatură și minimul acesteia, pe fețele varistorului, este relativ mică.

Ca senzori termici s-au folosit termorezistențele de platină, pe care le-am descris anterior. Inertția 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.

Măsurătorile au vizat cele două solicitări descrise la Pasul II, dar amplificate până la limită, anume:

- Încălzirea în regim permanent, la tensiunea de prag (nu la tensiunea nominală);
- Încălzirea în regim de impuls, în situația cea mai defavorabilă, la impulsul tip 8/20 având tensiunea și curentul maxime (nu la cele de energie mai redusă, la care s-a făcut dimensionarea).

Aceste măsurători nu sunt recomandate de standarde, fiind la limita anvelopei de siguranță a varistorului, acesta putându-se degrada ireversibil. Ele pot, cel mult, confirma justetea alegerii varistorului.

Pentru măsurătorile în regim permanent, varistorul a fost practic suspendat de cele două fire de legătură, pentru a avea o transmisie cât mai bună pe ambele fețe. El a fost alimentat cca. 30 minute la valoarea tensiunii de prag.

Măsurătorile în regim de impuls au fost făcute pentru același impuls corespunzător nivelului maxim de protecție. Pe una din fețele varistorului a fost montat senzorul de temperatură. Întregul ansamblu senzor + multimetru s-a încărcat până la potențialul de 1,5 kV pe parcursul impulsului. De aceea multimetrul a fost bine izolat față de cadrul instalației, utilizând anvelopa sa de protecție. S-a verificat curba de răcire pe durata a cca. 20 - 30 minute până la stabilizare.

Se vor analiza fiecare dintre seriile de varistoare studiate până acum.

Varistoarele disc de 7 mm, 230 Vef:

Evoluția temperaturii pe parcursul impulsului de curent, pentru varistorul de 7 mm și 230 Vef este detaliată în Figura 5.14:

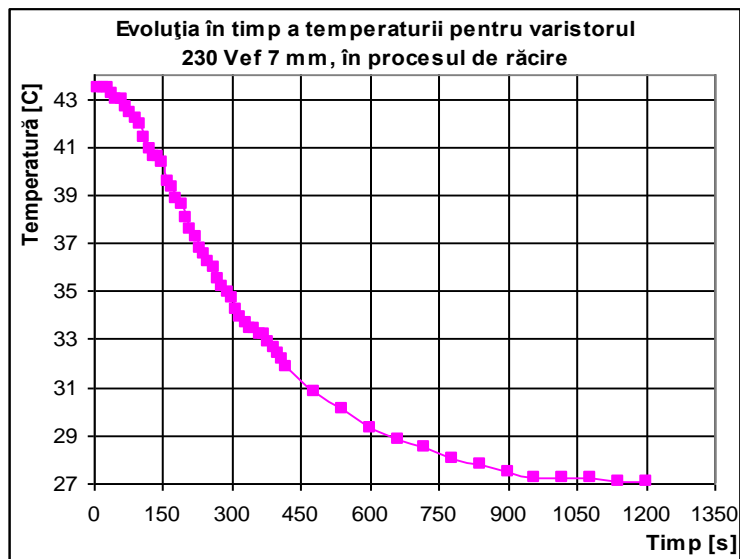


Figura 5.14: Evoluția în timp a temperaturii varistorului de 230 Vef, 7 mm, la aplicarea impulsului tip 8/20

Din graficul alăturat rezultă că, pe durata impulsului de tensiune cel mai violent pe care îl poate, teoretic, suporta acest varistor, temperatura sa nu a depășit 43,45 °C, ceea ce, pentru o temperatură ambiantă de 20 ...21 °C reprezintă o încălzire $\Delta\theta$ în jurul a 22...23 °C, sub limita admisibilă de 30 °C. Deci, chiar la limita de stabilitate, varistorul are un comportament excelent, verificarea aceasta confirmând faptul că a fost bine ales.

În situația încercărilor de regim permanent, temperatura acestuia nu a depășit 32 °C, ceea ce corespunde unei supratemperaturi în jurul a 11...12 °C, sub limita admisibilă de 20 °C. Și la acest set de încercări, varistoarele au fost corespunzătoare din punct de vedere al alegerii.

Varistoarele disc de 20 mm, 230 Vef:

Evoluția temperaturii pe parcursul impulsului de curent, pentru varistorul de 20 mm și 230 Vef este detaliată în Figura 5.15.

Din graficul alăturat rezultă că, pe durata impulsului de tensiune cel mai violent pe care îl poate, teoretic, suporta acest varistor, temperatura sa nu a depășit 39,65 °C, ceea ce, pentru o temperatură ambiantă de 20 ...21 °C reprezintă o încălzire $\Delta\theta$ în jurul a 18...19 °C, sub limita admisibilă de 30 °C. Deci, chiar la limita de stabilitate, varistorul are un comportament excelent, verificarea aceasta confirmând faptul că a fost bine ales.

În situația încercărilor de regim permanent, temperatura acestuia nu a depășit 31 °C, ceea ce corespunde unei supratemperaturi în jurul a 10...11 °C, sub limita admisibilă de 20 °C. Și la acest set de încercări, varistoarele au fost corespunzătoare din punct de vedere al alegerii.

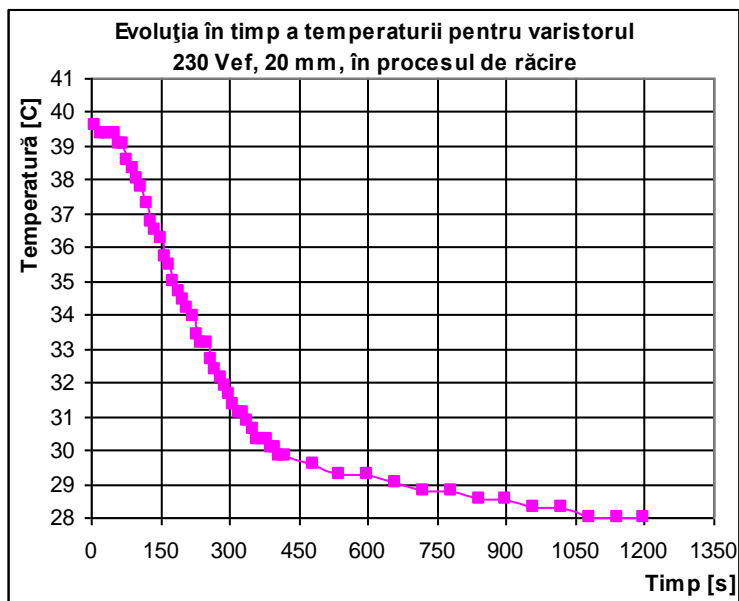


Figura 5.15: Evoluția în timp a temperaturii varistorului de 230 Vef, 20 mm, la aplicarea impulsului tip 8/20

Varistoarele disc de 30 mm, 230 Vef:

Evoluția temperaturii pe parcursul impulsului de curent, pentru varistorul de 30 mm și 230 Vef este detaliată în Figura 5.16.

Din graficul alăturat rezultă că, pe durata impulsului de tensiune cel mai violent pe care îl poate, teoretic, suporta acest varistor, temperatura sa nu a depășit 29,25 °C, ceea ce, pentru o temperatură ambiantă de 20 ...21 °C reprezintă o încălzire $\Delta\theta$ în jurul a maximum 8...9 °C, sub limita admisibilă de 30 °C. Deci, chiar la limita de stabilitate, varistorul are un comportament excelent, verificarea aceasta confirmând faptul că a fost bine ales.

În situația încercărilor de regim permanent, temperatura acestuia nu a depășit 26 °C, ceea ce corespunde unei supratemperaturi în jurul a 5...6 °C, cu mult sub limita admisibilă de 20 °C. Și la acest set de încercări, varistoarele au fost corespunzătoare din punct de vedere al alegerii.

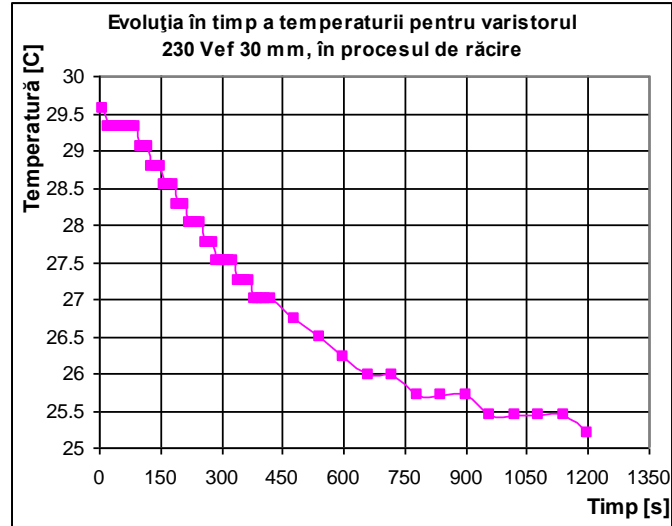


Figura 5.16: Evoluția în timp a temperaturii varistorului de 230 Vef, 30 mm, la aplicarea impulsului tip 8/20

Din graficele de mai sus se confirmă observația evidentă că, în condiții similare, un diametru mai mare înseamnă o stabilitate termică mai mare. Dar diametrul mărit poate genera și alte dezavantaje despre care vom vorbi în concluziile acestui capitol.

Varistoarele disc de 7 mm, 48 Vcc:

Evoluția temperaturii pe parcursul impulsului de curent, pentru varistorul de 7 mm și 48 Vcc este detaliată în Figura 5.17.

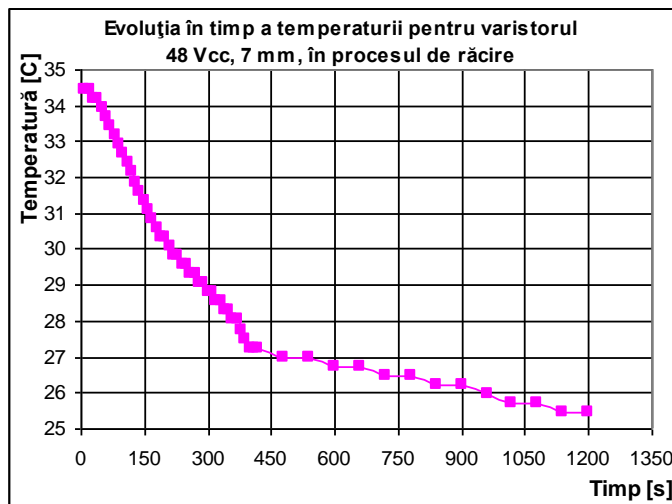


Figura 5.17: Evoluția în timp a temperaturii varistorului de 48 Vcc, 8 mm, la aplicarea impulsului tip 8/20

Din graficul alăturat rezultă că, pe durata impulsului de tensiune cel mai violent pe care îl poate, teoretic, suporta acest varistor, temperatura sa nu a depășit 34,6 °C, ceea ce, pentru o temperatură ambiantă de 20 ...21 °C reprezintă o încălzire $\Delta\theta$ în jurul a maximum 13...14 °C, sub limita admisibilă de 30 °C. Deci, chiar la limita de stabilitate, varistorul are un comportament excelent, verificarea aceasta confirmând faptul că a fost bine ales.

În situația încercărilor de regim permanent, temperatura acestuia nu a depășit 34 °C, ceea ce corespunde unei supratemperaturi în jurul a 13...14 °C, sub limita admisibilă de 20 °C. Și la acest set de încercări, varistoarele au fost corespunzătoare din punct de vedere al alegerii.

V.3. Concluzii

O primă concluzie care poate fi formulată, după acest studiu, este lipsa unei metodologii coerente, aplicabilă pentru proiectarea instalațiilor de protecție împotriva supratensiunilor pentru aplicații la joasă tensiune. Fiecare fabricant de varistoare sau de echipamente de protecție dispune de propriul său algoritm, de multe ori empiric, destinat proiectării acestora. Standardele internaționale de specialitate prevăd foarte clar cerințe referitoare la încercările acestor echipamente și mai puțin date privind alegerea sau dimensionarea acestora. Practic, numai aplicația concretă stabilește limitele concrete ale acestor aparate.

Prezenta lucrare propune un algoritm simplu și eficient privind proiectarea echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor pentru aplicații la joasă tensiune.

Pornind de la solicitările, bine definite de către domeniul de aplicație și standardele și normele specifice, la care sunt supuse varistoarele pentru aplicații la joasă tensiune, s-a propus un algoritm de alegere și proiectare a varistoarelor, bazat pe trei pași, anume:

1. Stabilirea tipului și tensiunii nominale a varistorului (calculul electric);
2. Calculul (și verificarea) curentului maxim suportabil, al energiei preluate și al căldurii disipate (calculul termic);
3. Compararea tensiunii și a curentului rezidual suportat de echipamentul de protecție la supratensiuni, ca valoare de vârf, cu limita maximală a supratensiunilor temporare care pot apărea în instalația de protejat (calculul de siguranță).

Varistoarele a căror proces tehnologic de fabricație a fost descris în Capitolul IV și care au fost utilizate pentru protecția SAM au fost proiectate și dimensionate în baza acestui algoritm.

În esență, pașii proiectării stabilesc:

- Pasul I – materialul, tipul, tensiunea de prag și înălțimea varistoarelor; Pornind de la nivelul de tensiune nominal al instalației, se stabilește tensiune de prag pentru a realiza compromisul între sensibilitate și fiabilitate, iar apoi, cunoscând parametrii de material, pentru un anumit tip de varistor, se va determina înălțimea acestuia.
- Pasul II – diametrul și capacitatea de absorbție în energie; Se pornește de la studiul echilibrului termic al varistorului, în două situații limită de exploatare. 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.

Prin evaluarea acestui echilibru se stabilește un prim diametru minimal al varistorului.

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. Prin evaluarea căldurii înmagazinate se corectează diametrul anterior cu noua valoare, mai mare.

Evident, cu cât diametrul este mai mare, cu atât capacitate de absorbție în energie este mai mare. Totuși, creșterea diametrului este limitată de gabaritul echipamentului, prețul acestuia, capacitatea dielectrică a ansamblului, cerințele de electrosecuritate și performanțele dinamice.

Referitor la solicitările termice, numai modelarea numerică poate oferi un răspuns privind valorile maxime ale acestora și metodele specifice de ameliorare a stabilității termice, dar această analiză nu face obiectul prezentei lucrări.

- Pasul III – limitele funcționale ale acestora (practic este o verificare a celorlalți pași).

Dacă în urma proiectării, utilizând metoda prezentată anterior, s-a optat pentru varistoare standardizate, se vor verifica din fișele tehnice ale varistoarelor următoarele mărimi, curentul maxim la o valoare maximă a tensiunii, pentru un impuls standardizat;

Dacă în urma proiectării, utilizând metoda prezentată anterior, s-a optat pentru varistoare realizate artizanal, în serii nestandardizate, acești parametrii maximali de curent și de tensiune trebuie verificați experimental, în scopul confirmării performanțelor specifice.

Este de dorit ca, pentru varistoarele analizate, aplicând un impuls de tensiune de o anumită valoare maximă, curentul să nu treacă de o valoare maximă specifică. După aplicarea acestui curent, varistorul trebuie să nu se distrugă nici prin străpungere dielectrică, nici prin ambalare termică.

Indiferent de modul de alegere al varistoarelor (industriale sau artizanale), se recomandă efectuarea unor încercări specifice, în scopul verificării parametrilor aleși, dacă acest lucru este posibil.

În această lucrare s-au efectuat încercări asupra a câte un singur varistor din seria respectivă, considerând că acestea sunt reproductibile și generalizabile pentru întreaga serie. Încercările specifice au fost:

- Determinarea caracteristicii curent-tensiune (pentru varistorul fizic se verifică tensiunea de prag, de la care s-a pornit în proiectarea lui, la două temperaturi uzuale, anume 20 °C și 40 °C precum și coeficientul de neliniaritate, care dă o informație asupra calității materialului). Se verifică, practic, Pasul I;
- Măsurarea supratemperaturii varistorului în regim permanent și în regim de impuls, pentru a verifica încadrarea varistorului fizic în limitele de temperatură definite la proiectare. Se verifică, practic, Pasul II;

În cazul celor 4 serii de varistoare descrise în această lucrare nu s-au constatat diferențe mari între valorile teoretice de la proiectare și cele concrete de la măsurători, acestea încadrându-se în limitele specificate de normative.

Singurul parametru la care s-au observat abateri destul de semnificative a fost coeficientul de neliniaritate α , care din măsurători a rezultat ca fiind 41 pentru seria de varistoare cu 5 oxizi aditivi, respectiv 28, pentru seria cu 2 oxizi aditivi, în calculele preliminare fiind estimat în jurul valorii de 20, respectiv 18. Acest lucru înseamnă că, varistoarele s-au dovedit a fi mult mai bune calitativ decât s-a estimat, dar și că sensibilitatea lor, în zona tensiunii de deschidere, este mult mai mare, ceea ce afectează negativ decât exploatarea acestora în regim de supratensiune de durată, când riscul ambalării termice este mai mare.

S-a observat că diametrele rezultate în urma calculului pentru serviciul de avarie sunt mult mai mari decât cele calculate pentru serviciul nominal. Putem afirma că serviciul de avarie este cel care determină dimensiunea varistoarelor, și, în situația unor determinări și mai precise, dimensiunile s-ar putea apropia.

Din ultima serie de încercări s-a constatat că, în condițiile limită de exploatare, există o foarte mare rezervă de stabilitate termică a tuturor varistoarelor. Putem spune că, aparent, aceste varistoare au fost supradimensionate ca diametru. În realitate, standardele aplicabile în mod normal în țările UE, privind protecția echipamentelor electrocasnice nu sunt aplicabile în totalitate echipamentelor de telecomunicații, chiar dacă au același nivel de tensiune. În plus, solicitările acestora pot fi mai violente, de multe ori neavând alte echipamente de protecție înaintea lor sau fiind integrate în instalații vechi sau incorect realizate.

Concluziile desprinse în acest capitol, împreună cu algoritmul de proiectare, pot fi generalizate și pentru varistoarele de medie și înaltă tensiune, cu modificarea limitelor și solicitărilor specifice.

Acest algoritm nu exclude soluțiile clasice de proiectare și de încercare, acestea fiind complementare. Se recomandă utilizarea metodelor numerice pentru modelarea completă a stabilității termice, în scopul definirii clare a solicitărilor care vor fi baza calculelor de proiectare.

V.4. Contribuții personale și originale

Dintre cele mai importante contribuții personale ale autorului, în acest capitol, amintim:

- Analiza principalelor metode de proiectare a varistoarelor pe bază de ZnO și evidențierea deficiențelor acestora;
- Propunerea unui algoritm propriu, având trei pași, pentru proiectarea varistoarelor pe bază de ZnO, care implică calculul electric, termic și de siguranță;
- Verificarea pașilor algoritmului;
- Proiectarea, în baza acestui algoritm a 4 serii de varistoare, pentru aplicațiile specifice telecomunicațiilor;
- Calculul concret al solicitărilor electrice și termice;
- Identificarea solicitărilor electrice specifice;
- Definirea noțiunilor de echilibru termic stabil și instabil, utilizând date concrete;
- Efectuarea încercărilor de siguranță;
- Măsurarea unor mărimi specifice în scopul verificării dimensiunilor alese;

Capitolul VI Determinarea impedanței complexe a varistoarelor

Următoarea etapă a implementării varistoarelor în domeniul echipamentelor de telecomunicații constă în determinarea impedanței varistoarelor în funcție de frecvență și alți parametri specifici.

Măsurarea în curent continuu este o metodă foarte eficientă pentru ridicarea și studiul caracteristicii curent-tensiune a varistoarelor, dar nu este întotdeauna suficientă pentru o bună cunoaștere a proprietăților varistorului. Numai răspunsul varistorului la aplicarea unor semnale de frecvență variabilă, va conduce la o mai bună cunoaștere a caracteristicilor lui, în scopul identificării unor alte proprietăți ale acestuia. În literatura de specialitate metoda este cunoscută sub denumirea de spectroscopia impedanței. Prin acest termen se înțelege de fapt măsurarea, analiza și reprezentarea în planul complex a mărimilor complexe ($\underline{\varepsilon}, \underline{Z}, \underline{Y}$). Simplitatea măsurării, cel puțin în anumite domenii de frecvență, dar mai ales rezultatele ce se pot obține în urma analizei, recomandă această metodă pentru utilizare în domeniul protecțiilor rețelelor de telecomunicații.

După o scurtă trecere în vedere a modelului matematic avut la bază în realizarea măsurătorilor, se vor exemplifica datele specifice varistoarelor studiate.

VI.1. Definirea impedanței complexe a varistoarelor

Pentru a facilita studiul, varistorul va fi privit ca un sistem liniar. În sprijinul acestei afirmații vine argumentul valorii tensiunii la care se va face studiul. Oricum, se presupune că, în regim permanent, varistorul nu va trece de tensiunea de prag și nu va intra în zona neliniară a caracteristicii curent-tensiune. Tensiunea aplicată va fi de $U = 10 \text{ V}$, valoare efectivă, varistorul comportându-se liniar, fiind în zona I (ohmică), a caracteristicii.

Cum la aceste tensiuni varistorul se comportă ca un material izolant, este justificată asocierea lui acestui grup de materiale și, în consecință, utilizarea modelelor și metodelor specifice, pentru o bună caracterizare a acestora [74].

Dacă se consideră tensiunea momentană u aplicată la bornele varistorului, prin acesta se va stabili curentul i . Folosind notațiile trigonometrice sau fazoriale:

$$\begin{aligned} u &= U_m \sin(\omega t - \varphi); & \text{sau} & & \underline{U}(\omega) &= U_m e^{i(\omega t - \varphi)} \\ & & & & & (6.1) \\ i &= I_m \sin(\omega t); & \text{sau} & & \underline{I}(\omega) &= I_m e^{i\omega t} \end{aligned}$$

unde:

- U_m ; I_m - valorile de vârf ale tensiunii și curentului;
- φ - defazajul dintre tensiune și curent;
- $\omega = 2\pi f$ - pulsația tensiunii;
- f - frecvența tensiunii de alimentare;

Impedanța complexă $\underline{Z}(\omega)$ este definită ca inversul funcției de transfer a varistorului, văzut ca sistem. Acestuia i se aplică curentul $\underline{I}(\omega)$, care determină, la bornele varistorului, o cădere de tensiune $U(\omega)$.

Pentru impedanța complexă vom avea expresia :

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{U(\omega)}{I(\omega)} = \frac{Um}{Im} \cdot e^{-j\varphi} = |\underline{Z}(\omega)| \cdot (\cos \varphi - j \sin \varphi) = Z'(\omega) - j \cdot Z''(\omega) \quad (6.2)$$

unde:

- $Z'(\omega)$ - partea reală a impedanței complexe, care reprezintă o măsură a posibilității de disipare de energie (poate fi privită ca o rezistență);
- $Z''(\omega)$ - partea imaginară a impedanței complexe, care reprezintă o măsură a posibilității de acumulare de energie (poate fi asimilată cu un condensator, semnul - evidențiind acest lucru);

În consecință, **Impedanța Z** este definită ca modulul impedanței complexe, sau raportul valorilor efective ale lui U și I, conform relației de mai jos [74]:

$$Z = |\underline{Z}(\omega)| = \frac{U}{I} \quad (6.3)$$

Reprezentarea impedanței complexe se poate face în două moduri :

- Reprezentarea utilizând diagrame Nyquist sau D'Argand, adică $Z''(\omega)$, $Z'(\omega)$;
- Reprezentarea utilizând diagrame Bode (modul și fază în funcție de frecvență): $\|\underline{Z}\|(f)$ și $\varphi(f) = \arg(\underline{Z})$.

În exemplele următoare se va prefera prima reprezentare, utilizată mai mult de către fizicieni, a doua fiind preferată de către automatisti [46].

Schema electrică echivalentă, după care se modelează varistorul, considerând microstructura prezentată în Capitolul IV (realizată din granule de ZnO separate prin spații intergranulare izolante) este prezentată în Figura 6.1. În continuare vom utiliza indicele j pentru a se evita confuziile cu indicele iterativ i. Inductivitatea varistorului, în general, poate fi neglijată, ea manifestându-se doar la frecvențe extrem de înalte.

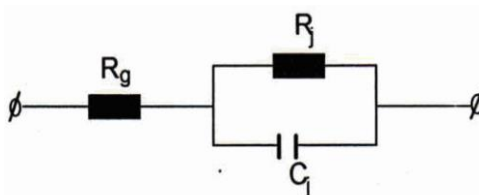


Figura 6.1: Schema echivalentă a unui varistor elementar

unde:

- R_g - este rezistența electrică a granulelor de ZnO. Poate fi privită ca o rezistență metalică, liniară, care nu-și modifică valoarea cu tensiunea aplicată. Valoarea ei este neglijabilă în raport cu valoarea rezistenței spațiului intergranular;
- R_j - Rezistența spațiului intergranular;
- C_j - Capacitatea spațiului intergranular.

R_j, C_j - modelează, de fapt înălțimea barierei de potențial, respectiv lățimea ei ;

Așa cum am mai subliniat anterior, în regimul normal de funcționare, varistorul este supus unei tensiuni joase, comportarea sa fiind dată numai de substanța izolantă din spațiul intergranular, R_g putând fi neglijată, simplificând schema echivalentă la un montaj R_j, C_j , reprezentarea în schema echivalentă putând fi făcută în serie sau în paralel, în funcție de cerințele de modelare impuse de schema de măsurare folosită sau domeniul de măsurare. De asemenea, este esențială dependența valorii elementelor schemei de frecvența semnalului aplicat.

Degradarea varistorului este evidențiată (și diagnosticată) prin creșterea curentului de fugă în zona tensiunilor joase (sub cea de prag). Pentru aceste tensiuni, valoarea rezistenței granulelor de ZnO, R_g , este mult mai mică și se poate neglija în raport cu impedanța ($R_j \parallel C_j$) a spațiului intergranular.

Așa cum am mai arătat în Capitolul IV, schema poate fi completată și cu o inductivitate L , în serie cu R_g . 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.

Concluzionând, starea varistorului poate fi determinată la tensiuni joase, sub cea de prag, esențială pentru caracterizarea ei fiind schema pentru frecvențele medii. Aceasta este și cea mai completă. Sintetic, în Figura 6.2, se prezintă schema echivalentă a varistorului pentru diverse frecvențe [46].

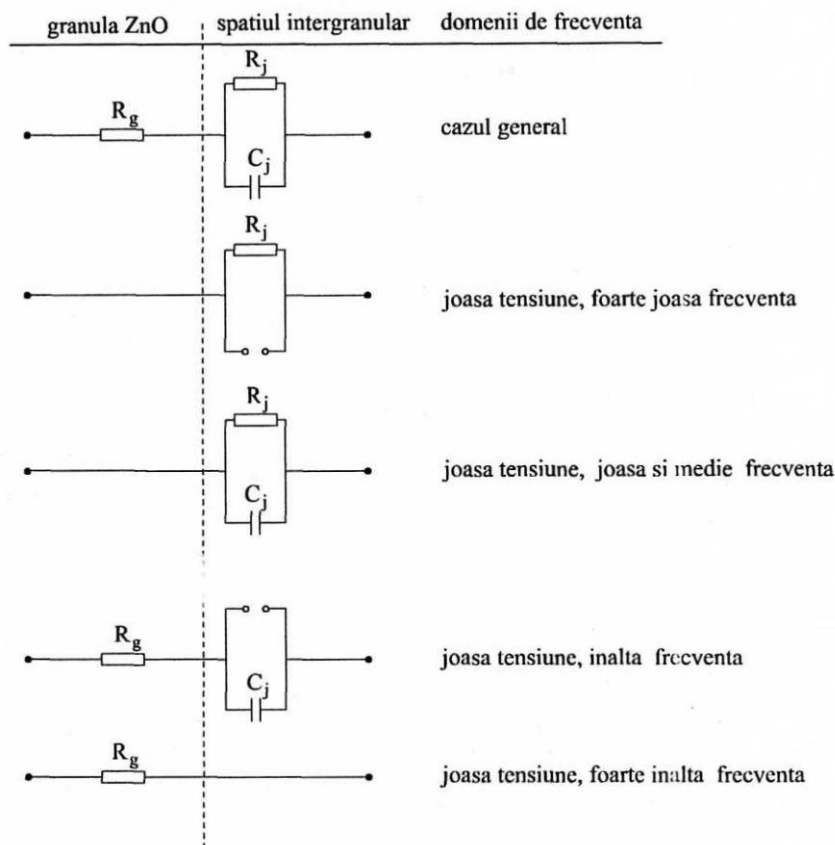


Figura 6.2: Schema echivalentă a varistorului pentru diverse frecvențe

Alături de impedanța complexă, și alte mărimi ajută la o mai bună modelare a acestor tipuri de materiale. S-au introdus relațiile de legătură:

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad \underline{Y} = Y' + jY'' \quad \underline{Z} = Z' - jZ'' \quad (6.4)$$

unde:

- ε – este permitivitatea complexă;
- \underline{Y} - admitanța complexă;
- \underline{Z} - impedanța complexă;

Referitor la permitivitatea complexă, trebuie lămurite anumite aspecte teoretice:

Polarizarea dielectrică

În condițiile în care efectuăm măsurătorile, varistorul poate fi considerat un material dielectric. Într-un dielectric, foarte puține sarcini se pot deplasa liber, curentul de conducție fiind foarte redus. Aplicarea unui câmp electric conduce la deplasarea purtătorilor de sarcină pozitivă și negativă și conduce la apariția unor dipoli electrici. Acești dipoli electrici care apar prin diverse mecanisme de polarizare (electronică, atomică, prin orientare dipolară sau interfacială) permit definirea unor mărimi electrice caracteristice pentru materialele dielectrice (impedanța complexă \underline{Z} , permitivitatea complexă $\underline{\varepsilon}$) [74].

- **Polarizarea electronică sau optică:** din punct de vedere electric, materia este constituită din nuclee atomice (cu sarcina pozitivă) înconjurate de un nor electronic de sarcină negativă. Când un câmp electric constant E este aplicat, norul electronic se deplasează în raport cu nucleul, creându-se un moment dipolar indus de câmpul electric aplicat. Acest tip de polarizare, numită electronică, se stabilește într-un timp foarte scurt și se manifestă pentru frecvențe optice de ordinul 10^{15} Hz.
- **Polarizarea atomică:** în cazul moleculelor constituite din diverși atomi, electronii care participă la legăturile covalente se deplasează către atomii cei mai electronegativi. Aceștia preiau astfel sarcina de sens contrar dând naștere la un moment dipolar indus. Această polarizare, denumită atomică, este observabilă în domeniul frecvențelor 10^{12} Hz.
- **Polarizarea prin orientare dipolară sau Debye:** cu toate că, la nivel microscopic rezultanta momentelor dipolare este nulă, moleculele polare posedă un moment dipolar permanent, independent de existența unui câmp exterior. În absența unui astfel de câmp, momentele dipolare sunt orientate după direcții aleatorii, și schimbă în permanență direcția în funcție de agitația termică. Sub efectul unui câmp electric aplicat, moleculele tind să se alinieze după direcția acestuia, rezultând o polarizare numită prin orientare dipolară sau Debye, care se manifestă pentru frecvențe de ordinul 10^6 Hz.
- **Polarizarea interfacială;** aceasta rezultă din acumularea locală de sarcini la suprafața dintre două medii; dacă materialul posedă purtători liberi de sarcină, aceștia migrează sub efectul câmpului electric aplicat și au tendința de a se concentra în jurul impurităților din material. Este și cazul varistoarelor unde sarcinile se acumulează în spațiile intergranulare. Această polarizare se mai numește și de suprafață și se manifestă mai ales în domeniul frecvențelor joase, timpii de atingere a echilibrului fiind cei mai lungi.

Relaxația dielectrică

Contribuția fiecărui mecanism de polarizare amintit mai sus este funcție de frecvența tensiunilor care se aplică materialului. Răspunsul eșantionului la tensiunea aplicată nu este instantaneu, starea de polarizare tinde asimptotic spre un echilibru care se atinge după un anumit timp, care corespunde valorii maxime a polarizării. Oricare ar fi mecanismul de polarizare considerat, fenomenul relaxației dielectrice poate fi caracterizat printr-un timp caracteristic τ , numit timp de relaxație dielectrică. Dacă timpul de aplicare al câmpului electric este suficient de lung pentru ca toate tipurile de polarizare să se manifeste, polarizația electrică P va tinde spre valoarea maximă, notată cu P_0 , ceea ce reprezintă polarizarea după un timp teoretic infinit (polarizare staționară) după o relație de forma [74]:

$$P = P_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (6.5)$$

Dacă polarizarea este măsurată imediat după aplicarea unui câmp electric se va manifesta numai polarizarea electronică și atomică. Această întârziere a stabilirii echilibrului pentru polarizările dipolare și de suprafață, ce se manifestă la aplicarea sau întreruperea câmpului electric definește noțiunea de relaxație a materialului dielectric. Relaxația este caracterizată de timpul de relaxație τ ce poate fi privit ca un timp de relaxație microscopic, sau ca o constantă de timp pentru sistemele omogene. Pentru sistemele neomogene, cum este și cazul varistoarelor, se vor studia proprietățile lor cu ajutorul timpului mediu de relaxație τ_m și a funcției de distribuție a timpilor de relaxație $F(s)$ conform modelelor cel mai adecvate, utilizate în literatura de specialitate.

Pierderile dielectrice

În procesul polarizării, la nivelul varistorului se manifestă pierderi de energie numite pierderi dielectrice. Pe de altă parte, datorită curentului de conducție ce străbate varistorul, apar și pierderi de energie datorate conducției. În regim sinusoidal, permitivitatea dielectrică devine o mărime complexă care depinde de frecvența tensiunii aplicate:

$$\underline{\varepsilon}(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j \cdot \varepsilon''(\omega) \quad (6.6)$$

unde :

- $\omega = 2\pi f$ – este pulsația;
- ε – este permitivitatea complexă;
- ε' – este partea reală a permitivității complexe;
- ε'' – este partea imaginară a permitivității complexe;

Disiparea de energie este apreciată prin unghiul de pierderi dielectrice, definit prin tangenta sa ca raport între cei 2 termeni ai permitivității complexe:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (6.7)$$

Aceasta este o primă definiție a mărimilor care apar în studiul impedanței complexe a varistoarelor.

VI.2. Modele pentru studiul relaxației dielectrice

În studiul impedanței complexe a varistoarelor, în scopul unei posibile utilizări a lor ca filtre, se utilizează anumite modele teoretice, în primul rând pentru evaluarea relaxației dielectrice [46].

VI.2.1. Modelul Debye

Conform teoriei Debye, relaxația este un proces pur vâscos de frânare a dipolilor ce tind să se alinieze sub acțiunea câmpului electric aplicat. El exprimă dependența permitivității complexe cu frecvența, printr-un sistem de ordinul 1, cu o singură constantă de timp (τ), prin relația denumită Debye, după numele autorului:

$$\underline{Z}(\omega) = R_{\infty} + \frac{R(0) - R_{\infty}}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau} \quad (6.8)$$

Schema electrică echivalentă, precum și reprezentarea grafică a impedanței complexe într-o diagramă d'Argand, pentru acest model este prezentată în Figura 6.3.

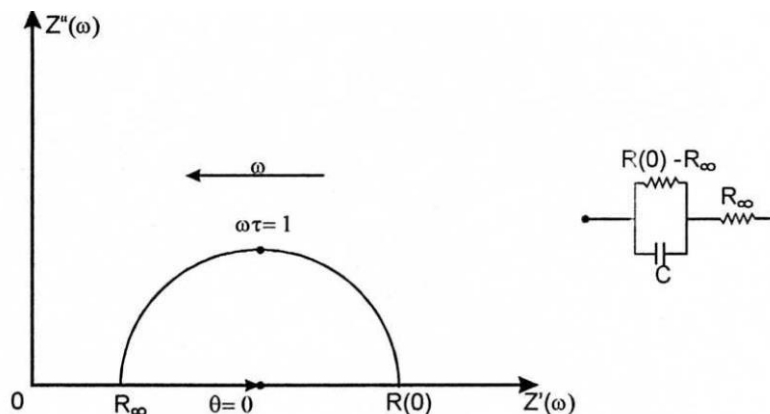


Figura 6.3: Modelul Debye definit pentru impedanța complexă

Semnificațiile mărimilor noi care intervin în schemă sunt:

- R_{∞} - impedanța la frecvență infinită; este practic rezistența granulelor de ZnO [Ω];
- $R(0)$ - impedanța la frecvență nulă, sau în curent continuu fiind identificabilă cu rezistența spațiilor intergranulare [Ω];
- $\tau = (R_{(0)} - R_{\infty}) \cdot C$ - constanta de timp a circuitului [s];
- C - capacitatea spațiilor intergranulare (care depinde de frecvența) [F];

Separând partea reală și imaginară a impedanței complexe se obține :

$$Z'(\omega) = R_{\infty} + \frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{și} \quad Z''(\omega) = -(R_{(0)} - R_{\infty}) \cdot \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (6.9)$$

Eliminând $(\omega\tau)^2$ între cele 2 relații din (6.9), știind că $Z' = R_0/2$, se obține relația:

$$\left(Z'(\omega) - \frac{(R_{(0)} - R_{\infty})}{2}\right)^2 + (Z''(\omega))^2 = \left(\frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{2}\right)^2 \quad (6.10)$$

Relația (6.10) reprezintă ecuația unui cerc, cu centrul pe axa reală, de rază $\frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{2}$. Reprezentarea grafică a relației dintre $Z''(\omega)$ și $Z'(\omega)$ este făcută în

Figura 6.3.

Modelul acesta are avantajul determinării cu o precizie bună a lui R_{∞} și arată că relaxația este caracterizată de un singur timp de relaxație (diagrama este un semicerc $\theta=0$, conf. 6.11), ceea ce corespunde unei omogenități perfecte în care toate microvaristoarele elementare sunt identice. Aceasta se întâmplă numai pentru structura ideală a varistorului, când structura rețelei cristaline este perfectă; în realitate însă, structura nu este perfectă, (în Capitolul IV fiind evidențiată structura reală). Drept urmare, acest model se poate folosi într-o abordare teoretică, dar pentru o mai bună apropiere de realitate se va folosi modelul Cole-Cole. Modelul este simplu, ideal, neținând seama de timpii de relaxație reali.

VI.2.2. Modelul Cole-Cole

Dacă relaxația dielectrică a numeroase lichide polare, confirmă modelul Debye, la majoritatea dielectricilor se constată o anumită deformare a graficului $Z''(Z')$. Luând ca referință modelul Debye, se poate accepta ideea unei relaxații dielectrice diferită de cea ideală. În funcție de materialul supus analizei și de gradul de deformare al cercului s-au propus diverse relații empirice pentru modelizarea caracteristicii, care s-a transformat dintr-un semicerc într-un arc de cerc. Relația propusă de K.S.Cole și R.H.Cole ține cont de o deformare simetrică a caracteristicii, în sensul deplasării semicercului sub axa reală, reprezentarea dependentei $Z''(Z')$ fiind un arc de cerc. Relația se bazează pe aceeași schemă echivalentă adoptată în cazul modelului Debye, schemă adecvata structurii interne a varistorului [46]:

$$\underline{Z}(\omega) = R_{\infty} + \frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{1 + j \cdot (\omega \tau_m)^{\gamma}} \quad \text{cu} \quad \gamma = 1 - \frac{2\theta}{\pi}; \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (6.11)$$

unde :

γ - este un exponent ce depinde de neomogenitatea materialului, reflectată de unghiul θ ;

θ - este unghiul de descentraj [rad]; care reprezintă unghiul făcut de o dreaptă ce unește originea axelor și centrul cercului $Z''(Z')$, cu axa reala (OZ');

τ_m - timpul mediu de relaxație [s];

După cum se observă, relația este mai generală decât precedentă, modelul Debye fiind de fapt un caz particular al modelului Cole-Cole ($\gamma = 1$);

Modelul Cole-Cole poate fi privit ca o superpoziție de procese de relaxație de tip Debye, dar cu timpi de relaxație diferiți, proprii fiecăruia, distribuiți în jurul unei valori medii. Această valoare medie poate fi determinată introducând o anumită funcție de distribuție a timpilor de relaxație. Valoarea unghiului de descentraj este legată de dispersia timpilor de relaxație, care este maximă pentru $\theta = \frac{\pi}{2}$ și minimă pentru $\theta = 0$.

Reprezentarea modelului Cole-Cole pentru impedanța complexă este făcută în Figura 6.4, fiind scoasă în evidență și evoluția caracteristicii cu γ [46]:

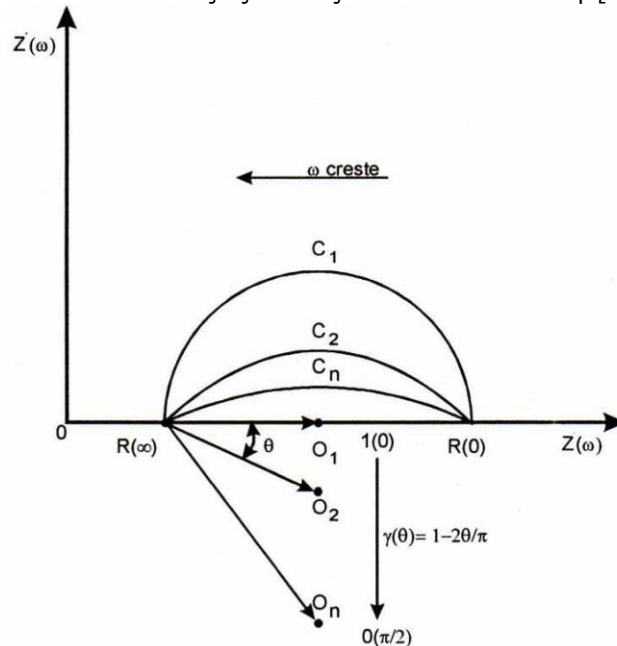


Figura 6.4: Definierea modelului Cole-Cole pentru impedanța complexă

Funcția de distribuție a timpilor de relaxație prezintă, de asemenea interes pentru studiul teoretic al acestui model

VI.2.3. Funcția de distribuție a timpilor de relaxație

Distribuția timpilor de relaxație este caracterizată de o funcție specifică fiecărui model de relaxație adoptat teoretic. Mai mulți cercetători (Von Schweidler, K.W. Wagner, J.G. Kirkwood, R.M Fuoss) au propus diverse funcții de distribuție, pentru cazul varistoarelor cea mai potrivita fiind cea propusa de Cole-Cole corespunzătoare modelului cu același nume. Funcția este definită prin relația [1], [36]:

$$\underline{Z}(\omega) - R_{\infty} = (R_{(0)} - R_{\infty}) \cdot \int_{\tau=0}^{+\infty} \frac{F(S)}{1 + j\omega\tau} d(\ln \tau) \quad (6.12)$$

unde:

$$s = \ln\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right) \quad \text{și} \quad \int_{\tau=0}^{+\infty} F(s) \cdot d(\ln \tau) = 1 \quad (6.13)$$

Folosind transformarea Stieltjes [1] Im fiind partea imaginară:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi(R_{(0)} - R_{\infty})} \lim_{\omega \rightarrow 0} \left\{ \operatorname{Im} \left[\underline{Z} \left(-\omega + \frac{j}{\tau} \right) \right] - \operatorname{Im} \left[\underline{Z} \left(\omega + \frac{j}{\tau} \right) \right] \right\} \quad (6.14)$$

Înlocuind expresia impedanței complexe corespunzătoare modelului Cole-Cole, obținem:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \lim_{\omega \rightarrow 0} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{1 + \left(-j\omega\tau_m - \frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma} - \frac{1}{1 + \left(j\omega\tau_m - \frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma} \right] \quad (6.15)$$

după ce am dat factor comun pe $\frac{\tau_m}{\tau}$ obținem :

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{1 + \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma (-j\omega\tau - 1)^\gamma} - \frac{1}{1 + \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma (j\omega\tau - 1)^\gamma} \right] \quad (6.16)$$

calculăm limita la numitor:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} (-1 - j\omega\tau)^\gamma = (-1 - j \cdot 0)^\gamma = (\cos \pi - j \cdot \sin \pi)^\gamma = e^{-j\pi\gamma}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} (-1 + j\omega\tau)^\gamma = (-1 + j \cdot 0)^\gamma = (\cos \pi + j \cdot \sin \pi)^\gamma = e^{-j\pi\gamma}$$

și obținem pentru F(s):

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma (\cos \gamma\pi - j \cdot \sin \gamma\pi)} - \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma (\cos \gamma\pi + j \cdot \sin \gamma\pi)} \right] \quad (6.17)$$

Separând apoi partea imaginară:

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma \sin(1-\gamma)\pi}{\left[1 - \left(\frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma \cos(1-\gamma)\pi \right]^2 + \left(\frac{\tau_m}{\tau} \right)^{2\gamma} [\sin(1-\gamma)\pi]^2} \quad (6.18)$$

Apoi introducând notația (6.13) se obține: $\left(\frac{\tau_m}{\tau} \right)^\gamma = e^{-s\gamma}$

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \frac{e^{-s\gamma} \cdot \sin(1-\gamma)\pi}{\left[1 - e^{-s\gamma} \cdot \cos(1-\gamma)\pi\right]^2 + e^{-2s\gamma} \cdot [\sin(1-\gamma)\pi]^2} =$$

$$= \frac{1}{\pi} \frac{e^{-s\gamma} \cdot \sin(1-\gamma)\pi}{1 - 2e^{-s\gamma} \cdot \cos(1-\gamma)\pi + e^{-2s\gamma} \cdot [\cos(1-\gamma)\pi]^2 + e^{-2s\gamma} \cdot [\sin(1-\gamma)\pi]^2}$$

(6.19)

Dând factor comun la numitor se va obține:

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \frac{e^{s\gamma} \cdot \sin(1-\gamma)\pi}{1 - 2 \cdot e^{-s\gamma} \cdot \cos(1-\gamma)\pi + e^{-2s\gamma} \cdot [\cos^2(1-\gamma)\pi + \sin^2(1-\gamma)\pi]}$$

(6.20)

și, aplicând identitatea fundamentală a trigonometriei la numitor, se obține:

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \frac{e^{-s\gamma} \cdot \sin(1-\gamma)\pi}{1 - 2 \cdot e^{-s\gamma} \cdot \cos(1-\gamma)\pi + e^{-2s\gamma}}$$

(6.21)

Simplificând cu $e^{-s\gamma}$ și dând la numitor pe 2 factor comun se obține:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin(1-\gamma)\pi}{\frac{e^{-s\gamma} + e^{+s\gamma}}{2} - \cos(1-\gamma)\pi}$$

(6.22)

Utilizând definiția funcțiilor hiperbolice $\frac{e^{-s\gamma} + e^{+s\gamma}}{2} = ch(s\gamma)$

Se obține pentru $F(s)$ expresia finală, în concordanță cu expresia găsită în literatură [1], [35], [37]:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin(1-\gamma)\pi}{ch(\gamma s) - \cos(1-\gamma)\pi}; \quad \text{cu} \quad \gamma = 1 - \frac{2\theta}{\pi};$$

(6.23)

Este o funcție de variabila τ cu τ_m și θ ca parametri, simetrică față de verticala care trece prin abscisa determinată de timpul de relaxație mediu. "Suplețea" ei este dată de unghiul de descentraj θ , fiind cu atât mai "largă" cu cât θ este mai mare. O reprezentare grafică a acestei funcții normalizată la unitate pentru un varistor cu 5 oxizi aditivi, pentru 230 Vef, este făcută în Figura 6.5.

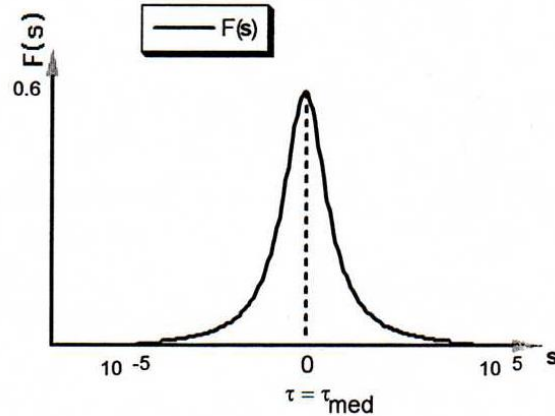


Figura 6.5: Funcția de distribuție a timpilor de relaxație pentru modelul Cole-Cole

Determinarea maximului funcției de distribuție și valoarea lui τ_{med} , pe baza măsurărilor experimentale vor sta la baza concluziilor referitoare la omogenitatea și calitatea varistoarelor. Aceste determinări se vor dovedi de o și mai mare utilitate pentru caracterizarea stării de degradare a varistoarelor supuse testelor de încercare.

În literatura de specialitate există mai multe teorii care propun distribuții ale timpilor de relaxație. Cele mai renumite sunt [46]:

a) Teoria K.M.Wagner:

$$G(\tau) = \frac{\beta}{\sqrt{\pi} \cdot \tau} \cdot e^{-\left(\beta \ln \frac{\tau}{\tau_p}\right)^2} \quad (6.24)$$

Această teorie sugerează o distribuție gaussiană a timpilor de relaxație în jurul unui timp τ_p cu factorul de repartiție β .

b) Teoria J.G.Kirkwood

$$G(\tau) = \frac{\tau_p}{(\tau + \tau_p)^2} \quad (6.25)$$

Această distribuție s-a dovedit potrivită în cazul polimerilor.

c) Teoria R.M.Fuoss

$$G(\tau) = \frac{\beta}{\pi \cdot \tau} \cdot \frac{ch\beta \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_p} \cdot \cos \frac{\beta\pi}{2}}{sh^2 \beta \ln \frac{\tau}{\tau_p} + \cos^2 \frac{\beta\pi}{2}} \quad (6.26)$$

Și aceasta este o funcție de tip gaussian, asemănătoare distribuției Wagner.

Modelul Cole-Cole și funcția de distribuție cu același nume s-au dovedit a fi cele mai adecvate pentru materialele ceramice, categorie din care fac parte și varistoarele cu ZnO.

În continuare se va trece la studiul experimental al impedanțelor complexe, utilizând modelele matematice descrise mai sus. Scopul acestui studiu este de a verifica posibilitatea utilizării varistoarelor ca filtre pentru diverse frecvențe, o altă posibilă utilizare a lor în montajele gata existente, destinate protecției împotriva supratensiunilor.

Această proprietate este utilă, mai ales în situația aplicării tehnologiei varistoarelor în domeniul telecomunicațiilor, pentru protecția centralelor telefonice digitale împotriva atât a supratensiunilor, cât și a unor interferențe care provin fie din rețeaua de alimentare, fie sunt provocate de către echipamentele electronice de putere de tip conversoare statice.

VI.3. Determinarea experimentală a impedanței complexe

Având în vedere tipul și domeniul de aplicație al varistoarelor utilizate, măsurătorile aferente acestui capitol se vor face pentru tensiuni reduse, deci în zona liniară, cvasi ohmică, corespunzătoare curenților mici. Standul experimental a fost realizat în cadrul Laboratorului „Génie Electrique” al Universității „Paul Sabatier” din Toulouse. Schema standului experimental folosit pentru acest set de măsurători este prezentat în Figura 6.6 și are ca părți componente:

- Analizorul de răspuns în frecvență (ARF), care are ca elemente principale :
 - generatorul de semnal sinusoidal $u_e(t)$;
 - analizorul de modul și fază cu două canale (canalul 1 și 2 din schemă) ;
- Sistemul supus măsurătorii, constituit din :
 - varistorul care trebuie analizat - $Z(\omega)$;
 - impedanțele interne ale canalelor de măsură Z_1 și Z_2 ;
 - rezistența de detecție - R_d ;

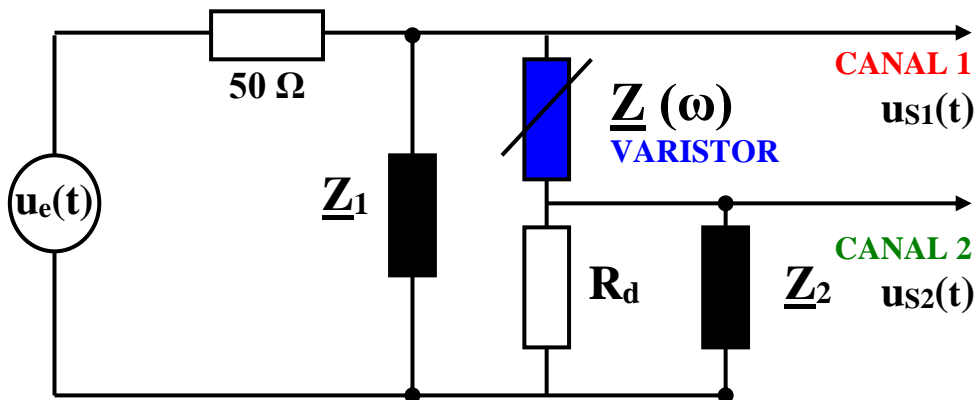


Figura 6.6: Schema dispozitivului experimental

Ca și ARF s-a utilizat un echipament tip Solartron 1253.

Eșantionului i se aplică o tensiune sinusoidală de frecvență și modul ce pot fi variate, analizorul determinând răspunsul sistemului supus măsurării la acest semnal aplicat, din cele două tensiuni $u_{s1,2}(t)$, pe care le primește din cele două

canale de analiză. Principiul măsurării este bazat pe descompunerea în serie Fourier a semnalelor obținute de la analizor. Generatorul de tensiune al ARF generează o tensiune sinusoidală de forma:

$$u_e(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (6.27)$$

Această tensiune este aplicată eșantionului supus analizei. Analizorul prelucrează răspunsul eșantionului la această excitație din tensiunile $u_{s1,2}$ pe care le primește prin cele două canale de analiză :

$$u_{s1,2}(t) = k_{1,2} U_m \sin(\omega t + \varphi_{1,2}) \quad (6.28)$$

Acestea se descompun după componentele în fază și cuadratură din semnalul de intrare și devin:

$$u_{s1,2}(t) = A_{1,2} \sin(\omega t) + B_{1,2} \cos(\omega t) \quad (6.29)$$

unde:

$A_{1,2}$ tensiunea maximă, valoare de vârf, a $u_{s1,2}(t)$ în fază cu $u_e(t)$ [V]

$B_{1,2}$ tensiunea maximă, valoare de vârf, a $u_{s1,2}(t)$ în cuadratură cu $u_e(t)$ [V]

Integrând apoi pe un număr întreg de perioade, și, aplicând transformările Fourier se determină $A_{1,2}$ și $B_{1,2}$:

$$A_{1,2} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{s1,2}(t) \sin(\omega t) dt$$

$$B_{1,2} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{s1,2}(t) \cos(\omega t) dt$$

În urma prelucrării acestor semnale, pe panoul de afișaj al analizorului sunt vizualizate valorile (a,b) ale unei mărimi complexe care reprezintă partea reală și imaginară a funcției de transfer (H) a analizorului:

$$\underline{H} = \frac{\underline{U}_{s2}}{\underline{U}_{s1}} = \rho \exp(j\psi) = \frac{A_2 + j B_2}{A_1 + j B_1} = a + jb \quad (6.30)$$

unde :

$\rho = -k_2/k_1$ - modulul funcției de transfer **H**

$\psi = \varphi_2 - \varphi_1$ - argumentul funcției de transfer **H** [rad]

Pornind de la aceste valori a și b urmează să se determine prin calcul, valoarea părții reale și imaginare a impedanței complexe a varistorului; pentru a deduce legătura între aceste mărimi conform Figurii 6.6. Funcția de transfer se poate scrie și în funcție de impedanțele din schemă:

$$\text{Observând că: } \underline{Z}_d = (R_d \parallel \underline{Z}_2) = \frac{R_d \underline{Z}_2}{R_d + \underline{Z}_2} \quad (6.31)$$

unde : R_d este rezistența de detecție [Ω] ;

$$\underline{Z}_2 = (R_2 // C_2)$$

Z_2 este impedanța internă pentru canalul 2 al analizorului [Ω];

$$\underline{H} = a + jb = \frac{\underline{Z}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}(\omega)} \quad (6.32)$$

Impedanța complexă $\underline{Z}(\omega)$ a varistorului se poate atunci exprima prin relația :

$$\underline{Z}(\omega) = \underline{Z}_d \cdot \frac{(1-H)}{H} \quad (6.33)$$

Cum capacitatea C_2 este de 70 pF pentru gama de frecvențe [10^{-3} - 10^2 Hz], reactanța sa va fi de cel puțin 20 de ori mai mare decât rezistența R_2 de 1 M Ω , impedanța \underline{Z}_2 poate fi considerată egală cu R_2 ; în acest caz, impedanța de detecție \underline{Z}_d devine:

$$\left| \underline{Z}_d \right| = Z_d = R_d \quad \left| \quad R_2 = \frac{R_d R_2}{R_d + R_2} \right. \quad (6.34)$$

Alegând și rezistența de detecție de 1 M Ω , atunci $Z_d = \frac{R_d}{2}$

Considerând expresia impedanței complexe a varistorului corespunzătoare schemei echivalente serie (în continuare se preferă scrierea R_s , X_s , în dauna lui Z'' și Z') :

$$\underline{Z}(\omega) = R_s + j X_s(\omega) \quad (6.35)$$

Și, înlocuind relațiile (6.30) în (6.33) și (6.34), iar apoi identificând termenii cu cei ai relației (6.35) se obțin $R_s(\omega)$ și $X_s(\omega)$, în funcție de a și b citiți de la analizor după relațiile :

$$R_s(\omega) = \frac{R_d}{2} \left(\frac{a}{a^2 + b^2} - 1 \right) \quad (6.36)$$

$$X_s(\omega) = - \frac{R_d}{2} \left(\frac{b}{a^2 + b^2} \right) \quad (6.37)$$

Experimental, măsurarea a fost efectuată pentru 20 de frecvențe distribuite logaritmice (cu scopul de a asigura un număr echilibrat de puncte pentru fiecare decadă de frecvență) în intervalul $10^{-3} \leq f \leq 10^2$ Hz. Cum timpul de măsurare este invers proporțional cu frecvența, măsurarea a fost începută de la frecvențe mari spre cele mici, pentru a sesiza mai repede eventualele erori de măsurare. Măsurarea a fost realizată automat, schema standului de măsură și achiziție fiind prezentată în Figura 6.7. Programul de conducere al procesului de măsurare nu este original, fiind realizat în cadrul LGET. Nu vom insista asupra acestui program.

Fișierele cu datele rezultate în urma măsurătorilor (f,a,b), au fost prelucrate ulterior cu ajutorul formulelor (6.36), (6.37), implementate într-o aplicație MathCAD.

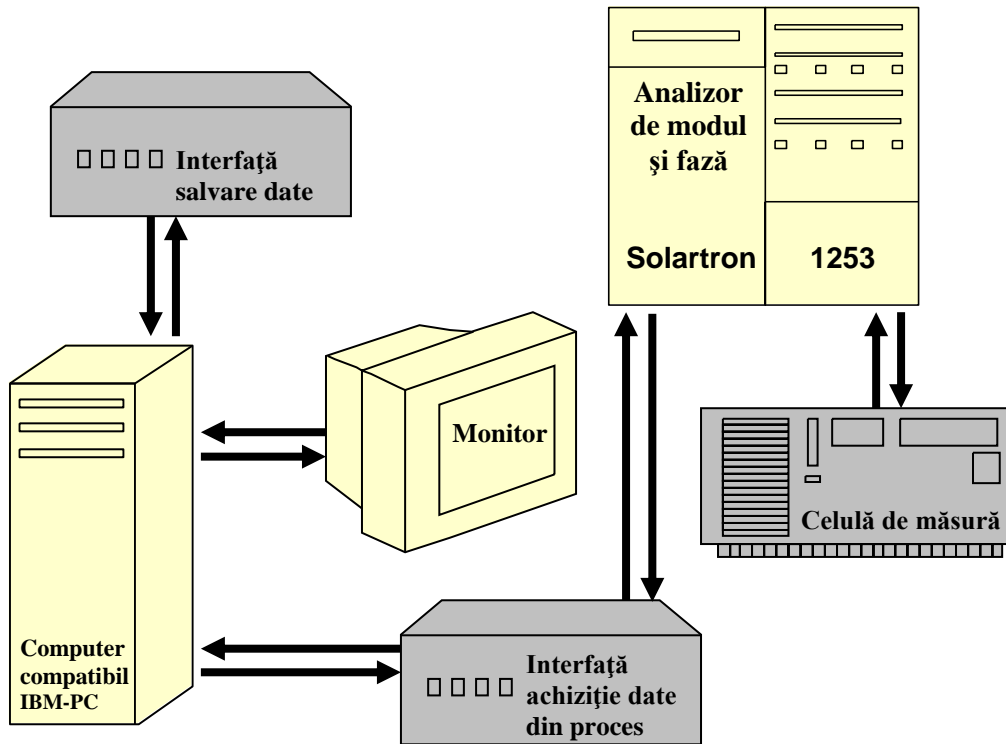


Figura 6.7: Stand automatizat pentru măsurarea impedanței complexe

În urma prelucrării s-au determinat astfel partea reală și imaginară a impedanței complexe a varistorului R_{SK}, X_{SK} , mărimi care vor fi folosite pentru tragerea unor concluzii referitoare la calitatea varistorului analizat (k este indicele de iterație).

Măsurarea a fost efectuată pentru $k = 0 \dots 19$ frecvențe distribuite logaritmice, așa cum s-a menționat anterior (pentru a asigura un număr echilibrat de puncte pentru fiecare decadă de frecvență), în intervalul $10^{-3} \leq f \leq 10^2$ Hz.. Fișierele cu datele rezultate în urma măsurătorilor (f,a,b), au fost prelucrate ulterior cu ajutorul formulelor (6.36), (6.37), implementate într-o aplicație MathCAD, procedură descrisă anterior.

Întreaga procedură este realizată în mod automat.

În Figura 6.8 este prezentată o vedere de ansamblu a instalației, așa cum este ea localizată la Laboratorul „Génie Electrique” al Universității Paul Sabatier din Toulouse.



Figura 6.8: Instalația pentru măsurarea impedanței complexe

Reprezentarea impedanței complexe a fost făcută în sistemul de axe $(R_S, 0, X_S)$, pentru ca graficul să rămână în mare parte în cadranul 1. A rezultat într-adevăr un arc de cerc, conform celor prezentate prin modelul Cole-Cole al impedanței. Pentru frecvențe inferioare valorii de 10^{-3} Hz, sistemul de măsură ar introduce erori mult mai mari, deci porțiunea din arcul de cerc corespunzătoare acestui domeniu este interpolată prin metoda regresiei circulare. Pentru cele patru serii de varistoare fabricate anterior, dată fiind foarte buna reproductibilitate, au fost supuse analizei câte un eșantion din fiecare; În Figura 6.9 este prezentată diagrama impedanței complexe pentru câte un eșantion din seriile produse, în stare virgină, înainte de a le supune la celelalte teste de verificare.

În urma prelucrării s-a determinat astfel partea reală și partea imaginară a impedanței complexe a varistorului $R_{SK}, X_{SK}; k=0..19$

$$\underline{Z}_{SK} = R_{SK} + j \left(-X_{SK} \right) \quad (6.38)$$

Din acest grafic se observă că arcul de cerc nu este complet, neavând puncte de măsurare pentru frecvențele inferioare celei de un mHz. Aceste puncte sunt posibil a fi obținute cu ajutorul unei scheme directe de măsurare, dar necesită timpi mari și există pericolul apariției unor erori necontrolabile, din această cauză renunțându-se la măsurarea lor. Dezavantajul va fi înlăturat prin interpolarea punctelor de măsurare existente și determinarea cercului care le conține. Eventualele erori introduse de această metoda nu vor influența concluziile, datorită mecanismului derivativ de caracterizare care va fi folosit (la compararea caracteristicilor din starea inițială, nedegradată și finală, după supunerea la testele de încercare).

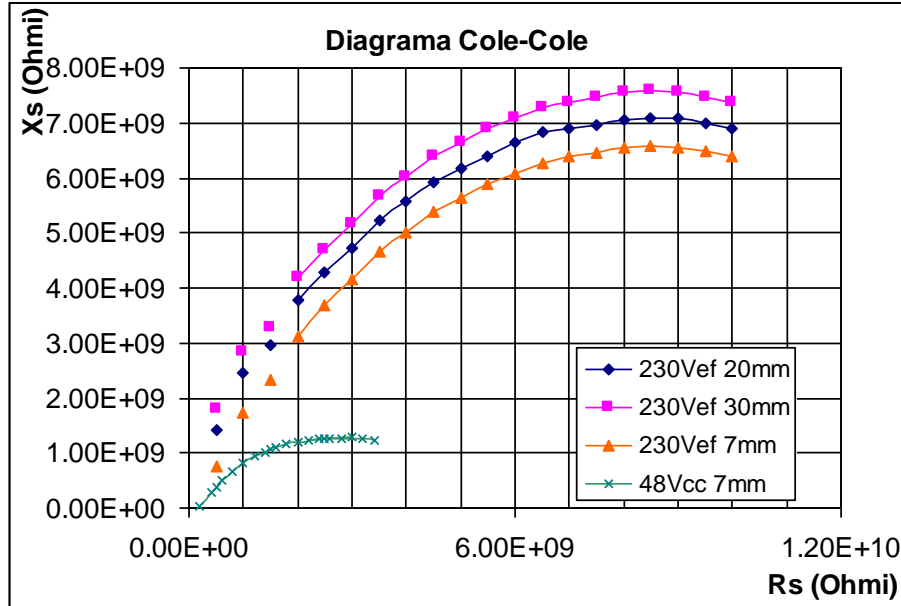


Figura 6.9: Diagrama Cole-Cole pentru varistoarele studiate

VI.3.1. Determinarea unghiului de descentraj θ prin metoda regresiei circulare

În continuare se va prezenta algoritmul pentru determinarea parametrilor arcului de cerc corespunzător modelului Cole-Cole al varistorului. Metoda regresiei circulare constă în a găsi "cel mai bun cerc" care să reprezinte locul geometric al punctelor (impedanțelor complexe):

$$Z_1(R_{S1}, -X_{S1}), \dots, Z_K(R_{SK}, -X_{SK}), \dots, Z_n(R_{Sn}, -X_{Sn}) \quad (6.39)$$

Ecuția cercului de rază R , cu centrul în (X_c, Y_c) este dată de relația:

$$(R_{Sk} - X_c)^2 + (-X_{Sk} - Y_c)^2 = R^2 + \varepsilon_k \quad (6.40)$$

unde $\varepsilon_k = 0$ în punctele de coordonate $(R_{Sk}, -X_{Sk})$ care aparțin cercului și $\varepsilon_k \neq 0$ pentru cele care nu sunt pe cerc. Dezvoltând relația de mai sus și notând $C = X_c^2 + Y_c^2 - R^2$, se obține:

$$2X_c R_{Sk} - 2X_c X_{Sk} + C - (R_{Sk}^2 + X_{Sk}^2) = \varepsilon_k; \quad k = \overline{1, n} \quad (6.41)$$

Pentru a neutraliza semnul abaterii, se ridică la pătrat ecuația anterioară și se însumează aceste pătrate. Problema determinării "cercului cel mai bun" revine în a

găsi tripletul de numere (R, X_C, Y_C) , care să determine suma pătratelor abaterilor, adică eroarea pătratică totală, definită prin [46]:

$$E(X_C, Y_C, C) = \sum_{K=1}^n \varepsilon_K^2 = \sum_{K=1}^n \left[2X_C R_{Sk} - 2Y_C Y_{Sk} + C - (R_{Sk}^2 + X_{Sk}^2) \right]^2 \quad (6.42)$$

Minimizarea expresiei $E(X_C, Y_C, C)$ de mai sus presupune de fapt rezolvarea sistemului următor de 3 ecuații cu 3 necunoscute:

$$\frac{\partial}{\partial X_C} E(X_C, Y_C, C) = 2 \sum_{K=1}^n (2X_C R_{Sk} - 2Y_C X_{Sk} + C - R_{Sk}^2 - X_{Sk}^2) 2R_{Sk} = 0 \quad (6.43)$$

$$\frac{\partial}{\partial Y_C} E(X_C, Y_C, C) = -2 \sum_{K=1}^n (2X_C R_{Sk} - 2Y_C X_{Sk} + C - R_{Sk}^2 - X_{Sk}^2) 2X_{Sk} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial C} E(X_C, Y_C, C) = 2 \sum_{K=1}^n (2X_C R_{Sk} - 2Y_C X_{Sk} + C - R_{Sk}^2 - X_{Sk}^2) = 0$$

Efectuând derivarea se va obține:

$$\begin{aligned} & 2X_C \sum_{K=1}^n R_{Sk}^2 - 2Y_C \sum_{K=1}^n R_{Sk} X_{Sk} + C \cdot \sum_{K=1}^n R_{Sk} - \sum_{K=1}^n R_{Sk}^3 - \sum_{K=1}^n R_{Sk} X_{Sk}^2 = 0 \\ & -2X_C \sum_{K=1}^n R_{Sk} X_{Sk} + 2Y_C \sum_{K=1}^n X_{Sk}^2 - C \cdot \sum_{K=1}^n X_{Sk} + \sum_{K=1}^n R_{Sk}^2 X_{Sk} + \sum_{K=1}^n X_{Sk}^3 = 0 \\ & 2X_C \sum_{K=1}^n R_{Sk} - 2Y_C \sum_{K=1}^n X_{Sk} + n \cdot C - \sum_{K=1}^n R_{Sk}^2 - \sum_{K=1}^n X_{Sk}^2 = 0 \end{aligned} \quad (6.44)$$

Din ultima relație se va obține:

$$C = \frac{1}{n} \left(2X_C \sum_{K=1}^n R_{Sk} + 2Y_C \sum_{K=1}^n X_{Sk} + \sum_{K=1}^n R_{Sk}^2 + \sum_{K=1}^n X_{Sk}^2 \right) \quad (6.45)$$

Înlocuind (6.45) în (6.44) se obține:

$$2 \cdot X_C \cdot \left\{ n \cdot \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 - \left[\sum_{k=1}^n R_{sk} \right]^2 \right\} + 2 \cdot Y_C \cdot \left\{ n \cdot \sum_{k=1}^n R_{sk} \cdot X_{sk} + \sum_{k=1}^n R_{sk} \cdot \sum_{k=1}^n X_{sk} \right\} =$$

$$= \left\{ n \cdot \sum_{k=1}^n R_{sk}^3 - \sum_{k=1}^n R_{sk} \cdot \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 \right\} + \left\{ n \cdot \sum_{k=1}^n R_{sk} \cdot X_{sk}^2 - \sum_{k=1}^n R_{sk} \cdot \sum_{k=1}^n X_{sk}^2 \right\} \quad (6.46)$$

$$2 \cdot X_C \cdot \left\{ -n \cdot \sum_{k=1}^n R_{sk} \cdot X_{sk} + \sum_{k=1}^n R_{sk} \cdot \sum_{k=1}^n X_{sk} \right\} + 2 \cdot Y_C \cdot \left\{ n \cdot \sum_{k=1}^n X_{sk}^2 - \left[\sum_{k=1}^n X_{sk} \right]^2 \right\} =$$

$$= \left\{ -n \cdot \sum_{k=1}^n X_{sk}^3 - \sum_{k=1}^n X_{sk} \cdot \sum_{k=1}^n X_{sk}^2 \right\} + \left\{ -n \cdot \sum_{k=1}^n X_{sk} \cdot R_{sk}^2 - \sum_{k=1}^n X_{sk} \cdot \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 \right\} \quad (6.47)$$

În relațiile (6.46) și (6.47), expresiile dintre acolade se vor nota cu δ , urmat de indicii aferenți 0,1,2,3. Cu notațiile de mai sus introduse pentru o mai ușoară urmărire, având cunoscute prin măsurători și apoi prin prelucrarea rezultatelor măsurătorilor, valorile numerice ale părții reale, R_{sk} , și imagine X_{sk} a impedanței complexe Z_{sk} , va rezulta un sistem cu două ecuații cu două necunoscute (X_C, Y_C):

$$2 X_C \delta_{20} + 2 Y_C \delta_{11} = (\delta_{30} + \delta_{12}) \quad (6.48)$$

$$2 X_C \delta_{11} + 2 Y_C \delta_{02} = (\delta_{03} + \delta_{21}) \quad (6.49)$$

a cărui soluție este [46]:

$$X_C = \frac{(\delta_{30} + \delta_{12})\delta_{02} - (\delta_{03} + \delta_{21})\delta_{11}}{2(\delta_{20}\delta_{02} - \delta_{11}^2)}$$

$$Y_C = \frac{(\delta_{03} + \delta_{21})\delta_{20} - (\delta_{30} + \delta_{12})\delta_{11}}{2(\delta_{20}\delta_{02} - \delta_{11}^2)}$$

și parametrii modelului (raza R și unghiul de descentraj θ):

$$R = \sqrt{C + X_C^2 + Y_C^2} \quad (6.50)$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{|Y_C|}{R} \right) \quad (6.51)$$

Algoritmul calculului unghiului de descentraj, al parametrilor cercului și rezistenței în curent continuu a fost transpus într-un program de calcul, realizat în cadrul L.G.E.T.

În urma măsurătorilor experimentale și a calculului ulterior s-a ajuns la următoarele valori, prezentate în tabelul de mai jos.

Tip varistor	θ [°]	$R_{(0)}$ [Ω]	X_c [Ω]	Y_c [Ω]	R [Ω]
230 Vef 30 mm	16,74	$1,47 \cdot 10^{10}$	$7,67 \cdot 10^9$	$-2,33 \cdot 10^9$	$8,026 \cdot 10^9$
230 Vef 20 mm	14,97	$1,76 \cdot 10^{10}$	$9,1 \cdot 10^9$	$-2,43 \cdot 10^9$	$9,42 \cdot 10^9$
230 Vef 7 mm	12,98	$1,94 \cdot 10^{10}$	$11,28 \cdot 10^9$	$-2,61 \cdot 10^9$	$11,62 \cdot 10^9$
48 Vcc 7 mm	27,9	$0,41 \cdot 10^{10}$	$2,36 \cdot 10^9$	$-1,25 \cdot 10^9$	$2,69 \cdot 10^9$

Tabelul 6.1: Parametrii diagramei Cole-Cole

Din aceste date se remarcă proprietățile asemănătoare ale seriilor pentru 230 Vef, realizate din același material cu 5 oxizi aditivi, seria pentru 48 Vcc având alți parametri care denotă o omogenitate mai redusă și, deci proprietăți electrice mai slabe, lucru confirmat prin testele pentru determinarea coeficientului de neliniaritate.

Un alt criteriu pentru caracterizarea omogenității materialului varistoarelor (și, implicit, a acestora) este funcția de distribuție a timpilor de relaxație. Pentru determinarea acesteia este necesară cunoașterea timpului mediu de relaxație al speciilor polarizabile din varistor.

Pe baza acestei diagrame se pot trage concluzii privind atât calitatea materialului, gradul de uzură al varistorului, cât și parametrii lui electrice în general.

VI.3.2. Calculul timpului mediu de relaxație și reprezentarea funcției de distribuție a timpilor de relaxație

Dacă toate punctele determinate experimental ar fi situate pe un cerc, timpul mediu s-ar putea determina dintr-un singur punct de măsură. Cum cercul este obținut însă printr-o interpolare, timpul mediu va rezulta ca o medie geometrică a timpilor de relaxație corespunzători fiecărui punct de măsură.

Pentru a evidenția mecanismul determinării acestor timpi medii $\tau_{mk}; k = \overline{1, n}$, se prezintă, în Figura 6.10, o metodă bazată pe folosirea parametrilor geometrici $u_k; v_k$, determinați cu notațiile din figură, conform relațiilor [46]:

$$u_k = \sqrt{(R_{sk} - R_\infty)^2 + (-X_{sk})^2} \quad (6.52)$$

$$v_k = \sqrt{(R_0 - R_{sk})^2 + (-X_{sk})^2} \quad (6.53)$$

Acceptând de asemenea modelul Cole-Cole pentru modelare, unde

$$\underline{Z}(\omega) = R_s(\omega) + j x_s(\omega) = R_\infty + \frac{R_{(0)} - R_\infty}{1 + (j \cdot \omega \tau_m)^y} \quad (6.54)$$

Considerând:

$$j^\gamma = \left(\cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} \right)^\gamma = \left(\cos \left(\gamma \frac{\pi}{2} \right) + j \sin \left(\gamma \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (6.55)$$

cu : $\gamma = 1 - \frac{2 \cdot \theta}{\pi}$, unghiul θ fiind exprimat în radiani;

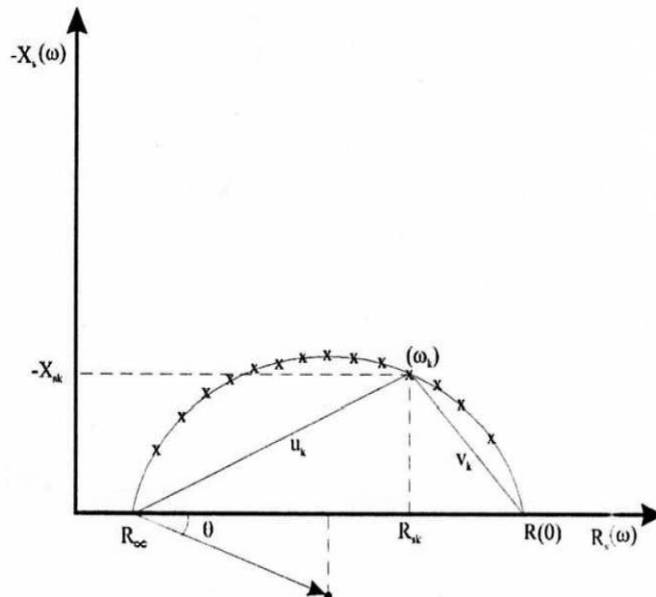


Figura 6.10: Parametrii geometrici

În partea a doua a relației (6.54), înlocuind relația (6.55), înmulțind cu conjugata numitorului, aducând la același numitor, și apoi identificând partea reală și imaginară a impedanței conform primei părți a relației (6.54), se obțin următoarele expresii:

$$R_s(\omega) = R_\infty + \frac{1 + (\omega\tau_{mk})^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega\tau_m)^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau_m)^{2\gamma}} (R_{(0)} - R_\infty)$$

$$X_s(\omega) = \frac{-(\omega\tau_m)^\gamma \sin\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega\tau_m)^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau_m)^{2\gamma}} (R_{(0)} - R_\infty)$$

(6.56)

Înlocuind în expresia parametrilor trigonometrici $u_k; v_k$, expresiile de mai sus particularizate pentru fiecare punct de măsurare k , se obțin relațiile:

$$u_k = \frac{(R_{(0)} - R_{\infty})}{\sqrt{1 + 2(\omega_k \tau_{mk})^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right) + (\omega_k \tau_{mk})^{2\gamma}}} \quad (6.57)$$

$$v_k = \frac{(R_{(0)} - R_{\infty}) \cdot (\omega_k \tau_{mk})^\gamma}{\sqrt{1 + 2(\omega_k \tau_{mk})^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right) + (\omega_k \tau_{mk})^{2\gamma}}} \quad (6.58)$$

Folosind raportul celor doi parametri obținem:

$$\frac{u_k}{v_k} = (\tau_{mk} \omega_k)^{-\gamma} \quad (6.59)$$

de unde:
$$\tau_{mk} = \frac{1}{\omega_k} \left(\frac{u_k}{v_k} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \quad (6.60)$$

Dacă cele n puncte experimentale ar fi situate toate pe un cerc, valoarea lui τ_{mk} ar fi aceeași indiferent de frecvența de măsurare, astfel că s-ar putea determina dintr-un singur punct experimental. Cum însă, în realitate, avem o dispersie a punctelor de măsurare, vom calcula pe τ_m din media geometrică (aleasă din considerente de interpretare statistică a rezultatelor) a celor n valori care rezultă din calcul:

$$\tau_m = \left[\prod_{k=1}^n \tau_{mk} \right]^{\frac{1}{n}} = \left[\prod_{k=1}^n \frac{1}{\omega_k} \left(\frac{u_k}{v_k} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (6.61)$$

Cu valoarea determinată pentru τ_m , se poate trece la reprezentarea funcției de distribuție a timpilor de relaxație $F(s)$, funcție reprezentată anterior și dată de relația (6.23):

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\sin[(1-\gamma)\pi]}{ch(\gamma s) - \cos[(1-\gamma)\pi]} \quad (6.62)$$

unde:

$$s = \ln\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right) \quad \text{și} \quad \int_{\tau=0}^{+\infty} F(s) d \ln \tau = 1 \quad (6.63)$$

În tabelul de mai jos s-au prezentat valorile obținute în urma calculului pentru timpul mediu de relaxație și valoarea maximului funcției de distribuție, pentru cele trei serii de varistoare analizate.

Tip varistor	230Vef 7mm	230Vef 20mm	230Vef 30mm	48 Vcc 7mm
$\tau_m(s)$	35,03	38,77	41,22	7,19
Max[F(s)]	0,54	0,61	0,63	0,45

Tabelul 6.2: Valoarea timpilor medii de relaxație

Reprezentarea funcțiilor de distribuție pentru cele trei serii de varistoare, în starea inițială, nedegradată, este făcută în Figura 6.11, în varianta normalizată. Mai avantajoasă decât reprezentarea $F(s)$ este reprezentarea $F(\tau)$, deoarece în afară de valoarea maximă normată a funcției de distribuție avem o informație și despre valoarea și dispersia timpilor de relaxație. Aceasta este prezentată în Figura 6.12.

Din alura funcțiilor de distribuție $F(s)$, valoarea ei maximă și valoarea timpului mediu de relaxație, se pot trage concluzii importante referitoare la calitatea varsitorului. Analizând cele două reprezentări, se remarcă o valoare mai mare pentru maximul funcției de relaxație și un timp de relaxație mai mare pentru seriile de varistoare cu 5 oxizi aditivi, "Suplețea" caracteristicii poate fi interpretată ca o mărturie a mai bune omogenități a varsitoarelor respective, adică, la nivelul microstructurii varistoarelor, cele mai multe microvaristoare elementare au timpi de relaxație apropiați de τ_m , deci structura varistorului este omogenă din punct de vedere al răspunsului la o solicitare electrică exterioară.

De asemenea o valoare cât mai ridicată pentru timpul de relaxație indică o stabilitate mai bună în timp a caracteristicilor electrice.

Avantajul esențial al metodei este acela că, pentru caracterizare, se poate folosi o tensiune redusă, ceea ce înseamnă ca metoda este nedistructivă, spre deosebire de metoda variației tensiunii reziduale care poate fi distructivă pentru eșantionul supus caracterizării.

Atât aceasta metodă, cât și cea clasică a determinării caracteristicii de protecție $I(U)$ în curent continuu, pot fi utilizate pentru caracterizarea stării de degradare a varistoarelor supuse testelor de îmbătrânire [46].

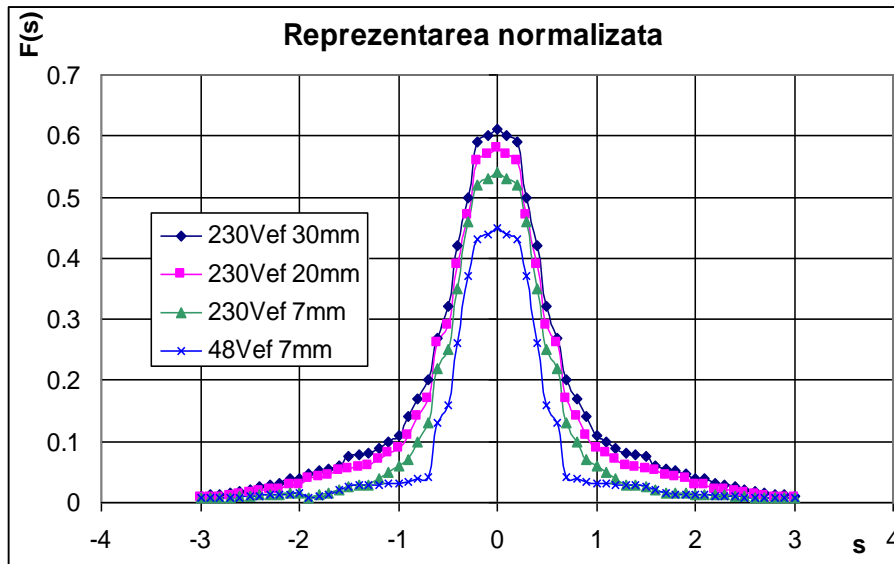


Figura 6.11: Reprezentarea normalizată a funcției de distribuție

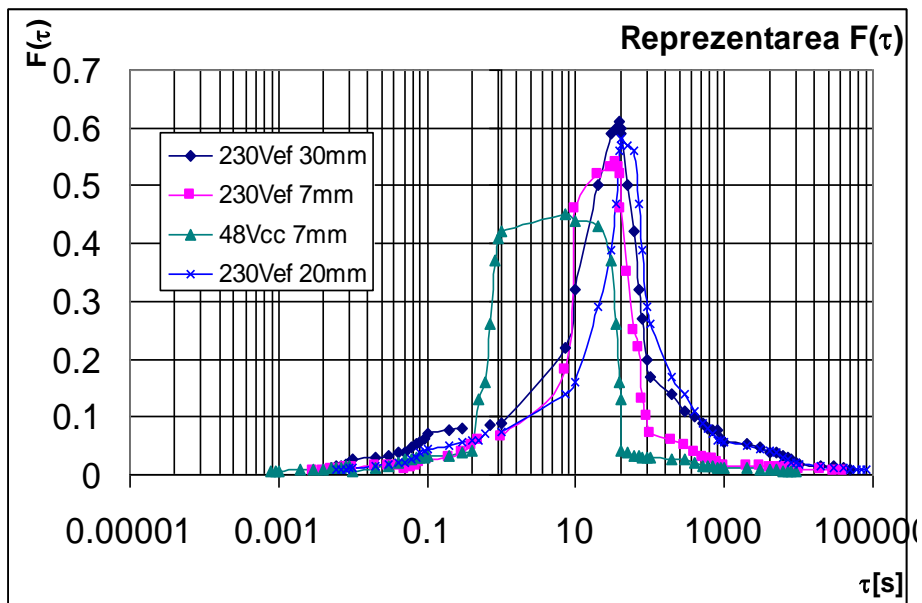


Figura 6.12: Reprezentarea funcției $F(\tau)$

VI.4. Determinarea capacității varistorului la frecvența de 50 Hz

Pentru aplicațiile legate de alimentarea în alternativ la frecvența uzuală de 50 Hz, este posibilă determinarea capacității dielectrice a varistorului printr-o metodă mult mai simplă, utilizând doar un osciloscop digital cu două canale.

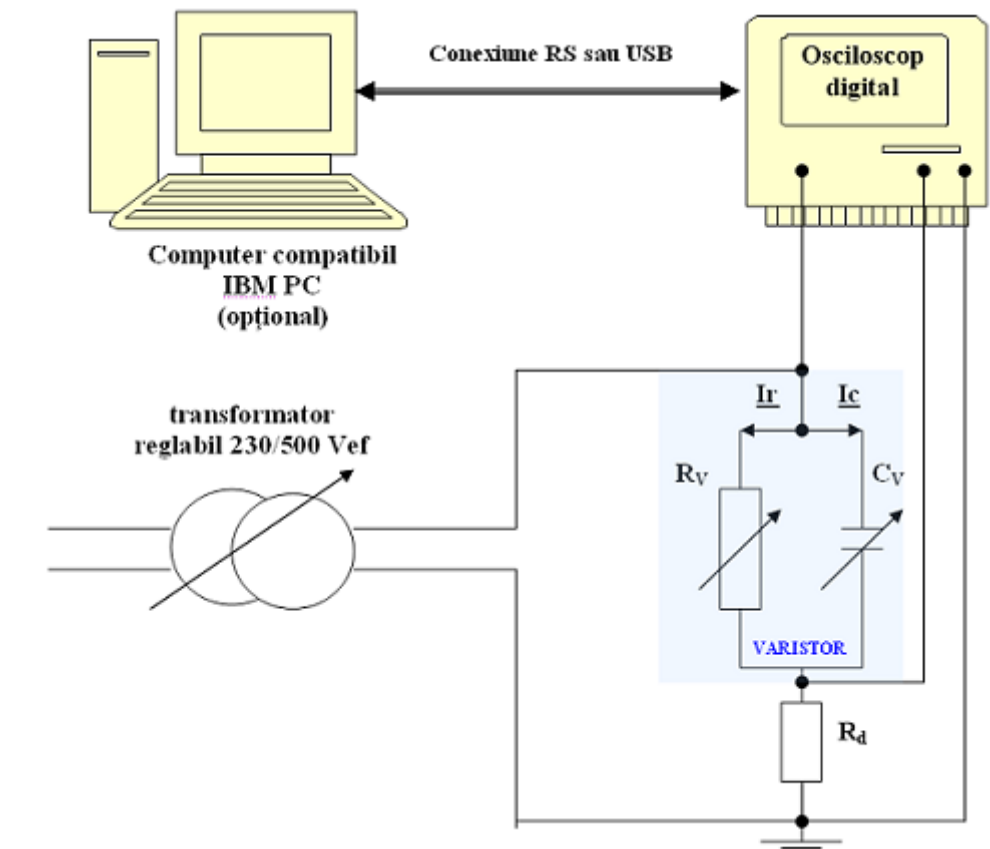


Figura 6.13: Schema pentru măsurători în alternativ

Această metodă se bazează pe observația că varistorul este un element de circuit neliniar, având, la această frecvență, o capacitate dielectrică deloc de neglijat.

Varistorul este echivalat cu o schemă paralel având o capacitate C_V și o rezistență R_V (variabilă în funcție de tensiunea aplicată, dar constantă pentru o anumită tensiune). Această schemă împreună cu schema de principiu pentru realizarea măsurătorilor este prezentată în Figura 6.13.

Nu este necesar ca achiziția de date să se realizeze automat (putem înlătura PC-ul), în funcție de performanțele osciloscopului. Pentru măsurătorile curente s-a utilizat un osciloscop digital pe două canale tip SEFRAM 5064DC.

Pe un canal s-a achiziționat tensiunea aplicată varistorului, iar pe celălalt canal s-a achiziționat, prin rezistența R_d , curentul care se stabilește prin varistor. Tensiunea de alimentare a varistoarelor a fost de 250 Vef (U_{MCOV} , tensiunea maximă ce poate apărea în condiții de exploatare normală, în valoare efectivă). Tensiunea reală se obține prin înmulțirea cu 20 a scalei osciloscopului, curentul fiind deja calibrat.

Dacă tensiunea crește peste această valoare aleasă la limită, varistorul intră în zona tensiunii de prag, iar prin urmare, componenta rezistivă a curentului devine preponderentă. Dacă tensiunea este cu mult sub această valoare, componenta rezistivă a curentului devine total neglijabilă în comparație cu cea capacitivă.

Această tensiune a fost obținută printr-un autotransformator uzual, la frecvența de 50 de Hz a rețelei. Determinările au fost efectuate în cadrul Laboratorului de Materiale Electrotehnice al Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara.

În Figura 6.14 este prezentat un exemplu de oscilogramă obținută prin achiziționarea acestor semnale, pentru un varistor de 20 mm.

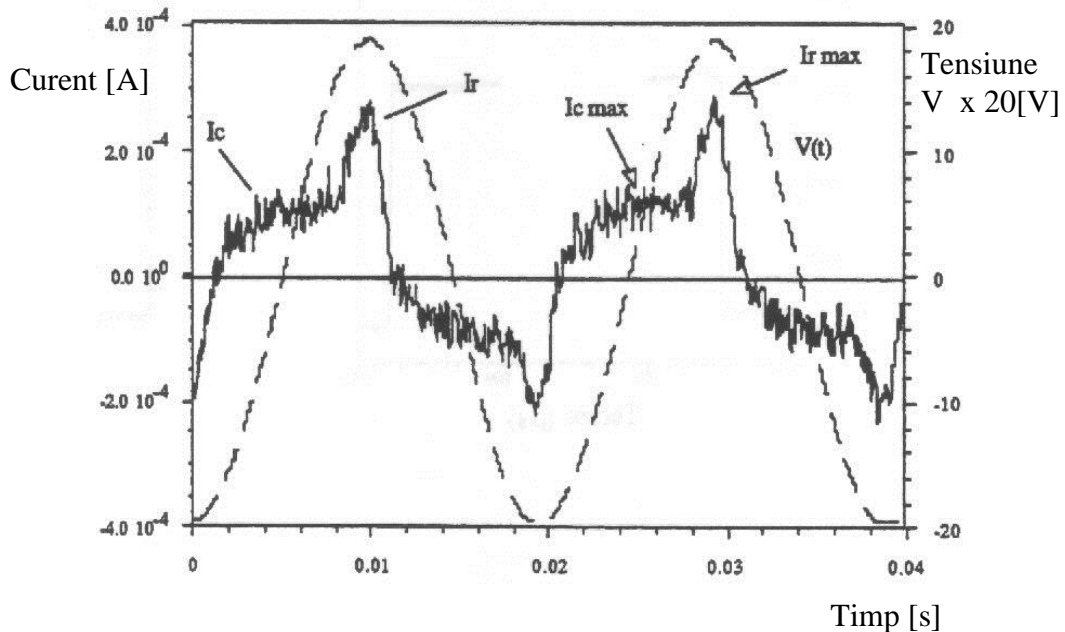


Figura 6.14: Forma de undă a curentului printr-un varistor de 230 Vef

După cum observăm din oscilogramă, putem separa două componente ale curentului, cea rezistivă, I_r , în fază cu tensiunea, precum și cea capacitivă I_c , defazată cu 90 de grade.

Principiul metodei de măsurare în alternativ constă în determinarea amplitudinii curentului capacitiv $I_{c_{max}}$, obținută, evident, la defazajul maxim de 90 de grade, adică atunci când tensiunea trece prin 0.

Pornind de la această valoare maximă, putem scrie următoarea relație de calcul pentru capacitatea varistorului C_V :

$$C_V = I_{C_{\max}} / (V_{\max} \cdot \omega) \quad (6.64)$$

În principiu, în baza aceleiași scheme se pot face și măsurători ale rezistenței electrice a varistorului pentru o anumită valoare a tensiunii efective.

S-a utilizat $V_{\max} = 250 \cdot 1,41 = 352 \text{ V}$, $\omega = 314 \text{ rad/s}$

Cunoscând valoarea capacității varistorului C_V la 50 Hz, se poate determina și permitivitatea relativă a acestuia, ϵ_r la o anumită tensiune (250 Vef în cazul de față) și frecvența de 50 Hz, verificând astfel performanțele materialului.

Asemenea teste au fost efectuate pentru toate varistoarele de 230 Vef.

Relația de calcul a permitivității relative ϵ_r este:

$$\epsilon_r = (4 \cdot h \cdot C_V) / (\epsilon_0 \cdot \pi \cdot d^2) \quad (6.65)$$

unde:

$h = 2,8 \text{ mm}$ (înălțimea varistorului de 230 Vef);

d este diametrul varistorului;

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ (permitivitatea absolută a vidului).

Rezultatele acestor măsurători sunt trecute în Tabelul 6.3:

Tip varistor 230Vef	$I_{C_{\max}}$ [A]	C_V [nF]	ϵ_r
7 mm	$1,32 \cdot 10^{-5}$	0,12	1044
20 mm	$1,13 \cdot 10^{-4}$	1,03	1038
30 mm	$2,57 \cdot 10^{-4}$	2,33	1046

Tabelul 6.3: Rezultatele măsurătorilor în curent alternativ 230 V la 50 Hz

Toate măsurătorile au fost efectuate la o temperatură ambiantă de cca. 20 °C.

Din tabelul de mai sus rezultă o valoare a lui ϵ_r în jurul a 1040, pentru materialul având 5 oxizi aditivi, utilizat în tensiune alternativă.

Valorile apropiate ale lui ϵ_r demonstrează, ca o verificare, corectitudinea măsurătorilor efectuate și a principiului metodei. În literatura de specialitate, pentru acest material considerat clasic, se descriu valori a lui ϵ_r în jurul a 1000-1500.

Pentru varistoarele de 48 Vcc, cu doi oxizi aditivi, care au un diametru al granulei de peste 2 ori mai mare (deci mai puține microcondensatoare echivalente pe înălțimea varistorului), prin urmare ϵ_r va avea valori mai reduse. Determinarea capacității acestora se poate face în curent alternativ, chiar dacă acestea sunt utilizate în curent continuu.

Tensiunea efectivă maximă (în curent alternativ) la care s-au făcut încercările acestora este cca. 0,65 din tensiunea de deschidere (aprox. 40 Vef, în loc de 38,9).

Prin urmare s-a considerat $V_{\max} = 0,65 \cdot 59 \cdot 1,41 = \text{aprox. } 56,4 \text{ V}$, $\omega = 314 \text{ rad/s}$

Alimentarea s-a făcut printr-un transformator coborâtor de 230/40 Vef. Din acest motiv s-a preferat alimentarea la 40 Vef, ușor mai mare decât cei 38,9 recomandați. Chiar și în aceste condiții, ponderea curentului rezistiv este neglijabilă.

Relațiile (6.64) și (6.65) rămân valabile, cu precizarea că:

$h = 0,9 \text{ mm}$ (înălțimea varistorului de 48 Vcc);

$d = 7 \text{ mm}$;

Rezultatele măsurătorilor sunt trecute în Tabelul 6.4.

Tip varistor 48Vcc	$I_{C_{max}}$ [A]	C_V [nF]	ϵ_r
7 mm	$3,01 \cdot 10^{-6}$	0,17	468

Tabelul 6.4: Rezultatele măsurătorilor în curent alternativ 40 V la 50 Hz

Toate măsurătorile au fost efectuate la o temperatură ambiantă de cca. 20 °C.

Din tabelul de mai sus rezultă o valoare a lui ϵ_r în jurul a 470, pentru materialul având 2 oxizi aditivi, utilizat în tensiune continuă. Această valoare permite obținerea unei capacități reduse, având în vedere că și înălțimea acestui varistor este mult mai redusă decât cea a omologului său în diametru, pentru alimentare în alternativ.

Obținerea unui ϵ_r de cca. 2,2 ori mai mic decât cel al materialului cu 5 oxizi aditivi, care are granulația de 2,11 ori mai mare denotă corectitudinea măsurătorilor și a principiului metodei.

Măsurarea inductivității echivalente a varistorului este utilă doar în situația în care acest varistor operează la foarte înaltă frecvență, cu rol de filtru și nu face obiectul prezentei lucrări.

VI.5. Concluzii

Studiul parametrilor schemei echivalente a varistoarelor este util în situația în care aceste dispozitive sunt utilizate ca filtre pentru anumite frecvențe (asigurând o impedanță redusă pentru curentul de frecvența respectivă). Acest studiu este util și pentru caracterizarea materialului, oferind informații privind calitatea și degradarea acestuia.

Putem afirma că măsurarea în curent continuu este o metodă foarte eficientă pentru ridicarea și studiul caracteristicii curent-tensiune a varistoarelor, dar nu este întotdeauna suficientă pentru o bună cunoaștere a proprietăților varistorului și a calității materialului acestuia. Prin studiul răspunsului varistorului la aplicarea unor semnale de frecvență variabilă, se va ajunge la o mai bună cunoaștere a caracteristicilor lui, în scopul identificării unor alte proprietăți ale acestuia.

În literatura de specialitate metoda este cunoscută sub denumirea de spectroscopia impedanței, dar este aplicată foarte rar în caracterizarea varistoarelor, dat fiind că funcția principală a acestora este de supresoare de tensiune și nu de filtre pasive sau active. Simplitatea principiului și flexibilitatea măsurării, cel puțin în anumite domenii de frecvență, dar mai ales rezultatele ce se pot obține în urma analizei, recomandă această metodă pentru utilizare în domeniul protecțiilor rețelelor de telecomunicații. Chiar dacă principiul metodei este relativ simplu, este necesară existența unor aparate performante (și scumpe), precum și existența (sau conceperea) de aplicații software care să realizeze o prelucrare eficientă a datelor experimentale.

Pentru studiul impedanței complexe a varistoarelor, în scopul unei posibile utilizări a lor ca filtre, se utilizează anumite modele teoretice, în primul rând pentru evaluarea relaxației dielectrice.

Modelul Debye stă la baza tuturor modelelor studiate. Conform teoriei Debye, relaxația este un proces pur vâscos de frânare a dipolilor ce tind să se alinieze sub acțiunea câmpului electric aplicat. El exprimă dependența permitivității complexe cu frecvența, printr-un sistem de ordinul 1, cu o singură constantă de timp având avantajul determinării cu o precizie bună a lui R_∞ și arătând că relaxația este caracterizată de un singur timp de relaxație, ceea ce corespunde unei omogenități

perfecte în care toate microvaristoarele elementare sunt identice. Aceasta se întâmplă numai pentru structura ideală a varistorului, când structura rețelei cristaline este perfectă; în realitate însă, structura nu este perfectă. Prin urmare, acest model se poate folosi într-o abordare teoretică, dar pentru o mai bună apropiere de realitate se va folosi modelul Cole-Cole.

Pornind de la modelul Debye, se poate accepta ideea unei relaxații dielectrice diferită de cea ideală. În funcție de materialul supus analizei și de gradul de deformare al cercului s-au propus diverse relații empirice pentru modelizarea caracteristicii, care s-a transformat dintr-un semicerc într-un arc de cerc. Relația propusă de K.S.Cole și R.H.Cole ține cont de o deformare simetrică a caracteristicii, în sensul deplasării semicercului sub axa reală, reprezentarea dependentei $Z''(Z')$ fiind un arc de cerc. Relația se bazează pe aceeași schemă echivalentă adoptată în cazul modelului Debye, schemă adecvata structurii interne a varistorului.

Reprezentarea impedanței complexe a fost făcută experimental pentru câte un varistor din fiecare serie (măsurătorile sunt reproductibile), pentru 20 de frecvențe generate de instalația aflată în dotarea L.G.E.Toulouse. A rezultat într-adevăr un arc de cerc, conform celor prezentate prin modelul Cole-Cole al impedanței.

Din datele obținute prin măsurători se remarcă proprietățile asemănătoare ale seriilor pentru 230 Vef, realizate din același material cu 5 oxizi aditivi, seria pentru 48 Vcc având alți parametri care denotă o omogenitate mai redusă și, deci proprietăți electrice mai slabe, lucru confirmat prin testele anterioare efectuate pentru determinarea coeficientului de neliniaritate.

Un alt criteriu pentru caracterizarea omogenității materialului varistoarelor (și, implicit, a acestora) este funcția de distribuție a timpilor de relaxație. Pentru determinarea acesteia este necesară cunoașterea timpului mediu de relaxație al speciilor polarizabile din varistor. Acest criteriu nu este neapărat necesar pentru evaluarea performanțelor de filtraj.

Pe baza acestei diagrame se pot trage concluzii privind atât calitatea materialului, gradul de uzură al varistorului, cât și parametrii lui electrice în general.

Din alura funcțiilor de distribuție $F(s)$, valoarea ei maximă și valoarea timpului mediu de relaxație, se pot trage concluzii importante referitoare la calitatea varistorului. Analizând cele două reprezentări, se remarcă o valoare mai mare pentru maximul funcției de relaxație și un timp de relaxație mai mare pentru seriile de varistoare cu 5 oxizi aditivi, "Suplețea" caracteristicii poate fi interpretată ca o măturie a mai bune omogenități a varistoarelor respective, adică, la nivelul microstructurii varistoarelor, cele mai multe microvaristoare elementare au timpi de relaxație apropiați de τ_m , deci structura varistorului este omogenă din punct de

vedere al răspunsului la o solicitare electrică exterioară. O valoare cât mai ridicată pentru timpul de relaxație indică o stabilitate mai bună în timp a caracteristicilor electrice. Diagrama Cole-Cole, precum și reprezentările timpilor de relaxație oferă instrumente performante de caracterizare a proprietăților varistoarelor, dar sunt costisitoare și greu reproductibile.

Pentru aplicațiile legate de alimentarea în alternativ la frecvența uzuală de 50 Hz sau în curent continuu, este posibilă determinarea capacității dielectrice a varistorului printr-o metodă mult mai simplă, utilizând doar un osciloscop digital cu două canale, având funcție de măsurare a valorilor de vârf.

Din oscilogrammele efectuate, putem separa două componente ale curentului, cea rezistivă, în fază cu tensiunea I_r , precum și cea capacitivă I_c , defazată cu 90 de grade. Principiul metodei de măsurare în alternativ constă în determinarea amplitudinii curentului capacitiv $I_{c_{max}}$, obținută, evident, la defazajul maxim de 90

de grade, adică atunci când tensiunea trece prin 0. Pornind de la această valoare maximă, se poate determina capacitatea varistorului C_V .

Tensiunea efectivă de lucru este chiar U_{MCOV} , (valoare efectivă maximă a tensiunii de alimentare în regim permanent) pentru care se obțin relațiile la limită. Având în vedere corelarea, în etapa de dimensionare, a tensiunii de prag cu această valoare, observăm că valoarea aceasta este recomandabilă și din punct de vedere al ponderii componente capacitive a curentului.

În plus, această încercare nu este o încercare distructivă, care să conducă la degradarea reversibilă sau ireversibilă a varistorului.

Validitatea modelului și a metodei a fost confirmată prin obținerea unor valori apropiate ale permitivității dielectrice ϵ_r pentru toate cele trei serii de varistoare cu 5 oxizi aditivi ($\epsilon_r = 1040$) și a unei valori de 2,2 ori mai mică pentru materialul cu 2 oxizi aditivi, în condițiile în care acesta are o granulație de 2,1 ori mai mare, valorile fiind comparabile cu cele indicate în literatură. Valorile obținute pentru capacitatea varistorului și, respectiv, pentru permitivitatea relativă a acestuia, au confirmat modelul teoretic al microstructurii varistoarelor luat în studiu pentru dimensionarea și execuția acestora. Metoda este originală, dar extrem de simplă și eficientă, fără a necesita aparatură costisitoare, reproductibilă, utilizabilă de către orice utilizator de varistoare.

Prin această metodă se poate măsura și inductivitatea echivalentă a varistorului, care se manifestă doar la frecvențe foarte înalte (sute de MHz). Este necesară separarea în prealabil a componente capacitive la acea frecvență, precum și determinarea celei rezistive. Pentru efectuarea acestui set de măsurători este necesară existența unei aparaturi mult mai performante și costisitoare, care ar putea fi utilizată pentru măsurători având rezultate mult mai precise. Măsurarea inductivității echivalente a varistorului este utilă doar în situația în care acest varistor operează la foarte înaltă frecvență, cu rol de filtru și nu face obiectul prezentei lucrări.

VI.6. Contribuții personale

Dintre cele mai importante contribuții personale ale autorului, în acest capitol, amintim:

- Analiza principalelor metode de măsurare a impedanței varistoarelor pe bază de ZnO și evidențierea avantajelor și dezavantajelor acestora;
- Stabilirea modelului Cole-Cole ca fiind cel mai adecvat pentru determinările impedanței complexe;
- Descrierea instrumentelor matematice utilizate pentru studiul teoretic și experimental;
- Adaptarea unei instalații folosită uzual pentru caracterizarea din punct de vedere dielectric a unor polimeri pentru măsurătorile pe varistoare;
- Realizarea măsurătorilor pentru determinarea diagramei Cole-Cole și a timpilor medii de relaxație precum și trasarea graficelor aferente;
- Elaborarea unor concluzii specifice;
- Propunerea unei metode simple și eficiente pentru determinarea capacității dielectrice a varistoarelor, utilizând aparatură de uz general;
- Calculul și verificarea permitivității dielectrice relative a seriilor de varistoare utilizate;

Capitolul VII. Implementarea modulelor de protecție împotriva supratensiunilor în instalațiile de telecomunicații

După dimensionarea și proiectarea varistoarelor utilizate, precum și după execuția și verificarea acestora, seriile de varistoare au fost înglobate în construcția unor module de protecție împotriva supratensiunilor, implementate în structura unei centrale telefonice digitale disponibilă pentru testare.

Toate încercările aferente montării modulelor pe centrala telefonică digitală au fost realizate pe platforma de testare din cadrul ALCATEL Timișoara, spre deosebire de încercările anterioare, pe varistoarele independente, care au fost realizate în cadrul Laboratorului „Génie Electrique” al Universității PAUL SABATIER din Toulouse, precum și în cadrul Laboratorului de Materiale Electrotehnice al Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică a Universității POLITEHNICA din Timișoara.

Pentru moment, modulele nu au fost încă integrate în fabricația de serie a centralelor telefonice, încercările fiind realizate din punct de vedere al studiului de fezabilitate și al studiilor aferente prezentei lucrări.

VII.1. Descrierea și amplasarea modulelor de protecție

În acest capitol vom prezenta, pe scurt, construcția și localizarea modulelor de protecție împotriva supratensiunilor, așa cum au fost ele utilizate în centrala telefonică digitală, urmând ca, în subcapitolele anterioare, să detaliem testele specifice efectuate asupra acestora.

VII.1.1. Modulul trifazat pentru 230 Vef

Acest modul a fost descris pe larg în Capitolul III. Din acest motiv nu vom insista prea mult asupra performanțelor acestuia. Modulul, realizat din trei cablaje, aferente fiecărei faze, este destinat a fi montat pe alimentarea trifazată de 400/230 Vef a sursei modulare de alimentare tip SAM 02-03. Arhitectura acestei surse tip SAM 02-03 a fost prezentată tot în Capitolul III.

O supratensiune produsă în cazul unei centrale cu mai multe SAM-uri nu era chiar atât de critică, din cauză că, de obicei, supratensiunea putea să afecteze doar câteva module SAM care, în cazul întreruperii funcționării afectau doar o parte din centrală. În cazul noilor echipamente HC4 este necesară doar o sursă SAM; dacă ne gândim că sursa poate fi avariata de o supratensiune, trebuie să realizăm că peste 250.000 de abonați pot rămâne fără serviciul telefonic și de date.

Orice echipament hardware peste care este dezvoltat un program software rămâne în scurt timp ușor învechit, din cauza evoluției rapide a programelor. Dacă într-un interval de zece ani, echipamentul hardware a avut o evoluție de 3 versiuni de la RCX, HC3 și apoi HC4, evoluția software a fost cu mult mai spectaculoasă, ea realizând peste 9 versiuni, deoarece piața de software este explozivă. Fiecare evoluție software era limitată în principal de echipamentul hardware, adică de faptul că programele soft nu puteau evolua decât în limita impusă de echipament, (memorie, vitezele procesoarelor, magistralelor, bufferelor) nefiind posibilă o evoluție hardware atât de rapidă. De obicei se dezvoltă doar o parte din echipament și, din cauza standardizării, ea trebuia să fie compatibilă cu vechile componente.

Astfel, tensiunea de alimentare a rămas aceeași, ea fiind de de -48V, astfel că modulul de protecție proiectat este potrivit pentru oricare din platformele existente.

Domeniul de utilizare al acestui modul poate fi lărgit și la consumatorii casnici, cu puteri sub 3000 W și având numeroase (și sensibile) alte receptoare: motoare de putere medie (aspiratoare, mașini de spălat, etc.), instalații de aer condiționat, frigider, instalații de iluminat, aparatură electronică, TV, audio, video, HiFi, tehnică de calcul, cuptoare și aparate electrocasnice de încălzit.

În urma testelor descrise în Capitolul V, s-a demonstrat că toate aceste varistoare sunt, în fapt, ușor supradimensionate pentru aplicația concretă, dar dată fiind specificitatea alimentării centralei telefonice, dimensionarea este acoperitoare [43].

În Figura 7.1 este prezentată amplasarea modulului trifazat pe conexiunea de intrare a sursei tip SAM.

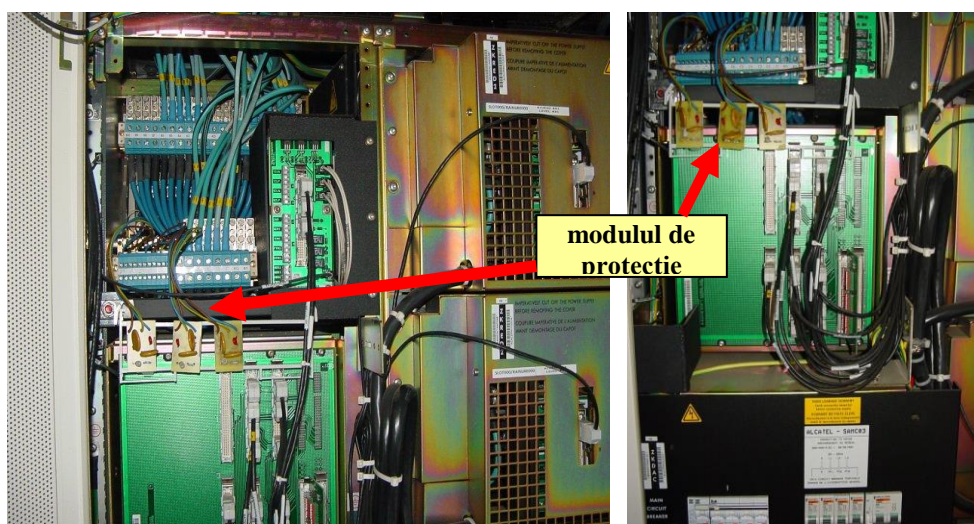


Figura 7.1: Amplasarea modulului trifazat pe alimentarea SAM

Schema electrică detaliată a acestui modul a fost prezentată în Capitolul III.

Acest modul reprezintă prima și singura protecție a sursei de alimentare împotriva oricăror supratensiuni care se propagă pe rețeaua trifazată până la intrarea în instalație. Originalitatea acestui modul constă în faptul că poate opera singur în arhitectura instalației, fără a necesita și prezența unor module având o clasă superioară sau inferioară de protecție.

Prețul acestui modul este extrem de redus, în comparație cu valoarea echipamentelor protejate. Dacă se va trece la producția de serie a acestuia, prețul lui nu va depăși 15 euro, o sumă infimă în comparație cu valoarea de zeci de mii de euro a echipamentului protejat sau a daunelor create de scoaterea din uz a centralei. O altă caracteristică importantă a acestuia îl face deosebit de util, anume, în situația depășirii valorii proiectate a supratensiunii sau în eventualitatea unei supratensiuni de durată, acest modul se va distruge. Dar distrugerea lui înseamnă, de fapt, străpungerea dielectrică a varistorului, iar impedanța sa redusă provoacă un scurtcircuit care va fi eliminat de către declanșatoarele electromagnetice ale întreruptoarelor automate (siguranțelor automate) localizate în partea de jos a tabloului electric, așa cum se observă din Figura 7.1. Evident, instalația va fi oprită

pentru scurt timp, dar va rezista avariei, putând fi reconectată după demontarea modulului distrus.

Așa cum vom arăta în continuare, echipamentul asigură și funcția de filtrare a perturbațiilor care se propagă pe linia de alimentare și care pot influența negativ calitatea semnalului telefonic.

VII.1.2. Modulul monofazat pentru 230 Vef

Acest modul este localizat pe ieșirile monofazate la 230 Vef, necesare serviciilor proprii ale centralei telefonice. Aceste ieșiri sunt realizate, pornind de la bateriile de acumulatori având 48 V (4 x 12 V), prin intermediul unor invertoare.

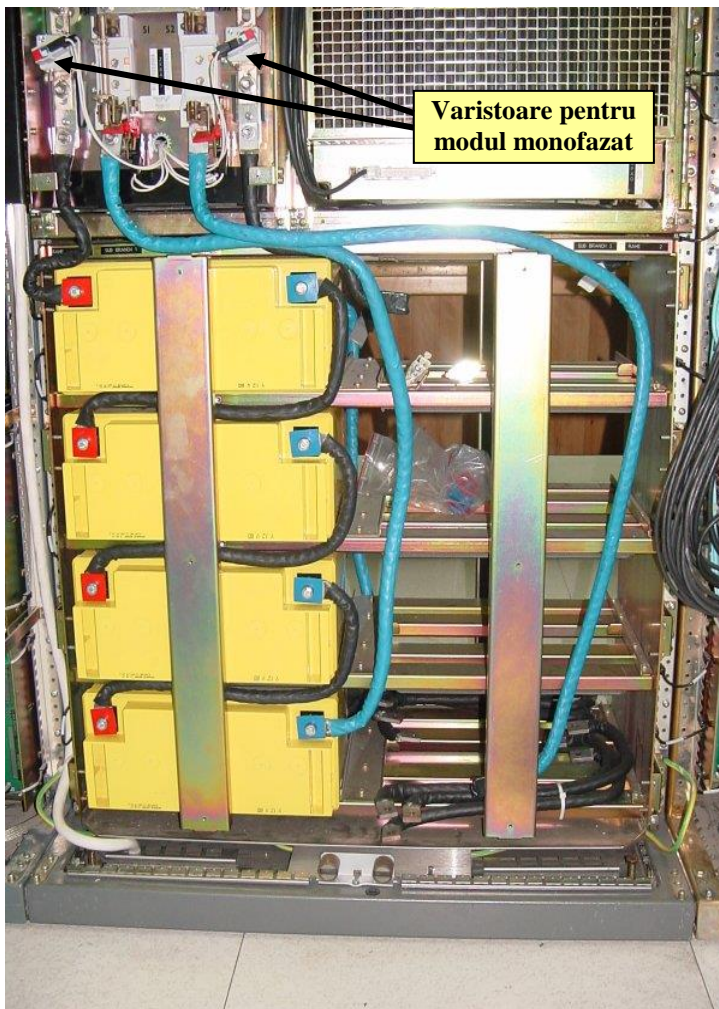


Figura 7.2: Amplasarea varistoarelor de 30 mm la bornele de ieșire din inverter

Practic, în acest caz, nu putem vorbi de un modul de protecție, ci, mai degrabă, de amplasarea unor varistoare pe fiecare dintre ieșirile inverterului.

Localizarea varistoarelor este realizată pe contactele interne de la ieșirea inverterului. Deoarece aceste varistoare au un diametru de 30 mm, ele nu au fost îmbrăcate decât pe lateral în rășină epoxidică, fără a avea nici fire de legătură. Astfel, pe fețele acestora se află numai depunerea metalică de electrozi.

Neavând cablaj imprimat sau fire de legătură, ele sunt strânse de către șuruburile bornelor de ieșire prin intermediul unor plăcuțe de alamă. Aceste varistoare sunt legate între nulul și faza ieșirii, instalația neavând neutru de protecție, această măsură nefiind necesară pentru electrosecuritate.

În Figura 7.2 este prezentată amplasarea varistorului la bornele de ieșire la 230 Vef ale sursei tip SAM. Bornele sunt strânse oblic, iar varistoarele au rășină epoxidică roșie. Prin intermediul cablurilor albe se realizează conexiunea către două sau patru prize clasice tip prelungitor.

S-a optat pentru varianta varistoarelor tip disc de 30 mm diametru, deoarece supratensiunile care pot apărea pe această cale de alimentare sunt mult mai lungi ca durată (deoarece apar ca urmare a defectării unor componente ale inverterului și mai puțin ca urmare a unor defecțiuni propagate prin alimentarea SAM-ului).

Prin urmare, energia absorbită de varistor este mai mare, ceea ce justifică alegerea diametrului de 30 mm, chiar dacă și în această situație ele sunt ușor supradimensionate.

Evident, prețul acestui varistor este extrem de redus, în comparație cu valoarea echipamentelor protejate. Dacă se va trece la producția de serie a acestuia, prețul lui nu va depăși 1 euro pentru fiecare priză, o sumă total infimă în comparație cu valoarea de zeci de mii de euro a echipamentului protejat sau a daunelor create de scoaterea din uz a centralei. O altă caracteristică importantă a acestuia îl face deosebit de util, anume, în situația depășirii valorii proiectate a supratensiunii sau în eventualitatea unei supratensiuni de durată, acest varistor se va distruge. Dar distrugerea lui înseamnă, de fapt, străpungerea dielectrică, iar impedanța sa redusă provoacă un scurtcircuit care va fi eliminat de către declanșatoarele electromagnetice ale întreruptoarelor automate (siguranțelor automate) montate la ieșirea din inverter.

VII.1.3. Modulul de 48 Vcc

Acest modul înglobează varistoarele de 48 Vcc și diametrul de 7 mm. Deoarece acest modul nu a fost prezentat în capitolele anterioare, vom detalia în continuare schema și parametrii acestuia.



Figura 7.3: Dulap cu rack-uri (sertare) pentru plăcile comutaționale ale centralei digitale

Există mai multe variante de amplasare a acestui tip de module. În primul rând, trebuie protejată fiecare ieșire care merge spre un dulap rack cu plăci de comutație telefonică. Un astfel de rack este prezentat în Figura 7.3. Dacă sursa de alimentare este relativ îndepărtată față de aceste dulapuri, se recomandă montarea a câte un modul pentru fiecare rack de acest tip.

Modulul de protecție pentru circuitele de comutație are o structură ușor mai complicată, în sensul că acesta a fost conceput să comunice cu placa în situația apariției unei avarii, trimițând un semnal de alarmă către modulul de gestionare a alarmelor aferent plăcii sau rack-ului respectiv.

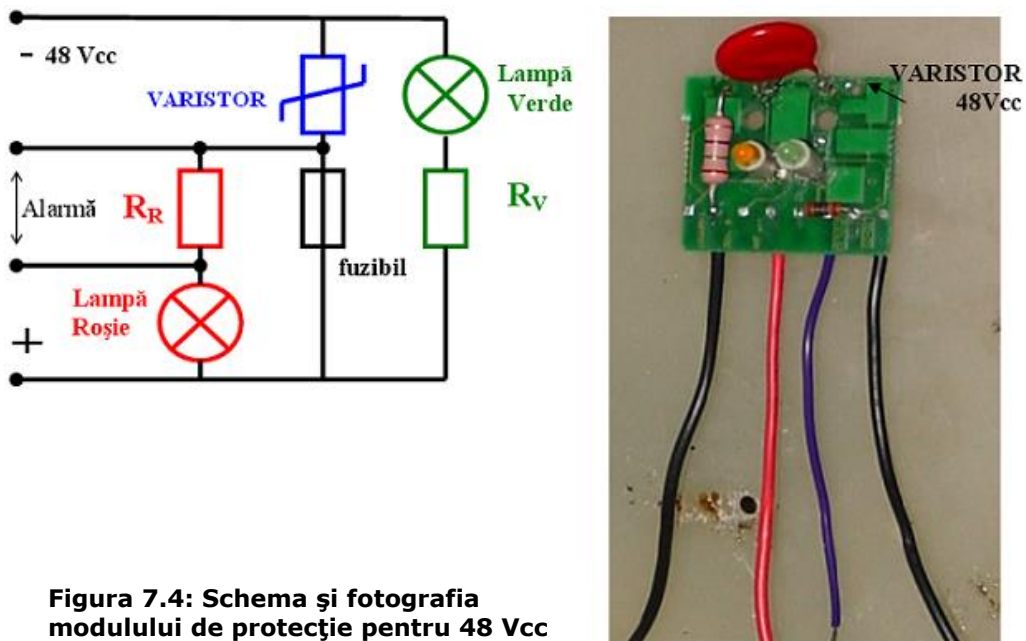


Figura 7.4: Schema și fotografia modului de protecție pentru 48 Vcc

Modulul este prezentat în detaliu în Figura 7.4, alături de schema electrică a acestuia. Concepția acestui echipament este absolut originală, cablajul imprimat având dimensiunile de 15 x 15 mm.

Din punct de vedere al schemei electrice, modulul este alcătuit din varistorul de 48 Vcc cu diametrul de 7 mm, înseriat cu o pistă fuzibilă, calibrată pentru 60 A.

În paralel cu acesta este conectată o lampă verde care indică buna funcționare a ansamblului. Este înseriată cu o rezistență de mică putere, de 2 k Ω , necesară limitării curentului prin lampă în regim permanent.

Datorită înglobării acestuia pe alimentarea plăcii telefonice, impedanța (capacitatea dielectrică) a varistorului utilizat trebuie să fie cât mai redusă, pentru a nu influența capacitatea liniei și pentru a realiza, în parte, funcția de filtraj a tensiunii de referință pentru microreleele și circuitele integrate aferente plăcii. De aceea, aceste varistoare, așa cum arătat în capitolele anterioare, sunt realizate dintr-un amestec de doi oxizi aditivi, ceea ce le conferă o capacitate mai redusă.

Pe derivația care pornește de la varistor se află localizate o rezistență de 2,5 k Ω , având 2 W, care este înseriată cu lampa roșie care indică regimul de avarie. În

regim de avarie, se estimează că tensiunea nu va depăși 68-70 Vcc, ca urmare a defecțiunii redresorului sursei. Oricum, la această valoare varistorul lasă să treacă un curent de ordinul zecilor sau sutelor de mA, tensiunea lui de deschidere fiind de 59 Vcc, așa cum am arătat în Capitolul V. Având varistorul în stare de conducție, de pe rezistența respectivă se va culege o tensiune suficient de mare în general peste 6 V care, care să poată fi colectată ca semnal de alarmă în regleta de alarme și transmisă apoi către o placă de tip ACALA, care este legată la inelul de alarme al întregii centrale telefonice. Alarma astfel colectată este tradusă în cod și este editată pe consola de gestiune a centralei digitale, așa cum vom arăta în paragraful următor.

Astfel, incidentul de supratensiune poate fi memorat și analizat, fiecare alarmă, fiind caracterizată prin dată, oră, valoare și durată. Dacă supratensiunea este mult mai violentă și are alte cauze, modulul, se va distruge, la depășirea a cca. 1000 V, aplicați chiar pentru scurtă durată, așa cum am demonstrat, chiar dacă pista fuzibilă nu se topește, varistorul, în acest caz se va degrada ireversibil, menținând regimul de scurtcircuit, care va fi eliminat de către declanșatoarele întreruptoarelor automate de pe plecările din SAM.

Nu se va trimite, nici în această situație, o tensiune violentă către analizorul de alarme (care nu acceptă mai mult de 6 V), deoarece lampa roșie acționează ca o siguranță fuzibilă, distrugându-se și întrerupând circuitul la peste 30-40 mA.

Cea mai mare parte a curentului cauzat de supratensiunea din circuit se va scurge prin pista fuzibilă, curentul prin partea de semnalizare a avariei fiind cu cca. 3 ordine de mărime mai mic. Prin urmare, energia absorbită de varistor este medie, ceea ce justifică alegerea diametrului de 7 mm, chiar dacă și în această situație ele sunt ușor supradimensionate.

Evident, și în acest caz, prețul modulului este extrem de redus, în comparație cu valoarea echipamentelor protejate. Dacă se va trece la producția de serie a acestuia, prețul lui nu va depăși 5 euro pentru fiecare circuit sau placă protejată, o sumă total infimă în comparație cu valoarea de zeci de mii de euro a echipamentului protejat sau a daunelor create de scoaterea din uz a centralei.

VII.2. Verificarea modulelor de protecție din punct de vedere al supratensiunilor

În continuare ne vom referi numai la descrierea comportamentului modulelor în situația aplicării unor supratensiuni. Se vor descrie procedurile de programare și, ulterior, de verificare a alarmelor cauzate de supratensiuni, care vor da și un diagnostic privind comportamentul modulelor de protecție.

VII.2.1. Programarea alarmelor declanșate de supratensiuni

În continuare se va exemplifica modul de programare a sistemului de gestionare a alarmelor colectate de pe modulele de protecție din SAM (sursa de alimentare modulară) și SMC (stația de module de comutație) în situația apariției unor supratensiuni.

Se va descrie această procedură de programare și, ulterior, verificarea comportamentelor modulului de 48 Vcc, la aplicarea unor supratensiuni pe intrarea modulelor de comutație ale SMC, care sunt, din punct de vedere al sursei de alimentare, consumatorul final, singurul prevăzut cu posibilitatea de înregistrare și gestiune a alarmelor.



Figura 7.5: Unitate terminală pentru alarme

Supratensiunea produsă este de durată nelimitată, având o valoare de 56 V, inferioară tensiunii de prag de 59 V a varistorului, dar suficient de ridicată pentru a fi luată în serios de către utilizator, fiind peste valoarea limită $U_{MCOV} = 53$ V. Datorită construcției modulare a centralei digitale, stația SMC poate fi alimentată separat.

În continuare se va exemplifica procedura de introducere a unor noi alarme colectate din regleta de alarmă. Centrala digitală ALCATEL E10 are două surse de alarme care pot fi afișate pe o unitate terminală de tip CV (după cum se observă în Figura 7.5). O primă sursă o reprezintă alarmele interne, fie ele generate intern, sau culese prin intermediul plăcilor ACALA din fiecare stație și din regleta de alarme. Alarmele colectate din regletă sunt considerate alarme externe și sunt în număr de 127; pe regleta de alarme aflându-se 127 de pini așezați ca o matrice, la care pot fi legați senzori, relee, contactoare sau orice alt aparat de comutație. Funcționarea este simplă, în cazul în care un senzor este acționat, acesta va genera o tensiune pe pinul regletei, pin care este legat la o placă de colectare de alarme ACALA și, care declanșează o alarmă internă care poate fi editată pe consola CV. Fiecărui pin din matricea regletei de alarme i se poate asocia o alarmă care poate fi editată pe consola CV [53].

Dacă dorim să interogăm alarmele care sunt deja introduse în sistem, vom folosi comanda ALDIN care o vom executa pe o consola CV:

@ALDIN:

CEN=1/07-05-04/10 H 21 MN 25/ALARM DESCRIPTION CONSULTATION

@NIDAL=8<50;

PROCESSING TPFIL ACC

NIDAL	NLOC	TYP	CAT	TEXAL	DMO
0010		*ENS	*IM	*POWER ROOM	EXP
0011		*ENS	*ID	*POWER ROOM	EXP
0014		*ENS	*ID	*AC SUPPLY	EXP
0033		*ENS	*IM	*RECTIFIER	SEXP
0034		*ENS	*ID	*RECTIFIER	SEXP
0042		*ENS	*IM	*INVERTER	EXP
PROCESSING TPFIL EXC					

Se observă că, alarmele corespunzătoare pinilor 10, 11, 14, 33, 34, 42 sunt active, adică în caz că unul din acești pini este acționat (apare tensiune la borne), se va declanșa o alarmă.

În cazul în care pin-ul 9 este acționat, nu se va declanșa nici o alarmă deoarece pentru pin-ul 9 nu a fost setată nici o alarmă. S-a ales, pentru

introducerea noii alarme de supratensiune pe sursa de alimentare modulară SAM, pinul 8 și s-a setat o alarmă cu ajutorul comenzii ALDMO:

```
@ALDMO:
  CEN=1/07-05-04/10 H 26 MN 06/ALARM DESCRIPTION MODIFICATION
@NIDAL=8,CDC=OUI,TYP=ENP,CAT=IM,TEXAL='SUPRA TENSIUNE ALM';
  PROCESSING TPFIL ACC
  NIDAL = 0008   NLOC = CDC
  TYP = ENP(ENP)   CAT = IM(IM)
  TEXAL = SUPRA TENSIUNE ALM
  PROCESSING TPFIL EXC
```

Ca explicație, s-au utilizat următorii parametri în introducerea noii alarme:

- NIDAL=8 este numărul alarmei care corespunde cu numărul pinului, adică 8;
- s-a setat CDC=OUI, adică am scris că alarma aparține centralei considerate (CDC=coeur de chaîne);
- tipul alarmei este ENP – energia principală;
- categoria este de tip IM - intervenție imediată;
- iar textul alarmei s-a ales unul sugestiv, pentru ca alarma să fie interpretată mai ușor;

Prin același procedeu s-a setat alarma pentru modulele de protecție din convertizoarele de 48 V:

```
@ALDMO:
  CEN=1/07-05-04/10 H 26 MN 54/ALARM DESCRIPTION MODIFICATION
@NIDAL=32,CDC=OUI,TYP=ENP,CAT=IM,TEXAL='SUPRA TENSIUNE 48V';
  PROCESSING TPFIL ACC
  NIDAL = 0032   NLOC = CDC
  TYP = ENP(ENS)   CAT = IM(IM)
  TEXAL = SUPRA TENSIUNE 48V
  PROCESSING TPFIL EXC
```

Vom verifica acum, de pe consola CV, dacă acestea au fost bine înregistrate în sistem:

```
@ALDIN:
  CEN=1/07-05-04/10 H 27 MN 08/ALARM DESCRIPTION CONSULTATION
@NIDAL=8+32;
  PROCESSING TPFIL ACC
  NIDAL NLOC   TYP CAT TEXAL                               DMO
  -----
  0008 CDC    ENP IM SUPRA TENSIUNE ALM
  0032 CDC    ENP IM SUPRA TENSIUNE 48V
  PROCESSING TPFIL EXC
```

VII.2.2. Verificarea alarmelor definite anterior, la aplicarea unor supratensiuni

După ce s-a provocat, în mod direct o supratensiune pe durata a 80 de secunde, având o valoare efectivă de cca 260 Vef, printr-un autotransformator, pe una din fazele SAM, alimentat prin modulul de protecție, pe consola CV se editeaza alarma pentru sursa principala de alimentare, setată anterior:

```
!!! *A0628/ 008 /07-05-04/12 H 36/N=1041/TYP=ENP/CAT=IM/EVENT=DAL
/NCEN=TLS1 /AM =SAM /AGEO=S1-TR01-B01-A001-R000
/TEXAL=SURSA TENSIUNE ALM/COMPL.INF:
/N=0002/
```

```
!!! *A0628/ 008 /07-05-04/12 H 37/N=1042/TYP=ENP/CAT=IM/EVENT=MAL
/NCEN=TLS1 /AM =SAM /AGEO=S1-TR01-B01-A001-R000
/TEXAL=SURSA TENSIUNE ALM/COMPL.INF:
/N=0002/
```

```
!!! *A0628/ 008 /07-05-04/12 H 37/N=1043/TYP=ENP/CAT=IM/EVENT=FAL
/NCEN=TLS1 /AM =SAM /AGEO=S1-TR01-B01-A001-R000
/TEXAL=SURSA TENSIUNE ALM/COMPL.INF:
/N=0002/
```

Se observă că, la ora 12:36 a apărut alarma cu EVENT=DAL (început de alarmă), după 1 minut se vede că alarma este menținută EVENT=MAL, și, imediat după ce supratensiunea a încetat, apare sfârșitul de alarma EVENT=FAL. De asemenea, supratensiunea nu a afectat funcționarea centralei, traficul de fond neavind nici o eroare și nici nu a fost editată o altă alarmă internă în acest timp. Tarifcul de fond s-a realizat folosindu-se simulatoare de mesaje ISUP (ISDN user part), la o rată de 25 apeluri pe secundă. Acest lucru confirmă faptul că modulul de protecție, montat după captatorul de tensiune al SAM, nu a lăsat ca supratensiunea să pătrundă în sursă.

Descrierea unei alarme se face conform specificațiilor exemplificate mai jos:

```
!!! - semnele de exclamare pot fi 1,2 sau 3 și indică gravitatea alarmei
A0628 - indică faptul că mesajul editat pe consola de avarii este o alarmă
008 - numărul alarmei
07-05-04 - data apariției alarmei
12 H 36 - ora și minutul apariției alarmei
N=1041 - numărul de ordine al apariției alarmei
TYP=ENP - tipul alarmei, în cazul nostru ENP = principală
CAT=IM - categoria alarmei IM= intervenție imediată (acțiune urgentă)
EVENT=MAL - starea alarmei ( DAL= start alarmă, MAL= alarmă menținută, FAL=
sfârșit de alarmă)
NCEN=TLS1 - numele centralei unde a apărut alarma
AM=SAM - modulul vizat de alarmă
AGEO=... - adresa geografică a modulului unde a apărut alarma
TEXAL=- textul alarmei
COMPL.INF= - informații complementare
```

Alarmerle apărute pentru supratensiune pe modulele de comutație de 48 V au fost testate și ele. În acest scop s-au folosit 4 module de protecție pentru cele 4 convertizoare prezente în stația SMC1.

Stația SMC1 a fost decuplată de la sursa de alimentare principală și s-a alimentat separat la tensiunea normală de -48V până aceasta s-a inițializat corect după care s-a aplicat tensiunea de cca. - 56 V. Se observă că alarmerle încep imediat după conectare, după un minut apare ENENT=MAL și după încă 1 minut (când deja supratensiunea s-a oprit) apare EVENT=FAL.

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 41/N=1210/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=DAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A003-R001
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 41/N=1211/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=DAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A003-R120
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 41/N=1212/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=DAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A004-R001
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 41/N=1213/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=DAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A004-R120
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 42/N=1214/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=MAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A003-R001
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 42/N=1215/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=MAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A003-R120
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 42/N=1216/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=MAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A004-R001
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 42/N=1217/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=MAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A004-R120
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 43/N=1218/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=FAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A003-R001
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
```

```
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 43/N=1219/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=FAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A003-R120
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
```

```

/N=0005/
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 43/N=1220/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=FAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A004-R001
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/
!!! *A0628/032 /07-05-08/09 H 43/N=1221/TYP=ENS/CAT=IM/EVENT=FAL
/NCEN=TIM21 /AM =SMC1/AGEO=S1-TR01-B02-A004-R120
/TEXAL=SUPRA TENSIUNE 48V/COMPL.INF:
/N=0005/

```

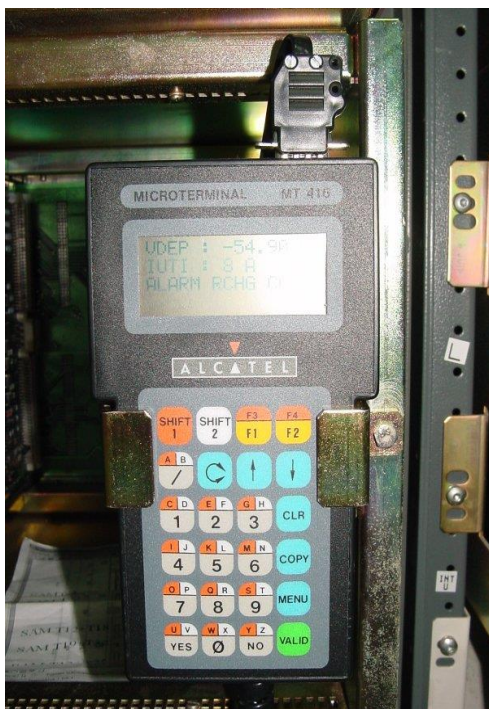


Figura 7.6: Tensiunea de -54.96V vizualizată pe microterminalul MT 416

sa functioneze in regim de monitor(voltmetrul digital).

Oricum, tensiunile aplicate (260 Vef, respectiv -56 Vcc) sunt mai mari decât tensiunile maxime acceptate de instalație, iar în absența protecțiilor ar fi putut periclita destul de grav siguranța în exploatare a centralei digitale.

S-a observat ca stația (echipamentul) SMC a funcționat corect, neobservându-se alte alarme. Si in acest caz centrala era in trafic, folosindu-se acelasi simulatoare de mesaje ISUP cu aceeasi rata de comutatie de 25 apeluri pe secunda, neavind nici un apel pierdut. Acest lucru demonstrează că modulul de protecție a reacționat corespunzător, chiar dacă a activat alarma de supratensiune definită anterior, după modulul respectiv nu s-au mai înregistrat alte alarme interne, ceea ce înseamnă că modulul de protecție și-a îndeplinit funcția de protecție într-un mod normal, în plus, avertizând despre producerea evenimentului.

Acestea sunt doar testele care au vizat în mod direct comportamentul modulelor de protecție în situația aplicării unor supratensiuni. Aceste supratensiuni au avut valori reduse pentru a nu periclita echipamentele testate (SAM și SMC), deoarece testele au avut loc pe viu, pe centrala digitală care valorează sute de mii de euro. Alarmerile de supratensiune pentru statia SMC sunt colectate de catre regleta de alarme, dar dupa cum se poate vedea si in Figura 7.6 sunt sesizate de către microterminalul MT 416 programat

VII.3. Verificarea modulelor de protecție din punct de vedere al filtrajului

Protecția împotriva supratensiunilor este principala atribuție a acestor module. În continuare vom detalia și o serie de teste efectuate în scopul verificării proprietăților de filtraj ale modulelor (și, implicit, ale varistoarelor din construcția lor).

Capacitatea de filtrare este un „bonus” al acestor module, ele fiind proiectate pentru ca să protejeze instalația împotriva supratensiunilor. Filtrajul unor semnale parazite (pentru care, datorită reactanței capacitive reduse pentru anumite frecvențe, varistoarele oferă o cale de scurtcircuitare) este o funcție colaterală. Dacă s-ar fi urmărit în primul rând proprietățile de filtraj ale varistoarelor, dimensionarea și fabricarea lor ar fi fost executate în mod diferit. La fel și construcția modulelor de protecție.

Capacitatea dielectrică redusă este foarte importantă pentru telecomunicații, deoarece reactanța capacitivă fiind mare iar nivelele de tensiune fiind mici, rezultă pierderi de semnal extrem de reduse. Dar acest lucru este un dezavantaj pentru filtrarea semnalelor parazite, care găsesc și ele o cale de impedanță mărită. Din fericire, așa cum arătat în capitolele anterioare, au o capacitate dielectrică puternic influențată de frecvență, mai ales între 0,1 Hz și 1000 Hz. Prin urmare, chiar dacă pentru semnalul principal (util) au o reactanță mărită, pentru semnale de frecvențe nu foarte diferite pot avea reactanțe extrem de reduse.

VII.3.1. Stabilirea perturbațiilor specifice și a parametrilor de testare

În scopul evidențierii performanțelor de filtraj ale ansamblului modulelor montate atât pe SAM, cât și pe SMC, se vor efectua o serie de teste de perturbații, specifice sistemelor de telecomunicații.

S-a introdus, în paralel cu rețeaua de alimentare, un generator de semnal sinusoidal tip BK Precision, care va genera un semnal parazit, cu amplitudinea de 20 V, peste tensiunea de 230 V_{ef}, 50 Hz a rețelei, reglat pe frecvențe de testare între 50 și 300 Hz, cu un pas de 0,5 Hz, pentru a se verifica eficacitatea filtrajului varistoarelor pentru armonicile de rang redus ale tensiunii de alimentare sau pentru orice alte perturbații de joasă frecvență suprapuse peste fundamentală. Semnalul a fost reglat la 20 V amplitudine, pentru ca nici măcar în situația cea mai defavorabilă a suprapunerii celor două semnale, să nu se depășească 250 V_{ef} maximul tensiunii tolerate în regim permanent, astfel încât să nu avem de-a face cu o supratensiune.

Pentru vizualizarea acestor perturbații s-a montat în circuit un multiscop portabil tip Fluke, pe două canale, canalul A fiind conectat pe generatorul de semnal, iar canalul B este conectat pe semnalul monofrecvență de 440 Hz, generat de centrală și utilizat pentru realizarea tonalităților de invitație la numerotare, de ocupare, sau de retur de apel.

În Figura 7.7 este prezentat standul de testare, împreună cu o oscilogramă a perturbațiilor produse.

În situația în care modulele nu au fost montate pe SAM sau SMC, s-a constatat că, pentru un semnal perturbator, generat în condițiile anterioare, având frecvența începând de la 62,5 Hz (canalul A) peste tensiunea de alimentare, nivelul perturbațiilor de pe semnalul monofrecvență de 440 Hz, (canalul B) începe să fie

inacceptabil. Deci, problemele apărute pe alimentare s-au propagat până după sursa de alimentare.

În consecință, chiar aplicarea unui astfel de semnal de amplitudine și frecvență redusă poate produce blocarea centralei, ca urmare a detectării unor perturbații inacceptabile după sursa de alimentare.

Spre deosebire de situația aplicării supratensiunilor, când există și riscul distrugerii echipamentelor, odată cu întreruperea funcționării centralei digitale, în situația apariției perturbațiilor pe linia de alimentare, riscul distrugerii echipamentelor de telecomunicații este redus, dar operatorul de telefonie resimte pagube financiare importante prin scoaterea temporară din uz a centralei.

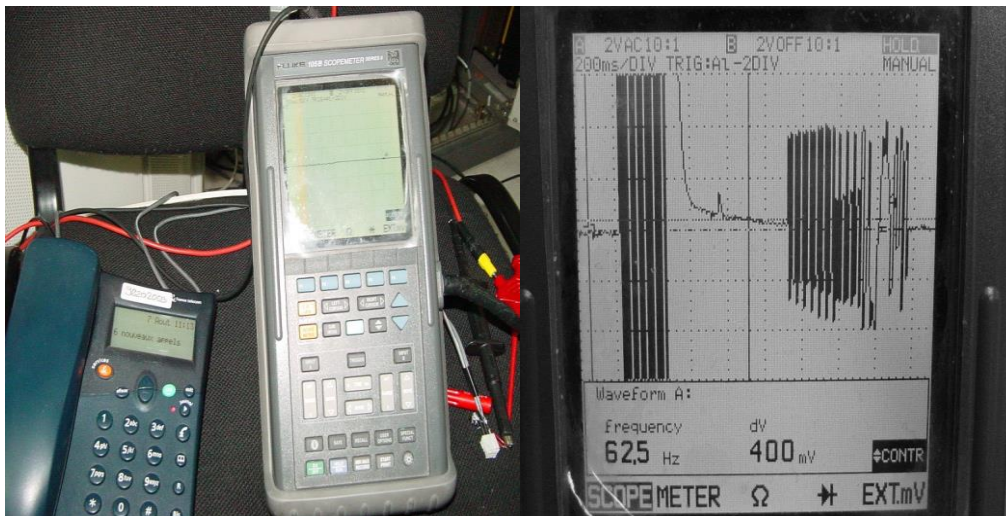


Figura 7.7: Analiza semnalelor perturbatoare cu multiscopul portabil, pentru frecvența perturbatoare și frecvența perturbată

Testele finale, care vor fi descrise în acest capitol au fost făcute pentru o frecvență de 300 Hz, care perturbă semnificativ semnalul de 440 Hz, așa cum vom arăta în continuare.

VII.3.1.1. Simulatorul de abonați ALCATEL SANUM F 2G

Simulatorul de abonați SANUM are posibilitatea de a simula abonați și, totodată apeluri între abonați analogici și numerici. Simulatorul poate lucra în mod funcțional sau în mod trafic. Pentru aplicațiile folosite, simulatorul s-a încărcat să lucreze în mod funcțional, acest mod permițând efectuarea de apeluri unitare între abonați.

Simulatorul de abonați SANUM, prezentat în Figura 7.8, poate fi echipat cu 8 plăci de abonați care pot fi numerici sau analogici, plăcile de abonați fiind de tip ALCATEL TAN3G și pot avea 8 abonați analogici sau 4 abonați numerici.

SANUM-ul este legat la centrala telefonică prin intermediul unui concentrator digital de abonați de tip CSN HD și este pilotat de o interfață grafică instalabilă pe un calculator obișnuit. Atât limbajul de programare cât și instrucțiunile folosite sunt specifice SANUM-ului. Cu autorul acestui limbaj specific, un apel între doi sau mai mulți abonați poate fi controlat și testat în toate fazele specifice unui apel (numerotare, stabilire apel,

conversație, eliberare...etc). Se pot observa și verifica atât timpii de conversație, mesajele interne, cât și frecvențele folosite pentru diverse tonalități.

Pentru că în paragraful următor vom efectua, cu ajutorul SANUM-ului, câteva teste de frecvență, vom descrie procedurile prin care s-au setat frecvențele folosite pentru apel în SANUM. Deși aceste setări sunt conforme cu normele specifice din domeniul telecomunicațiilor, ele diferă totuși de la operator la operator, fiecare țară având tonalități diferite pentru sonerie, invitație la număratoare...etc. Setările se realizează prin intermediul interfeței grafice și ele sunt valabile pentru toate testele efectuate pe centrala digitală, iar ferestrele dialog pentru setarea lor sunt prezentate în scopul de a oferi o imagine despre frecvențele și procedurile standard din telefonie.



Figura 7.8: Simulatorul de abonați ALCATEL SANUM

VII.3.2. Teste perturbatorii fără montarea a nici unui modul de protecție

În situația perturbării sursei de alimentare cu semnalul de 300 Hz generat după metoda descrisă în subcapitolul VII.3.1., fără module de protecție, s-a efectuat un singur test pe centrala digitală, cel mai simplu, dar și cel mai determinant pentru ansamblul parametrilor convorbirii, anume realizarea unei convorbiri între doi abonați analogici.

Pentru a se înțelege mai bine testul, am ilustrat, în Figura 7.9 configurația de apel folosită:

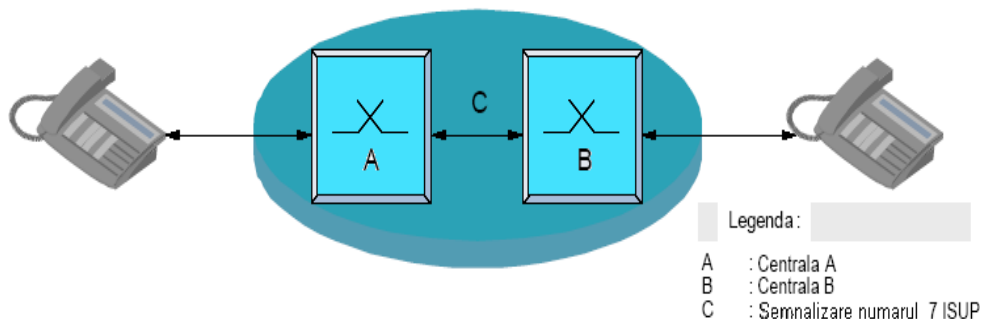


Figura 7.9: Schema fizică a configurației de apel

S-a constatat că testele de frecvență a eșuat, toate frecvențele descrise mai sus fiind puternic influențate de zgomotul perturbator.

În consecință, testul a eșuat, iar într-o situație reală de exploatare, convorbirea ar fi fost practic imposibilă, fiind perturbate inclusiv tonalitățile de bază.

În loc de cei doi abonați analogici, s-a folosit simulatorul de abonați SANUM F 2G, care are posibilitatea de a efectua apeluri între abonați, iar cu ajutorul programului conceput poate să testeze prin comparație frecvențele și tonalitățile generate de centrala telefonică cu cele încărcate în fișierele SANUM-ului, așa cum s-a prezentat în paragraful anterior.

Configurația de apel folosind simulator SANUM este ilustrată în Figura 7.10:

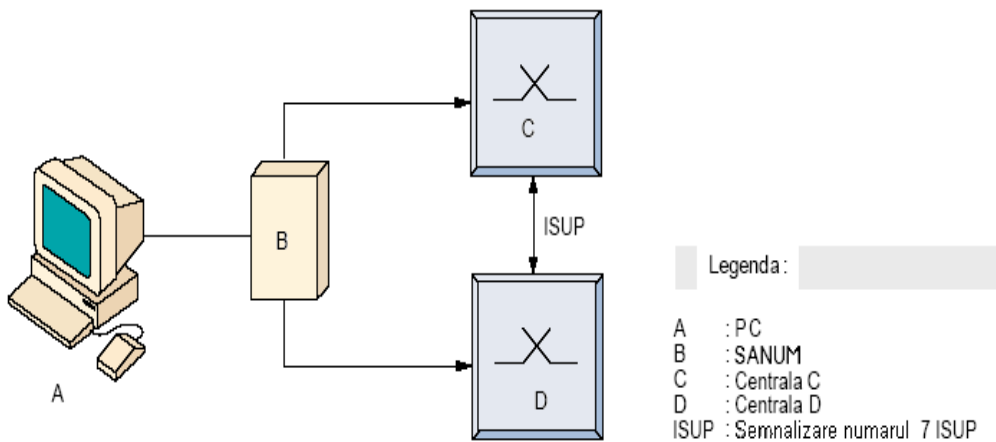


Figura 7.10: Configurația de apel simulată pe SANUM

VII.3.3. Teste perturbatorii cu montarea tuturor modulelor de protecție

În situația perturbării sursei de alimentare cu semnalul de 300 Hz generat după metoda descrisă în subcapitolul VII.3.1. s-au efectuat, cu toate cele trei tipuri de module prezente pe instalație, o serie de teste pe centrala digitală, teste efectuate în mod normal pentru controlul parametrilor centralei. Față de situația anterioară, când un test elementar a eșuat, fără a mai fi nevoie de a complica scenariile de testare, de această dată, scenariile de testare au fost mult mai sofisticate, acoperind întreaga gamă de verificări specifice. Testul de convorbire între doi abonați analogici (eșuat anterior) a fost introdus într-un scenariu cu trei abonați analogici într-un apel tip conferință. S-au mai realizat și alte teste, cum ar fi testul pentru un apel de la un abonat numeric debit de baza tip 2B+D spre un abonat analogic, folosind protocolul de semnalizare DSS1+. Protocolul DSS1+ fiind un protocol standardizat de norme internaționale din domeniu nu am mai ataseat nici o listă cu descrierea limbajului. Toate testele de frecvență efectuate s-au încadrat în limitele de frecvență normale, deci convorbirile sunt practic realizabile.

Putem concluziona că, în situația aplicării perturbațiilor pe rețeaua de alimentare, modulele de protecție împotriva supratensiunilor acționează ca niște veritabile filtre, eliminând, datorită impedanțelor reduse, determinate în Capitolul VI, efectele acestor perturbații asupra parametrilor semnalului monofrecvență de 440 Hz sau a celorlalte semnale de tonalitate, făcând posibilă desfășurarea, în bune condițiuni a convorbirilor telefonice.

VII.4. Concluzii

Acest capitol se referă integral la finalitatea varistoarelor a căror dimensionare, tehnologie de fabricație și verificare a fost descrisă în capitolele anterioare. Finalitatea acestora este, așa cum am anticipat în prealabil, înglobarea lor în module de protecție împotriva supratensiunilor, care să fie montate în „punctele cheie” ale sursei de alimentare sau ale modulelor de comutație din centrala digitală.

S-a optat pentru trei module de protecție împotriva supratensiunilor:

- 1 modul trifazat pentru 230 Vef care include 6 varistoare tip 230 Vef cu diametrul de 20 mm și 3 varistoare tip 230 Vef și 7 mm diametru, localizat pe intrarea în sursa de alimentare modulară tip SAM;
- 2 module (în funcție de numărul de prize) monofazate pentru 230 Vef care includ 1 varistor fiecare, fără cablaj, tip 230 Vef 30 mm, localizat pe prizele de servicii interne ale centralei;
- 4 module de curent continuu 48 Vcc, care includ, fiecare, câte un varistor 48 Vcc, 7 mm, localizate pe alimentarea modulelor de comutație.

Fiecare dintre aceste module are o concepție originală, fiind realizat practic, pe baza unor cablaje existente pe piață.

Vom prezenta câteva concluzii succinte referitoare la fiecare modul:

Modulul trifazat de 230 Vef

- Reprezintă prima și singura barieră de protecție a sursei de alimentare împotriva oricăror supratensiuni care se propagă pe rețeaua trifazată până la intrarea în centrala digitală. Acest modul poate opera singur în arhitectura instalației, fără a necesita și prezența unor module având o clasă superioară sau inferioară de protecție;
- Domeniul de utilizare al acestui modul poate fi lărgit și la protecția consumatorilor casnici sau similari, cu puteri sub 3000 W, alimentați prin rețele trifazate;
- Montajul funcționează chiar mai bine în situația în care neutrul de protecție lipsește, când, practic, avem un varistor mare, de 20 mm diametru, montat în paralel cu o grupare serie având un alt varistor mare, de 20 mm diametru și unul mai mic, de 7 mm diametru;
- În situația depășirii valorii preconizate a supratensiunii, sau în eventualitatea unei supratensiuni de durată, acest modul se va distruge. Dar distrugerea lui înseamnă, de fapt, străpungerea dielectrică a varistorului, iar impedanța sa redusă provoacă un scurtcircuit care va fi eliminat de către declanșatoarele electromagnetice ale întreruptoarelor automate. Instalația va fi oprită pentru scurt timp, dar va supraviețui avariei, putând fi reconectată după demontarea modulului distrus.

Modulul monofazat de 230 Vef

- Modulul este localizat pe ieșirile monofazate la 230 Vef, necesare serviciilor proprii ale centralei telefonice. Aceste ieșiri sunt realizate, pornind de la bateriile de acumulatori având 48 V, prin intermediul unor invertoare.

Varistorul este prins prin plăci de alamă strânse de către șuruburile clemelor de racord;

- Practic, în acest caz, nu putem vorbi de un modul de protecție, ci, mai degrabă, de amplasarea unor varistoare pe fiecare dintre ieșirile inverterului. Localizarea varistoarelor este realizată pe contactele interne de la ieșirea inverterului.
- Supratensiunile care pot apărea pe această cale de alimentare sunt mult mai lungi ca durată (deoarece apar ca urmare a defectării unor componente ale inverterului și mai puțin ca urmare a unor defecțiuni tip lovitură de trăsnet, propagate prin alimentarea SAM-ului), prin urmare, energia absorbită de varistor este mai mare, ceea ce justifică alegerea diametrului de 30 mm;

Modulul de 48 Vcc

- Există mai multe variante de amplasare a acestui tip de module. În primul rând, trebuie protejată fiecare ieșire care merge spre un dulap rack cu plăci de comutație telefonică. Dacă sursa de alimentare este relativ îndepărtată față de aceste dulapuri, se recomandă montarea a câte un modul pentru fiecare rack de acest tip;
- Modulul de protecție pentru circuitele de comutație a fost conceput să comunice cu placa în situația apariției unei avarii, trimițând un semnal de alarmă către modulul de gestionare a alarmelor aferent plăcii sau rack-ului respectiv. Astfel, incidentul de supratensiune poate fi memorat și analizat, inclusiv ca dată, oră, valoare și durată;
- Datorită înglobării acestuia pe alimentarea plăcii telefonice, impedanța (capacitatea dielectrică) a varistorului utilizat trebuie să fie cât mai redusă, pentru a nu influența capacitatea liniei, prin scurtcircuitarea semnalelor utile;

Pentru toate categoriile de module putem desprinde următoarele concluzii:

- Prețul acestor module este extrem de redus, în comparație cu valoarea echipamentelor protejate. Dacă se va trece la producția de serie a acestora, prețul lor nu va depăși câteva zeci de euro pentru fiecare centrală digitală, o sumă total infimă în comparație cu valoarea de zeci (sau chiar sute) de mii de euro a echipamentului protejat sau a daunelor create de scoaterea din uz a centralei;
- Testele anterioare au arătat că modulele sunt ușor supradimensionate, dar acest lucru le conferă o vulnerabilitate mai redusă;
- Până în prezent, modulele nu au fost încă integrate în fabricația de serie a centralelor telefonice, încercările fiind realizate din punct de vedere al studiului de fezabilitate și al studiilor aferente prezentei lucrări.

După montarea modulelor pe centrala telefonică digitală de pe platforma ALCATEL, s-au provocat supratensiuni reduse, pentru a nu periclita echipamentele testate (SAM și SMC), deoarece testele au avut loc pe viu, pe centrala digitală care valorează zeci de mii de euro. Scopul testelor a fost de a verifica dacă, în afara alarmelor de supratensiune, a căror apariție este de dorit, nu vor mai apărea și alte alarme, care să demonstreze că protecțiile nu au funcționat. Oricum, tensiunile aplicate (260 Vef, respectiv 56 Vcc) sunt mai mari decât tensiunile maxime acceptate de instalație, iar în absența protecțiilor ar fi putut periclita destul de grav siguranța în exploatarea centralei digitale.

S-a observat ca stația (echipamentul) SMC a funcționat corect, neobservându-se alte alarme. Acest lucru demonstrează că modulele de protecție au reacționat corespunzător, chiar dacă s-au activat alarmele de supratensiune definite anterior.

După modulul de 48 Vcc nu s-au mai înregistrat alte alarme, ceea ce înseamnă că modulul de protecție și-a îndeplinit funcția de protecție într-un mod normal („ajutat” în parte și de celelalte), în plus, avertizând despre producerea evenimentului.

În mod indiscutabil, protecția împotriva supratensiunilor este principala atribuție a acestor module. Capacitatea de filtrare este un „bonus” al acestor module, ele fiind proiectate pentru ca să protejeze instalația împotriva supratensiunilor. Filtrajul unor semnale parazite (pentru care, datorită reactanței capacitive reduse pentru anumite frecvențe, varistoarele oferă o cale de scurtcircuitare) este o funcție colaterală. Dacă s-ar fi urmărit în primul rând proprietățile de filtraj ale varistoarelor, dimensionarea și fabricarea lor ar fi fost executate în mod diferit. La fel și construcția modulelor de protecție.

Capacitatea dielectrică redusă este foarte importantă pentru telecomunicații, deoarece reactanța capacitivă fiind mare iar nivelele de tensiune fiind mici, rezultă pierderi de semnal extrem de reduse. Dar acest lucru este un dezavantaj pentru filtrarea semnalelor parazite, care găsesc și ele o cale de impedanță mărită. Din fericire, așa cum arătat în capitolele anterioare, au o capacitate dielectrică puternic influențată de frecvență, mai ales între 0,1 Hz și 1000 Hz. Prin urmare, chiar dacă pentru semnalul principal (util) au o reactanță mărită, pentru semnale de frecvențe nu foarte diferite pot avea reactanțe extrem de reduse.

În situația în care modulele nu au fost montate pe SAM sau SMC, s-a constatat că, pentru un semnal perturbator, generat în condițiile anterioare, având frecvența începând de la 62,5 Hz peste tensiunea de alimentare, nivelul perturbațiilor de pe semnalul monofrecvență de 440 Hz, începe să fie inacceptabil. Deci, problemele apărute pe alimentare s-au propagat până după sursa de alimentare.

Prin urmare, chiar aplicarea unui astfel de semnal de amplitudine și frecvență redusă poate produce blocarea centralei, ca urmare a detectării unor perturbații inacceptabile după sursa de alimentare. Spre deosebire de situația aplicării supratensiunilor, când există și riscul distrugerii echipamentelor, odată cu întreruperea funcționării centralei digitale, în situația apariției perturbațiilor pe linia de alimentare, riscul distrugerii echipamentelor de telecomunicații este redus, dar operatorul de telefonie resimte pagube financiare importante prin scoaterea temporară din uz a centralei.

În situația perturbării sursei de alimentare cu semnalul de 300 Hz, fără module de protecție, s-a efectuat un singur test pe centrala digitală, cel mai simplu, dar și cel mai determinant pentru ansamblul parametrilor convorbirii, anume realizarea unei convorbiri între doi abonați analogici.

S-a constatat că testele de frecvență a eșuat, toate frecvențele descrise mai sus fiind puternic influențate de zgomotul perturbator, încercarea nu a fost validată, iar într-o situație reală de exploatare, convorbirea ar fi fost practic imposibilă, fiind perturbate inclusiv tonalitățile de bază.

În situația perturbării sursei de alimentare cu semnalul de 300 Hz, cu toate cele trei tipuri de module prezente pe instalație, s-au efectuat o serie de teste pe centrala digitală, teste efectuate în mod normal pentru controlul parametrilor centralei. Față de situația anterioară, când un test elementar a eșuat, fără a mai fi nevoie de a complica scenariile de testare, de această dată, scenariile de testare au fost mult mai sofisticate, acoperind întreaga gamă de verificări specifice.

Testul de convorbire între doi abonați analogici (eșuat anterior) a fost introdus într-un scenariu cu trei abonați analogici într-un apel tip conferință. S-au mai realizat și alte teste, cum ar fi testul de apel de la un abonat numeric tip 2B+D folosind protocolul de semnalizare DSS1+ spre un abonat analogic V23 care în atunci când este sunat poate afișa în faza de presonerie numărul apelantului; s-a constatat că abonatul a primit numărul în format corect al apelatului, care în cazul nostru a fost un abonat numeric. Toate testele de frecvență efectuate s-au încadrat în limitele de frecvență normale, deci convorbirile sunt practic realizabile.

În concluzie, în situația aplicării perturbațiilor pe rețeaua de alimentare, modulele de protecție împotriva supratensiunilor acționează ca niște veritabile filtre, chiar dacă nu aceasta este funcția lor principală.

Ele elimină, datorită impedanțelor reduse, determinate în Capitolul VI, efectele acestor perturbații asupra parametrilor semnalului monofrecvență de 440 Hz sau a celorlalte semnale de tonalitate, făcând posibilă desfășurarea, în bune condițiuni a convorbirilor telefonice.

Totuși, pentru o protecție completă a instalației, se recomandă montarea de filtre dedicate, active sau pasive, pentru o gamă mai largă de frecvențe perturbatorii.

VII.5. Contribuții personale și originale

Dintre cele mai importante contribuții personale, în acest capitol, amintim:

- Analiza principalelor variante de amplasare a modulelor de protecție împotriva supratensiunilor cu evidențierea avantajelor și dezavantajelor acestora;
- Stabilirea unor configurații pentru modulele de protecție împotriva supratensiunilor;
- Proiectarea, execuția și montajul acestora pe centrala telefonică;
- Descrierea funcționării acestor module de protecție;
- Adaptarea unor scheme de protecție din domeniul energetic în domeniul telecomunicațiilor;
- Conceperea unor dialoguri de alarmă între module și unitatea centrală;
- Verificarea funcționării reale a modulelor de protecție împotriva supratensiunilor;
- Realizarea secvențelor de program pentru definirea și verificarea alarmelor;
- Identificarea oportunităților de filtraj ale acestor echipamente;
- Conceperea unei proceduri de testare în situația aplicării unor perturbații;
- Elaborarea unor programe de verificare, pentru comportamentul în caz de perturbații;
- Verificarea funcționării modulelor în situația filtrației perturbațiilor;
- Stabilirea unor concluzii specifice;

Capitolul VIII. Concluzii și perspective

VIII.1. Rezultatele cercetării

Pe parcursul 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;
- analiza critică a standardelor românești din domeniu, evidențiind deficiențele și punctele lor slabe;
- analiza stării rețelelor de telecomunicații din România, din punct de vedere al protecției la supratensiuni;
- 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;
- prezentarea detaliată și obiectivă a soluțiilor tehnice existente în acest moment în domeniul protecției contra supratensiunilor în rețelele de joasă tensiune și de telecomunicații;
- descrierea principalelor echipamente de protecție împotriva supratensiunilor utilizate în domeniul telecomunicațiilor, atât în România, cât și în străinătate;
- 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, 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 solicitărilor electrice la care sunt supuse aceste echipamente, pornind de la regimurile de funcționare și terminând cu posibilitățile de filtraj, toate aceste elemente teoretice fiind în directă legătură cu obiectul temei;
- prezentarea succintă a elementelor matematice care stau la baza determinării impedanței complexe a varistoarelor;
- calculul concret al solicitărilor electrice și termice;
- identificarea solicitărilor electrice specifice;
- definirea noțiunilor de echilibru termic stabil și instabil, utilizând date concrete;
- expunerea, în baza unor studii bibliografice ale altor autori, a metodei globale de analiză a stabilității termice a echipamentelor de protecție cu varistoare pe bază de ZnO;

- elaborarea unor seturi de concluzii specifice pentru proiectarea și dimensionarea fiecărei categorii de echipamente de protecție.

Rezultatele cercetării aplicative

Cele mai importante aplicații ale studiilor teoretice, soluții tehnice propuse, sau realizări practice și experimentale sunt:

- implementarea varistoarelor pe bază de ZnO ca soluție de protecție și în situația echipamentelor de telecomunicații;
- fabricarea de către autor a trei serii de câte 6 varistoare, având diametrele utile de 7, 20 și 30 mm utilizate ulterior pentru experimente, după rețeta și în cadrul Laboratorului "Génie Electrique" al Universității PAUL SABATIER din Toulouse (L.G.E.T.). Primele două serii fiind complet îmbrăcate în rășină epoxidică, iar ultima serie fiind o serie de discuri îmbrăcate doar pe lateral, toate cele trei serii având 5 oxizi aditivi. Aceste trei serii sunt destinate funcționării la tensiunea de 230 Vef. O a patra serie a fost concepută pentru a opera la 48 V și are un diametru util de 7 mm, complet îmbrăcată în rășină epoxidică. Are în compoziție doar 2 oxizi aditivi, fiind destinată aplicațiilor electronice, unde este necesară o capacitate electrică mai redusă;
- precizarea unor elemente de chimie și fizica materialelor în scopul de a evalua calitatea și performanțele varistoarelor;
- propunerea și verificarea unui algoritm propriu, având trei pași, pentru proiectarea varistoarelor pe bază de ZnO, care implică calculul electric, termic și de siguranță;
- proiectarea, în baza acestui algoritm a celor 4 serii de varistoare, pentru aplicațiile specifice telecomunicațiilor;
- efectuarea încercărilor de siguranță și măsurarea unor mărimi specifice în scopul verificării dimensiunilor alese;
- adaptarea unei instalații folosită uzual pentru caracterizarea din punct de vedere dielectric a unor polimeri pentru măsurătorile pe varistoare;
- realizarea măsurătorilor pentru determinarea diagramei Cole-Cole și a timpilor medii de relaxație precum și trasarea graficelor aferente;
- propunerea unei metode simple și eficiente pentru determinarea capacității dielectrice a varistoarelor, utilizând aparatul de uz general, la frecvența de 50 Hz;
- analiza principalelor variante de amplasare a modulelor de protecție împotriva supratensiunilor cu evidențierea avantajelor și dezavantajelor acestora, precum și stabilirea unor configurații originale pentru modulele de protecție împotriva supratensiunilor;
- proiectarea, execuția și montajul acestora pe centrala telefonică;
- adaptarea unor scheme de protecție din domeniul energetic în domeniul telecomunicațiilor;
- conceperea unor secvențe de program pentru dialogurile de alarmă între module și unitatea centrală, pentru definirea și verificarea alarmelor și pentru verificarea funcționării reale a modulelor de protecție împotriva supratensiunilor;
- identificarea oportunităților de filtraj ale acestor echipamente și conceperea unei proceduri de testare în situația aplicării unor perturbații;
- elaborarea unor programe de verificare, pentru comportamentul în caz de perturbații și verificarea funcționării modulelor în situația filtrajului perturbațiilor;

VIII.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;
- există o mare varietate de module de protecție la supratensiuni destinate a funcționa în rețele trifazate de 400 V, dar cele care utilizează trei varistoare montate între neutru și fază, neutru și neutru de protecție, fază și neutru de protecție, sunt cele mai fiabile și recomandabile pentru telecomunicații.
- 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.
- 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;
- pornind de la solicitările specifice surselor de alimentare din domeniul telecomunicațiilor s-a propus un algoritm de alegere și proiectare a varistoarelor, bazat pe trei pași, anume:
 - stabilirea tipului și tensiunii nominale a varistorului (calculul electric);
 - calculul (și verificarea) curentului maxim suportabil, al energiei preluate și al căldurii disipate (calculul termic);
 - compararea tensiunii și a curentului rezidual suportat de echipamentul de protecție la supratensiuni, ca valoare de vârf, cu limita maximală a supratensiunilor temporare care pot apărea în instalația de protejat (calculul de siguranță).
- diagrama Cole-Cole, precum și reprezentările timpilor de relaxație oferă instrumente performante de caracterizare a proprietăților varistoarelor, dar sunt costisitoare și greu reproductibile;
- din datele obținute prin măsurători se remarcă proprietățile asemănătoare ale seriilor pentru 230 V_{ef}, realizate din același material cu 5 oxizi aditivi, seria pentru 48 V_{cc} având alți parametri care denotă o omogenitate mai redusă și, deci proprietăți electrice mai slabe, lucru confirmat prin testele anterioare efectuate pentru determinarea coeficientului de neliniaritate;
- pentru aplicațiile legate de alimentarea în alternativ la frecvența uzuală de 50 Hz sau în curent continuu, este posibilă determinarea capacității dielectrice a varistorului printr-o metodă mult mai simplă, utilizând doar un osciloscop digital cu două canale, având funcție de măsurare a valorilor de vârf;

- prețul modulelor de protecție împotriva supratensiunilor este extrem de redus, în comparație cu valoarea echipamentelor protejate. Dacă se va trece la producția de serie a acestora, prețul lor nu va depăși câteva zeci de euro pentru fiecare centrală digitală, o sumă total infimă în comparație cu valoarea de zeci (sau chiar sute) de mii de euro a echipamentului protejat sau a daunelor create de scoaterea din uz a centralei;
- în situația aplicării perturbațiilor pe rețeaua de alimentare, modulele de protecție împotriva supratensiunilor acționează ca niște veritabile filtre, chiar dacă nu aceasta este funcția lor principală;

VIII.3. Contribuții 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, în structura surselor de alimentare modulare din domeniul telecomunicațiilor.

S-a încercat găsirea unor răspunsuri la întrebările:

„Ce sunt supratensiunile în rețelele electrice ?”

„Care este problematica specifică a echipamentelor de telecomunicații ?”;

„Ce mijloace de protecție contra supratensiunilor există la ora actuală în domeniul echipamentelor de telecomunicații?”

„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;
- analiza stării rețelelor de telecomunicații din România, din punct de vedere al protecției la supratensiuni;
- compararea celor mai moderne soluții tehnice existente privind protecția contra supratensiunilor a rețelelor de joasă tensiune și telecomunicații, precum 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;

Cea mai importantă contribuție originală a autorului în aceste două capitole o constituie concepția și proiectarea, unui modul de protecție trifazat pentru sursele de alimentare modulare ale echipamentelor de telecomunicații.

Următoarele două capitole au încercat să dea unele răspunsuri la întrebările:

„Ce proprietăți au varistoarele pe bază de ZnO?”

„Cum se pot produce asemenea varistoare pentru aplicații specifice?”

„Cum se aleg și se dimensionează aceste semiconductoare pentru o aplicație?”

„Cum se pot produce asemenea varistoare pentru aplicații specifice?”

„Cum se poate verifica dimensionarea acestora?”

Cele mai importante contribuții personale ale autorului, în aceste două capitole, se referă la:

- 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;
- analiza principalelor metode de proiectare a varistoarelor pe bază de ZnO și evidențierea deficiențelor acestora;
- propunerea unui algoritm propriu, având trei pași, pentru proiectarea varistoarelor pe bază de ZnO, care implică calculul electric, termic și de siguranță;
- calculul concret al solicitărilor electrice și termice;
- identificarea solicitărilor electrice specifice;
- definirea noțiunilor de echilibru termic stabil și instabil, utilizând date concrete;

Contribuțiile originale cele mai semnificative sunt:

- proiectarea, în baza algoritmului de trei pași, a 4 serii de varistoare, pentru aplicațiile specifice telecomunicațiilor;
- elaborarea de către autor a trei serii de câte 6 varistoare, destinate funcționării la tensiunea de 230, având diametrele utile de 7, 20 și 30 mm, utilizate ulterior pentru experimente, după rețeta și în cadrul L.G.E.Toulouse, primele două serii fiind complet îmbrăcate în rășină epoxidică, iar ultima serie fiind o serie de discuri îmbrăcate doar pe lateral, toate cele trei serii având 5 oxizi aditivi. O a patra serie a fost concepută pentru a opera la 48 V și are un diametru util de 7 mm, complet îmbrăcată în rășină epoxidică. Are în compoziție doar 2 oxizi aditivi, fiind destinată aplicațiilor electronice, unde este necesară o capacitate dielectrică mai redusă;
- efectuarea verificărilor specifice.

Următoarele două capitole au încercat să dea unele răspunsuri la întrebările:

„Ce proprietăți electrice au varistoarele pe bază de ZnO?”

„Cum se pot măsura aceste impedanțe pentru aplicații specifice?”

„Cum se implementează aceste dispozitive semiconductoare în structura centralei de telecomunicații digitale?”

„Aceste varistoare pot realiza și filtrajul perturbațiilor, ca o funcție suplimentară?”

Cele mai importante contribuții personale ale autorului, în aceste două capitole, se referă la:

- analiza principalelor metode de măsurare a impedanței varistoarelor pe bază de ZnO și evidențierea avantajelor și dezavantajelor acestora;
- stabilirea modelului Cole-Cole ca fiind cel mai adecvat pentru determinările impedanței complexe;
- descrierea instrumentelor matematice utilizate pentru studiul teoretic și experimental;
- studiul principalelor variante de amplasare a modulelor de protecție împotriva supratensiunilor cu evidențierea avantajelor și dezavantajelor acestora;

- stabilirea unor configurații pentru modulele de protecție împotriva supratensiunilor;
- proiectarea, execuția și montajul acestora pe centrala telefonică;
- adaptarea unor scheme de protecție din domeniul energetic în domeniul telecomunicațiilor;
- identificarea oportunităților de filtraj ale acestor echipamente;

Contribuțiile originale cele mai semnificative sunt:

- adaptarea unei instalații folosită uzual pentru caracterizarea din punct de vedere dielectric a unor polimeri pentru măsurătorile pe varistoare;
- realizarea măsurătorilor pentru determinarea diagramei Cole-Cole și a timpilor medii de relaxație precum și trasarea graficelor aferente;
- propunerea unei metode simple și eficiente pentru determinarea capacității dielectrice a varistoarelor, utilizând aparatură de uz general;
- calculul și verificarea permitivității dielectrice relative a seriilor de varistoare utilizate;
- conceperea și execuția modulelor de protecție împotriva supratensiunilor;
- conceperea unor dialoguri de alarmă între module și unitatea centrală;
- verificarea funcționării reale a modulelor de protecție împotriva supratensiunilor;
- realizarea secvențelor de program pentru definirea și verificarea alarmelor;
- conceperea unei proceduri de testare în situația aplicării unor perturbații;
- elaborarea unor programe de verificare, pentru comportamentul în caz de perturbații;
- verificarea funcționării modulelor în situația filtrajului perturbațiilor;

VIII.4. Perspective ale continuării studiului

Posibilitățile de implementare a echipamentelor de protecție împotriva supratensiunilor bazate pe varistoarele cu ZnO, în domeniul telecomunicațiilor sunt nelimitate. Practic, aceste dispozitive semiconductoare au fost inventate pentru domeniul de telecomunicații, care rămâne sectorul în care acestea sunt implementate cel mai puțin. Prin urmare, generarea unor noi metode de analiză a performanțelor electrice și propunerea unor noi soluții tehnice, menite a aduce îmbunătățiri funcționale sau noi domenii de aplicabilitate, 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 performanțele electrice sunt comune.

Metodele de proiectare și dimensionare concepute în această lucrare sunt, de asemenea, valabile pentru toate domeniile de tensiune.

Se va urmări și integrarea acestor module în fabricația de serie a centralelor digitale de telecomunicații.

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] **BĂRAN, I., POSTOLACHE, P., AGHINII, E., RÂMNICEANU, V.**, „Normativele românești protejează sistemele informatice împotriva impulsului de trăsnet? », Revista Electricianul, nr. 4/2002, București, România
- [4] **BUI, A., LEBEY, T., VASILIEVICI, AI., DELESEGA, I., MOLDOVAN, L., BUTA, A., ANDEA, P., ȘURIANU, F.**, ș. a., "Matériaux diélectriques et matériel électrique", Editura Tehnică, București, 1997
- [5] **BUI, A., LOUBIERE, A., PENCHENAT, G.**, "Etude comparative des modules de protection pour installation domestique basse tension" , Université PAUL SABATIER, Toulouse, 1993
- [6] **DELESEGA, I.**, "Aparate și Echipamente Electrice", Editura "Orizonturi Universitare", Timișoara, 2006
- [7] **DELESEGA, I.**, "Încercarea aparatelor și echipamentelor electrice", Editura Helicon, Timișoara, 1995
- [8] **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
- [9] **DRĂGAN, G.**, "Supratensiuni atmosferice în instalațiile electroenergetice", Editura Academiei Române, București, 1992
- [10] **DRĂGAN, G.**, "Supratensiuni interne în sistemele electroenergetice", Editura Tehnică București, 1975
- [11] **DRĂGAN, G.**, "Tehnica tensiunilor înalte, Vol.II", editura Academiei Române, Editura AGIR, București, 2001
- [12] **EMTAGE, P. R.**, "Physics of Zinc Oxide Varistors", Journal of Applied Physics, vol. 48, no. 10, 1975
- [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-ILIASA, 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-ILIASA, F., TITIȚĂZAN 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-ILIASA, F., VĂȚĂU, 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
- [19] **FRIGURĂ-ILIASA, F., VĂȚĂU, D., ȘURIANU F., D.**, "An Experimental Method Applied to ZnO Varistors in Order to Determine Their Voltage Limits for a Certain Environmental Temperature", Buletinul Științific al Universității POLITEHNICA din Timișoara, Seria Energetică, Tom 50(64), Fascicola 1 - 2, Timișoara 2005, Proceedings of the Sixth International Power Systems Conference, Timișoara, 3-4 Noiembrie 2005, pag. 237 - 244, ISSN 1582 - 7194
- [20] **FRIGURĂ-ILIASA, F., M., MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA, M., POPA, C.**, „Some Aspects Concerning the Chemical Composition of a Low Voltage Metal Oxide Varistor”, Proceedings of the 9th International Symposium Interdisciplinary Regional Research, ISIRR 2007, Novi Sad, Serbia, paper S5-A-O-14, 21-23 iunie 2007, ISBN 978-86-7892-042-4
- [21] **FRIGURĂ-ILIASA F., M.**, „Stabilitatea termică a varistoarelor pe bază de ZnO. Aplicații la joasă tensiune”, Editura "Orizonturi Universitare", Timișoara, 2002, , Colecția "Științe Tehnice", ISBN 973-8391-03-2
- [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 Proprieties of Metal Oxyde Surge Arresters", IEEE Transactions on Apparatus and Systems, vol. PAS 102, no. 7, 1983
- [30] **LAT, M., V.**, "Analitical Method for Prediction of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Apparatus and Systems, vol PAS 104, no. 10, 1985
- [31] **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
- [32] **MATSUOKA, M.**, "Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics", Japan. Journal of Applied Physics. 10, N° 6 p. 736-746, Tokyo, 1971
- [33] **MIGNARDOT, D.**, "Règles d'installation des parafoudres basse tension", REE, Numéro 6, Juin 1998, Franța
- [34] **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
- [35] **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
- [36] **MODINE F. A., WHEELER R. B.**, "Pulse Response Characteristics of ZnO Varistors", Journal of Applied Physics 67(10), 15 May 1990
- [37] **MOLDOVAN, L., VĂTĂU, D.**, "Elemente moderne în domeniul echipamentelor electrice de comutație", Editura AGIR, București, 2001
- [38] **MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA F.M., CAZACU E.**, „Design and Engineering Limits of a ZnO Varistor based surge-arrester”, Proceedings on The 5th International Symposium on ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING, ATEE – 2006, NOVEMBER 24-25, 2006, Bucharest, Romania, pp.61-66 –ISBN 978-973-8987-12-8
- [39] **MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA F.M., CAZACU E.**, „Engineering and Manufacturing Aspects Concerning ZnO Based Varistors”, Proceedings on The 5th International Symposium on ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING, ATEE – 2006, NOVEMBER 24-25, 2006, Bucharest, Romania, pp.67-73 – ISBN 978-973-8987-12-8.

- [40] **MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA F.M., CAZACU E.**, „*About Establishing the Functional Limits of a ZnO Varistor Based Surge-Arrester*”, Lucrare acceptată pentru publicare, în curs de apariție în Revue Roumaine de Sciences Techniques, Série Electrotechnique et Énergetique, Publishing House of the Romanian Academy, ISSN: RM-ISSN 0035-4066
- [41] **MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA F.M., FRIGURĂ-ILIASA M.**, „*The Thermal Behavior of a ZnO Based Varistor Under Continuous Operating Regime*”, Proceedings of the International Symposium „Research and Education in an Innovation Era”, Section III, Engineering Processes and Technologies, pag. 554-560, Editura Universității „Aurel Vlaicu” Arad, 16-18 noiembrie 2006, România, ISBN 9978-973-752-110-1
- [42] **MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA F.M., FRIGURĂ-ILIASA M.**, „*A Few Improvements to the Physical and Chemical Structure of a ZnO Based Varistor*”, Proceedings of the International Symposium „Research and Education in an Innovation Era”, Section III, Engineering Processes and Technologies, pag. 561-567, Editura Universității „Aurel Vlaicu” Arad, 16-18 noiembrie 2006, România, ISBN 9978-973-752-110-1
- [43] **MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA, F., M., FRIGURĂ-ILIASA, M., POPA, C.**, „*Some Aspects Concerning the Over-Voltage Protections for Telecommunication Equipment*”, Proceedings of the 9th International Symposium Interdisciplinary Regional Research, ISIRR 2007, Novi Sad, Serbia, paper S5-A-O-03, 21-23 iunie 2007, ISBN 978-86-7892-042-4
- [44] **MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA F.M., FRIGURĂ-ILIASA M.**, „*New Manufacturing Technology Developed for Low Voltage ZnO Based Varistors*”, Proceedings of the 5th International Conference on the Management of Technological Changes, 25-26 august 2007, Alexandroupolis, Grecia, Vol. II, pag.96-100 ISBN: 978-960-8932-0-5, 978-960-8932-2-9
- [45] **MUNTEANU, F., FRIGURĂ-ILIASA F.M., FRIGURĂ-ILIASA M.**, „*Tools for Computer Aided Design of High Voltage Switching Devices*”, Proceedings of the 5th International Conference on the Management of Technological Changes, 25-26 august 2007, Alexandroupolis, Grecia, Vol. II, pag.101-106 ISBN: 978-960-8932-0-5, 978-960-8932-2-9
- [46] **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
- [47] **NĂSTĂSIE, S., BLEY, V.**, „*Implementarea descărcătoarelor cu oxizi metalici în instalațiile electrice, premisă pentru creșterea calității protecției la supratensiuni*”, Analele Universității din Oradea, 1998
- [48] **NGUYEN, H.**, „*Varistance à base d'oxyde de zinc à champ de seuil élevé*” Thèse de docteur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1995
- [49] **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;

- [50] **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
- [51] **NISHIWAKI, S., ANDOH, H.**, "Failure Mechanisms and Recent Improvements in ZnO Arrester Elements", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 16, No. 1, January / February 2000
- [52] **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
- [53] **OTEȘTEANU, M., ALEXA, F., BALINT, C.**, „Telefonia Numerică - Sistemul Alcatel 1000E-10”, Editura de Vest, Timișoara, 2004, România
- [54] **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
- [55] **PHILIPP, H., R., LEVINSON, M.**, "High-temperature Behavior of ZnO-based Ceramic Varistors", Journal of Applied Physics 50(1), January, 1979
- [56] **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;
- [57] **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
- [58] **SERRANO, M., S.**, "Etude du comportement électrique et thermique des parafoudres au ZnO", Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon, 1988
- [59] **SHEN, C., Y., WU, L.**, "Effect of Additions on Conduction Properties of ZnO Varistors", Japanese Journal of Applied Physics, vol. 32, 1993.
- [60] **STOIAN, C., MIȘCA, T.**, „Soluții privind protecția la supratensiuni atmosferice și de comutație”, revista Electrica, 2004
- [61] **SUCIU, I.**, "Aparate electrice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1968
- [62] **SUCIU, I.** "Bazele calculului solicitărilor termice ale aparatelor electrice", Editura Tehnică, București, 1980
- [63] **ȘORA, I.**, "Electrotermie și electrotehnologii. Vol. I: Electrotermie", Editura Tehnică, București, 1998

- [64] **ȘURIANU, F., D.**, "Rețele electrice industriale", Editura "Orizonturi Universitare", Timișoara, 1999
- [65] **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;
- [66] **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
- [67] **TRUȘCĂ, V., POPESCU, M., O.**, "Tehnologia de fabricație a aparatelor electrice", Editura ICPE, București, 1996
- [68] **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
- [69] **VASILIEVICI, Al., ANDEA, P.**, "Aparate și echipamente electrice", Editura "Orizonturi universitare", Timișoara, Edițiile I, II, III, 2000-2007
- [70] **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
- [71] **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
- [72] **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
- [73] **VĂTĂU, D., FRIGURĂ, F.**, "Asupra dificultății diagnosticului industrial în domeniul echipamentelor electrice", Analele Universității din Oradea, Fascicola Energetică, volumul I, Oradea, 2001
- [74] **VĂTĂU, D., FRIGURĂ, F.**, „Materiale și tehnologii pentru electrotehnică. Elemente moderne”, Editura "Orizonturi Universitare", Timișoara, 2003, Colecția "Tehnologii", ISBN 973-638-032-7
- [75] **VICAUD, A., LEROY, G., HENNEBIQUE, I.**, "Parafoudres à oxyde métallique dans les réseaux alternatifs" EPURE/EDF-DER, 07/1984-3
- [76] **VITET, S. ș.a.**, "Thermal Stress on ZnO Surge Arresters in Polluted Conditions", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992

- [77] **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
- [78] * * *, **ABB Energie S.A.**, "Parafoudre oxyde de zinc XCL 24 S HN 65 S 20", Prospect , ABB Franța, 1999
- [79] * * *, **CONEL – S. C. ELECTRICA S. A.** "Varistoare cu oxizi metalici. Aplicații", București, 1999
- [80] * * *, **DEHN + SÖHNE GmbH.**, "Overvoltage Protection – Main Catalogue , Germania, 2002
- [81] * * *, **DEHN+SÖHNE GmbH.**, "Overvoltage Protection – Main Catalogue , Germania, 2000
- [82] * * *, **Global Lightning Technologies Pty. Ltd.**, "Lightning and Transient Protection for a Typical Telecommunications or Cellular Radio Facility" Hobart, Australia, 1996
- [83] * * *, "Guide UTE C15-443: Protection des installations électriques basse tension contre les surtensions d'origine atmosphérique", Franța, 1995
- [84] * * * , **I.C.P.E. București**, "Ceramic Materials and Products", catalog, România, 1998
- [85] * * * , "INGESCO – Products Catalogue" **Dena Desarrollos S.L.** Spania 2000
- [86] * * * , "Metal Oxide (ZnO) Varistors", Catalog **ISKRA Varistor**, Ljubljana, Slovenia, 2001
- [87] * * * , **MURATRON S.A.**, "Catalogue 2000", Franța, 2000
- [88] * * * , "Norme NFC 15-100, sections 443 et 534: Installations électriques à basse tension" Franța, 1995
- [89] * * * , "Norme NFC 61740 (de juillet 1995): Parafoudres pour installations à basse tension", Franța, 1995
- [90] * * * , "Norme NFC 83-280 (Décembre 1978): Système CENELEC d'assurance de la qualité. Varistances"
- [91] * * * , Norme CEI 664-1980, "Coordonarea izolațiilor în rețelele electrice"
- [92] * * * , Norme CEI 60-2-1994, "Tehnica încercărilor la înaltă tensiune"
- [93] * * * , "Recommendations for lightning arresters, Part 1: Non-linear resistor-type arresters", IEC Publication 99-1 A, 1985
- [94] * * * , **S.C. PROTENERGO S.A. Timișoara**, "Fișa tehnică a produsului Bloc Multipriză protejat la Supratensiuni tip BMS 01", România, 2001

- [95] * * *, **SIEMENS A.G.**, "Protection Enclosed - Catalogue", Germania, 1999
- [96] * * * **SR CEI 60536: 1995**, "Clasificarea echipamentelor electrice și electronice din punct de vedere al protecției împotriva șocurilor electrice", ASRO București, România, 1995
- [97] * * * **SR CEI 60536-2: 1995**, "Partea 2: Instrucțiuni privind aplicarea prescripțiilor de protecție împotriva șocurilor electrice", ASRO București, România, 1995
- [98] * * * **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
- [99] * * * **SR CEI 60446: 1993**, "Identificarea conductoarelor prin culori sau repere numerice", ASRO București, România, 1993
- [100] * * * **SR CEI 60884+A1: 1997**, "Fișe și prize pentru uz casnic și similar. Partea 1: Prescripții generale", ASRO București, România, 1997
- [101] * * * **SR EN 60950 + A1: 1996**, "Securitatea echipamentelor pentru tehnologia informației (inclusiv a echipamentelor electronice de birou)", ASRO București, România, 1996
- [102] * * * **SR EN 60950 + A2: 1997**, "Securitatea echipamentelor pentru tehnologia informației (inclusiv a echipamentelor electronice de birou)", ASRO București, România, 1997
- [103] * * * **SR EN 60950 + A3: 1997**, "Securitatea echipamentelor pentru tehnologia informației (inclusiv a echipamentelor electronice de birou)", ASRO București, România, 1997
- [104] * * * **SR EN 60099 - 4: 1998**, "Descărcătoare. Partea 4: Descărcătoare cu oxizi metalici fără eclatoare pentru rețele de curent alternativ" ASRO București, România, 1998
- [105] * * * **SR EN 60099 - 5: 1998**, "Descărcătoare. Partea 5: Recomandări pentru alegere și utilizare" ASRO București, România, 1998
- [106] * * * **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
- [107] * * * **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

- [108] * * *, **UNION TECHNIQUE de l`ELECTRICITE**, "*Guide pratique- Protection des installations électriques basse tension contre les surtensions d`origine atmosphérique*", Paris, 1996
- [109] * * *, "*Varistances. Spécifications et guide pour applications*", versiunea în franceză, editată de **Power Development Ltd** , Marea Britanie, 1996