

**UNIVERSITATEA “POLITEHNICA” din TIMIȘOARA
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ**

Teza de doctorat

*Contribuții la studiul și dimensionarea
descărcătoarelor cu oxizi metalici în vederea
implementării lor în sistemele de tracțiune electrică*

Inginer Silvian Năstasie

**Conducător științific
Prof. Dr. Ing. Alexandru Vasilevici**

- 1998 -

Cuvânt înainte

Aceasta lucrare a fost efectuată în cea mai mare parte în cadrul Laboratorului de Genie Electric (LGET) al Universității Paul Sabatier din Toulouse fiind o realizare a cooperării științifice și tehnice între România și Franța, în cadrul programelor de colaborare TEMPUS.

Doresc să mulțumesc domnului profesor Bui Ai, director de cercetare al LGET, care a avut bunavoința să mă primească în laborator și să-mi pună la dispoziție tot ceea ce a fost necesar pentru a putea finaliza lucrarea. De asemenea vreau să-mi exprim respectul și mulțumirea față de echipa de cercetare materiale ceramice : domnii ingineri de cercetare Andre Loubiere, Chabanne Talhi, Vincent Bley, Thiery Lebey și Sorin Dinculescu, pentru spiritul de colegialitate, ajutorul, sfaturile tehnice acordate pe tot timpul stagiului.

Totodată îmi exprim recunoștința și mulțumirea față de domnii profesori Alexandru Vasilevici și Florin Ionescu pentru îndrumarea spre tema lucrării și sprijinul acordat pentru obținerea bursei de cercetare. Multe mulțumiri și domnului profesor Adrian Buta pentru sfaturile și discuțiile în urma cărora s-au conturat mai exact direcțiile și problemele ce au trebuit abordate în lucrare.

Mulțumesc colegilor din Catedra de Electroenergetică pentru sprijinul moral pe care l-am primit și simțit în perioada elaborării tezei. Mulțumesc de asemenea doamnei Valentina Ștef care m-a ajutat la îmbunătățirea formei grafice a lucrării.

Nu în ultimul rând mulțumesc mult familiei care m-a înțeles, sprijinit și a trecut cu bine peste multe privațiuni , acceptate pentru ca eu să pot finaliza această lucrare.

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Autorul

621.281
366 B]

CUPRINS

Cap.1 INTRODUCERE	5
Cap.2 PREZENTAREA SISTEMELOR DE TRACTIUNE ELECTRICA SI A PROTECTIEI LA SUPRATENSIUNI	8
2.1 Tractiunea electrica urbana	8
2.1.1 Alimentarea cu energie electrica a substatiiilor de tractiune	8
2.1.2 Protectia substatiiilor, retelei si a vehiculelor electrice de tractiune impotriva supratensiunilor	11
2.2 Sisteme de tractiune electrica feroviara	14
2.2.1 Alimentarea cu energie electrica a instalatiilor de tractiune feroviara	15
2.2.2 Realizarea protectiei la supratensiuni in instalatiile fixe de tractiune feroviara	16
2.2.3 Protectia la supratensiuni a materialului rulant electric	20
Cap.3 CARACTERISTICILE ECHIPAMENTELOR ELECTRICE DE PROTECTIE LA SUPRATENSIUNI	23
3.1 Cauzele aparitiei supratensiunilor in instalatiile de tractiune	23
3.1.1 Supratensiuni de origine atmosferica	24
3.1.2 Supratensiuni de comutatie	25
3.1.3 Supratensiuni temporare in instalatiile de tractiune	26
3.2 Studiul comparativ al echipamentelor de protectie la supratensiuni	27
3.2.1 Eclatoare	28
3.2.2 Descarcatoare cu SiC si eclatoare in serie	30
3.2.3 Descarcatoare pe baza de ZnO	31
Cap.4 TEHNOLOGIA DE FABRICATIE SI PROCESELE FIZICE ALE CONDUCTIEI IN VARISTOARELE CU ZNO	33
4.1 Caracteristica de protectie I(U) a varistoarelor cu ZnO	33
4.2 Tehnologia de fabricatie a varistoarelor cu ZnO	36
4.2.1 Operatiile procesului de fabricatie	37
4.2.2 Microstructura varistoarelor cu ZnO	41
4.2.3 Rolul oxizilor aditivi si influenta lor asupra proprietatilor electrice ale varistoarelor	44
4.2.4 Influenta diametrului mediu al granulelor de ZnO asupra tensiunii de prag	47
4.3 Mecanismele conductiei la varistoarele cu ZnO	49
4.3.1 Modelul M.Matsuoka	49
4.3.2 Modelul J.D.Levine	50
4.3.3 Modelul G.E.Pike si C.H.Seager	52

4.3.4 Modelul L.M. Levinson, H.R. Philip, G.D. Mahan	52
4.3.5 Modelul J. Bernasconi	53
4.3.6 Modelul O. Dorlanne	53
4.3.7 Determinarea dependentei $\phi(U)$ a înalțimii barierei de potențial cu tensiunea de polarizare	53
4.4 Mecanismele degradării	62
4.4.1 K.Eda și colaboratorii	63
4.4.2 T.K.Gupta și colaboratorii	66
4.4.3 C.G. Shirley și W.M. Paulson	66
Cap.5 DIMENSIONAREA DESCARCĂTOARELOR CU ZnO PENTRU PROTECȚIA INSTALAȚIILOR DE TRACȚIUNE ELECTRICA URBANA	68
5.1 Prezentarea protecției actuale	69
5.2 Definiția marimilor electrice specifice varistoarelor cu ZnO	72
5.3 Influența temperaturii asupra dimensionării varistoarelor cu ZnO	75
5.4 Stabilirea ferestrei de acționare și prezentarea parametrilor caracteristici ai varistoarelor fabricate pentru protecția instalațiilor de tracțiune urbana ..	85
Cap.6 MODELE TEORETICE, ALGORITMI DE PRELUCRARE A DATELOR, INSTALAȚIILE DE MASURARE UTILIZATE PENTRU STUDIUL EXPERIMENTAL AL VARISTOARELOR CU ZnO	90
6.1 Ridicarea experimentală a caracteristicii I(U) a varistorului	90
6.1.1 Măsurarea I(U) la curenți mici în curent continuu	91
6.1.2 Evidențierea mecanismului termoelectronic de conducție prin de- terminarea experimentală a variației înalțimii barierei de potențial	94
6.1.3 Determinarea caracteristicii I(U) la curenți mari	97
6.1.4 Determinarea experimentală a coeficientului de neliniaritate α	100
6.2 Caracterizarea electrică a varistoarelor prin determinarea experimentală a impedanței complexe	101
6.2.1 Definiția impedanței complexe. Schema electrică echivalentă a varistoarelor	102
6.2.2 Proprietăți dielectrice ale varistoarelor	105
6.2.3 Modele teoretice pentru relaxația dielectrică. Funcții de distribuție ale timpilor de relaxație.	108
6.2.4 Instalația de măsurare a impedanței complexe	114
6.2.5 Reprezentarea impedanței complexe în diagrama Cole-Cole	119
6.2.6 Determinarea unghiului de descentraj θ prin metoda regresiei circulare	120
6.2.7 Calculul timpului mediu de relaxație și reprezentarea funcției de distribuție a timpilor de relaxație	123
6.2.8 Prezentarea organigramei programului de calcul a parametrilor necesari caracterizării varistoarelor prin metoda spectroscopiei impedanței	127

Cap.7 CARACTERIZARE ELECTRICA SI MODELAREA VARISTOARELOR CU ZnO	133
7.1 Incercari pentru verificarea caracteristicilor de functionare	134
7.1.1 Verificarea nivelului de protectie N_p asigurat de varistor	134
7.1.2 Verificarea functionarii la curentul nominal de descarcare	136
7.1.3 Verificarea tinerii la impulsuri de curent de mare amplitudine	137
7.1.4 Verificarea tinerii la impulsuri de curent de lunga durata	138
7.2 Caracterizarea starii de degradare a varistoarelor prin masurarea caracteristicii $I(U)$ in curent continuu	139
7.2.1 Verificarea variatiei procentuale a tensiunii de prag U_s	140
7.2.2 Evolutia curentului de scurgere I_r dupa aplicarea de socuri de tensiune	143
7.2.3 Evidentierea starii de degradare prin diminierea inaltimii barierei de potential	144
7.3 Caracterizarea starii de degradare a varistoarelor prin metoda spectroscopiei impedantei	144
7.3.1 Studiul evolutiei impedantei complexe in diagrama Cole-Cole	145
7.3.2 Studiul evolutiei functiei de distributie a timpilor de relaxatie	147
7.4 Concluzii referitoare la caracterizarea varistoarelor pe baza de ZnO	151
7.5 Modelarea varistoarelor fabricate si simularea comportarii lor in scheme electrice	153
7.6 Evidentierea experimentală a eliminării supratensiunilor cu ajutorul varistoarelor pe baza de ZnO	160
 Cap.8 CONCLUZII	 164
BIBLIOGRAFIE	172
ANEXE	179
Anexa 1 Compozitia varistoarelor fabricate	
Anexa 2 Programul de calcul TAUMED	
Anexa 3 Standurile pentru masuratori experimentale	

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

Una din cerintele principale pe care trebuie sa le satisfaca un sistem de alimentare cu energie electrica este functionarea fara intreruperi neprogramate. Aceasta cerinta se realizeaza printr-un sistem complex de masuri de conceptie si exploatare in vederea prevenirii avariilor. In timpul functionarii normale , izolatia instalatiei electrice este solicitata la tensiunea de serviciu, tensiune apropiata de tensiunea nominala. Din diverse cauze , izolatia poate fi insa solicitata la tensiuni mai mari decit cea de serviciu. Orice crestere a tensiunii din instalatia electrica peste tensiunea maxima de serviciu se delineste ca supratensiune.

Supratensiunile care pot aparea in instalatiile electrice si in particular in cele de tractiune electrica , pot fi grupate in 2 mari categorii :

- supratensiuni interne;
- supratensiuni externe;

Aceasta clasificare are in vedere cauzele care provoaca aceste supratensiuni. Supratensiunile interne sint datorate proceselor tranzitorii din instalatiile electrice, cele externe fiind provocate de descarcarile electrice din atmosfera. Izolatia instalatiilor electrice este astfel dimensionata, incit sa poata suporta anumite supratensiuni fara strapungeri sau conturnari. In functie de tensiunea nominala a instalatiei, este stabilita tensiunea maxima de o anumita forma pe care trebuie sa o suporte izolatia. Valoarea acestei tensiuni se numeste nivel de protectie si este normata prin standarde. Stabilirea nivelului de protectie intr-o instalatie este o problema complexa cu implicatii tehnico economice. Importanta cunoasterii cit mai precise a valorii supratensiunilor si gasirea unor metode si mijloace de protectie impotriva lor a rezultat din necesitatea asigurarii unui grad de fiabilitate marit pentru functionarea instalatiilor, cit si din considerente economice, pentru protejarea componentelor de valoare ridicata din instalatii (transformatoare,redresoare,aparataj) si pentru asigurarea unui nivel de protectie corespunzător (cheltuieli cu izolatia mai reduse).

In cadrul instalatiilor electrice o importanta si pondere deosebita o au instalatiile de tractiune electrica in curent continuu si alternativ. In curent alternativ monofazat la nivelul de tensiune de 25 kV se alimenteaza retelele electrice de tractiune feroviara, iar in curent continuu, la noi in tara sint numai instalatiile de tractiune urbana. In alte tari (Franta, Germania, Elvetia) in curent continuu se alimenteaza si retelele de tractiune feroviara datorita avantajelor pe care le reprezinta :

- scaderea pierderilor de putere pe linie;
- functionarea la un nivel de tensiune scazut (1500 V sau 3000 V);
- cresterea puterii de transport.

Conversia energiei din trifazat în continuu a cunoscut o evoluție deosebită, datorată evoluției permanente a elementelor semiconductoare cu care sînt realizate redresoarele din stațiile de transformare. Inconvenientul pe care-l reprezintă totuși redresoarele din substațiile de alimentare a instalațiilor de tracțiune este acela că sînt sensibile la supratensiuni, înșasi instalația electrică putînd fi cauza producerii de supratensiuni, prin propagarea acestora producîndu-se pagube importante. O cauză externă frecventă în producerea supratensiunilor în instalațiile de tracțiune electrică, este lovitura de trasnet directă pe linia de contact (catenara) sau în apropierea ei, linia fiind afectată prin inducerea unei unde de tensiune de amplitudine mare ce se propaga pe linie. Cauzele interne din instalații sînt cel mai adesea punerea în funcțiune sau întreruperea de puteri ridicate, fapt ce se petrece foarte frecvent mai ales în tracțiunea urbană. Supratensiunile astfel create, ce prezintă fronturi crescătoare de $\text{kV}/\mu\text{s}$ și amplitudini de kV și zeci de kV , pot degrada izolația și echipamentele instalației, mai ales instalațiile de redresare a tensiunii. Se cunoaște cazul din 1987 cînd o stație de tracțiune urbană din Timișoara a ars aproape complet în timpul unei furtuni cu descărcări electrice. Dispozitivele de protecție existente, (eclatoare cu coarne, descărcătoare cu rezistență variabilă din carborund) au performanțe limitate. În ultimii ani înșă, domeniul echipamentelor de protecție la supratensiuni cu caracteristici electrice neliniare a fost revoluționat de apariția varistoarelor cu oxizi metalici (ZnO , Bi_2O_3 etc.). Utilizarea acestor componente, a permis îmbunătățirea performanțelor în domeniul limitării supratensiunilor și creșterea eficacității aparatelor de protecție la supratensiuni.

Obiectivul lucrării este studiul noilor descărcătoare, particularizat pentru instalațiile de tracțiune urbană, în vederea înlocuirii celor existente cu finalitate în reducerea efectelor nedorite ale supratensiunilor asupra instalațiilor protejate. Performanțele electrice sînt verificate și comparate cu ale echipamentelor folosite actualmente pentru protecție (eclatoare, descărcătoare cu carbura de siliciu (SiC)).

În capitolul al doilea am făcut o prezentare a sistemelor de tracțiune electrică urbană și feroviara, a problemele specifice legate de protecția lor la supratensiuni. În capitolul al treilea am prezentat cauzele apariției supratensiunilor, și un studiu comparativ al performanțelor echipamentelor de protecție la supratensiuni existente. În capitolul patru sînt prezentate caracteristicile generale ale descărcătoarelor, proprietățile lor, tehnologia de fabricație, mecanismele conductiei și îmbatrînirii. În capitolul cinci am detaliat problemele specifice dimensionării unui descărcător pentru protecția la supratensiuni în substațiile de tracțiune urbană și vagoanele motoare ale tramvaielor și troleibuzelor. În capitolul șase sînt prezentate aspecte legate de dispozitivele și schemele folosite pentru încercări, metodele de măsurare experimentală a impedanței complexe, caracteristicii $I(U)$, studiul îmbatrînirii și comportării la solicitări multiple. În capitolul șapte au fost prelucrate și interpretate rezultatele experimentale, a fost simulată comportarea varistorului, pe baza unui model fizic

la care parametrii au rezultat din datele experimentale. In ultimul capitol sint prezentate concluziile lucrarii si directiile de perspectiva ce se deschid in urma acestui studiu.

In ultimul timp, pe plan mondial, datorita rezultatelor foarte bune obtinute in protectia retelelor de transport si distributie a energiei electrice prin utilizarea noilor tipuri de descarcatoare cu oxizi metalici, a avut loc o crestere a domeniilor de utilizare a acestora. Aceasta crestere este datorata bunei calitati a protectiei la supratensiuni, coroborata cu pretul scazut, in raport cu cel al instalatiei protejate.

Scopul principal urmarit in lucrare este evidentierea problemelor specifice in ce priveste dimensionarea, fabricarea, caracterizarea electrica si modelizarea noilor tipuri de descarcatoare cu ZnO, studiul fiind particularizat pentru instalatiile de tractiune electrica urbana, concluziile putind fi insa extrapolate si pentru alte aplicatii.

CAPITOLUL 2

PREZENTAREA SISTEMELOR DE TRACTIUNE ELECTRICA SI A PROTECTIEI LA SUPRATENSIUNI

In acest capitol vor fi prezentate sistemele de tractiune electrice, cu scopul de a evidentia locul si rolul echipamentelor de protectie la supratensiuni in cadrul statiilor de tractiune si al materialului rulant electric. Aceasta prezentare a instalatiilor va facilita dimensionarea corespunzatoare a descarcatoarelor cu oxid de zinc (ZnO) utilizate pentru protectia lor. Voi prezenta succint schemele de alimentare ale sistemelor de tractiune cu protectiile la supratensiuni existente.

2.1. Tractiunea electrica urbana

Transportul in comun de persoane reprezinta o veriga importanta in activitatea sociala economica a aglomeratiilor urbane, in orasele mari tramvaiul si troleibuzul avind o pondere insemnata in sistemul general de transport, datorita costurilor scazute si gradului redus de poluare.

2.1.1. Alimentarea cu energie electrica a statiilor de tractiune

Energia necesara tractiunii electrice urbane este livrata din sistemul energetic national prin intermediul retelelor electrice de distributie , posturilor de transformare si statiilor de tractiune electrice. O schema principala de alimentare a retelei de contact este prezentata in fig. 2.1.

De la centralele electrice 1, ale sistemului energetic national, energia electrica in curent alternativ este transmisa prin liniile de transport 2 la statiile coboritoare de tensiune 3 de unde sint transmise la o tensiune medie statiilor de tractiune 4. In aceste statii are loc redresarea curentului alternativ in curent continuu dupa ce nivelul tensiunii a fost redus in postul de transformare coboritor la 480 V. Din statia de tractiune, curentul continuu este transmis la reseaua de contact 6, prin cablurile de alimentare 5 , unde prin captatorul de curent ajunge la motoarele de tractiune si serviciile auxiliare ale tramvaiului 7 sau troleibuzului 10. Circuitul se inchide apoi prin sinele 8 (la tramvai) sau firul de intoarcere (la troleibuz) si cablurile de intoarcere 9 in statia de tractiune.

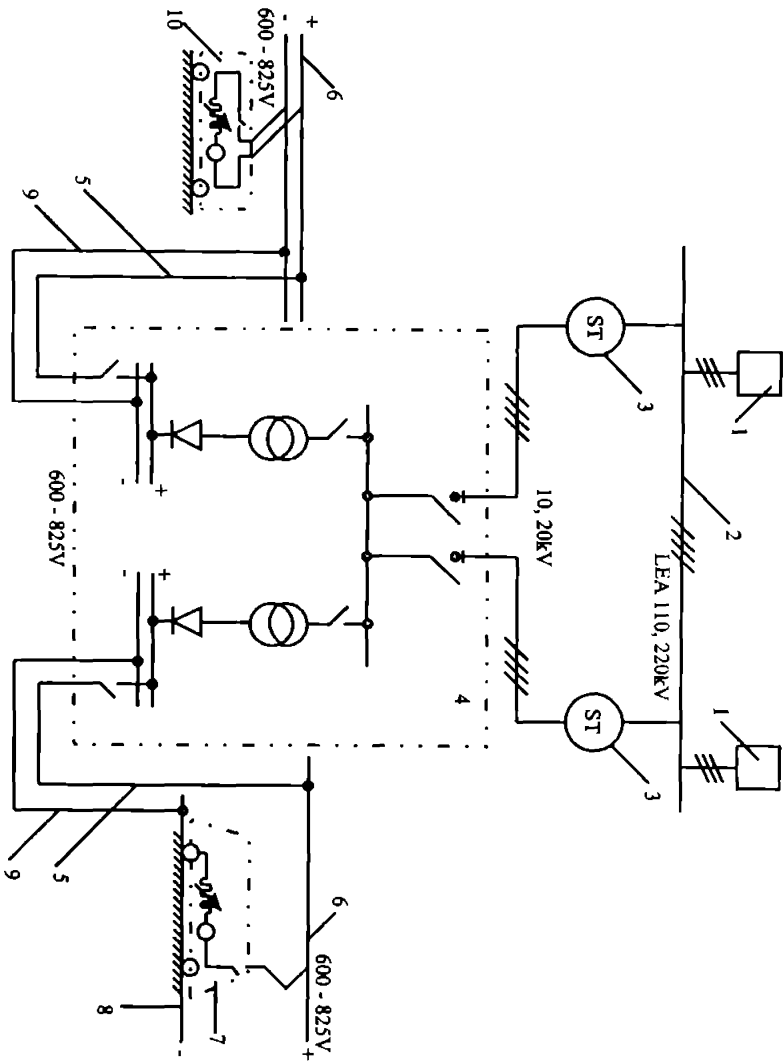


Fig. 2. 1. Schema electrica a substatiei de traciune electrica urbana.

Sistemul exterior de alimentare cu energie electrică sau circuitul primar cum i se mai spune, cuprinde toate elementele de pe partea de curent alternativ, posturile de transformare coboritoare, aparatul de comandă și protecție. Cablurile de întoarcere, rețelele de contact, calea de rulare, substația de tracțiune cu toate aparatele de protecție, comutație și redresare constituie sistemul interior sau secundar de alimentare.

Substațiile de tracțiune electrică urbană sunt alimentate în curent alternativ la 10 sau 20 kV [102]. La barele stațiilor pe partea de curent continuu, tensiunea nominală redresată este de 750 V [103], așa cum vom întâlni în orașele București, Ploiești, Constanța. În Timișoara și Oradea se utilizează tensiunea exceptată de 600 V iar în celelalte orașe 825 V [3]. La nivel mondial cea mai răspândită tensiune este cea de 600 V, datorită multitudinii de echipamente construite pentru această tensiune și fiabilității lor sporite. Din punct de vedere al pierderilor electrice în cabluri, în rețeaua de contact și în echipamentele de reglaj, este mai avantajoasă tensiunea mai înaltă; însă prin înlocuirea reglajului rezistiv al vitezei cu cel pe bază de dispozitive cu comutație statică, realizat cu semiconductoare, acest dezavantaj a fost înlăturat.

Sistemele exterioare de alimentare cu energie electrică pot fi clasificate în funcție de modul de conectare al substațiilor cu posturile de transformare care le alimentează în :

- sisteme radiale;
- sisteme magistrale;
- sisteme inelare;

Alegerea uneia sau altele din aceste scheme se face pe baza unei analize tehnico-economice, depinzând de amplasarea substațiilor de tracțiune, a posturilor de transformare, planul rețelelor de distribuție și gradul de siguranță necesar.

Sistemele interioare de alimentare cu energie electrică pot fi :

- sisteme centralizate;
- sisteme descentralizate;
- sisteme mixte;

Alegerea uneia sau altele din aceste soluții este făcută în funcție de particularitățile specifice situației existente pe teren.

Rețeaua de tracțiune funcționează în condiții specifice, care se deosebesc de condițiile de funcționare a sistemelor de alimentare a obiectivelor industriale generând probleme specifice de exploatare. Se pot aminti aici câteva din aceste condiții :

- sarcinile rețelei de tracțiune se schimbă în limite largi și își modifică poziția față de substația de tracțiune;
- rețeaua funcționează în condiții de mediu și solicitare dure;
- motoarele de tracțiune pot fi trecute și în regim de generator, realizând o frinare recuperativă, prin această trimitând energie în rețeaua de contact.
- parametrii rețelei de contact și ai căii de rulare variază în limite largi;

- calea de rulare e sustinuta de sol, o parte a curentului de tractiune trecind prin sol si dind nastere curentilor vagabonzi.

Schemele de alimentare cu energie trebuie sa permita o mare elasticitate in manevre si un nivel de siguranta sporit, adica sa fie capabile de a face fata unor regimuri grele de functionare si sa permita prevenirea, depistarea si lichidarea operativa a regimurilor de avarie.

2.1.2. Protectia statiilor, retelei si a vehiculelor electrice de tractiune impotriva supratensiunilor

Se va face referire aici la protectia la supratensiuni in sistemul secundar sau interior de alimentare, in cel exterior protectia fiind cea clasica, conform normelor protectiei statiilor de transformare in curent alternativ [102].

Rețelele de contact functioneaza in conditii deosebit de grele, asupra lor exercitandu-se factori de agresiune chimici, mecanici si atmosferici. Supratensiunile datorate descarcarilor electrice pot provoca in anumite conditii strapungerea izolatoarelor sau contornarea lor pe suprafetele acoperite cu impuritati. Acest pericol este cu atat mai pronuntat cu cit rețeaua are o intindere mai mare mai ales spre zone cu constructii joase care nu asigura ecranarea impotriva descarcarilor electrice atmosferice. Acestea prezinta un pericol deosebit atat pentru linia de contact cit si pentru vehiculele electrice si echipamentele din substatia de tractiune, putind provoca avarierea si incendierea lor.

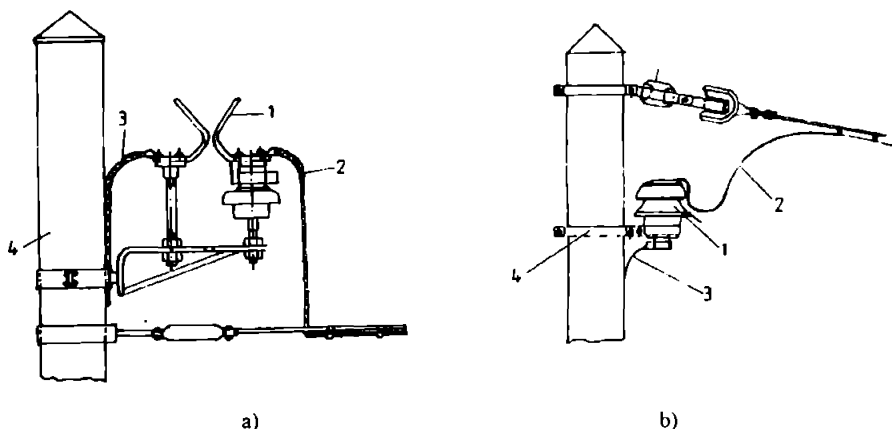


Fig.2.2 Eclator cu coame (a) si DRV (b) pentru protectia liniei de contact la supratensiuni.

1. dispozitivul de protectie (eclator, DRV);
2. legatura elastica la firul de contact;
3. legatura elastica la sina sau priza de pantam;
4. stilp de sustinere al rețelei de contact.

Pentru protecția împotriva supratensiunilor atmosferice, pe stâlpi se montează în general eclatoare cu coarne și descarcatoare cu rezistență variabilă [104] (fig.2.2), iar în celulele de plecare în curent continuu ale substației se montează actualmente descarcatoare cu rezistență variabilă (DRV) cu carbura de siliciu (SiC).

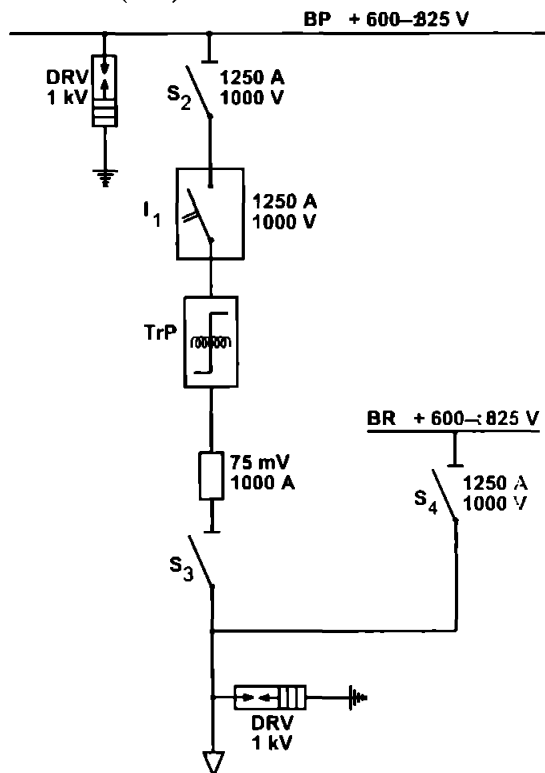


Fig. 2.3. Schema electrică a celulei de plecare din substația de tracțiune.

Eclatoarele cu coarne au avantajul în exploatare de a fi ușor de verificat din punct de vedere al stării tehnice după furtuni și de aceea se recomandă folosirea lor pe fiecare sector al liniei de contact. Descarcatorul care se pune în celulele de curent continuu din stație este necesar a fi instalat și pe vagonul motor. În figura 2.4.a se prezintă o parte din schema electrică de forță a vagonului Timis 2 și a celulei de plecare CIRP-9 din substație (fig. 2.3).

La troleibuzele clasice (DAC 217) cu reglajul vitezei prin rezistență, protecția la supratensiuni se asigură printr-un descarcător de tip DRV montat între cele două brate ale trolului (fig. 2.4 b).

La troleibuzele cu reglajul vitezei prin dispozitive cu comutație statică, fiind cunoscută sensibilitatea acestora la supratensiuni, pentru protecția acestor dispozitive, se folosesc varistoare cu ZnO (fabricație Siemens tip B600K680) puse în paralel pe dispozitivul de reglaj,

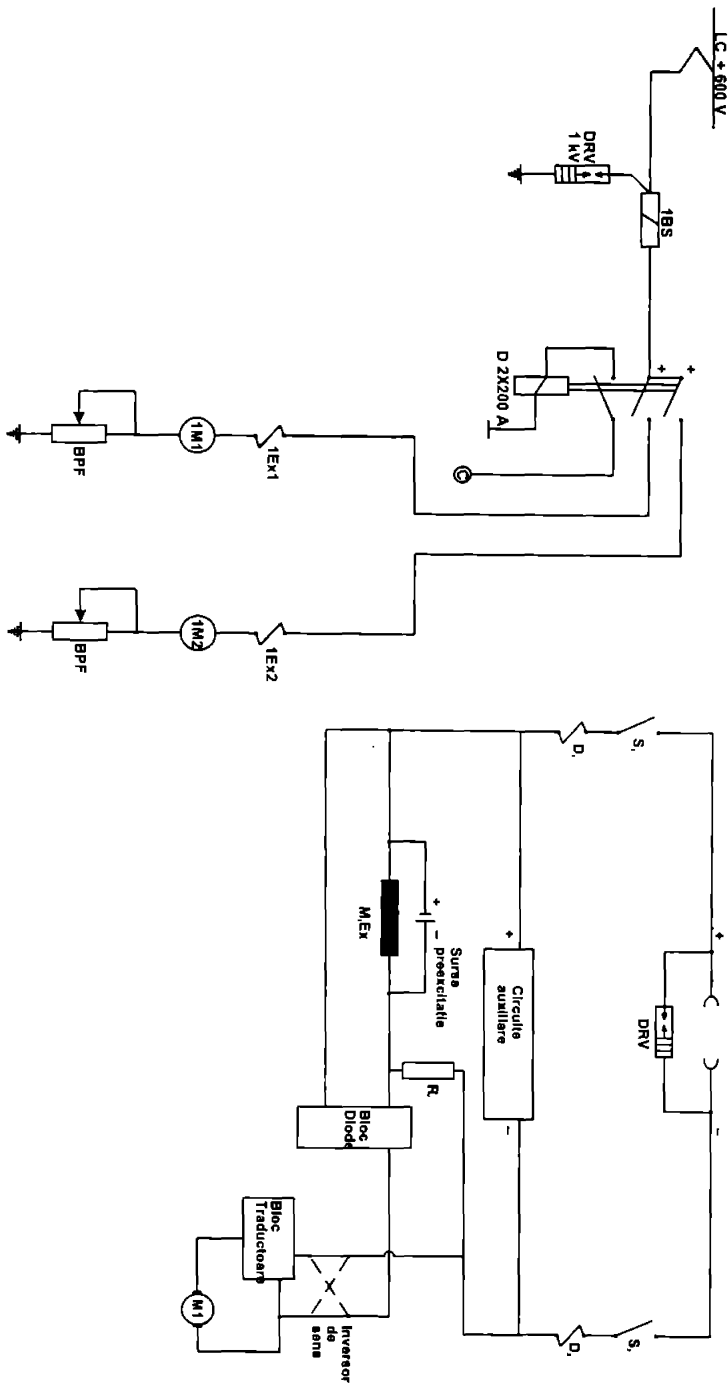


Fig. 2.4. a) Schema principală de forță a tramvaielor Timiș 2, b) Schema principală de forță a trolebusurilor DAC 217
 LC-linia de contact; 1BS bobina de șoc; D-2x200 A – disjunctorul; BPF-blocuri pornire și frânare;
 1M1, 1M2 – motoare de tracțiune

protectia la supratensiunile provenind de pe linia de alimentare fiind facuta tot cu descarcatoare clasice cu SiC, DRV folosite sunt de acelasi tip ca si cele prezentate la tramvaie.

Tabelul 2.1.

Caracteristici ale descărcătoarelor cu SiC utilizate în tracțiunea urbană

Tipul	U_n [kV]	I_n [kA]	Tensiunea de amorsare U_{am} [kV]		U_{rez} [kV]
			$f=50$ Hz	La impuls 1,2/50 μ s	
VB 0,8/ 2,5	0,8	2,5	1,5	3	3
VB 1/ 2,5	1	2,5	1,8	3,6	3,6
DRVC 0,9/2,5	0,9	2,5	1,75	3	3,5

2.2. Sisteme de tracciunea electrica feroviara

La scara mondiala in functie de natura curentului de alimentare a liniei de contact, exista urmatoarele sisteme de tracciune electrica feroviara :

- sistemul de curent alternativ trifazat;
- sistemul de curent continuu;
- sistemul de curent alternativ monofazat cu frecventa redusa;
- sistemul de curent alternativ monofazat cu frecventa industriala;

Sistemul de c.a. trifazat are numai o importanta istorica, el fiind folosit la primele electrificari feroviare in Elvetia si Italia;Sistemul de c.c. are o mare raspindire deoarece a permis construirea unor locomotive simple prin utilizarea motoarelor cu excitatie serie de c.c.Tensiunea de alimentare a liniei de contact este 1500 V (Franta, Olanda, Spania), 3000 V (fosta U.R.S.S., Italia, Cehia, Polonia). Tensiunea redusa la linia de contact care a impus distante mici intre substatii (15 - 30 km), sectiunile mari ale liniei de contact, care conduc la consum de Cu si greutate sporita, complexitatea echipamentelor necesare pentru transformarea tensiunii, actiunea corosiva nefasta a curentilor de intoarcere asupra altor instalatii electrice si de telecomunicatii, au facut ca treptat si acest sistem sa fie abandonat.Sistemul de c.a. monofazat cu frecventa redusa imbrina efectele favorabile ale liniei de contact la tensiune inalta (15 kV), cu proprietatile motoarelor de c.c. cu excitatie serie. Frecventa folosita este de 16,66 Hz. Se mai intilneste acest sistem in Germania, Norvegia, Suedia. Are insa si urmatoarele dezavantaje :

- nu se incadreaza in sistemul energetic , datorita frecventei , fiind necesare statii convertizoare complexe;
- locomotivele au motoare monofazate cu colector care sint pretentioase;
- influenta asupra instalatiilor de telecomunicatii datorata frecventei ;

Necesitatea combinării avantajelor alimentării liniei de contact cu tensiune înaltă (16 - 25 kV) și frecvența industrială 50 Hz (Europa), 60 Hz (Japonia, S.U.A.) cu racordarea ușoară la sistemele electroenergetice existente, a condus la apariția și dezvoltarea sistemului monofazat de tensiune alternativă.

2.2.1 Alimentarea cu energie electrică a instalațiilor de tracțiune feroviara

Îmbinarea avantajelor industriale ale alimentării liniei de contact la tensiune înaltă cu racordarea comodă a căii ferate electrice la rețelele și sistemul energetic național, a făcut ca sistemul de curent alternativ monofazat la $f = 50$ Hz, să fie adoptat și dezvoltat și în țara noastră. Dezvoltarea și extinderea sistemului a fost întârziată de greutatea întâmpinată în construirea unor locomotive electrice simple și robuste. Primele linii, alimentate la 16 kV au fost construite în Ungaria și Germania la începutul secolului. În anii 50 în urma unor studii care au dus la proiectarea și construcția locomotivelor redresoare, a fost adoptată măsura electrificării căilor ferate la o tensiune $U_n = 25$ kV, și $f = 50$ Hz. Schema principală a sistemului de c.a. monofazat este prezentată în figura 2.5.

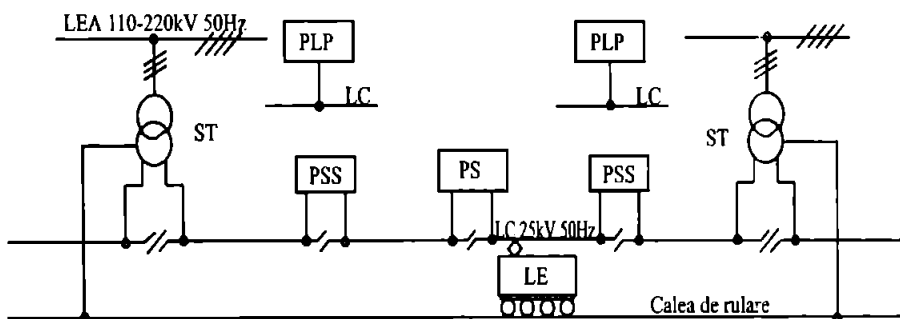


Fig2.5. Schema de principiu a sistemului de tracțiune în c.a. monofazat.

LEA: Linie electrică de alimentare; ST: Substație de tracțiune; PS: Post de sectionare;

PLP: Punct de legare în paralel; PSS: Punct de sectionare;

LC : Linia de contact; LE: Locomotivă electrică;

Avantajele principale ale sistemului de curent monofazat și $f = 50$ Hz, sunt :

- datorită tensiunii mari utilizată la linia de contact, distanța dintre substațiile de tracțiune este mare (50 - 80 km) și secțiunea firului de contact este mică (150 - 200 mm²), rezultând o construcție ușoară și consum redus de Cu față de sistemul de tracțiune în c.c.;

- substationile de traciune sint foarte simple in comparatie cu ale celorlalte sisteme; costul este redus iar intretinerea si exploatarea necesita de asemenea cheltuieli minime;
- sistemul de c.a. monofazat se incadreaza cu usurinta in retelele energetice ale sistemului energetic national;

Dezavantajul sistemului este influentarea liniilor aeriene de telecomunicatii amplasate de-a lungul caii ferate. De asemenea nesimetria indusa in sistemul trifazat de alimentare. Limitele admise sint date de valorile normalizate ale coeficientilor de nesimetrie in curent si tensiune, definiti ca raportul dintre componentele de secventa inversa si directa.

2.2.2 Realizarea protectiei la supratensiuni in instalatiile fixe de traciune feroviara

Din punct de vedere functional, constructiv si al exploatarei, instalatiile de traciune feroviara se impart in :

- material rulant electric (locomotive, rame electrice);
- instalatii fixe de traciune electrica, care la rindul lor cuprind :
 - instalatiile de alimentare cu energie electrica;
 - linia de contact;

In categoria instalatiilor de alimentare cu energie electrica intra substationile de traciune si celelalte instalatii care din punct de vedere functional, constructiv si al exploatarei sint similare cu acestea (PS, PSS, PLP), instalatiile anexe si telemecanizare, alte servicii proprii.

A. Substationile de traciune

Sint instalatii in care energia electrica primita de la sistemul trifazat de alimentare de 110 sau 220 kV este adaptata necesitatilor traciunii electrice si furnizata liniei de contact la tensiunea de 25 kV. Fiecare substatie cuprinde o parte de inalta tensiune (110 sau 220 kV), transformatoarele si autotransformatoarele coboritoare de tensiune si reglaj, si echipamentele de distributie a curentului de traciune. Functional si constructiv, toate substationile si celelalte instalatii similare au in componenta lor :

- Circuite primare; sint circuite de inalta tensiune (220, 110 sau 25 kV) care asigura circulatia puterii in substatie si livrarea ei consumatorului. Aici intra celulele si barele de 110 kV, transformatoarele de putere 110/27.5 kV, barele si fiderile de 25 kV si echipamentele auxiliare de masura si protectie (transformatoare de masura de U si I, descarcatoare pentru protectia la supratensiuni, instalatiile de compensare).
- circuitele secundare ce cuprind totalitatea circuitelor de comanda, protectie, masura, semnalizare si automatizare.

- serviciile auxiliare sînt acele instalații ce asigură alimentarea consumatorilor proprii.

Protecția la supratensiuni este realizată actualmente prin descărcătoare cu rezistență variabilă (SiC) de proveniență autohtonă sau străină, tipurile și caracteristicile lor principale [7], fiind prezentate în tabelul 2.2.

Tabel 2.2

Descărcătoare cu SiC utilizate în instalațiile fixe de tracțiune feroviară

Tipul	Tensiunea		Tens. de amorsare U_{am} [kV]		Tens. reziduală max. la 3000 A [kV]	Greutatea [kg]
	Nominală	Max.	50 Hz	impuls		
	[kV]	[kV]	[kV]	[kV]		
DRVS-25	25	29	52	76	75	98
DRVS-110	110	126	224	340	324	230

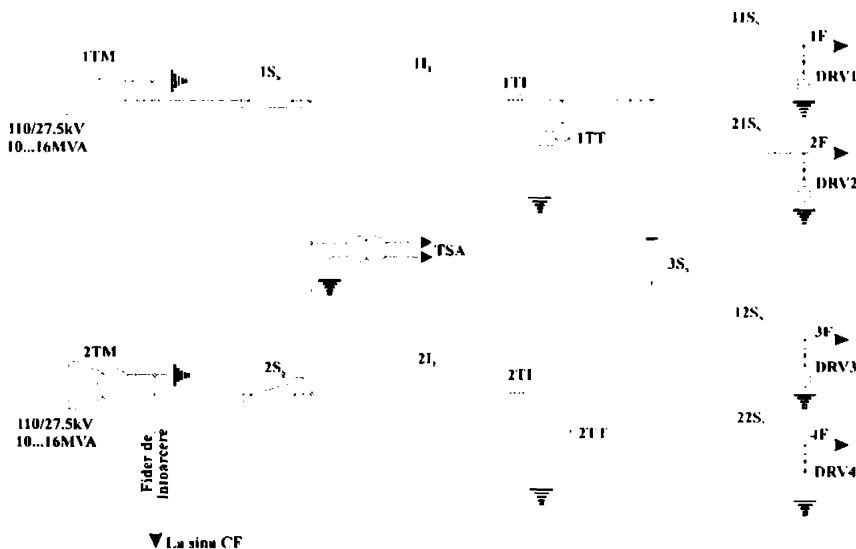


Fig. 2.6. Schema de principiu a circuitelor primare pentru o substație de tracțiune cu transformatoare monofazate legate simplu.

Descărcătoarele pentru nivelul tensiunii 25 kV se instalează la ieșirea din substație spre linia de contact, pentru a conduce la pământ undele de supratensiune care se pot propaga din linia de contact spre echipamentul din substație. Dispunerea lor este prezentată în fig. 2.6. Alimentarea liniei de contact este făcută pentru linie dublă prin 4 fideri aeriene 1F, 2F, 3F, 4F prevăzute cu separatoare de sarcină 11S_s, 21S_s, 11S_s, 22S_s, în acest fel reducând numărul de intreruptoare necesar, protecția la supratensiuni fiind asigurată de descărcătoarele DRV1 - DRV4.

UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI

NUMĂRUL: _____

NUMĂRUL: 621281

DATA: 30.06.2013

BUPT

In continuare vor fi prezentate si celelalte instalatii fixe de tractiune, echipamentele folosite pentru protectia la supratensiuni pentru nivelul de tensiune de 25 kV fiind cele prezentate in tabelul 2.2.

B. Posturile de sectionare

Posturile de sectionare sint instalatii electroenergetice care realizeaza sectionarea longitudinala a liniei la mijlocul intervalului dintre doua substatii de tractiune. Sectionarea este necesara din motive de exploatare cit si din motive de protectie. Din motive de exploatare sint necesare pentru scoaterea de sub tensiune in cazul lucrarilor de intretinere si reparatii a unor sectoare ale liniei de contact fara afectarea circulatiei. Pentru protejarea echipamentelor din aceste posturi contra supratensiunilor pe fidelele de intrare si iesire trebuiesc instalate descarcatoare asa cum se prezinta in figura 2.7.

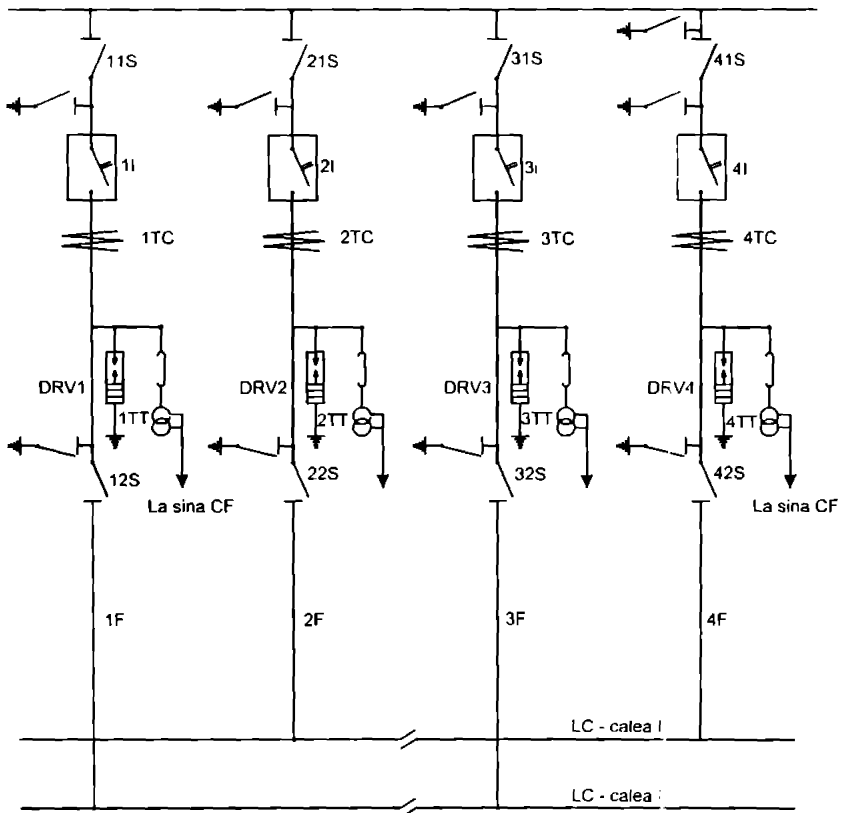


Fig.2.7. Schema principiala a circuitelor primare ale unui post de sectionare.

C. Posturi de subsectionare

Posturile de subsectionare realizeaza o sectionare longitudinala suplimentara a liniei de contact intre substatiiile si posturile de sectionare. Tot in aceste posturi se realizeaza si o legare in paralel a liniilor duble. Singurul considerent care justifica necesitatea acestor posturi este asigurarea unei exploatari comode a instalatiilor de tractiune, cu afectarea la minimum a circulatiei trenurilor.

Schema principala este prezentata in fig 2.8 si evidențiază similitudinea realizării protecției la supratensiuni cu posturile de sectionare prezentate anterior.

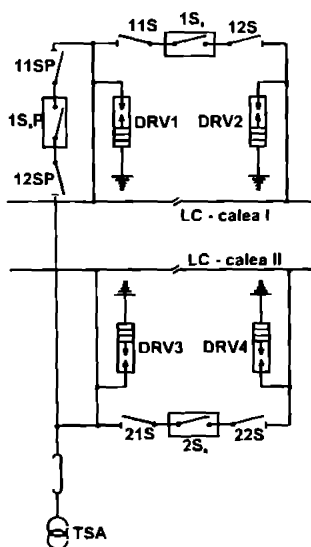


Fig.2.8. Schema principala a circuitului primar al unui post de subsectionare

D. Linia de contact

Linia de contact este protejata impotriva supratensiunilor prin montarea de-a lungul ei , printr-o sectorizare corespunzatoare (in general la intrarea si iesirea din gari) a descarcatoarelor tubulare. Acestea sint descarcatoare simple, fara rezistenta interioara, caracteristicile principale ale tipurilor utilizate in instalatiile fixe de tractiune fiind prezentate in tabelul 2.3. Pentru buna functionare ele trebuiesc montate in puncte ale instalatiei unde curentul de insotire, egal cu cel de scurtcircuit, se gaseste intre curentii de lucru ai descarcatorului. La aparitia unor curenti de scurtcircuit mai mari decat limita maxima se poate produce explozia descarcatorului (fapt care se si intimpla destul de des).

La curenti mici insa, nu poate degaja un volum de gaze suficient pentru intreruperea curentului de scurgere astfel ca instalatia va fi deconectata prin protectii.

Tabel 2.3

Descărcătoare tubulare cu fibră utilizate în instalațiile de tracțiune feroviară

Tipul	Tensiunea nominala	Curentul limita de insotire		Lungime interval disruptiv		Tensiune de Amorsare [kV_{max}]		Greutate kg
		Minim	Maxim	Interior	Exterior	Stare Uscată	Stare Umedă	
	kV_{ef}	kA_{ef}	kA_{ef}	mm	mm			
DTF-25 0,4-3	25	0,4	3	140	60	80	-	1,7
DTF-110 0,4-2,2	110	0,4	2,2	300	250	184	155	9
DTF-110 1,2-7	110	1,2	7	300	$\frac{250}{300}$	$\frac{184}{213}$	$\frac{165}{200}$	9,7

Din principiul lor de funcționare se poate concluziona ca aceste descarcatoare prezinta mari dezavantaje si este imperios necesara inlocuirea lor cu descarcatoare de concepie noua, asa cum sint, de exemplu, cele pe baza de oxizi metalici.

2.2.3. Protecția la supratensiuni a materialului rulant electric

Se va prezenta in cele ce urmeaza problemele legate de protecția la supratensiuni la cele 2 tipuri de locomotive electrice fabricate la noi in tara :

- LE 060 EA de 5100 kW;
- LE 040 EC de 3400 kW;

Construcția lor fiind asemanatoare, voi prezenta problemele de protecție numai pentru cea de 5100 kW.

Echipamentele folosite pentru protecție sint descarcatoarele cu rezistenta variabila din SiC. Protecția este realizata pe 3 nivele de tensiune in functie de grupul circuitelor protejate. Cel mai important este primul descarcator notat e5 in schema electrica din fig.2.9, dispus pe acoperisul locomotivei dupa pantograf si intreruptorul principal e6. Rolul lui este in principal pentru protecția la supratensiunile ce se propaga pe linia de contact si ar putea afecta transformatorul principal mT 1,3 si autotransformatorul de reglaj mT 1,1 de pe locomotiva. Nivelul tensiunii nominale pentru circuitul unde este instalat descarcatorul este 25 kV, tipul descarcatorului folosit actualmente fiind DRVT 33 fabricat la IEC Turda. XAD-33kV/10 kA, fabricat de ASEA, MWA-28kV/10 kA, fabricat de ABB.

Un alt circuit care se protejeaza prin descarcatorul eT 10 contra supratensiunilor este cel de incalzire , nivelul tensiunii fiind de 1500 V. Descarcatorul folosit este DRVT - 2.5kV/5kA - fabricat de IEC Turda, XCF 3 kV/5kA fabricat de ABB, XRES 618-E-2,5 kV/10 kA fabricat de ASEA. Pentru protectia serviciilor auxiliare ale locomotivei, la nivelul de tensiune 460 V , este dispus descarcatorul e 8.32, tot de fabricatie indigena DRVT 0.5 kV/2,5 kA, sau de fabricație ASEA XHF 380 V.

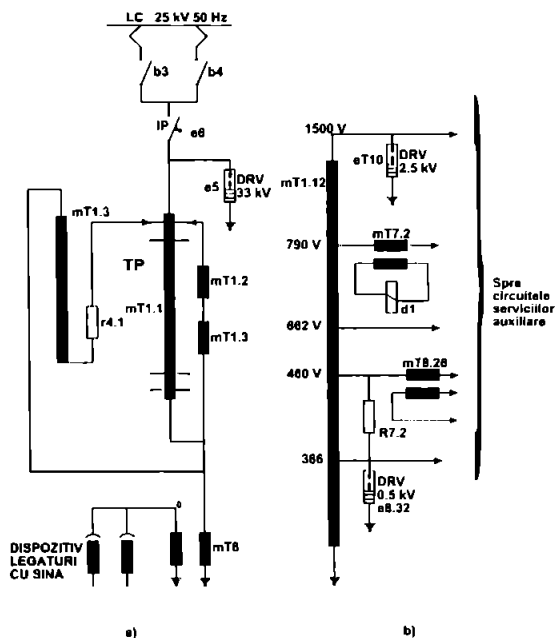


Fig.2.9 Circuitul de inalta tensiune si reglare al LE 060 EA de 5100 kW;

a). circuitul de inalta tensiune, b). circuitul serviciilor auxiliare

Tabelul 2.4.

Caracteristicile principale ale descarcatoarelor de pe locomotiva electrică

Tipul	U_n [kV]	I_n 8/20 μ s [kA]	$U_{amorsare}$ 100% la impuls (1,2/50 μ s) [kV _{max}]	U_{um} f=50 Hz [kV _{ef}]	U_{rec} la I_n 8/20 μ s [kV _{max}]
DRVT 0,5	0,5	2,5	1,5 (impus \leq 2)	0,846 – 0,99	1,7 (impus \leq 1,8)
DRVT 2,5	2,5	5	7,7 (impus \leq 13,5)	4,6	7,9 (impus \leq 8)
DRVT 33	33	10	86	45 – 58	-
XRES 618 E	2,5	15	-	4,5 -- 5,5	6
XAD 33S	33	10	85	45 ... 58	93

Din discuțiile avute cu factorii de decizie din exploatare, a rezultat că aceste descarcătoare creează probleme, în special datorită capacității mici de disipare a căldurii, în timpul acționării. Se impune deci o marire a curentului nominal de descarcare și a tensiunii de amorsare a eclatorului inseriat cu rezistența neliniară din SiC. Descarcătoarele cu oxizi metalici (ZnO) nu necesită eclatoare în serie datorită gradului mai ridicat de neliniaritate a caracteristicii $I(U)$, având și proprietăți mult mai bune de disipare a căldurii, fiind o soluție de viitor pentru înlocuirea descarcătoarelor existente.

În capitolul 2 am făcut o sinteză a problemei protecției la supratensiuni în instalațiile de tracțiune electrică urbană și feroviară.

Am prezentat principial schemele electrice ale instalațiilor electrice de tracțiune evidențind dispozitivele de protecție la supratensiuni existente actualmente în părțile fixe (substații de tracțiune) și cele mobile (materialul rulant electric, vagoanele motoare) ale sistemelor de tracțiune.

Am sintetizat deasemenea pentru variantele de protecție existente principalele date de catalog garantate de către producători, date ce vor constitui un punct de plecare în dimensionarea noilor tipuri de descărcătoare pe bază de oxizi metalici, de la care se așteaptă îmbunătățirea calității protecției la supratensiuni.

CAPITOLUL 3

CARACTERISTICILE ECHIPAMENTELOR ELECTRICE DE PROTECTIE LA SUPRATENSIUNI

In acest capitol se vor analiza natura si originile supratensiunilor ce se manifesta in instalatiile electrice de tractiune. Se vor prezenta apoi caracteristicile de functionare ale echipamentelor de protectie contra supratensiunilor.

3.1 Cauzele aparitiei supratensiunilor in instalatiile de tractiune

Izolatiile instalatiilor electrice aflata in serviciu poate fi supusa la supratensiuni care se pot clasifica in functie de amplitudinea si durata lor in :

- supratensiuni de origine atmosferica , cauzate de trazenet. Se caracterizeaza printr-o amplitudine mare si o durata redusa.
- supratensiuni de manevra, care apar de regula la schimbarea configuratiei retelelor, deci la inchiderea si deschiderea circuitelor. Nivelul lor este mai scazut dar durata depinde de caracteristicile retelei, putind atinge citeva ms.

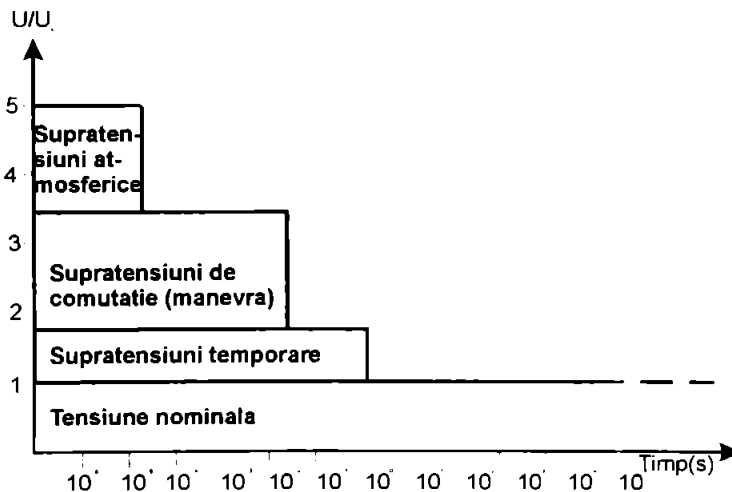


Fig.3.1. Clasificarea supratensiunilor electrice dupa ordinul de marime si durata.

- supratensiunile temporare, de amplitudine redusă dar de durată ce poate depăși o secundă. Aceste supratensiuni provin din defectele generate de puneri la pământ a liniei de contact, de reflexii multiple ale undelor de supratensiune rezultate în urma răscolurilor pantografelor pe linia de contact, etc.

O prezentare sintetică a acestei clasificări este făcută în figura 3.1.

3.1.1 Supratensiuni de origine atmosferică

Aceste supratensiuni sunt generate direct sau indirect de trăsnet. În cazul trăsnetelor directe, descărcarea se face direct asupra liniei, fiind caracterizată printr-o mare energie, manifestată prin curenți de intensitate mare de câteva zeci de kA și tensiuni variabile de sute de kV. Frecvența lor este foarte mare și pentru reprezentarea acestui tip de undă, obișnuit, normativele interne și internaționale [95], [96], prevăd o formă biexponențială pentru undă de tensiune și curent (fig.3.2.) cu următorii parametri :

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

Diverse statistici ale loviturilor de trăsnet evidențiază că majoritatea lor au valori de vârf de câțiva zeci de kA, un procent nesemnificativ (2-3%) depășind 100 kA ca valoare de vârf. În țara noastră descărcătoarele sunt testate cu unde de curent de șoc normalizate de 65 kA. Aceeași valoare este folosită și în Franța, de exemplu. În țări cu un factor de keramicitate mai mare cum ar fi de exemplu Canada, aceste încercări se fac cu unde cu valoarea de vârf de 100 kA.

Supratensiunile provocate de trăsnet pot apărea:

- fie direct, prin lovirea de către trăsnet a liniei,
- fie indirect, prin descărcarea în apropierea liniei în pământ sau structura metalică de susținere.

Unda de supratensiune se propagă într-o parte și în alta a punctului de impact, amortizându-se într-un timp ce depinde de caracteristicile liniei. Ea poate depăși valoarea de străpungere pentru primii izolatori întâlniți și dacă nu sunt montați descărcători, va avea loc o conturare în locurile respective. Trăsnetul poate de asemenea genera supratensiuni prin cuplajul capacitiv sau inductiv cu punctul de contact al liniei, supratensiunile numite în acest caz indirecte. În funcție de mecanismul apariției trăsnetului se disting două tipuri de lovituri de trăsnet : cele cu polaritate negativă în 80% din cazuri , pentru care propagarea descărcării este dinspre nori spre pământ, și cele cu polaritate pozitivă , provocate de terenul accidentat , amorțite dinspre formele de relief cu înălțime mare și nori. Incidenta acestora este mai scăzută, circa 20% , dar sunt cele mai periculoase pentru că sunt caracterizate de energii de descărcare importante.

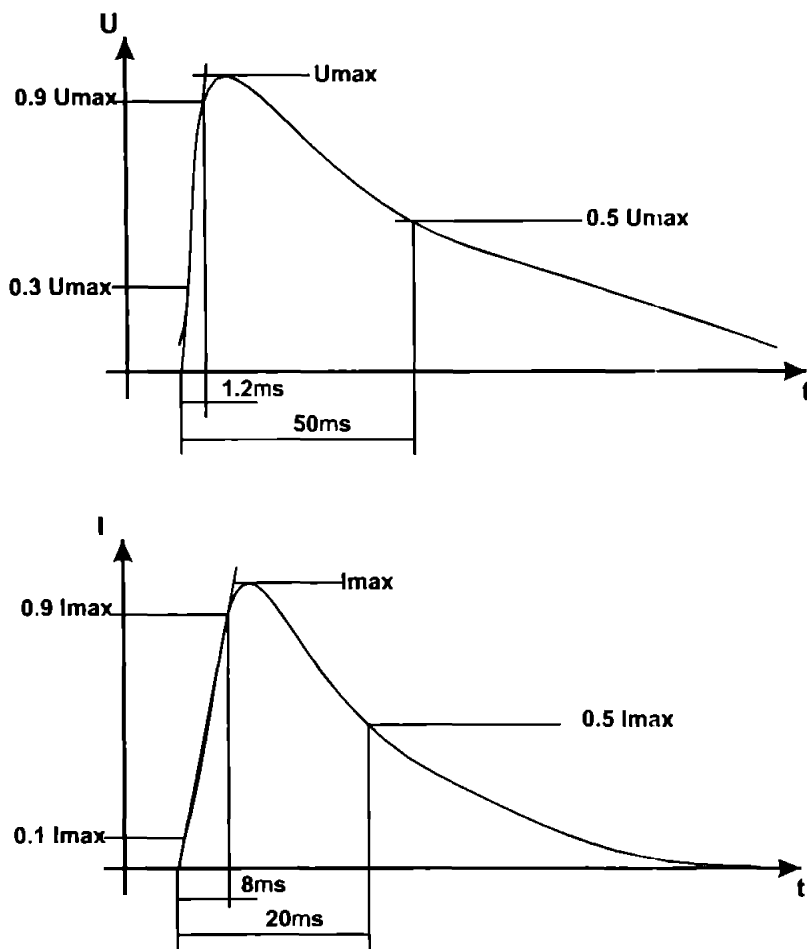


Fig.3.2. Forme de unda standardizate.

3.1.2 Supratensiuni de comutație

O modificare brusca a regimului stabilit într-o rețea electrică provoacă apariția fenomenelor tranzitorii. Acestea se manifestă prin niște supratensiuni cu front lent care este cuprins între $100 - 500 \mu\text{s}$.

Supratensiunile de comutație pot fi generate prin deschiderea unui aparat de comutație (întreruptor) sau protecție (sigurante fuzibile), întreruperea unor circuite cu inductivități mari etc. Ordinul de mărime al amplitudinii undei este de pînă la 3,5 ori

tensiunea nominală, dar durata lor, care depinde de caracteristicile rețelei, poate ajunge la câteva ms. aceste unde sunt normalizate ca unde 250/2500 μ s în tensiune și ca unde dreptunghiulare de zeci de μ s și de A intensitate și durata 2 ms pentru curent.

Supratensiunile de manevra sunt cauza unui număr mai mic de defecte decât cele produse de trăsnet, dar prin durata lor, în timp conduc la îmbătrânirea izolației electrice a instalației. De aceea este importantă și eliminarea lor. Totodată, trebuie acordată atenția cuvenită energiei înmagazinate în aceste supratensiuni care poate avea valori ridicate datorită duratei mai mari. Ele pot provoca fenomene de ambalare termică în dispozitivele de protecție (descărcătoare cu SiC sau cu oxizi metalici).

3.1.3 Supratensiuni temporare în instalațiile de tracțiune

Sunt perturbatiile cele mai numeroase, periculoase și greu de stăpinit, manifestându-se atât pe liniile de transport cît și de tracțiune. În majoritatea cazurilor sunt de amplitudine scăzută, de lungă durată și frecvență joasă. Ele sunt periculoase pentru că pot persista o perioadă lungă de timp și pot distruge echipamentele de protecție care nu sunt capabile să disipeze energia din aceste unde. Sunt generate în principal de diverse incidente ca :

- suprasarcini prelungite, corelate cu lipsa de putere în rețea;
- puneri la pământ accidentale;
- defecte de contact datorate ricoșeurilor pantografului pe linia de contact;
- întreruperi scurte ale alimentării la trecerea peste secțiuni de linie fără tensiune, fără deschiderea în prealabil a circuitului electric al vehiculului; acest fenomen se poate produce accidental sau normal în serviciu.
- variația bruscă a tensiunii de alimentare a liniei între 2 secțiuni de circuit, alimentate din 2 substații diferite și încărcate inegal.

În aceste condiții tensiunea poate fi afectată de supratensiuni temporare, prezentînd variații de amplitudine $1.7 U_n$ [40], [99]. Fiecare din incidentele amintite provoacă separat perturbatii. Dacă aceste incidente coincid în timp, ele pot produce supratensiuni de valoare ridicată, periculoase acestea depinzînd și de parametrii rețelei.

Aceste supratensiuni temporare care vehiculează energii importante, dar a căror amplitudine redusă nu provoacă funcționarea descărcătorului de protecție, sînt stînjenoare și greu de suprimate. Ele se pot propaga pe linie și pot pătrunde în substațiile de tracțiune putînd provoca distrugerea redresoarelor sau străpungerea izolației transformatoarelor și cablurilor. Este deci necesară limitarea supratensiunilor de orice origine și eliminarea lor cu operativitate.

3.2 Studiul comparativ al echipamentelor de protecție la supratensiuni

Protecția contra supratensiunilor constă în instalarea de echipamente al căror rol este evitarea distrugerii izolației instalației, de a reduce întreruperile în serviciu și de a limita riscul electrocutării datorate amorsării unui arc electric și de transmitere a supratensiunii la pământ sau altor rețele vecine.

O primă abordare a protecției contra acestor supratensiuni constă în instalarea de fire și inele de gardă, punerea la pământ a neutrului instalațiilor electrice. Aceste măsuri atenuează acțiunea supratensiunilor dar nu le înlătură. O altă abordare constă în amplasarea aparatelor de protecție serie sau paralel cu circuitul de protejat. Tehnica de protejare diferă în funcție de nivelul de tensiune, și de tipul tensiunii, curentul continuu, creând probleme suplimentare aparatelor de protecție. Protecția serie grupează filtrele LC cu acțiune frecvențială, disjunctoarele și fuzibilele active la scurtcircuit. Protecția la supratensiuni este în general o protecție de tip paralel care stabilește o legătură tranzitorie între instalația de protejat și pământ, fiind eficientă la fenomenele tranzitorii de durată redusă. Schema electrică a unei astfel de protecții este prezentată în fig.3.3.

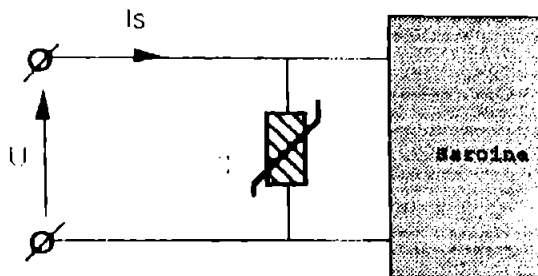


Fig.3.3 Schema electrică a protecției paralele

După cum am arătat în cap.2, în instalațiile de tracțiune există diverse tipuri de aparate de protecție la supratensiuni dispuse în instalațiile fixe sau materialul rulant de tracțiune, cu scopul bine precizat de asigurare a unei bune calități a serviciilor. Calitățile esențiale ce trebuie asigurate de un sistem de protecție paralelă pot fi sintetizate astfel:

- un timp de răspuns foarte redus, pentru evitarea deteriorării elementelor instalației;
- o tensiune de amorsaj și reziduală cât mai apropiată de tensiunea de serviciu;

- limitarea supratensiunilor la o valoare inferioară nivelului de protecție și chiar tensiunii de ținere a izolației instalației de protejat;
- capacitatea de absorbție a unor energii ridicate în timpul acționării la defecte;
- consum cit mai redus de energie în regimul permanent;
- stabilitate termică în timp;
- selectivitate;
- sensibilitate;
- fiabilitate;

Un dispozitiv de protecție care să satisfacă în totalitate aceste cerințe este practic imposibil de realizat dar există dispozitive care realizează unele dintre acestea. În cele ce urmează se va face o prezentare sintetică a echipamentelor de protecție la supratensiuni în ordinea cronologică a apariției lor, adică :

- eclatoare;
- descarcatoarele cu SiC asociate cu eclatoare;
- descarcatoare cu rezistență variabilă cu oxizi metalici (ZnO);

Ultimele enumerate mai sus , dau rezultate foarte bune în protecția rețelilor de energie electrică alternative, în ultima perioadă extinzându-se domeniul lor de aplicatie și în curent continuu.

3.2.1 Eclatoarele

Eclatorul este mijlocul cel mai simplu și mai ieftin de protecție la supratensiuni. Este compus în general din 2 electrozi, unul legat la elementul de protejat iar celălalt este legat la pământ. Distanța dintre electrozi este astfel reglată încât amorsajul să se producă pentru tensiuni mai mari decât nivelul de izolație. În absența perturbațiilor, practic el este perfect izolant. Caracteristica $I(U)$ a eclatorului [41], este prezentată în fig. 3.4.

Caracteristica are 3 zone :

- zona 1, de regim permanent, curentul este practic nul de ordinul a 10^{-9} A iar tensiunea de amorsare, variabilă, depinde de regimul dinamic (frontul unde);
- zona 2, este o zonă de tranziție unde eclatorul amorsează;
- zona 3 corespunde curentilor mari, unde eclatorul se comportă ca un scurtcircuit, tensiunea fiind de valoare redusă determinată de arcul electric care se amorsează între coarne.

Avantajul principal al eclatorilor este simplitatea și prețul de cost redus, simplitatea constructivă, de montare și reglaj al tensiunii de amorsare.

Are însă și multe dezavantaje dintre care amintesc:

- incertitudinea asupra tensiunii și timpului de amorsare, care depind de condițiile de mediu și de panta supratensiunii;
- curentul de însoțire nu poate fi stins totdeauna, punind linia la pământ, ceea ce va produce acționarea protecțiilor la scurtcircuit, deci implicit o discontinuitate în alimentare;
- amorsajul eclatorului se poate produce și din alte cauze decât supratensiunile, de exemplu ramuri de copaci, pasări gheata, etc...
- posibilitatea depășirii nivelului de protecție la supratensiuni cu front foarte rapid.
- funcționarea eclatorului poate provoca unde tăiate cu front abrupt ce pot antrena străpungeri în izolația bobinajelor și pot fi sursa altor supratensiuni prin reflexie.

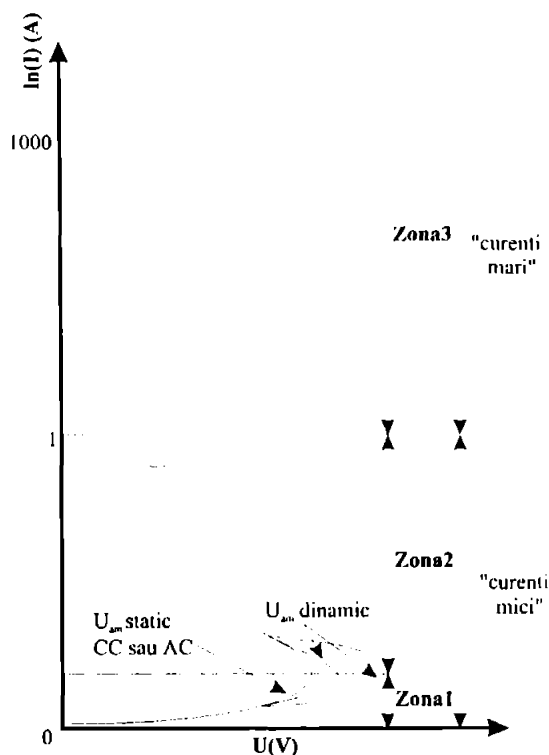


Fig. 3.4 Caracteristica $I(U)$ a eclatorilor.

Pentru remedierea acestor neajunsuri au fost create alte dispozitive cu complexitate ridicată, numite descărcătoare.

3.2.2. Descarcatoarele cu SiC și eclatoare în serie

Descarcatoarele sînt aparate care conduc la pămînt ca și eclatoarele, energia din unda de supratensiune, dar spre deosebire de acestea intrerupe și curentul de însoțire grație proprietăților neliniare ale rezistenței de SiC [41],

Curentul de însoțire este curentul ce traversează rezistența neliniară după ce unda de supratensiune a fost scursă la pămînt. Rezistența neliniară este formată din granule de SiC aglomerate cu ajutorul unui liant, presată sub formă de disc. Coeficientul de neliniaritate α este cuprins între 3 și 6. În fig. 3.5 se prezintă caracteristica $U(I)$ a descarcatorului. Atunci cînd tensiunea depășește nivelul de amorsare al eclatorului, acesta devine conductor (zona 1), curentul de scurgere trecînd prin rezistența variabilă a cărei valoare (zona 2) scade rapid cu tensiunea la borne. O dată ce tensiunea revine la valoarea normală, rezistența recapătă o valoare ridicată, limitînd curentul de însoțire, la o valoare suficient de mică (zona 3) pentru ca arcul amorsat la eclator să se stingă.

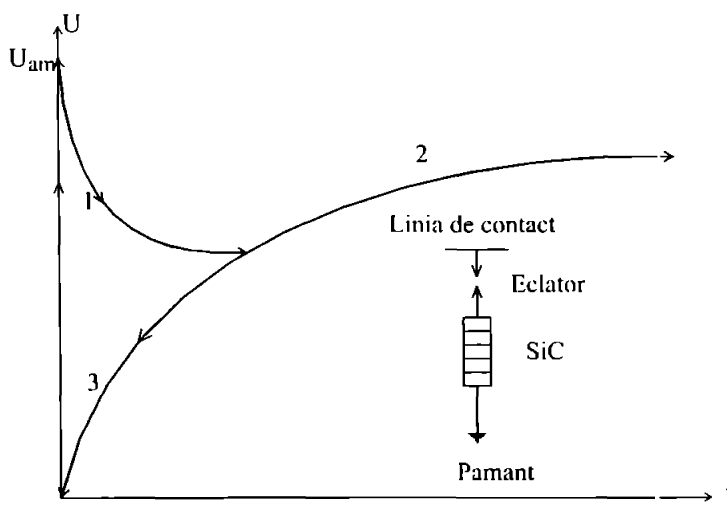


Fig.3.5 Caracteristica $U(I)$ a unui descarcator cu SiC și eclator în serie.

Avantajele pe care le aduc în raport cu eclatoarele sînt :

- insensibilitatea la condițiile de mediu, datorită faptului că rezistența variabilă și eclatorul se află într-o încălț din porțelan.
- dispersia mai redusă a tensiunilor de amorsaj ale eclatorului;
- stingerea mai rapidă și ușoară a arcului de amorsaj de la eclator;

- menținerea unei tensiuni reziduale la bornele descarcatorului de o valoare redusă dar diferită de zero după amorsare, evita propagarea unor unde cu front abrupt în rețea.

Dezavantajele sunt :

- costul mai ridicat decât al eclatorilor;
- instabilitatea termică , chiar pentru valori reduse ale curentului (de la tensiunea de serviciu), ceea ce presupune totdeauna asocierea lor cu un eclator.
- complexitate constructivă.

În curent continuu există varianta de protecție la care eclatorul este înlocuit de un condensator de câțiva μF . Timpul de răspuns este scurt această variantă fiind eficientă pentru absorbirea supratensiunilor de durată redusă, neputând face față la cele care vehiculează cantități mari de energie.

3.2.3. Descarcatoarele pe baza de ZnO

Descarcatoarele echipate cu varistor din ZnO au un curent de fugă foarte scăzut, datorită acestui fapt nemaifiind necesar un eclator în serie cu rezistență variabilă. Pentru tensiuni înalte descarcatorul este obținut prin inserierea mai multor pastile de ZnO , eventual cu distanțoare metalice conductoare pentru o mai bună disipare a căldurii. O prezentare amănunțită a acestor tipuri de descarcatoare va fi făcută în capitolul următor. Se amintesc aici câteva din avantajele pe care le aduc față de descarcatoarele clasice cu SiC [62], [63].

- nivelul de protecție asigurat de aceste descarcatoare este mai scăzut;
- curentul de fugă este practic nul, de aici rezultând o bună stabilitate termică;
- coeficientul de neliniaritate este cu un ordin de mărime mai mare decât la cele clasice (obișnuit 25 – 70).
- timpul de răspuns foarte scurt, de ordinul a 25 ns.
- capacitatea de absorbție a energiei foarte ridicată, superioară valorii de $150\text{J}/\text{cm}^3$.

Pentru evidențierea proprietăților acestor aparate de protecție voi prezenta în mod sintetic în tabelul 3.1 un studiu comparativ al proprietăților lor.

Pentru a concluziona, comparând proprietățile tuturor acestor aparate de protecție la supratensiuni cu cerințele protecției ideale, se constată că varistoarele cu ZnO îndeplinesc cele mai multe din aceste cerințe.

În acest capitol am făcut o prezentare sintetică a supratensiunilor ce pot apărea în instalațiile de tracțiune, reprezentarea lor standardizată în funcție de cauzele care au generat apariția lor. Am făcut apoi o analiză critică a echipamentelor de protecție la supratensiuni, evidențiind avantajele și dezavantajele fiecăruia.

Comparație a proprietăților dispozitivelor de protecție la supratensiuni
Tabelul 3.1.

	Dispozitiv ideal	Eclator	DRV cu SiC	U_A descărcătoare cu ZnO
Curent de scurgere la U_n	nul	nul	ridicat	scăzut
Nivel de protecție (Np)	reduc	tensiunea de amorțaj mare \Rightarrow nivel de protecție ridicat	ridicat	reduc
Capacitate de absorbție a energiei	ridicată	ridicată	scăzută	ridicată
Timp de răspuns	rapid	lent ($\approx 10^{-6}$ s)	mediu ($< 10^{-8}$ s)	rapid ($< 10^{-9}$ s)
Gama de capacitare [pF]	-	1 – 10 pF	-	12 μ F - 50 μ F
α (determinat între 1 și 10 mA)	-	-	3 – 6	25 – 70
Pret de cost	-	scăzut	mare	mediu
Domenii de aplicare	-	joasă și medie tensiune cu grad ridicat de răspândire	medie și înaltă tensiune, circuite de forță, cu domenii de aplicare în restrângere	joasă, medie și înaltă tensiune cu o arde de răspândire în expansiune
Complexitate	-	reduc	ridicată	medie

CAPITOLUL 4

TEHNOLOGIA DE FABRICATIE SI PROCESELE FIZICE ALE CONDUCTIEI IN VARISTOARELE CU ZnO

La modul general, varistorul este o componenta electrica a carei rezistenta variaza cu modificarea unui parametru exterior impus. In cele ce urmeaza prin varistor vom delini componenta a carei rezistenta electrica variaza neliniar cu tensiunea aplicata la bornele ei. Varistoarele pe bază de ZnO au această proprietate, alte elemente cu astfel de proprietăți fiind varistoarele cu SiC, diodele cu Si, primele prezentând un net avantaj în ce privește raportul calitate/preț/element.

Proprietățile neliniare ale varistoarelor cu ZnO au fost puse în evidență pentru prima dată în U.R.S.S. în 1958 de către M.S.Kosman și I.A.Gesse. Afirmarea lor ca materiale pentru electrotehnică a început însă în 1969 în Japonia, M.Matsuoka fiind unul dintre cercetătorii cu cele mai mari contribuții la studiul lor. Marele interes comercial stârmit de acest material este evidențiat de numărul mare de brevete internaționale depuse (peste 6000) și de domeniile de utilizare, cel mai important fiind acela al protecției la supratensiuni. Dintre cei mai importanți fabricanți mondiali de varistoare se pot aminti: Mac Graw, General Electric și Joslyn în USA, Matsushita și Meidensha în Japonia, Semens și BBC în Germania, Power Development în Anglia, ASEA în Suedia, LCC Thompson și Soulee în Franța, Iskra în Slovenia.

În țară nu există încă un producător industrial, la ICPE București în colaborare cu Universitatea Politehnica București fiind făcuți primii pași în ce privește studiul și producția experimentală în condiții de laborator.

4.1 Caracteristica de protecție I(U) a varistoarelor cu ZnO

Dependenta dintre curentul și tensiunea la bornele unui varistor este exprimata de relatia :

$$J = K \cdot E^n \quad (4.1)$$

in care : J - densitatea curentului I prin varistor;
 E - intensitatea cimpului electric aplicat la bornele varistorului;
 K - constante ce depinde de geometria si modul de realizare a varistorului;
 α coeficientul de neliniaritate, valoare numerica superioara unitatii,
 iar reprezentarea grafica a acestei dependente este facuta in fig. 4.1.,

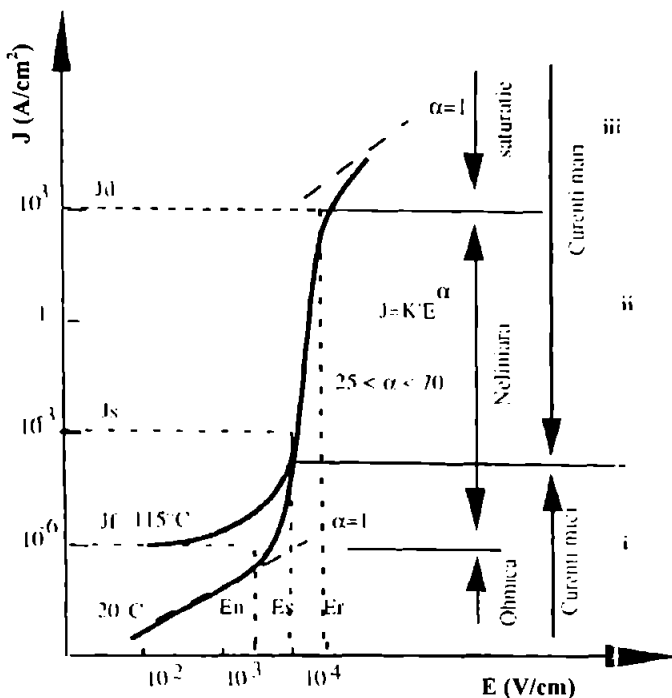


Fig. 4.1 Caracteristica J(E) a unui varistor cu ZnO

Caracteristica curent tensiune prezinta mai multe zone, fiecare fiind caracterizata prin proprietati de conductie particulare [2],[15],[26],[42].

• **i Zona ohmica**

Corespunde zonei de curenti slabi, dependenti de tensiune printr-o relatie ohmica liniara. Rezistivitatea electrica a varistorului in aceste zone este $10^4 - 10^{10} \Omega\text{m}$. In aceasta zona, in care se situeaza si tensiunea nominala a instalatiei de protejat, curentul este determinat de conductia termica dupa cum se observa si din caracteristica J(E) ridicata pentru

temperaturi diferite ale mediului ambiant. Densitatea de curent este dată [14] sau [88] de expresiile:

$$J = J_0 \cdot e^{\frac{\sqrt{\epsilon \cdot q_e^3} (4\pi\epsilon)^{-1} \Phi(U)}{k \cdot T}} \quad (4.2)$$

$$J = A(U) \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-q_e \Phi(U)}{k \cdot T}} \quad (4.2')$$

unde :

- J_0 - constanta de material ce depinde de geometria rețelei cristaline;
- E - cimpul electric aplicat;
- q_e - sarcina electronului;
- ϵ - permitivitatea dielectrică absolută;
- k - constanta lui Boltzman;
- T - temperatura absolută ;
- $\Phi(U)$ - înalțimea barierei de potențial;
- $A(U)$ - constanta de radiație a lui Richardson ;

Temperaturile ridicate ale mediului ambiant în care este plasat varistorul favorizează depășirea mai ușoară a barierei de potențial de către electroni liberi, ceea ce duce la creșterea curentului, fapt relevat de fig. 4.1 pentru caracteristica corespunzătoare unei temperaturi a mediului ambiant de 115°C.

• ii Zona de funcționare

În această zonă se manifestă efectul de varistor relativ (4.1) descriind această zonă, valorile pentru coeficientul de neliniaritate α fiind obișnuit între 25 și 70. Tensiunea de prag (U_S), una din marimile caracteristice ale varistorului, se situează în această zonă. Aceasta este definită în mod convențional și se măsoară în mod obișnuit pentru o densitate de curent de $j = 1 \text{ mA/cm}^2$, sau în general pentru ușurința măsurătorii la un curent de 1 mA. Valoarea sa nu depinde practic de temperatura așa după cum se constată și din caracteristica $I(U)$. Valoarea lui α este variabilă în 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. Aceste puncte sunt de regulă cele corespunzătoare curentilor de 1 și 10 mA. În această zonă conductia se face prin efect Tunnel conform unor autori [47] sau prin mecanismul termoelectronic conform altora [14], teoriile referitoare la această problemă urmînd a fi prezentate ulterior.

- **iii Zona de saturatie**

Corespunde curenților ridicati (cîtiva kA), deci atunci cînd prin varistor trece curentul de descarcare. Caracteristica devine ohmică, curentul fiind limitat numai de rezistența granulelor de ZnO, rezistivitatea în această zonă fiind de ordinul $0.5 \cdot 10^{-2} \Omega \text{m}$. [47], caracteristica $I(U)$ liniarizîndu-se, în mod asemanător cu cea a materialelor conductoare electrice.

Tensiunea de serviciu permanent a varistorului trebuie să fie situată în zona I. Valoarea de vîrf a componentei rezistive, responsabilă de încălzirea lui trebuie să fie inferioară valorii de 1 mA, fiind predominantă componenta capacitivă, deci varistorul are caracteristici apropiate de ale materialelor izolante. Distribuția tensiunii depinde de valoarea capacității fiecărei granule de ZnO și a capacității parazite dintre ele.

Calitățile de element de protecție ale varistorului sînt asigurate în zonele ii și iii.

În zonele de funcționare ale varistorului (i, ii), repartiția potențialului, la nivel microscopic, pe varistoarele elementare depinde esențial de rezistivitatea fiecărei granule, de ZnO, capacitățile și temperatura avînd un rol neglijabil. Protejarea circuitului este cu atît mai eficientă cu cît coeficientul de neliniaritate α are o valoare mai mare. Spre deosebire de cele cu SiC la care $\alpha = 3 - 6$, varistoarele cu ZnO au obisnuit un $\alpha = 25 - 70$ și un curent de scurgere (curent ce corespunde tensiunii de serviciu), mult mai scăzut decît celelalte.

Obținerea acestor performanțe depinde foarte mult de compoziția și modul de fabricație al pastilei [27],[77]. Conductia neliniară a ceramicelor pe baza de ZnO a făcut obiectul multor studii, dezvoltarea modelelor teoretice și interpretarea corectă a fenomenelor observate vor putea furniza informațiile necesare optimizării cu finete a caracteristicii $I(U)$, îmbunătățirea performanțelor de protecție și creșterea duratei de viață a varistoarelor. Geometria neregulată a granulelor de ZnO, a îndemnat spre o modelare cît mai simplă a structurii, ipotezele de simulare propuse [2],[17] neconducînd însă la rezultate concludente cantitativ, acestea avînd mai mult o valoare teoretică. Lămurirea mecanismelor de conducție și de degradare a varistoarelor rămîne în continuare o problemă de actualitate.

4.2 Tehnologia de fabricație a varistoarelor cu ZnO

La ora actuală există mai multe procedee chimice pentru elaborarea varistoarelor pe baza de ZnO. Pentru scopurile urmărite în lucrare am adoptat metodele clasice de fabricare a ceramicelor, în scopul asimilării producerii lor în țară cu eforturi financiare minime. Înainte de

a descrie tehnologia de fabricatie, precizez proprietatile care se doresc a fi asigurate de pastilele ce se vor obtine :

- tensiune de prag ridicata pentru buna comportare la supratensiunile tranzitorii;
- o buna rezistenta la solicitarile electrice, termice, chimice sau combinate;

Tensiunea de prag depinde in mod esential de dimensiunea granulatiei pulberii de oxid metalic. Este deci necesar un control strict al dimensiunii medii a pulberii. intervine apoi reteta, adica proportia in care sint amestecati in afara de ZnO si alti oxizi, fiecare avind o influenta si un rol bine definit [17]. Un alt parametru care influenteaza produsul final este tratamentul termic din timpul procesului de fabricatie. În continuare voi prezenta procesul tehnologic pe care l-am utilizat în cadrul Laboratorului de Genie Electric al Universității Paul Sabatier din Toulouse (LGET) pentru fabricația varistoarelor necesare aplicației propuse.

4.2.1 Operatiile procesului de fabricatie

Oxizii utilizati se prezinta sub forma de pudre cristaline. Dimensiunile medii ale cristalelor sint variabile, in functie de tipul oxizilor, dar ramin inferioare valorii de 10 μm cristalele de ZnO fiind baza compozitiei. Etapele fabricatiei sint prezentate in diagrama din fig.4.2.

Cântarirea

Cintarirea componentelor este efectuata cu ajutorul unei balante (Sartorius si Mettler) cu precizia 0.1 mg.

Macinarea

Dupa cintarire, oxizii sint macinati si amestecati intr-un cilindru cu bile. Aceasta operatie de amestecare se face in faza lichida prin adaugarea de apa distilata si agent de polimerizare. Aceasta operatie dureaza in jur de 30 h.

Uscarea

Pasta obtinuta in etapa precedenta este uscata prin expunere deasupra unei placi incalzite, sau intr-o etuva, pina la evaporarea completa a apei, dupa aceasta operatie, pudra rezultata care are o granulatie neuniforma trebuie din nou macinata dar de aceasta data se face o macinare uscata care dureaza citeva ore.

Cernerea

Dupa macinarea uscata se face cernerea cu scopul de a separa granulele din pudra cu o dimensiune mai mare de $200\mu\text{m}$. Aceasta are ca principal scop facilitarea umplerii formelor si apoi presarea pudrei in aceste forme.

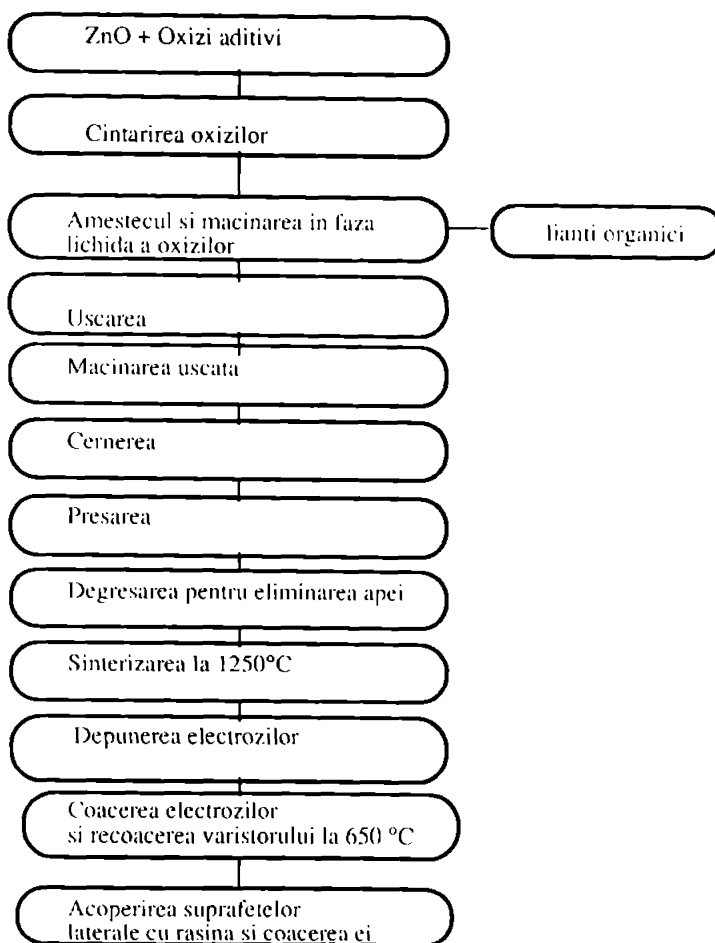


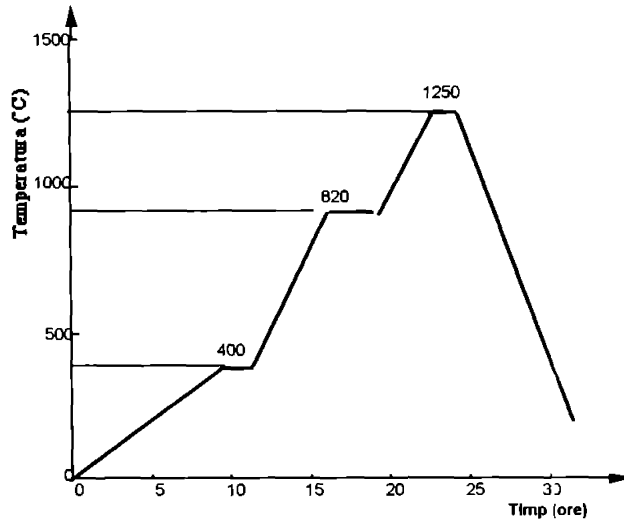
Fig.4.2 Etapele fabricatiei varistoarelor cu ZnO

Presarea

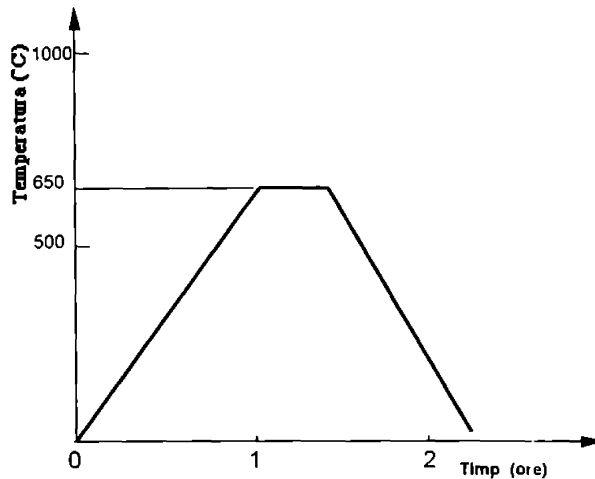
Pudra este turnata intr-o forma cilindrica si apoi presata la 400 - 640 barr. Dimensiunile pastilelor ce se vor obtine sunt stabilite in functie de curentul nominal (diametrul) și tensiunea de prag (înălțimea pastilei) ce se doresc a fi asigurate.

Sinterizarea

Aceasta este operatia cea mai importanta, fiindca de parametrii ciclului termic vor depinde foarte mult reactiile fizico-chimice intre diferitele elemente constitutive, structura, de care vor depinde proprietatile varistorului. Diagrama de timp a ciclului de sinterizare este prezentata in fig.4.3.



a)



b)

Fig.4.3. a) Ciclu termic de sinterizare ; b) Ciclu termic de reccazere

Tratamentul termic este cea mai importanta operatie in fabricarea varistorului. In timpul acestei operatii au loc reactii fizico-chimice complexe intre elementele constituite ale pulberii de oxizi, in urma acestor reactii rezultind structura de care vor depinde proprietatile materialului rezultat. In prima faza are loc o crestere cu un gradient mic a temperaturii (in 10 ore) pina la 400 °C temperatura care se mentine constanta timp de 3 ore , in aceasta faza avind loc eliminarea oricaror urme de apa. Urmeaza apoi cresterea pina la 840 °C cu un palier de cel puțin 1 ora la aceasta temperatura. In aceasta faza se realizează structura cristalină a materialului. In ultima faza are loc din nou o crestere la 1250 °C si apoi racirea lenta pina la temperatura mediului ambiant. Datorită numărului mare de constituanți și etapelor procesului termic și a temperaturilor ridicate, cunoașterea fizico-chimică a proceselor din interiorul varistorului este încă imperfectă.

In urma acestei operatii se constata o reducere a volumului initial al pastilei cu circa 20%, deci o crestere a densitatii spre densitatea teoretica de $5.8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Densitatea ajunge la 98-99 % din aceasta valoare teoretica. Acest fapt va fi evidentiat si prin dimensiunea finala a pastilei (diametrul scade de la 44 la 39 mm la toate seriile fabricate, înălțimea pastilei fiind si ea mai scazuta cu aproximativ 15 %).

Depunerea electrozilor

Dupa sinterizarea esantioanelor, pe cele 2 fete ale pastilei cilindrice se depune prin serigrafie sau cu pensula o pasta conductoare pe baza de Ag sau Al, aceste suprafete constituind electrozii pastilei.

Recoacerea varistorului

Pentru ca pasta de pe suprafetele frontale sa devina metalica si deci sa aiba loc formarea electrozilor pastilei, este necesar un tratament termic de recoacere la peste 600°C, prezentat in fig 4.3 b.

Acoperirea suprafetei laterale cu rasina

Pe periferia esantionului se depune o rasina izolanta. Aceasta captusire se face cu scopul de a proteja varistorul contra actiunii mediului ambiant, a agresunilor chimice dar si pentru evitarea conturnarilor la socurile de curent si tensiune de mare amplitudine. In prealabil varistorul se incalzeste la 220°C timp de 2-3 ore, pentru ca rasina sa adere perfect si sa polimerizeze pe suprafata laterala.

Dupa aceasta operatie varistoarele pot fi supuse testelor de caracterizare si verificare a calitatii, teste ce vor fi prezentate in cap 6 si 7 al lucrarii.

4.2.2 Microstructura varistoarelor cu ZnO

Varistoarele prezintă o structură policristalină compusă din granule de ZnO separate de spații intergranulare. Structura sa văzută la un microscop electronic este prezentată în fig. 4.4.



Fig.4.4 Microstructura unei pastile de ZnO văzută la microscopul electronic.

Structura seamănă cu a unui zid de piatră, în care granulele de ZnO sunt „pietrele”, iar ceilalți oxizi metalici realizează „mortarul” care este responsabil de caracterul neliniar al varistorului. Observațiile la microscop au evidențiat trei părți componente în structura internă a varistorului [27],[61]:

- granulele de ZnO a căror dimensiune variază în funcție de tratamentul termic și compoziția chimică, obișnuit fiind în jurul a 20 μm.
- stratul intergranular bogat în Bi_2O_3 a căror dimensiune variază adesea în funcție de tratamentul termic între $10^{-3} - 10^{-1}$ μm,
- 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 donoșilor. Electronii de conducție sunt pe de o parte de natură intrinsecă, legați de atomii interstițiali, iar pe de altă parte de natură extrinsecă datorati dopajului cu Co și Mn. Caracteristicile fizice ale rețelei cristaline sînt urmatoarele:

- rețea hexagonală;
- constantele rețelei $a = 3.24 \text{ \AA}$; $c = 5.19 \text{ \AA}$; $c/a = 1.6$;
- masa molară 81.37 g/mol ;
- masa volumică $5.7 \pm 0.08 \text{ g/cm}^3$;
- căldura specifică 0.5 J/g la 300°K ;
- temperatura de topire $2300 \text{ }^\circ\text{K}$;
- lărgimea benzii interzise 3.2 V ;
- densitatea atomilor donori 10^{17} cm^{-3} ;
- mobilitatea electronică $200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$;
- rezistivitatea $0.5 \text{ }\Omega\text{cm}$.

Izolatiă granulelor de ZnO se comportă însă 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 aprox. 3 V . Numărul acestor spații intergranulare vor determina tensiunea de prag U_s . Această structură va determina mecanismele de conducție și degradare care vor fi prezentate ulterior. Schema electrică echivalentă pentru o microvaristă (o granulă de ZnO înconjurată de spațiul izolant intergranular) la nivel microscopic se poate reprezenta ca în fig.4.5., o schema electrică globală rezultînd prin considerarea legării acestora în serie și paralel [76], model des adoptat în literatura specifică domeniului .

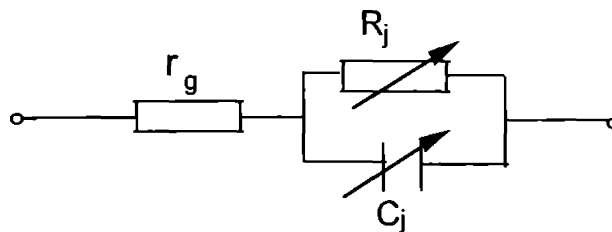


Fig.4.5 Schema electrică a microvaristăței de la nivelul microscopic.

Microstructura corespunzătoare acestui model , alți cea reală și cea idealizată sînt prezentate în fig.4.6. Pe figura sînt marcate și dimensiunile geometrice cele mai importante pentru varistor.

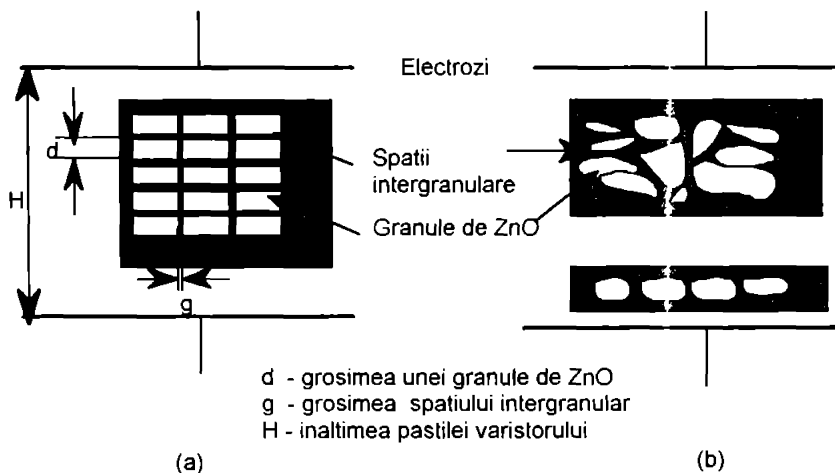


Fig.4.6 Microstructura unui varistor cu ZnO; a) microstructura teoretică idealizată; b) microstructura reală

Așa cum indică și denumirea lor, varistoarele au în componența lor în cea mai mare proporție ZnO la care se adaugă un număr de alți oxizi aditivi, fiecare având un anumit rol. O formulă clasică de compoziție este prezentată în tabelul 4.1 :

Tabel 4.1
Compoziția varistoarelor cu ZnO

Componenta	Compoz.procentuala [% molare]	Cantitate [g]
ZnO	97.0	9,117
Bi ₂ O ₃	0.5	0.269
MnO ₂	0.5	0.050
Co ₃ O ₂	0.5	0.139
Cr ₂ O ₃	0.5	0.088
Sb ₂ O ₃	1.0	0.337
Total	100	10

În afara de acești oxizi se mai folosesc și alții, în tabelul 4.2 fiind date câteva din proprietățile fizice ale acestora, de asemenea compoziția chimică diferind de la un producător la altul.

Tabel 4.2
Caracteristicile fizice ale oxizilor metalici din componenta varistoarelor

Formula moleculară a componentei	Masa molară [g]	Densitatea [g/cm^3]	Tipul Rețelei Culoarea la 25 °C	Temperatura de topire [°C]
ZnO	81.37	5.70	hexagonală alba	2000
Bi_2O_3	496.96	8.90	romboedrică galbenă	820
MnO_2	86.94	5.03	romboedrică neagră	535
Co_3O_2	240.80	6.07	cubică neagră	1935
Cr_2O_3	151.99	5.21	hexagonală verde	2435
Sb_2O_3	291.50	5.20	cubică alba	656
TiO_2	79.89	4.26	romboedrică alba	1850

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

Tensiunea de prag (U_S) a varistantei depinde de numărul de straturi intergranulare și deci de dimensiunile granulelor de ZnO. De asemenea coeficientul de neliniaritate α și curentul de scurgere prin varistori la tensiunea de serviciu (I_1) sunt influențati de proporția oxizilor suplimentari folosiți ca lianți.

4.2.3 Rolul oxizilor aditivi și influența lor asupra proprietăților electrice ale varistoarelor

În interiorul varistorului conducția electrică este determinată de barierele de potențial care se formează la nivelul spațiilor intergranulare. Pentru ca aceste bariere să existe este necesar ZnO ca element principal și alți oxizi aditivi, unii cu rol de dopanți ai ZnO prin difuzie, iar alții cu rol în formarea structurii rețelei cristaline a materialului.

Dupa cum s-a constatat din reteta de compozitie a varistorului, componenta principala este oxidul de zinc (ZnO). Acesta se prezinta sub forma de pulbere cristalizata de culoare alba, puritatea sa ajungind pina la 99%. Impuritatile cele mai importante sint sulfatii (0.01%) arsenic (0.005%), plumb (0.005%), azot (0.001%), clor (0.001%), calciu (0.001%). Aditivii cei mai importanti sint oxizii amintiti in tabelul 4.2 pe linga acestia influente diverse asupra caracteristicilor avind-o si alti dopanti ca : Cr, Sb, Ba, Ni, Ti, Al, Li. [17]. Iata pe scurt rolul fiecaruia:

- Bi_2O_3 joacă un rol esențial în manifestarea efectului de varistor, adică a neliniarității pronunțate [67]. Observațiile la microscopul electronic au arătat că Bi se localizează între granulele conductoare electric de ZnO asigurând o izolație electrică eficace. Concentrația de Bi_2O_3 in pulberea initiala influenteaza valoarea curentului de scurgere (I_r) și a exponentului de neliniaritate α asa cum se constata si din fig.4.7.

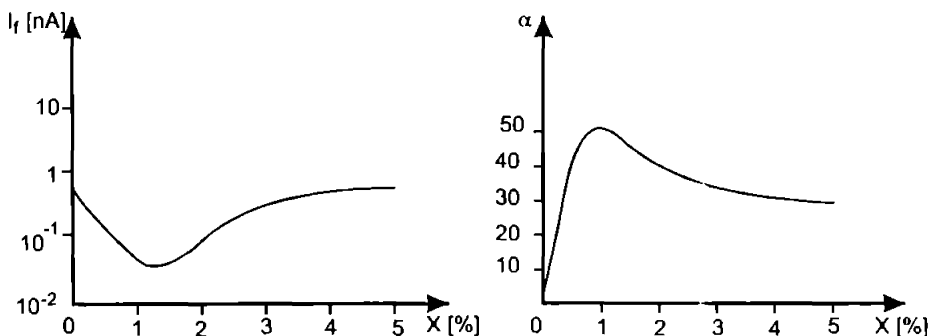


Fig. 4.7 Influenta proportiei de $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x$, in compozitia $(\text{ZnO})_{96-x} \cdot (\text{Mn}_2\text{O}_3)_1 \cdot (\text{Co}_2\text{O}_3)_1 \cdot (\text{Sb}_2\text{O}_3)_2$ asupra I_r și α .

- Co_3O_4 sau MnO_2 - sint oxizi indispensabili obtinerii unei caracteristici puternic neliniare. Rolul lor este de a dopa granulele de ZnO si deci de a deplasa nivelul Fermi, modificind structura sarcinii spatiale, facilitind micșorarea inaltimei barierei de potential.
- Sb_2O_3 - oxidul de stibiu are rolul de a fixa Bi_2O_3 la temperaturi inalte si astfel limiteaza cresterea dimensiunii granulelor de ZnO. In acest fel este fixata tensiunea de prag U_s pentru o anumita inaltime a pastilei varistorului.

Adaugarea altor aditivi nu modifica microstructura electronica a benzilor de energie, dar contribuie la ameliorarea caracteristicilor electrice ale materialului obtinut. Astfel, daca

oxizii de Sb si Cr limiteaza dimensiunile granulelor, Ti sau Si favorizeaza cresterea lor. Alumiul prin nitratii si oxizii sai diminueaza rezistivitatea materialului pe cind Li are un efect contrar. O sistematizare a acestor influente asupra proprietatilor fizico-chimice si electrice este facuta in tabelul 4.3.

Tabel 4.3
Influenta oxizilor aditivi asupra proprietatilor fizice si electrice ale varistoarelor

Elementul	Proprietati fizice	Proprietati electrice
Bi	- permite sinterizarea in faza lichida - concentratie ridicata a dopantilor in spatiul intergranul. - Aderenta la oxiziide Al.	influenta curentul de scurgere in sensul maririi lui.
Co		dopeaza granulele de ZnO
Mn		dopeaza granulele de ZnO
Cr	limiteaza dimensiunea granulelor de ZnO	
Sb	limiteaza dimensiunea granulelor de ZnO	
Ti	creste dimensiunea granulelor de ZnO	
Si	creste dimensiunea granulelor de ZnO	
B		stabilizeaza curentul in timp
Ni		reduce curentul de scurgere
Al		-scade rezistivitatea -creste tgδ
Ga,In,Zr		scad rezistivitatea electrica
Li,K,Na,Cu		creste rezistivitatea electrica

Ameliorarea performanțelor electrice a fost obținută prin optimizarea concentrației oxizilor cât și prin modificarea ciclului termic de sinterizare. M.Matsuoka a realizat un material cu 5 oxizi aditivi care stă la originea fabricării industriale a varistoarelor, având un coeficient de neliniaritate 50 determinat pentru curenți între 1 și 10 mA. Tabelul 4.4. rezumă evoluția performanțelor în funcție de numărul de aditivi și temperatura de sinterizare a ciclului termic.

Tabel 4.4
Dependena caracteristicilor electrice de concentraia aditivilor i temperatura de sinterizare

Aditivi	Temperatura de sinterizare [°C]	E _s [V/mm]	α
Bi ₂ O ₃ (0,5 %)	1150	10	4
Sb ₂ O ₃ (0,5 %)	1150	55	3
Bi ₂ O ₃ (0,5 %) CoO (0,5 %)	1250	30	13
Bi ₂ O ₃ (0,5 %) MnO (0,5 %)	1350	50	18
Bi ₂ O ₃ (0,5 %) MnO (0,5 %) CoO (0,5%)	1350	30	22
Bi ₂ O ₃ (0,5 %) MnO (0,5 %) CoO (0,5%) Cr ₂ O ₃ (0,5 %)	1250	48	21
Bi ₂ O ₃ (0,5 %) MnO (0,5 %) CoO (0,5%) Cr ₂ O ₃ (0,5 %) Sb ₂ O ₃ (0,5%)	1350	135	50

4.2.4 Influenta diametrului mediu al granulelor de ZnO asupra tensiunii de prag

Un varistor cu ZnO are in componenta sa granule de diferite dimensiuni. Prin urmare, va exista o cale preferentiala de trecere a curentului pe drumul de rezistenta minima, traversind granulele de ZnO care au rezistenta mica, ocolind spatiile izolante. P.R. Emtage [17] a demonstrat teoretic, printr-o abordare statistica, ca tensiunea de prag u'_s a unei microvaristante elementare este o medie statistica a tensiunii de prag (u_s) a microvaristantelor elementare considerate izolat, adica introducind un coeficient statistic σ este data de relatia:

$$u'_s = (1 - \sigma) \cdot u_s \tag{4.3}$$

σ – fiind un coeficient statistic ce rezulta din histograma variatiei tensiunii de prag elementare datorata dimensiunii granulelor.

u_s - tensiunea de prag a unei microvaristante teoretice, egala cu largimea benzii interzise

$$(u_s = V_{bi} \cong 3V) \tag{4.4}$$

Presupunind ca trecerea curentului se face prin n microvaristante i seriate pe inaltimea acestuia si considerind ca acestea au dimensiuni si proprietati identice atunci tensiunea de prag a unui varistor va fi

$$U_s = n \cdot u_s' = n \cdot (1 - \sigma) \cdot u_s \quad (4.5)$$

Considerind ca toate granulele de ZnO au acelasi diametru mediu d_g atunci $\sigma = 0$ si $n = H/d_g$.

si deci tensiunea de prag a varistorului va fi proportionala cu numarul de straturi de ZnO, sau altfel spus cu inaltimea H a pastilei ceramice.

$$U_s = \frac{H}{d_g} \cdot u_s \cong \frac{H}{d_g} \cdot 3V \quad (4.6)$$

Dupa cum se constata din aceasta ecuatie, stabilind tensiunea de prag U_s necesara a fi asigurata de varistor si cunoscind granulatia medie a pulberilor putem calcula cu aproximatie inaltimea pe care va trebui sa o aiba pastila ceramica.

In final, referitor la caracteristicile fizico chimice si electrice ale varistoarelor se pot evidentia citeva concluzii:

- conductivitate ridicata a granulelor de ZnO, care poate fi privit ca un semiconductor donor de tip N, conductivitatea fiind datorata ionilor negativi de Zn interstitiali; concentratia lor depinde de tratamentul termic si este de ordinul $10^2 (\Omega \cdot m)^{-1}$ in conditiile unui palier de recoacere de 1200 °C;
- limitarea conductiei de barierele de potential electrostatic de la nivelul interstitiilor intergranulare. Din masuratorile experimentale s-a constatat ca o conductie ridicata apare de la o valoare de 3 V aplicata barierei de potential.
- calculul tensiunii de prag (U_s) se poate face in mod aproximativ daca se cunoaste dimensiunea medie a granulelor de ZnO dupa formula :

$$U_s = \frac{H}{d_g} \cdot V_{bi} \quad (4.7)$$

in care :

- H inaltimea pastilei
- d_g dimensiunea medie a granulelor de ZnO (este considerata 20 μm).
- V_{bi} inaltimea barierei de potential: - 3 V; (de exemplu pentru o tensiune $U_s=1500$ V, rezultă că înălțimea pastilei trebuie să fie $H \cong 1$ cm)
- varistorul cu ZnO prezinta o capacitate dielectrica neneglijabila invers proportionala cu numarul de interstitii si de acest fapt trebuie tinut cont mai ales cind se foloseste varistorul in circuitele de ca.
- pierderile dielectrice $\tan \delta < 0.03$ sint foarte reduse si prezinta un maxim la frecventa $f = 2 \cdot 10^5$ Hz;
- timpul de raspuns este foarte scazut dar depinde in general si de impedanta circuitului de protejat, dar in mod obisnuit este de ordinul zeci de ns;

- posibilitatea de a absorbi energia depinde de parametrii geometrici si de calitatea varistorului. Aceasta energie poate ajunge pina la 200 J/cm^3 ;

Referitor la structura varistoarelor, se poate concludiza 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.

În ceea ce privește tehnologia de fabricatie a varistoarelor, se poate concludiza ca un numar mare de factori pot influenta calitatea varistorului și deci fabricația prezintă un grad ridicat de empirism. Dintre acestia cei mai importanti sint :

- compozitia chimica a amestecului de pulberi;
- granulatia pulberilor constituente;
- temperatura tratamentelor termice;
- profilul curbei tratamentelor termice;
- proprietatile electrice ale pastei conductoare din care vor rezulta electrozii;

Gasirea variantei optime la toti acesti factori, în mod empiric, va conduce in final la o caracteristica $I(U)$ cu un grad important de neliniaritate, necesar pentru satisfacerea cerintelor contradictorii de tensiune de prag cit mai inalta si nivel de protectie cit mai scazut.

Obtinerea acestor deziderate permite racordarea unui varistor direct la retea, fara utilizarea suplimentara in serie a unui eclator , simplificind fabricatia, reducind costurile de productie si asigurind calitati de protectie superioare.

4.3 Mecanismele conductiei la varistoarele cu ZnO

De la descoperirea efectului de varistor, in anii 1970 [15],[26],[47] foarte multe cercetari au fost consacrate studierii mecanismelor conductiei in spatiile interstiale dintre granulele de ZnO, incercind sa raspunda la intrebari precum: de ce rezistenta unor astfel de materiale scade brusc cind tensiunea creste peste un anumit prag? Care sint mecanismele conductiei? Majoritatea rezultatelor au condus la modele teoretice care au incercat sa se apropie tot mai mult de rezultatele experimentale. In continuare voi trece in revista principalele modele de conductie propuse pentru explicarea neliniaritatii varistoarelor cu ZnO.

4.3.1 Modelul M. Matsuoka

In 1971, M. Matsuoka a propus un prim model care explica neliniaritatea varistoarelor. Pornind de la observarea microscopica dimensionala a spatiului intergranular , el a exclus de la inceput posibilitatea conductiei prin efect Tunnel datorita grosimii mari

(1 μm) 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 reflectă 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 $2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, valori mult mai mici (de ordinul sutelor de ori) decât cea propusă de autor (1 μm);
- 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 granulatia pulberii de ZnO supusă sinterizării.
- Permittivitatea dielectrică relativă propusă este de 170, în realitate experimentele confirmând o valoare măsurată $8,5 \leq \epsilon_r \leq 10$.

4.3.2 Modelul J.D. Levine

J.D. Levine a fost primul care a propus ca mecanism al conductiei emisia termoelectronică printr-o dublă barieră Schottky. În 1975, autorul prezintă [42],[61] o diagramă energetică a ansamblului granula ZnO - spațiu intergranular, prezentată în fig. 4.8.a. El presupune că electronii liberi dintr-o parte și alți 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 independentă de nivelele de energie ale benzilor de conducție E_c , și valență E_v . Când tensiunea aplicată crește, scade înălțimea barierei de potențial favorizând conducția la nivelul joncțiunii (spațiului intergranular).

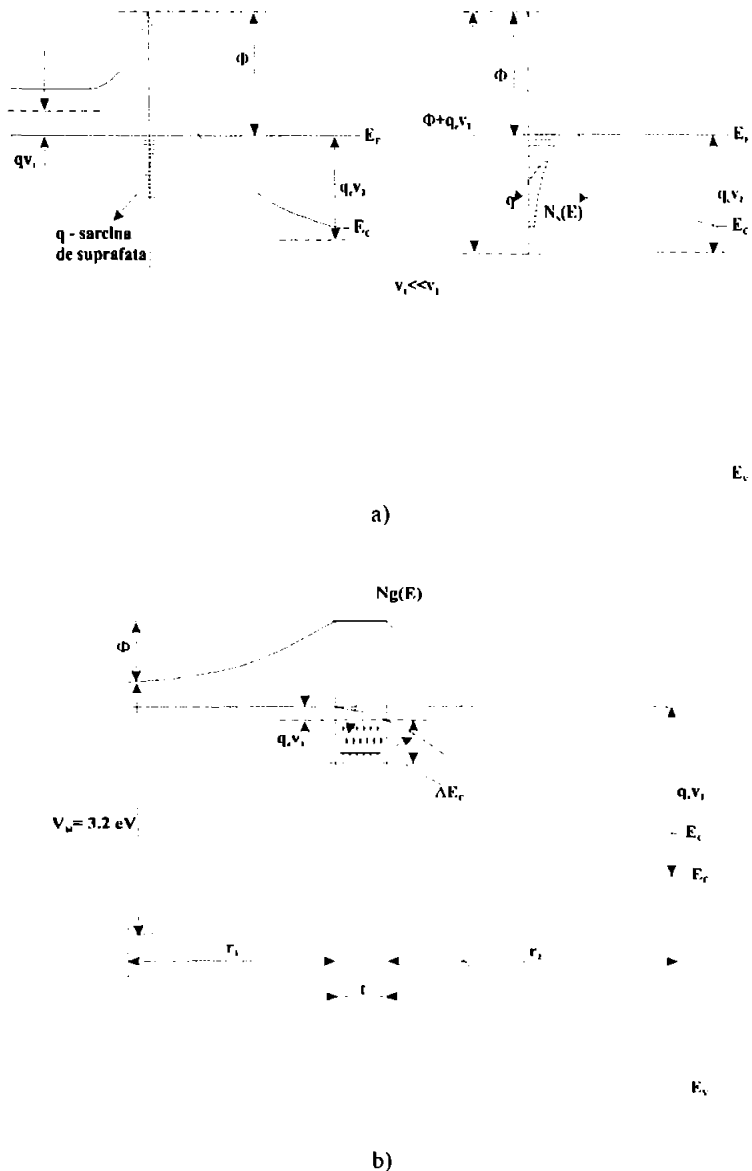


Fig.4.8. a). Modelul teoretic al lui J.D. Levine. b). Modelul Pike

In prima instanta Levine a determinat variatia inaltimii barierei de potential ϕ , si numai dupa aceea o introduce intr-o ecuatie relativa la efectul termoelectric la care face apel pentru a explica efectul de neliniaritate al varistorului. Observatiile critice aduse acestui model sunt :

- neglijarea sarcinilor celorlalte granule adiacente spațiului intergranular;
- valorile lui α obținute teoretic (3-6) sunt prea scăzute față de rezultatele experimentale (>50);
- variația cu temperatura a lui α din teorie nu este confirmată experimental;

4.3.3 Modelul 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 vor migra electronii din interiorul granulei de ZnO (fig.4.8.b).

Autorii presupun [65] că golurile sunt create în avalanșa datorită ionizării sub efectul câmpului electric, în regiunea sărăcită în electroni. Neliniaritatea este datorată recombinației 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 sarcină 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 coborîrea barierei de potențial și trecerea ei mai ușoară de către electronii liberi.

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

L.M. Levinson și colaboratorii au publicat un mare număr de lucrări referitoare la varistoare[43]. Modelul original pe care-l propun aceștia pleacă de la diagrama benzilor de energie cu 2 bariere inverse, aplicând în această zonă legile conservării sarcinilor și ale curentului. Conductivitatea este privită ca fiind desfășurată în 2 etape:

- dinspre granula din stînga către spațiul intergranular;
- din spațiul intergranular spre granula din dreapta;

Ei presupun, referitor la mecanismul conductivității, că atunci cînd tensiunea este inferioară celei de prag, conductivitatea este determinată prin efect termoelectronic iar la depășirea acesteia, conductivitatea este realizată prin efect Tunnel, 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.

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

4.3.5 Modelul J. Bernasconi

Acesta face distincție între două componente ale sarcinii spațiale la nivelul granulei de ZnO [2]: sarcinile spațiale donoare și cele captoare de electroni. Creșterea volumică a celor din urmă antrenează o diminuare a înălțimii barierei de potențial deci implicit a curentului de scurgere. Neliniaritatea se explică prin mișcarea golurilor create prin ionizare, sub influența cimpului electric, și neutralizarea lor în spațiul intergranular. Teoria este deficitară prin 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, aceasta fiind în jurul valorii de 3V.

În afara de aceste teorii au mai fost formulate și altele de autori ca: P.R. Emtage[17], K. Eda[15],[16], T.K. Gupta[28],[29], R. Fizinger și alții. Caracteristica generală a tuturor teoriilor este că admit efectul termoelectronic responsabil de mecanismul conductivității pentru tensiuni sub cea de prag, pentru tensiuni superioare acestea fiind avansată ipoteza conductivității prin efect Tunnel.

4.3.6 Modelul O. Dorlanne

O abordare specifică cu o apropiere mai mare a rezultatelor teoretice de experiment a avut-o O. Dorlanne [14]. Teoria sa se bazează pe modelul propus de J.D. Levine al dublei bariere inverse. În figura 4.9 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 cu diferența de potențial V aplicată. Numai după ce se stabilește această dependență sunt explicate și cuantificate, cu ajutorul legilor fizicii corpului solid, mecanismele transportului de sarcină, deci ale conductivității. Deoarece rezultatele experimentale pe care le-am obținut, ce vor fi prezentate în cap 6 și 7, verifică această teorie, în continuare voi dezvolta etapele calculului și ecuațiile folosite pentru explicarea fenomenelor fizice de conducție din varistor.

4.3.7 Determinarea dependenței $\phi(U)$ a înălțimii barierei de potențial cu tensiunea de polarizare

Determinarea înălțimii barierei de potențial ϕ se va face prin rezolvarea ecuației Poisson evaluând, pe de o parte, cantitatea de sarcini spațiale pozitive Q_{cs} , Q_{ca} , din granulele

de oxid din stânga și dreapta spațiului intergranular, iar pe de altă parte cantitatea de sarcini negative de suprafață Q_s din spațiul intergranular. Aplicind apoi legea conservarii sarcinilor se va obtine ecuatia implicita de unde se poate determina dependenta $\phi(U)$.

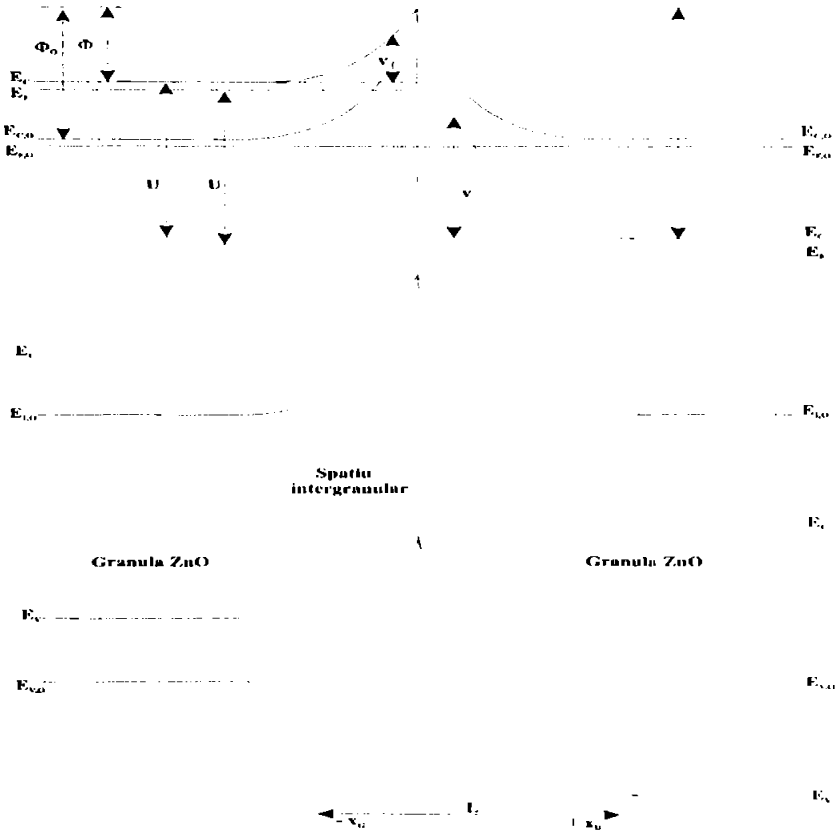


Fig.4.9 Diagrama benzilor de energie.

Punctul de pornire este ecuatia lui Poisson unidimensionala , in care se presupune deplasarea sarcinilor numai dupa directia axei ox:

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = - \frac{q_e n_T}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \quad (4.8)$$

in care :

- v - potentialul intr-un punct oarecare al spatiului granular;
- q_e - sarcina elementara a electronului
- ϵ_r , ϵ_0 - permitivitatea relativa a materialului varistorului respectiv cea absoluta a vidului;
- n_T - densitatea totala a purtatorilor de sarcina;

in general : $n_T = n + n_i + p$

n_+ , n_- : densitatea de sarcini fixe pozitive respectiv sarcini fixe negative ($n_+ = n_D$ densitatea atomilor donori; $n_- = n_A$ densitatea atomilor acceptori);

n, p : densitatea electronilor în banda de conducție respectiv a golurilor în banda de valență;

Majoritatea autorilor identifică pe $n_T = n_D$ neglijând celelalte specii purtătoare de sarcină. Neglijarea lui n_A este justificată, granulele fiind dopate cu atomi donori. Neglijarea însă a purtătorilor mobili n și p introduce erori deoarece concentrația acestora depinde esențial de tensiunea aplicată

Prin definiție [14], numărul acestor purtători se calculează cu formulele:

$$n = n_{int} \cdot e^{-\frac{E_c - E_{c,int}}{k \cdot T}} = n_{int} \cdot e^{-\frac{q_e \cdot \psi}{k \cdot T}} = n_D \cdot e^{-\frac{q_e \cdot \psi}{k \cdot T}} \quad (4.9)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad \text{și} \quad n_{int} = n_i \cdot e^{-\frac{E_{F,int} - E_{i,int}}{k \cdot T}} \quad (4.10)$$

$n_{int} = n_D$ - semnifică purtătorii din interiorul granulei de ZnO și este egal cu concentrația donoșilor presupunând că toți atomii donori furnizează electroni în banda de conducție;

n_i - este densitatea sarcinilor mobile în semiconductorul intrinsec, relația dintre n_{int} și n_i fiind dată mai sus;

$E_{F,int}$ și $E_{i,int}$ - nivelul Fermi și nivelul Fermi intrinsec;

E_c , $E_{c,int}$ - nivelul benzii de conducție a materialului și nivelul benzii de conducție a materialului intrinsec;

Cum la un material nedegenerat $E_{F,int} \cong E_{c,int}$ diferența dintre cele este neglijabilă în raport cu $V_{bi} = 3,2$ V (valoarea benzii intrinse pentru ZnO) și

$$E_{c,int} - E_{i,int} = q_e \cdot \psi \quad \text{unde} \quad \psi = \frac{V_{bi}}{2},$$

Pe baza relațiilor și a considerentelor de mai sus, se poate determina n_{int} și p :

$$n_{int} = n_i \cdot e^{-\frac{q_e \cdot \psi}{k \cdot T}} \quad (4.11)$$

și apoi :

$$p = \frac{n_{int}^2 \cdot e^{-\frac{2 \cdot q_e \cdot \psi}{k \cdot T}}}{q_e \cdot \psi} = n_{int} \cdot e^{-\frac{q_e \cdot (2\psi + \psi)}{k \cdot T}} = n_D \cdot e^{-\frac{q_e \cdot (2\psi + \psi)}{k \cdot T}} \quad (4.12)$$

Ecuatia Poisson se poate scrie acum:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{q_e}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \left[n_D - n_D \cdot e^{\frac{q_e \cdot v}{k \cdot T}} + n_D \cdot e^{-\frac{q_e(2\psi+v)}{k \cdot T}} \right] \quad (4.13)$$

sau

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{q_e \cdot n_D}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \left[e^{\frac{q_e \cdot v}{k \cdot T}} - e^{-\frac{q_e(2\psi+v)}{k \cdot T}} - 1 \right] \quad (4.14)$$

Înmulțind ambii membri ai ecuației cu $2 \cdot \frac{dv}{dx}$ obținem în cei 2 membri ai ecuației :

$$2 \cdot \frac{dv}{dx} \cdot \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left[\left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right] \text{ în membrul stîng}$$

$$\text{respectiv în cel drept } 2 \cdot \frac{dv}{dx} \cdot \frac{q_e \cdot n_D}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \left[e^{\frac{q_e \cdot v}{k \cdot T}} - e^{-\frac{q_e(2\psi+v)}{k \cdot T}} - 1 \right] \quad (4.15)$$

Integrînd relația obținută prin egalarea celor 2 membri se obține:

$$\frac{d}{dx} \left[\left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right] = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{2q_e \cdot n_D}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \left[e^{\frac{q_e \cdot v}{k \cdot T}} - e^{-\frac{q_e(2\psi+v)}{k \cdot T}} - 1 \right] \quad (4.16)$$

$$\int \frac{d}{dx} \left[\left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right] dx = \frac{2q_e \cdot n_D}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \int \left[e^{\frac{q_e \cdot v}{k \cdot T}} - e^{-\frac{q_e(2\psi+v)}{k \cdot T}} - 1 \right] \frac{dv}{dx} dx + C \quad (4.17)$$

$$\int d \left[\left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \right] = \frac{2q_e \cdot n_D}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \int \left[e^{\frac{q_e \cdot v}{k \cdot T}} - e^{-\frac{q_e(2\psi+v)}{k \cdot T}} - 1 \right] dv + C \quad (4.18)$$

$$\left(\frac{dv}{dx} \right)^2 = \frac{2q_e \cdot n_D}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \left[\frac{kT}{q_e} \cdot e^{\frac{q_e \cdot v}{k \cdot T}} + \frac{kT}{q_e} \cdot e^{-\frac{q_e(2\psi+v)}{k \cdot T}} - v \right] + C \quad (4.19)$$

punînd condiția la limită : $\left(\frac{dv}{dx} \right)_{v=0} = 0$. Din relația anterioară se poate determina C:

$$C = -\frac{2q_c \cdot n_D \cdot k \cdot T}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \left(1 + e^{-\frac{2q_c \psi}{k \cdot T}} \right) \quad (4.20)$$

Ținând cont că pentru temperaturi curente $T=300^\circ\text{K}$, $\frac{kT}{q_c} \cong 25 \text{ mV}$ și $2\psi=V_{bi}=3,2 \text{ V}$

rezultă că termenul $e^{-\frac{2q_c \psi}{k \cdot T}} \cong e^{-\frac{3,2}{25 \cdot 10^{-3}}} > e^{-100} \ll 1$

Deci acest termen se poate neglija în raport cu unitatea fără a genera erori prea mari.

Rezultă $C \cong -\frac{2 \cdot n_D \cdot k \cdot T}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}$ și deci din relația 4.19 obținem :

$$\left(\frac{dv}{dx} \right)^2 = \frac{2 \cdot n_D \cdot k \cdot T}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \cdot \left[-\frac{q_c \cdot v}{k \cdot T} + e^{\frac{q_c \cdot v}{k \cdot T}} + e^{-\frac{q_c(2\psi+v)}{k \cdot T}} - 1 \right] \quad (4.21)$$

Această relație este necesară pentru calculul intensității cimpului electric și apoi al sarcinii electrice.

Aplicind $E_p = -\left(\frac{dv}{dx} \right)_{x=x_p}$ (4.22)

pentru suprafețele de frontieră ale granulelor de ZnO obținem pentru cea din stînga :

$$E_{0,s} = -\left(\frac{dv}{dx} \right)_{x=0,s} = -\left(\frac{dv}{dx} \right)_{v=-\phi} \quad (4.23)$$

$$E_{0,s} = \left(\frac{2 \cdot n_D \cdot k \cdot T}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} \right)^{1/2} \cdot \left[\frac{q_c \cdot \phi}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_c \cdot \phi}{k \cdot T}} + e^{-\frac{q_c(V_{bi}-\phi)}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} \quad (4.24)$$

Din motivele pe care le-am prezentat mai sus, $V_{bi}-\phi > V_{bi}-\phi_0=3,2-0,8=2,6 \text{ V}$, termenul $e^{-\frac{q_c(V_{bi}-\phi)}{k \cdot T}} \ll 1$ se poate neglija obținind pentru sarcina electrică spațială din stînga expresia :

$$Q_{e,s} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot E_{0,s} \left(2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \right)^{1/2} \cdot \left[\frac{q_c \cdot \phi}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_c \cdot \phi}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} \quad (4.25)$$

In mod analog, aplicind relatia 4.22 si 4.23 pentru granula de ZnO din dreapta, potentialul fiind dat la suprafata de separatie din dreapta de relatia

$$E_{0,d} = -\left(\frac{dv}{dx}\right)_{x=0,d} = -\left(\frac{dv}{dx}\right)_{v=-(\phi+U)} \quad (4.26)$$

U fiind tensiunea aplicata unui spatiu intergranular deci pentru un model ideal reprezintă tensiunea totala aplicata varistorului impartita la numarul de spatii intergranulare elementare considerate inseriate.

$$Q_{c,d} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot E_{0,d} = \\ = (2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0)^{1/2} \cdot \left[\frac{q_c \cdot (\phi + U)}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_c \cdot (V_{bi} - (\phi + U))}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} \quad (4.27)$$

Cantitatea totala de sarcina spatiala din imediata vecinatate a suprafetei de separatie dintre cele doua granule este :

$$Q_c = Q_{c,s} + Q_{c,d} = (2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0)^{1/2} \left[\left[\frac{q_c \cdot \phi}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_c \cdot \phi}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} + \right. \\ \left. + \left[\frac{q_c \cdot (\phi + U)}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_c \cdot (V_{bi} - (\phi + U))}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} \right] \quad (4.28)$$

Semnificatia termenilor este urmatoarea :

- $\frac{q_c \cdot \phi}{k \cdot T}$ - reprezinta atomii donori ai granulei din stinga;
- $e^{-\frac{q_c \cdot \phi}{k \cdot T}} - 1$ - reprezinta electronii din stinga;
- $e^{-\frac{q_c \cdot (V_{bi} - (\phi + U))}{k \cdot T}}$ - reprezinta golurile din dreapta,
- 1 - reprezinta electronii din dreapta

Ceea ce este de remarcat este ca daca $(\phi+U)$ devine egal cu V_{bi} , numarul de goluri , neglijabil pina atunci creste exponential perturbind variatia lui Q_c cu U.

De asemenea daca in ecuatia lui Poisson se neglijeaza purtatorii minoritari se regaseste expresia la care au ajuns si ceilalti autori [17],[43] :

$$Q_e = (2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0)^{1/2} \cdot (\phi^{1/2} + (\phi + U)^{1/2}) \quad (4.29)$$

Calculul sarcinilor la suprafața de separație granule de ZnO-spațiu intergranular

Densitatea acceptorilor de pe suprafața N_s se presupune constantă și uniformă. Sarcina totală conform legilor statisticii termodinamice este :

$$Q_s = \int dQ_s = \int -q_e \cdot n_s \cdot f(E - E_F) \cdot dE \quad (4.30)$$

unde $f(E - E_F)$ este funcția Fermi;

Pentru calculul integralei trebuie precizate limitele de integrare și expresia funcției Fermi

- Limita superioară corespunde nivelului Fermi $E_{F,x=0}$;
- Limita inferioară este nivelul benzii de valență de la interiorul granulei $E_{V,int}$;
- Funcția Fermi este o funcție Heaviside, chiar și la temperatura mediului ambiant;

În aceste condiții efectuând integrala obținem :

$$Q_s = \int_{E_{V,int}}^{E_{F,0}} -q_e \cdot n_s \cdot 1 \cdot dE = -q_e \cdot n_s \cdot (E_{F,0} - E_{V,int}) \quad (4.31)$$

Folosind cercetările lui G.E. Pike [65], $E_{F,0} = E_{C,int}$, iar $E_{V,int}$ fiind diferită pentru cele 2 părți ale suprafeței de separație, vom separa pe Q_s în 2 termeni corespunzători :

$Q_s = Q_{s,s} + Q_{s,d}$ în care :

$$Q_{s,s} = -q_e \cdot n_s \cdot (E_{C,int,s} - E_{V,int,s}) = -q_e \cdot n_s \cdot q_e \cdot V_{bi} \quad (4.32)$$

$$Q_{s,d} = -q_e \cdot n_s \cdot (E_{C,int,d} - E_{V,int,d}) = -q_e \cdot n_s \cdot q_e \cdot (V_{bi} + U) \quad (4.33)$$

sau :

$$Q_s = -q_e^2 \cdot n_s \cdot (2 \cdot V_{bi} + U) = -2q_e^2 \cdot n_s \cdot V_{bi} \cdot \left(1 + \frac{U}{2V_{bi}}\right) \quad (4.34)$$

Dacă se notează cu Q_{s0} cantitatea de sarcini de suprafață pentru $U=0$ adică înainte de polarizare se obține pentru Q_s :

$$Q_s = Q_{s0} \cdot \left(1 + \frac{U}{2V_{bi}} \right) \quad (4.35)$$

Schematic , sarcinile Q_{s-s} si Q_{s-d} sint reprezentate in fig.4.10.

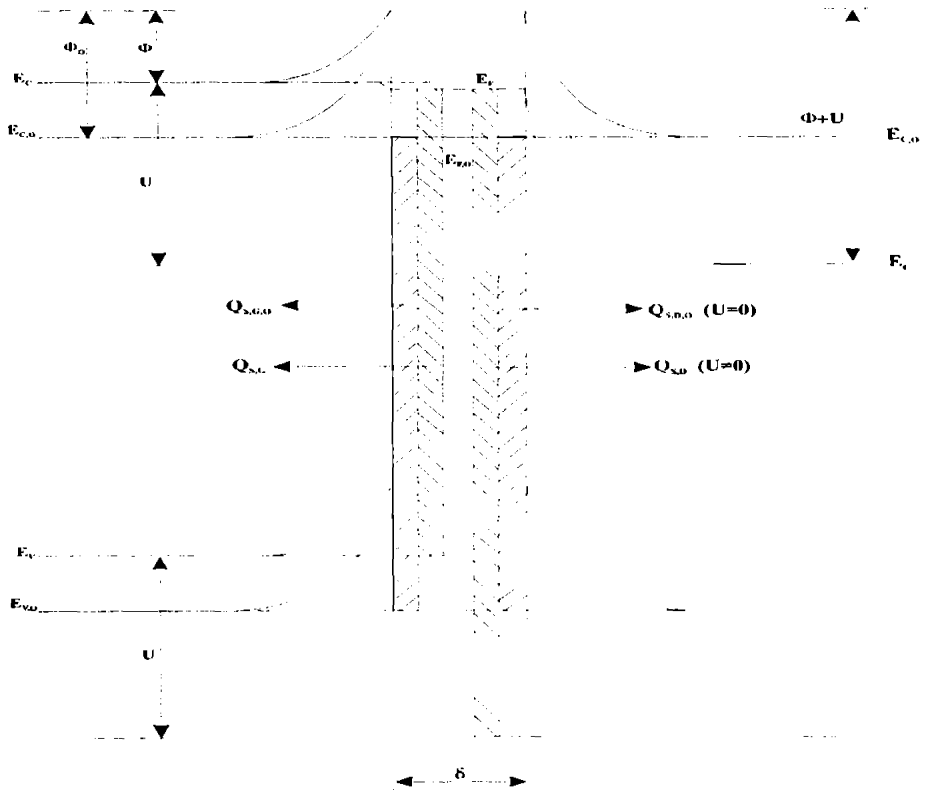


Fig.4.10 Sarcinile de suprafata initial ($Q_{s,G,0}$, $Q_{s,D,0}$), în absența polarizării $U=0$ și în urma aplicării unei tensiuni de polarizare $U \neq 0$ ($Q_{s,G}$, $Q_{s,D}$).

Legea conservarii sarcinilor electrice, aplicata unei suprafete Σ ce inconjoara spațiul intergranular dintre cele doua granule, impune :

$$Q_e = Q_s = 0 \quad (4.36)$$

Inlocuind in 4.36 relatiile 4.28 si 4.35 se obtine o relatie din care se poate calcula Q_{s0} :

$$\begin{aligned}
 & \left(2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0\right)^{1/2} \left[\frac{q_e \cdot \phi}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_e \cdot \phi}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} + \\
 & + \left[\frac{q_e \cdot (\phi + U)}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_e \cdot (V_{bi} - (\phi + U))}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} = -Q_{s0} \cdot \left(1 + \frac{U}{2V_{bi}}\right)
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

punind conditia ca $U=0$, se obtine expresia pentru sarcinile spatiale initiale in lipsa tensiunii:

$$Q_{s0} = -2 \left[\left(2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0\right) \cdot \left(\frac{q_e \cdot \phi_0}{k \cdot T} - 1\right) \right]^{1/2} \tag{4.38}$$

Inlocuind aceasta relatie in 4.37 simplificind cu $\left(2 \cdot n_D \cdot k \cdot T \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0\right)^{1/2}$ se obtine ecuatia implicita a inaltimei barierei de potential ϕ in functie de tensiunea aplicata U :

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{q_e \cdot \phi}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_e \cdot \phi}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} + \left[\frac{q_e \cdot (\phi + U)}{k \cdot T} + e^{-\frac{q_e \cdot (V_{bi} - (\phi + U))}{k \cdot T}} - 1 \right]^{1/2} = \\
 & = 2 \left(\frac{q_e \cdot \phi_0}{k \cdot T} - 1 \right)^{1/2} \cdot \left(1 + \frac{U}{2V_{bi}} \right)
 \end{aligned} \tag{4.39}$$

In aceasta relatie intervin in afara de ϕ si U doar doua constante de material cunoscute : $\phi_0=0.8 \text{ eV}$ si $V_{bi}=3.2 \text{ V}$.

Expresia 4.39 permite determinarea prin calcul numeric a inaltimei barierei de potential in functie de tensiunea aplicata, reprezentarea grafica fiind facuta in fig.4.11. Din aceasta reprezentare se constata o scadere a inaltimei barierei de potential pronuntata pentru o tensiune de polarizare ce depaseste 2,7 V. Aceasta cadere este determinata de aparitia in numar mare a golurilor - termenul $e^{-\frac{q_e \cdot V_{bi} - (\phi + U)}{kT}}$ - din granula de oxid dreapta atunci cand $\phi+U=q_e \cdot V_{bi}$. (adică pentru o tensiune $U = 2,7 \text{ V}$). Dacă nu ar fi considerate golurile, ar trebui ca ϕ să crească pentru o tensiune $U > 3 \text{ V}$, ceea ce ar fi în contradicție cu evoluția reală a curentului ($I(U)$). Această scădere bruscă a înălțimii barierei de potențial va fi constatată experimental (§ 6.1.2.) pentru varistoarele fabricate.

Concluzionând, neliniaritatea puternica care apare in jurul unei tensiuni de 3V se explica prin aparitia in numar mare al golurilor in partea dreapta a ansamblului celor doua granule de ZnO. Acestea, prin neutralizarea sarcinilor spatiale, produc o micorare

semnificativă a înălțimii barierei de potențial determinând astfel un proces de ambalare în avalanșă și creștere rapidă și pronunțată a curentului.

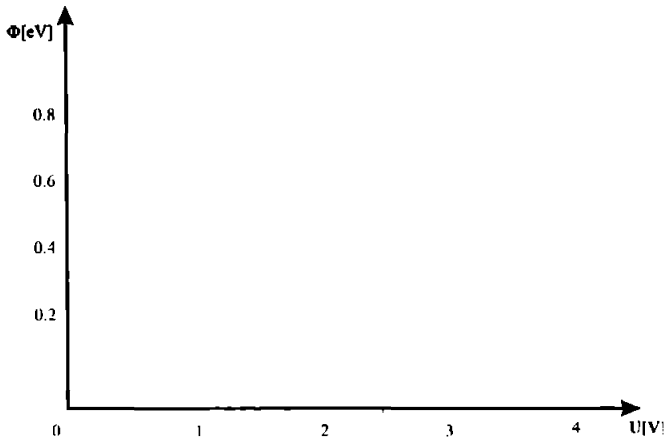


Fig.4.11. Evoluția teoretică a înălțimii barierei de potențial ϕ cu tensiunea aplicată U unui spațiu intergranular.

Mai multe lucrări experimentale [64],[76],[77] au verificat modelul conductivității în interiorul varistorului prin mecanismul emisie termoelectronice. Conform acestei ipoteze conductivitatea prin efect Tunnel este nesemnificativă în raport cu mecanismul conductivității termoelectronice, fapt evidențiat de caracteristicile $I(U)$ ridicate pentru temperaturi diferite (se va vedea în &6.1.2).

4.4 Mecanismele degradării

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. Solicitățile ce 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 de scurtă durată dar de mare amplitudine datorate descărcărilor atmosferice;

- supratensiunile de lunga durata rezultate in urma manevrelor efectuate in instalatia electrica.
- descarcarile pariale din apropierea varistorului ;
- solicitari electrice si chimice ale mediului inconjurator asupra varistorului;

In studiul experimental care va urma se va urmări degradarea produsa de primele trei tipuri de solicitari prezentate mai sus. Ca urmare a degradării se va constata o crestere a curentului de scurgere in functionare normala si o scadere a tensiunii de prag. In cazul solicitarilor unidirectionale (in curent continuu) caracteristicile $I(U)$ vor prezenta un caracter asimetric, o schimbare mai pronuntata observindu-se pentru caracterizarea cu tensiuni de polaritate inversa celor aplicate pentru degradare. Supunerea la solicitari cu tensiuni alternative, determina o degradare simetrica; Aceste observatii experimentale sugereaza o deformatie a barierei Schottky cu o scadere a inaltimii barierei de potential provocata de o modificare a distributiei sarcinii spatiale la suprafata de separatie. Majoritatea articolelor care trateaza acest subiect [16],[28],[29],[67] explica la nivel microscopic fenomenul degradării varistorului printr-o deplasare a ionilor sub actiunea solicitarilor cimpului electric aplicat. In continuare voi prezenta citeva din teoriile referitoare la mecanismele degradării a celor mai importanti analisti ai ceramicelor folosite in electrotehnica;

4.4.1 K. EDA si colaboratorii

Acestia au studiat degradarea varistoarelor supuse tensiunilor continue sau alternative, la diverse temperaturi ale mediului ambiant. Ridicarea caracteristicii $I(U)$ si determinarea proprietatilor dielectrice le-a permis sa evalueze aceasta degradare. Masurarea curentului de depolarizare stimulat termic, a condus la stabilirea cantitatii de ioni care au difuzat spre spatiul intergranular. Atomii care s-au deplasat sint conform observatiilor cationii de Zn,Sb,Co,Mn si Cr care migreaza sub actiunea cimpului electric. Ei vor fi neutralizati si perturba echilibrul sarcinilor. Drept urmare, bariera Schottky sufera o deformare, scaderea ei imbunatateind conductia prin spatiul intergranular. Concluziile ce se desprind din studiile lor sint :

1) Pentru solicitari unidirectionale (tensiune continua):

- modificarea $I(U)$ la o caracterizare cu tensiune inversa celei cu care a fost degradata , este provocata printr-o migratie a ionilor in regiunea intergranulara bogata in Bi_2O_3 care deformeaza bariera schottcky polarizata direct.
- modificarea $I(U)$ la tensiuni de acelasi sens cu cea la care a fost degradata este consecinta unei deplasari a ionilor in zona saraca in electroni, antrenind o deformare a barierei polarizate in sens invers.

2) Pentru solicitari alternative, dubla bariera este deformata in ambele parti in mod simetric, prin deplasarea ionilor in cele doua zone parasite (sarace in electroni).

Autorii aduc de asemenea citeva clarificari asupra rationamentului pentru care ciclurile de recoacere amelioreaza stabilitatea varistorului [16]. In timpul acestei operatii structura retelei ionice se modifica, conductivitatea ionica (generata de ionii de O) diminuandu-se. In plus, ionii de Zn^{2+} interstitiali difuzeaza catre suprafata de separatie, intergranulara unde se pot combina cu O^{2-} ducind la scaderea concentratiei lor si deci la scaderea conductivitatii spatiului intergranular. Acest fapt conduce la scaderea curentului prin varistor, care inseamna de fapt imbunatatirea stabilitatii termice a lui.

Intr-o alta publicatie [16], K.Eda modeleaza mecanismul acestei migratii de ioni de O intr-o structura formata din 3 granule de ZnO intre care se afla spatiul granular bogat in Bi_2O_3 . Schematic situatia este prezentata in figura 4.12.

Migratia poate fi provocata pe 2 cai :

- sub actiunea gradientului de concentratie de-a lungul spatiului intergranular;
- sub actiunea cimpului electric aplicat heterojonctiunii din stanga asupra Bi_2O_3 , unde o parte din ionii de O^{2-} pot fi neutralizati, alta parte fixandu-se pe suprafata din dreapta. Acest mecanism prezinta in esenta mecanismul pierderilor de O. In urma acestor actiuni rezulta o scadere a inaltimii barierei de potential Schottky si o deformatie asimetrica a acesteia din urma daca tensiunea aplicata este continua sau simetrica daca tensiunea aplicata este alternativa.

Autorul explica faptul ca bariera Schottky polarizata in sens direct va fi deformata mai usor decit cea polarizata in sens invers, explicind asta prin pierderea de oxigen mai usoara pentru jonctiunea polarizata in esns direct decit cealalta.

Verificarea experimentală a acestui model a fost făcută de A Chiang și W.D Kingery [8], care au pus în evidență o diferență de concentrație a ionilor metalici (Al, Si, Ca, Ti, Fe, Co și Bi) între spațiile întregranulare în starea inițială, nedegradată și cea finală după ce probele au fost supuse degradării. Pierderile de oxigen au fost de asemenea constatate și de D. Bineschi [4], pentru varistoare degradate.

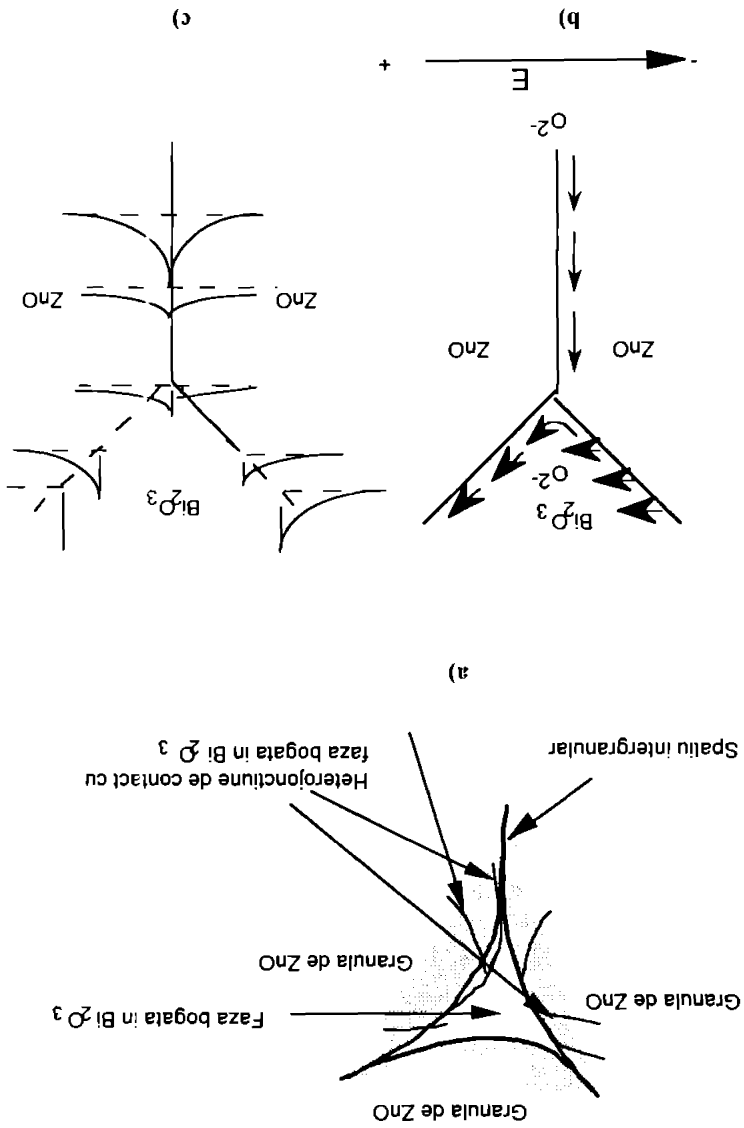


Fig. 4.12 Modelarea mecanismului migrației ionilor de O²⁻ într-o structură granulară:
 a) Diagrama schematică a pierderilor de oxigen, (ionii de O²⁻ migrează către zone polarizate pozitiv); b) deformarea barierei Schottky datorată cimpului electric
 c) barierele deformate asimetric conform situației prezentate în b).

4.4.2 T.K.Gupta și colaboratorii

Aceștia presupun că o răcire rapidă în ciclul de sinterizare, poate provoca un gradient termic important în granulele de ZnO care determină defecte în rețeaua cristalină (ionii de Zn^{2+} se deplasează în poziții intermediare) și o distribuție neomogenă a ionilor [28],[29]. Aplicarea unei tensiuni mari esanționului supus analizei provoacă difuzia ionilor pozitivi Zn^{2+} în zona parazită de electroni către spațiul intergranular unde neutralizează o parte din sarcinile negative care sunt generatoare ale barierei Schottky, rezultând o deformare a acesteia și o scădere a înălțimii barierei de potențial și creșterea curentului de conducție

4.4.3 C.G.Shirley și W.M.Paulson

Aceștia analizează mecanismul degradării în urma aplicării [70] unui impuls de mare amplitudine și mare energie, echivalentul unei lovituri de trăsnet. Acest soc produce o neomogenitate a materialului varistorului, 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 la nivel microscopic este evidențiat prin deformarea barierei de potențial, datorate migrației ionilor și modificării concentrației ionice de la suprafața de separație intergranulară iar la nivel macroscopic prin modificarea în sens nedorit a caracteristicilor electrice:

- creșterea curentului de scurgere ca urmare a îmbătrînirii varistorului, ce 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 .
- stabilirea unor canale conductoare prin interiorul varistorului sau pe suprafața exterioară, generate de un grad înalt de neomogenitate;
- apariția descărcărilor parțiale în interiorul varistorului sau între suprafața laterală izolantă protectoare și pulberea sinterizată a varistorului.

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

- degradarea reversibilă, atunci când esanțioanele supuse degradării își recapătă proprietățile inițiale după un anumit timp de repaus, timp ce poate fi redus prin aplicarea unui tratament termic. Acest tip de degradare este atribuit deplasării ionilor dinspre interiorul granulelor spre spațiul intergranular.

- degradarea ireversibilă atunci când esanționul este parțial sau total distrus. Dacă socul de tensiune care a produs degradarea este de lungă durată, și în general de mică amplitudine, mecanismul este de creare a unui canal conductor prin varistor datorat neomogenității pulberii din care a fost fabricat varistorul. Dacă socul este de scurtă durată și mare amplitudine este posibilă fisurarea esanționului datorită creșterii bruste a temperaturii și imposibilității de cedare a ei în timp util mediului ambiant;

Experiența pe care am dobândit-o ca urmare a stagiului de 5 luni efectuat la Universitatea Paul Sabatier din Toulouse, în colectivul de cercetare pentru materiale ceramice, a stat la baza concepției acestui capitol ce va constitui fundamentul teoretic al dimensionării fabricației și studiului caracteristicilor electrice ale varistoarelor cu ZnO.

Am prezentat caracterul neliniar al acestora, reflectat de caracteristica de protecție $I(U)$, problemele specifice și factorii de influență (compoziția, tratamentul termic, granulația pulberii) din procesul fabricației asupra gradului de neliniaritate și a parametrilor electrici ai varistorului.

Procesele fizice de conducție din varistor și mecanismele degradării au fost obiectivul unui studiu bibliografic critic al ipotezelor emise de către cei mai importanți cercetători în domeniu.

Am prezentat pe larg, cu contribuții personale în demonstrarea expresiei finale implicite a înălțimii barierei de potențial funcție de tensiunea de polarizare (relația 4.39), modelul conducției termoelectronice și mecanismele degradării în varistoarele cu ZnO.

CAPITOLUL 5

DIMENSIONAREA DESCARCATOARELOR CU ZnO PENTRU PROTECTIA INSTALATIILOR DE TRACTIUNE ELECTRICA URBANA

Supratensiunile tranzitorii generate de cauze externe, dar mai ales interne datorate manevrelor frecvente ce se fac in aceste tipuri de instalatii, solicita puternic izolatia dielectrica, fiind cauza principala a imbatrinirii si degradarii acesteia. Protectia contra acestor supratensiuni este asigurata actualmente prin descarcatoare compuse dintr-o rezistenta variabila (SiC) inseriata cu un eclator. Dezavantajul principal al acestora este faptul ca supratensiunile interne de valoare mai redusa nu provoaca amorsarea descarcatorului propagandu-se prin instalatia electrica pina in zone cu izolatia slabita din diverse cauze, unde strapung si creeaza defecte.

Inlocuirea actualelor descarcatoare cu cele de tip nou, in care rezistenta variabila din ZnO, datorita calitatilor prezentate in capitolul anterior, nu mai trebuie inseriata cu un eclator, este o necesitate mai ales prin proprietatile electrice imbunatatite ale protectiei (selectivitate, rapiditate, precizie, fiabilitate), cit si prin avantajele economice (simplitate constructiva , pret de cost redus).

Acest nou tip de descarcatoar este implementat pe scara larga in tarile Comunitatii Europene in multe domenii de activitate. La noi in tara, descarcatoarele clasice cu SiC din statiile de transformare de medie si inalta tensiune ale RENEL au inceput sa fie inlocuite cu descarcatoare cu oxizi metalici de productie externa. Datorita ariei de raspindire si importantei tractiunii electrice, in viitorul apropiat se impune introducerea noilor tipuri de descarcatoare si in aceste instalatii , un factor favorizator fiind fabricarea acestor descarcatoare in tara . Folosirea noului tip de descarcator in acest domeniu este cu altit mai necesara datorita numarului mare de comutatii ce provoaca supratensiuni interne. Cazul supus studiului este al tractiunii urbane din orasul Timisoara, nivelul tensiunii nominale fiind 600V cc.

Studiul poate fi insa extrapolat si pentru alte niveluri de tensiune conform celor prezentate in capitolul 2, sau pentru realizarea protectiei in alte tipuri de instalatii electrice industriale; ceea ce trebuie avut in vedere la dimensionarea descarcatoarelor sunt conditiile si solicitarile specifice din instalatia electrica respectiva.

In acest capitol, se vor defini marimile caracteristice ale var.stoarelor si se vor determina valorile lor pentru aplicatia aleasa.

Aceste date au rezultat dintr-o cercetare atenta a normelor impuse prin standardele interne si internationale CEI [95],[96],[100], precum si din discutiile avute cu personalul de exploatare al instalatiilor din orasele Timisoara, Craiova si Slatina.

Comparativ se va prezenta si varianta de protectie existenta subliniind dezavantajele ce trebuiesc surmontate de noile tipuri de descarcatoare.

5.1 Prezentarea protectiei actuale

Pentru incadrarea acesteia in ansamblul general al substatiei de tractiune, in figura 5.1 se prezinta schema principiala monofilara a substatiei de tractiune:

Ca si prezentare generala, substatia cuprinde doua grupuri transformator-redresor de 1600 A, instalatia de medie tensiune , instalatia de bara pozitiva, bara negativa, servicii auxiliare si celule plecari [87].

Caracteristici tehnice :

- Tensiunea de alimentare 20 kV.
- Tensiuni operative : 24 V cc si 220 ca pt media tensiune.
- Tensiunea debitata pe linia de contact 600=825 Vcc.
- Transformatoarele grupurilor redresoare de 1.5 si 3 MVA tensiuni 20 . 0.647 kV.
- Transformatorul de servicii auxiliare 40 kVA cu tensiune 20 / 0.4 kV.
- Redresoarele : punte trifazata necomandata realizata cu diode;
- Rezistenta de izolatie - 2 MΩ.

Protectia la supratensiuni pe partea de joasa tensiune in interiorul statiei este asigurata prin DRV 1, instalat pe bara de + si prin DRV 2,, cite unul pentru fiecare celula de plecare CIRP-9. De asemenea pe toate vagoanele motoare imediat dupa pantograful de contact cu linia de contact (catenara), se afla dispus cite un astfel de descarcator (asa cum s-a prezentat in capitolul 2). Pe linia de contact la distante de citeva sute de metri sint dispuse eclatoare cu coarne cu rol de protectie contra supratensiunilor atmosferice directe.

Actualmente aceste descarcatoare sint cu SiC si eclatori DRVC -0.9 kV de productie Electroceramica Turda sau VB 1/2.5/6 productie germană - Dresda. Acestea sunt de o complexitate constructiva ridicată si au dimensiuni de gabarit mari. Ca termen de comparatie, daca pastila cu rezistenta variabila de SiC are un diametru $d = 75$ mm si $h = 16$ mm, pentru performante similare pastila de ZnO va avea un diametru $d = 40$ mm si $h = 9.2$ mm, nemaifiind necesar nici eclatorul. Caracteristicile tehnice ale descărcătorului DRVC 0.9 rezultate în urma verificărilor experimentale și ale descărcătorului VB1 sunt prezentate în tabelul 5.1.

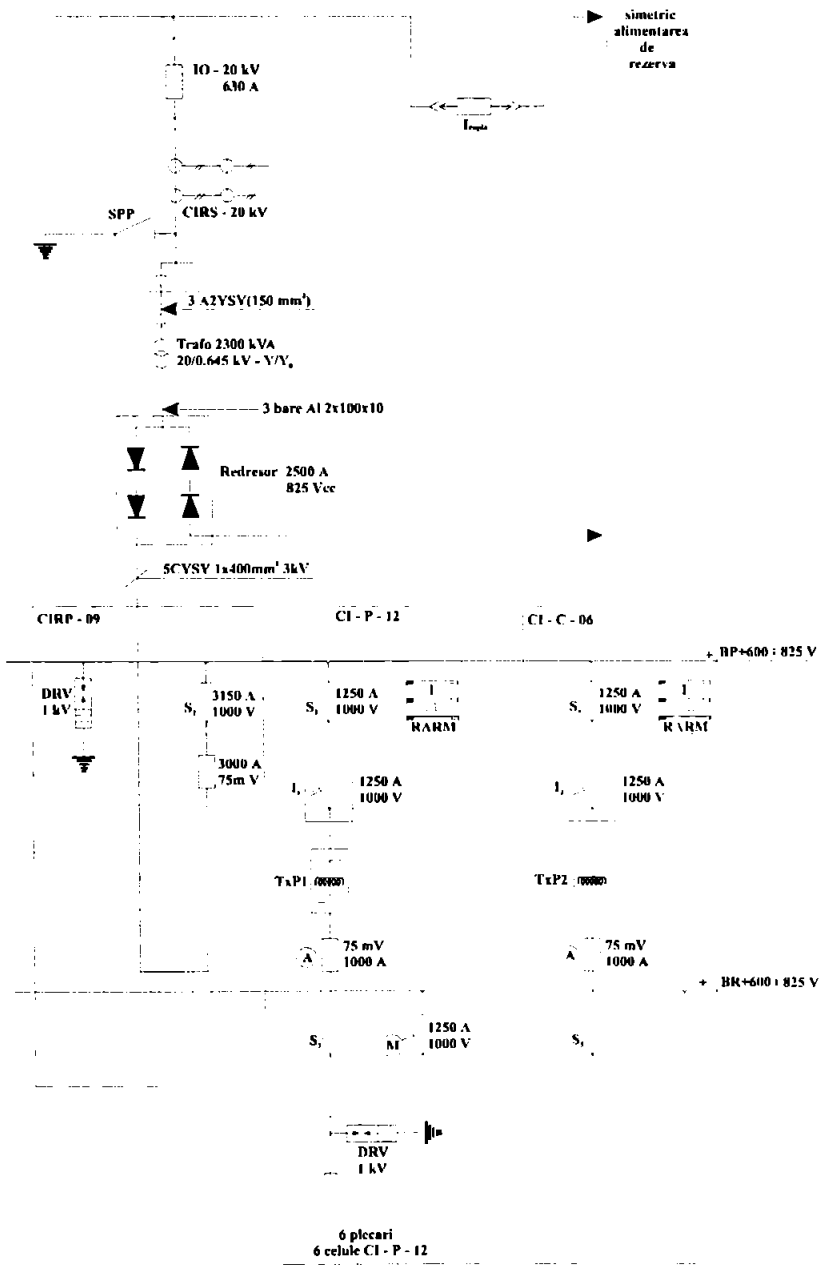


Fig.5.1 Substatie de tracțiune electrica produsa la Electroputere Craiova

Tabel 1 5.1.
Caracteristici tehnice ale descărcătoarelor cu SiC

Caracteristici	DRVC-0,9	VB
I_n	2,5	2,5
U_n [kV]	0,9	1
U_{am} [kV _{ef}] $f=50$ Hz	1,6 - 1,9	1,8
U_{am} [kV _{max}] impuls	3,5	3,6
U_{rez} [kV _{max}] la I_n	3,5	3,6

Din analiza acestor caracteristici date de fabricant și verificate în urma încercărilor de laborator efectuate la ICPE, [86], se pot trage următoarele concluzii :

- 1) Capacitatea de descarcare asigurata de aceste descarcatoare este redusa (numai 2.5kA)
- 2) Nivelul de protectie (dat de tensiunea reziduala) se incadreaza in prevederile STAS (7,2 kV) dar nu permite scaderea nivelului de izolatia la 3,6 kV.
- 3) Conditia anterioara ar fi imposibil de realizat in conditiile in care se doreste cresterea capacitatii de descarcare la 5 kA.
- 4) Tensiunea de amorsare la frecventa industriala si la impuls variaza in limite largi, influentind sensibilitatea si precizia protectiei, serviciul de exploatare al instalatiei de tractiune dorind limitarea acesteia la valori pe cit posibil mai reduse
- 5) Supratensiunile temporare de valori sub tensiunea de amorsare la frecvență industrială sau impuls a eclatorului nu sunt sesizate de către descărcător și deci nu este asigurată protecția la aceste supratensiuni.
- 6) Dupa supunerea esantioanelor analizate la un numar de 20 socuri de curent de amplitudine redusa si lunga durata ($I = 75$ A, $t = 2$ ms), s-a constatat o degradare pronuntata a pastilei de SiC, ceea ce indica o inrautatare a calitatii protectie asigurate, in decursul timpului.
- 6) Disiparea greoaie a undelor de supratensiune transformata in caldura si deci posibilitatea exploziei descarcatorului la solicitari multiple intr-un interval scurt de timp.
- 8) Neliniaritatea caracteristicii $I(U)$ este redusa, exponentul de neliniaritate α avind valori scazute ($\alpha \approx 3$);
- 9) Arcul care se amorseaza cind eclatorul strapunge, este greu de stins, si din aceasta cauza functionarea descarcatorului "este vazuta" de catre alte protectii (de exemplu cea maxima de curent) ca un scurtcircuit (deoarece pune linia la pamint), de aici rezultind actionari multiple ale intreruptoarelor de c.c. in ciclul RAR. Din cauza acestui numar mare de ruperi de curenti de scurtcircuit,

contactele intreruptoarelor de cc se deterioreaza rapid, de asemenea numarul de actionari mecanice conduce la uzura mai rapida a echipamentelor de comutatie. In plus aceste comutatii induc supratensiuni tranzitorii de comutatie, care determina străpungeri ale izolației în zonele sensibile (cabluri vechi, manșoane de legătură). Aceste probleme sunt confirmate de personalul din exploatare.

Inlaturarea acestor dezavantaje, a fost avuta in vedere pentru stabilirea temei de proiectare pentru un descarcator pe baza de ZnO. Si in cazul acestui tip de descarcator se poate avea in vedere varianta asocierii (inserierii) pastilei cu rezistenta variabila de ZnO cu un eclator. Argumente in sprijinul acestei variante ar fi:

- imbunatatirea stabilitatii termice a descarcatorului;
- prelungirea duratei de viata;
- in comparatie cu cele cu SiC datorita neliniaritatii mai pronuntate a caracteristicii I(U) stingerea arcului dupa descarcarea energiei din unda de supratensiune este mai usoara.

Argumentul forte impotriva variantei cu eclator, mai ales in circuite de cc, este totusi pericolul persistentei arcului electric si deci al generarii de supracurenti care pot produce defecte majore, de asemenea uzura pronunțată a echipamentelor de comutatie, datorită acțiunilor multiple.

Pretul de cost mult mai redus al pastilei de ZnO (2 – 3 \$), in comparatie cu cel al echipamentelor de comutatie, precum si premisa unei bune dimensionari si fabricatii a descarcatorului cu ZnO, indica pentru acest caz adoptarea solutiei numai cu rezistenta variabila de ZnO fara eclator in serie. Varianta aceasta este mai ieftina si din punct de vedere al pretului de cost si mult mai simplu de realizat tehnologic. In schimb, alegerea tensiunii de prag trebuie facuta cu mult mai multa grija, de asemenea fabricatia trebuie sa asigure o neliniaritate mare si curenti de scurgere reduși pentru tensiunea nominală a instalației.

5.2 Definirea marimilor electrice specifice varistoarelor cu ZnO

Dimensionarea sau alegerea unui descarcator se face in conformitate cu o standardizare specifica domeniului de utilizare. Pe plan intern în lipsa unei standardizari precise referitoare atit la instalatiile de tractiune urbana cit si la descarcatoarele cu ZnO a fost necesara adoptarea unei terminologii si a unor reguli adaptate la normele internationale in vigoare[88],[101]. De aceea in continuare voi prezenta pe scurt semnificatia unor parametri specifici, ca date de catalog pentru descărcătoare, utili pentru alegerea, dimensionarea si descrierea proprietatilor descarcatoarelor cu ZnO.

- U_S sau V_N - Tensiune de prag a varistorului, reprezinta tensiunea masurata la bornele varistorului în mod convențional pentru un curent de 1 mA;

- U_N - Tensiune nominală a instalației de protejat;
- U_{MCOV}, V_{RMS} - Tensiune maximă de serviciu permanent; reprezintă tensiunea maximă admisibilă ca valoare efectivă a tensiunii de alimentare de frecvență industrială (Maximum Continuous Operating Voltage);
- V_{DC} - Tensiune maximă de serviciu permanent, continuă, ce poate fi aplicată;
- U_{TOV} - Tensiune maximă, ca valoare efectivă a supratensiunilor temporare care pot apărea în instalație (Temporary Over Voltage), mărime importantă în dimensionarea varistorului care este dată de instalație;
- U_r - Tensiune reziduală, reprezintă tensiunea maximă ca valoare de vârf ce se stabilește la bornele varistorului în timpul descărcării unui soc de curent forma de undă 8/20 de amplitudine dată; Obisnuit se da această tensiune pentru curentul nominal de descărcare al varistorului;
- I_N - Curentul nominal; reprezintă valoarea de vârf a curentului de descărcare forma de undă T₁/T₂ 8/20 μs, utilizat pentru testele de verificare ale varistorului;
- I_{max} - Curentul maxim al varistorului; reprezintă valoarea de vârf dată de constructor a unei de soc de curent de descărcare 8/20 μs suportată o singură dată de varistor;
- I_f - Curentul de scurgere reprezintă curentul care se stabilește prin varistor atunci când este alimentat cu tensiunea nominală U_N ;
- N_p - Nivel de protecție; parametru care caracterizează performanțele protecției cu descărcătoare și care este valoarea de vârf a tensiunii celei mai ridicate, admisibilă la bornele descărcătorului în condiții specificate de încercare. În cazul încercării cu tensiuni de impuls normalizate, N_p trebuie să fie superior fiecăreia din valorile următoare [95]:
 - tensiunea maximă de amorsaj la soc de tensiune T₁/T₂ 1,2/50 μs;
 - tensiunea reziduală la curentul nominal de descărcare (ca valoare maximă);
 - tensiunea maximă de amorsare pe fruntea unei împărțite la 1,15;
- N_i - Nivel de izolație; parametru care caracterizează performanțele de izolație ale instalației în care este plasat descărcătorul, definit prin tensiunea de tinere la soc ce corespunde tensiunii de întoarcere a izolației instalației la unde de tensiune 1.2/50 μs;

În figura 5.3 se prezintă, pentru o mai bună explicitare a definițiilor nivelului de protecție (N_p) și nivelului de izolație (N_i), o diagramă $U(t)$. Nivelul de izolație, N_i este o caracteristică a izolației, nivelul de protecție N_p fiind fixat de către utilizator corespunzător unui grad de siguranță dorit. În general coeficientul de siguranță reprezentat prin raportul dintre nivelul de izolație și cel de protecție are valori în jurul lui 1,2.

- Q - Factor de calitate; este utilizabil numai pentru descărcătoare cu ZnO și reprezintă raportul dintre tensiunea reziduală la I_N și tensiunea de prag;

$$Q = \frac{U_r}{U_s} \quad (5.1)$$

Acest factor reflectă calitatea execuției descarcatorului. Performanțele de protecție vor fi cu atât mai bune cu cât acest coeficient este mai apropiat de unitate (cazul ideal). Obisnuit acesta are valori între 1.5 și 2.5 pentru o tensiune reziduală măsurată la un curent nominal de 5 kA.

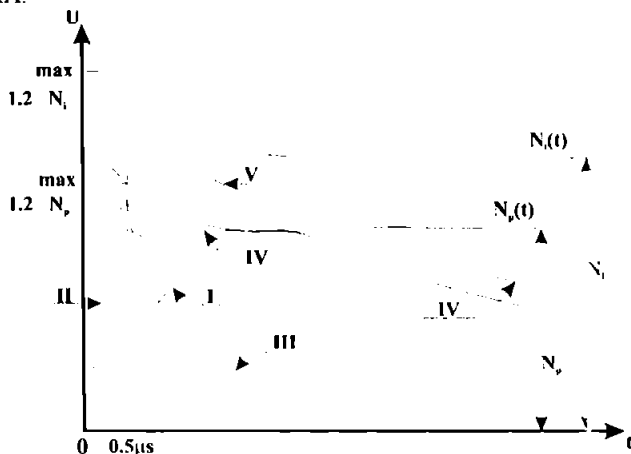


Fig.5.2 Definirea nivelului de protecție. I - undă plină ce nu produce amorsarea echipamentului de protecție; II - undă cu front foarte rapid ce produce acționarea echipamentului de protecție (pentru maxim $1,2 N_p$); III - tensiunea reziduală sigurată de un eclator; IV - tensiunea reziduală a unui descărcător cu rezistență variabilă ; V - nivel de protecție necorespunzător, asigurat de un aparat de protecție (tensiunea de amorsare pe front rapid este superioară la $1,2 N_p$).

- **Ambalarea termica-** Se spune ca varistorul sufera o ambalare termica daca, dupa o functionare de durata care a produs o anumita incalzire a varistorului, curentul care-l traverseaza creste in timp atunci cind varistorul este alimentat cu tensiunea de serviciu, in conditii neschimbate de mediu. Este un fenomen care poate produce distrugerea varistorului, de care trebuie tinut cont atunci cind se face dimensionarea varistorului.

O cuantificare a posibilității apariției fenomenului de ambalare termică este făcută prin coeficientul de utilizare U_c exprimat ca raportul dintre tensiunea nominală și cea de prag:

$$U_c = \frac{U_n}{U_s} \quad (5.2)$$

În condiții ideale de asigurare a răcirii varistorului se poate obține un coeficient de utilizare de până la 0,8 fără riscul apariției ambalării termice; obișnuit însă, acesta are valori sub 0,5. Acesta (U_c) determina de fapt valoarea curentului de ambalare termica in conditii date de mediu, pentru curenti mai mari decit acesta avind loc cresterea necontrolata a curentului si deci si a temperaturii care va duce la distrugerea varistorului

5.3. Influența temperaturii asupra dimensionării varistoarelor cu ZnO

Rolul unui descarcator consta in a disipa energia inmagazinata intr-o unda de supratensiune. În funcționare normală, curentul prin varistor (curentul de scurgere I_f) este foarte mic. La apariția unei supratensiuni, curentul prin varistor crește conducând la pământ sau transformând în căldură energia înmagazinată în unda de supratensiune, limitând astfel conform caracteristicii $I(U)$ tensiunea la bornele sarcinii.

Dimensionarea unui descarcator, consta in gasirea dimensiunilor pastilei ceramice pentru protejarea corespunzătoare a unei instalații avind o tensiune nominală specificată. În cazul supus analizei va fi tensiunea de 600 Vc.c. Ajungerea la aceste date, este rezultatul gasirii celui mai bun compromis între mai multe cerințe contradictorii:

- un consum scăzut de energie în regimul permanent;
- un nivel de protecție de valoare cât mai redusă;
- capacitate ridicată de absorbție a energiei;
- fiabilitate ridicată;
- un pret de cost redus;

Considerind numai factorii electrici de influența dimensionarea consta in gasirea unui compromis între următoarele cerințe:

- pe de o parte pentru regimul tranzitoriu cind acționează , varistorul trebuie să limiteze supratensiunile la o valoare inferioară nivelului de protecție N_p , ceea ce impune o limitare superioară pentru înălțimea pastilei de ZnO (care impune tensiunea de prag);
- pe de alta parte pentru regimul de serviciu permanent, cind fenomenele de îmbătrânire generate de creșterea temperaturii datorită puterii disipate în varistor impun o tensiune de prag minimă , deci o înălțime minimă a pastilei; Astfel se evita riscul ambalării termice în timpul funcționării normale a instalației.

Diametrul pastilei este determinat de curentul și energia ce trebuie disipate de varistor. Pentru o bună disipare a căldurii către mediul ambiant este avantajos un diametru redus [19],[20], și punerea în paralel a mai multor pastile dacă este nevoie. De asemenea îmbunătățirea posibilității de disipare a căldurii prin dispunerea pastilelor pe niște piese radiante este indicată.

În figura 5.3 am prezentat o diagramă cu cele mai importante tensiuni care concurează la stabilirea tensiunii de prag și deci a înălțimii pastilei de ZnO.

Alegerea unei tensiuni de prag ridicate, față de tensiunea nominală a instalației de protejat are ca rezultat o bună stabilitatea termică și o capacitate energetică crescută la acțiunea supratensiunilor temporare (de pînă la cîteva ms) dar poate duce la ridicarea

nivelului de protecție N_p , reducând astfel marja de siguranță la acțiunea supratensiunilor de trasnet, tensiunea limitată de descarcator (de fapt tensiunea reziduală) putând depăși nivelul de izolație N_i . Figura 5.3 ilustrează această cerință, intervalul nehasurat reprezintă fereastra în care va trebui să se afle caracteristica de protecție $I(U)$ a varistorului. Și de aici se poate observa că cu cât coeficientul de neliniaritate este mai mare, cu atât această fereastră poate fi îngustată, ceea ce este caracteristic pentru un varistor de bună calitate.

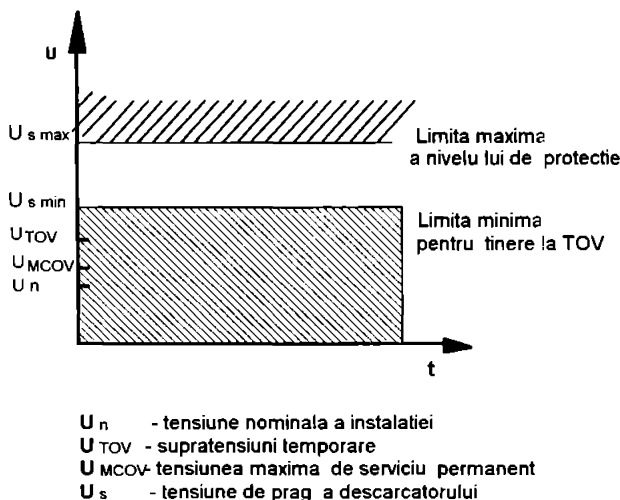


Fig.5.3 Nivele de tensiune necesare delimitării ferestrei pentru tensiunea de prag.

Alegerea unei tensiuni de prag joase va conduce la asigurarea unei bune calități a protecției prin nivelul de protecție (N_p) redus, dar datorită capacității energetice limitate (de disipare redusă a energiei acumulate în undele de supratensiune) există pericolul încălzirii excesive, ce poate conduce la reducerea duratei de viață a descarcatorului, sau chiar la ambalării termice și distrugerii lui.

În regimul normal de funcționare al instalației (absența unei supratensiuni) varistorul ajunge la o anumită temperatură staționară, determinată prin stabilirea echilibrului între puterea produsă prin pierderile Joule-Lentz și cea cedată mediului ambiant sub forma de căldură. Ruperea acestui echilibru generează creșterea temperaturii care produce o creștere a curentului de scurgere prin varistor (de natură termoelectronică), procesul repetându-se în avalanșă definind astfel ambalarea termică. Trecerea din starea stabilă termică în starea instabilă se poate face în două moduri :

- în regim permanent prin creșterea temperaturii mediului ambiant sau prin creșterea tensiunii de alimentare a sarcinii;

- in regim tranzitoriu , energia din undele de supratensiune produce o crestere rapida si pronuntata a temperaturii; daca aceasta ramine inferioara unei anumite limite, caldura degajata poate fi evacuata, varistorul se raceste progresiv si temperatura revine la o valoare stabila; daca insa temperatura depaseste o valoare anume de prag, (de exemplu datorita unor socuri de tensiune care se succed la intervale scurte de timp) apare ambalarea termica.

In continuare va fi nuantata notiunea de ambalare termica prin prisma stabilirii unui prag al curentului de la care este posibila cresterea lui necontrolata.

Pentru stabili aceasta valoare voi porni de la ecuatia diferentiala a bilantului termic (5.3) pentru un conductor cilindric de diametru “d” si inaltime “h”, cu care poate fi asimilat varistorul:

$$\frac{d\tau}{dt} + \left(\frac{\alpha_{\Sigma} \cdot l_p}{c_1 \cdot A} - \frac{\rho_a \cdot \alpha_R \cdot J^2}{c_1} \right) \cdot \tau = \frac{\rho_a \cdot J^2}{c_1} \quad (5.3)$$

in care:

$\tau = \theta - \theta_a$ – supratemperatura varistorului la un moment dat;

θ_a – temperatura mediului ambiant;

θ – temperatura varistorului la un moment oarecare;

α_{Σ} – transmisivitatea termica globala ce tine cont de convecție si radiatie;

c_1 – caldura specifica volumica a varistorului;

ρ_a – rezistivitatea varistorului la temperatura mediului ambiant luata ca o valoare medie pentru functionarea varistorului la o tensiune in jurul celei nominale U_n

α_R – coeficientul de variatie al rezistivitatii cu temperatura;

A – aria sectiunii transversale;

l_p – lungimea perimetrului varistorului ($l_p = \pi d$);

J – densitatea de curent prin varistor.

- a) In conditiile in care rezistivitatea nu variaza cu temperatura ($\alpha_R=0$), ecuatia de bilant termic devine:

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot l_p}{c_1 \cdot A} \cdot \tau = \frac{\rho_a \cdot J^2}{c_1} \quad (5.4)$$

solutia fiind :

$$\tau = \tau_{sa} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (5.5)$$

in care :

$$\tau_{sa} = \frac{\rho_a \cdot J^2 \cdot A}{\alpha_{\Sigma} \cdot l_p} \quad (5.6)$$

si

$$T = \frac{c_l \cdot A}{\alpha_{\Sigma} \cdot l_p} \quad (5.7)$$

τ_{sa} – supratemperatura maxima de regim permanent, stabilizat, corespunzatoare unei anumite densitati de curent J;

T – constanta termica de timp a varistorului.

b) Daca $\alpha_R \neq 0$, solutia ecuatiei (5.3) va fi :

$$\tau = \tau_s \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\tau}}} \right) \quad (5.8)$$

$$\tau_s = \tau_{sa} \cdot \frac{l}{l - \alpha_R \cdot \tau_{sa}} \quad (5.9)$$

unde τ_s reprezinta temperatura stationara in regimul stabilizat daca se tine cont si de variatia rezistivitatii cu cresterea temperaturii.

$$T_{\tau} = \frac{T}{1 - \alpha_R \cdot \tau_{sa}} = \frac{c_l}{\rho_a \cdot J^2} \cdot \frac{\tau_{sa}}{1 - \alpha_R \cdot \tau_{sa}} \quad (5.10)$$

Analizand relatiile (5.9) si (5.10) se constata ca exista o densitate de curent critica J_{cr} rezultata din conditia de anulare a numitorului acestor relatii:

$$l - \alpha_R \cdot \tau_{sa} = 0 \quad (5.11)$$

ce presupune ca coeficientul lui τ din (5.3) sa fie nul sau

$$\frac{\alpha_{\Sigma} \cdot l_p}{c_l \cdot A} - \frac{\rho_a \cdot \alpha_R \cdot J_{cr}^2}{c_l} = 0 \quad (5.12)$$

$$J_{cr} = \sqrt{\frac{\alpha_{\Sigma} \cdot l_p}{\rho_a \cdot \alpha_R \cdot A}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \alpha_{\Sigma}}{\alpha_R \cdot \rho_a \cdot d}} \quad (5.13)$$

ecuatia bilantului termic devenind:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\rho_a \cdot J_{cr}^2}{c_l} \quad (5.14)$$

care are solutia:

$$\tau(t) = \frac{\rho_a \cdot J_{cr}^2}{c_l} \cdot t \quad (5.15)$$

Aceasta reprezintă ecuația unei drepte ce trece prin origine, deci pentru un timp de funcționare nelimitat, teoretic temperatura varistorului va crește la această densitate (J_{cr}) a curentului aplicat la o valoare infinită.

$$\frac{\rho_a \cdot J_{cr}^2}{c_1} \cdot t - \text{se numește intensitate de încălzire.}$$

J_{cr} – densitatea de curent critică este o mărime specifică, strict definită pentru fiecare varistor.

Pentru $J < J_{cr}$, temperatura maximă în regim stabilizat τ_s va obține valori finite, pozitive, date de relația (5.9), dependente de valoarea curentului, acesta fiind determinat de tensiunea nominală a instalației sau altfel spus de factorul de utilizare $U_c = \frac{U_n}{U_s}$ al varistorului.

Dacă

$$1 - \alpha_R \cdot \tau_s < 0, \text{ adică } J > J_{cr} \quad (5.16)$$

soluția ecuației (5.3) va fi o exponentială rapid crescătoare de forma :

$$\tau = \tau_{max} \cdot \left(e^{\frac{t}{T_+}} - 1 \right) \quad (5.17)$$

cu

$$\tau_{max} = \frac{\tau_{sa}}{\alpha_R \cdot \tau_{sa} - 1} \quad (5.18)$$

și

$$T_+ = -T_\tau = \frac{\tau_{sa}}{\alpha_R \cdot \tau_{sa} - 1} \cdot \frac{c_1}{\rho_a \cdot J^2} \quad (5.19)$$

Reprezentarea supratemperaturii pentru cazurile mai sus menționate este prezentată în fig. 5.4 pentru valori concrete ale lui J , după determinarea densității de curent critică.

Analizând expresia densității critice de curent J_{cr} dat în (5.12) se poate concluziona că valoarea lui este influențată numai de condițiile de evacuare a căldurii prin modificarea lui α_s sau prin modificarea diametrului d al pastilei de ZnO.

Densitatea critică va fi aceeași pentru toate seriile de varistoare fabricate având același diametru, diferind însă energia care poate fi absorbită prin volumul diferit pe care-l au (prin înălțimea diferită a pastilelor de ZnO).

În condiții normale de răcire, la un $\alpha_s = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{grad}^{-1}$, cunoscând din rezultatele experimentale obținute la LGET [18],[19],

$$c_1 = 2.9 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{grad}^{-1};$$

$$\rho_a = 2 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{m};$$

$$\alpha_R = 5 \cdot 10^{-3} \text{ grad}^{-1};$$

densitatea de curent critica, calculata cu relatia (5.12) va fi

$$J_{cr} = 3.16 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2};$$

Acestei densitati de curent ii corespunde (pentru varistoarele fabricate care au un diametru $d = 4 \text{ cm}$), la aplicarea unei tensiuni continue de durata, curentul de ambalare termica :

$$I_{amb} = J_{cr} \cdot A \cong 4 \text{ mA}$$

Aceasta valoare este superioara celei constatate experimental, la curenti ce depasesc 1 mA observindu-se o crestere continua , necontrolata a curentului

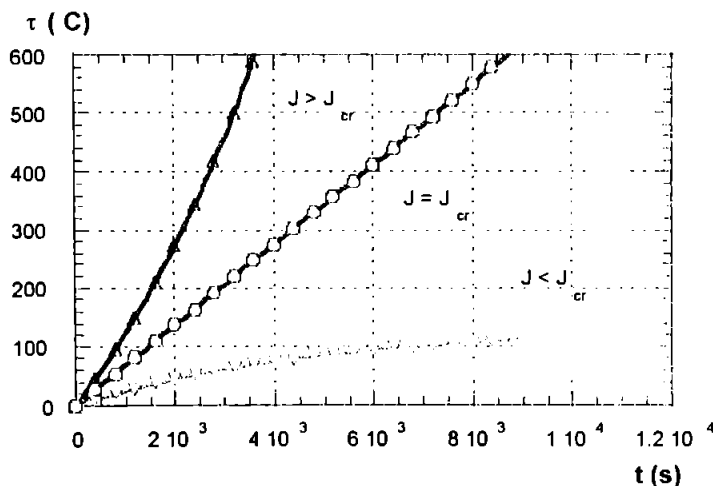


Fig.5.4 Dependenta supratemperaturii $\tau - t$ a varistorului, cu J parametru;

$$J_{cr} = 3.16 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}; J < J_{cr} (J = 2 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}); J > J_{cr} (J = 4 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2});$$

Cunoscind valoarea J_{cr} , si valorile constantelor de material ale varistoarelor fabricate, din relatia (5.15) rezulta ecuatia supratemperaturii in regimul limita :

1) Pentru $J = J_{cr} = 3.16 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$, particularizind relatia (5.15):

$$\tau(t) = 6.88 \cdot 10^{-2} \cdot t \tag{5.20}$$

2) Pentru $J < J_{cr}$, am ales o valoare de $J = 2 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ ce determina un curent prin varistor $I = 2.5 \text{ mA}$. Pentru acest curent varistorul nu se ambaleaza termic dar temperatura lui de regim stationar va fi destul de ridicata ($133 \text{ }^\circ\text{C}$). Ecuatia temperaturii particularizind relatia (5.8) a rezultat :

$$\tau(t) = 133 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{4830}} \right) \quad (5.21)$$

2) Pentru $J > J_{cr}$, am ales o valoare de $J = 4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ ce determina un curent prin varistor $I = 5 \text{ mA}$. Pentru acest curent varistorul se ambaleaza termic. Ecuația temperaturii, particularizind relația (5.17) a rezultat :

$$\tau(t) = 533.3 \cdot \left(e^{\frac{t}{4833}} - 1 \right) \quad (5.22)$$

Reprezentarea supratemperaturii corespunzătoare celor trei cazuri posibile de variație ale temperaturii (fig. 5.4) indica faptul ca atunci cand este indeplinita condiția (5.16) sau limita (5.11), temperatura conductorului parcurs in regim de lunga durata (corespunzator funcționării normale a instalației cand varistorul este alimentat cu tensiunea U_n nominala a instalației) de un curent cu o densitate superioara valorii critice ($J \geq J_{cr}$) poate atinge valori teoretic infinite. Aceasta comportare descrisa de curbele $J = J_{cr}$ si $J > J_{cr}$ din fig. 5.4 corespunde fenomenului de ambalare termica pentru regimul nominal de funcționare a instalației .

O a doua posibilitate de aparitie a ambalării termice este prin descarcarea in varistor a energiei din undele de supratensiune. Sub acțiunea curenților de descarcare, produși de supratensiuni, solicitarea termica a pastilei varistorului se caracterizeaza prin urmatoarele particularitati :

- Densitate de curent mare, mult superioara celei din regimul nominal de funcționare cind este supus numai la tensiunea nominala a instalației;
- Procesul de suprasarcina este de scurta durata, curentul de descarcare prin varistor fiind redus la valoarea curentului de scurgere I_f (la U_n) dupa eliminarea unde de supratensiune.
- Variația curentului in timp este complexa si are loc intr-un interval scurt de timp;
- Rezistența , si deci rezistivitatea varistorului variaza in limite foarte largi (citeva ordine de marime) in timpul descarcării;

Acest regim in care varistorul preia din retea undele de supratensiune poate fi asimilat funcționării unui conductor in regim de scurtcircuit, varistorul fiind parcurs un interval scurt de timp de un curent foarte mare. Temperatura initiala de la care evolueaza procesul este cea corespunzatoare regimului nominal al instalației

Datorita mai ales faptului ca rezistența variaza in limite largi in timpul procesului , o modelare matematica nu este oportuna, conducind la valori teoretice mult departate de realitate, influentate de erorile introduse prin considerarea unor marimi medii echivalente.

Pentru a pune în evidență metodele de reducere a riscului ambalării termice, voi prezenta o diagrama de variație a puterii dezvoltate în varistor prin efect Joule-Lentz (P_{dez}) și a puterii disipate prin convecție și radiație de varistor (P_{dis}) în funcție de temperatura (θ) (figura 5.5).

$$P_{dez} = U \cdot I = U \cdot A(U) \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{q_e \phi(U)}{k \cdot T}} \quad (5.23)$$

$$P_{dis} = \alpha_{\Sigma} S_1 (\theta - \theta_a) \quad (5.24)$$

- cu :
- S_1 - suprafața de disipare a puterii;
 - $\phi(U)$ - înălțimea barierei de potențial ca funcție de tensiunea aplicată;
 - q_e - sarcina electronului;
 - T - temperatura absolută;
 - k - constanta lui Boltzman

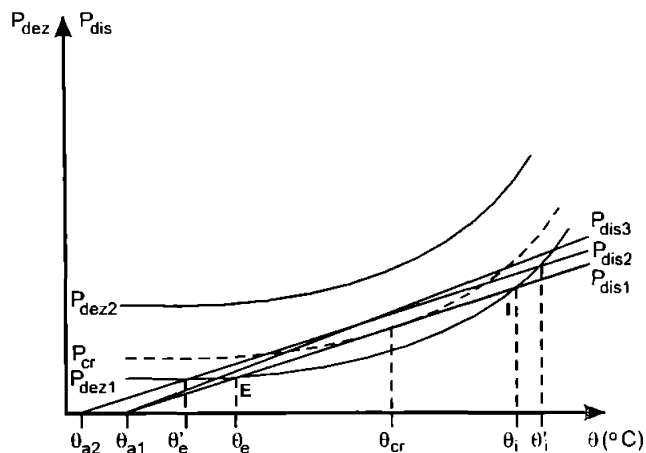


Fig.5.5. Echilibrul termic al unui varistor;

Analizând situațiile posibile referitor la poziția relativă a celor două grafice putem avea următoarele situații cu semnificația lor fizică :

- două puncte de intersecție E și I (P_{dez1} cu P_{dis1}), acestea fiind corespunzătoare temperaturii normale de funcționare de echilibru (θ_e) și temperaturii maxime de stabilitate termică (θ_i). La echilibru temperatura varistorului este θ_e , foarte apropiată de temperatura mediului ambiant (θ_{a1}), curentul ce trece prin varistor fiind de ordinul μA (valoare constatată experimental). 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 ce corespunde temperaturii θ_i , pînă la acest punct,

puterea disipată fiind mai mare decât cea produsă, varistorul se răcește și revine la punctul stabil de funcționare din θ_c (după descărcarea undei de supratensiune); dacă se depășește însă temperatura θ_i , aceasta va crește progresiv având loc ambalarea termică. Acest fapt se petrece pentru unde de supratensiune ce înmagazinează o cantitate mare de energie, situație specifică supratensiunilor tranzitorii de comutație ce se succed la intervale scurte de timp, sau celor atmosferice în timpul unei furtuni.

- un singur punct de intersecție (P_{cr} și P_{dez1}), la limita celor 2 puncte de intersecție dintre puterea disipată și cea dezvoltată în varistor suprapunându-se; acest unic punct corespunde temperaturii limita 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 $U_c \approx 0.8$; 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.
- cele două grafice nu au puncte comune, caz în care puterea disipată este tot timpul mai mică decât cea produsă în regim permanent deci este un regim de ambalare termică, este cazul curbei P_{dez2} corespunzătoare unui coeficient de utilizare U_c superior unității.

Ecartul de temperatură $\Delta\theta_{max} = \theta_i - \theta_c$ între punctele de intersecție a celor două curbe, ce caracterizează echilibrul stabil și instabil (θ_c, θ_i), corespunde încălzirii maxime ce poate fi suportată de varistor produsă de socuri de supratensiune. Varistorul este cu atât mai stabil termic cu cât $\Delta\theta_{max}$ este mai mare. Se constată din grafic că acest lucru se poate obține prin:

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

$$\Delta\theta_{max} = \theta_i - \theta_c \quad (5.25)$$

se mărește și el la:

$$\Delta\theta'_{max} = \theta'_i - \theta'_c \quad \text{cu} \quad \Delta\theta'_{max} > \Delta\theta_{max} \quad (5.26)$$

prin aceasta mărindu-se capacitatea de absorbție de energie a varistorului.

Realizarea acestui deziderat se face prin plasarea descărcătorului în spații lipsite de surse de căldură sau expuse la acțiunea razelor solare.

- Îmbunătățirea schimbului termic cu exteriorul, puterea disipată P_{dis} va crește (curba P_{dis2}). Acest lucru se face prin îmbunătățirea transmisivității termice globale prin plasarea unor distanțori metalici între pastilele de ZnO, aceștia comportându-se ca niște radiatoare.
- Micșorând puterea produsă în varistor în regimul permanent. Aceasta se poate realiza prin creșterea tensiunii de prag (adică micșorarea coeficientului de utilizare U_c) cu influența directă în ridicarea nivelului protecție N_p , deci trebuie ajuns la un compromis pentru obținerea soluției optime.

Pentru o ilustrare cantitativă a acestor posibilități de creștere a capacității energetice a varistorului, voi aminti rezultatele practice obținute la LGET [20].

În figura 5.6. se prezintă dependența dintre temperatura de echilibru stabil a eșantionului θ_c în funcție de coeficientul de utilizare U_c determinată pentru mai multe valori ale temperaturii mediului ambiant. Din acest grafic se poate observa că pentru temperaturi ale mediului ambiant de 30-50 °C se poate merge cu un coeficient U_c de până la 0,8 în regim nominal, dar dacă se ține cont de posibilitatea unor supratensiuni de energie ridicată sau o creștere a temperaturii mediului ambiant, trebuie redus U_c până la valori inferioare lui 0,5, adică tensiunea nominală a instalației trebuie să fie cel mult jumătate din tensiunea de prag U_s .

$$U_n < 0.5 U_s \quad (5.27)$$

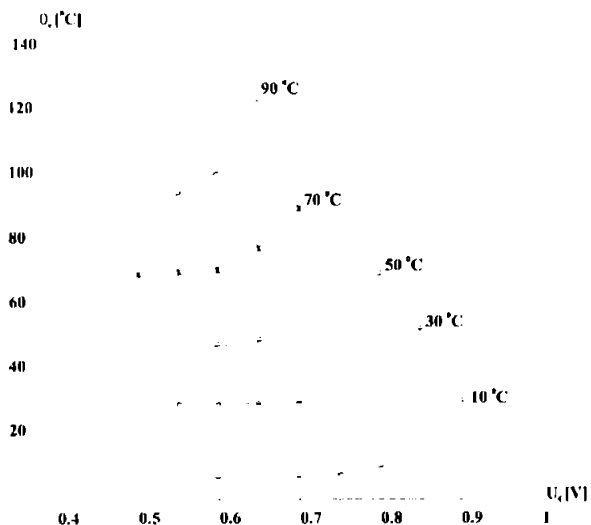


Fig.5.6. Temperatura de echilibru stabil în funcție de coeficientul de utilizare U_c la diverse temperaturi ale mediului ambiant.

În funcție de tipul solicitărilor din instalație, tensiunea de prag se alege ca un compromis între nivelul de protecție și această dimensionare termică, prevalând factorul cu cea mai mare importanță și influență. În cazul aplicației avute în vedere, date fiind condițiile specifice :

- situarea într-o zonă cu nivel de keraunicitate scăzut; rețeaua fiind în interiorul orașului, ceea ce face mai puțin probabilă apariția unor socuri de tensiune de mare amplitudine care să conducă la depășirea nivelului de protecție;

- instalația de tracțiune este sediul unui număr mare de manevre ce produc supratensiuni de mai mică amplitudine și energie, am considerat mai important criteriul stabilirii tensiunii de prag la o valoare mai ridicată pentru mai bună stabilitate termică în regimul permanent și deci o premisa a unei durate de viață mai mari. Precizez că prin aceasta nu sunt afectate performanțele electrice ale protecției, tensiunea reziduală și deci nivelul de protecție (N_p) având o creștere redusă ca urmare a ridicării tensiunii de prag. Acest fapt va fi evidențiat de rezultatele testelor de verificare la care vor fi supuse varistoarele fabricate.

5.4 Stabilirea ferestrei de acțiune și prezentarea parametrilor caracteristici ai varistoarelor fabricate pentru protecția instalațiilor de tracțiune urbană

Posibilitatea unei dimensionări optime, în afara de considerentele teoretice prezentate în paragraful anterior, depinde de modul în care solicitările reale la care vor fi supuse varistoarele sunt cunoscute sau pot fi estimate. În lipsa unor standarde specifice domeniului tracțiunii în curent continuu, am estimat prin comparație cu normele internaționale și ale altor țări (Franța) principalele solicitări ce pot apărea în aceste instalații. O mare importanță o au și condițiile reale de serviciu, complexitatea problemelor care se manifestă în instalație făcând imposibilă existența unei proceduri de dimensionare standard. De aceea, în continuare în figura, 5.7 voi prezenta succint o diagramă simplificată a nivelelor tensiunilor, cu precizarea valorilor lor în scopul dimensionării pastilei de ZnO pentru protecția substațiilor de tracțiune urbană cu $U_n=600$ V. Chiar acest nivel de tensiune este nestandardizat (valoarea standard - 750V), fiind însă tolerat și acceptat datorită ariei largi internaționale de răspândire, cu implicațiile în ceea ce privește echipamentele de comutație și protecție ce echipează instalațiile.

Semnificația acestor tensiuni a fost prezentată în paragraful anterior;

Obiectivul propus de reducere a nivelului de izolație de la 7.2 kV cit este actual, la 3.6 kV [24], va permite o mai mare siguranță în exploatare, creșterea duratei de viață a izolației în special a cablurilor electrice și reducerea unor distanțe de izolație. Această cerință, care este de fapt cea mai importantă, presupune pentru varistoarele fabricate obținerea unei tensiuni reziduale maxime de până la $N_p=3$ kV la un curent de descărcare egal cu cel nominal propus ($I_n=5$ kA). O caracteristică $I(U)$ ce satisface acest obiectiv este reprezentată în fig 5.7.

Această caracteristică nu este însă unică, în fereastra de acțiune putându-se încadra caracteristici aparținând unor varistoare diferite. Acestea vor fi determinate de tehnologia de fabricație, alegerea unciilor din variante făcându-se în funcție de condițiile specifice de la locul de instalare.

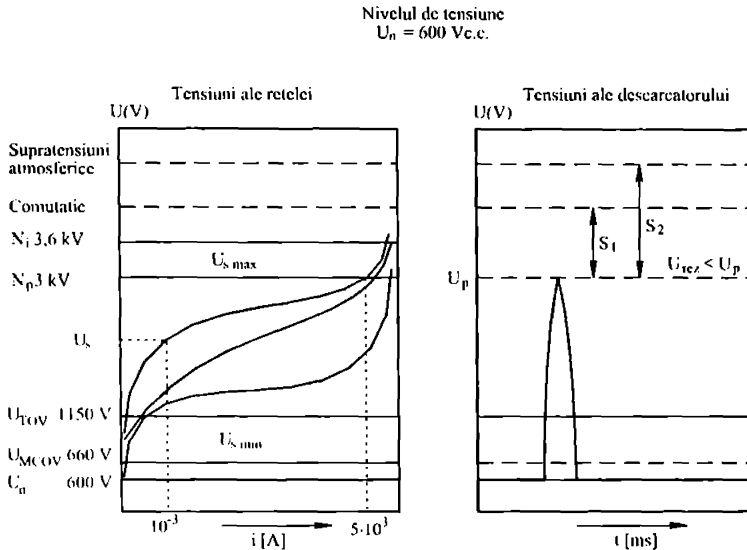


Fig.5.7 Diagrama de delimitare a ferestrei de acțiune a varistorului
 $U_{MCOV}=1.1 U_n=660 \text{ V}$ și $U_{TOV}=1.73 U_{MCOV}\cong 1150 \text{ V}$

- S_1 - este un factor al supratensiunilor de comutație ; în lipsa descărcătorului acestea pot atinge un nivel de 4-5 ori tensiunea nominală ;
- S_2 - este un factor al supratensiunilor datorate trasnetului; în lipsa descărcătorului acestea pot atinge valori de ordinul zecilor de kV;

Datorită duratei scurte a acestor supratensiuni ,se accepta depășirea nivelului de protecție fără ca aceasta să genereze producerea de defecțe.

Pentru încadrarea caracteristicii de protecție în această fereastră (între U_{TOV} și N_p) destul de strîmtă, varistorul trebuie să prezinte o caracteristică $I(U)$ abruptă caracterizată de un coeficient de neliniaritate cât mai mare. Acest deziderat nu poate fi asigurat de descărcătoarele cu SiC.

- I_n - 5 kA (această valoare este actualmente de 2.5 kA)
- I_{max} - 40 kA

Tensiunea de prag cea mai potrivită pentru pastila de ZnO, luînd în considerare cele prezentate mai sus, care se dorește a fi obținută este cuprinsă în intervalul:

- U_s - 1200 - 1700 V; această valoare asigură o bună stabilitate termică (obisnuit raportul $0,3 \leq \frac{U_n}{U_s} \leq 0,5$), și creează premisele asigurării nivelului de protecție propus, în urma testelor de verificare acest fapt va fi confirmat (rezultatele experimentale vor fi prezentate în capitolul 7).

Fixând tensiunea de prag U_s și cunoscând granulația pulberii de sinterizare (diametrul mediu $d_{g\ med}$), prin aplicarea relațiilor (4.4) – (4.7), va rezulta înălțimea h a pastilelor de ZnO:

$$h = \frac{U_s}{V_{bi}} \cdot d_{g\ med} \quad (5.28)$$

iar apoi masa de substanță necesară :

$$m = \rho_d \cdot V = \rho_d \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot h \quad (5.29)$$

în care: ρ_d – densitatea teoretică a pastilei de ZnO; d – diametrul pastilei de ZnO.

Întrucât diametrul granulelor variază în limite destul de largi, relațiile (5.28), (5.29) oferă o valoare orientativă pentru înălțimea pastilei (h) și masa de pulbere (m) necesară pentru un varistor, valoarea exactă rezultând experimental.

Pe baza acestor date și a rețetei de compoziție prezentate în anexa 1, am fabricat, în cadrul LGET pastilele de ZnO, conform tehnologiei prezentate în capitolul 4.

Pentru o mai bună acoperire experimentală a gamei de tensiuni de prag din intervalul stabilit am fabricat patru serii de câte 10 varistoare pentru care în tabelul 5.1 se prezintă principalii parametri fizici.

Tabel 5.1

Parametrii electrici și dimensionali ai varistoarelor fabricate

	U_s [V]	m_i [g]	h_i [mm]	d_i [mm]	m_f [g]	h_f [mm]	d_f [mm]
seria A	1000	42	7,5	48	38	5,6	40
seria B	1200	50	8,7	48	45	6,6	40
seria C	1400	55	9,6	48	50	7,4	40
seria D	1650	65	11,8	48	60	9,2	40

în care :

- U_s - tensiunea de prag la 1 mA;
- m_i - masa de substanță (pulbere) folosită pentru formarea esantioanelor;
- m_f - masa de substanță finală după tratamentul termic;
- d_i, d_f - diametrul pastilei de ZnO înainte și după tratamentul termic;
- h_i, h_f - înălțimea (grosimea) pastilei înainte și după tratamentul termic;
- $\rho_f \cong 5,4 \text{ g/cm}^3$ - densitatea varistoarelor după sinterizare. Această valoare este apropiată de valoarea teoretică ($\rho_f \cong 5,7 \text{ g/cm}^3$)

Observația care trebuie făcută este că oricare din esantioanele ultimelor (B, C, D) trei serii pot fi folosite în instalația de tracțiune, realizând o tăiere bună a supratensiunilor,

diferența fiind în durata de viață (prin riscul mai ridicat al ambalării termice pentru cele cu tensiune de prag mai scăzută) și nivelul de protecție asigurat de fiecare, conform celor prezentate anterior.

Luând în considerare faptul că instalația de tracțiune este sediul unui număr mare de manevre, deci în instalație se manifestă multe supratensiuni tranzitorii de comutație care sunt și cele mai periculoase prin energia pe care o transportă, cea mai potrivită alegere este seria D, care satisface obiectivul asigurării unui nivel de protecție $N_p=3$ kV la un $I_n = 5$ kA, și va avea durata de viață cea mai ridicată prin posibilitatea disipării unor energii de 2-3 kJ.

În continuare voi analiza comparativ toate seriile de varistoare fabricate pentru evidențierea unor caracteristici generale dar și aspectele particulare. În capitolele următoare voi face o analiză critică a metodelor de testare și caracterizare a stării de degradare a varistoarelor fabricate după ce au fost supuse la diverse solicitări, și voi prezenta rezultatele experimentale ale caracterizării electrice.

În acest capitol am stabilit caracteristicile electrice principale (I_n , U_s , N_p , I_{max}) pe care trebuie să le aibă varistoarele cu ZnO ce vor fi fabricate pentru a satisface cerințele protecției la supratensiuni din instalația de tracțiune electrică urbană.

Au fost prezentați factorii de influență (nivelul de protecție și ambalarea termică) între care trebuie făcut un compromis pentru o dimensionare optimă. Pentru aceasta a fost definit teoretic fenomenul de ambalare termică, iar apoi, prin calcul, am determinat densitatea de curent critică - relația (5.13) - și curentul de ambalare termică la funcționarea de durată (4 mA).

Aceste caracteristici au rezultat în urma unei analize critice, originale, care a scos în evidență punctele slabe ale protecției existente și a indicat printr-o analogie și aliniere cu standardele internaționale, valorile pe care vor trebui să le aibă principalele mărimi electrice (U_s , I_n , U_{te} , N_p , N_i) ale varistoarelor cu ZnO destinate să realizeze protecția la supratensiuni în instalațiile de tracțiune electrică urbană cu $U_n=600$ V.

Pornind de la nivelul de protecție și curentul nominal ce se dorește a fi asigurate, cunoscând granulația pulberii și procesul tehnologic de fabricație am stabilit dimensiunile fizice ale varistorului și cantitatea de pulbere necesară fabricației unui varistor.

Pentru acoperirea ferestrei de acționare am fabricat 4 serii de varistoare cu parametrii electrice diferiți (U_s , U_{te}) în scopul realizării unui studiu mai larg care să surprindă atât aspectele general valabile cât și pe cele specifice fiecărei serii.

Principalele contribuții originale se referă la:

- analiza critică a performanțelor protecției actuale și evidențierea punctelor slabe ale acestora;
- studiul bibliografic și precizarea parametrilor și terminologiei specifice noilor tipuri de descărcătoare cu ZnO;

- sistematizarea și precizarea factorilor ce concură la o dimensionare adecvată a descărcătoarelor cu ZnO;
- definirea teoretică a fenomenului de ambalare termică (fig. 5.4.) și determinarea prin calcul a densității de curent critice.
- stabilirea parametrilor electrici ai varistoarelor cu ZnO destinate protecției instalațiilor de tracțiune cu $U_n=600$ V;
- realizarea celor patru serii de varistoare cu tensiunile de prag de 1000 V; 1200 V; 1400 V; 1650 V;
- evidențierea performanțelor superioare ce se urmăresc a fi asigurate de noua variantă de protecție:
 - Coborârea nivelului de izolație al instalației (N_i) de la 7,2 kV la 3,6 kV;
 - Creșterea curentului nominal (I_n) de la 2,5 kA la 5 kA;
 - Dimplificarea constructivă a descărcătorului prin eliminarea eclatorului
 - Creșterea capacității energetice;
 - Reducerea prețului de cost al descărcătorului.

Accestea vor fi confirmate în urma caracterizării electrice făcute în capitolul 7.

CAPITOLUL 6

MODELE TEORETICE, ALGORITMI DE PRELUCRARE A DATELOR, INSTALAȚIILE DE MĂSURARE UTILIZATE PENTRU STUDIUL EXPERIMENTAL AL VARISTOARELOR CU ZnO

În acest capitol voi prezenta metodele pe care le-am utilizat pentru caracterizarea experimentală a varistoarelor, aparatura și instrumentele de măsură, programele concepute în scopul prelucrării datelor experimentale. Studiul l-am făcut pentru toate seriile de varistoare fabricate, prezentând unitar problemele comune și evidențiind pe cele specifice.

Metoda clasică de apreciere a varistoarelor, se bazează pe ridicarea caracteristicii $I(U)$. O a doua metodă, mai recentă și mai puțin folosită datorită dificultăților în ceea ce privește măsurarea și prețul aparatelor ce pot realiza aceste măsurători, este studiul impedanței complexe a varistorului.

În cele ce urmează voi prezenta ambele metode în scopul stabilirii unor criterii de apreciere a stării varistoarelor urmînd ca datele experimentale și modelele fizico-matematice stabilite pe baza acestora să fie apoi utilizate în simularea comportării varistorului atunci cînd este supus la diverse solicitări electrice. Instalațiile de încercare ce vor fi prezentate în continuare fac parte din dotarea laboratorului LGET. În cadrul acestui laborator am fabricat seriile de varistoare pe care apoi le-am supus testelor și încercărilor.

6.1. Ridicarea experimentală a caracteristicii $I(U)$ a varistorului

Conform celor prezentate în capitolul 4, caracteristica $I(U)$ are 3 zone specifice, caracterizate de proprietăți diferite. În mod corespunzător, măsurătorile și aparatele folosite, trebuie adaptate acestor cerințe specifice. De asemenea măsurătorile trebuie făcute fără riscul ambalării termice și distrugerii esanțioanelor.

Astfel, pentru zonele I caracterizată prin curenți slabi, măsurătorile se vor face în curent continuu cu tensiuni pînă la cea de prag (U_s), fără precauții speciale. Pentru valori ale tensiunii aplicate superioare acestei valori, trebuie luate măsuri pentru a nu depăși limita de stabilitate termică. Energia disipată în varistor fără pericolul distrugerii poate să ajungă obișnuit la valori de pînă la 400 J/cm^3 , [18, 88] mult mai mare decît la cele cu SiC. În zonele II și III, din fig.4.1., caracterizate de curenți de valoare ridicată, unde de curent sau tensiune necesare măsurătorile vor fi obținute cu ajutorul unor generatoare de impulsuri (de soc), schemele electrice și principiul de funcționare al acestora fiind prezentate în cele ce urmează.

6.1.1. Masurarea $I(U)$ la curenti mici in curent continuu

Masurarea consta in determinarea curentului de conductie ce trece prin varistor la diverse valori ale tensiunii continue aplicate la bornele varistoarului. Schema electrica de masurare este prezentata in fig.6.1.

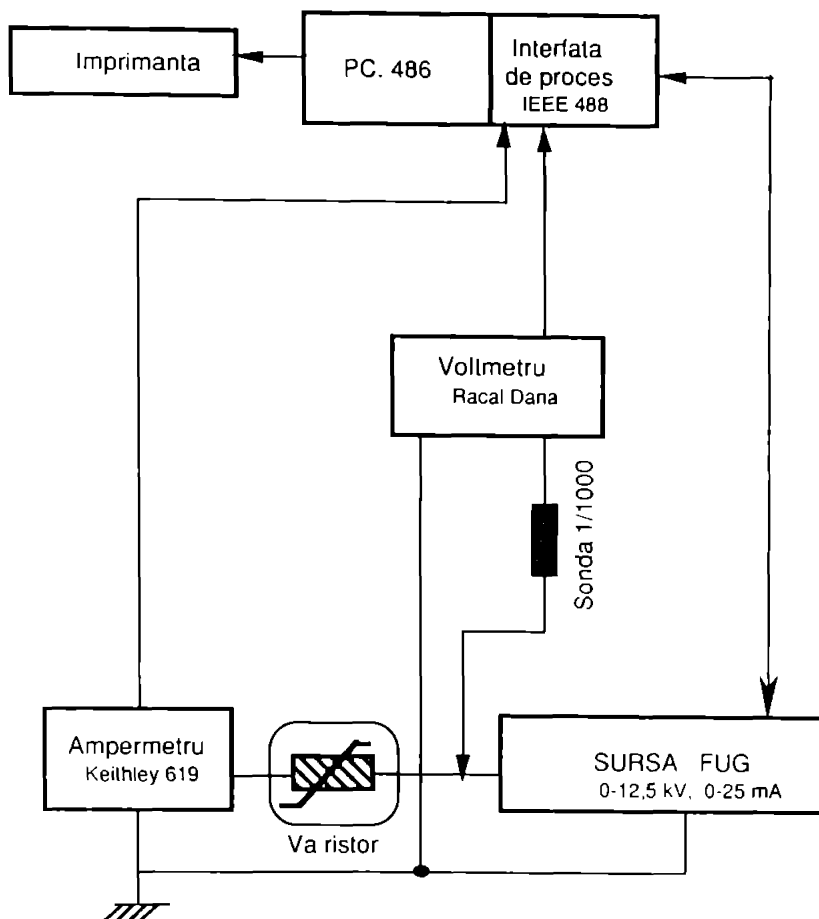


Fig.6.1 Schema de masurare a caracteristicii $I(U)$ la curenti mici

Elementele schemei de masurare sint :

- o sursa de tensiune continua programabila FUG-HP 64488 ce poate debita o tensiune continua între 0 - 12.5 kV si un curent de pina la 25 mA.

- un electrometru Keitley 619 care permite măsurarea curenților de la $1.9 \cdot 10^{-9}$ - $19.9 \cdot 10^{-3}$ A cu o rezoluție maximă de $1 \cdot 10^{-12}$ A, și 0.5 % clasa de precizie.
- Un voltmetru cu memorie (Racal Dana 6000) ce măsoară tensiunea cu ajutorul unei sonde 1/1000, clasa de precizie voltmetru - sonda fiind 0.1 %.

Inregistrarea curbei este făcută în felul următor: se crește în trepte tensiunea cu valori ΔU într-un interval de timp Δt . Măsuratoarea este făcută cu o anumită întârziere pentru a se stabiliza curentul și a se amortiza curentul tranzitoriu de polarizare. Timpul de atenuare a componentei tranzitorii este de câteva minute pentru curenții mai mici de $1 \mu\text{A}$ și de ordinul secundelor pentru curenții de ordinul mA, corespunzător tensiunilor în jurul celei de prag (U_s).

De exemplu caracteristicile $I(U)$ pentru primele trei serii de varistoare sunt prezentate în figura 6.2.

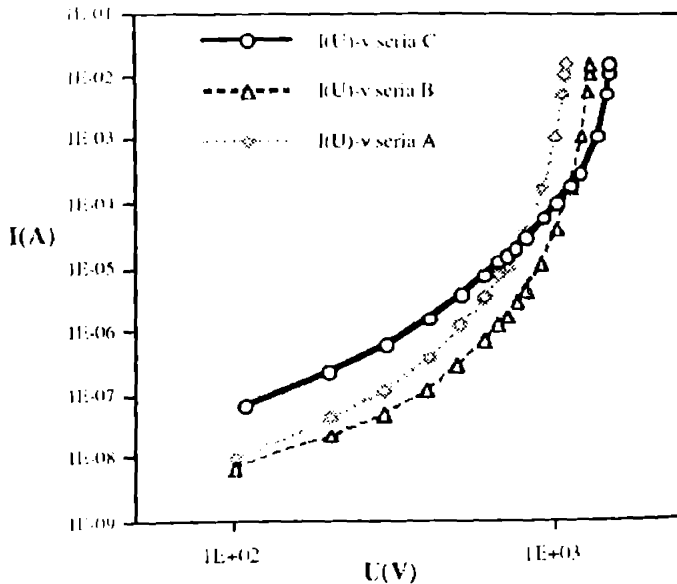


Fig. 6.2 Caracteristica $I(U)$ pentru cele trei serii de varistoare în starea inițială

Pentru fiecare serie au fost caracterizate câte 5 varistoare, reproductibilitatea caracteristicilor electrice fiind bună. Prezentarea se va face în cele ce urmează pentru câte un varistor din fiecare serie. Principalele caracteristici electrice ale seriilor de varistoare sunt prezentate în tabelul 6.1.

Tabel 6.1
 Proprietățile seriilor A,B,C de varistoare

	U_s [V]	I_f [A]	U_{rez} [V]	Q	U_c
Seria A	1000	$3 \cdot 10^{-6}$	1750	1.75	0.6
Seria B	1200	$0,7 \cdot 10^{-6}$	2080	1.73	0.5
Seria C	1400	$9 \cdot 10^{-6}$	2580	1.84	0.43
Seria D	1650	$0,6 \cdot 10^{-6}$	2860	1,73	0.36

- in care :
- U_s - tensiunea de prag la 1 mA
 - I_f - curentul de scurgere la $U_n = 600$ V
 - U_{rez} - tensiunea reziduala la trecerea unui curent $I_n = 5$ kA prin varistor
 - $Q = \frac{U_{rez}}{U_s}$ -factorul de calitate
 - $U_c = \frac{U_n}{U_s}$ - coeficientul de utilizare

Seriile au fost executate cu tensiuni de prag diferite pentru a avea la dispoziție mai multe variante de varistoare cu tensiuni de prag în cadrul ferestrei de acționare prezentate în figura 5.7. Prima serie a rezultat cu o tensiune de prag $U_s=1000$ V, mai redusă decât îmi propuseseam, din motive prezentate pe larg în cap.5, fiind o variantă de așa zisă “reglare a tirului” Seriiile cu tensiunea de prag mai mica au avantajul limitării supratensiunilor la valori mai mici (U_{rez} de valoare mai mica) si o sensibilitate marita la supratensiunile temporare, dezavantajul fiind pericolul ambalării termice daca socurile de supratensiune sint frecvente. Curentul de scugere va avea valori ridicate superioare la 1 mA, ceea ce conduce la ambalarea termică. Seria D, care are tensiunea de prag cea mai mare, va avea o durata de viata mai mare datorata curentului de fuga mai mic , nivelul de protectie al instalatiei va fi insa mai ridicat (fara a depasi insa valoarea de 3 kV propusa in cap 5).

O influenta deosebita asupra stabilitatii termice, reflectata si in caracteristica de protectie $I(U)$ a varistorului o are temperatura mediului ambiant. Pentru aceasta, esantioanele seriei A au fost plasate intr-o etuva in interiorul careia temperatura a fost mentinuta constanta in timpul masuratorilor la valorile : 25; 52; 80; 93; °C. Caracteristicile $I(U)$ sunt prezentate în fig.6.3. Din aceste caracteristici se constată o crestere pronuntata a curentului cu temperatura, mai ales in zona tensiunilor reduse (de până la $0,5 U_s$), pentru tensiuni in jurul celei de prag temperatura nemaiaivind o influenta deosebita. Aceasta constatare confirma ipoteza mecanismului de conductie termoelectronic in aceasta zona.

O consecință practică a acestei constatări este influența pe care poate să o aibă creșterea temperaturii mediului ambiant asupra riscului de ambalare termică. Această concluzie întărește ideea alegerii unei tensiuni de prag mai ridicate (seria D), în practică de

regulă tensiunea nominală a instalației de protejat fiind în jurul unei treimi de cea de prag ($U_n \approx 0,3 U_s$).

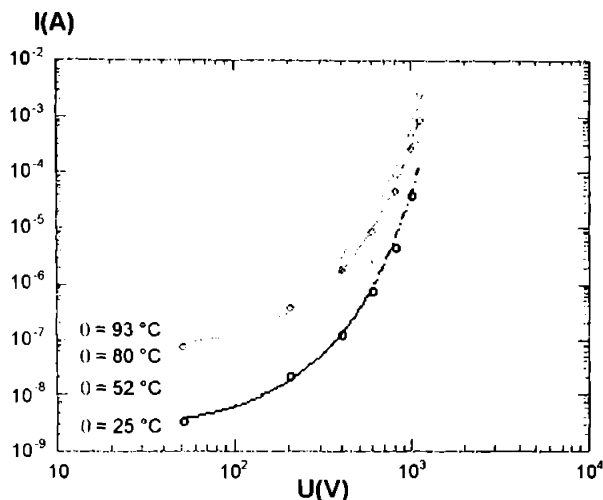


Fig.6.3 Influența temperaturii mediului ambiant asupra caracteristicii I(U);

6.1.2 Evidențierea mecanismului termoelectronic de conducție prin determinarea experimentală a variației înalțimii barierei de potențial

Zona de caracteristica determinata anterior este foarte importanta prin faptul ca la o functionare normala, in absenta perturbatiilor electrice, corespunde regimului permanent sub tensiunea de serviciu.

In aceasta zona densitatea de curent creste nelinier cu cimpul electric aplicat si conductia este activa termic. Conductia este caracterizata de o densitate de curent rezultata in urma rezolvarii ecuatiei Richardson-Dushman [6.5], data de expresia :

$$J = A(U) \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{q_e \phi(U)}{k \cdot T}} \quad (6.1)$$

in care semnificatia marimilor este cea din capitolul 4.

Plecind de la masuratorile I(U) pentru seria B ($U_s=120$ V) de varistoare si de la expresia curentului termoelectronic am determinat experimental valoarea inalțimii barierei de potențial in functie de tensiunea aplicata U, dupa urmatorul algoritim :

- se ridica experimental caracteristicile I(U) la diverse temperaturi ale mediului ambiant , in speta cele prezentate anterior in 6.1.1.

- se trasează pentru valori discrete (U_1, U_2, \dots) ale cimpului electric aplicat (și pentru care s-a măsurat curentul prin varistor la temperaturile diferite ale mediului ambiant) dependențele $\ln(J/T^2) - (1/T)$. În ipoteza că se confirmă teoria expusă în capitolul 4 referitoare la mecanismul conductivității, punctele rezultate la fiecare din aceste caracteristici ar trebui să se alinieze pe o dreaptă.
- se interpolează aceste puncte după ecuația unei drepte;
- se determină pentru fiecare dreaptă panta și ordonata la origine;
- pentru fiecare valoare a tensiunii aplicate la bornele varistorului (U_i cu $i=1, \dots$) se poate calcula din cele două valori obținute mai sus înălțimea barierei de potențial $\phi(U_i)$ și constanta de radiație a lui Richardson $A(U_i)$

Suportul matematic și relațiile folosite pentru implementarea algoritmului descris mai sus sunt prezentate în continuare:

- Din valorile măsurate ale lui $I(U)$ se calculează $J = \frac{I}{S}$ și apoi prin împărțirea cu T^2 ($T=273+0$) și logaritmare se obține primul termen al dependenței $\ln \frac{J}{T^2}$, al doilea fiind obținut prin inversarea lui T , ($1/T$);
- Se reprezintă grafic aceste dependente pentru diverse valori ale tensiunii, apoi se interpolează punctele rezultate după o dreaptă. Pentru exemplificare în figura 6.4 se prezintă aceste diagrame.

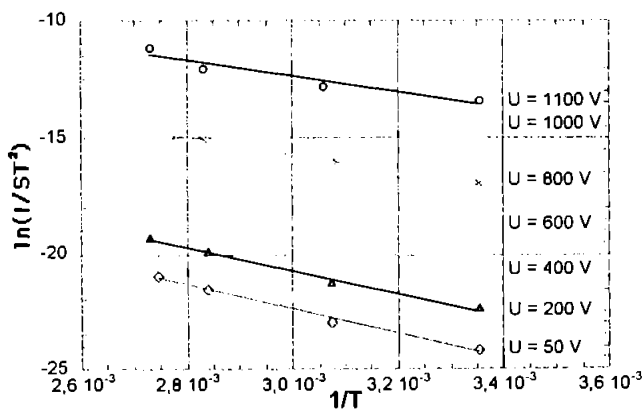


Fig. 6.4 Caracteristicile $\ln(J/T^2) = f(1/T)$

Se observă alinierea perfectă după o dreaptă a punctelor, ceea ce confirmă ipoteza mecanismului termoelectronic în această zonă a caracteristicii.

Ecuatiile dreptelor de interpolare sunt:

$$\begin{aligned}
 y_{1100} &= -2.1253 + -3412.9x & y_{400} &= -4.8364 + -4737.5x \\
 y_{1000} &= -4.2498 + -3163.8x & y_{200} &= -5.4175 + -5085.7x \\
 y_{800} &= -4.5516 + -3704.5x & y_{50} &= -6.2435 + -5373.5x \\
 y_{600} &= -4.3818 + -4320x & &
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

- Logaritmind relația (6.1) după împărțirea cu T^2 se obține :

$$\ln\left(\frac{J}{T^2}\right) = \ln A - \frac{q_c \phi(U)}{k} \cdot \frac{1}{T} \tag{6.3}$$

$$\text{Notind : } y = \ln\left(\frac{J}{T^2}\right); \quad x = \frac{1}{T} \quad b = \ln A; \quad a = -\frac{q_c \phi(U)}{k}; \tag{6.4}$$

$$\phi(U) = -\frac{k \cdot a}{q_c} \quad \text{și} \quad A(U) = e^b \tag{6.5}$$

se pot identifica dreptele $y_i = b + a \cdot x$; $i = 50; 200; \dots; 1100$, cu cele de interpolare din relațiile (6.2)

Din panta și ordonata dreptelor (a,b) conform relației (6.5) am determinat și apoi reprezentat cele 2 mărimi care interesează $\phi(U)$ și $A(U)$. Reprezentarea grafică a acestora este făcută în fig 6.5.

Dupa cum se constata și din reprezentarea grafică, înălțimea barierei de potențial scade cu creșterea cimpului electric (a tensiunii) aplicat, ceea ce confirmă ipoteza dependenței $\phi(U)$. Aceasta scădere este și mai pronunțată în vecinătatea tensiunii de prag (U_S). Pe un interval însă destul de larg de variație (0.2-0.9 U_S) se poate însă interpola variația ei, (fig.5.a) după ecuația unei drepte. Se constată scăderea înălțimii barierei de la aproximativ 0,5 eV pentru tensiuni mici la 0,18 eV pentru tensiuni apropiate celei de prag. Pentru varistorul supus acestei măsurători ecuația dreptei este prezentată în fig 6.5.a.

Constanta lui Richardson, reprezentată în figura 6.5.b, nu rămâne constantă cu tensiunea dar are valori în jurul a $2 \cdot 10^{-3}$, cu mult mai mici decât cea teoretică (130) corespunzătoare însă corpului negru.

Din reprezentările anterioare se poate reține concluzia că pentru valori ale tensiunii aplicate între 0.2-0.9 U_S se poate considera $\phi(U)$ o funcție liniară și A o valoare constantă

posibil de determinat prin măsuratori, ceea ce simplifică evaluarea prin calcul a curentului termoelectronic $J=I(A,T,\phi(U))$ atunci cind unul din parametrii de care depinde se modifica.

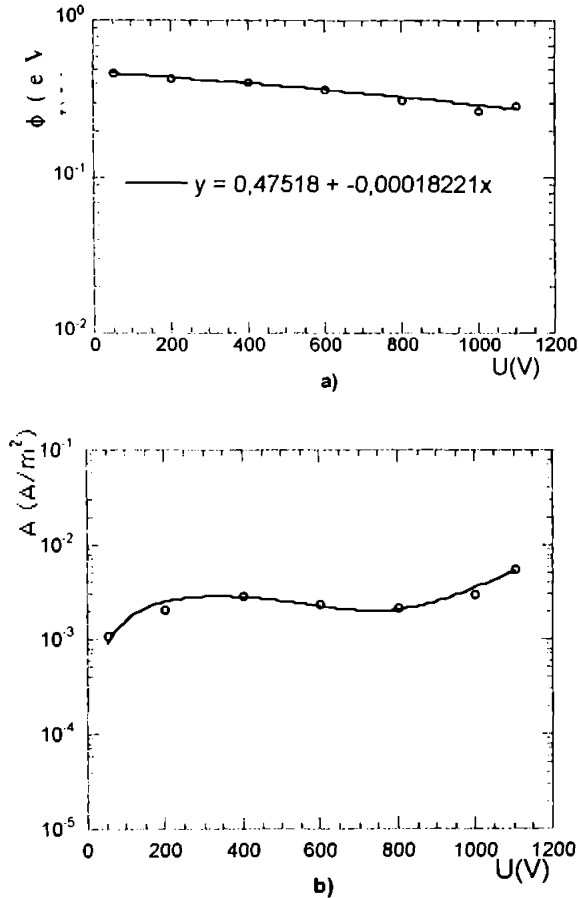


Fig. 6.5. a) Înălțimea barierei de potențial $\phi(U)$; b) Constanta lui Richardson $A(U)$;

6.1.3 Determinarea caracteristicii $I(U)$ la curenți mari

Măsurarea caracteristicii $I(U)$ în curent continuu este limitată pînă la valori ale curentului de 10^{-2} A, peste această valoare încălzirea esanționului devine importantă și poate deveni instabil din punct de vedere termic. Pentru curenți mai mari, ridicarea caracteristicii se face prin aplicarea unor impulsuri de tensiune obținute cu ajutorul generatoarelor de

impulsuri. Aceste generatoare vor fi utilizate și pentru efectuarea testelor de tinere la socuri de scurta sau lunga durata. Inregistrarea tensiunii și curentului am făcut-o cu ajutorul unui osciloscop cu memorie Tektronix 2000. In continuare voi prezenta generatoarele de impulsuri și standurile de măsurare.

A. Generatorul de impulsuri de lunga durata

Caracteristic pentru acest generator este faptul ca unda de curent obtinuta este de forma dreptunghiulara de amplitudine redusa (pina la 500 A) și de durata mai lunga (pina la 2.5 ms). Cu acest generator se simuleaza și se fac incercarile la supratensiuni de manevra.

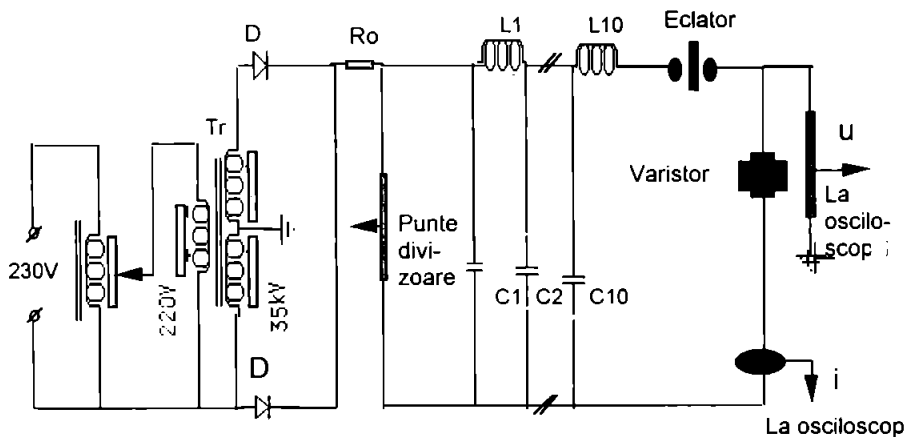


Fig.6.6. Schema electrica a generatorului de socuri de lunga durata

Energia este stocata într-o baterie de condensatoare cu ajutorul unui autotransformator și apoi un transformator ridicător ce debitează pe un redresor. Bateria de condensatoare este descărcată brusc pe esanșionul de încercat prin intermediul unui eclator cu trei electrozi. Valorile inductivității și condensatorului din schema sînt astfel calculate încît să se poată obține o durată reglabilă a impulsului de pînă la 2.5 ms. Tensiunea de încărcare poate atinge 20kV și amplitudinea impulsului de curent poate ajunge la 500 A, controlul încercării fiind făcut de la un panou de comandă, formele de undă achiziționate pe osciloscop fiind reprezentate în fig.6.8.a.

B. Generatorul de impulsuri de mare amplitudine și scurta durată

Cu ajutorul acestui generator se simulează supratensiunile atmosferice prin generarea undelor de încercare normalizate. Schema electrică de principiu este prezentată în fig.6.7:

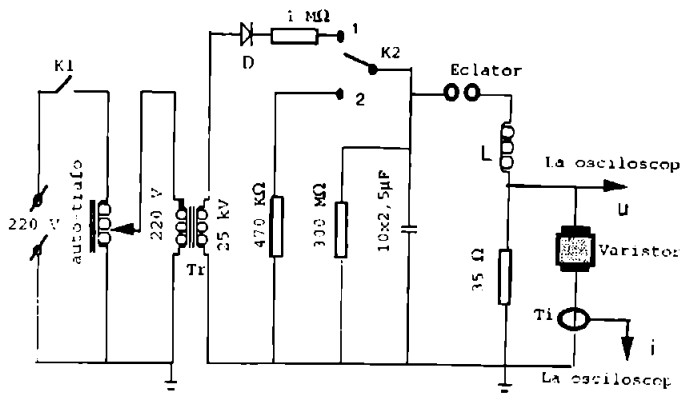
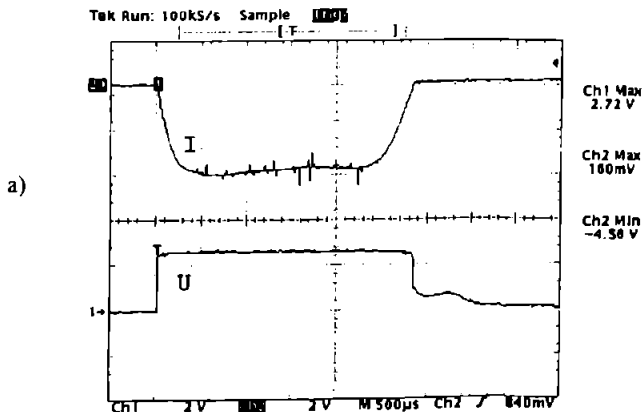


Fig.6.7. Schema electrica a generatorului de socuri de scurta durata 4/10 μ s

Ca principiu este asemanator cu cel prezentat inainte dar cu alti parametri :

- autotransformatorul ce furnizeaza tensiunea variabila de la 0-250 V , ce permite fixarea tensiunii de incarcare si deci a energiei stocate in el.
- transformatorul ridicator in al carui secundar se poate obtine o tensiune de 25 kV, tensiune redresata cu care este incarcata condensatorul;
- blocul de condensatori de 25 μ F care poate fi incarcata la 35 kV cu o energie de 15 kJ.
- eclatorul comandat printr-un electromagnet auxiliar, prin intermediul caruia se aplica energia inmagazinata in condensator unui circuit exterior, in care se afla plasat si varistorul, si ale carui elemente sint calculate in asa fel incit sa se obtina o descarcare aperiodic amortizata, formele de undă fiind cele standardizate (fig.6.8.b).



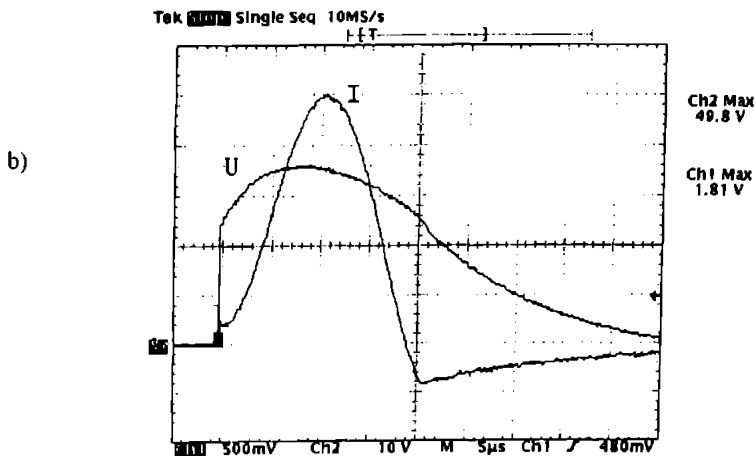


Fig. 6.8. Formele de undă livrate de generatoarele de șoc; a) șoc de manevră, $t=2.5$ ms, $I=100$ A, $U=1600$ V; b) Soc (supratensiune)atmosferică 8/20 $I=4,98$ kA, $U=1810$ V.

Ca exemplu caracteristica $I(U)$ totală pentru seria D de varistoare, ridicată experimental conform celor prezentate anterior este prezentată în fig.6.9., pentru seriile A, B, C, fiind prezentate în fig.6.2.

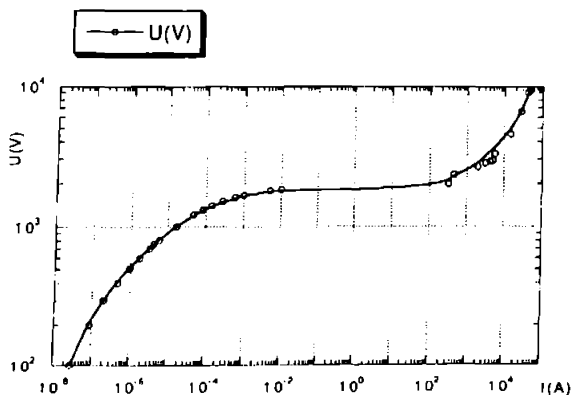


Fig.6.9. Caracteristica $I(U)$ a seriei D ridicată experimental.

6.1.4. Determinarea experimentală a exponentului de neliniaritate α

Valoarea exponentului de neliniaritate α reflecta proprietatile electrice ce se aștepta 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 determina simplu , observind ca reprezinta panta caracteristicii $I(U)$, pentru zona neliniara, in coordonate logaritmice:

$$I=K \cdot U^\alpha \text{ care logaritmata devine } \ln(I) = \ln(K) + \alpha \cdot \ln(U) \quad (6.6)$$

Relatia de mai sus reprezinta de fapt ecuatia unei drepte in care α este panta dreptei. Cum o dreapta este determinata prin 2 puncte , vom considera doua puncte din caracteristica , (I_1, U_1) si (I_2, U_2) , din caracteristica de protectie $I(U)$, de unde va rezulta α

$$\alpha = \frac{\ln(I_2) - \ln(I_1)}{\ln(U_2) - \ln(U_1)} = \frac{\ln \frac{I_2}{I_1}}{\ln \frac{U_2}{U_1}} = \frac{d \ln(I)}{d \ln(U)} \quad (6.7)$$

In mod conventional, cele 2 puncte ale caracteristicii necesare determinării lui α se aleg pentru 1 si 10 mA/cm². Pentru usurinta masuratorilor am considerat pentru aceasta determinare curentii de 1 si 10 mA.

Valorile exponentului de neliniaritate α calculate pentru cele patru serii de varistoare sint prezentate in tabelul 6.2.

Tabelul 6.2.
Exponentul de neliniaritate α

	α
Seria A	37
Seria B	42
Seria C	32
Seria D	30

Determinarea valorilor lui α are o importanta deosebita , in primul rind prin informatia referitoare la neliniaritatea caracteristicii de protectie si in al doilea rind pentru modelarea matematica si posibilitatea estimarii comportarii lui sub diverse sollicitari electrice, estimare facuta cu ajutorul programelor de simulare numerica.

6.2 Caracterizarea electrica a varistoarelor prin determinarea experimentală a impedantei complexe

Masurarea in curent continuu, desi foarte eficienta, pentru ridicarea si studiul caracteristicii de protectie, nu este totdeauna suficienta pentru o buna cunoastere a proprietatilor varistorului. Prin analogie cu studiul unor materiale dielectrice, raspunsul

varistorului la aplicarea unor semnale de frecvență variabilă, va conduce la o mai bună cunoaștere a caracteristicilor lui. 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 al marimilor complexe ($\underline{\epsilon}$, \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 cele ce urmează voi prezenta aplicarea acestei metode pentru varistoarele analizate, nu înainte de a face o scurtă recapitulare bibliografică a noțiunilor teoretice, referitoare la proprietățile dielectrice și modelelor teoretice adecvate varistoarelor.

6.2.1 Definiția impedanței complexe. Schema electrică echivalentă a varistoarelor

Pentru această măsurare, varistorul va fi privit ca un sistem liniar. În sprijinul acestei afirmații vine argumentul valorii tensiunii la care se va face studiul. Tensiunea aplicată va fi de $U = 10$ V, valoare efectivă, varistorul comportându-se liniar, fiind în zona i (ohmică), a caracteristicii prezentate în cap.4. Cum la aceste tensiuni varistorul se comportă ca un material izolant, este justificată asocierea lui acestui grup de materiale și în consecință, utilizarea pentru o bună caracterizare a modelelor și metodelor specifice acestora.

Dacă se consideră tensiunea u aplicată la bornele varistorului prin aceasta se va stabili curentul i . Folosind notațiile trigonometrice sau fazoriale:

$$\begin{aligned} u &= U_m \sin(\omega t - \varphi); & \text{sau} & \quad \underline{U}(\omega) = U_m e^{j(\omega t - \varphi)} \\ i &= I_m \sin(\omega t); & \text{sau} & \quad \underline{I}(\omega) = I_m e^{j\omega t} \end{aligned} \quad (6.8)$$

în care :

- 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 $\underline{I}(\omega)$ ce determină la bornele varistorului o cădere de tensiune $\underline{U}(\omega)$, și deci pentru impedanța complexă vom avea reprezentarea :

$$\underline{Z}(\omega) = \frac{\underline{U}(\omega)}{\underline{I}(\omega)} = \frac{U_m}{I_m} \cdot e^{j\varphi} = |Z(\omega)| \cdot (\cos \varphi - j \cdot \sin \varphi) = Z'(\omega) - j \cdot Z''(\omega) \quad (6.9)$$

in care :

- $Z'(\omega)$ - partea reala a impedantei complexe ce semnifică o masura a posibilitatii de disipare de energie(poate fi privita ca o rezistenta);
- $Z''(\omega)$ - partea imaginara a impedantei complexe, este o masura a posibilitatii de acumulare de energie (poate fi privita ca un condensator, semnul - evidentiind acest lucru);

Impedanta Z este definita ca modulul impedantei complexe sau raportul valorilor efective ale lui U si I .

$$Z = |Z(\omega)| = \frac{U}{I} \quad (6.10)$$

Revenind la impedanta complexa, reprezentarea acesteia se poate face in 2 moduri :

- reprezentarea in diagrame Nyquist sau D'Argand adica $[Z''(\omega)] - [Z'(\omega)]$;
- reprezentarea in diagrame Bode (modul si faza functie de frecventa) $[|Z|] - [f]$ si $[\varphi = \arg(Z)] - [f]$;

Vom folosi in cele ce urmeaza prima reprezentare, utilizata de catre fizicieni, a doua fiind preferata de catre automatisti.

Schema electrica echivalenta dupa care se modeleaza varistorul, considerind microstructura prezentata in capitolul 4 (realizata din granule de ZnO separate prin spatii intergranulare izolante) este prezentata in figura 6.10

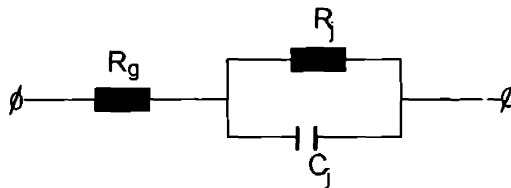


Fig.6.10. Schema echivalenta a unui varistor elementar.

in care :

- R_g - rezistenta electrica a granulelor de ZnO. Poate fi privita ca o rezistenta metalica, liniara care nu-si modifica valoarea cu tensiunea aplicata. Valoarea ei este neglijabila in raport cu cea a spatiului intergranular;
- R_j - Rezistenta spatiului intergranular;
- C_j - Capacitatea spatiului intergranular;

R_j, C_j - modeleaza de fapt inaltimea barierei de potential respectiv largimea ei ;

In regimul normal de functionare, varistorul este supus la o tensiune joasa, comportarea fiind dictata de substanta izolanta din spatiul intergranular, R_g putind fi

neglijată, simplificând schema echivalentă la o celulă R_j, C_j , reprezentarea în schema echivalentă putînd fi făcută serie sau paralel în funcție de cerințele de modelare impuse de schema de măsurare folosită. De asemenea, este esențială dependența valorii elementelor schemei de frecvența semnalului aplicat.

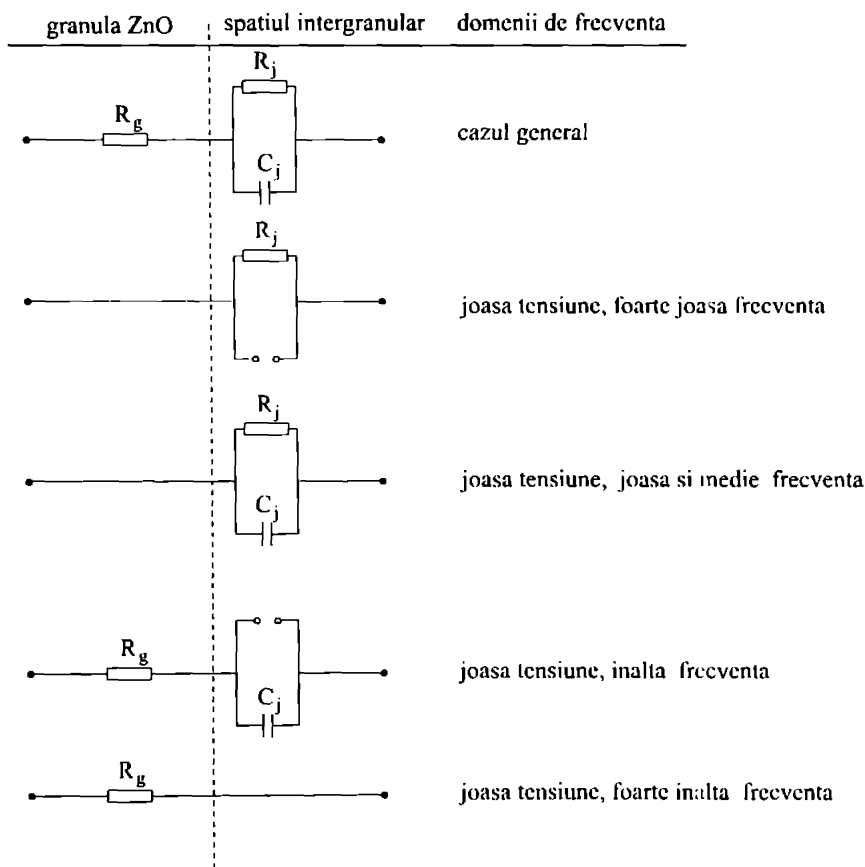


Fig.6.11 Schema echivalentă a varistorului pentru diverse frecvențe.

Degradarea varistorului este evidențiată de 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 ($R_j || C_j$) a spațiului intergranular.

Concluzionînd, starea varistorului poate fi constatată la tensiuni joase, sub cea de prag, esențială pentru caracterizarea ei fiind schema pentru frecvențele medii. Sintetic, în fig 6.11 se prezintă schema echivalentă a varistorului pentru diverse frecvențe.

În afara de impedanța complexă, și alte mărimi ajută la o mai bună modelizare a acestor tipuri de materiale, legătura dintre ele fiind dată prin relațiile următoare:

$$\begin{aligned}\underline{\epsilon} &= \epsilon' - j \cdot \epsilon'' \\ \underline{Y} &= Y' + j \cdot Y'' \\ \underline{Z} &= Z' - j \cdot Z''\end{aligned}\tag{6.11}$$

în care: $\underline{\epsilon}$ - permitivitatea complexă;
 \underline{Y} - admitanța complexă;
 \underline{Z} - impedanța complexă;

6.2.2 Proprietățile dielectrice ale varistoarelor

În continuare voi reaminti pe scurt câteva noțiuni teoretice specifice materialelor dielectrice [5], noțiuni ce vor interveni în modelele utilizate pentru caracterizarea varistorului prin metoda spectroscopiei impedanței.

A. Polarizarea dielectrică

Datorită caracteristicilor electrice, în regimul normal de funcționare, varistorul poate fi considerat un material izolanț. În practică curenții termenii de izolanț și dielectric sunt adesea sinonime, dar în general se consideră dielectrice materialele care au proprietatea de a se polariza atunci când sunt plasate într-un câmp electric. 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 drept efect aparitia unor dipoli electrici. Acești dipoli electrici care apar prin diverse mecanisme de polarizare (electronica, atomică, prin orientare dipolară sau Debye, interfacială) permit definirea unor mărimi electrice caracteristice pentru materialele dielectrice (impedanța complexă \underline{Z} , permitivitatea complexă $\underline{\epsilon}$). În figura 6.12 se prezintă într-un mod intuitiv aceste tipuri de polarizare.

- **Polarizarea electronică sau optică;** din punct de vedere electric, materia este constituită din nuclee atomice (cu sarcină 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

capata astfel sarcina de sens contrar dind nastere la un moment dipolar indus. Aceasta polarizatie numită atomica este observabila in domeniul frecventelor 10^{12} Hz.

- **Polarizarea prin orientare dipolara sau Debye;** cu toate ca la nivel macro rezultanta momentelor dipolare este nula, moleculele polare poseda un moment dipolar permanent, independent de existenta unui cimp exterior. In absenta unui astfel de cimp, momentele dipolare sint orientate dupa directii aleatorii, si schimba permanent directia in functie de agitatie termica. Sub efectul unui cimp electric aplicat, moleculele tind sa se alinieze dupa directia acestuia, rezultind o polarizare numita prin orientare dipolara sau Debye, care se manifesta pentru frecvente de ordinul 10^6 Hz.
- **Polarizarea interfaciala;** aceasta rezulta din acumularea locala de sarcini la suprafata dintre doua medii; daca materialul poseda purtatori liberi de sarcina, acestia migreaza sub efectul cimpului electric aplicat si au tendinta de a se concentra in jurul impuritatilor din material. Este și cazul varistoarelor unde sarcinile se acumuleaza in spatiile intergranulare. Aceasta polarizare se mai numeste si de suprafata si se manifesta n-ai ales in domeniul frecventelor joase, timpii de atingere al echilibrului fiind cei mai lungi.

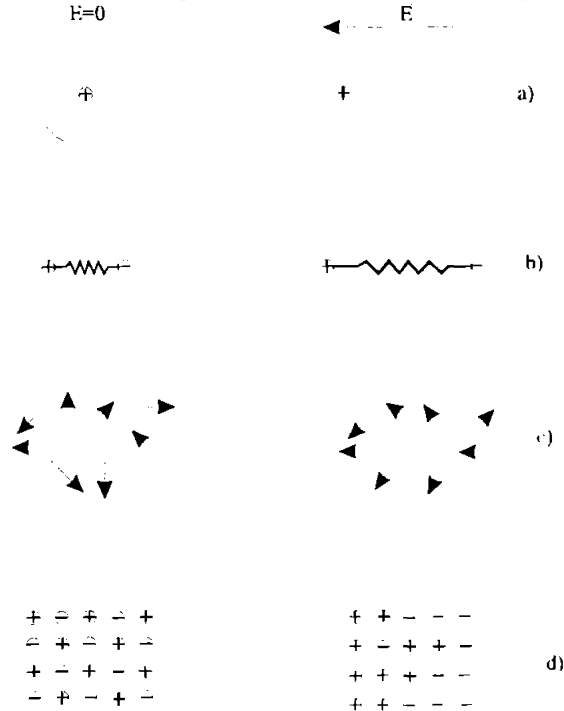


Fig. 6.12. Mecanisme de polarizare intr-un material dielectric; a) polarizatie electronica; b) polarizare atomica; c) polarizare prin orientare dipolara; d) polarizare interfaciala;

B. Relaxatia dielectrica

Contributia fiecarui mecanism de polarizare amintit mai sus este functie de frecventa tensiunilor care se aplica materialului. Raspunsul esantionului la tensiunea aplicata nu este instantaneu, starea de polarizare tinde asimptotic spre un echilibru care se atinge dupa un anumit timp, care corespunde valorii maxime a polarizarii. Oricare ar fi mecanismul de polarizare considerat, fenomenul relaxatiei dielectrice poate fi caracterizat printr-un timp caracteristic τ , numit timp de relaxatie dielectrica. Daca timpul de aplicare al cimpului electric este suficient de lung pentru ca toate tipurile de polarizare sa se manifeste, polarizatia electrica P va tinde spre valoarea maxima notata cu P_0 , ceea ce reprezinta polarizarea dupa un timp teoretic infinit (polarizare staționară) dupa o relatie de forma:

$$P = P_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (6.12)$$

Daca polarizarea este masurata imediat dupa aplicarea unui cimp electric se va manifesta numai polarizarea electronica si atomica. Aceasta intirziere a stabilirii echilibrului pentru polarizatiile dipolare si de suprafata, ce se manifesta la aplicarea sau intreruperea cimpului electric defineste notiunea de relaxatie a materialului dielectric. Relaxatia este caracterizata de timpul de relaxatie τ ce poate fi privit ca un timp de relaxatie macroscopic, sau ca o constanta de timp pentru sistemele omogene. Pentru sistemele neomogene, cum este si cazul varistoarelor, se vor studia proprietatile lor cu ajutorul timpului mediu de relaxatie τ_m si a functiei de distributie a timpilor de relaxatie $f(s)$ conform modelelor cel mai adecvate, utilizate in literatura de specialitate.

C. Pierderile dielectrice

In procesul polarizarii, la nivelul varistorului se manifesta pierderi de energie numite pierderi dielectrice. Pe de alta parte datorita curentului de conductie ce strabate varistorul apar si pierderi de energie datorate conductiei. In regim sinusoidal, permitivitatea dielectrica devine o marime complexa ce depinde de frecventa tensiunii aplicate de forma :

$$\underline{\epsilon}(\omega) = \epsilon'(\omega) - j \cdot \epsilon''(\omega) \quad (6.13)$$

in care :

- $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ - pulsatia
- $\underline{\epsilon}(\omega)$ - permitivitatea complexa;
- $\epsilon'(\omega)$ - partea reala a permitivitatiei complexe;
- $\epsilon''(\omega)$ - - partea imaginara a permitivitatiei complexe;

Disiparea de energie este apreciată prin unghiul de pierderi dielectrice definit prin tangenta sa ca raportul dintre cei 2 termeni ai permitivității complexe:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (6.14)$$

6.2.3 Modele teoretice pentru relaxația dielectrică. Funcții de distribuție ale timpilor de relaxație.

A. Modelul Debye

Conform teoriei Debye, relaxația este un proces pur viscos de frinare 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 numită Debye după numele autorului:

$$\underline{Z}(\omega) = R_\infty + \frac{R(0) - R_\infty}{1 + j \cdot \omega \cdot \tau} \quad (6.15)$$

Schema electrică echivalentă și reprezentarea impedanței complexe într-o diagramă d'Argand a acestui model este prezentată în fig.6.13

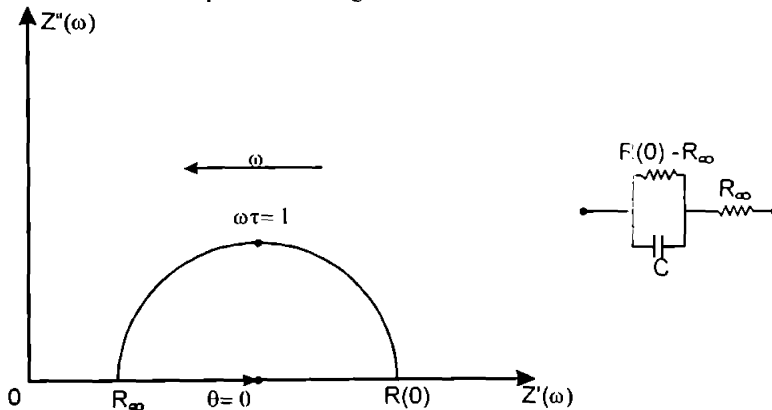


Fig.6.13. Modelul Debye definit pentru impedanța complexă

În care semnificațiile marilor noi ce intervin sînt:

- R_∞ - Impedanța la frecvența infinită; este practic rezistența granulelor de ZnO [Ω];

- $R_{(0)}$: - Impedanta la frecvența nulă sau în curent continuu fiind identificabilă cu rezistența spațiilor intergranulare Ω ;
- C - capacitatea spațiilor intergranulare (care depinde de valoarea frecvenței) [F];
- $\tau = (R_{(0)} - R_{\infty}) \cdot C$ - constanta de timp a circuitului [s];

Separând partea reală și imaginara a impedanței complexe se obține :

$$Z'(\omega) = R_{\infty} + \frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{și} \quad Z''(\omega) = (R_{(0)} - R_{\infty}) \cdot \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (6.16)$$

Eliminând $(\omega \cdot \tau)^2$ între cele 2 relații din 6.16 se obține ecuația :

$$\left(Z'(\omega) - \frac{(R_{(0)} - R_{\infty})^2}{2} \right)^2 + (Z''(\omega))^2 = \left(\frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{2} \right)^2 \quad (6.17)$$

care reprezintă ecuația unui cerc cu centrul pe axa reală de rază $\frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{2}$. Reprezentarea grafică a dependenței $Z''(\omega) - Z'(\omega)$ este făcută în figura 6.13.

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 $\theta=0$), 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 4 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.

B. 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 neideale. În funcție de materialul supus analizei și de gradul de deformare al cercului mulți cercetători 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 dependenței $Z''(Z')$ fiind un arc de cerc. Relația se bazează pe aceeași schemă echivalentă adoptată în cazul modelului Debye, schema adecvată structurii interne a varistorului :

$$\underline{Z}(\omega) = R_{\infty} + \frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{1 + j \cdot (\omega \tau_m)^{\gamma}} \quad \text{a cu} \quad \gamma = 1 - \frac{20}{\pi}; \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (6.18)$$

unde :

- γ - un exponent ce depinde de neomogenitatea materialului reflectata de unghiul θ ;
- θ - unghiul de descentraj [rad]; reprezinta unghiul facut de o dreapta ce uneste originea axelor cu centrul cercului $Z''(Z')$, cu axa reala (OZ');
- τ_m - timpul de relaxatie mediu [s];

Dupa cum se observa relatia este mai generala decit precedenta, modelul Debye fiind de fapt un caz particular al modelului Cole-Cole ($\gamma = 1$);

Reprezentarea modelului Cole-Cole pentru impedanta complexa este facuta in figura 6.14, fiind scoasa in evidenta si evolutia caracteristicii cu γ :

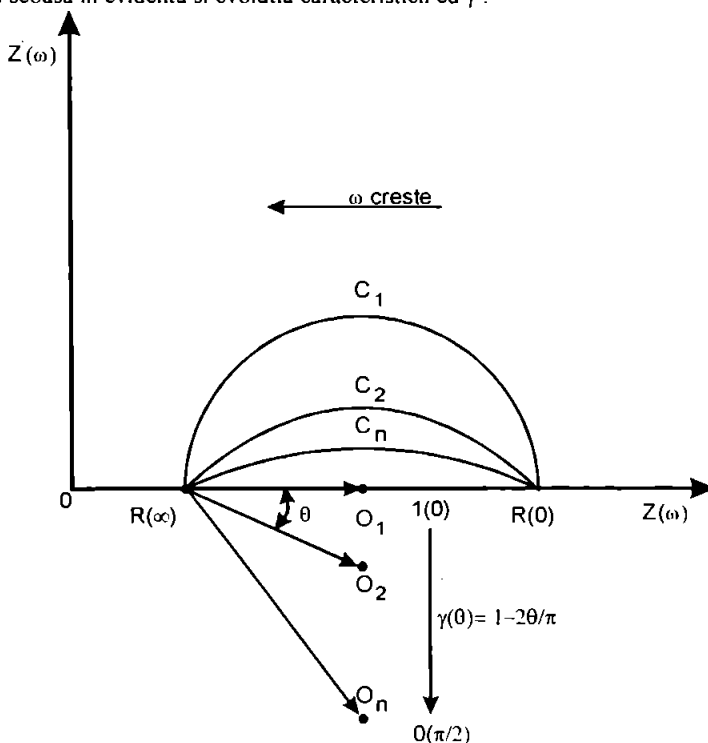


Fig.6.14. Definirea modelului Cole-Cole pentru impedanta complexa.

Modelul Cole Cole poate fi privit ca o superpozitie de procese de relaxatie de tip Debye dar cu timpi de relaxatie diferiti, proprii fiecaruia, distribuiti in jurul unei valori medii. Aceasta valoare medie poate fi determinata introducind o anumita functie de distributie a timpilor de relaxatie. Valoarea unghiului de descentraj este legata de dispersia timpilor de relaxatie care este maxima pentru $\theta = \frac{\pi}{2}$ si minima pentru $\theta = 0$.

C. 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 potrivită fiind cea propusă de Cole-Cole corespunzătoare modelului cu același nume:

Funcția este definită prin relația [1], [37]:

$$\underline{Z}(\omega) - R_{\infty} = (R(0) - R_{\infty}) \int_{\tau=0}^{+\infty} \frac{F(s)}{1+j\omega\tau} d(\ln\tau) \quad (6.19)$$

unde:

$$s = \ln\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right) \quad \text{și} \quad \int_{\tau=0}^{+\infty} F(s) d(\ln\tau) = 1 \quad (6.20)$$

Folosind transformarea Stieltjes [1]

$$F(s) = \frac{1}{2\pi(R(0) - R_{\infty})} \lim_{\omega \rightarrow 0} \left\{ \operatorname{Im} \left[\underline{Z} \left(-\omega + \frac{j}{\tau} \right) \right] - \operatorname{Im} \left[\underline{Z} \left(\omega + \frac{j}{\tau} \right) \right] \right\} \quad (6.21)$$

Înlocuind expresia impedanței complexe corespunzătoare modelului Cole-Cole, obținem:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \lim_{\omega \rightarrow 0} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{1 + (-j\omega\tau_m - \frac{\tau_m}{\tau})^{\gamma}} - \frac{1}{1 + (j\omega\tau_m - \frac{\tau_m}{\tau})^{\gamma}} \right] \quad (6.22)$$

după ce am dat factor comun pe $\frac{\tau_m}{\tau}$ obținem:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{1 + \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(\frac{\tau_m}{\tau})^{\gamma}}{\tau} (-j\omega\tau - 1)^{\gamma}} - \frac{1}{1 + \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{(\frac{\tau_m}{\tau})^{\gamma}}{\tau} (j\omega\tau - 1)^{\gamma}} \right] \quad (6.23)$$

calculăm limita la numitor:

$$\begin{aligned} \lim_{\omega \rightarrow 0} (-1 - j\omega\tau)^{\gamma} &= (-1 - j \cdot 0)^{\gamma} = (\cos\pi - j \cdot \sin\pi)^{\gamma} = e^{j\pi\gamma} \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} (-1 + j\omega\tau)^{\gamma} &= (-1 + j \cdot 0)^{\gamma} = (\cos\pi + j \cdot \sin\pi)^{\gamma} = e^{j\pi\gamma} \end{aligned}$$

și obținem pentru $F(s)$:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\tau_m}{\tau}\right)^{\gamma} (\cos\gamma\pi - j \cdot \sin\gamma\pi)} - \frac{1}{1 + \left(\frac{\tau_m}{\tau}\right)^{\gamma} (\cos\gamma\pi + j \cdot \sin\gamma\pi)} \right] \quad (6.24)$$

Separind apoi partea imaginara :

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \frac{\left(\frac{\tau_m}{\tau}\right)^\gamma \sin(1-\gamma)\pi}{\left[1 - \left(\frac{\tau_m}{\tau}\right)^\gamma \cos(1-\gamma)\pi\right]^2 + \left(\frac{\tau_m}{\tau}\right)^{2\gamma} [\sin(1-\gamma)\pi]^2} \quad (6.25)$$

introducind notatia (6.20) se obtine : $\left(\frac{\tau_m}{\tau}\right)^\gamma = e^{-s\gamma}$

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{1}{\pi} \frac{e^{-s\gamma} \cdot \sin(1-\gamma)\pi}{\left[1 - e^{-s\gamma} \cdot \cos(1-\gamma)\pi\right]^2 + e^{2s\gamma} \cdot [\sin(1-\gamma)\pi]^2} = \\ &= \frac{1}{\pi} \frac{e^{-s\gamma} \cdot \sin(1-\gamma)\pi}{1 - 2e^{-s\gamma} \cdot \cos(1-\gamma)\pi + e^{2s\gamma} \cdot [\cos(1-\gamma)\pi]^2 + e^{2s\gamma} \cdot [\sin(1-\gamma)\pi]^2} \end{aligned} \quad (6.26)$$

Dând factor comun la numitor se obține:

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{e^{-s\gamma} \cdot \sin(1-\gamma)\pi}{1 - 2 \cdot e^{-s\gamma} \cos(1-\gamma)\pi + e^{-2s\gamma} \cdot [\cos^2(1-\gamma)\pi + \sin^2(1-\gamma)\pi]} \quad (6.27)$$

și aplicând identitatea fundamentală a trigonometriei la numitor, se obține:

$$F(s) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{e^{-s\gamma} \cdot \sin(1-\gamma)\pi}{1 - 2 \cdot e^{-s\gamma} \cos(1-\gamma)\pi + e^{-2s\gamma}} \quad (6.28)$$

Simplificând cu $e^{-s\gamma}$ și dând la numitor pe 2 factor comun se obține:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\sin(1-\gamma)\pi}{e^{-s\gamma} + e^{+s\gamma} - \cos(1-\gamma)\pi} \quad (6.29)$$

Utilizând definiția funcțiilor hiperbolice $\frac{e^{-s\gamma} + e^{+s\gamma}}{2} = \text{ch}(s\gamma)$

Se obține pentru F(s) expresia finală în concordanță cu expresia găsită în literatură [1], [35], [37]:

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin(1-\gamma)\pi}{\text{ch}(\gamma s) - \cos(1-\gamma)\pi} ; \quad \text{cu} \quad \gamma = 1 - \frac{2\theta}{\pi} ; \quad (6.30)$$

Este o funcție de variabila τ cu τ_m și 0 ca parametri, simetrica față de verticala care trece prin abscisa determinată de timpul de relaxare mediu. "Supletea" ei este data 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 unul din varistoarele caracterizate este făcută în fig.6.15.

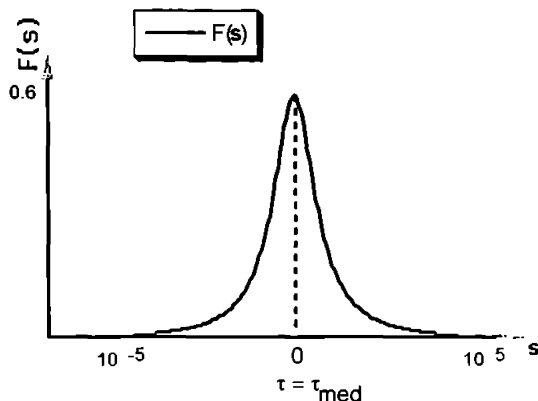


Fig. 6.15. Funcția de distribuție a timpilor de relaxație pentru modelul Cole-Cole

Determinarea maximului funcției de distribuție și valoarea lui τ_{med} , pe baza măsurătorilor 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 ce propun distribuții ale timpilor de relaxație. Amintesc aici câteva din cele mai renumite:

a) Teoria K.M.Wagner.

$$G(\tau) = \frac{\beta}{\sqrt{\pi} \cdot \tau} \cdot e^{-\left(\beta \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_p}\right)^2} \quad (6.31)$$

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

$$G(\tau) = \frac{\tau_p}{(\tau + \tau_p)^2} \quad (6.32)$$

Această distribuție s-a dovedit potrivită în cazul polimerilor.

Teoria R.M.Fuoss

$$G(\tau) = \frac{\beta}{\pi \cdot \tau} \cdot \frac{\operatorname{ch} \beta \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_p} \cdot \cos \frac{\beta \pi}{2}}{\operatorname{sh}^2 \beta \ln \frac{\tau}{\tau_p} + \cos^2 \frac{\beta \pi}{2}} \quad (6.33)$$

Si 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.

6.2.4 Instalația de masurare a impedantei complexe

Masurarea aceasta se va face pentru tensiuni reduse deci in zona liniara cvasi ohmica corespunzatoare curenților mici. Schema principiala a standului folosit pentru aceasta masuratoare este prezentat in fig 6.16 si se compune din :

- Analizorul de raspuns in frecventa (ARF) care are ca elemente principale :
 - generatorul de tensiune sinusoidala $u_e(t)$;
 - analizorul de modul si faza cu doua canale (canal 1 si 2) ;
- Sistemul supus masurarii constituit din :
 - varistorul ce trebuie analizat - $Z(\omega)$;
 - rezistenta de detectie - R_d ;

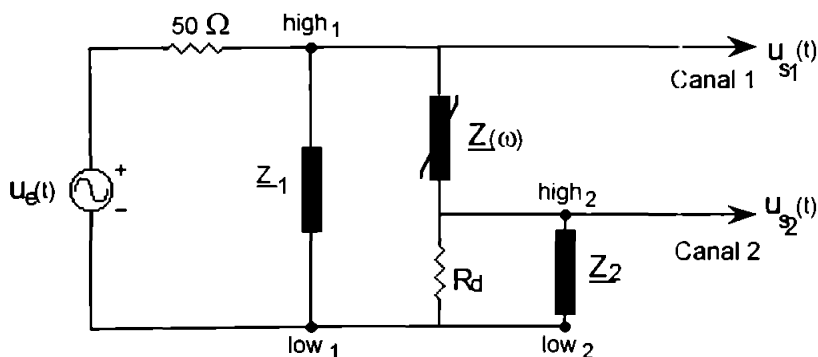


Fig.6.16 Schema principiala a instalatiei experimentale de masura a impedantei complexe

Principalele caracteristici ale ARF sint prezentate in tabelul urmator :

Tabel 6.3.
 Principalele caracteristici tehnice ale ARF Solartron 1253.

Generator de tensiune	
Semnal	sinusoidal
Frecventa	
Gama	1 mHz-20 kHz
Rezolutia	0,025% x frecventa
Tip de baleiaj	liniar sau logaritm
Amplitudinea	
Gama	0 V _{eff} -10,23 V _{eff}
Rezolutia	10 mV
Impedanta de iesire	50 ± 10%
Analizor de modul si faza	
Numar de canale	2
Calibraj	automatic
Calibru(rezolutia)	30 mV (1 μV), 300 mV (10 μV), 3 V (100 μV), 30 V (1 mV), 300 V (10 mV)
Rezistenta de intrare	1 M ± 2%
Capacitatea de intrare	< 70 pF
canal 2/canal 1 (F < 4 kHz)	
Precizia pentru modul G _{dB}	< 0,1 dB
Precizia pentru faza φ	1°

Esantionului i se aplica o tensiune sinusoidala de frecventa si modul ce pot fi variate, analizorul determinind raspunsul sistemului supus masurarii la acest semnal, din cele doua tensiuni $u_{s1,2}(t)$ pe care le primeste din cele 2 canale de analiza. Principiul masurarii, este bazat pe descompunerea in serie Fourier a semnalelor obtinute de la analizor. Generatorul de tensiune al ARF genereaza o tensiune sinusoidala de forma:

$$u_e(t) = U_m \sin(\omega t) \quad (6.34)$$

ce este aplicata esantionului supus analizei. Analizorul prelucreaza raspunsul esantionului la aceasta exciatiie din tensiunile $u_{s1,2}$ pe care le primeste prin cele doua canale de analiza :

$$u_{s1,2}(t) = k_{1,2} U_m \sin(\omega t + \varphi_{1,2}) \quad (6.35)$$

care descompuse după componentele în fază și în cuadratură cu semnalul de intrare devin:

$$u_{s1,2}(t) = A_{1,2} \sin(\omega t) + B_{1,2} \cos(\omega t) \quad (6.36)$$

în care:

$A_{1,2}$ tensiunea maximă, valoare de vîrf, a $u_{s1,2}(t)$ în fază cu $u_e(t)$ [V]

$B_{1,2}$ tensiunea maximă, valoare de vîrf, a $u_{s1,2}(t)$ în cuadratură cu $u_e(t)$ [V]

Integrînd apoi pe un număr întreg de perioade, și aplicînd transformările Fourier se determină $A_{1,2}$ și $B_{1,2}$:

$$A_{1,2} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{s1,2}(t) \sin(\omega t) dt \quad (6.37)$$

$$B_{1,2} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{s1,2}(t) \cos(\omega t) dt \quad (6.38)$$

În urma prelucrării acestor semnale, pe panoul de afișaj al analizorului sînt vizualizate valorile (a,b) ale unei mărimi complexe ce reprezintă partea reală și imaginara a funcției de transfer (\underline{H}) a analizorului:

$$\underline{H} = \frac{U_{s2}}{U_{s1}} = \rho \exp(j\psi) = \frac{A_2 + jB_2}{A_1 + jB_1} = a + jb \quad (6.39)$$

unde:

$$\rho = \frac{k_2}{k_1} \quad \text{modulul funcției de transfer } \underline{H}$$

$$\psi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad \text{argumentul funcției de transfer } \underline{H} \text{ [rad]}$$

Din 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 6.16. funcția de transfer se poate scrie și în funcție de impedanțele din schema:

$$\text{Observînd ca :} \quad \underline{Z}_d = (R_d // \underline{Z}_2) = \frac{R_d \underline{Z}_2}{R_d + \underline{Z}_2} \quad (6.40)$$

în care: R_d rezistența de detecție [Ω];

$\underline{Z}_2 = (R_2 // C_2)$ impedanța internă pentru canalul 2 al analizorului [Ω];

$$\underline{H} = a + jb = \frac{\underline{Z}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}(\omega)} \quad (6.41)$$

Impedanța complexă $\underline{Z}(\omega)$ a varistorului se poate atunci exprima prin relația:

$$\underline{Z}(\omega) = \underline{Z}_d \cdot \frac{(1 - H)}{H} \quad (6.42)$$

Cum capacitatea C_2 este de 70 pF pentru gama de frecvențe $[10^{-3} - 10^2 \text{ Hz}]$, reactanța sa va fi de cel puțin 20 de ori mai mare decât rezistența R_2 de 1 MΩ, impedanța \underline{Z}_2 poate fi considerată egală cu R_2 ; în acest caz impedanța de detecție \underline{Z}_d devine :

$$|\underline{Z}_d| = Z_d = R_d \parallel R_2 = \frac{R_d \cdot R_2}{R_d + R_2} \quad (6.43)$$

Alegând și rezistența de detecție de 1 MΩ, atunci $Z_d = \frac{R_d}{2}$;

Considerând expresia impedanței complexe a varistorului corespunzătoare schemei echivalente serie :

$$\underline{Z}(\omega) = R_s(\omega) + j X_s(\omega) \quad (6.44)$$

și înlocuind relațiile (6.43) și (6.41) în (6.42) apoi identificând termenii cu cei ai relației (6.44) se obțin $R_s(\omega)$ et $X_s(\omega)$ în funcție de a și b citiți de la analizor după relațiile :

$$R_s(\omega) = R_d \left(\frac{a}{a^2 + b^2} - 1 \right) \quad (6.45)$$

$$X_s(\omega) = - R_d \left(\frac{b}{a^2 + b^2} \right) \quad (6.46)$$

Experimental măsurarea am efectuat-o pentru $N_p=20$ de frecvențe distribuite logaritmice (cu scopul de a asigura un număr echilibrat de puncte pentru fiecare decada de frecvență) în intervalul $10^{-3} \leq f \leq 10^2 \text{ Hz}$. 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 6.17. Programul de conducere al procesului de măsurare realizat în cadrul LGET [13] este prezentat printr-o ordinogramă în figura 6.18. Fișierele cu datele rezultate în urma măsurătorilor (f,a,b), le-am prelucrat ulterior cu ajutorul formulelor (6.45), (6.46) implementate în programe de calcul în Pascal, și apoi am reprezentat în mediul Kaleidagrap.

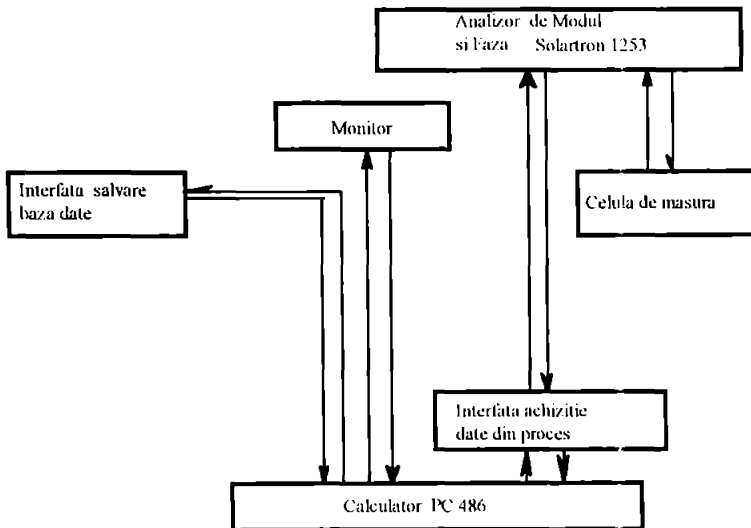


Fig.6.17. Stand de masura automata a impedantei complexe

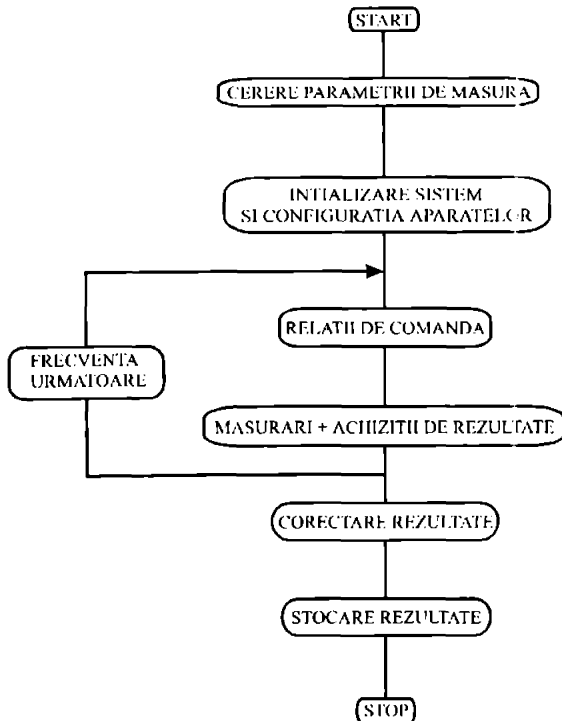


Fig. 6.18. Ordinograma programului de conducere a procesului de măsurare a impedanței complexe

În urma prelucrării am determinat astfel partea reală și imaginara a impedanței complexe a varistorului $R_{sk}, X_{sk}; k=0..19$, mărimi care vor fi folosite pentru tragerea unor concluzii referitoare la calitatea varistorului analizat.

6.2.5 Reprezentarea impedanței complexe în diagrama Cole-Cole

Experimental măsurarea am efectuat-o pentru 20 de frecvențe distribuite logaritmice (cu scopul de a asigura un număr echilibrat de puncte pentru fiecare decada de frecvență) în intervalul $10^{-3} \leq f \leq 10^2$ Hz. Fisierile cu datele rezultate în urma măsurătorilor (f, a, b), au fost supuse prelucrării cu ajutorul mediului de programare și reprezentare Kaleidagrap și a formulelor (6.45), (6.46). În urma prelucrării am determinat astfel partea reală și imaginara a impedanței complexe a varistorului $R_{sk}, X_{sk}; k=0..19$,

$$\underline{Z}_{sk} = R_{sk} + j \cdot (-X_{sk}) \quad (6.47)$$

Reprezentarea impedanței complexe am făcut-o în sistemul de axe $(R_s, -X_s)$ ($-X_s$ pentru ca graficul să fie în cadranul I), fiind intradevar un arc de cerc conform celor prezentate la modelul Cole-Cole al impedanței. Pentru frecvențe inferioare valorii de 10^{-3} Hz, sistemul de măsură ar introduce erori mari și porțiunea din arc de cerc corespunzătoare este interpolată prin metoda regresiei circulare. Pentru cele trei serii de varistoare fabricate data fiind bună reproductibilitate am supus analizei câte 2 esanțioane; În figura 6.19 am prezentat diagrama impedanței complexe pentru câte un esanțion din seriile A, B, C, în starea virgină, înainte de a le supune la teste de verificare.

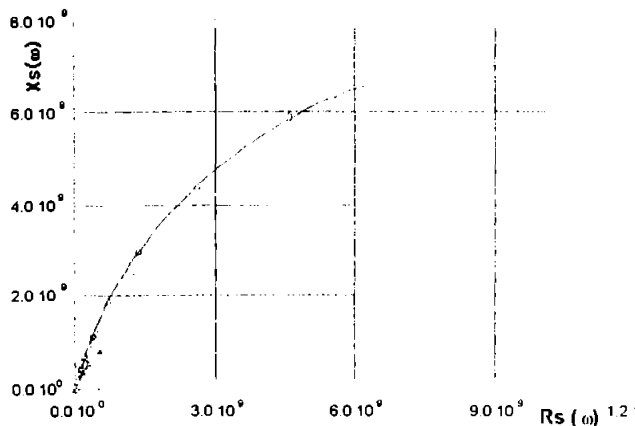


Fig. 6.19. Diagrama Cole cole pentru seriile de varistoare A,B,C în starea inițială

Se observă din această reprezentare 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 metodă nu vor influența concluziile, datorită mecanismului derivativ de caracterizare pe care îl voi folosi (voi compara caracteristicile din starea inițială, ne degradată și finală după supunerea la testele de încercare).

6.2.6 Determinarea unghiului de descentraj θ prin metoda regresiei circulare

Voi prezenta algoritmul determinării 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 (impedantelor complexe) :

$$Z_1(R_{s1}-X_{s1}), \dots, Z_k(R_{sk}-X_{sk}), \dots, Z_n(R_{sn}-X_{sn}). \quad (6.48)$$

Ecuatia cercului de raza R cu centrul în (x_c, y_c) este dată de relația :

$$(R_{sk} - x_c)^2 + (-X_{sk} - y_c)^2 = R^2 + \epsilon_k \quad (6.49)$$

cu $\epsilon_k = 0$ în punctele de coordonate $(R_{sk}-X_{sk})$ care aparțin cercului, și $\epsilon_k \neq 0$ pentru cele care nu sînt pe cerc. Dezvoltind relația de mai sus și notînd $c = x_c^2 + y_c^2 - R^2$ se obține

$$2x_c R_{sk} - 2x_c X_{sk} + c - (R_{sk}^2 + X_{sk}^2) = \epsilon_k; \quad k = \overline{1, n} \quad (6.50)$$

Pentru a neutraliza semnul abaterii ridicăm la patrat ecuația anterioară și însumăm aceste patrate ; Problema determinării "cercului cel mai bun " revine la a găsi tripletul de numere (R, x_c, y_c) , care să minimizeze suma patratelor abaterilor, adică eroarea patratică totală definită prin :

$$E(x_c, y_c, c) = \sum_{k=1}^n \epsilon_k^2 = \sum_{k=1}^n [2x_c R_{sk} - 2y_c X_{sk} + c - (R_{sk}^2 + X_{sk}^2)]^2 \quad (6.51)$$

Minimizarea expresiei $E(x_c, y_c, c)$ de mai sus presupune de fapt rezolvarea sistemului de 3 ecuații cu 3 necunoscute următor:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_c} E(x_c, y_c, c) &= 2 \sum_{k=1}^n (2x_c R_{sk} - 2y_c X_{sk} + c - R_{sk}^2 - X_{sk}^2) 2R_{sk} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial y_c} E(x_c, y_c, c) &= -2 \sum_{k=1}^n (2x_c R_{sk} - 2y_c X_{sk} + c - R_{sk}^2 - X_{sk}^2) 2X_{sk} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial c} E(x_c, y_c, c) &= 2 \sum_{k=1}^n (2x_c R_{sk} - 2y_c X_{sk} + c - R_{sk}^2 - X_{sk}^2) = 0 \end{aligned} \quad (6.52)$$

Efectuind derivarea vom obtine:

$$\begin{aligned} 2x_c \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 - 2y_c \sum_{k=1}^n R_{sk} X_{sk} + c \cdot \sum_{k=1}^n R_{sk} - \sum_{k=1}^n R_{sk}^3 - \sum_{k=1}^n R_{sk} X_{sk}^2 &= 0 \\ -2x_c \sum_{k=1}^n R_{sk} X_{sk} + 2y_c \sum_{k=1}^n X_{sk}^2 - c \cdot \sum_{k=1}^n X_{sk} + \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 X_{sk} + \sum_{k=1}^n X_{sk}^3 &= 0 \\ 2x_c \sum_{k=1}^n R_{sk} - 2y_c \sum_{k=1}^n X_{sk} + n \cdot c - \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 - \sum_{k=1}^n X_{sk}^2 &= 0 \end{aligned} \quad (6.53)$$

Din ultima relatie vom obtine:

$$c = \frac{1}{n} \left(2x_c \sum_{k=1}^n R_{sk} + 2y_c \sum_{k=1}^n X_{sk} + \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 + \sum_{k=1}^n X_{sk}^2 \right) \quad (6.54)$$

Inlocuind 6.54 in 6.53 obtinem

$$\begin{aligned} 2x_c \left(n \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 - \left[\sum_{k=1}^n R_{sk} \right]^2 \right) + 2y_c \left(-n \sum_{k=1}^n R_{sk} X_{sk} + \sum_{k=1}^n R_{sk} \sum_{k=1}^n X_{sk} \right) \\ = \left(n \sum_{k=1}^n R_{sk}^3 - \sum_{k=1}^n R_{sk} \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 \right) + \left(n \sum_{k=1}^n R_{sk} X_{sk}^2 - \sum_{k=1}^n R_{sk} \sum_{k=1}^n X_{sk}^2 \right) \end{aligned} \quad (6.55)$$

δ_{20}
 δ_{11}

$$\begin{aligned}
 & 2x_c \left(\overbrace{-n \sum_{k=1}^n R_{sk} X_{sk} + \sum_{k=1}^n R_{sk} X_{sk}}^{\delta_{11}} \right) + 2y_c \left(\overbrace{-n \sum_{k=1}^n X_{sk}^2 - \left[\sum_{k=1}^n X_{sk} \right]^2}^{\delta_{02}} \right) \\
 &= \left(\overbrace{-n \sum_{k=1}^n X_{sk}^3 + \sum_{k=1}^n X_{sk} \sum_{k=1}^n X_{sk}^2}^{\delta_{03}} \right) + \left(\overbrace{-n \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 X_{sk} + \sum_{k=1}^n R_{sk}^2 \sum_{k=1}^n X_{sk}}^{\delta_{21}} \right)
 \end{aligned} \tag{6.56}$$

Cu notațiile introduse pentru o mai ușoară urmărire, având cunoscute prin măsurători și apoi prelucrarea rezultatelor măsurătorilor, valorile numerice ale părții reale, R_{sk} , și imaginare X_{sk} a impedanței complexe Z_{sk} , va rezulta un sistem cu două ecuații cu două necunoscute (x_c, y_c):

$$2x_c \delta_{20} + 2y_c \delta_{11} = (\delta_{30} + \delta_{12}) \tag{6.57}$$

$$2x_c \delta_{11} + 2y_c \delta_{02} = (\delta_{03} + \delta_{21}) \tag{6.58}$$

a cărui soluție este :

$$x_c = \frac{(\delta_{30} + \delta_{12}) \delta_{02} - (\delta_{03} + \delta_{21}) \delta_{11}}{2(\delta_{20} \delta_{02} - \delta_{11}^2)} \tag{6.59}$$

$$y_c = \frac{(\delta_{03} + \delta_{21}) \delta_{20} - (\delta_{30} + \delta_{12}) \delta_{11}}{2(\delta_{20} \delta_{02} - \delta_{11}^2)} \tag{6.60}$$

și parametrii modelului (raza R și unghiul de descentraj θ) :

$$R = \sqrt{c + x_c^2 + y_c^2} \tag{6.61}$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{|y_c|}{R} \right) \tag{6.62}$$

Algoritmul calculului unghiului de descentraj, al parametrilor cercului și rezistenței în curent continuu l-am transpus într-un program de calcul ce va fi prezentat în paragraful următor. În urma măsurătorilor experimentale, și apoi rularea programului de calcul au condus la următoarele valori prezentate în tabelul 6.4.

Tabelul 6.4.
 Parametrii modelului Cole-Cole pentru seriile A, B, C de varistoare

	θ [grd]	$R_{(0)}$ [Ω]	x_c [Ω]	y_c [Ω]	R [Ω]
Seria A	16,74	$1,47 \cdot 10^{10}$	$7,67 \cdot 10^9$	$-2,33 \cdot 10^9$	$8,026 \cdot 10^9$
Seria B	14,97	$1,758 \cdot 10^{10}$	$9,1 \cdot 10^9$	$-2,43 \cdot 10^9$	$9,42 \cdot 10^9$
Seria C	27,9	$0,41 \cdot 10^{10}$	$2,36 \cdot 10^9$	$-1,25 \cdot 10^9$	$2,69 \cdot 10^9$

Din aceste date se remarca proprietatile asemanatoare ale seriilor A si B facute din aceeași pulbere, seria C avind alti parametri care denota o omogenitate mai redusa si deci proprietati electrice mai slabe. Rezultatul era de altfel de asteptat, pulberea folosita pentru varianta C avind o granulatie superioara (200 μm) celorlalte doua serii.

Un alt criteriu pentru caracterizarea omogenitatii si deci a calitatii varistoarelor este functia de distributie a timpilor de relaxatie. Pentru determinarea acesteia este necesara cunoasterea timpului mediu de relaxatie al speciilor polarizabile din varistor.

6.2.7 Calculul timpului mediu de relaxatie si reprezentarea functiei de distributie a timpilor de relaxatie

Daca toate punctele determinate experimental ar fi situate pe un cerc, timpul mediu s-ar putea determina dintr-un singur punct de masura. Cum cercul este obtinut inasa printr-o interpolare, timpul mediu va rezulta ca o medie geometrica a timpilor de relaxatie corespunzatori fiecarui punct de masura. Pentru a evidentia mecanismul determinarii acestor timpi medii τ_{mk} ; $k = \overline{1, n}$, se prezinta in fig. 6.20 o metoda bazata pe folosirea parametrilor geometrici u_k, v_k , determinati cu notatiilor din figura conform relatiilor

$$u_k = \sqrt{(R_{sk} - R_{\infty})^2 + (-X_{sk})^2} \quad (6.63)$$

$$v_k = \sqrt{(R_0 - R_{sk})^2 + (-X_{sk})^2} \quad (6.64)$$

Acceptind de asemenea modelul Cole-Cole pentru modelare in care

$$\underline{Z}(\omega) = R_s(\omega) + jX_s(\omega) = R_{\infty} + \frac{R_{(0)} - R_{\infty}}{1 + (j \cdot \omega \tau_m)^{\gamma}} \quad (6.65)$$

considerind :

$$j^\gamma = \left(\cos \frac{\pi}{2} + j \cdot \sin \frac{\pi}{2} \right)^\gamma = \left(\cos \left(\gamma \frac{\pi}{2} \right) + j \cdot \sin \left(\gamma \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (6.66)$$

cu: $\gamma = 1 - \frac{2\theta}{\pi}$ unghiul θ fiind exprimat in radiani;

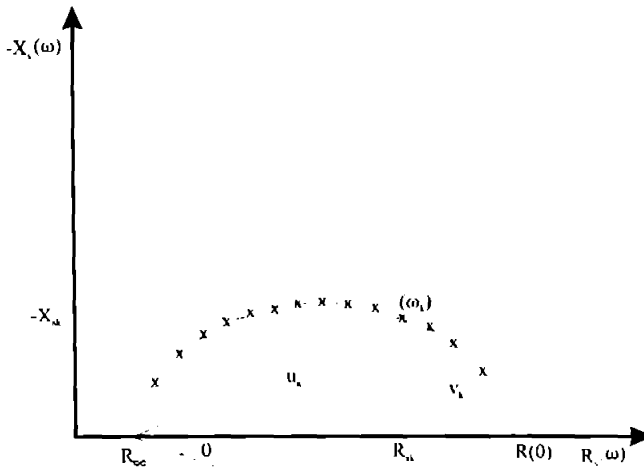


Fig.6.20. Parametrii geometrici u_k, v_k .

In partea a doua a relatiei (6.65) inlocuind relatia (6.66), inmultind cu conjugata numitorului, aducind la acelasi numitor, si apoi identificind partea reala si imaginara a impedantei complexe conform primei parti a relatiei (6.65), se obtin urmatoarele expresii:

$$R_s(\omega) = R_\infty + \frac{1 + (\omega \tau_m)^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega \tau_m)^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right) + (\omega \tau_m)^{2\gamma}} (R(0) - R_\infty) \quad (6.67)$$

$$X_s(\omega) = \frac{-(\omega \tau_m)^\gamma \sin\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right)}{1 + 2(\omega \tau_m)^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right) + (\omega \tau_m)^{2\gamma}} (R(0) - R_\infty) \quad (6.68)$$

Inlocuind in expresia parametrilor trigonometrici u_k, v_k , (fig.6.20), expresiile de mai sus particularizate pentru fiecare punct k de masurare, se obtin relatiile:

$$u_k = \frac{(R(0) - R_\infty)}{\sqrt{1 + 2(\omega_k \tau_m)^\gamma \cos\left(\gamma \frac{\pi}{2}\right) + (\omega_k \tau_m)^{2\gamma}}} \quad (6.69)$$

$$v_k = \frac{(R(0) - R_\infty) (\omega_k \tau_{mk})^\gamma}{\sqrt{1 + 2(\omega_k \tau_{mk})^\gamma \cos\left(\frac{\gamma\pi}{2}\right) + (\omega_k \tau_{mk})^{2\gamma}}} \quad (6.70)$$

Facind raportul celor doi parametri obținem:

$$\frac{u_k}{v_k} = (\tau_{mk} \omega_k)^{-\gamma} \quad (6.71)$$

de unde :

$$\tau_{mk} = \frac{1}{\omega_k} \left(\frac{u_k}{v_k}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (6.72)$$

Daca cele n puncte experimentale ar fi situate toate pe un cerc, valoarea lui τ_{mk} ar fi aceeași indiferent de frecvența de măsurare, astfel ca 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 a celor n valori care rezulta din calcul :

$$\tau_m = \left[\prod_{k=1}^n \tau_{mk} \right]^{\frac{1}{n}} = \left[\prod_{k=1}^n \frac{1}{\omega_k} \left(\frac{u_k}{v_k}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (6.73)$$

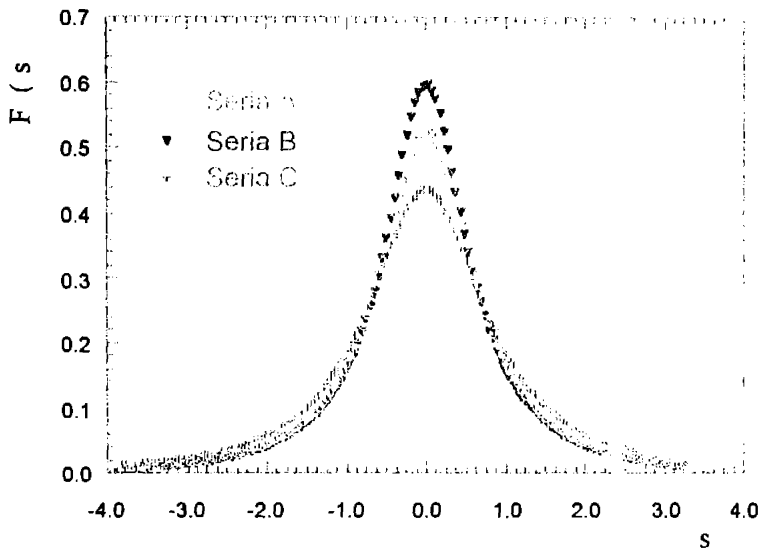
Cu valoarea determinată pentru τ_m , se poate trece la reprezentarea funcției de distribuție a timpilor de relaxație $F(s)$, funcție prezentată în 6.2.3 și data de relația :

$$F(s) = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin[(1-\gamma)\pi]}{\operatorname{ch}(\gamma s) \cos[(1-\gamma)\pi]} \quad (6.74)$$

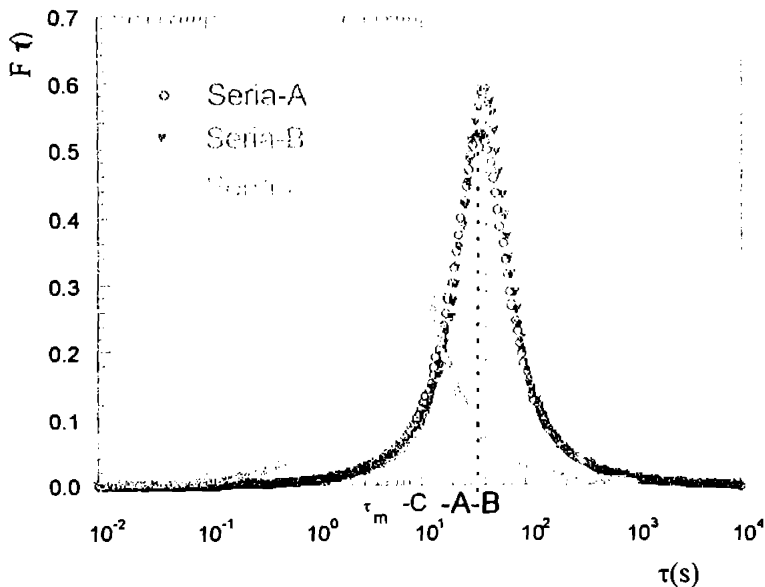
in care :

$$s = \ln\left(\frac{\tau}{\tau_m}\right) \quad \text{și} \quad \int_{\tau=0}^{+\infty} F(s) d\ln\tau = 1 \quad (6.75)$$

Reprezentarea funcțiilor de distribuție pentru cele trei serii de varistoare în starea inițială nedegradată, este făcută în figura 6.21. Mai avantajoasă decât reprezentarea $F(s)$ este reprezentarea $F(\tau)$, deoarece în afara de valoarea maximă normată a funcției de distribuție avem o informație și despre valoarea și dispersia timpilor de relaxație.



a)



b)

Fig.6.21. Funcțiile de distribuție ale timpilor de relaxație pentru seriile A, B, C de varistoare în starea inițială nedegradată a) $F(s)$ Reprezentare normalizată a funcției de distribuție; b) $F(\tau)$ Reprezentarea funcției de distribuție în raport cu timpul de relaxație;

În tabelul 6.5. am prezentat valorile obținute în urma calculului pentru timpul mediu de relaxare și valoarea maximului funcției de distribuție, pentru cele trei serii de varistoare analizate.

Tabel.6.5.

Valoarea timpilor medii de relaxatie

Seriile	A	B	C
τ_m (s)	35,03	38,77	7,19
max {F(s)}	0,54	0,61	0,45

Din alura funcțiilor de distribuție $F(s)$, valoarea ei maximă și valoarea timpului mediu de relaxare se pot trage concluzii importante referitoare la calitatea varistorului. Analizând cele două reprezentări se remarcă o valoare mai mare pentru maximul funcției de relaxare și un timp de relaxare mai mare pentru seria B de varistoare. "Suplețea" caracteristicii poate fi interpretată ca o măturie a mai bune omogenități a varistoarelor din seria B adică, la nivelul microstructurii varistoarelor, cele mai multe microvaristoare elementare au timpi de relaxare apropiați de τ_m , adică 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 relaxare indică o stabilitate mai bună în timp a caracteristicilor electrice;

Mult mai eficiente se vor dovedi metodele prezentate în cazul evaluării gradului de degradare al varistorului după supunerea lui la teste de îmbătrânire (degradare), prin compararea τ_m și a funcției de distribuție $F(s)$ din starea inițială cu valorile din starea finală. Avantajul esențial al metodei este acela că pentru caracterizare se poate folosi o tensiune redusă, ceea ce înseamnă că metoda este nedistructivă, spre deosebire de metoda variației tensiunii reziduale care poate fi distructivă pentru eșantionul supus caracterizării.

Atât această metodă, cât și cea clasică, a determinării caracteristicii de protecție $I(U)$ în curent continuu, vor fi utilizate pentru caracterizarea stării de degradare al varistoarelor supuse testelor de îmbătrânire, rezultatele aplicării acestor metode fiind prezentate în capitolul următor.

6.2.8 Prezentarea organigramei programului de calcul a marimilor necesare caracterizării varistoarelor prin metoda spectroscopiei impedanței

Dat fiind numărul mare de măsurători și a timpului necesar (mai ales la frecvențe joase), cât și a instrumentelor de măsurare "inteligente", prevăzute cu facilități de achiziție și transfer de date, standul de măsurare a fost prevăzut cu un program de comandă al dispozitivelor de măsură, realizarea achiziției și salvarea rezultatelor măsurătorilor, făcându-se automat [13]. Organigrama programului de măsurare a fost prezentată în figura 6.18.

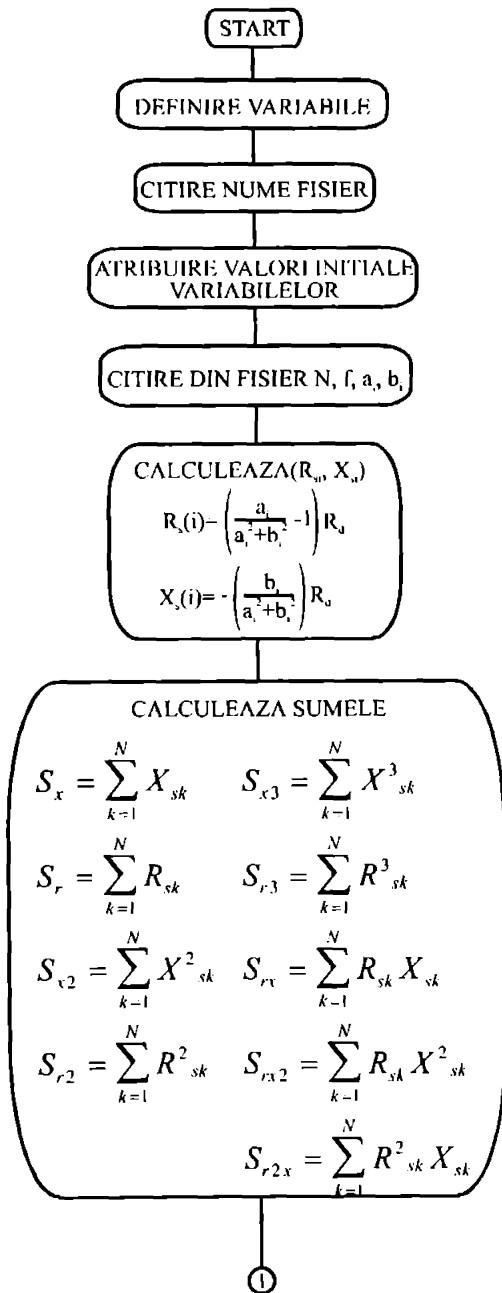
Asa cum am prezentat anterior, rezultatul măsurătorii sînt frecvența și valorile tensiunii culese la ieșirea celor două canale ale analizorului Solartron (f, a, b), valori ce urmează a fi prelucrate ulterior în conformitate cu obiectivele propuse. Algoritmii și relațiile matematice care au stat la baza dezvoltării programelor au fost prezentați în paragrafele anterioare (§.6.2.3, §.6.2.6, §.6.2.7).

Unele mărimi care s-au pretat la un calcul tabelar ($R_s, X_s, F(s), I(U)$) le-am determinat și reprezentat cu ajutorul programelor Kaleidagraph și Cricket Graph pe calculatoare Mac Intoch, iar cele care au necesitat un calcul iterativ ($\tau_m, \theta, R(0), x_c, y_c, R$, algoritmul de minimizare) le-am determinat printr-un program în Turbo Pascal pe calculator PC. Organigrama programului de calcul TAUMED este prezentată în figura 6.22, programul fiind prezentat în anexa 2. Valorile calculate cu ajutorul programului ($\tau_m, \theta, R(0), x_c, y_c, R$) vor fi folosite pentru caracterizarea prin metoda impedanței complexe a varistoarelor fabricate și pentru reprezentările grafice a diagramelor Cole-Cole, $X(R)$ și ale funcțiilor de distribuție $F(\tau)$ sau $F(s)$. Reprezentările grafice le-am făcut pe calculatorul Mac Intoch, trecerea datelor de pe un calculator pe altul necesitînd unele transformări, simple însă, de rutină. Tratarea datelor era posibilă și pe un singur calculator dar calculatoarele fizice avute la dispoziție și avantajele și facilitățile oferite de programele Kaleidagraph și Cricket Graf, au condus la această abordare.

Programul de desfășurare al măsurătorilor și prelucrării datelor în cazul studiului impedanței complexe a varistoarelor fabricate, supuse caracterizării este prezentat schematic în ordinograma principală din figura 6.23.

Concluzionînd, prelucrarea datelor, reflectată în această ordinogramă s-a desfășurat în felul următor :

- măsurarea propriu-zisă în urma căreia au rezultat fisierele cu date primare (f, a, b), achiziționate de la analizorul Solartron.
- calculul parametrilor R_s, X_s din schema echivalentă a varistorului, cunoscînd pentru această funcția de transfer a analizorului și parametrii schemei de măsurare;
- reprezentarea grafică, într-o diagramă Cole-Cole a $X_s - R_s$;
- interpolarea prin metoda regresiei circulare a "celui mai bun cerc" ce poate lega punctele de măsură;
- calculul coordonatelor centrului cercului și razei cercului (x_c, y_c, R) și a rezistenței în curent continuu (R_0);
- calculul timpului mediu de relaxare (τ_m) și a unghiului de descentraj (θ) necesari pentru reprezentarea funcțiilor de distribuție;
- generarea unei serii pentru τ și s și apoi reprezentarea funcțiilor $F(\tau)$ sau $F(s)$;
- salvarea graficelor și rezultatelor pentru prelucrări și interpretări ulterioare;



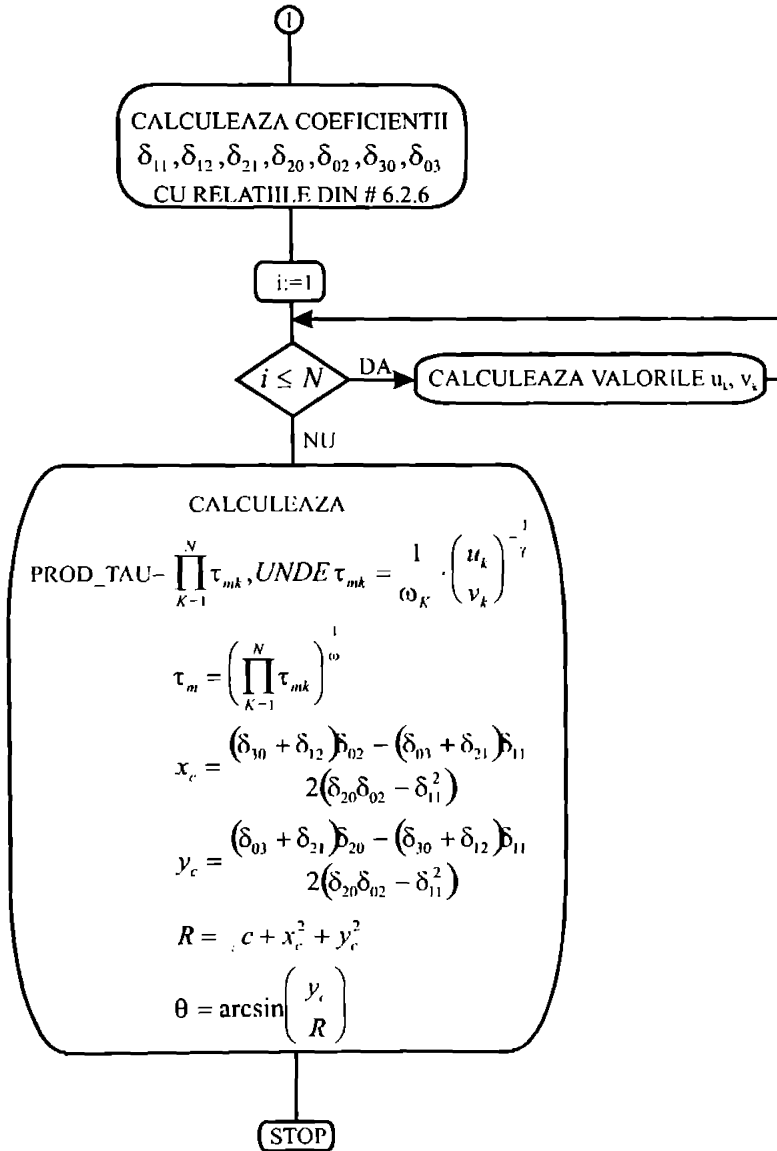


Fig. 6.22. Organigrama programului de calcul a parametrilor necesari studiului impedantei complexe, TAUMED.

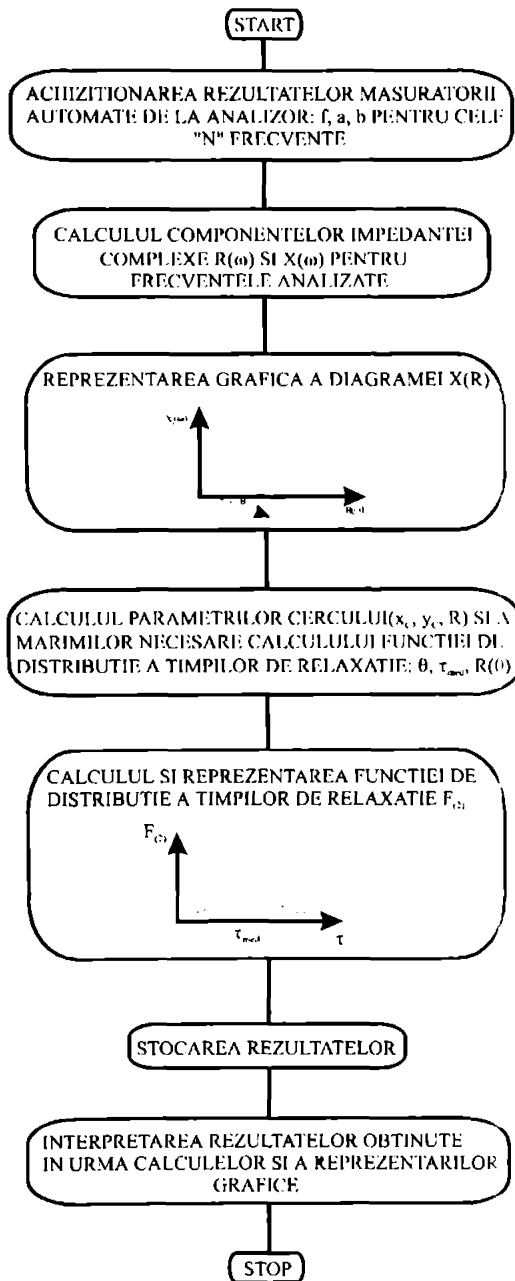


Fig. 6.23. Organigrama cu desfasurarea programului de masuratori, prelucrare a datelor si reprezentari grafice în cazul caracterizării varistoarelor cu ZnO prin metoda spectroscopiei impedantei.

In acest capitol am prezentat din punct de vedere teoretic metodele de caracterizare electrica a varistoarelor :

- metoda clasica de ridicare a caracteristicii $I(U)$ si determinarea gradului de neliniaritate a caracteristicii.
- metoda moderna de studiu al impedantei complexe a varistoarelor.

Ambele metode aduc criteriile de apreciere a stării varistoarelor. Prin metoda clasică variația tensiunii de prag U_s , a tensiunii reziduale U_{rez} la I_n și a curentului de scurgere I_f la U_n ; prin metoda impedanței complexe funcția de distribuție a timpilor de relaxație, parametrii modelului Cole-Cole.

Am prezentat schemele electrice de masurare iar apoi algoritmi de prelucrare a datelor si rezultatelor experimentale. Am detaliat algoritmul de determinare a parametrilor modelului Cole-Cole pentru impedanta complexa si notiunea de functie de distributie a timpilor de relaxatie, demonstrând expresia analitică a acesteia pentru modelul Cole-Cole, ales ca fiind cel mai potrivit pentru varistoarele cu ZnO .

Toate problemele teoretice prezentate le-am ilustrat prin prelucrarea unora din datele rezultate in urma masurarilor experimentale asupra varistoarelor fabricate.

Ca urmare a sistematizarii procesului de prelucrare a datelor experimentale, sistematizare impusa de volumul mare de date si masuratori pe care le-am facut, am stabilit un mers (program) de prelucrare, prezentat in ordinograma din fig.6.23, pentru cuprinderea unui numar cit mai mare de situatii in scopul evidentierii avantajelor, dezavantajelor si problemelor specifice ridicate de fiecare din metodele de studiu utilizate pentru caracterizarea varistoarelor fabricate.

Pentru indeplinirea acestui scop a fost necesara crearea “uneltelor”, adica a programelor de prelucrare si calcul care sa implementeze algoritmi matematici propusi , iar apoi realizarea reprezentarilor grafice pentru interpretarea rezultatelor obtinute.

Eficienta metodelor de studiu propuse in acest capitol se va dovedi cu precadere in capitolul urmator prin compararea proprietatilor initiale ale varistoarelor (in stare virgina) cu cele pe care le vor avea dupa supunerea la teste de verificare (stare degradata).

CAPITOLUL 7

CARACTERIZAREA ELECTRICA SI MODELAREA VARISTOARELOR CU ZnO

Măsurarea simplă a unora din caracteristicile electrice ale descarcătoarelor nu este suficientă pentru caracterizarea lor. Este necesară pentru aceasta supunerea descarcătoarelor la anumite genuri de solicitări care să permită evaluarea comportamentului sau la solicitări din cele mai severe. Aceste solicitări care simulează într-un mod normalizat, standard, socurile de tensiune reale ce pot apărea în exploatare, sînt din cele mai diverse. În primul rînd sînt testele de încercări de tip care se regăsesc și în normativele CEI și standardele naționale pentru produse similare (descarcătoare cu SiC). Dintre acestea, cele mai importante, care vor fi aplicate și esanțioanelor analizate sînt prezentate în tabelul următor :

Tabel 7.1
Încercări de tip ale varistoarelor cu ZnO

Denumire operație	Modalități de realizare	Tensiune sau curent aplicat
Măsurări inițiale	Determinarea tensiunii de prag și a caracteristicii I(U)	Tensiune continuă 0-U _s
Determinare nivel de protecție	Măsurarea tensiunii reziduale la I _n în stare inițială	1xI _n 8/20 μs
Funcționarea la I _n de descărcare	Aplicarea a 4 grupuri de câte 5 socuri de supratensiuni succesive la I _n . Intervalul între impulsuri 60 și între grupuri de impulsuri 30 min	4x5xI _n 8/20 μs
Funcționarea la supratensiuni de trăsnet	Șoc de mare amplitudine (40 kA) la temperatura mediului ambiant (θ _a =20°C)	1x40kA (4/10 μs)
	Șoc de mare amplitudine (40 kA) la temperatura de 60°C	1x40kA (4/10 μs)
Funcționarea la supratensiuni de manevră	Aplicarea a 20 șocuri de lungă durată și amplitudine 100 A	20x100 A 250/2500 μs
Verificarea stării de degradare	a) Ridicarea caracteristicii I(U) b) Măsurarea U _{rez} după testele de funcționare la I _n	
Evaluarea stării finale a varistorului		

Esanționul supus verificării nu trebuie să sufere modificări fizice sau deteriorări vizibile. După răcirea lui la temperatura mediului ambiant, tensiunea reziduală la curentul nominal de descărcare nu trebuie să varieze cu mai mult de 10% față de valoarea inițială din starea virgină. În afara de acestea, standardele internaționale [96],[97] mai prevăd și teste de îmbătrînire la solicitări simple sau combinate, specifice descarcătoarelor cu oxizi metalici.

Dintre acestea cele mai întâlnite solicitări care pot fi aplicate separat sau în același timp sunt : tensiunea de serviciu permanent, temperatura, supratensiuni de comutație sau de trazețnet.

Pentru a caracteriza comportarea descarcătorului la aceste solicitări, se va compara starea finală în urma supunerii la testele de îmbătrânire cu starea inițială, așa numit virgînă. Această caracterizare o voi face în cele ce urmează prin cele 2 metode prezentate în capitolul anterior:

- măsurarea caracteristicii $I(U)$, metoda cel mai des utilizată și mai ușor de realizat practic. După efectuarea acestei măsurători voi determina variația unor parametri ca :
 - variația tensiunii de prag $f(\Delta U_s, U_s)$;
 - variația curentului de fugă $f(\Delta I_f, I_f)$;
 - variația coeficientului de neliniaritate α ;
- măsurarea impedanței complexe, metoda mult mai laborioasă și pretentioasă prin aparatele de măsură și apoi prelucrarea rezultatelor, dar nedistructivă, care poate reflecta starea omogenității varistoarelor supuse analizei.

Cele două metode vor fi aplicate pentru caracterizarea varistoarelor cu ZnO supuse analizei.

7.1. Incercări pentru verificarea caracteristicilor de funcționare

Testele la care vor fi supuse varistoarele pot fi încadrate în categoria încercărilor de tip. Aceste încercări de tip se efectuează pentru noi tipuri de descarcătoare sau în cazul în care intervin modificări în construcția, natura și calitatea materialului sau a procesului tehnologic.

7.1.1. Verificarea nivelului de protecție N_p asigurat de varistor

Această încercare se face prin măsurarea tensiunii reziduale la aplicarea unui curent nominal de descarcare. Unul din scopurile urmărite la proiectarea noului tip de descarcător a fost și obținerea unui curent nominal $I_n = 5 \text{ kA}$. Cum acest curent nu se poate obține prin aplicarea unei tensiuni continue de durată (varistorul s-ar distruge prin ambalare termică), această măsurătoare s-a făcut cu ajutorul generatorului de soc prezentat în capitolul 6.1.

Varistorul care urmează a fi caracterizat i se aplică o undă de soc normalizată de curent $8/20 \mu\text{s}$ la care valoarea de vîrf a curentului trebuie să fie $5\text{kA} \pm 10\%$. Pentru acest curent se măsoară valoarea de vîrf a unde de supratensiune ce apare pe varistor în momentul descărcării, aceasta constituind tensiunea reziduală în stare virgînă, ce va indica nivelul de protecție N_p asigurat de varistor. Această tensiune va fi o mărime de referință pentru caracterizarea comportării varistorului. În figura 7.1 se prezintă ca exemplu oscilograma

acestei încercări pentru unul din varistoarele seriei B, fiind evidențiate și formele de undă normalizate pentru curent și tensiune.

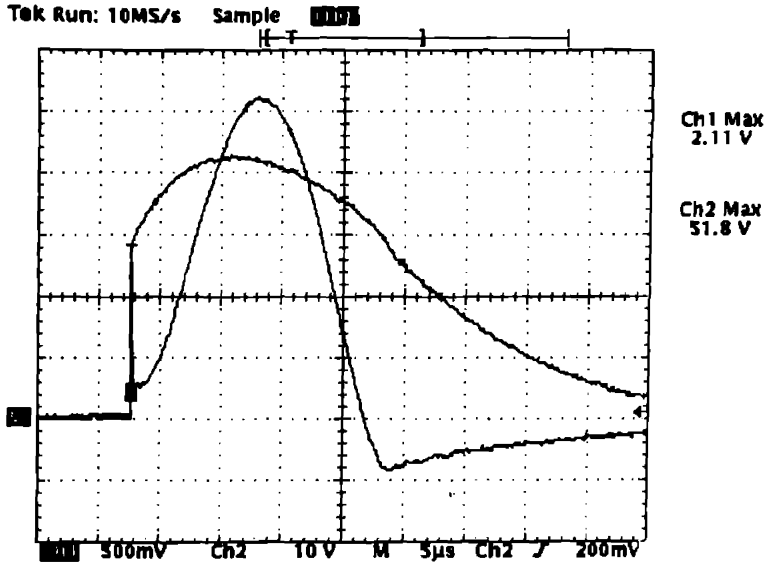


Fig.7.1 Tensiunea reziduală $U_{rez} = 2,11$ kV la $I_n = 5,18$ kA pentru seria B de varistoare.

Valorile tensiunii reziduale U_{rez-v} în starea inițială (virgină) pentru cele patru serii de varistoare (câte 3 eșantioane din fiecare) sunt prezentate în tabelul 7.1.

Tabel 7.1
Tensiunea reziduală a varistoarelor

SERIA	U_{rez-v} [V]			$U_{rez-med}$ [V]
	V_1	V_2	V_3	
A	1750	1820	1680	1750
B	2090	2060	2090	2030
C	2700	2650	2800	2720
D	2920	2860	2820	2850

Asa cum am mai amintit dat fiind reproductibilitatea varistoarelor (se constată și din valorile tensiunii de prag U_S și a celei reziduale U_{rez-v}) în continuare voi face referire numai la primul eșantion din serie, iar acolo unde problemele sunt identice și se pot generaliza

indiferent de nivelul tensiunii de prag, rezultatele analizei se vor prezenta pentru un singur esantion.

Concluzia care se poate trage din aceste măsurători este că scopul propus, de a reduce U_{rez} și creșterea lui I_n a fost atinsă. La un curent nominal de 5 kA, tensiunea reziduală $U_{rez} < 3$ kV pentru toate seriile de varistoare fabricate, spre deosebire de varistoarele cu SiC existente actualmente în exploatare care la un $I_n = 2.5$ kA au $U_{rez} = 3.1$ kV, iar la $I_n = 5$ kA au $U_{rez} > 3.5$ kV [108], adică la limita impusă de standarde. Drept urmare folosirea noilor tipuri de varistoare permite coborîrea nivelului de izolație de la 7.2 kV cît este în prezent la 3.6 kV (valoare la care ELECTROPUTERE Craiova execută deja celulele de tracțiune urbană). Mai mult, încercările următoare vor întări această afirmație și pentru curenții maximi de descărcare I_{max} .

7.1.2 Verificarea funcționării la curenții nominali de descărcare

Această încercare a constat în aplicarea a 20 de socuri de $I_n = 5$ kA împărțite în 4 grupe a câte 5 socuri. Între 2 socuri succesive a fost lăsată o pauză de 1 min iar între grupele de socuri o pauză de 15 min pentru răcirea esantioanelor. Încercarea a fost efectuată cu același generator de soc folosit și la încercarea precedentă, tensiunea de încărcare a generatorului fiind diferită pentru cele 3 serii de varistoare, în scopul obținerii aceleiași unde normalizate $8/20$ de I_n . Rezultatele măsurătorilor sînt similare pentru esantioanele analizate. În tabelul 7.2 se dau valorile variației maxime procentuale, după aplicarea a 20 socuri, a tensiunii reziduale pentru esantioanele celor trei serii de varistoare.

Tabelul 7.2
Variația tensiunii reziduale după 20 socuri de I_n

	U_{rez-v} [V]	U_{rez-d} [V]	$\frac{\Delta U_{rez}}{U_{rez-v}} \cdot 100$ [%]
Seria A	1750	1850	5.7
Seria B	2090	2110	0.95
Seria C	2650	2920	11

Concluzia desprinsă de aici este că degradarea este foarte redusă și varistoarele corespund din punct de vedere al acestei probe, cu excepția seriei C care prezintă o degradare mai pronunțată.

7.1.3 Verificarea tinerii la impulsuri de curent de mare amplitudine

Inercarea a constat in aplicarea a 2 socuri de curent de mare amplitudine cu valoarea de virf de aproximativ 50 kA ($10 I_n$). Aceste socuri simuleaza unda de trasnet. Inercarea a fost efectuata cu generatorul de inalta tensiune unde $4/10 \mu s$, de asemenea prezentat in cap 6.1, formele de unda ale tensiunii si curentului pentru incercarea unui varistor al seriei D fiind prezentate in figura 7.2.

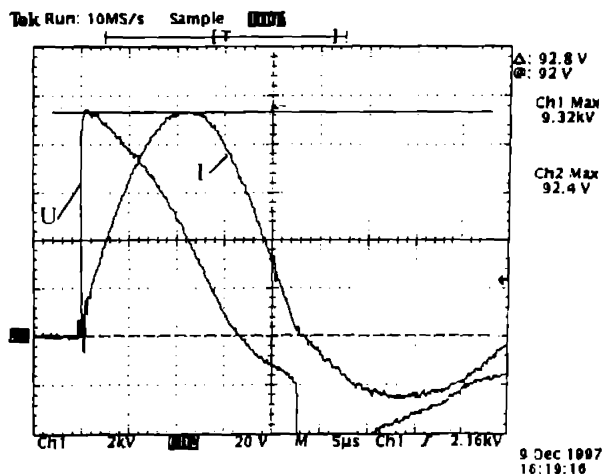


Fig.7.2 Incercarea cu unde de soc de mare amplitudine $I_{max} = 46.2 \text{ kA}$; $U_{rez} = 9.32 \text{ kV}$.

Factorul de demultiplicare al schemei de masurare este 500 pentru canalul 2 (de curent) si 1000 pe canalul 1 (de tensiune). Atit inainte cit si dupa efectuarea acestei probe a fost masurata tensiunea reziduala la I_n , variatia acesteia inainte si dupa acest tip de incercare fiind prezentata in tabelul 7.3;

Tabelul 7.3
Tensiunea reziduală la I_n dupa 2 socuri de I_{max}

	U_{rez-v} [V]	U_{rez-d2} [V]	$\frac{\Delta U_{rez}}{U_{rez-v}} \cdot 100$ [%]
Seria A	1750	1880	7,4
Seria B	2090	2140	2,39
Seria C	2700	Nu a rezistat	
Seria D	2920	2980	2,05

Variația tensiunii reziduale se menține în limitele prevăzute de standarde de 10%, deci varistoarele corespund și la această încercare. Observația care se face este că la seria C unul din esantioane a fost străpuns. Această comportare este datorată neomogenității structurii varistorului, fapt care va putea fi pus mai bine în evidență prin analiza impedanței complexe, care va confirma această ipoteză.

7.1.4 Verificarea tinerii la impulsuri de curent de lungă durată

Această încercare se face cu ajutorul generatorului de socuri de lungă durată și amplitudine redusă. Undele de curent sunt de formă dreptunghiulară, amplitudinea lor putând fi variată prin tensiunea de încărcare a bateriei de condensatoare, durata frontului fiind reglată la 2500 de μs . Factorii de scală pentru curent și tensiune sunt :

$$k_I = 22.34$$

$$k_U = 600$$

Forma de undă aplicată esantioanelor supuse încercării este prezentată în fig. 7.3.

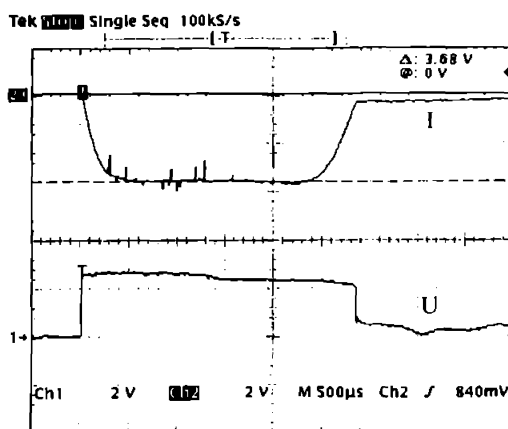


Fig. 7.3 Unde de soc de curent de lungă durată ($t=2.7$ ms) și mică amplitudine ($I = 82.4$ A, $U = 1578$ V), aplicată esantioanelor seriei B de varistoare

Standardele românești [104], [108] prevăd aplicarea a 20 de socuri de 75 A. Data fiind tensiunea mică de încărcare a condensatorului și reglajului dificil de efectuat cu exactitate am aplicat esantioanelor 20 de socuri cu o amplitudine a frontului de 90 ± 100 A. Esantioanele au suportat cu bine încercarea, după răcirea lor variația tensiunii reziduale la I_n fiind dată în tabelul 7.4

Se constată și de această dată o variație redusă a acestora ceea ce confirmă o degradare redusă a varistorului. Aceste concluzii vor fi întărite și de rezultatele celorlalte

metode de caracterizare. Mai mult, la unele esantioane s-a observat chiar o scădere a U_{rez} ceea ce conduce la ipoteza unei regenerări a varistorului. Ipoteza aceasta poate fi adevărată și explicabilă prin temperatura ridicată la care ajunge varistorul care poate produce modificări în structura microscopică, atomică a varistorului.

Tabelul 7.4
Variația tensiunii reziduale după 20 socuri de 100 A

	U_{rez-v} [V]	U_{rez-d3} [V]	$\frac{\Delta U_{rez}}{U_{rez-v}} \cdot 100$ [%]
Seria A	1750	1920	9,7
Seria B	2090	2170	3,82
Seria C	2700	Nu a rezistat	
Seria D	2920	2960	1,36

Testele de încercare prezentate până acum sunt cerute de standardele românești [108] în vigoare pentru descarcatoarele cu SiC, pentru descarcatoarele cu oxizi metalici nefiind încă stabilite norme de încercare specifice. drept pentru care în continuare voi prezenta câteva metode specifice, mai adecvate pentru caracterizarea acestor noi tipuri de descarcatoare, folosite de către firmele producătoare de varistoare pe baza de oxizi metalici.

Rezultatele experimentale obținute prin această metodă de caracterizare evidențiază o foarte bună calitate a varistoarelor seriilor B și D, creșterea procentuală a tensiunii reziduale fiind mică (1-3%) sub pragul acceptat de 10%.

Seria C nu a corespuns calitativ, în urma aplicării testelor, esantioanele suferind modificări fizice (spargerea sau strapungerea lor). Seria A prezintă și ea proprietăți corespunzătoare, în limitele acceptate dar a rezistat cu dificultate la suprătensiunile (socurile) de manevră care sunt cele mai probabile să apară în exploatare, creșterea tensiunii reziduale fiind mai pronunțată (9,7%).

7.2 Caracterizarea stării de degradare a varistoarelor prin măsurarea caracteristicii I(U) în curent continuu

Așa cum a fost amintit în capitolul 4, degradarea unui varistor este însoțită de creșterea curentului de fugă care poate conduce la o ambalare termică în interiorul varistorului deci în ultima instanță la distrugerea acestuia. Această creștere a curentului conduce la ideea deplasării caracteristicii I(U), cuantificarea acestei deplasări fiind făcută prin stabilirea variației tensiunii de prag U_S sau a curentului de fugă I_f (definiți pentru tensiunea de serviciu permanent). Creșterea lui I_f este determinată de diminuarea înălțimii barierei de potențial ϕ , (vezi §.6.1.2).

Aceasta comportare fiind observată la toate esantioanele supuse analizei, acestea având caracteristici aproape identice în cadrul aceleiași serii, prezentarea se va face numai pentru un esantion, concluziile rezultate putând fi generalizate. Pentru a justifica afirmația privind reproductibilitatea caracteristicilor varistoarelor aparținând aceleiași serii în fig. 7.4 se prezintă caracteristicile $I(U)$ pentru 2 esantioane diferite ale seriei B, în stare inițială, virgină.

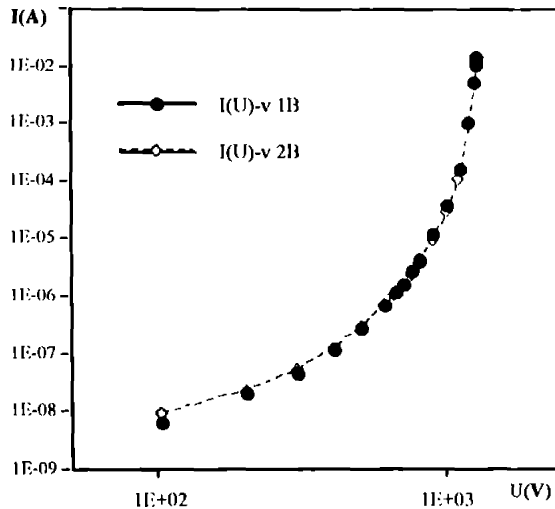


Fig. 7.4 Caracteristica $I(U)$ pentru esantioanele 1 și 2 seria B în stare virgină $U_s=1200$ V.

7.2.1 Verificarea variației procentuale a tensiunii de prag U_s

Caracterizarea pastilei de ZnO prin ridicarea caracteristicii de protecție $I(U)$ a varistorului a fost făcută în starea inițială și apoi după fiecare test de verificare care a determinat implicit o degradare mai mult sau mai puțin pronunțată. S-au notat caracteristicile după cum urmează :

- $I(U)-v$ Caracteristica în stare virgină;
- $I(U)-d1$ Caracteristica după degradarea cu 20 socuri de I_n ;
- $I(U)-d2$ Caracteristica după degradarea cu 2 socuri de I_{max} ;
- $I(U)-d3$ Caracteristica după degradarea cu 20 socuri de lungă durată ($t=2500 \mu s$);

După cum se observă din fig. 7.5 nu se remarcă o degradare pronunțată a caracteristicii mai ales pentru tensiuni în jurul celei de prag; se constată la unele esantioane chiar o creștere a tensiunii de prag, ca și cum calitatea varistorului s-ar fi îmbunătățit; acest fapt se explică prin energia ce se disipă în varistor în timpul ultimei încercări (socuri de lungă durată) care ajută la fixarea și consolidarea rețelei cristaline a varistorului.

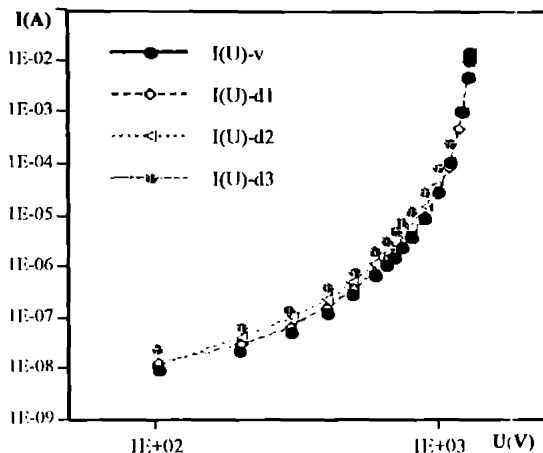


Fig. 7.5. Caracteristica I(U) în starea inițială și după testele de încercări.

O comportare aparte o are seria C de varistoare la care degradarea este cea mai pronunțată, caracteristica din stare inițială, virgină, dănd o primă informație în acest sens (prin compararea cu ale celorlalte serii, a se vedea fig. 6.2) prin valoarea mare a curentului de fugă I_f la U_n , confirmarea venind și de la această caracterizare după cum se poate constata din fig. 7.6, după numai prima degradare.

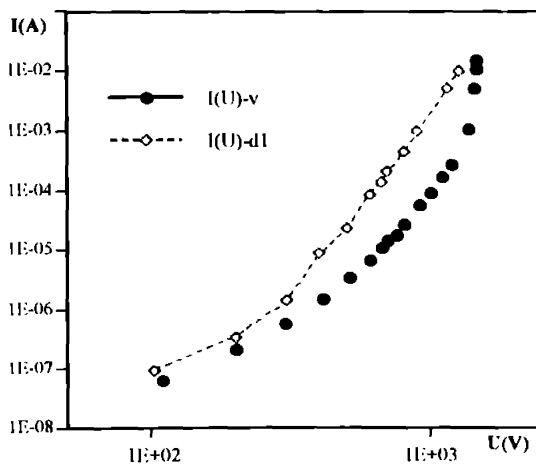


Fig. 7.6. Caracteristica I(U) pentru seria C de varistoare

Un aspect util în caracterizarea varistorului privitor la degradarea lui se poate pune în evidență prin aplicarea unei tensiuni de polarizare inverse decât cea care a produs degradarea.

Considerentele teoretice al implicăției sensului tensiunii de polarizare asupra mecanismelor degradării, a fost tratat în cap 4, unde am arătat că aplicarea unei tensiuni de sens contrar pune în evidență mai pronunțat degradarea prin deformarea asimetrică a barierei de potențial de la nivelul microvaristăntei. Și la nivel macroscopic se constată aceasta, în fig.7.7 am notat caracteristicile cu d+ corespunzător caracterizării cu tensiune de aceeași polaritate cu cea care a provocat degradarea și d- pentru cea de sens contrar. Pentru o mai bună caracterizare am luat în calcul valoarea medie aritmetică a variației tensiunii de prag măsurate la 1 mA.

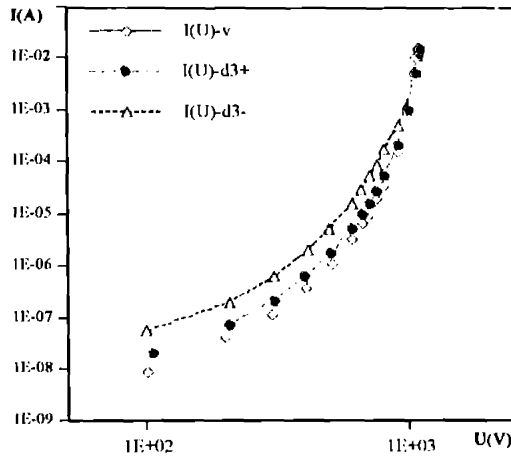


Fig.7. Caracteristica I(U) pentru tensiuni de polarizare de semne contrare.

Variația relativă medie procentuală este dată atunci de relația :

$$\frac{\Delta U_s}{U_s} = \frac{U_s - U_{sd}}{U_s} \cdot 100 = \left(1 - \frac{[U_s d+ U_s d-]}{2 U_s} \right) \cdot 100 \tag{7.1}$$

În tabelul 7.5 se da variația procentuală a acestora pentru seriile de varistoare fabricate și caracterizate

Tabel 7.5
Variația procentuală a tensiunii de prag U_s

	U_{ni} [V]	U_{sd} [V]	U_{sd+} [V]	$\frac{\Delta U_s}{U_s}$ [%]	α_i	α_f
Seria A	1020	976	992	3,5	36,9	24
Seria B	1215	1169	1211	0,95	42,2	32,7
Seria C	1402	-	-	-	32	Nu a rezistat
Seria D	1650	1546	1630	3,75	25	21

Tot din caracteristica I(U) s-a constatat, ca urmare a degradării, și o scădere a exponentului α , valorile inițiale și finale fiind de asemenea date în tabelul 7.5

În practică, valoarea limită a variației procentuale a tensiunii de prag de la care varistorul se consideră degradat este de 10%. Adoptând acest procent se constată că seriile A, B și D ca sînt de bună calitate, seria C netrecînd testele de încercări.

7.2.2 Evoluția curentului de scurgere I_f după aplicarea de socuri de tensiune

Măsurătorile au fost efectuate în cc înainte și după aplicarea celor 2 socuri de mare amplitudine (unde de curent $4/10\mu\text{s}$ cu $I_{\text{max}} = 50 \text{ kA}$). Inițial, varistorul a fost supus tensiunii $U=1050 \text{ V}$ corespunzătoare unei supratensiuni temporare pentru atingerea unui regim termic stabilizat cele două șocuri de supratensiune de mare amplitudine fiind aplicate succesiv la 1 minut. Se constată din rezultatele măsurătorilor prezentate în fig.7.8 o creștere bruscă a curentului de scurgere (dar fără atingerea unei valori care să producă ambalarea termică), apoi o descreștere exponențială către o valoare stabilizată puțin mai mare decît cea inițială de dinaintea aplicării socurilor, ceea ce semnifică o degradare oarecare a varistorului, dar și o polarizare de suprafață remanentă, care în timp se anulează.

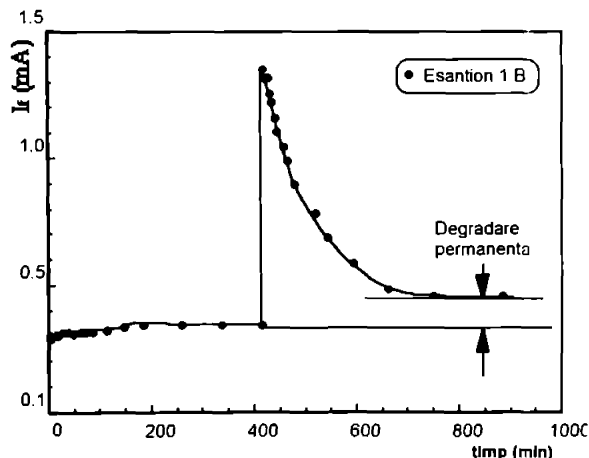


Fig. 7.8. Evoluția curentului de scurgere (la $U = 1050 \text{ V}$) înainte și după aplicarea a 2 socuri de mare amplitudine.

Lucrul cel mai important pentru a considera ca un varistor nu a suferit o degradare ireversibilă care să conducă la distrugerea lui, este stabilizarea curentului de scurgere în regimul normal de funcționare la o valoare constantă care să nu producă ambalarea termică. Deci procentul de creștere al curentului este mai puțin relevant, importanța fiind valoarea la care se stabilizează, valoare ce trebuie să fie inferioară lui 10^{-3} A , așa cum a fost demonstrat în §.5.3.

7.2.3 Evidențierea stării de degradare prin diminuarea înălțimii barierei de potențial

Cresterea curentului de fuga în urma socurilor aplicate sugerează modificarea în sensul creșterii numărului purtătorilor de sarcină la nivel microscopic. Aceasta creștere nu poate fi datorată decât reducerii înălțimii barierei de potențial. Punerea în evidență a acestei reduceri este făcută în fig. 7.9 unde este reprezentată curba înălțimii barierei de potențial $\phi(U)$ înainte și după degradare pentru primul din esantioanele seriei B.

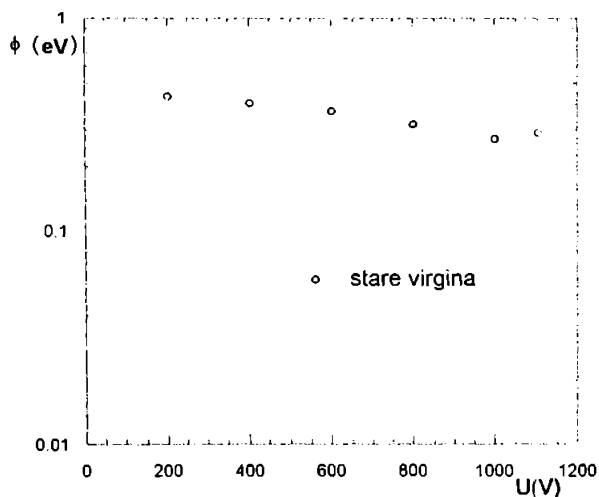


Fig. 7.9. Evoluția înălțimii barierei de potențial înainte și după procesele de degradare

Această metodă are numai o importanță teoretică, de explicare fizică a fenomenelor de la nivelul microscopic, nefiind deocamdată cuantificată valoarea de la care varistorul să se considere degradat. Este deci o metodă calitativă și nu cantitativă de evidențiere a degradării varistorului, constatându-se accentuarea diminuării înălțimii barierei de potențial pentru tensiuni ce se apropie de tensiunea de prag U_s .

7.3 Caracterizarea stării de degradare a varistoarelor prin metoda spectroscopiei impedanței

Procedul de caracterizare este analog celui folosit în măsurarea $I(U)$ adică prin compararea caracteristicii $X(\omega) - R(\omega)$ în starea virgina și după degradările succesive la care este supusă în urma testelor de verificare. Marimile prin care se va cuantifica degradarea vor fi:

- rezistența în curent continuu (R_0);
- unghiul de descentraj (θ);
- timpul mediu de relaxare (τ_m);
- maximul funcției de distribuție ($F(s)$ sau $F(\tau)$).

7.3.1 Studiul evoluției impedanței complexe în diagrama Cole-Cole

Așa cum a fost arătat în §.6.2.6 și §.6.2.7, seriile de varistoare analizate au parametri diferiți, însă calitativ, comportarea lor la solicitări este similară, confirmând observațiile rezultate din măsurarea $I(U)$. În continuare voi prezenta dependența $X_S(\omega) - R_S(\omega)$ pentru câte un esanțion din fiecare serie, ridicată experimental după testele de degradare :

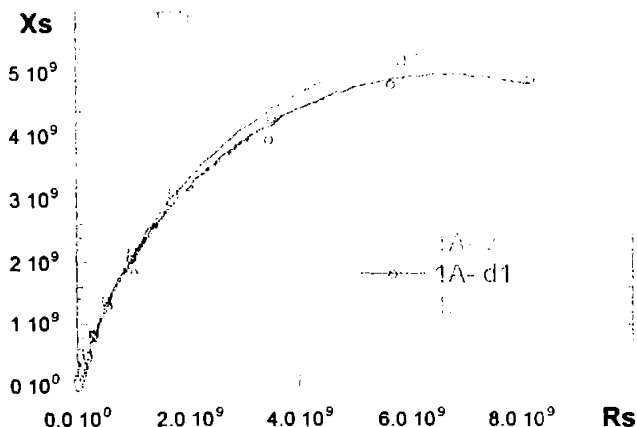


Fig. 7.10. Diagrama Cole Cole pentru seria A , în stările virgină și după testele de verificare

După cum se constată, din fig.7.10. așa cum era de așteptat cercul (din care face parte arcul de cerc al reprezentării) își micșorează diametrul, ceea ce înseamnă o reducere a rezistenței în curent continuu R_0 , și o creștere a unghiului de descentraj, ceea ce semnifică modificări în structura internă a pastilei de ZnO.

Același lucru se constată și la celelalte două serii de varistoare. O mărime importantă care reflectă degradarea varistorului este rezistența în curent continuu R_0 , a cărei variație este prezentată în tabelul 7.6, $R_{0,i}$ și $R_{0,f}$ fiind valorile inițiale și finale a acestuia pentru eșanționul din serie supus acestei metode de caracterizare.

Tabel 7.6
Variatia rezistentei in curent continuu, R_0

	R_{0-i} [Ω]	R_{0-f} [Ω]	$\frac{\Delta R}{R_0} \cdot 100$ [%]
Seria A	$1.39 \cdot 10^{10}$	$1.26 \cdot 10^{10}$	9.3
Seria B	$1.758 \cdot 10^{10}$	$2.02 \cdot 10^{10}$	-14.9
Seria C	$0.344 \cdot 10^{10}$	$0.086 \cdot 10^{10}$	34.9

Rezultatele de mai sus certifica modificarea structurii interne in urma solicitarilor la care este supus varistorul. Aceasta constatare va fi intarita si de functia de distributie a timpilor de relaxatie. O comportare aparte, contrara teoriei, au avut-o unele esantioane la care s-a constatat o crestere a rezistentei in curent continuu, dupa degradare. De exemplu esantionul 2B prezentat in fig. 7.11.

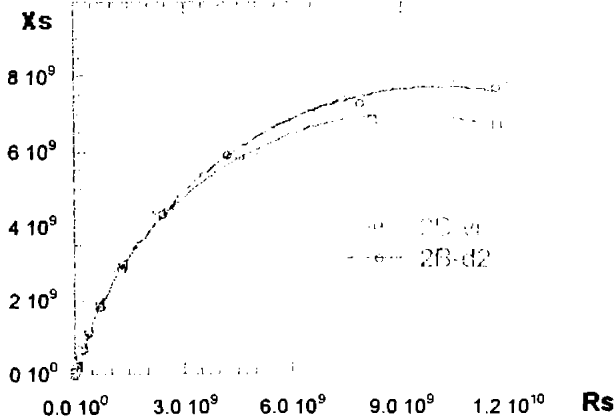


Fig.7.11 Diagrama Cole Cole pentru esantionul 2B

Cresterea rezistentei este explicabila prin distrugerea unei parti din suprafata electrozilor varistorului; in urma supunerii la socuri. La unele esantioane printre care si acesta, suprafata acoperita cu strat conductor din aliaj de Ag a scazut conducind la cresterea rezistentei in curent continuu. De aceea aceasta metoda nu poate fi folosita pentru o cuantificare exacta a starii de degradare a varistorului ci numai pentru o apreciere calitativa a fenomenului.

7.3.2 Studiul evoluției funcției de distribuție a timpilor de relaxație

În concordanță cu cele prezentate în 7.3.1 se prezintă funcția de distribuție pentru esanționul 1 al seriei B, în starea inițială, virgină și finală, degradată. Analiza expresiei funcției de distribuție relevă faptul că este o curbă parametrică de parametri τ_m și θ . Acest fapt este pus în evidență și din reprezentarea grafică din fig.7.12, pe măsura degradării varistorului, maximumul funcției (care depinde de valoarea unghiului de descentraj θ), se micșorează, graficul funcției lărgindu-se spre bază, iar timpul mediu de relaxație se deplasează spre valori mai reduse.

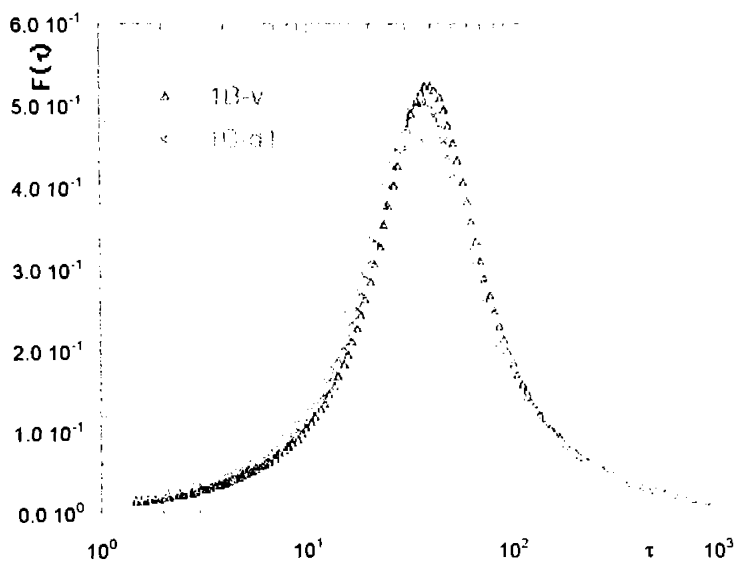


Fig. 7.12. Funcția de distribuție a timpilor de relaxație, în starea inițială și după degradări succesive a esanționului 1B.

Semnificația faptelor constatate experimental este următoarea: dacă în starea inițială, varistoarele au avut un anumit grad de omogenitate (reflectat de valoarea lui $F(\tau_m)$ și θ), după degradare scade gradul de omogenitate fapt constat prin scăderea maximumului funcției de distribuție și a lui τ_m . La nivel microscopic, aceasta semnifică o modificare a constantei de timp a microvaristoarelor elementare și deci o mai mare dispersie a acestor constante ceea ce semnifică creșterea neomogenității. O comportare diferită, care de altfel era de așteptat, a avut-o esanționul cu suprafața electrozilor erodată (2B), la care timpul mediu în loc să scadă a avut o mică creștere. Aceasta comportare care contrazice regula și estimările teoretice, poate fi constatată și din figura 7.13 și a fost pusă în evidență și prin măsurarea rezistenței în cc, prezentată anterior.

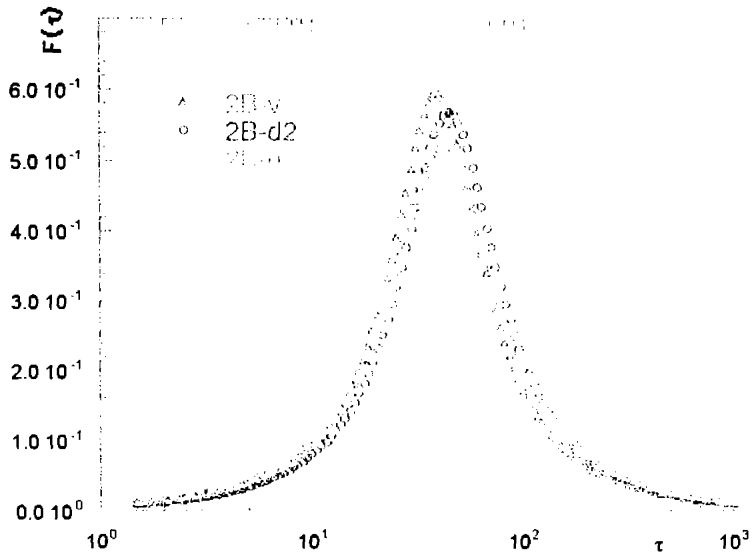


Fig. 7.13 Comportarea neconforma cu teoria a timpului mediu pentru esantionul 2B.

Parametrul invariant ca și comportare este unghiul de descentraj care a crescut la toate esantioanele în urma degradării de asemenea maximul funcției de distribuție care s-a redus în toate cazurile. Pentru o cuantificare unitară a acestor modificări în tabelul 7.7 sunt sistematizate datele referitoare la principalii parametri care reflectă modificările de structură $\theta, F_{max}, \tau_m, \frac{\Delta\tau}{\tau_m}$ la $\frac{1}{2} F_{max}$, pentru cele trei serii de varistoare :

Tabel 7.7

Evoluția parametrilor referitori la relaxația dielectrică

	θ_i	F_{max-i}	τ_{m-i}	t_{0-i}	θ_f	F_{max-f}	τ_{m-f}	t_{0-f}	$\frac{\Delta D}{D_i}$ [%]	$\frac{\Delta F_{max}}{F_{max-i}}$ [%]	$\frac{\Delta \tau_m}{\tau_{0-i}}$ [%]
Seria A	16.9	0.53	38.7	1.04	18.7	0.38	33.2	1.28	10	28	32
Seria B	14.9	0.6	38.8	0.88	16.2	0.54	41.8	1.04	8	10	19
Seria C	20	0.44	6.7	1.1	30.1	0.28	6.5	1.6	50	36	45

Semnificația notațiilor și relațiile de calcul sînt date în figura următoare :

t_1, t_2 - sînt timpii de relaxație corespunzători $\frac{F_{max}}{2}$; și $\Delta\tau = t_2 - t_1$;

τ_m - timpul mediu de relaxație;

$t_0 = \frac{\Delta\tau}{\tau_m}$ - este "largimea relativă" la $\frac{F_{max}}{2}$ a funcției de distribuție

θ - unghiul de descentraj

i, f - indici care se referă la starea inițială (virgină) și finală (degradată) a varistorului;

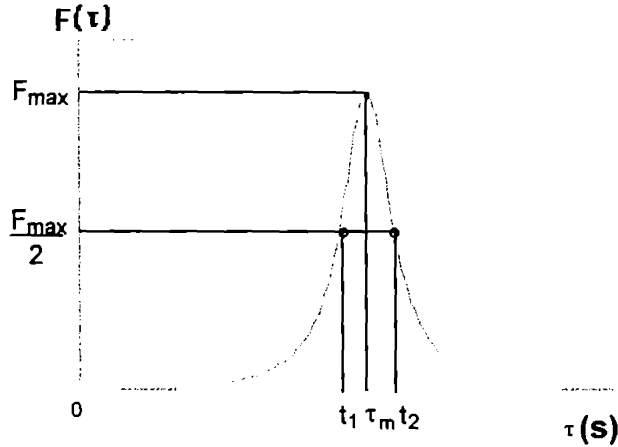


Fig. 7.14. Notatiile folosite pentru determinarea unor parametri caracteristici ai relaxatiei;

Relatiile de calcul al parametrilor indicati conform fig.7.14. sint urmatoarele :

$$t_0 = \left[\frac{1 + \cos 2\theta + \sqrt{(\cos 2\theta - 1) \cdot (\cos 2\theta + 3)}}{2} \right]^{\pi} - \left[\frac{1 + \cos 2\theta - \sqrt{(\cos 2\theta - 1) \cdot (\cos 2\theta + 3)}}{2} \right]^{\pi} \quad (7.2)$$

$$F_{\max} = F_{\tau_m} = \frac{1}{2\pi} \frac{\sin 2\theta}{1 - \cos 2\theta} \quad (7.3)$$

Aceste relatii rezulta din relatiile (6.20) - (6.30) punind conditiile

$$F(t_1) = F(t_2) = \frac{F_{\max}}{2} \text{ si } t_0 = \frac{t_2 - t_1}{\tau_m} = \frac{\Delta\tau}{\tau_m} \quad (7.4)$$

Concluzia care se poate trage este ca modificarea unghiului de descentraj θ cu un anumit procentaj, (obisnuit se considera o valoare de 10%) semnifica degradarea varistorului. De asemenea, o valoare initiala a unghiului de descentraj mica sub 20° indica o calitate buna a varistorului (seriile A si B) , o valoare mai mare indicind o slaba calitate (seria C) sau o degradare pronuntata . Trasarea functiei de distributie ofera de asemenea o imagine asupra omogenitatii, cu cit valoarea maxima a lui $F(s)$ este mai mare (maximul teoretic este 1, fiind o functie normalizata) si t_0 mai redus, cu atit omogenitatea este mai ridicata. In cazul degradarii pronuntate se constata o scadere pronuntata a maximului lui $F(s)$ si cresterea lui t_0 . O ilustrare evidenta a acestei afirmatii este cazul seriei C , ale carei varistoare au suferit

degradari apreciabile, situație prezentată în fig.7.15. Se observă încă din starea inițială, nedegradată o valoare redusă (0.44) pentru maximumul lui $F(\tau_m)$, după supunerea la testele de verificare, datorită degradării suferite, valoarea devenind și mai redusă (0.28).

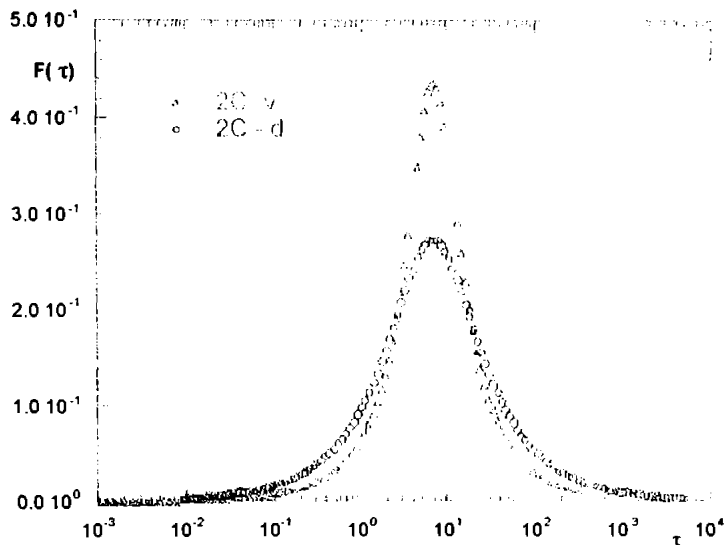


Fig.7.15. Funcția de distribuție a timpilor de relaxație pentru esanționul 2C.

Valoarea timpului mediu de relaxație da și el o informație despre calitatea varistorului, variația lui nefiind eficientă datorită influențării lui de către degradarea suprafeței electrozilor varistorului. Un τ_m de valoare mică (sub 10 s) indică o slabă calitate, de asemenea scăderea lui în urma testelor indică o oarecare degradare.

Analizând deci datele din tabelul 7.7. se poate concluziona că parametrul cel mai adecvat pentru caracterizarea varistoarelor prin metoda spectroscopiei impedanței este unghiul de descentraj, θ care poate fi asociat unui factor de heterogenitate al varistorului analizat. Conform acestui criteriu seria B de varistoare ($U_s = 1200$ V) are calitățile cele mai bune seria C nefiind corespunzătoare. De asemenea, maximumul funcției de distribuție a timpilor de relaxație poate fi un criteriu de apreciere, o valoare redusă sau scăderea valorii maximumului funcției, indicând o omogenitate redusă și deci calități electrice necorespunzătoare, existând riscul străpungerii eșantioanelor supuse solicitărilor electrice.

7.4 Concluzii referitoare la caracterizarea varistoarelor pe baza de ZnO.

Experimentele și rezultatele prezentate arată că există mai multe posibilități de caracterizare a varistoarelor cu ZnO, metoda adoptată depinzând de mai mulți factori din care cei mai importanți ar fi gradul de cunoaștere dorit, aparatul de măsură avut la dispoziție și nu în ultima instanță scopul în care se face caracterizarea. Pentru o privire de ansamblu asupra rezultatelor caracterizării voi recapitula în tabelul 7.8 câteva din valorile principalelor mărimi urmărite prin măsuratori pentru esanșionul 1 din seria B de varistoare.

Tabel 7.8.
Mărimi caracteristice ale varistoarelor seriei B

Mărimă \ Stare	Virgină	Degradată	
		Polarizare sens direct (+)	Polarizare sens invers (-)
U_s [V]	1215	1211	1196
$\frac{\Delta U_s}{U_s}$ [%]	-	-0.3	-1.5
U_{rez}	2080	2170	
$\frac{\Delta U_{rez}}{U_{rez}}$ [%]	4.3		
I_f [A] la $U_n=600$ V	$0.68 \cdot 10^{-6}$	$1.25 \cdot 10^{-6}$	$1.44 \cdot 10^{-6}$
$\frac{\Delta I_f}{I_f}$ [%]	-	83.8	111.7
α	42.2	32.7	
θ	14.97	16.2	
$\frac{\Delta \theta}{\theta}$ [%]	8		
τ_m	38.77	41.8	
R_0	$1.75 \cdot 10^{10}$	$2.02 \cdot 10^{10}$	
t_0	0.88	1.04	
$\frac{\Delta t_0}{t_0}$ [%]	19		

Din analiza valorilor acestor mărimi, se constată o concordanță a rezultatelor caracterizării, indiferent de metoda de caracterizare și mărimile de analiză utilizate.

Referitor la metoda clasică de caracterizare prin caracteristica de protecție $I(U)$ se poate spune că este o metodă eficientă și ușor de utilizat prin aparatul de măsură necesar. Aprecierea comportării se poate face însă numai după aplicarea unor teste de încercare care pot fi distructive pentru varistor. Este o metodă derivativă, caracterizarea fiind făcută prin aprecierea variației tensiunii de prag U_S sau a curentului de scurgere I_f , după aplicarea testelor de încercări în starea degradată, față de valorile din starea inițială, nedegradată.

O mărime electrică importantă care indică nivelul de protecție N_p , ca va fi asigurat de varistor este tensiunea reziduală la aplicarea $I_n=5$ kA. Compararea valorii acesteia în starea inițială, virgină și după degradările datorate solicitărilor electrice poate constitui indicatorul cel mai eficient al stării varistorului. Tensiunea reziduală la I_n trebuie să fie inferioară nivelului de protecție ($U_{rez} < N_p$), prin aceasta asigurându-se un anumit nivel de izolație N_i ($N_i = 1,2 N_p$). Această mărime este folosită de altfel și pentru caracterizarea descărcătoarelor clasice cu eclator și SiC. Firmele producătoare apreciază ca bună starea varistoarelor dacă variația relativă a tensiunii reziduale este sub 10% $\left(\frac{\Delta U_{rez}}{U_{rez}} < 10\% \right)$.

Referitor la variația curentului de scurgere I_f la U_n , nu putem stabili pentru variația relativă valori de referință deoarece acest curent este influențat de mai mulți factori. Esențială este însă valoarea la care se stabilizează curentul după descărcarea unei de supratensiune și solicitarea numai la tensiunea nominală. Dacă curentul rămâne inferior valorii de 1 mA, se poate concluziona că varistorul rămâne stabil termic, depășirea acestei valori putând conduce la ambalarea termică și deci la distrugerea varistorului.

Metoda caracterizării prin măsurarea impedanței complexe a evidențiat următoarele concluzii:

- invarianta răspunsului dielectric al varistorului care este un semicerc cu centrul sub axa reală, definit de unghiul de descentraj θ ;
- unghiul de descentraj θ poate fi asociat unui anumit grad de omogenitate al varistorului;
- creșterea unghiului de descentraj, după aplicarea unor solicitări ce produc degradarea varistorului;
- micșorarea timpului mediu de relaxare τ_m cu creșterea gradului de degradare;
- micșorarea rezistenței R_0 în curent continuu;
- micșorarea valorii maxime a funcției de distribuție a timpilor de relaxare;

Metoda spectroscopiei prezintă unele avantaje mai ales sub aspectul studiului teoretic, fizic al fenomenelor ce au loc la nivelul microstructurii varistorului:

- avantajul principal este acela că este o metodă nedistructivă, folosind o tensiune redusă (5-10V) care nu produce modificări ale microstructurii varistorului.
- cu această metodă poate fi apreciat gradul de neomogenitate al varistorului;

- permite determinarea unei constante de timp medii pentru procesele de relaxatie, și de asemenea permite modelizarea electrica a varistorului și calculul parametrilor lui;
- permite o tratare statistica la nivel microscopic, prin introducerea functiei de distributie a timpilor de relaxatie;
- permite caracterizarea starii de degradare a varistorului in cazuri in care alte metode nu dau o informatie precisa.

Se poate trage deci concluzia generala ca cele doua metode de diagnostic nu se exclud ci sînt complementare. Neputându-se stabili o corelatie directa între caracteristica curent tensiune $I(U)$ și unghiul de descentraj din diagrama Cole-Cole. In general criteriul cel mai la îndemina pentru stabilirea starii de degradare este prin determinarea variatiei procentuale a tensiunii de prag $\frac{\Delta U_s}{U_s}$ și a celei reziduale la $I_n \frac{\Delta U_{rez}}{U_{rez}}$, procentul maxim pentru care varistorul se considera propriu pentru folosire fiind 10 %. Tinind cont de faptul ca aceasta variatie este cu atit mai mica cu cit varistorul este mai omogen și deci unghiul de descentraj mai apropiat de 0, se poate admite in mod similar pentru aprecierea starii de degradare prin metoda impedantei complexe o valoare de 10% pentru variatia procentuala a unghiului de descentraj $\frac{\Delta \theta}{\theta}$;

Oricare din aceste criterii se iau in considerare se poate aprecia buna calitate a seriilor A și B de varistoare, seria C nîndeplinind aceste criterii, fapt constatat experimental.

7.5. Modelarea varistoarelor fabricate și simularea comportării lor în scheme electrice

În vederea cunoașterii comportării varistorului înainte de introducerea lui în instalație electrică am considerat necesară definirea unui model electric pentru varistorul în cauză și simularea comportării lui în urma supunerii la solicitări, comparând apoi rezultatele simulării cu rezultatele obținute experimental.

Rezolvarea acestei probleme este necesară și foarte utilă pentru utilizator. De altfel, firmele producătoare de renume (Siemens, Matsushita, Harris) furnizează pentru produsele proprii și modelul matematic împreună cu parametrii lui pentru fiecare tip de varistor. Modelele respective sunt mai mult sau mai puțin complexe în funcție de necesitățile aplicației și corelate programele de simulare utilizate pentru implementarea modelului.

Dezvoltarea acestor modele în vederea simulării comportării circuitelor cu elemente neliniare de tip varistor se înscrie în concepția modernă de proiectare as stată a schemelor și circuitelor electrice.

Unul dintre mediile de programare și simulare foarte des utilizate pentru elementele semiconductoare, deci care au o caracteristică neliniară este PSPICE.

În conceptul modelării cu PSPICE varistorul va fi reprezentat prin caracteristica $I(U)$. Pentru varistoarele fabricate în scopul protejării instalațiilor de tracțiune urbană, am adoptat un model ce reflectă structura varistoarelor, model prezentat în fig. 7.16.

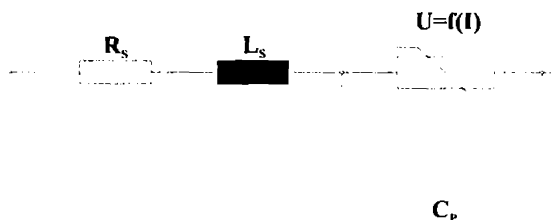


Fig. 7.16. Schema electrică de modelare a varistoarelor fabricate.

În acest model R_s - rezistor serie de valoare redusă (0.1 m Ω) ce reflectă rezistența electrică a granulelor de ZnO.

L_s - inductivitate serie a varistorului. Este de valoare redusă dar există incontestabil, fapt constatat experimental prin apariția unui anumit decalaj temporar între maximele curentului și tensiunii în timpul șocurilor 8/20 aplicate. Pentru inductivitatea L_s am luat o valoare de 20 nH cunoscând din practică faptul că în cazul varistoarelor sub formă de disc fiind de aproximativ 2 nH/mm, înălțimea varistoarelor seriei D fiind de 9.2 mm.

C_p - Capacitatea varistorului. Valoarea este variabilă cu frecvența. Cu ajutorul unei punți numerice programabile de mare precizie a fost măsurată capacitatea C_p a pastilei care variază între 1,3 - 5 nF pentru frecvențe în gama 10 kHz - 50 kHz, frecvențe obișnuite pentru undele de supratensiune atmosferică. Am folosit pentru simulare valoarea cea mai mică de 1,3 nF, care este și cea mai dezavantajoasă, creșterea capacității influențând pozitiv calitățile protecției.

$U=f(I)$ - Dependența este modelată în PSPICE cu o sursă de tensiune comandată pentru care trebuie cunoscută o relație analitică. Unele firme producătoare, ca de exemplu Harris și Siemens [87], [105], modelează această dependență prin următoarea relație analitică de dependență cu coeficienți reali, determinați:

$$\log U = b_1 + b_2 \log(I) + b_3 e^{-\log(I)} + b_4 e^{\log(I)}, \text{ sau}$$

$$U = 10^{b_1 + b_2 \log(I) + b_3 e^{-\log(I)} + b_4 e^{\log(I)}} \quad (7.5)$$

Modelul va reflecta în mod fidel realitatea prin precizia cu care se vor determina experimental valorile mărimilor R_s , L_s , C_p și parametrii b_1 , b_2 , b_3 , b_4 (ce vor rezulta după

prelucrarea măsurătorilor). Dependența $U(I)$ modelată prin relația (7.5) pentru seria D de varistoare, este prezentată în fig.7.17.

Limitele modelului varistorului apar din motive matematice la curenți sub 10^{-6} și curenți mai mari decât I_{\max} (40 kA) unde modelarea nu poate ține cont de efectele termice ale trecerii unui curent așa de mare.

După fabricarea seriei D de varistoare am trecut la ridicarea caracteristicii $I(U)$, conform metodologiei și dispozitivelor de măsurare prezentate în cap.6.

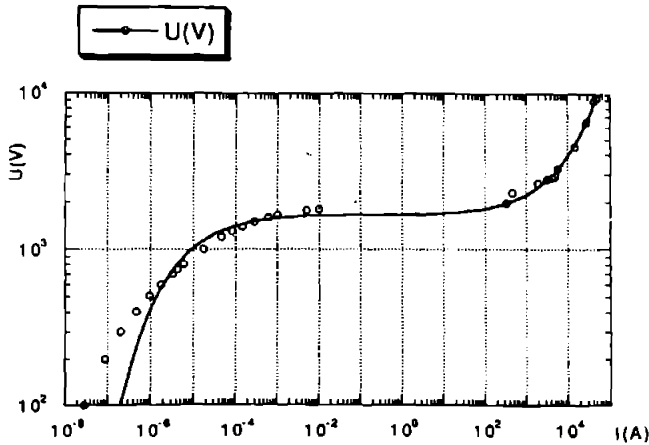


Fig.7.17. Dependența $U(I)$ pentru seria D de varistoare.

- o puncte determinate experimental
- curbă obținută prin calcul cu relația (7.6)

Cu ajutorul programului de prelucrare a datelor Kaleidagrap efectuând o interpolare după relația analitică (7.5) am obținut pentru coeficienții b_1, b_2, b_3, b_4 valorile

$$b_1 = 3.2175 ; b_2 = -0.00433 ; b_3 = -0.001539 ; b_4 = 0.007218.$$

Relația de dependență devenind:

$$\log U = 3.2175 - 0.00433 \cdot \log(I) - 0.001539 \cdot e^{-\log(I)} + 0.007218 \cdot e^{\log(I)} \quad (7.6)$$

În figura 7.17 cu linie continuă este trasată caracteristica $U(I)$ obținută prin calcul conform relației (7.6) în care coeficienții sunt corespunzători seriei D.

Dupa cum se constata din fig. 7.17, relatia analitica (7.6) nu interpoleaza foarte exact punctele de pe caracteristica $U(I)$ determinata experimental, mai ales in zona curenților mici (sub 10^{-4}). In studiul pe care l-am intreprins in problemele de modelare, am urmarit eliminarea acestui dezavantaj prin gasirea unei relatii analitice care sa redea cit mai exact dependenta $U-I$ conform determinarilor experimentale.

Dupa mai multe incercari, functia cu care am obtinut cea mai buna apropiere de caracteristica $U(I)$ ridicata experimental a fost urmatoarea :

$$\log U = m_1 + m_2 \cdot \log(I) + \frac{m_3}{\sqrt[3]{I}} + m_4 \cdot \sqrt{I} \quad (7.7)$$

Urmind aceiasi procedura prezentata anterior pentru determinarea coeficientilor relatiei (7.5), am obtinut pentru coeficientii din (7.7) valorile numerice: $m_1= 3.3369$; $m_2= -0.022806$; $m_3=-0.048311$; $m_4=0.0034494$.

Relatia analitica proprie, pe care o propun pentru modelarea caracteristicii $U(I)$ a varistoarelor seriei D va fi:

$$\log U = 3.3369 - 0.022806 \cdot \log(I) - \frac{0.048311}{\sqrt[3]{I}} + 0.0034494 \cdot \sqrt{I} \quad (7.8)$$

Reprezentarea grafica a dependentei $U(I)$ corespunzatoare relatiei (7.8) este prezentata in fig. 7.18 prin curba 1, pentru comparatie pe grafic fiind reprezentata prin curba 2 și dependenta exprimata de relatia (7.6). Prin cerculete sunt reprezentate perechile de valori U - I determinate experimental.

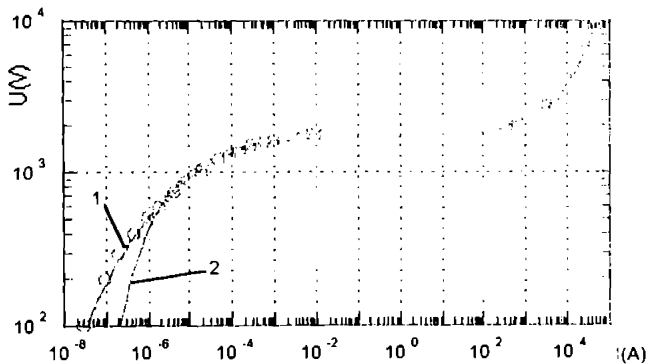


Fig.7.18 Modelarea dependentei $U(I)$; 1.model propriu;2.model Siemens Matsushita.

Din aceasta reprezentare se constata in mod evident superioritatea modelului propriu elaborat , descris prin (7.8), punctele determinate experimental situandu-se aproape in totalitate pe aceasta caracteristica.

In continuare, utilizind relatia analitica generala(7.7), particularizata pentru seria D de varistoare, prin coeficientii determinati si prezentati in (7.8) , am creat o subrutina proprie de modelare a varistorului , care va fi utilizata in simularile ce vor fi prezentate in continuare.

Astfel în fig.7.19 se prezintă aceeași caracteristică U(I) a varistorului, rezultată în urma simulării în PSICE prin aplicarea unei tensiuni de tip rampă la bornele lui.

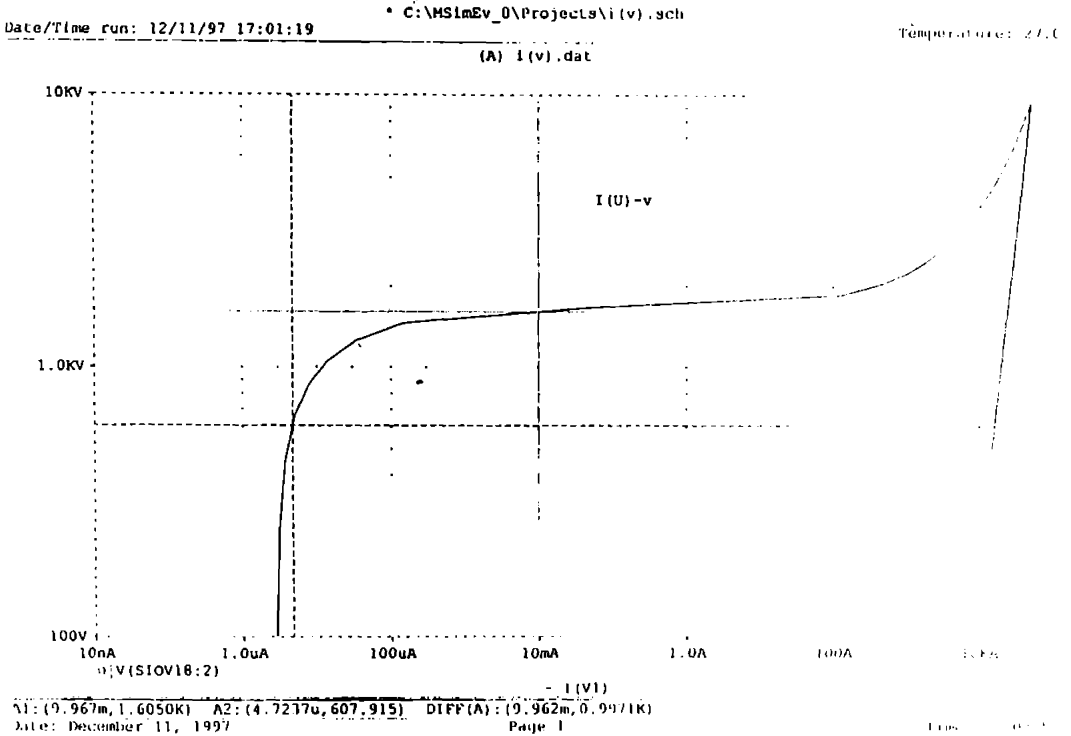


Fig.7.19. Caracteristica I(U) obținută prin simulare în PSICE.

Analizând această caracteristică am constatat o deplasare a caracteristicii față de cea reală dar într-un sens convenabil, care asigură un anumit coeficient de siguranță supraunitar în cazul simulării. Pentru a fi mai explicit, la aceeași tensiune aplicată, curentul de pe caracteristica reală are o valoare mai mică decât cel de pe caracteristica simulată, adică caracteristica simulată este acoperitoare. Spre exemplificare, la tensiunea nominală $U_n=600$ V a instalației de protejat curentul de scurgere I_f a fost:

$$I_{\text{real}}=1,75 \cdot 10^{-6} \text{ A, iar}$$

$$I_{\text{simulat}}=4,72 \cdot 10^{-6} \text{ A, adică simularea asigură un coeficient de siguranță.}$$

De asemenea tensiunea de prag pentru caracteristica reală și simulată diferă foarte puțin. De exemplu pentru $I=10$ mA avem:

$$U_{\text{caract. reală}} = 1710 \text{ V}$$

$$U_{\text{caract. simulată}} = 1605 \text{ V, adică o eroare } \epsilon=6\%.$$

Concluzia care se desprinde este că modelul propus aproximează destul de bine varistorul real, permițând o bună cunoaștere a comportării varistorului prin simulare. Pentru a proba afirmația anterioară voi prezenta rezultatele aplicării unui șoc de curent standardizat, sub formă de undă 8/20 μ s varistorului.

Conform celor prezentate în cap.6. cu ajutorul generatorului de șoc prin aplicarea unui șoc de supratensiune standardizat sub formă de undă de curent 8/20 μ s am obținut experimental prin oscilografieri pe osciloscopul TEKTRONIX formele de undă de tipul celor prezentate în fig.7.1., în care U_{rez} , a avut valorile din tabelul 7.1. Pentru varistorul 1D care a fost analizat, $U_{rez}=2920$ V.

Pe baza modelului elaborat și prezentat anterior, cu parametrii calculați pe baza măsurătorilor experimentale, folosind schema electrică cu parametrii cunoscuți a generatorului de șoc, am simulat cu ajutorul PSPICE comportarea varistorului. În figura 7.20. este prezentată această schemă electrică cu valorile numerice ale parametrilor și varistorul VAR_D al cărui model a fost prezentat anterior. Rezistența R_m , de valoare foarte mică (1 m Ω) nu influențează simularea, fiind necesară programului de simulare pentru calculul curentului prin acea ramură, adică prin varistor. În urma simulării închiderii comutatorului 1-2 tensiunea continuă cu care s-a încărcat condensatorul C_1 este aplicată circuitului de descărcare în care se află și varistorul VAR_D ce este pus în paralel peste rezistența de sarcină R_s . Valorile elementelor de circuit sunt cele prezentate în schemă, fiind determinate în prealabil în cadrul LGET.

Tensiunea de încărcare a condensatorului este fixată în cazul simulării prin valoarea care se alege pentru sursa de tensiune continuă V_1 . În urma simulării închiderii comutatorului 1-2 se obțin formele de undă prezentate în fig.7.21. Se constată că în urma simulării a rezultat o tensiune reziduală maximă de 3046 V la un curent de $I=4,69$ kA și un defazaj temporal al maximelor de ≈ 2 μ s.

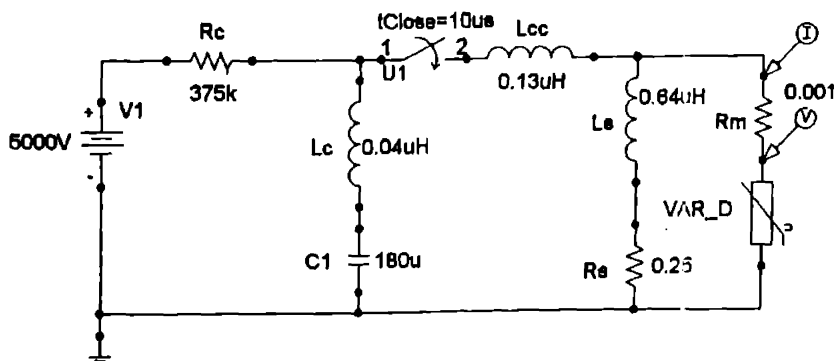


Fig.7.20 Schema electrică a generatorului de șoc folosită pentru simulare în PSPICE.

Spre comparație, real, experimental, valorile de vârf ale tensiunii reziduale la curenți în jurul celui nominal de 5 kA au fost între 2860 și 2920 V, deci foarte aproape de valoarea rezultată în urma simulării, ceea ce validează modelul adoptat.

Subliniez de asemenea că eroarea introdusă de model este într-un sens favorabil, valorile reale fiind mai mici decât cele simulate, deci modelul introduce un coeficient de siguranță k_{sig} cu valori între 1,05 și 1,1 în ceea ce privește valoarea maximă a tensiunii reziduale ce poate să apară la bornele sarcinii în cazul real al unei supratensiuni, față de valoarea rezultată din simulare.

$$U_{rez\ simulat} = k_{sig} \cdot U_{rez\ real} \tag{7.9}$$

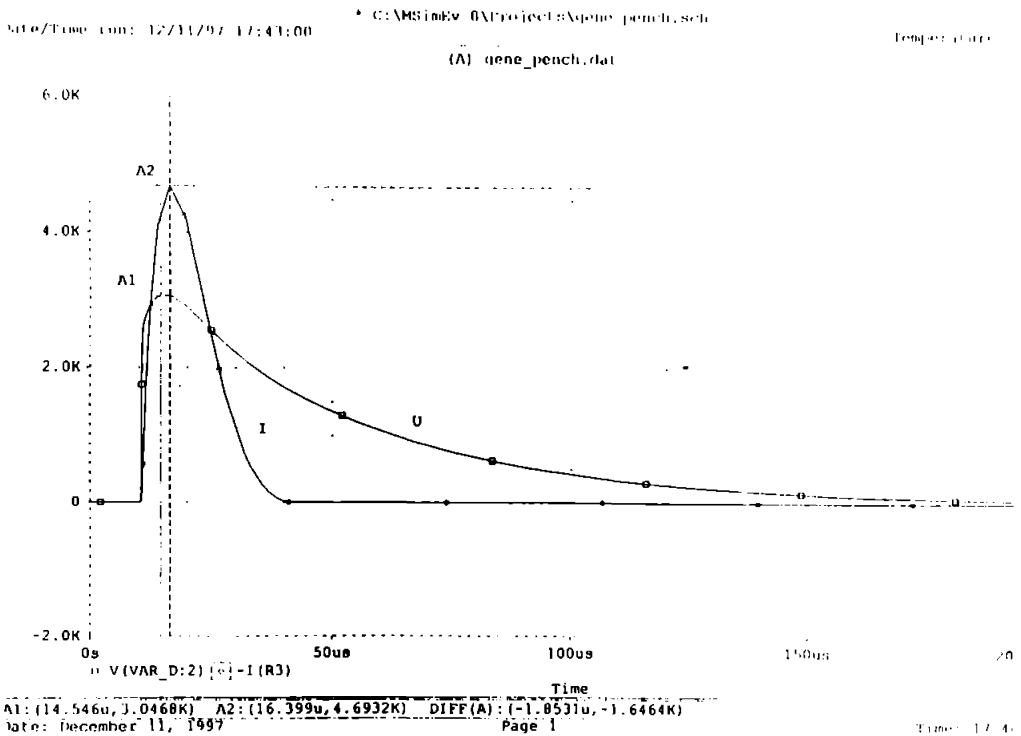


Fig. 7.21. Formele de undă ale tensiunii și curentului prin varistor obținute prin simulare.
 $I=4,69\text{ kA}$; $U_{rez}=3,0468\text{ kV}$.

În ceea ce privește decalajul de timp al maximelor, în realitate acesta este în jurul a 4 μs , și nu aproximativ 2 μs cât a rezultat în simulare; deci se poate concluziona că inductivitățile nu au fost perfect determinate, fapt de altfel justificat deoarece chiar și modificarea poziției unor legături din interiorul standului poate influența valoarea acestora.

Oricum, în practică ceea ce interesează în primul rând este valoarea tensiunii reziduale, valoare care este redată foarte bine din punct de vedere tehnic de modelul pe care l-am determinat și prezentat.

Se poate concluziona că modelul realizat pentru varistor este adecvat și poate fi utilizat în simulări cu variante de programe PSPICE în scopul anticipării comportamentului varistorului într-o instalație electrică.

7.6. Evidențierea experimentală a eliminării supratensiunilor cu ajutorul varistoarelor pe bază de ZnO

În scopul evidențierii cu claritate a acțiunii varistorului cu ZnO într-o schemă reală în care apar supratensiuni am făcut următorul experiment:

Cu ajutorul materialelor avute la dispoziție în LGET am realizat practic schema electrică prezentată în fig. 7.22.

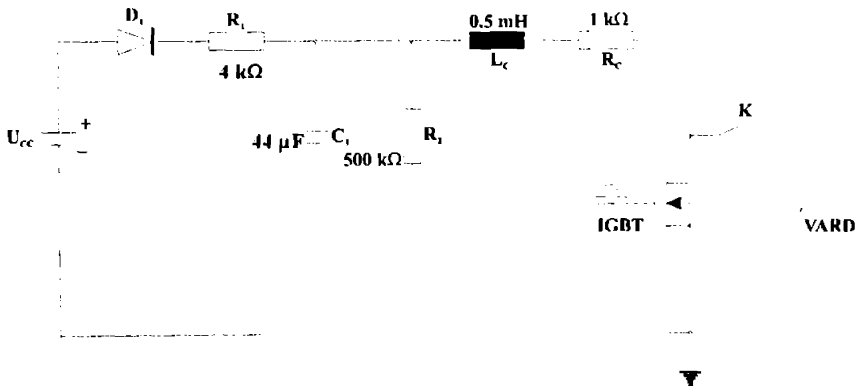


Fig. 7.22. Schemă electrică pentru punerea în evidență a funcționării varistorului.

În această schemă, sarcina - consumatorul, este reprezentată de către R_c și L_c , IGBT-ul comandat comportându-se ca un întreruptor electric cu care este conectată cu o frecvență dorită sarcina (L_c , R_c) la sursa de tensiune continuă. Cu ajutorul comutatorului K se poate introduce sau scoate din schemă varistorul (VARD).

În momentul comutației IGBT datorită variației bruște a curentului și a inductivității din circuit se manifestă supratensiuni de ordinul a $2,5 U_n$ cu durate în jurul a $10 \mu s$.

Fără varistor (K deschis) unda de supratensiune (achiziționată pe osciloscop) se manifestă oscilatoriu amortizat (curba 1) conform figurii 7.23. Închizându-se prin sarcină.

După închiderea comutatorului K și introducerea în circuit a varistorului tensiunea pe comutator nu mai prezintă variație oscilatorie amortizată (supratensiunea fiind consumată în varistor) pe comutator stabilindu-se aperiodic amortizat tensiunea de alimentare $U=574$ V (curba 2), din figura 7.23.

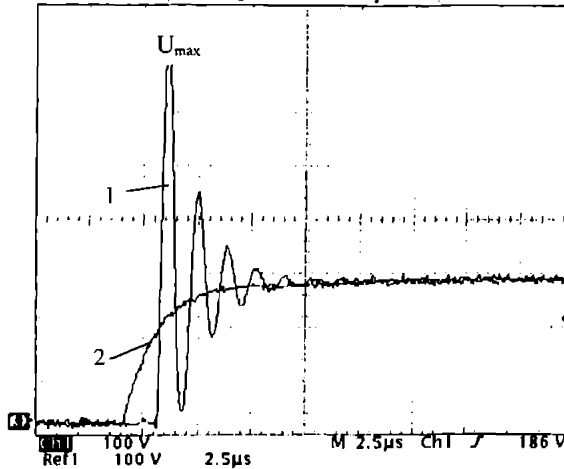


Fig.7.23. Supratensiunea pe comutator 1) cu varistor $U=574$ V; 2) fără varistor $U_{max}=1440$ V.

Comparând cele două situații cu și fără varistor este evidentă acțiunea lui și protecția pe care o asigură izolației instalației și efectul benefic asupra încetinirii proceselor de îmbătrânire a ei.

Energia transportată de către unda de supratensiune este consumată în varistor așa cum se constată și din fig.7.24, unde am oscilografiat pe lângă tensiunea (curba 1), curentul din varistor (curba 2) și puterea prin acesta (curba 3).

Avantajul varistoarelor cu ZnO față de cele clasice (eclator + SiC) constă în faptul că din plaja $1,5 - 2,5 U_n$ nu amorsează eclatorul și deci ele nu sunt sesizate de către descărcătoarele clasice.

Ținând cont de numărul mare de comutații în instalațiile de tracțiune electrică urbană este evident avantajul folosirii descărcătoarelor cu ZnO în locul celor clasice, și efectele benefice asupra micșorării riscului de străpungeri și îmbătrânire a instalației.

Un argument suplimentar al necesității înlocuirii descărcătoarelor clasice din instalațiile de tracțiune cu cele cu ZnO îl constituie faptul că partea de redresare din substație cât și alte echipamente din partea de acționare de pe vagoanele motoarelor conțin dispozitive semiconductoare ce sunt foarte sensibile la acțiunea supratensiunilor (chiar a celor de scurtă durată de genul celor generate în experimentul anterior).

Luând în considerare costul ridicat al dispozitivelor semiconductoare și cel relativ scăzut al varistoarelor cu ZnO, apare cu atât mai necesară introducerea acestora.

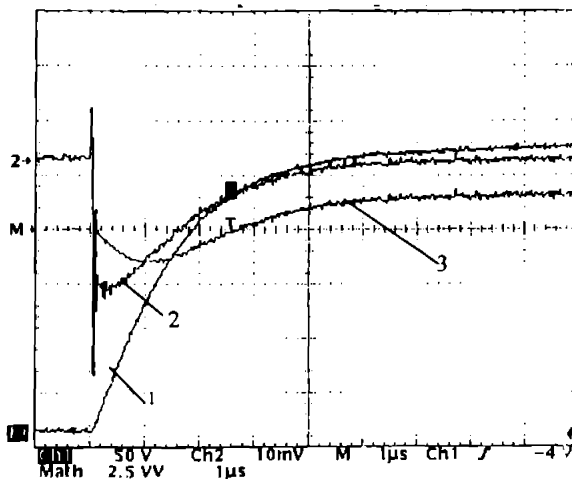


Fig. 7.24. 1 - $U(t)$; 2 - $I(t)$; 3 - $P(t)$ în varistor în timpul comutației.

În acest capitol am urmărit și realizat următoarele obiective:

- testele de verificare la care au fost supuse varistoarele fabricate;
- aprecierea stării de degradare în urma supunerii varistoarelor cu ZnO la solicitări electrice directe prin două metode:
 - a) prin ridicarea caracteristicii $I(U)$ înainte și după testele de degradare, urmărind variația unor parametri ca tensiunea de prag U_s , tensiunea reziduală U_{rez} , curentul de scurgere I_s , înălțimea barierei de potențial ϕ_u ;
 - b) prin studiul impedanței complexe în plaja de frecvențe $10^{-3} - 10^2$ Hz, urmărind variația unor parametri ca: unghiul de descentraj θ al caracteristicii $X(R)$, timpul mediu de relaxație τ_m , maximumul funcției de distribuție a timpilor de relaxație $F(\tau)$;
- am conceput un model matematic pentru varistor, relația (7.7.) determinându-i parametrii (m_1, m_2, m_3, m_4) pe baza măsurătorilor experimentale în scopul simulării comportării în scheme reale cu ajutorul programelor de simulare PSPICE;
- compararea rezultatelor obținute cu modelul propriu cu cele obținute cu modelul propus în [87], [105].
- simularea aplicării de șocuri de supratensiune $I_n-8/20 \mu s$ varistorului modelat conform rel.(7.8) și comparația între rezultatele simulate și cele reale obținute experimental;

- validarea modelului propus prin simularea funcționării varistorului în schema din fig. 7.20 și compararea rezultatelor simulării (fig. 7.21) cu cele reale obținute experimental;
- verificarea experimentală a comportării varistorului într-o schemă electrică (fig. 7.22) în care se generează supratensiuni care vor fi eliminate așa cum se constată în figura 7.23;
- modelarea analogică a schemei de comutație și evidențierea rolului varistorului în absorbirea undei de supratensiune (fig. 7.24).

Toate rezultatele experimentale obținute în acest capitol concură la ideea necesității introducerii varistoarelor cu ZnO în instalațiile de tracțiune electrică urbană prin calitățile superioare ale protecției asigurate și avantajele economice rezultate din reducerea riscului distrugerii părților scumpe, ce conțin dispozitive semiconductoare, din instalație.

CAPITOLUL 8

CONCLUZII

Protecția instalațiilor electrice contra supratensiunilor de natura internă sau externă s-a dovedit indispensabilă pentru asigurarea continuității în serviciu a acestora. Realizarea unei bune calități a protecției la supratensiuni este greu de asigurat fără un studiu al fenomenelor generatoare de perturbații și a efectelor lor asupra echipamentelor din instalații precum și punerea la punct și adaptarea la condițiile de serviciu a unor echipamente de protecție adecvate.

Îmbunătățirea performanțelor celor deja existente și găsirea unor materiale și soluții noi constituie o preocupare continuă a firmelor producătoare de astfel de echipamente sub presiunea și cerințele utilizatorilor. Actualmente, la noi în țară, protecția contra supratensiunilor în majoritatea instalațiilor electrice este realizată cu eclatoare sau descărcătoare cu carbura de siliciu (SiC) înscrinate cu eclatoare. Pe plan mondial, descărcătoarele clasice au fost înlocuite cu descărcătoare pe baza de oxizi metalici (ZnO fiind cel mai utilizat). Varistoarele cu ZnO sunt ceramice policristaline, cu structură granulară, utilizate pe scară largă ca element de bază în dispozitivele de protecție contra supratensiunilor, datorită performanțelor electrice remarcabile în ce privește variația rezistenței lor cu tensiunea.

Performanțele electrice net superioare ale acestora față de cele clasice cu SiC, posibilitatea implementării facile în locul acestora, costul redus și simplitatea tehnologiei de fabricație explică interesul crescând pentru implementarea acestora pe scară largă în instalațiile de joasă, medie și înaltă tensiune. Rezultatele cele mai importante obținute ca urmare a implementării lor sunt: reducerea apreciabilă a nivelului de izolație al instalației și asigurarea unui grad ridicat de protecție la supratensiuni.

Obiectivul urmărit de această lucrare este analiza supratensiunilor din instalațiile de tracțiune electrică în c.c., elaborarea temei de proiectare pentru un descărcător cu ZnO și evidențierea tuturor problemelor ce privesc dimensionarea, fabricarea, caracterizarea electrică și modelarea matematică a lui. O atenție deosebită a fost acordată metodelor de caracterizare electrică a varistoarelor. Datorită multitudinii de factori ce influențează calitatea acestora și a informației reduse oferite de metoda clasică (ridicarea caracteristicii $I(U)$, măsurarea U_s , I_s ,

U_{rez}) am căutat o nouă metodă de diagnosticare a calității varistoarelor și anume prin studiul impedanței complexe.

În primele trei capitole am făcut o prezentare a studiului bibliografic referitor la instalațiile de tracțiune electrică, supratensiunile din aceste instalații și echipamentele de protecție la supratensiuni existente actualmente în acestea.

Contribuția personală constă în sintetizarea acestor informații și date ce vor constitui un punct de plecare pentru dimensionarea noilor tipuri de descărcătoare pe baza de ZnO. În tabelul 3.1 am prezentat concluziile studiului comparativ al proprietăților echipamentelor de protecție la supratensiuni. În urma analizei critice a avantajelor și dezavantajelor pe care le prezintă acestea reiese clar că descărcătoarele cu ZnO au proprietățile cele mai apropiate de ale protecției ideale care se dorește a fi asigurată :

- asigură un nivel de protecție N_p scăzut, deci un grad de siguranță al nedepășirii nivelului de izolație ridicat;
- curent de scurgere în regimul nominal de funcționare al instalației de valoare redusă;
- neliniaritate pronunțată a caracteristicii de protecție, deci un exponent de neliniaritate ridicat;
- preț de cost redus;
- complexitate redusă;
- arie largă a posibilităților și domeniilor de implementare.

În capitolul patru am prezentat concluziile studiului teoretic și practic efectuat în cadrul LGET, al proceselor fizice de conducție și degradare, a tehnologiei de fabricație și factorilor de influență asupra calității varistoarelor. În acest sens am prezentat rezumativ problemele specifice legate de tehnologia de fabricație, microstructura, proprietățile fizico-chimice și influența unor factori ca : tratamentul termic, compoziția, granulația pulberii, asupra calității și proprietăților electrice finale ale varistoarelor. De mai mult de 50 de ani, cercetările în domeniul varistoarelor au urmărit explicarea mecanismului de conducție care să justifice neliniaritatea ce apare începând de la o anumită tensiune aplicată. Actualmente, modelul acceptat pentru explicarea neliniarității face apel la existența unei bariere de potențial (dubla barieră de potențial Schottky) între granulele de oxid de zinc din structura cristalină a varistorului. Acceptând acest model, bazat pe conducția termoelectronică, o contribuție personală constă în demonstrarea relației (4.39) ce exprimă dependența înălțimii

barierei de potențial de tensiunea de polarizare. Aceasta dependenta o voi folosi apoi pentru evidențierea stării de degradare. Mecanismele degradării au fost de asemenea obiectul studiului bibliografic din cap.4. pentru completarea informațiilor referitoare la varistoarele cu ZnO.

După lămurirea problemelor teoretice legate de mecanismele conducției și degradării varistoarelor am trecut la dimensionarea lor pentru o aplicație concreta la protecția instalațiilor de tracțiune urbana. După o analiză critică a punctelor slabe ale protecției actuale am evidențiat factorii ce concură la o dimensionare optimă a pastilei de ZnO (nivelul de protecție determinat de tensiunea reziduală maximă la curentul nominal și stabilitatea termică determinată de coeficientul de utilizare U_c). Impunând un nivel de protecție ce va permite scăderea nivelului de izolație a instalației, am determinat densitatea de curent critică și curentul de ambalare termică. Apoi, pornind de la protecția actuala, normativele in vigoare si solicitările prezumate in instalație, am stabilit fereastra de acționare in care trebuie sa se încadreze caracteristicile $I(U)$ ale varistorului. După precizarea mărimilor care intervin in aceasta diagrama, cunoscând granulația pulberii de sinterizare am stabilit cantitatea de pulbere necesara pentru fabricația unui varistor cu ZnO cu o tensiune de prag (U_s) dorita. Pentru aplicația aleasa am fabricat varistoare cu tensiuni de prag de : 1000 V, 1200 V, 1400 V, 1650 V cu caracteristicile prezentate în tabelul 5.1.

Prin aceasta am urmărit acoperirea ferestrei de acționare in scopul realizării unui studiu care sa surprindă atât aspectele general valabile cit si cazurile particulare.

Principalele contribuții din cap.5. se refera la :

- O analiza critica a variantei clasice de protecție cu sublinierea neajunsurilor ei;
- sublinierea avantajelor aduse de descărcatoarele cu ZnO;
- prezentarea rezultatelor studiului bibliografic referitor la terminologia specifica descărcătoarelor cu oxizi metalici;
- sistematizarea si precizarea factorilor electrici si a modului in care influențează dimensionarea si comportarea in exploatare a descărcătoarelor cu ZnO;
- definirea teoretică a fenomenului de ambalare termică (fig.5.4.), calculul densității de curent critice și a curentului de ambalare termic;
- stabilirea ferestrei de acționare si a parametrilor electrici ce vor trebui sa fie asigurați de descărcatoarele cu ZnO pentru protecția instalațiilor de tracțiune cu $U_n=600$ V;

- evidențierea performanțelor superioare asigurate de noua varianta de protecție:
 - coborârea nivelului de izolație de la 7.2 kV la 3.6 kV;
 - creșterea curentului nominal de descărcare de la 2.5 kA la 5 kA.
 - simplificarea construcției descărcătorului;
 - creșterea capacității energetice;
 - reducerea prețului de cost.
- dimensionarea geometrica a pastilelor de ZnO pentru aplicația propusa.
- fabricația varistoarelor in cadrul LGET.

După fabricarea varistoarelor a urmat studiul experimental si caracterizarea electrica a lor. In capitolul sase am prezentat pe scurt instalațiile de măsurare si baza teoretica de interpretare si prelucrare a rezultatelor experimentale.

Pentru studiu am utilizat doua metode :

- metoda clasica a măsurării caracteristicii de protecție $I(U)$ si a tensiunii reziduale maxime pentru curentul nominal al varistorului; prin prelucrări ale rezultatelor experimentale s-au urmărit și alte mărimi electrice caracteristice pentru varistor, ca: tensiunea de prag U_s , curentul de scurgere I_r , înălțimea barierei de potențial ϕ ;
- metoda spectroscopiei impedanței , ce consta in studiul impedanței complexe a varistorului la diverse frecvente. Metoda este mai pretențioasa din punct de vedere al posibilității efectuării măsurătorilor, prin instrumentele de măsurare necesare si al modelelor matematice utilizate la prelucrarea datelor.

Cele doua metode, deși sunt total diferite au condus la concluzii similare referitor la calitatea varistoarelor fabricate, rezultatele experimentale obținute prin aplicarea celor două metode de analiză completându-se in ansamblu.

Prin studiul caracteristicii $I(U)$ ridicata la diverse temperaturi ale mediului ambiant am pus in evidenta experimental ipoteza teoretica a conducției termoelectronice si am determinat experimental variația înălțimii barierei de potențial cu tensiunea de polarizare aplicata varistorului. Am determinat valoarea exponentul de neliniaritate α (30-40) cu un ordin de mărime mai mare fata de descărcatoarele cu SiC a.

Prin metoda impedanței complexe a fost studiat gradul de omogenitate al varistorului, reflectat prin parametrii modelelor teoretice de reprezentare a impedanței complexe ca: unghiul de descenteraj θ , timpul mediu de relaxație al speciilor polarizabile τ_{med} , relaxația dielectrica, funcția de distribuție a timpilor de relaxație. La joasă frecvență și nivele de

tensiune scăzute, funcționarea varistorului bazată pe contribuția spațiilor intergranulare izolante, preponderentă față de influența granulelor de ZnO, a dat în diagrama $X(R)$ un semicerc, descentrat, cu centrul sub axa rezistențelor, comportare conformă modelului Cole-Cole pentru impedanța complexă. Pe această bază, rezultatele experimentale au fost interpretate în termeni de distribuție a timpilor de relaxație, la care a fost asociată o funcție care să țină cont de unghiul de descentraj, asimilat ca un factor de neomogenitate, și de timpul mediu de relaxație al speciilor polarizabile.

Contribuțiile personale constau în :

- ridicarea caracteristicilor experimentale $I(U)$ pentru varistoarele fabricate;
- stabilirea algoritmului și evidențierea experimentală a dependenței înălțimii barierei de potențial de tensiunea continuă de polarizare;
- determinarea experimentală a exponentului de neliniaritate α pentru varistoarele fabricate;
- prezentarea modelelor teoretice și a funcțiilor de distribuție a timpilor de relaxație;
- demonstrarea expresiei funcției de distribuție a timpilor de relaxație $F(\tau)$ – rel.(6.30), adecvata modelului Cole-Cole pentru impedanța complexă;
- stabilirea unui program propriu , sistematic, de măsurare, prelucrare și reprezentare a rezultatelor experimentale;
- crearea “uneltelor” de prelucrare a datelor, adică definitivarea algoritmilor de interpolare prezentați în §.6.2.6. - §.6.2.8. și realizarea programului de calcul TAUMED;
- realizarea reprezentărilor grafice și interpretarea rezultatelor obținute experimental.

După studiul experimental prin cele două metode mai sus amintite, eșantioanele fabricate au fost supuse unor teste standard cu scopul de a urmări comportarea lor în condiții de cvasifuncționare, prezentarea și interpretarea acestor teste fiind făcută în cap.7. Solicitățile electrice din instalație (șocuri de supratensiune de comutație sau atmosferice) au fost simulate prin unde standard de supratensiune obținute de la generatoarele de soc din LGET, care au fost aplicate eșantioanelor supuse caracterizării după o metodologie standard conforma cu normele internaționale [90],[96],[97].

Parametrii electrici esențiali ai varistoarelor au fost monitorizați pe parcursul încercărilor de tip, în final fiind făcută o evaluare a stării de degradare prin compararea valorilor inițiale cu cele finale avute după supunerea la testele de încercare. După efectuarea

încercărilor cu șocuri de supratensiune, în urma cărora eșantioanele analizate au suferit o anumită degradare, am constatat:

- creșterea tensiunii reziduale maxime după ce eșantioanele au suferit degradări succesive ca urmare a aplicării supratensiunilor;
- scăderea tensiunii de prag U_s , măsurata la 1 mA;
- creșterea curentului de scurgere I_f ;
- diminuarea înălțimii barierei de potențial;
- scăderea rezistenței în c.c. ;
- diminuarea maximului funcției de distribuție $F(\tau)$ a timpilor de relaxație;
- creșterea unghiului de descentraj θ din diagrama Cole-Cole;
- micșorarea timpului mediu de relaxație τ_{med} .

Din analiza rezultatelor numerice s-au desprins câteva criterii calitative și cantitative de apreciere a stării de degradare dintre care amintesc pe cele mai importante :

- variația relativă a tensiunii reziduale cu mai puțin de 10%
- variația relativă a tensiunii de prag cu același procent de 10 %;
- curentul de scurgere I_f la U_n sub valoarea de 1 mA după efectuarea testelor de verificare.

Studiul realizat prin metoda spectroscopiei impedanței oferă informații privitoare la omogenitatea eșantionului, unghiul de descentraj θ fiind mărimea cea mai potrivită pentru apreciere. Astfel creșterea acestuia peste o valoare de 20° conduce la concluzia ca eșantionul supus analizei a suferit o degradare pronunțată . De asemenea un parametru care reflectă cu fidelitate procesele de degradare este maximul funcției de distribuție a timpilor de relaxație. Cu cit maximul acestuia este mai mare (aproape de 1) și curba mai “suplă” eșantionul are o omogenitate ridicată și deci proprietăți electrice mai bune. Cealaltă parametri sunt afectați de mai mulți factori, evoluția lor putând fi în anumite cazuri derutanta și neconcludentă. Una din cauzele ce conduc la erori este degradarea suprafeței metalizate a electrozilor în urma aplicării șocurilor , scăderea acestei suprafețe conducând la propagarea unor erori în algoritmul matematic de calcul al parametrilor specifici metodei impedanței complexe.

Concluzionez deci ca metoda de studiu a impedanței complexe are avantajul de a fi nedistructivă dar este mult mai costisitoare prin aparatura de măsurare necesară, în producția de serie nefiind justificată folosirea ei, metoda clasică conducând la rezultate concludente

referitor la starea varistorului si mai ușor de obținut prin măsurări relativ simple fata de cealaltă.

În urma caracterizării electrice a rezultat concluzia unei bune calități pentru seriile A,B si D de varistoare cu tensiunile de prag de 1000 V, 1200 V si 1650 V. seria C netrecând testele de verificare.

Următorul pas după ce am făcut caracterizarea electrica a varistoarelor fabricate , a fost elaborarea unui model în scopul simulării comportării varistorului într-o schema electrica. Pentru a putea verifica modelul, prin compararea cu rezultatele experimentale, schema electrica folosita pentru simulare a fost chiar cea a standului de încercare la curent nominal în 8/20 μ s. Modelul propus (fig.7.16) este similar modelului fizic la nivel microscopic al varistoarelor cu ZnO.

Dependența U(I) a fost descrisă prin relația proprie (7.7) și pentru comparație și prin relația (7.5) rezultată în urma cercetării bibliografice [87], [105]. Coeficienții numerici ai celor două relații prezentați în rel.(7.8) respectiv (7.6), au rezultat prin interpolarea măsurătorilor experimentale făcute în scopul ridicării caracteristicii de protecție a seriei D de varistoare. Cu relația propusă (7.8) pentru a descrie dependența U(I) s-a obținut o interpolare mai bună cum s-a constatat în fig.7.18.

Introducând modelul astfel determinat în programul de simulare PSPICE am ridicat în mod teoretic (simulat) caracteristica de protecție asigurata de varistor, caracteristică ce s-a dovedit a fi apropiata de cea reala, obținută experimental (fig.7.19). O alta verificare a modelului am făcut-o prin compararea rezultatelor simulării șocurilor de supratensiune de $I_n = 5 \text{ kA}$ 8/20 μ s, cu rezultatele experimentale (fig.7.21). Tensiunea reziduala ca valoare de vârf a rezultat în urma simulării 3046 V , măsurările experimentale fiind de 2920 V deci o eroare de 6%. Trebuie remarcat ca eroarea introdusă de simulare este în sens favorabil; acoperitor. Deci rezultatele simulării asigura un anumit coeficient de siguranța în ce privește nivelul de protecție asigurat de varistor.

Realizarea modelului este importanta prin posibilitatea cunoașterii comportării unei scheme “of line” iar pe de alta parte stabilește o metodologie de calcul a parametrilor modelului si pentru alte serii de varistoare.

Pentru a evidenția si practic avantajele si calitățile superioare ale protecție realizata cu ZnO am realizat o schema de alimentare (fig.7.22) a unui consumator într-un circuit în care comutația generează unde de supratensiune. O protecție clasica cu descărcător cu SiC nu ar fi

sesizat aceste supratensiuni pentru ca eclatorul lui nu ar fi amorsat la tensiuni de ordinul celor la care am făcut experimentul ($1,5 - 2,5 U_n$). In prezenta descărcătorului cu ZnO aceste unde de supratensiune au fost eliminate complet așa cum se poate constata in figurile 7.23 si 7.24.

Toate aceste concluzii evidențiază superioritatea descărcătoarelor cu ZnO si sugerează ideea necesității introducerii pe scara larga a acestor noi tipuri de descărcătoare in scopul creșterii calității protecției la supratensiuni.

În acest sens, ideile urmărite în lucrare s-au concentrat spre studiul proprietăților fizice, al tehnologiei de fabricație, a factorilor de influență asupra calităților electrice ale protecției asigurate și a metodelor de verificare și caracterizare electrică a varistoarelor cu ZnO, cu scopul de a fi o lucrare folositoare în perspectiva asimilării fabricației acestui tip de descărcătoare în țară.

Protecția contra supratensiunilor ce se cere a fi asigurata in cele mai diverse domenii de la cel al consumatorilor casnici, până la domeniul transportului si distribuției energiei electrice sugerează creșterea in viitorul apropiat a cererii de descărcătoare cu ZnO , dat fiind rezultatele economice pozitive obținute printr-o buna protecție, de calitate, obținută cu cheltuieli reduse.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Böttcher, C.J. , Bordewijk, P. , Theory of electric polarization, Editura Elsevier, Amsterdam, 1978.
- [2] Bernasconi, J., Kleen, H.P., Knecht, B., Strasler, S., Investigation of various models for metal-oxide varistor, Journal of Electronic Materials, vol5, no. 5 , 1976.
- [3] Bihoi, Gh. , Retele, captarea si utilizarea energiei in tractiunea electrica urbana, Tipografia RATT Ploiesti, 1994.
- [4] Binesti, D. , Les varistances a base d'oxyde de zinc: épreuves de vieillissement et dégradation, These docteur de l'Université de Bordeaux I, 1985.
- [5] Bui, A. , Lebey, T. , Vasilevici, Al., Moldovan, L., Buta, A., Andea, P., Surianu, F., Delesega, I. , Matériaux dielectrique et materiel électrique, Editura Tehnica , 1998.
- [6] Buta, A. , Transportul si distributia energiei electrice, 1993.
- [7] Ciortan, P. , Alimentarea cu energie electrica a cailor ferate electrice, Editura Tehnica, Bucuresti, 1972.
- [8] Combino J., Kingery D., Pike, G., Levinson L.M., Philipp H.R., Effect of heat treatments on the Wetting Behavior of Bismuth - Rich Intergranular phases in ZnO, Varistors, Journal American Ceramic Society, 72, 1989.
- [9] Corodeanu, I. , Tractiunea electrica feroviara, Editura CFR Bucuresti, 1958.
- [10] Dario Bento, Rodolfo Bother, Alan Searcy, Influence of temperature gradients on sintering: Experimental tests of a theory, Journal American Ceramic Society, 72, 1989.
- [11] Delesega, I. , Aparate electrice, Litografia U.P. Timisoara, 1993.
- [12] Delesega, I. , Incercarea aparatelor electrice, Editura Helicon, Timisoara, 1995.
- [13] Dinculescu S., Étude et réalisation d'un système pour la mesure diélectrique en basse et très basse fréquence, Memoire pour diplome d'ingénieur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1995.
- [14] Dorlanne, O. , Contribution a l'étude du joint de grains dans les céramiques électriques : Application aux varistances a base d'oxyde de zinc, Thèse docteur de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1986.
- [15] EDA, K. , Zinc oxide varistors, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 5 no 6, nov/dec 1989.
- [16] EDA, K. , Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents, Journal of Applied Physics, vol. 56 , no.10, 1984.
- [17] Emtage, P.R. , Physics of zinc oxide varistors, Journal of Applied Physics, vol 48, no. 10, 1975.

- [18] Fakkar, A., Bui, A., Loubiere, A., Penchenat, G., Modelization thermique des varistances a base d'oxide de zinc, Revue générale de l'Electricité, no.1, 1993.
- [19] Fakkar, A., Contribution a l'étude du comportement thermique des varistances a base d'oxide de zinc: Simulations et mesures, applications aux parafoudres moyenne et haute tension. These no. 1736 de l'Universite Paul Sabatier, Toulouse, 1994
- [20] Fakkar, A., Contribution a l'étude du comportement thermique des varistances a base d'oxyde de zinc, Thèse docteur de l'Universite Paul Sabatier, de Toulouse, 1994.
- [21] Francois, D. Martzloff, Caracteristiques des surtensions dans les reseaux basse tension.
- [22] Gary, C., Les connaissances actuelles sur la foudre et les phenomenes orageux, Journée d'Étude SEE (Gif-sur-Yvette), 27 Mai 1988.
- [23] Ghosn, J., Étude de la qualité d'écrêtage des varistances a base d'oxide de zinc, Memoire pour diplome d'études approfondées de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.
- [24] Gleb Grăgan, Supratensiuni atmosferice în instalațiile electroenergetice, Editura Academiei Române, 1992.
- [25] Graciet, M., Étude chimique, céramique et électronique de nouveaux composants électronique passifs : les varistances a basse d'oxide de zinc, thèse docteur, l'Université Bordeaux I, 1979.
- [26] Graciet, M., Varistances, Technique de l'ingénieur E 2110.
- [27] Graciet, M., Salmon, R., Leflem, G., Hagunmuler, P., Evolution et rôle des constituants chimiques au cours du processus de fabrication des varistances au ZnO, Review Physics Applied, vol 13, no. 2, 1978.
- [28] Gupta, T. K., Carlson, W. G., Hower, P. L., Current instability phenomena in ZnO varistors under a continuous a.c. stress, Journal of Applied Physics, vol 52, 1981.
- [29] Gupta, T.K., Application of Zinc Oxide Varistors, Journal American Ceramic Society, 73 (7), 1990
- [30] Hassanzadeh, M., Bui A., Dorlanne, O., Louhiere, A., proprietes electriques des varistances a oxyde de zinc en couches epaisses, Journal of Applied Physied, 25, 1995.
- [31] Hennebique, I., Le Roy, G., Vicaud, A., Parafoudres et ceramiques a oxide de zinc, Journele d'Étude, SEE (Gif sur Yvette), 1979.
- [32] Hoang, T.G., Malec, D., Study of Space Charge Behaviours in XLPE Power Cable Instalation under high Pressure, Journal of Electrostatics, 1997
- [33] Hortopan, Gh., Aparate electrice de comutatie, Editura Tehnica. Bucuresti, 1993.
- [34] Hower, P.L., Gupta, T. K., A barrier model for ZnO varistors, Journal of Applied Physics, vol 50, 1979.

- [35] Khalaf Al-Abdullah, Contribution a l'étude du comportement des varistances a base d'oxide de zinc, ZnO, par la mesure des impedances complexes a basse et a moyenne frequence, Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1991.
- [36] Knecht, B., Mayer, A., Parafoudres type MVR pour tensions de 1 a 7,2kV, Rev. Brown Boveri 9-1980.
- [37] Laffargue, J.M., Caracterisation de la degradation des varistances a base d'oxide de zinc par la spectroscopie d'impedance, These no.2013 de l'Universite Paul Sabatier, Toulouse, 1995.
- [38] Lat, M.V., Analitical method for prediction of metal oxide surge arresters, IEEE Transactions on Apparatus and Systems, vol PAS 104, no.10, 1985.
- [39] Lat, M.V., Thermal properties of metal oxide surge arresters, IEEE Transactions on Apparatus and Systems, vol PAS 102, no. 7, 1983.
- [40] Laurenceau, J., Réseaux électriques de traction, Journées d'étude SEE (Gif-sur-Yvette), 1978.
- [41] Ledoux, C., Appareils de protection contre les surtensions, Technique de l'ingénieur, D 670.
- [42] Levine, J.D., Theory of varistor properties, Critical Reviews in Solid State Sciences, 1975.
- [43] Levinson, L.M., Philipp, H.R., The physics of metal oxide varistors, Journal of Applied Physics, no. 46, 1975.
- [44] Mahan, G.D., Levinson, L. M., Philipp, H. R., Theory of conduction in ZnO varistors, Journal of Applied Physics Letter, 50, no 4, 1979.
- [45] Marcu, M., Schemele electrice si comenzile locomotivelor, Editura Tehnica, Bucuresti, 1992.
- [46] Mark, D., Popa, B., Protectia instalatiilor electrice impotriva supratensiunilor atmosferice, Editura Tehnica, Bucuresti, 1987.
- [47] Matsuoka, M., Journal of Applied Physics, Nonohmic properties of Zinc Oxide ceramics vol.10, no. 6, 1971.
- [48] Meskatoddini, M.R., Protection intégrée des transformateurs de puissance contre les surtensions a l'aide des varistances a base d'oxide de zinc. Thèse no 2543 de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.
- [49] Moldovan L. Proiectarea aparatelor și echipamentelor electrice - principii și elemente, Lito UPT, Timișoara, 1994.
- [50] Moldovan L., Vătău D., Aplicații și probleme de aparate și echipamente electrice, Lito U.P.T., Timișoara, 1996.
- [51] Moldovan, L., Echipamente electrice, Litografia U.P. Timisoara. 1994.
- [52] Năstasie S., Bley, V., Implementarea DOM în instalațiile electrice, premisă pentru creșterea calității protecției la supratensiuni, Analele Universității Oradea, în curs de publicare, 1998.

- [53] Năstasie S., Bui A., Vasilevici Al., Caracterizarea stării descărcătoarelor cu oxizi metalici prin metoda spectroscopiei impedanței, Buletinul Științific și Tehnic U.P. Timișoara, 1998, în curs de publicare.
- [54] Năstasie S., Identificarea și localizarea defectelor monofazate în rețelele de medie tensiune cu neutrul tratat prin bobină de stingere. Referat II de doctorat, 1995.
- [55] Năstasie S., Studiu teoretic și experimental al mecanismului de conducție termoelectronic în descărcătoarele cu oxizi metalici, Buletinul Științific și Tehnic U.P. Timișoara, în curs de publicare, 1998.
- [56] Năstasie S., Teste de încercare a descărcătoarelor cu oxizi metalici pentru instalațiile electrice de tracțiune urbană, în curs de publicare, Analele Universității Oradea, 1998.
- [57] Negru, V., Tehnica tensiunilor înalte, Litografia U.P. Timisoara 1993.
- [58] Nguyen, H.T., Bui, A., Loubiere, A., La tenue aux chocs des varistances ZnO a haut champ de seuil, Journal of Applied Physied, 28, 1995.
- [59] Nguyen, H.T., Bui, A., Loubiere, A., Role of additives in the high-field ZnO based varistors, International Conference on Electronic ceramics - Aachen, 5-7 sept. 1994.
- [60] Nguyen, H.T., Varistance a base d'oxide de zinc a champ de seuil élevé, Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1995.
- [61] Olsson, E., Osterlund, R., Dunlop, L., The rol of the interfacial microstructure in ZnO varistors materials, Materials Sciences Researchs, vol 21, 1988.
- [62] Osaka, Y., Nouvelles idées concernant la protection contre les surtensions a l'aide des parafoudres, CIGRE, grup 33, 1978.
- [63] Oyama, M., Ohshima, I., Honda, M., Yamashita, M., Kojima, S., Life performance of zinc-oxide elements under DC voltage, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 6, June 1982.
- [64] Penchenat, G., Contribution a l'étude de dispositifs de protection a base de varistances a l'oxide de zinc et d'eclateurs pour installations base-tension, Memoire pour le diplôme d'ingenieur, CNAM, l'Universite Paul Sabatier, Toulouse, 1992.
- [65] Pike, G.E., Seager, C.H., The d.c. voltage dependence of semiconductor grain-boundary resistance, Journal of Applied Physics, 50, 1979.
- [66] Rousseau, A., Dimensionnement des parafoudres MT pour le réseau EDF, Journée d'Etudes SEE (Gif-sur-Yvette), 27 Mai 1988.
- [67] Sato, K., Takada, Y., A mechanism of degradation in leakage currents through ZnO varistors, Journal of Applied Physics, vol. 53, no.9, 1982.
- [68] Serrano, M., S., Etude du comportement électrique et thermique des parafoudres au ZnO, Thèse de l'école centrale de Lyon, 1988.
- [69] Shen, C.Y., Wu, L., Effect of additions on conduction properties of ZnO varistors, Japanese Journal of Applied Physics, vol 32, 1993.

- [70] Shirley, C.G., Paulson, W.M., The pulse-degradation characteristic of ZnO varistors, *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no.9, 1979.
- [71] Sletson L., Potter, M., Mohammad A., Influence of Sintering Temperature on Intrinsic Trapping in Zinc Oxide - Based Varistors, *Journal American Ceramic Society*, 71, 1988
- [72] Sora, C., Bazele electrotehnicii, Editura didactica si pedagogica, Bucuresti, 1982.
- [73] Suciu, I., Bazele calculului sollicitarilor termice ale aparatelor electrice, Editura Tehnica, Bucuresti, 1980.
- [74] Talhi, C., Bui, A., Loubiere, A., Dimensionnement d'un parafoudre a base de ZnO pour lignes a courant continu, *Annales de Chimie Science des Matériaux* édition Masson III Vol. 19 no.7-8, 1995.
- [75] Talhi, C., Contribution a l'étude d'un parafoudre a base d'oxyde de zinc: Application aux lignes a courant continu. These no.2037 de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 1995
- [76] Tao, M., Bui, A., Dorlanne, O., Loubiere, A., Different single grain junctions within ZnO varistor, *Journal of Applied Physics*, vol 61, 1987.
- [77] Tao, M., Propriétés électriques du joint de grains de la céramique a base d'oxyde de zinc: Application aux varistances a basse tension, Thèse docteur de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 1988.
- [78] Thorsteinsen, T.E., Modern high surge arresters, *ASEA journal* 39-1996.
- [79] Tominaga, S., Shibuya, Y., Fijuara, Y., Nitta, T., Stability and long term degradation of metal oxide surge arresters, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-99 no.4, 1980.
- [80] Vasilevici, Al., Aparate electrice, Editura M.S. Sibiu 1995.
- [81] Vasilevici Al., Buta A., Năstasie S., Studiul supratensiunilor datorate punerilor la pământ în instalațiile electrice de medie tensiune cu neutrul tratat prin bobină de limitare. Contract de cercetare științifică nr.73/22.09.1994, cu FIRE Sibiu.
- [82] Vasilevici Al., Moldovan L., Năstasie S., Realizarea unei protecții de distanță digitală pentru liniile electrice aeriene de înaltă tensiune. Contract de cercetare științifică nr.85/50004 din 1993 cu Ministerul Învățământului.
- [83] Vasilevici Al., Vătău D., Năstasie S., Simulator de sarcină pentru verificarea contoarelor mono și trifazate. Contract de cercetare științifică nr. 29/12.03.1993
- [84] Vicaud, A., Rousseau A., Hennebique, I., Les parafudres a oxyde de zinc dans les reseaux a haute tension, *Revue General de l'Electricite*, no.9, 1986.
- [85] * * * Asociação Protection contre la Foudre, comment se protéger de la foudre chez sol en milieu artisanal ou rural, 1996.
- [86] * * * Buletin de încercare 1254/10.08. 1987, ICSIT pentru Electrotehnică, București MIEt E157/9/1/88
- [87] * * * Cataloge : Electroceramica Turda, AEG Brown Boveri, Siemens, Iskra, Haris, Muratron.

- [88] * * * CIGRE, Group de travail 06 du Comité d'Etudes 33, Propriétés générales des parafoudres a oxide métallique, 1991.
- [89] * * * CIMAE ICP Instrucțiuni locomotive LDE, COCO - Electroputere Craiova, 1975.
- [90] * * * Group de Travail 06 du Comité d'Etudes 33 Parafoudres a oxide metalique dans les réseaux alternatifs, Electra, no. 128, 1991
- [91] * * * Instrucția de reparare a locomotivelor electrice tip Co-Co de 5100 kW, SNCFR, 1995.
- [92] * * * Merlin Gerin, La protection des installations électriques contre la foudre, Collection guides pratiques no. 1, 1996.
- [93] * * * NF F 60-001/1989; NF F 01-510/1990; NF F 60-101/1991 Matériel roulant ferroviaire, Équipements électriques et électronique alimentés en courant continu. Essais de surtensions.
- [94] * * * NF F 61-740/1995, Matériel pour installations alimentés directement par un réseau de distribution publique a basse tension - parafoudres pour installations basse tension.
- [95] * * * Norme CEI 664-1980, Coordonarea izolatiei in retelele electrice.
- [96] * * * Norme CEI 60-2 - 1994, Tehnica incercarilor la inalta tensiune. Sisteme de masurare.
- [97] * * * Norme CEI 99-4 - 1991, Metal oxide surge arresters without gaps for a.c. systems.
- [98] * * * Norme française NFF 60/101/1991 Materiel roulant ferroviaire. Coordination de l'isolement - Distances d'isolement dans l'air et lignes de fuite des appareils et des équipements.
- [99] * * * Norme UTE 850, Alimentation électrique des réseaux de traction ferroviaire.
- [100] * * * Norme UTE C15-443/96, Protection des installations électriques basse tension contre les surtensions d'origine atmosphérique.
- [101] * * * Note Technique: Specification technique du modèle de base des parafoudres 24 kV a oxyde de zinc sans éclateurs avec enveloppe synthétique pour réseaux HTA, Techniques de l'ingénieur D4211, structure et planification des réseaux de distribution.
- [102] * * * PE 126 Règlement de exploitation tehnica a centralelor și retelelor electrice.
- [103] * * * STAS 2613-84, Sisteme de curent de tractiune electrica. Tensiuni și frecvențe nominale.
- [104] * * * STAS E 7377-73 Descarcatoare cu rezistență variabilă. Condiții tehnice generale de calitate.
- [105] * * * TVS-4- Designing with Harris Varistors, 1997.

- [106] * * * Zinc oxide arresters: principle, protection characteristics, Test and experience, Burger U., Knecht, B., CIGRE - 1980, 33-07.
- [107] * * * ZNR Manual, Transient Voltage Suppression Manual, 1985.
- [108] * * * STR MIEt E/157/9/1/88, (standard de ramură), Descărcătoare cu rezistență variabilă și suflaj magnetic de curent continuu, tip DRVC-0,9 kV.

ANEXE

ANEXA 1

Compozitia varistoarelor fabricate

Compozitia varistoarelor fabricate la LGET din pudra clasica Soulée

Oxid	Masa [g]	Masa [%]
ZnO	821.5	82.15
Bi ₂ O ₃	40	4
Sb ₂ O ₃	88.5	8.85
Co ₃ O ₄	21	2.1
Mn ₂ O ₃	7.5	0.75
NiO	6.5	0.65
Cr ₂ O ₃	13	1.3
B ₂ O ₃	1	0.1
Al ₂ O ₃	0.5	0.05
MgO	0.5	0.05
Total	1000	100

ANEXA 2

Programul de calcul TAUMED

```

{$n+}
program TAUMED;
uses crt,dos;
type vect=array[1..50] of real;
var nume_fisier:string;
    fisier_disk,fisier:text;
    raspuns:char;
    d11,d12,d20,d30,d21,d03,d02:double;
    Xc,Yc,R,R0,c,teta,gamma,prod_tau,t_m:real;
    Sx,Sr,Srx,Srx2,Sr2x,Sr2,Sr3,Sx2,Sx3:double;
    numar_puncte,i,j,k,n:integer;
    Rs,Xs,f,uk,vk,tau_m:vect;

(*****)

PROCEDURE read_fisier(nume:string;var f,R,X:vect;var i:integer);

var X1:real;
begin assign(fisier,nume);
    reset(fisier);
    i:=1;
    while i<>21
        do
            begin readln(fisier);

                read(fisier,f[i],R[i],X1);
                X[i]:=-X1;
                writeln(i,' ',f[i],' ',R[i],' ',X[i]);
                inc(i);
            end;
        dec(i);
    end;

(*****)

FUNCTION sum_a(n:integer;v:vect):double;

var i:integer;
    s:double;

begin s:=0;
    for i:=1 to n do s:=s+v[i];
    sum_a:=s;
end;

(*****)

```



```

FUNCTION sum_a_b(n:integer;v1,v2:vect):double;

var i:integer;
    s:double;

begin s:=0;
      for i:=1 to n do s:=s+v1[i]*v2[i];
      sum_a_b:=s;
end;

(*****

FUNCTION sum_a_b2(n:integer;v1,v2:vect):double;

var i:integer;
    s:double;

begin s:=0;
      for i:=1 to n do s:=s+v1[i]*v2[i]*v2[i];
      sum_a_b2:=s;
end;

(*****

FUNCTION sum_a2(n:integer;v1:vect):double;

var i:integer;
    s:double;

begin s:=0;
      for i:=1 to n do s:=s+v1[i]*v1[i];
      sum_a2:=s;
end;

(*****

FUNCTION sum_a3(n:integer;v1:vect):double;

var i:integer;
    s:double;

begin s:=0;
      for i:=1 to n do s:=s+v1[i]*v1[i]*v1[i];
      sum_a3:=s;
end;

(*****

```

```

BEGIN repeat
  clrscr;
  write('Nume fisier de prelucrat ? ');readln(ume_fisier);
  clrscr;
  read_fisier(ume_fisier,f,Rs,Xs,numar_puncte);

  Sx:=sum_a(numar_puncte,Xs);
  Sr:=sum_a(numar_puncte,Rs);

  Sx2:=sum_a2(numar_puncte,Xs);
  Sr2:=sum_a2(numar_puncte,Rs);

  Sr3:=sum_a3(numar_puncte,Rs);
  Sx3:=sum_a3(numar_puncte,Xs);

  Srx:=sum_a_b(numar_puncte,Rs,Xs);

  Srx2:=sum_a_b2(numar_puncte,Rs,Xs);
  Sr2x:=sum_a_b2(numar_puncte,Xs,Rs);

  d11:=-numar_puncte*Srx+Sr*Sx;

  d12:=numar_puncte*Srx2-Sr*Sx2;
  d21:=-numar_puncte*Sr2x+Sr2*Sx;

  d20:=numar_puncte*Sr2-Sr*Sr;
  d02:=numar_puncte*Sx2-Sx*Sx;
  d30:=numar_puncte*Sr3-Sr*Sr2;
  d03:=-numar_puncte*Sx3+Sx*Sx2;

  Xc:=((d30+d12)*d02-(d03+d21)*d11)/(2*(d20*d02-d11*d11));
  Yc:=((d03+d21)*d20-(d30+d12)*d11)/(2*(d20*d02-d11*d11));
  c:=(-2*Xc*Sr+2*Yc*Sx+Sr2+Sx2)/numar_puncte;
  R:=sqrt(c+Xc*Xc+Yc*Yc);
  teta:=arcsin(abs(Yc)/R);
  alfa:=arcsin(abs(Yc)/c);
  l1:=Xc*Xc+Yc*Yc;
  writeln('l=',l1);

  writeln;
  writeln('Coordonatele centrului sunt :');
  writeln;
  writeln('Raza cercului este :');
  writeln;
  writeln('    R = ',R);
  writeln;
  writeln('Unghiul de descentraj este :');
  writeln;

```

```

writeln('    teta = ',teta*180/PI,' grade');
R0:=l1*sin(alfa)+R*cos(teta);
writeln;
writeln('Rezistenta in curent continuu este :');
writeln('    Ro = ',R0);
gamma:=1-2*teta/PI;
prod_tau:=1;
for i:=1 to numar_puncte do
    begin uk[i]:=sqrt(Rs[i]*Rs[i]+Xs[i]*Xs[i]);
          vk[i]:=sqrt(sqr(R0-Rs[i])+Xs[i]*Xs[i]);
          tau_m[i]:=exp(ln(gamma/(2*PI*f[i]*(uk[i]/vk[i]))));
          prod_tau:=prod_tau*tau_m[i];
    end;
writeln(prod_tau);

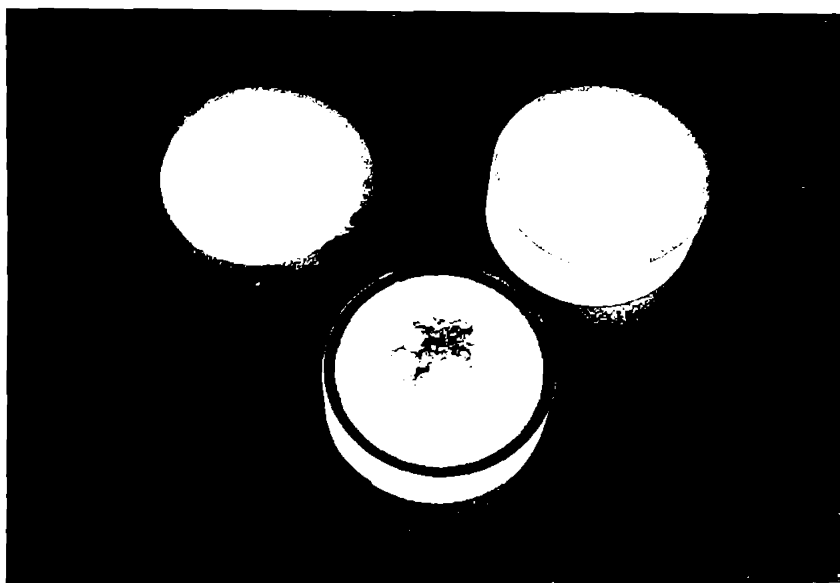
t_m:=exp(ln(prod_tau)/numar_puncte);
writeln;
writeln('Timpul mediu de relaxatie este :');
writeln('    Tau_m = ',t_m);

write('Repeta ? ');readln(raspuns);
until raspuns <>'o'
    end.

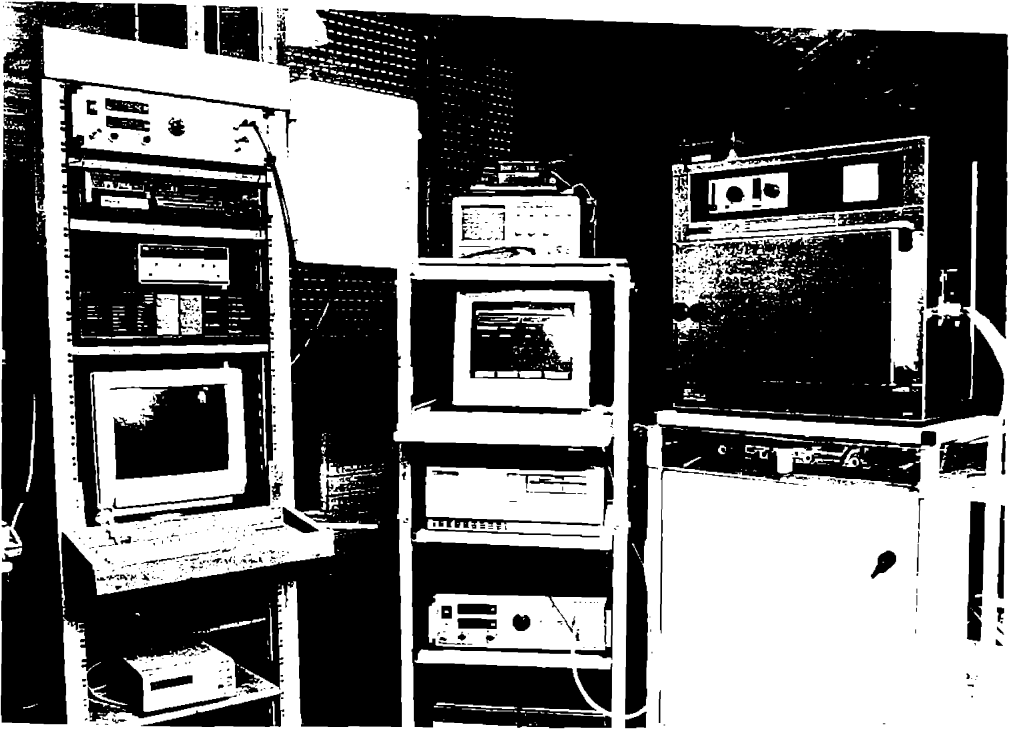
```

ANEXA 3

Standurile pentru masuratori experimentale



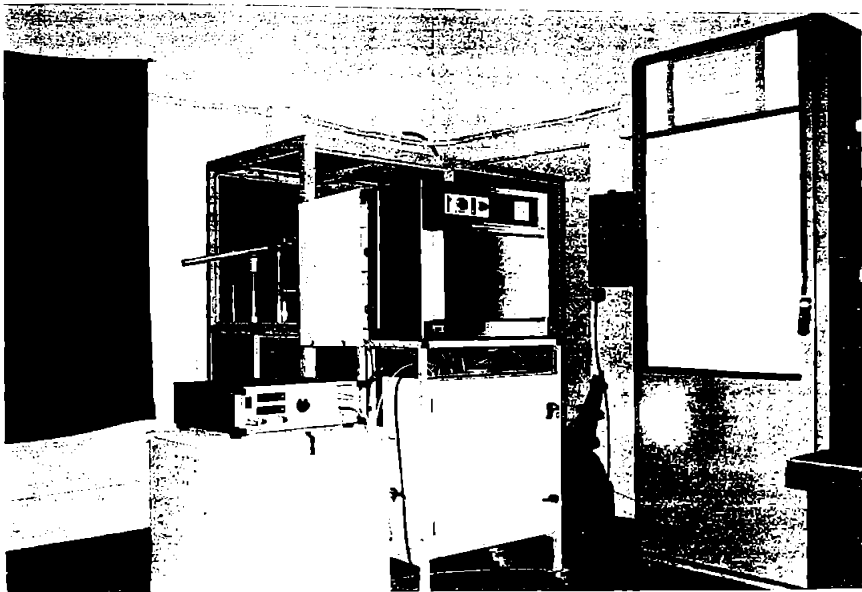
Varistoare cu ZnO in starea initiala, nedegradată si finala după caracterizarea electrică



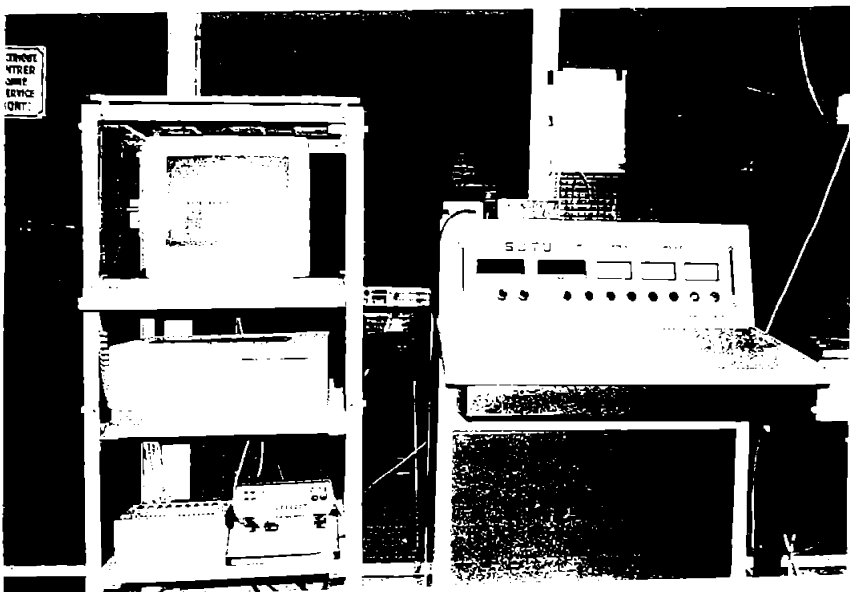
Stand pentru ridicarea $U(I)$ (stinga) și măsurarea impedanței complexe (dreapta)



Etuva pentru măsurători la temperaturi θ constante, superioare celei a mediului ambiant θ_a

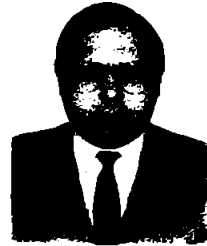


Generatorul de unde de soc de lunga durata



Stand pentru achizitia automata a datelor la masuratorile de lunga durata

Despre autor



M-am nascut la Slatina , la data de 13 martie 1965, si am urmat cursurile gimnaziale la piatra Olt, apoi liceul "Radu Greceanu" din Slatina. In 1989, am absolvit Facultatea de Electrotehnica din cadrul Universitatii "Politehnica" din Timisoara.

In perioada 1989-1991 mi-am desfasurat activitatea la I.A.E.M. Timisoara, ca inginer tehnolog in sectia de contoare electrice si apoi inginer proiectant statii de etalonare. In perioada 1991 - 1993 preparator iar din 1993 asistent la Facultatea de Electrotehnica din Timisoara.

Cu principale repere ale activitatii profesionale si stiintifice amintesc

- *Coautor la o culegere de probleme in domeniul aparatelor electrice;*
- *Participarea la 4 contracte de cercetare stiintifica;*
- *Publicarea a 12 articole;*
- *Participarea la sesiuni de comunicari , simpozioane, 6 articole comunicate*

Dintre care reprezentative pentru preocuparile avute

- *Analiza simbolica a schemelor de pornire si protectie a motoarelor electrice;*
- *Aplicarea teoriei elementului finit la rezolvarea unor ecuatii diferentiale;*
- *Proiectarea și realizarea asistată de calculator a schemelor instalațiilor electrice;*
- *Cercetari privind realizarea unei truse trifazate destinata obtinerii simultane de tensiuni curenți defazaj reglabile;*
- *Studiul si proiectarea unei truse mobile destinata obtinerii sarcinilor artificiale pentru contorii monofazati de masurare a energiei electrice;*
- *Automatizarea statiilor electrice de etalonare a contoarelor de energie electrica;*
- *Determinarea timpului de ardere al arcului electric de curent continuu prin metoda grafo- analitica;*
- *Protection equipment for high voltage networks;*
- *Distributed management system of the power transformer stations;*
- *Studiul teoretic și experimental al mecanismului de conductie termoelectromagnetice, descărcătoarele cu oxizi metalici;*
- *Caracterizarea stării descărcătoarelor cu oxizi metalici prin metoda spectroscopiei de impedanței;*