

RAPORT FINAL DE ACTIVITATE

Programul de cercetare – dezvoltare (tema):

Sisteme avansate de protecție împotriva supratensiunilor în rețelele electrice

Echipa de cercetare:

Prof.dr.ing. Andea Petru

Prof.dr.ing. Musuroi Sorin

Prof.dr.ing. Flaviu Mihai FRIGURA-ILIASA

Coordonator:

Conf.dr.ing. Attila SIMO

Autor:

Conf.dr.ing. Attila SIMO

Universitatea POLITEHNICA Timișoara

Facultatea de Electrotehnica și Electroenergetică

Termen: **03.12.2021**

1. Obiectivul proiectului

Obiectivul principal al acestui proiect constă în conceperea unei tehnologii noi de fabricație a varistoarelor pe bază de oxizi metalici, care să conducă la obținerea unor noi dispozitive, utile în domeniul conversiei fotovoltaice, concepute special pentru panourile de 48-52 V dar și pentru invertoarele MPPT. De asemenea, se pune accent pe realizarea unei serii de materiale ceramice policristaline semiconductoare, pentru varistoare (rezistențe variabile) utilizate ca elemente de protecție împotriva supratensiunilor în instalațiile fotovoltaice, în scopul creșterii duratei de viață și a siguranței în exploatare a acestora.

2. Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului

Rezultatele preconizate se referă la conceperea unor noi materiale varistoare prin modificarea concentrațiilor unor dopanți sau a unor oxizi aditivi, sau prin modificarea parametrilor ciclurilor termice de sinterizare a acestora. Noile materiale trebuie să aibă un răspuns în tensiune corespunzător nivelelor de tensiune continuă sau alternativă specifice instalațiilor fotovoltaice (atât pe partea de curent continuu, cât și după invertor). Alt rezultat preconizat constă în integrarea varistoarelor realizate după această tehnologie în construcția panourilor fotovoltaice sau a invertoarelor și a celorlalte echipamente de adaptare a tensiunii prezente în instalațiile fotovoltaice.

Rezultate:

- Se vor definitiva etapele procesului tehnologic de fabricație al varistoarelor;
- Se va aplica metoda planelor factoriale pentru a stabili influența fiecărui oxid aditiv în parte;
- Se vor realiza 5 serii de varistoare prin variația cu 0,5 % molar a concentrației următorilor dopanți: Bi₂O₃, MnO, Co₃O₄, Cr₂O₃ și Sb₂O₃;
- Se va încerca, pentru fiecare serie, la concentrația de 1 molar, varierea temperaturii de sinterizare în jurul a 3 valori (încă 15 varistoare noi);
- Varistoarele realizate cu aceste materiale vor fi testate în tensiune continuă pentru a determina tensiunea de deschidere și coeficientul de neliniaritate;
- Se vor calcula dimensiunile finale pentru varistoare destinate a funcționa la două nivele de tensiune continuă (în panouri) și un nivel de tensiune alternativă (400 V) după invertor, realizate din cel mai bun material rezultat după măsurătorile anterioare;
- Se va elabora tehnologia finală de fabricație;

3. Metodologie și rezultate

Varistoarele pe baza de ZnO sunt realizate, în general, printr-un proces convențional folosit și la fabricarea ceramicelor. Oxizii adiționali utilizați pentru impurificare (“dopare”) în formarea pudrei cu dimensiuni de câțiva microni, sunt cântăriți și amestecați cu oxidul de zinc prin intermediul bilelor de măcinare. Durata acestei operații este de câteva ore în mediul umed, cu adăugare de produse organice precum lianți și lubrifianti care să faciliteze operațiile următoare. Această ultimă operație permite obținerea unei pudre cu “sferoide” de 100 µm diametru. Pudra este presată într-o matriță cu o formă corespunzătoare, iar mostrele obținute sunt apoi sinterizate la 1000-1300 °C. Această operație este foarte importantă, deoarece ea asigură dezvoltarea (“creșterea”) cristalină a granulelor de ZnO și formarea microstructurii de care depind proprietățile electrice ale varistorului.

Eșantioane din amestecurile obținute sunt prezentate în Fig.1.

Într-un varistor cu oxizi metalici, procentul cel mai mare de material este de peste 90% (concentrație molară) ZnO (peste 80% concentrație masică) și compoziția este echilibrată prin adăugarea de alți oxizi metalici. Se poate adăuga un număr de diferiți oxizi suplimentari, folosiți pentru realizarea proprietăților materialului varistor: Bi, Pr, Ba, Sr, La, Co, Mn, Ni, Cr, Sb, Si, B, Ti sau, după caz alți oxizi mai puțin utilizati.

Se vor realiza două mari categorii de varistoare:

- Cu 2 oxizi aditivi, pentru nivelul de tensiune de 48 V, (corespunzător unui panou de 72 de celule solare, având tensiunea în gol de 46 V, tensiunea nominală fiind de 24 V, iar tensiunea la putere maximă fiind de 36 V). S-a ales această valoare, fiind peste tensiunea debitată în gol a panoului (cea mai mare posibilă), asigurând astfel protecția în orice situație. Coeficientul de siguranță este de $48/46 = 1,043$, sub limita recomandată ca fiind 1,05;
- Cu 5 oxizi aditivi, pentru nivelul de 250 Vef (corespunzător tensiunii efective de 230 - 240 Vef pe fază, debitată de către invertor, în rețea. S-a ales această valoare peste maximul de 240 Vef admisibil în regim permanent al rețelei, dat fiind și caracterul imperfect sinusoidal al formei de undă generate de către invertor, având, prin urmare, un coeficient de siguranță de $240/250 = 1,041$, sub limita de 1,05 recomandată în normative.

Compozițiile chimice inițiale pentru fiecare dintre aceste amestecuri varistoare sunt prezentate în tabelele de mai jos:

Tabelul 1. Compoziția chimică inițială pentru materialul cu 2 oxizi aditivi

Componentă	Compoziția procentuală [% molare]	Cantitate la 10 g produs [g]	Masa molară [g]
ZnO	99,0	9,6682	81,37
Bi ₂ O ₃	0,5	0,2796	496,96
MnO ₂	0,5	0,0522	86,94

Tabelul 2. Compoziția chimică inițială pentru materialul cu 5 oxizi aditivi

Componentă	Compoziția procentuală [% molare]	Cantitate la 10 g produs [g]	Masa molară [g]
ZnO	97,0	9,117	81,37
Bi₂O₃	0,5	0,269	496,96
MnO₂	0,5	0,050	86,94
Co₃O₄	0,5	0,139	240,80
Cr₂O₃	0,5	0,088	151,99
Sb₂O₃	1,0	0,337	291,50

În Fig.1. sunt prezentate amestecurile obținute pentru variantele de bază.

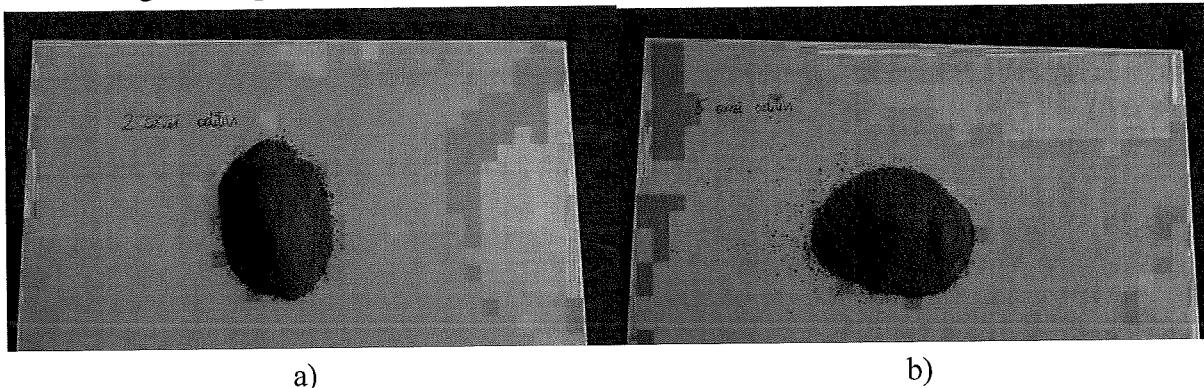


Fig.1. Amestecul inițial (înainte de sinterizare), cu 2 oxizi (a) și cu 5 oxizi (b)

Este vorba de compoziția inițială a amestecului. S-a preferat, pentru început, fixarea concentrațiilor molare ale aditivilor în jurul valorii de 0,5 procente molare, urmând ca, apoi, să mărim concentrația aditivului vizat, diminuând corespunzător pe cea a oxidului de Zinc.

Un prim set de măsurători vizează varistoarele realizate din cele două materiale descrise mai sus (cu 2 și cu 5 oxizi aditivi), dar, care au fost sinterizate la temperaturi diferite. Influența temperaturii de sinterizare nu a fost luată, în general, în calcul, majoritatea fabricanților de varistoare preluând valori constante, de cca. 1200-1300 grade Celsius pentru sinterizare, valori preluate din zona ceramicilor uzuale, aplicate ca atare și pentru ceramicile semiconductoare.

Varistoarele utilizate, sinterizate la o presiune de 500 kgf/cm², au fost:

- cu 2 oxizi aditivi, 7 varistoare sinterizate la 1100°C, 1150°C, 1200°C, 1250°C, 1300°C, 1350°C, 1400°C (Fig.2.a);
- cu 5 oxizi aditivi, 7 varistoare sinterizate la 1100°C, 1150°C, 1200°C, 1250°C, 1300°C, 1350°C, 1400°C (Fig.2.b);

S-au folosit varistoare având diametrul final de 30 mm (fără izolație) și grosimea (înălțimea) finală de cca. 3 mm. Aceste varistoare au fost realizate utilizând tehnica din dotarea UPT și INCEMC.

Aceste temperaturi au fost menținute, în cuptorul programabil, în conformitate cu graficul de încălzire, cca. o oră, restul parametrilor ciclului termic sau ai procesului tehnologic de fabricație nefiind modificați. Singura modificare a fost, prin urmare, valoarea temperaturii de sinterizare.

S-a încercat menținerea aceleiași înălțimi, prin compensarea cu cca. 5-10% (adăugarea de material amestec suplimentar) pentru varistoarele care sunt realizate prin sinterizare la peste 1250 de grade Celsius.



a)

b)

Fig. 2. Serii de varistoare sinterizate la 7 temperaturi diferite cu 2 oxizi aditivi, (b) cu 5 oxizi aditivi

Dependența pierderilor de masă în funcție de temperatura de sinterizare este detaliată în Fig. 3.

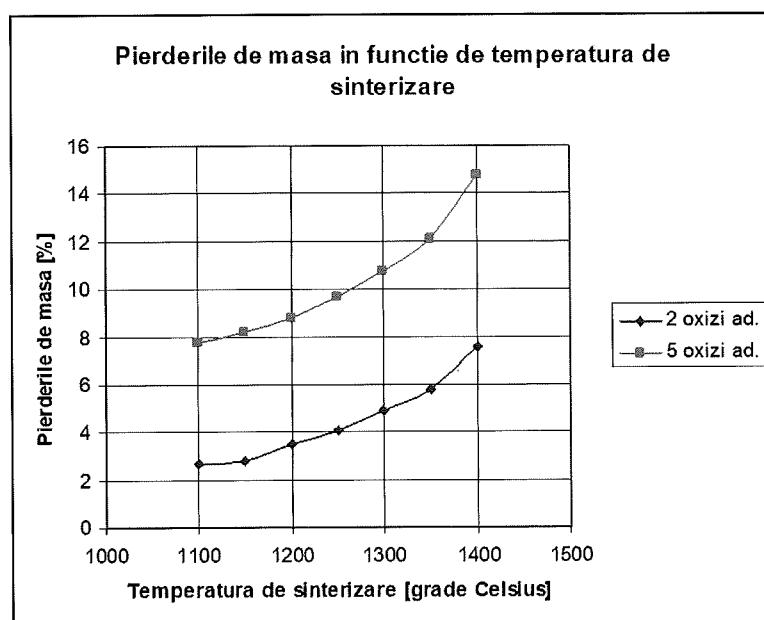
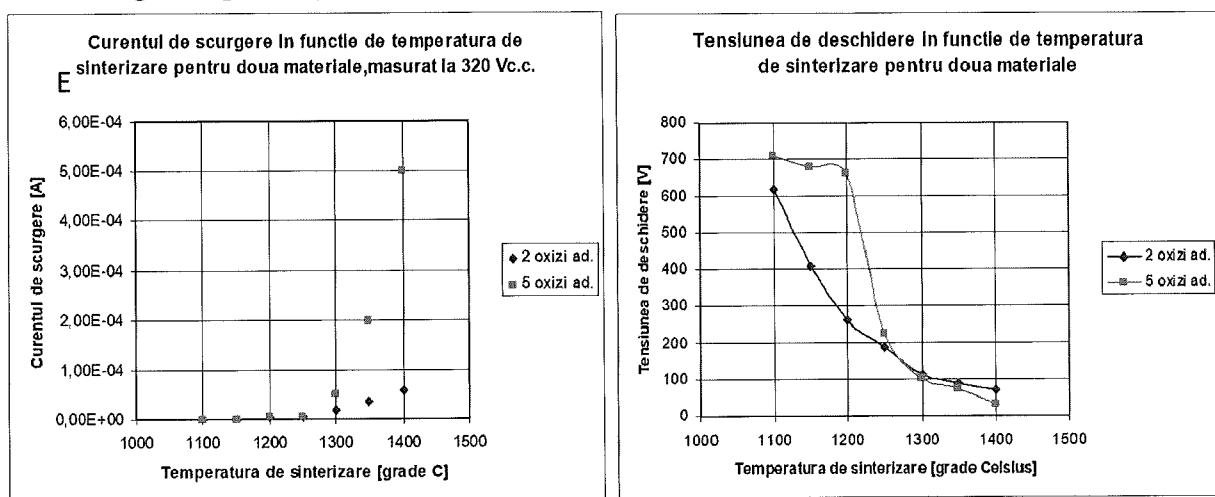


Fig. 3. Dependența pierderilor de masă în funcție de temperatura de sinterizare



a)

b)

Fig. 4. Curentul de scurgere și tensiunea de deschidere în funcție de temperatura de sinterizare

– (a) cu 2 oxizi aditivi, (b) cu 5 oxizi aditivi

De exemplu, prezența MnO₂ favorizează formarea unor compuși intermediari care fixează Bi₂O₃, evitând pierderea acestuia prin vaporizare, chiar la temperaturi ridicate de coacere (sinterizare). De aceea cei doi oxizi trebuie utilizați împreună, în orice structură chimică aferentă fabricației varistoarelor, în proporții care trebuie stabilite corect, dar trebuie să fie stoechiometric egale. Determinările parametrilor electrici au fost făcute cu instalația care va fi descrisă ulterior.

Analizând măsurătorile sintetizate în graficul din Fig.4.a., putem formula următoarele concluzii:

- Pentru varistoarele sinterizate între 1100 și 1250 grade Celsius, curentul de scurgere este aproximativ același, indiferent de numărul de oxizi aditivi;
- Pentru varistoarele sinterizate între 1250 și 1400 grade Celsius, tensiunea de deschidere este aproximativ aceeași, indiferent de numărul de oxizi aditivi;
- Pentru varistoarele sinterizate de la 1300 la 1400 grade Celsius, curentul de scurgere începe să crească, ajungând la valori semnificative pentru cele obținute la 1400 grade Celsius, ceea ce trădează o creștere a sensibilității acestor materiale, care poate fi benefică în principiu, dar poate duce la o încălzire nepermisă a varistorului, aceeași observație fiind valabilă și în cazul tensiunii de deschidere;
- Această creștere a curentului de scurgere precum și scăderea tensiunii de deschidere în regim permanent este agravată în situația varistoarelor cu 5 oxizi aditivi, care, devin, evident, mai sensibile, lucru nu neapărat benefic;
- Temperatura optimă de sinterizare, din punct de vedere al curentului de scurgere, este cea de cca. 1300 grade Celsius, care dă o ușoară sensibilitate varistoarelor, dar care nu pune în pericol siguranța în exploatare a lor.
- Sinterizat la cca. 1300 grade Celsius, materialul varistor cu 5 oxizi aditivi este ușor mai sensibil.

3.1. Determinarea parametrilor electrici

Cei mai importanți parametrii electrici ai varistorului sunt coeficientul de neliniaritate și tensiunea (intensitatea câmpului electric) la deschidere. Acești parametrii se determină, practic, pornind de la caracteristica curent-tensiune a varistorului, în zona tensiunilor de deschidere (48 V pentru cele de cc. Cu 2 oxizi, respectiv 320-330 V în c.c. pentru cele de curent alternativ cu 5 oxizi aditivi).

O parte din parametrii electrici descriși mai sus au fost determinați utilizând o instalație experimentală artizanală, prezentată în continuare. Instalația experimentală pentru determinarea parametrilor electrici este prezentată în Fig.5. Elementele acesteia sunt:

- sursa de tensiune continuă, programabilă prin intermediul unui calculator compatibil IBM-PC, care poate debita o tensiune continuă între 0 și 12500 V, la un curent maxim de 25 mA. Sursa poate fi reglată și manual;
- un (micro)ampermetru digital Keithley 619 inseriat cu varistorul, care permite măsurarea curenților între $1,9 \cdot 10^{-9}$ și $1,9 \cdot 10^{-3}$ A, având clasa de precizie 0,5%;

- un voltmetriu digital, cu memorie, tip Racal Dana 6000, care măsoară tensiunea aplicată între fețele varistorului printr-un divizor rezistiv, cu raportul 1:1000, având clasa de precizie 0,1 % ;

Ampermetrul digital și voltmetrul digital pot transmite datele obținute direct la PC, acesta fiind prevăzut cu o interfață de proces, compatibilă IEEE 488. Sistemului i se poate atașa și o imprimantă. Măsurările sunt realizate în conformitate cu standardele IEC-CEI.

Instalația poate fi folosită și pentru determinări ale parametrilor varistorului la diverse temperaturi ale mediului ambiant sau ale varistorului însuși. În acel caz, varistorul este introdus într-o incintă specială, prin care pot trece conductorii de legătură, care apare și în figură

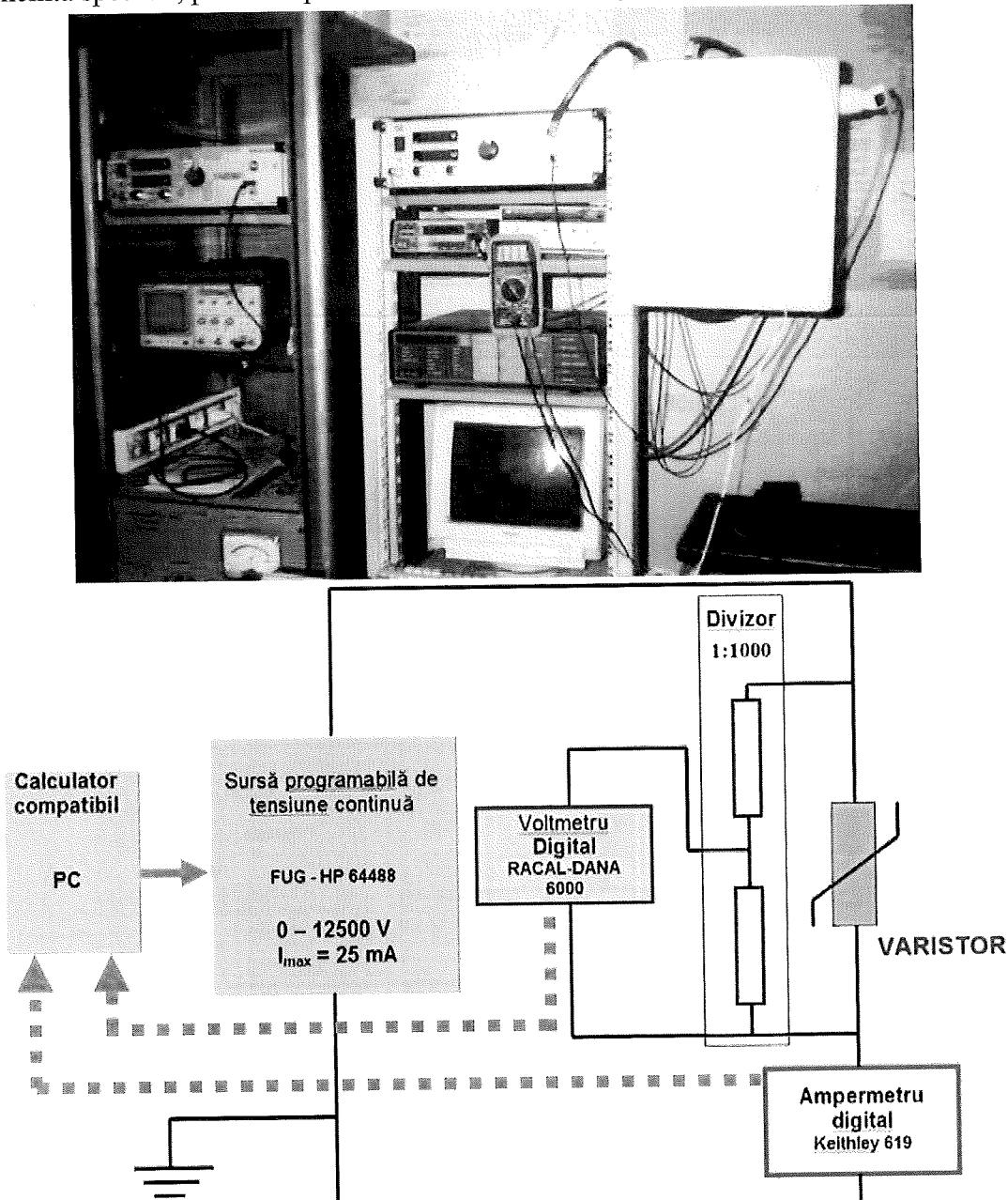


Fig.5. Instalația pentru măsurători în regim permanent

Înregistrarea curbei este făcută în felul următor: se crește în trepte tensiunea cu valori ΔU într-un interval de timp Δt . Măsurătoarea este citită cu o anumită întârziere, pentru a se stabiliza

currentul și a se amortiza curentul tranzitoriu de polarizare. Timpul de atenuare a componentei tranzistorii este de câteva minute pentru curenții mai mici de $1 \mu\text{A}$ și de ordinul secundelor pentru curenții de ordinul mA, corespunzători tensiunilor în jurul tensiunii de prag (U_s). Măsurările au fost efectuate la o temperatură ambiantă de 20°C , respectiv, ridicată la 40°C .

O altă determinare necesară, obținută în baza caracteristicii curent-tensiune, este cea a coeficientului de neliniaritate α , care reflectă proprietățile electrice ce se așteaptă a fi asigurate de varistor. Cu cât acest exponent va avea o valoare mai ridicată, se poate spune despre caracteristica de protecție a varistorului că se apropie de cea ideală.

Exponentul de neliniaritate se determină relativ simplu, observând că acesta reprezintă panta caracteristicii $I(U)$, pentru zona neliniară, în coordonate logaritmice:

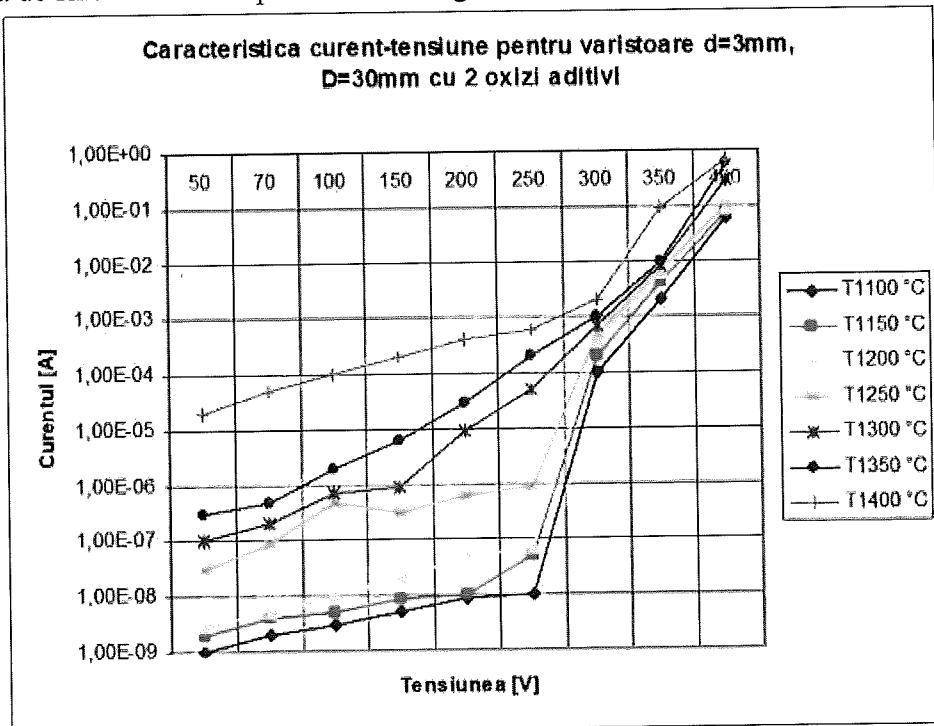
$I=KU^a$, care logaritmată devine: $\ln(I)=\ln(K)+\ln(U)$

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

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

În mod convențional, cele două puncte ale caracteristicii necesare determinării lui α se aleg pentru densitățile de curent $J = 1$ și 10 mA/cm^2 . Pentru simplificarea măsurătorilor, am considerat pentru aceasta determinare curenții de la 1 și 10 mA .

Caracteristicile curent-tensiune pentru cele două categorii de varistoare, în funcție de temperatura de sinterizare sunt prezentate în Fig.6.



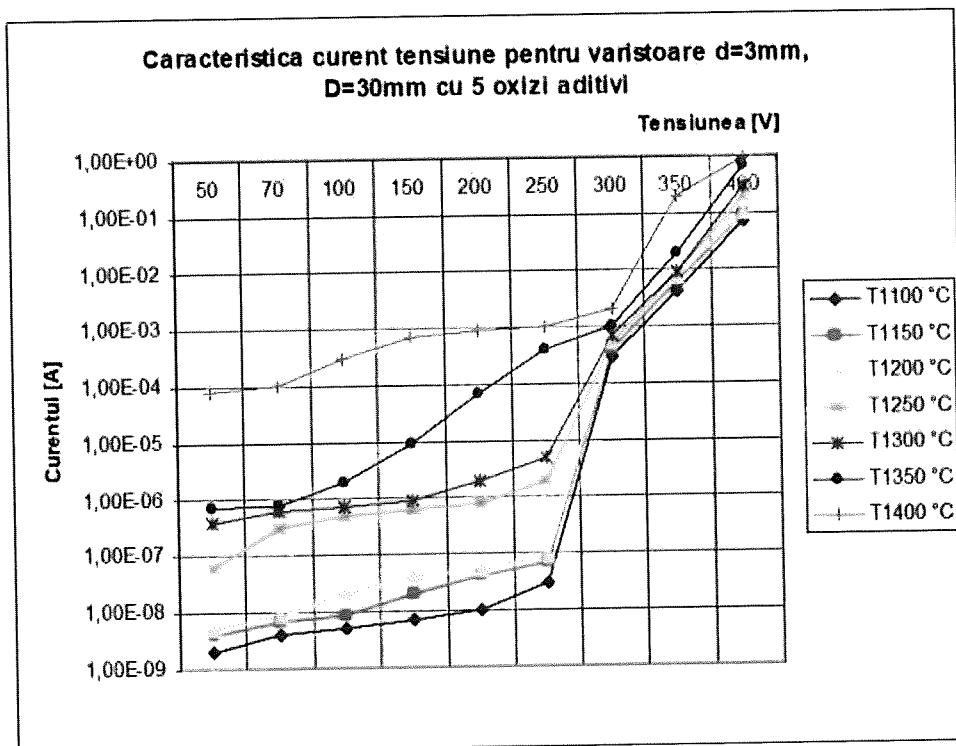


Fig.6. Caracteristicile curent tensiune pentru materiale cu 2 și 5 oxizi, funcție de temperatura de sinterizare

3.2. Utilizarea metodei planelor (analizei) factoriale pentru determinarea concentrațiilor optime de dopanți

Sub formă matematică, se poate scrie că mărimea de interes Y (una dintre mărimile electrice esențiale), care va fi numită, în continuare, *răspuns*, este o funcție de mai multe variabile X_i (variabile care vor fi denumite în continuare *factori*), acestea fiind, în cazul nostru, concentrațiile molare ale oxizilor aditivi. Această funcție o aproximăm ca fiind polinomială, de gradul I.

Se va lua în considerare influența a 4 oxizi aditivi, a căror rol este percepțut, în literatura de specialitate, ca fiind esențial asupra structurii și proprietăților materialului, în principal asupra caracteristicii curent-tensiune. Concentrația de Bi_2O_3 este menținută constantă, deci nu prezintă interes pentru experimente. Remarcăm faptul că s-au preferat mărimi care pot caracteriza materialul din care este realizat varistorul, nu varistorul în sine (s-au eliminat prin împărțire dimensiunile fizice ale piesei, mărimile rezultante E_s și J_F fiind specifice materialului, nu piesei care are o anumită geometrie și este realizată din acel material. De asemenea, funcțiile răspuns sunt mărimi electrice. Este de subliniat caracterul interdisciplinar al acestei lucrări, prin care se urmărește, prin tehnici specifice ingineriei chimice, obținerea unui material destinat în esență ingineriei electrice. De aceea, metodele de evaluare sunt specifice beneficiarului materialului.

Rezultatul aplicării planului factorial pentru 4 oxizi din 5 (excepție Bi₂O₃, considerat constant) este prezentat în Tabelul 3.

Tabelul 3. Rezultatul complet al aplicării planului factorial 2⁴

Numărul încercării	X ₁ Sb ₂ O ₃ % mol	X ₂ MnO ₂ % mol	X ₃ Cr ₂ O ₃ % mol	X ₄ Co ₃ O ₄ % mol	α	E _s [V/mm]	J _f [μA/cm ²]
1	+	+	+	+	65	504	0,14
2	-	+	+	+	54	322	0,71
3	+	-	+	+	47	469	0,0433
4	-	-	+	+	52	322	0,394
5	+	+	-	+	61	417	0,058
6	-	+	-	+	51	291	0,669
7	+	-	-	+	48	388	0,0317
8	-	-	-	+	53	260	0,179
9	+	+	+	-	63	439	0,147
10	-	+	+	-	52	287	1,334
11	+	-	+	-	30	417	0,144
12	-	-	+	-	42	273	0,887
13	+	+	-	-	64	385	0,0323
14	-	+	-	-	55	245	0,359
15	+	-	-	-	33	350	0,0539
16	-	-	-	-	52	244	0,140

În urma evaluării rezultatelor sintetice prezentate în Tab.3, s-au obținut cele trei funcții răspuns, pentru fiecare mărime studiată, după cum urmează:

- Pentru E_s [V/mm], (intensitatea câmpului electric de prag), regresia polinomială arată că efectul lui Sb₂O₃ este preponderent, având un coeficient de 35,16. Rolul lui Cr₂O₃ este puțin mai redus, având un coeficient de 28,31. Ceilalți constituenți, anume Co₃O₄ și MnO₂ au un rol mai redus asupra tensiunii (și intensității câmpului electric) de deschidere (de prag). Ecuația de regresie nu este extrem de exactă, putând fi corectată prin adăugarea altor termeni, de grad mai ridicat. Totuși, în aplicațiile din prezenta lucrare, nu este necesară o valoare mai ridicată a preciziei, nefiind vorba de o aplicație de statistică matematică.
- Pentru α (coeficientul de neliniaritate), ecuația regresiei este foarte simplă, ceea ce arată că, surprinzător, numai un singur aditiv are un efect apreciabil asupra lui α . Acest aditiv este MnO₂. Acest lucru urmează a fi confirmat și mai în detaliu, în capitolele următoare. Observăm că valoarea obținută pentru F, egală cu 1,45, este inferioară valorii limită, ceea ce confirmă precizia expresiei.
- Pentru JF [μA/cm²], (densitatea curentului de scurgere) se constată că nu densitatea curentului de scurgere JF [μA/cm²], depinde liniar de aditivi, ci logaritmul acestei valori. În consecință, interpolările și ecuația de regresie trebuie realizate pentru $\log JF$. O altă observație este că, din punct de vedere a simplificării calculelor, mai ales în prima parte a caracteristicii, este mai simplu să se exprime valorile lui JF în nA/cm². Polinomul de regresie este complex, fiecare dintre aditivi având un rol

hotărâtor. Observăm că valoarea obținută pentru F, egală cu 1,08, este inferioară valorii limită, ceea ce confirmă precizia expresiei.

3.3. Rezultatele experimentale necesare pentru aplicarea analizei factoriale

Pentru stabilirea influențelor fiecărui aditiv, în cazul materialului mai elaborat, având 5 oxizi aditivi principali, s-au realizat 4 familii de varistoare, a câte trei bucăți fiecare, deci un total de 12 varistoare, cu concentrațiile descrise în Tabelul 4. Dimensiunile sunt aceleași ca și în cazul varistoarelor anterioare, piesele având același aspect.

Tabelul 4. Compoziția chimică a familiilor de varistoare studiate

Familia	Compoziția
A	(95,5-x) % mol. ZnO x % mol. Sb ₂ O ₃ 1 % mol. MnO ₂ 1 % mol. Cr ₂ O ₃ 1 % mol. Co ₃ O ₄ 0,5 % mol. Bi ₂ O ₃ 1 % mol. alți dopanți cu rol nesemnificativ x variază între 1 și 3, anume 1,2,3 (total 3 varistoare)
B	(93,5-y) % mol. ZnO y % mol. MnO ₂ 3 % mol. Sb ₂ O ₃ 1 % mol. Cr ₂ O ₃ 1 % mol. Co ₃ O ₄ 0,5 % mol. Bi ₂ O ₃ 1 % mol. alți dopanți cu rol nesemnificativ y variază de la 0,5 la 1,5, anume 0,5,1, 1,5 (total 3 varistoare)
C	(93,5-z) % mol. ZnO z % mol. Cr ₂ O ₃ 3 % mol. Sb ₂ O ₃ 1 % mol. MnO ₂ 1 % mol. Co ₃ O ₄ 0,5 % mol. Bi ₂ O ₃ 1 % mol. alți dopanți cu rol nesemnificativ z variază de la 0,5 la 1,5, anume 0,5,1, 1,5 (total 3 varistoare)
D	(93,5-t) % mol. ZnO t % mol. Co ₃ O ₄ 3 % mol. Sb ₂ O ₃ 1 % mol. MnO ₂ 1 % mol. Cr ₂ O ₃ 0,5 % mol. Bi ₂ O ₃ 1 % mol. alți dopanți cu rol nesemnificativ t variază de la 0,5 la 1,5, anume 0,5,1, 1,5 (total 3 varistoare)

Temperatura de sinterizare a tuturor varistoarelor a fost de cca. 1300 °C, iar presiunea de sinterizare a fost de 500 kgf/cm², în conformitate cu concluziile anterioare, nefiind adăugate alte operații suplimentare sau modificări ale parametrilor tehnologici.

În compoziția amestecului s-a introdus, în plus față de eșantioanele anterioare, Bi₂O₃ a cărui concentrație a rămas constantă, la 0,5 % molare. De aceea, în loc să vorbim de un material cu 5 oxizi aditivi, referirile le vom face de fapt la cei 4 aditivi rămași. În baza cercetărilor anterioare, concentrația de Sb₂O₃ variază în limitele cele mai mari, de 4 ori față de celelalte.

3.4. Caracteristicile curent-tensiune

Pentru acest set de măsurători s-au utilizat varistoarele artizanale având concentrațiile molare de 1, 2 și 3 %, supuse polarizării în curent continuu, de la cca. 30 Vcc până la cca. 230 Vcc (intensitatea maximă a câmpului fiind $E = 7000 \text{ V/mm}$). S-a evitat deschiderea varistoarelor și creșterea curentului prin acesta, pentru a nu produce încălzirea inutilă a lor. Sunt prezentate în Fig.7.

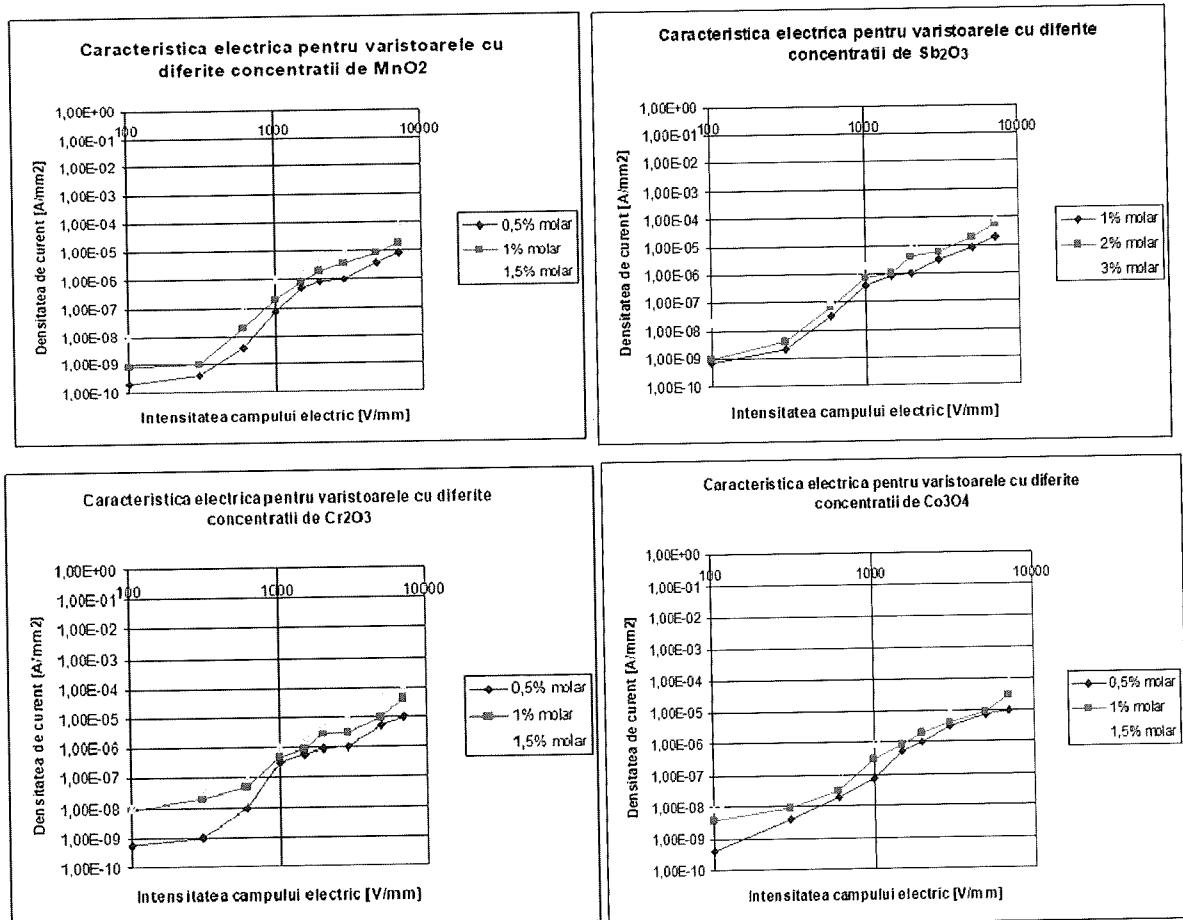


Fig. 7. Caracteristicile electrice (curent-tensiune) pentru cele 4 familii de varistoare

Analizând măsurările sintetizate în graficul din Fig.7, putem formula următoarele concluzii:

- Se remarcă o deplasare în sus a caracteristicilor curent-tensiune odată cu creșterea concentrației molare de aditiv, ceea ce trădează o creștere a sensibilității acestor materiale, care poate fi benefică în principiu, dar poate duce la limită la o încălzire nepermisă a varistorului;
- Caracteristicile sunt în formă brută, nefiind interpolate, tocmai pentru a arăta variația reală a parametrilor măsurați;
- Regăsim ca valabilă afirmația de la care am pornit, anume că tensiunea de deschidere varistoarelor este în jurul a 300-315 V, când curentul ajunge la o valoare de cca 1 mA, ceea ce confirmă buna dimensionare a acestora;

- Caracteristicile electrice sunt relativ apropiate, iar poziția lor față de celelalte
- caracteristici urmează a fi studiată în continuare;
- Concentrația mare de aditiv are o influență medie asupra caracteristicii curent-tensiune, lucru demonstrat prin metoda planurilor factoriale.

Referitor la compoziția varistoarelor, s-au tras următoarele concluzii generale:

- Orice creștere a concentrației vreunui oxid aditiv produce o deplasare în sus a caracteristicilor coeficientului de neliniaritate, a intensității electrice de deschidere sau a intensității electrice reziduale în cazul impulsului, precum și a caracteristicilor curent-tensiune, ceea ce trădează o creștere a sensibilității acestor materiale, care poate fi benefică în principiu, dar poate duce la o încălzire nepermisă a varistorului sau la asigurarea unui grad de protecție insuficient;
- Variația principalelor mărimi monitorizate (coeficient de neliniaritate, intensitate electrică de câmp de deschidere, intensitate electrică de câmp de închidere) are o formă care poate fi aproximativă ca liniară, în anumite condiții, în funcție cu creșterea concentrației de oxizi aditivi;
- Ecuatiile care stabilesc influența fiecărui oxid aditiv, determinate statistic prin intermediul metodei planurilor factoriale, au fost verificate experimental, în totalitate, ordinea importanței oxizilor fiind:
- Poz.1. Sb₂O₃, Poz.2. Cr₂O₃, Poz.3. Co₃O₄, Poz.4. MnO₂.
- Au fost vizate proprietățile de material, care nu sunt influențate prea mult de dimensiunea piesei varistor realizată din acel material. Toate încercările au fost realizate utilizând aparatajul descris anterior, în conformitate cu normativele și procedurile de încercare standardizate.

4. Dezvoltare module de protecție

4.1. Modulul de protecție pentru instalația de curent continuu (48 Vcc)

Schema acestui modul împreună cu realizarea fizică a sa sunt prezentate și detaliate mai jos:

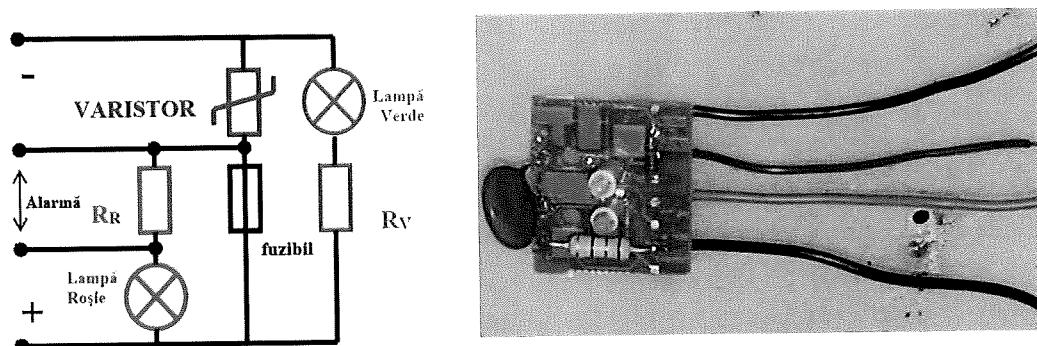


Fig.8. Schema modulului de protecție

Concepția acestui echipament este absolut originală, cablajul imprimat având dimensiunile de 15 x 15 mm. Din punct de vedere al schemei electrice, modulul este alcătuit

din varistorul de 15 V c.c. cu diametrul de 7 mm, inseriat cu o pistă fuzibilă, calibrată pentru 10 A. Diametrul minim de 7 mm a fost ales din considerente de absorbție a energiei. În paralel cu acesta este conectată o lampă verde care indică buna funcționare a ansamblului. Este inseriată cu o rezistență de mică putere, de $6\text{ k}\Omega$, necesară limitării curentului prin lampă în regim permanent. Datorită înglobării acestuia pe intrarea în invertor, impedanța (capacitatea dielectrică) a varistorului utilizat trebuie să fie cât mai redusă, pentru a nu influența capacitatea instalației și pentru a realiza, în parte, funcția de filtraj a tensiunii de referință pentru microreleele și circuitele integrate aferente plăcilor protejate din invertor.

Pe derivația care pornește de la varistor se află localizate o rezistență de $2,5\text{ k}\Omega$ (deinde de modul de alarmare din fiecare centrală), având 2 W, care este inseriată cu lampa roșie care indică regimul de avarie. În regim de avarie, se estimează că tensiunea nu va depăși 50 Vcc, ca urmare a defecțiunii redresorului de pe alternator. Oricum, la această valoare varistorul lasă să treacă un curent de ordinul zecilor sau sutelor de mA, tensiunea lui de deschidere fiind de cca. 45 Vc.c.. Având varistorul în stare de conducție, de pe rezistență respectivă se va culege o tensiune suficient de mare în general peste 6 V care, care să poată fi colectată ca semnal de alarmă și transmisă apoi către unitatea de gestiune a alarmelor din centrală (integrată sau nu SCADA), sau, pur și simplu, unei lămpi martor pe cutia invertorului. Astfel, incidentul de supratensiune poate fi semnalat imediat operatorului stației care va putea deconecta panourile respective. Dacă supratensiunea este mult mai violentă și are alte cauze, modulul, se va distrugă, la depășirea a cca. 300 V, aplicați chiar pentru scurtă durată, aşa cum am demonstrat, chiar dacă pistă fuzibilă nu se topește, varistorul, în acest caz se va degrada ireversibil, menținând regimul de scurtcircuit, care va fi eliminat de către siguranțele fuzibile (sau microreleele) din instalație. Nu se va trimite, nici în această situație, o tensiune violentă către analizorul de alarme (care nu acceptă mai mult de 6 V), deoarece lampa roșie acționează ca o siguranță fuzibilă, distrugându-se și întrerupând circuitul la peste 30-40 mA.

Cea mai mare parte a curentului cauzat de supratensiunea din circuit se va scurge prin pistă fuzibilă, curentul prin partea de semnalizare a avariei fiind cu cca. 3 ordine de mărime mai mic. Prin urmare, energia absorbită de varistor este medie, ceea ce justifică alegerea diametrului de 7 mm, chiar dacă și în această situație ele sunt ușor supradimensionate.

Evident, și în acest caz, prețul modulului este extrem de redus, în comparație cu valoarea echipamentelor protejate. Dacă se va trece la producția de serie a acestuia, prețul lui nu va depăși 2-3 euro pentru fiecare circuit sau placă protejată, o sumă infimă în comparație cu valoarea de mii de euro a instalației fotovoltaice.

Ca și testare, s-a efectuat și analiza comportării modulului în regim permanent, la limita normală de exploatare, adică la o tensiune de 55 V c.c. Modul de lucru a fost cel clasic. S-a efectuat și o modelare numerică, utilizând și FLUX 2D, în scopul verificării supraîncălzirii, pentru varistorul dat. Media valorilor valorile măsurate 22,2 [°C] este foarte apropiată de rezultatul modelării. Aceste valori sunt apropriate și de valoarea estimată prin calcule, care are valoarea $\tau_{se} = 23,55$ [°C].

Cablajul a fost adaptat pornind de la piese existente. Pentru eventuala fabricație de serie, acesta poate fi reproiectat cu costuri rezonabile, pentru cercetarea curentă costurile de

execuție fiind mult prea ridicate.

4.2. Modulul de protecție pentru instalația trifazată, după invertor (230 Vef)

Ansamblul poate fi înglobat într-o carcăsă de material plastic, de tipul celor utilizate pentru dozele de distribuție. Dimensiunea însumată a cablajelor este de 50 x 90 mm. Ansamblul este conceput modular, existând trei module elementare, câte unul pentru fiecare fază.

Elementele constitutive ale montajului sunt, pentru fiecare dintre fazele R,S,T:

- Varistoarele V1R, V1S, V1T, inseriate cu fuzibilele F1R, F1S, F1T;
- Varistoarele V2R, V2S, V2T, inseriate cu fuzibilele F2R, F2S, F2T;
- Varistoarele V3R, V3S, V3T, inseriate cu fuzibilele F3R, F3S, F3T;
- Lămpile cu neon NeR, NeS și NeT, inseriate cu rezistoarele RR, RS și RT. Varistoarele din familia V1 sunt de 250 V c.a., diametru 5 mm, montate între neutrul rețelei N și neutrul de protecție NP.

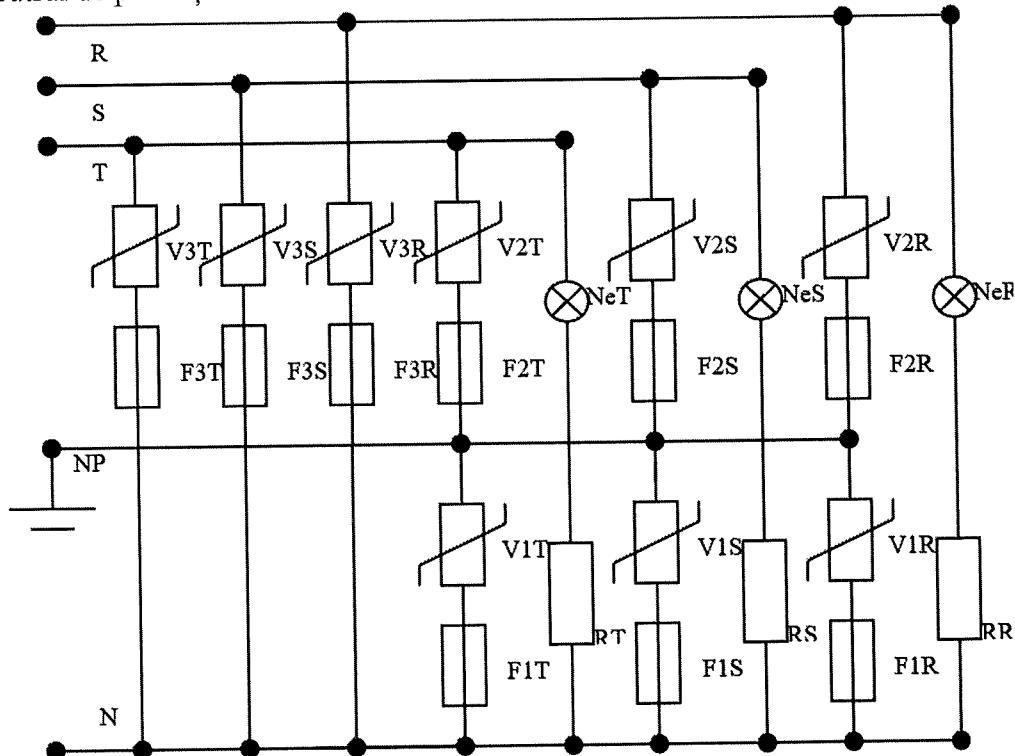


Fig.9. Schema electrică pentru modulul de protecție

Varistoarele din familia V2 și cele din familia V3 sunt de 250 V c.a., diametru 20 mm, montate între fază și neutrul de protecție NP, respectiv neutrul rețelei N.

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

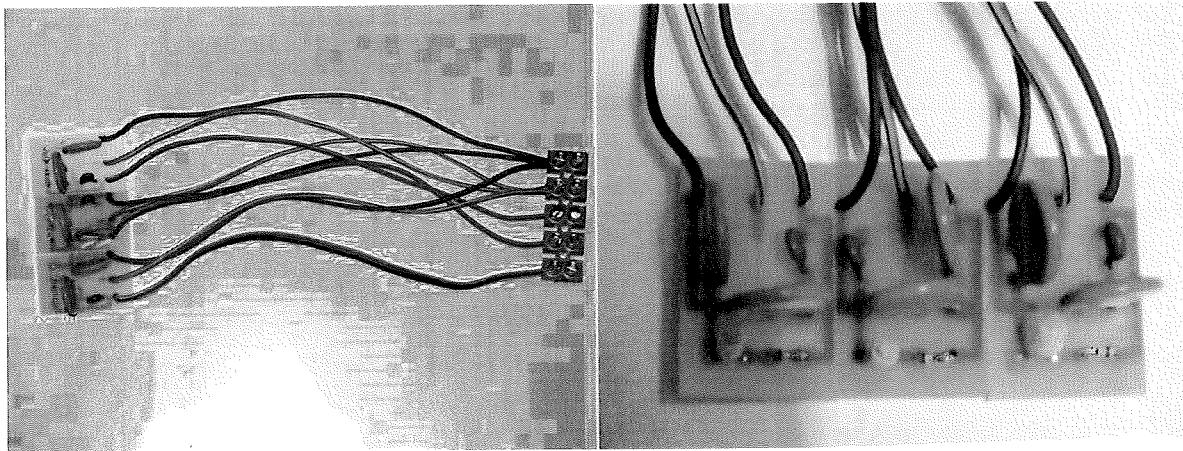


Fig.10. Modul experimental

Fuzibilele sunt inseriate cu varistoarele și plasate între:

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

În condiții defectuoase de exploatare a instalațiilor electrice, este posibil ca potențialul neutrului să nu fie egal cu cel al neutrului de protecție, ceea ce a impus această soluție de conectare aparent fără justificare.

Lampa cu neon este destinată semnalizării prezentei tensiunii pe fază. Tensiunea nominală de funcționare a lămpilor de neon în familia Ne este de 60 Vca, la un curent de maxim 1 mA. Se montează între fază și neutru. Se inseriază cu o rezistență de 200 kΩ, pentru a asigura nivelul de tensiune de 60 Vca, la un curent limitat la 0,8 mA. Rezistențele R sunt de 200 KΩ, 0,5 W.

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

Ambele tipuri de varistoare au tensiunea nominală de 230-250 V c.a.

S-a efectuat și analiza comportării modulului în regim permanent, la limita normală de exploatare, adică la o tensiune de 460 V c.a. Modul de lucru a fost cel prezentat în situația studiului varistoarelor legate în paralel.

S-a efectuat și o modelare numerică, utilizând și FLUX 2D, în scopul verificării supraîncălzirii, pentru varistorul V3R. Se observă că valorile măsurate sunt foarte apropiate de cele rezultate în urma modelării. Aceste valori sunt apropiate și de valoarea estimată prin calcule, care are valoarea $\tau_{se} = 8,79$. Diferența dintre aceste temperaturi poate fi cauzată de neomogenitatea materialului, imprecizia măsurătorilor, conducția termică în firele de legătură, etc. Cablajul a fost executat gratuit, în baza unui proiect aferent.

5. Testarea modulelor în regim de curent alternativ

Pentru aplicațiile legate de alimentarea în alternativ la frecvență uzuală de 50 Hz, este posibilă determinarea capacității dielectrice a varistorului printr-o metodă foarte simplă, rapidă și eficientă, utilizând doar un osciloscop digital cu două canale. Procedura descrisă mai jos este complet originală. Această metodă se bazează pe observația că varistorul este un element de circuit nelinier, având, la această frecvență, o capacitate dielectrică deloc de neglijat.

Varistorul este echivalent cu o schemă paralelă având o capacitate C_V și o rezistență R_V (variabilă în funcție de tensiunea aplicată, dar constantă pentru o anumită tensiune). Această schemă împreună cu schema de principiu pentru realizarea măsurătorilor este prezentată mai jos. S-au efectuat măsurători pentru toate varistoarele utilizate. Nu este necesar ca achiziția de date să se realizeze automat (putem înălța PC-ul), în funcție de performanțele osciloscopului. Pentru măsurările curente s-a utilizat un osciloscop digital pe două canale tip SEFRAM 5064 DC. Pe un canal s-a achiziționat tensiunea aplicată varistorului, iar pe celălalt canal s-a achiziționat, prin rezistență R_d , curentul care se stabilește prin varistor. Tensiunea de alimentare a varistoarelor a fost de 250 Vef (UMCOV, tensiunea maximă ce poate apărea în condiții de exploatare normală, în valoare efectivă).

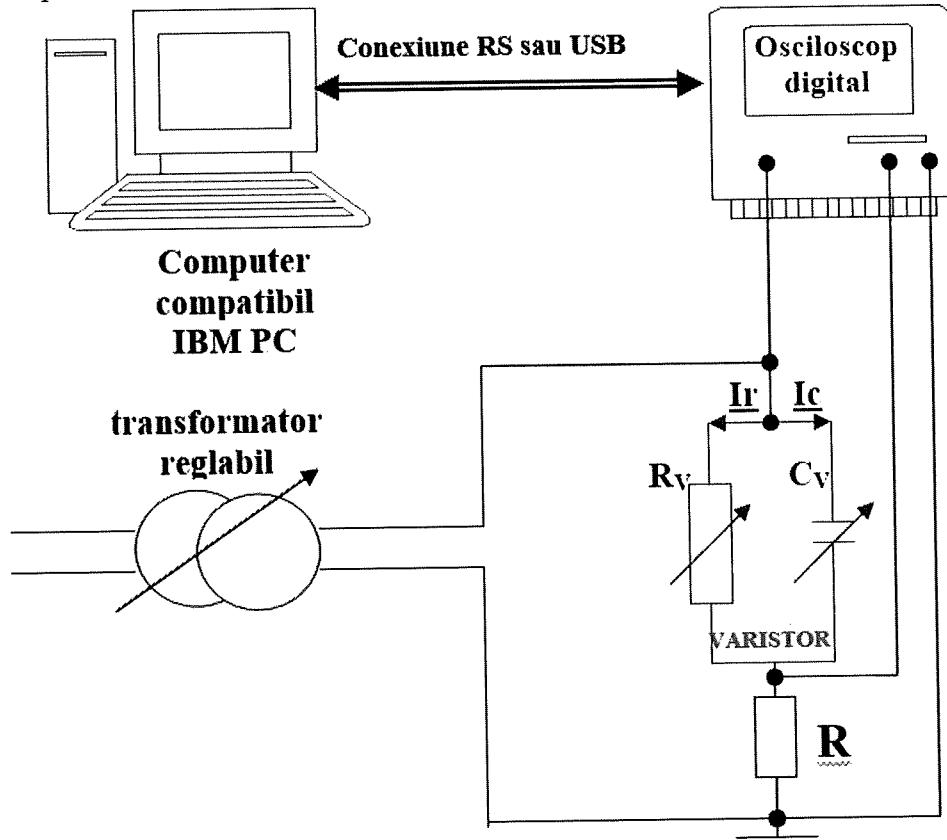


Fig.11. Schema de principiu

Tensiunea reală se obține prin înmulțirea cu 20 a scalei osciloscopului, curentul fiind deja calibrat.

Dacă tensiunea crește peste această valoare aleasă la limită, varistorul intră în zona tensiunii de prag, iar prin urmare, componenta rezistivă a curentului devine preponderentă.

Dacă tensiunea este cu mult sub această valoare, componenta rezistivă a curentului devine total neglijabilă în comparație cu cea capacitive. Această tensiune a fost obținută printr-un autotransformator ușor, la frecvența de 50 de Hz a rețelei. În figura de mai jos este prezentat un exemplu de oscilogramă obținută prin achiziția acestei tensiuni, pentru un varistor de 20 mm.

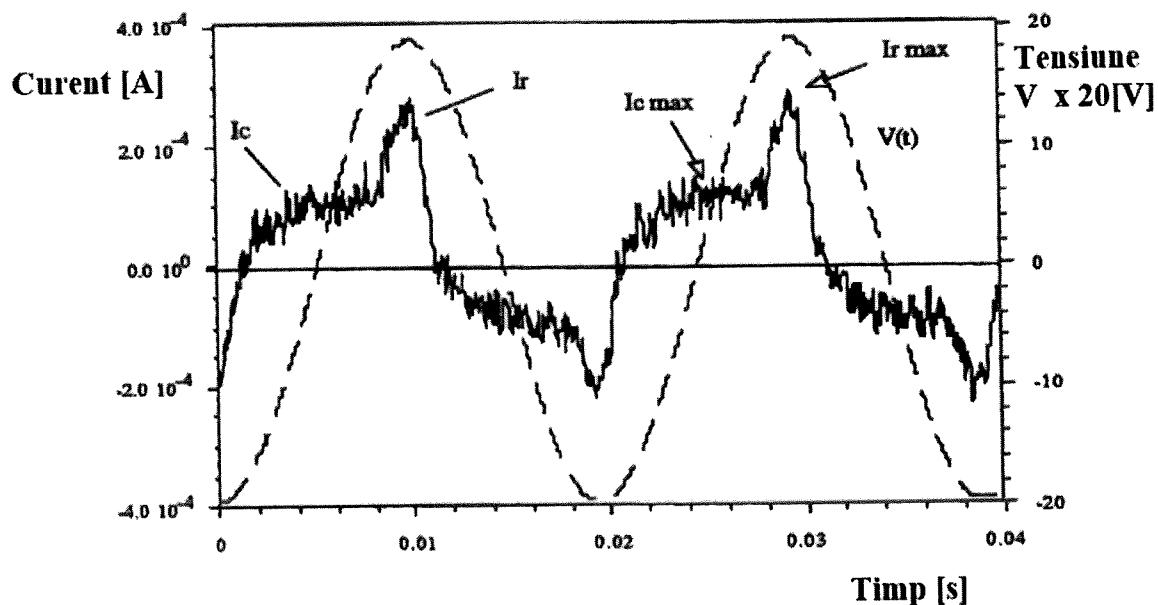


Fig.12. Oscilogramă obținută prin achiziția tensiunii, pentru un varistor de 20 mm.

După cum observăm din oscilogramă, putem separa două componente ale curentului, cea rezistivă, în fază cu tensiunea I_r , precum și cea capacitive I_c , defazată cu 90 de grade. Principiul metodei de măsurare în alternativ constă în determinarea amplitudinii curentului capacitive I_{cmax} , obținută, evident, la defazajul maxim de 90 de grade, adică atunci când tensiunea trece prin 0.

Pornind de la această valoare maximă, putem scrie următoarea relație de calcul pentru capacitatea varistorului CV:

$$CV = I_{cmax} / (V_{max} \cdot \omega)$$

În principiu, în baza aceleiași scheme se pot face și măsurători ale rezistenței electrice a varistorului pentru o anumită valoare a tensiunii efective.

S-a considerat $V_{max} = 250 \cdot 1,41 = 352$ V, $\omega = 314$ rad/s

Cunoșcând valoarea capacității varistorului CV la 50 Hz, se poate determina și permitivitatea relativă a acestuia, și la o anumită tensiune (250 Vef în cazul de față) și frecvența de 50 Hz, verificând astfel performanțele materialului.

Asemenea teste au fost efectuate pentru toate varistoarele de 230 Vef.

Relația de calcul a permitivității relative ϵ_r este:

$$\epsilon_r = (4 \cdot h \cdot CV) / (\epsilon_0 \cdot \pi \cdot d^2)$$

unde:

$h = 2,8$ mm (înălțimea varistorului de 230 Vef); d este diametrul varistorului;

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m (permittivitatea absolută a vidului). Rezultatele acestor măsurători

sunt trecute mai jos.

Tabelul 5. Rezultate măsurători

Tip varistor 230Vef	I_{emax} [A]	CV [nF]	ε_r
20 mm	$1,13 \cdot 10^{-4}$	1,03	1038
30 mm	$2,57 \cdot 10^{-4}$	2,33	1046

Toate măsurătorile au fost efectuate la o temperatură ambientă de cca. 20 °C. Din tabelul de mai sus rezultă o valoare a lui ϵ_r în jurul a 1040, pentru materialul având 5 oxizi aditivi, utilizat în tensiune alternativă. Valorile apropriate ale lui ϵ_r demonstrează, ca o verificare, corectitudinea măsurătorilor efectuate și a principiului metodei. Toate măsurătorile efectuate au confirmat modelările anterioare. Testele pot fi completate și cu regimul de impuls.

Coordonator,
Conf.dr.ing. Attila SIMO

From: susy@mdpi.com <susy@mdpi.com> on behalf of Editorial Office <applsci@mdpi.com>
Sent: Sunday, December 12, 2021 8:24 PM
To: Flaviu Mihai FRIGURA-ILIASA <flaviu.frigura@gmail.com>
Cc: Attila Simo <attlia.simo@upt.ro>; Flaviu Frigura <flaviu.frigura@upt.ro>; Petru Andea <petru.andea@upt.ro>; Sorin Musuroi <sorin.musuroi@upt.ro>
Subject: [Applied Sciences] Manuscript ID: [applsci-1528770](#) - Submission Received

Dear Dr. FRIGURA-ILIASA,

Thank you very much for uploading the following manuscript to the MDPI submission system. One of our editors will be in touch with you soon.

Journal name: Applied Sciences

Manuscript ID: [applsci-1528770](#)

Type of manuscript: Article

Title: Establishing Service Limits for Metal Oxide Varistors as Function of the Applied Voltage and Ambient Temperature

Authors: Attila Simo *, Flaviu Mihai Frigura-Ilias * , Petru Andea, Sorin Musuroi

Received: 12 December 2021

E-mails: attlia.simo@upt.ro, flaviu.frigura@upt.ro, petru.andea@upt.ro,
sorin.musuroi@upt.ro

You can follow progress of your manuscript at the following link (login required):

https://susy.mdpi.com/user/manuscripts/review_info/0a50cb5d25fb7331f69fcc9ac7ac5fb

The following points were confirmed during submission:

1. Applied Sciences is an open access journal with publishing fees of 2000 CHF for an accepted paper (see <https://www.mdpi.com/about/apc/> for details). This manuscript, if accepted, will be published under an open access Creative Commons CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), and I agree to pay the Article Processing Charges as described on the journal webpage (<https://www.mdpi.com/journal/applsci/apc>). See <https://www.mdpi.com/about/openaccess> for more information about open access publishing.

Please note that you may be entitled to a discount if you have previously received a discount code or if your institute is participating in the MDPI Institutional Open Access Program (IOAP), for more information see <https://www.mdpi.com/about/ioap>. If you have been granted any other special discounts for your submission, please contact the Applied Sciences editorial office.

2. I understand that:

a. If previously published material is reproduced in my manuscript, I will provide proof that I have obtained the necessary copyright permission.

(Please refer to the Rights & Permissions website:

<https://www.mdpi.com/authors/rights>.

b. My manuscript is submitted on the understanding that it has not been published in or submitted to another peer-reviewed journal. Exceptions to this rule are papers containing material disclosed at conferences. I confirm that I will inform the journal editorial office if this is the case for my manuscript. I confirm that all authors are familiar with and agree with submission of the contents of the manuscript. The journal editorial office reserves the right to contact all authors to confirm this in case of doubt. I will provide email addresses for all authors and an institutional e-mail address for at least one of the co-authors, and specify the name, address and e-mail for invoicing purposes.

If you have any questions, please do not hesitate to contact the Applied Sciences editorial office at applsci@mdpi.com

Kind regards,

Applied Sciences Editorial Office

St. Alban-Anlage 66, 4052 Basel, Switzerland

E-Mail: applsci@mdpi.com

Tel. +41 61 683 77 34

Fax: +41 61 302 89 18