

**Lucrare de laborator la
COMPATIBILITATE ELECTROMAGNETICA**

Avansati

**Lucrarea 1
Supratensiuni în rețeaua de alimentare. Analiză și simulare
în SIMULINK.**

Cuprins:

- 1.Suport teoretic**
- 2.Simularea în SIMULINK a supratensiunilor de lungă durată și a metodelor de eliminare**
- 3.Distrugerea echipamentelor prin supratensiuni**
- 4.Dispozitive comerciale pentru eliminarea supratensiunilor**

Supratensiuni în rețeaua de alimentare

1. Suport teoretic

1.1. Introducere

Cea mai însemnată parte din perturbațiile electromagnetice care se manifestă în mediul industrial este produsă de regimurile tranzitorii ale echipamentelor și instalațiilor electrice de acționare precum și de variațiile amplitudinii și frecvenței tensiunii de alimentare peste limitele admise, perturbații care se propagă prin conducție (rețeaua de alimentare).

Cauzele principale ale unor astfel de perturbații sunt în general următoarele (1):

- comutările instalațiilor de forță
- reconfigurările din mers ale unor subsisteme energetice
- schimbarea în regim de lucru a prizelor transformatoarelor
- funcționarea cu șocuri de sarcină a motoarelor electrice de acționare de putere medie și mare
- șocurile de curent specifice arcurilor electrice (instalații de sudură, cupatoare cu arc electric etc.)
- comutările on- off ale sarcinilor inductive și capacitive importante (cum sunt de exemplu instalațiile mixte de filtrare- compensare)
- scurtcircuiturile accidentale
- supratensiuni datorate descărcărilor electrice atmosferice
- variațiile rapide ale amplitudinii și frecvenței tensiunii de alimentare peste limitele admise de constructorii echipamentelor de calcul ca urmare a supraîncărcării rețelei, comutării instalațiilor energetice, scurtcircuitate, etc.

În rețea impulsurile ating în mod curent amplitudini de 2500V, și maxim 20000V. Se apreciază că 90% din perturbările în funcționarea calculatoarelor se datorează evenimentelor din rețea.

Perturbațiile conduse prin rețeaua de alimentare pot fi clasificate în mai multe feluri. O clasificare ar putea fi următoarea:

- fluctuații rapide de amplitudine a tensiunii (vârfuri de tensiune suprapuse);
- fluctuații lente de amplitudine a tensiunii;
- microdefecte în forma tensiunii și căderi de tensiune cu revenire;
- distorsiuni armonice;
- variații de frecvență ale tensiunii;
- parazitarea nulului și împământării.

O altă clasificare, mai detaliată:

- dispariții complete ale tensiunii pe una sau mai multe semialternanțe;
- depresiuni sau supracreșteri ale nivelului tensiunii de rețea în cadrul semialternanței;
- fluctuații și efecte de tip flicker (pâlpâiri pe frecvențe joase);
- impulsuri transiente singulare;
- impulsuri parazite oscilante;
- salve de impulsuri parazite;
- modificări ale frecvenței și fazei;
- armonici superioare;
- nesimetrii ale tensiunii;
- componente de curent continuu.

Repartiția procentuală a evenimentelor din rețea este:

-oscilații, tranziții căzătoare (15% din nivel)- 49%;

- vârfuri de tensiune (25% din nivel)- 39,5%;
- fluctuații de tensiune (10% din nivel)- 11%;
- pierderea pasageră a întregii tensiuni- 0,5%.

Se consideră că una dintre cele mai frecvente situații perturbatoare este generată de disparițiile tranzitorii sau de atenuările pasagere drastice ale tensiunii de rețea (ex. urmare a intrării în acțiune a sarcinilor grele sau a scurtcircuitelor). Se pot cita date statistice cu factorii care perturbă și procentul de afectare a funcționării:

- 25% perturbații de frecvență mare, inclusiv componente spectrale ale impulsurilor;
- 5% impulsuri transiente;
- 55% scăderea nivelului tensiunii de alimentare mai mult de 10%;
- 15% dispariții pasagere ale tensiunii de alimentare.

Date mai noi (6) arată că ponderea supratensiunilor este foarte mare în apariția defecțiunilor, figura 1:

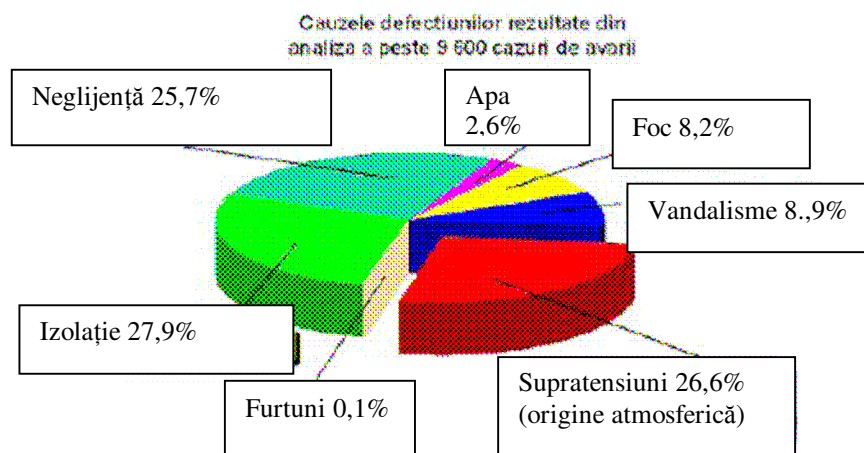


Figura 1: ponderea defecțiunilor apărute ca urmare a supratensiunilor atmosferice

1.2. Tipuri de perturbații în rețea

În România aceste perturbații sunt normate de standardul SREN 50160 (caracteristicile tensiunii furnizate de rețelele publice de distribuție), care prevede atât variația maximă a amplitudinii cât și frecvența fluctuațiilor din rețea, precum și componența în armonici admisă pentru tensiunea rețelei.

Fluctuațiile rapide de amplitudine se împart în:

- vârfuri de tensiune suprapuse peste tensiunea rețelei
- scăderea amplitudinii unei alternanțe, cea pozitivă sau cea negativă;
- scăderea simetrică a ambelor alternanțe.

De regulă, variațiile lente ale amplitudinii datorate diferențelor de consum în timp sunt mai puțin perturbante decât variațiile rapide. Cu toate acestea fluctuațiile lente pot deveni perturbante dacă se depășește limita garantată de fabricantul de echipament de calcul pentru amplitudinea tensiunii rețelei.

Căderile bruște de tensiune cu revenire (voltage dips) sunt căderi la zero pentru un anumit interval de timp a tensiunii rețelei, cu o anumită periodicitate. Durata acestor căderi de tensiune este mai mare decât o alternanță. În general aceste defecte se datorează instalațiilor electrice de construcție asimetrică, precum și scurtcircuitelor în rețea. Observațiile practice arată că aceste căderi de tensiune sunt urmate la revenirea tensiunii de creșteri ale tensiunii de durată și valoare mare.

Microdefectele (microîntreruperile) sunt întreruperi ale tensiunii pe intervale mai mici decât o alternanță, fiind datorate în general comutărilor, atât la generarea tensiunii cât și la consumatorii cu mutatoare. Microdefectele și căderile de tensiune pot fi considerate din punctul de vedere al analizei lor ca un caz particular al fluctuației de amplitudine între valoarea nominală și zero.

Distorsiunile armonice sunt cauzate de circuite în comutație cu tiristoare și triaci, și de punți redresoare. Conținutul în armonici depinde de puterea comutată, de unghiul de comandă și de modul simetric sau asimetric de comandă (triac sau tiristor).

Măsurile de protecție împotriva supratensiunilor sunt funcție de valoarea și durata supratensiunii, conform tabelului următor:

Impulsuri transiente (supratensiuni) 0,1- 100 μ s	<i>filtre și limitatoare</i>
Supratensiuni ale tensiunii de rețea sau variații +/- 10% cu durata secunde, minute	<ul style="list-style-type: none"> • <i>sursa neîntreruptibilă cu AVR (Automatic Voltage Regulator)</i> • <i>variatoare cu triac/ tiristor</i>
Supratensiuni ale tensiunii de rețea +/-30%, cu durata de minute, ore	<i>transformatoare cu prize comutate automat</i>
Supratensiuni ale tensiunii de rețea >30% cu durate > ore	<i>Limitatoare cu siguranță și asigurarea energiei de la surse alternative (grup motor generator)</i>

În general măsurile antiperturbative sunt bidirecționale, adică se protejează echipamentul de perturbațiile conduse prin rețea, dar și rețeaua este protejată de eventualele perturbații generate de echipament.

1.3.Elemente de circuit pentru limitarea vârfurilor de tensiune

Eliminarea supratensiunilor se face cu dispozitive de limitare care sunt elemente de circuit neliniare care taie vârfurile de tensiune. Filtrele echipate cu elemente de limitare se numesc și filtre cu absorbție deoarece convertesc energia perturbatoare în energie calorică. Un filtru de rețea obișnuit, fiind reactiv, returnează în rețea energia perturbației.

Varistorul MOV (Metal Oxid Varistor)

Caracteristica tipică a unui varistor (Voltage Dependent Resistor) este dată în figura 2:

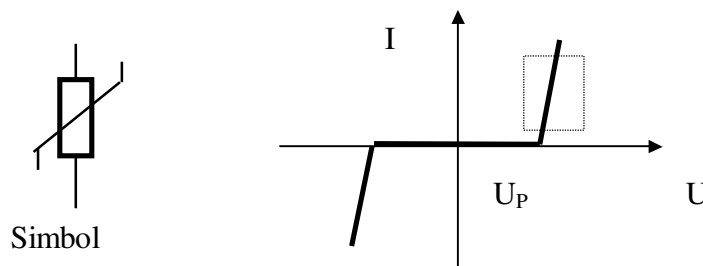


Figura 2: simbolul și caracteristica varistorului

Pe porțiunea de caracteristică marcată cu linie punctată:

$$I = KU^\alpha;$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{K}U^{1-\alpha} \quad (4.6)$$

Varistorul intră în acțiune în timpi de ordinul sute ns, și poate disipa doar cantități mici de energie (20-40J).

Limitatoare cu diode Zener

Două diode Zener înseriate în sensuri contrare intră în conducție la depășirea unei tensiuni de prag, figura 3:

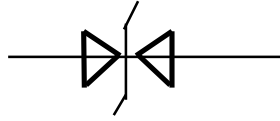


Figura 3: limitator cu diode Zener

General Semiconductor Industries a integrat aceste diode și le-a numit tranzorb (Transient Zener Absorber). Din punct de vedere constructiv tranzorbul este format din două diode de siliciu cu avalanșă, care poate să conducă un curent mare în perioada de străpungere. Tranzorbul este un element foarte rapid, răspunde în ns, dar poate disipa energii foarte mici- 1,5J.

Tub cu descărcare în gaze (eclator)

La deschidere, tensiunea la borne se limitează la 30-V60V (funcționarea este asemănătoare cu a diacului). Caracteristica tipică a eclatorului este dată în figura 4:

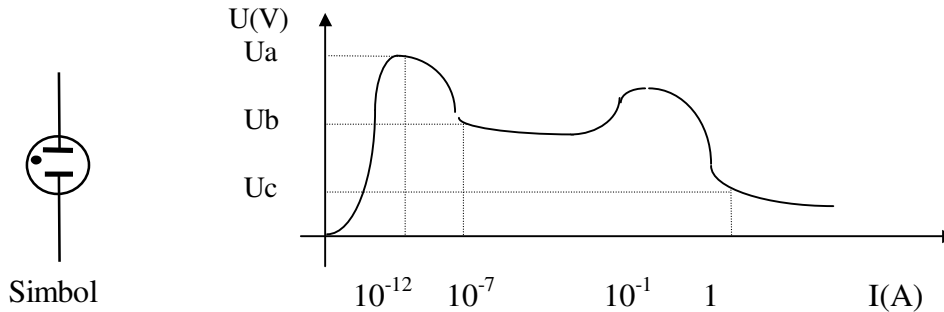


Figura 4: simbolul și caracteristica eclatorului

U_a este tensiunea de aprindere, U_b este tensiunea pe tubul aprins iar U_c tensiunea de apariție a arcului electric. Variația în timp a tensiunii este dată în figura de mai jos cu punerea în evidență a diferenței între tensiunea de aprindere statică și cea dinamică. Graficul tensiune- timp (Voltage Time Curve) din figura de mai jos arată că, la creșterea vitezei frontului este nevoie de o tensiune mai mare de deschidere, sau de un impuls mai larg.

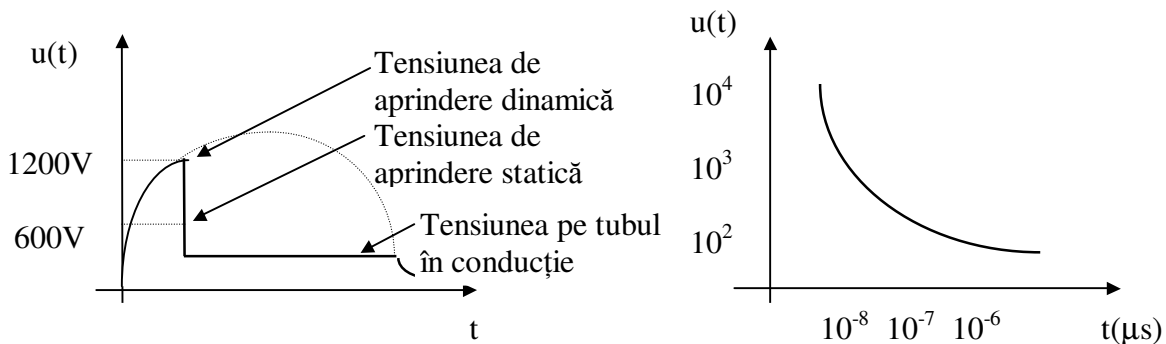


Figura 5: graficul aprinderii tubului și graficul tensiune- timp

Arrestorul răspunde în timpi de ordinul microsecundelor, dar poate disipa energii de ordinul sute de j. La aprindere se creează o depresiune în forma tensiunii. Tubul arrestor este un element de limitare superior din punct de vedere al perturbațiilor retrimise în rețea (retrimite o mică parte din

perturbația aplicată). În stare blocată are o capacitate mai mică de $10\mu\text{F}$ și o rezistență mai mare de $10^{10}\Omega$.

Limitatoare cu mai multe etaje

Un sistem de protecție conține toate aceste elemente de limitare, cu pragurile de declanșare stabilite ca: primul să intre în conducție dioda Zener, fiind cea mai rapidă, apoi varistorul și apoi eclatorul. Fiecare, prin intrarea în acțiune dacă tensiunea continuă să crească, protejează elementul care a declanșat înaintea lui. O astfel de schemă este dată în figura 6:

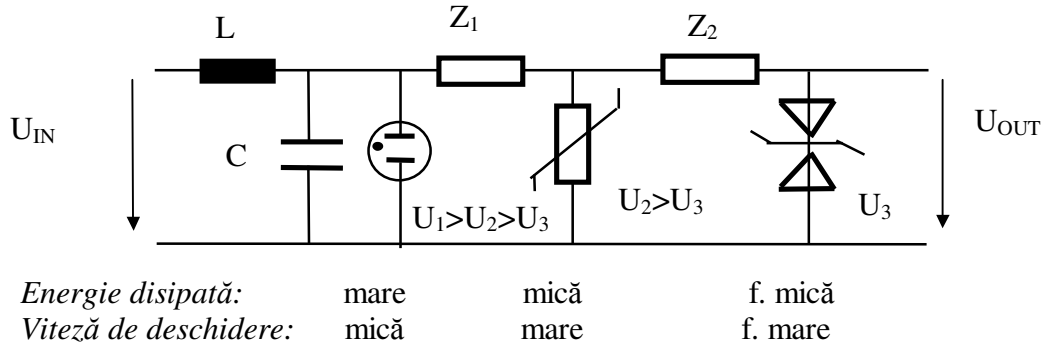


Figura 6: limitator cu 3 multe etaje

Elementele de limitare pot echipa și alte tipuri de filtre, cum ar fi:

- filtru cu limitare pentru antene de recepție;
- element de limitare pentru rețea Ethernet pe cablu coaxial, montat în cuplă BNC;
- element de limitare în cablurile de transfer serial RS232.

2.Simularea în SIMULINK a supratensiunilor de lungă durată și a metodelor de eliminare

Un model SIMULINK al unei supratensiuni de lungă durată este prezentat în figura 7:

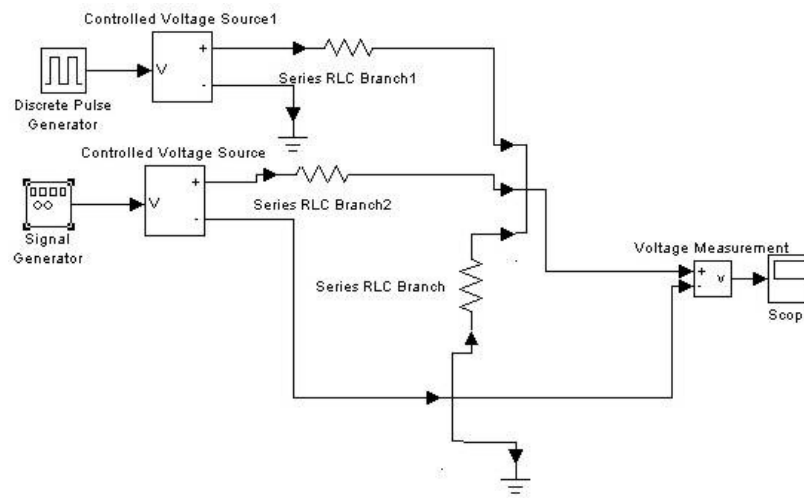


Figura 7: model al unei perturbații de durată mare

Generatorul de semnal generează o tensiune sinusoidală cu amplitudinea de 310V iar generatorul de impulsuri un semnal dreptunghiular cu amplitudinea de 1000V și durata de 100ms.

Tensiunile sunt însumate pe o sarcină comună. Semnalul sinusoidal neperturbat și cel perturbat sunt date în figura :

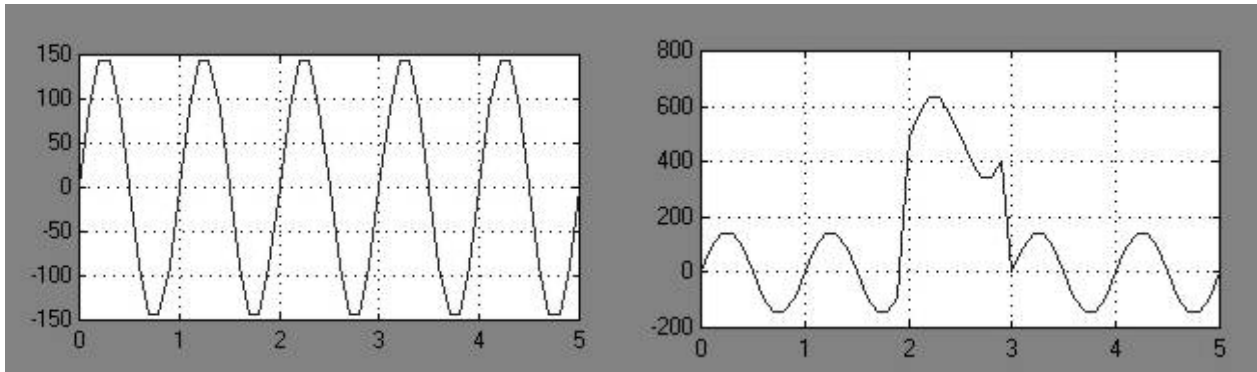


Figura 7: semnal sinusoidal neperturbat (stânga) și perturbat (dreapta)

În prima variantă de eliminare a supratensiunii se folosește un tiristor care intră în conducție la apariția impulsului perturbator fiind comandat de un generator de impulsuri care generează aceeași formă de undă ca și perturbația.

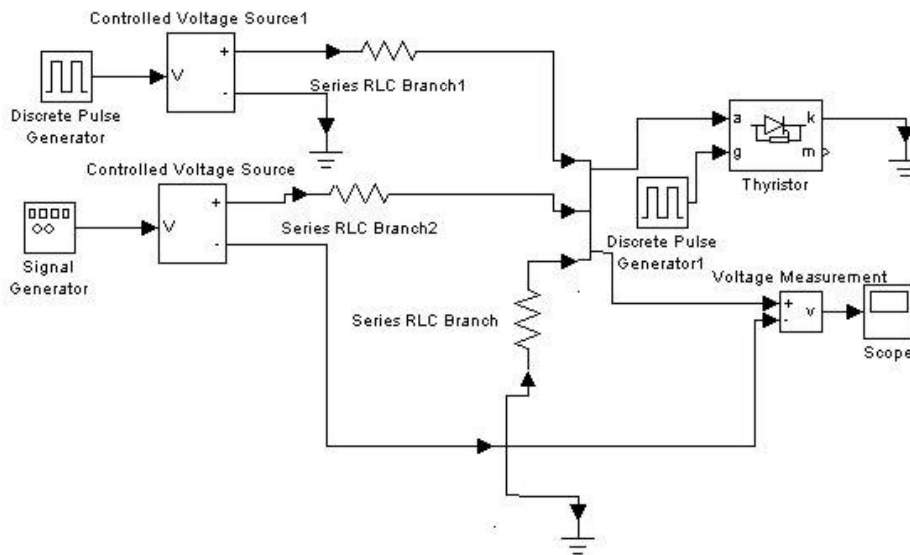


Figura8: eliminarea supratensiunii cu tiristor

Formele de undă obținute sunt date în figura 9, unde este de asemenea prezentat și un detaliu.

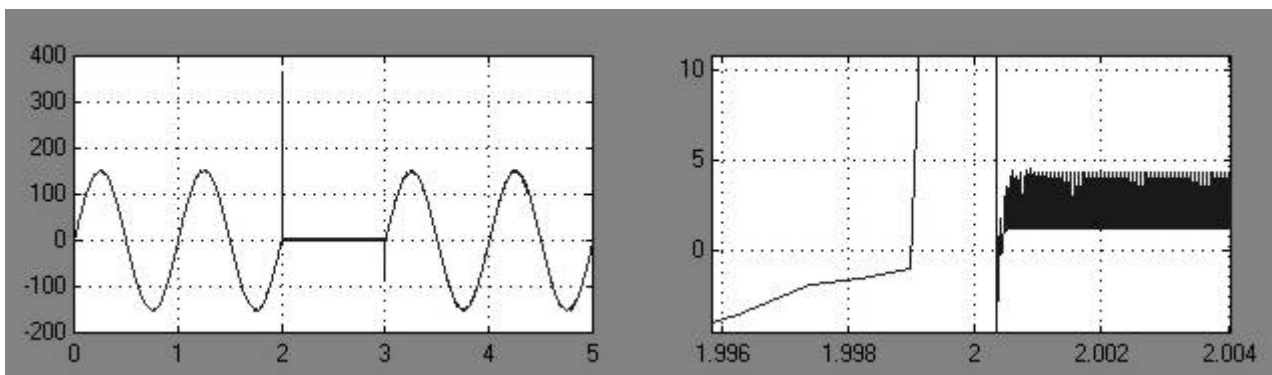


Figura 9: eliminarea supratensiunii cu tiristor și un detaliu la intrarea în conducție a tiristorului

O supratensiune de lungă durată produce distrugerea elementului de limitare prin disipare termică. De aceea protecția la supratensiuni de lungă durată se completează cu siguranțe care decuplează sarcina. Un model SIMULINK de protecție cu tiristor și siguranță care decuplează într-un timp de 10ms este dat în figura următoare:

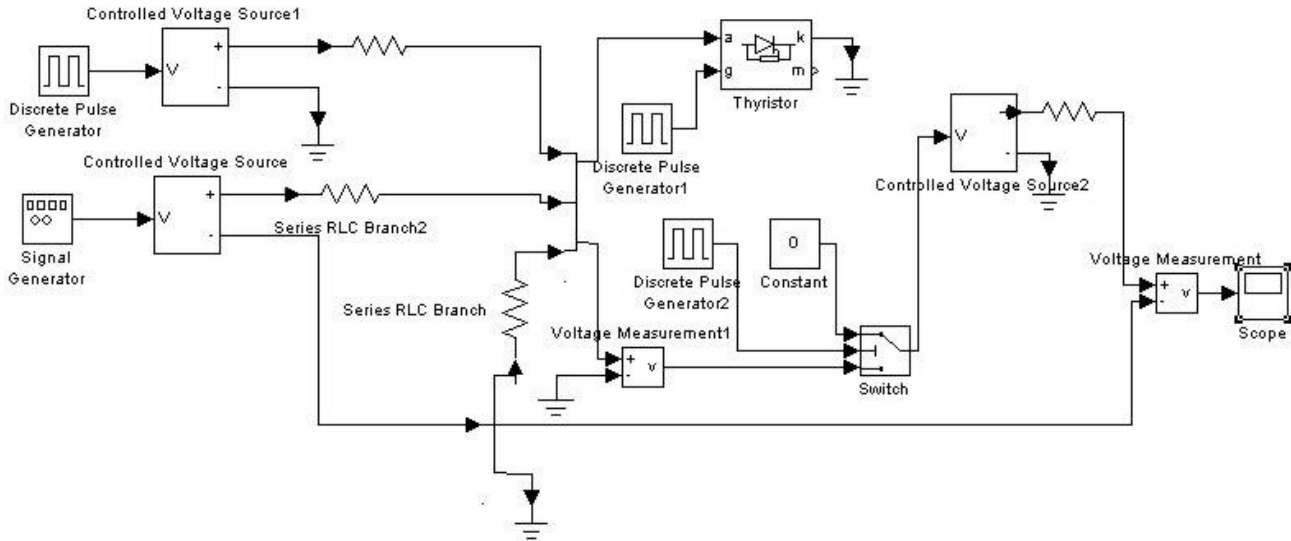


Figura 10: eliminarea supratensiunilor cu tiristor și siguranță

Rezultatele simulării arată că tiristorul elimină supratensiunea iar după decuplarea siguranței tensiunea pe sarcină devine 0. În perioada în care tiristorul conduce tensiunea are mici oscilații în jurul valorii de 0, figura 11(stânga). Cu același model se poate simula și eliminarea perturbațiilor cu un tub cu descărcare în gaze care limitează tensiunea la tensiunea pe tubul în conducție (50V în această simulare), figura 11(dreapta). Acest lucru este posibil modificând parametrii modelului tiristorului. Modelul pentru siguranță a fost realizat pe baza modelului de comutator comandat prin terminalul din mijloc. La o tensiune >0 intrarea de sus este conectată la ieșire iar la o tensiune <0 intrarea de jos este conectată la ieșire.

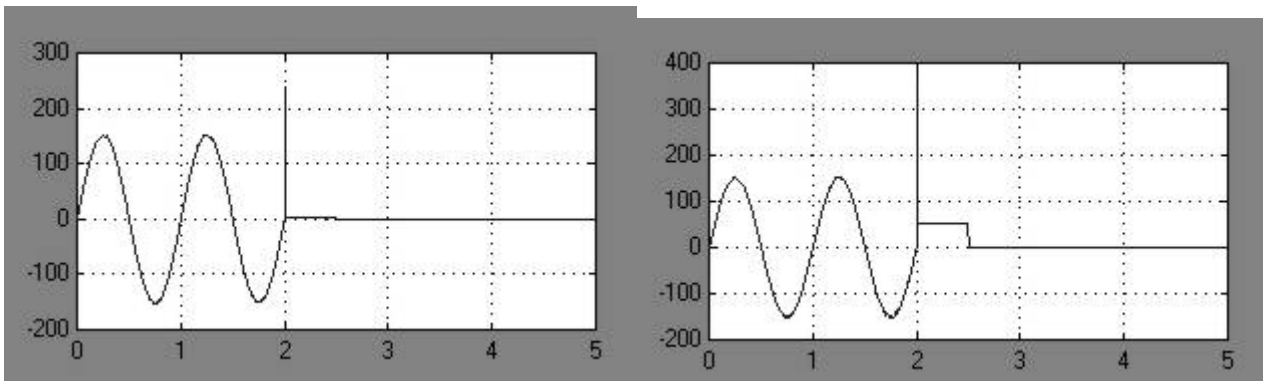


Figura 11: eliminarea supratensiunii cu tiristor și siguranță (stânga) și tub și siguranță (dreapta)

O variantă foarte utilizată de eliminare a supratensiunilor este cu varistor. Un model de eliminare a supratensiunilor cu varistor metal oxid cu tensiunea de prag de 270V este dată în figura 12:

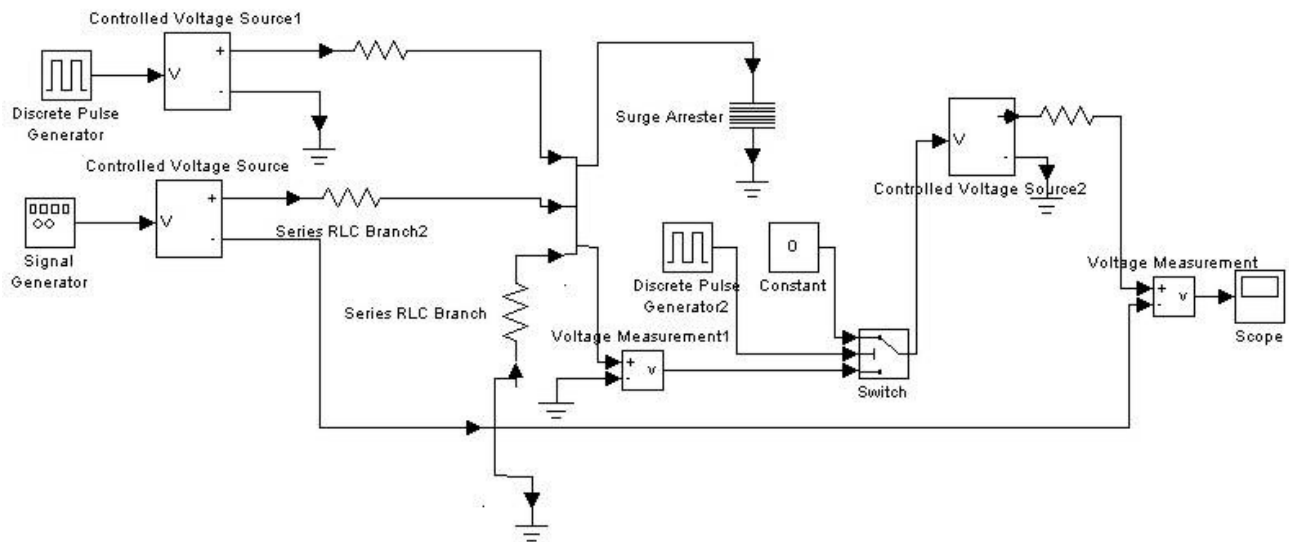


Figura 12: eliminarea supratensiunilor cu varistor și siguranță

Forma tensiunii pe sarcină este dată în figura 13:

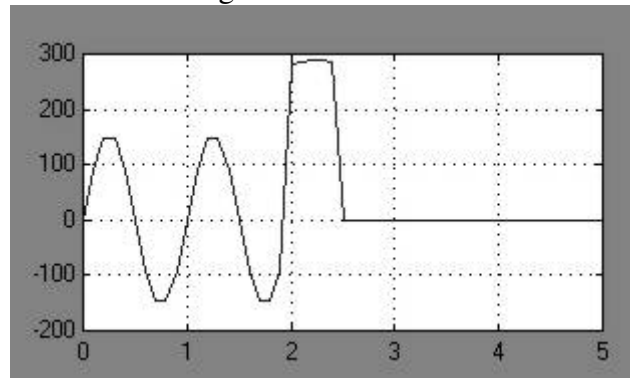


Figura 13: eliminarea supratensiunilor cu varistor și siguranță

3. Distrugerea echipamentelor prin supratensiuni

O supratensiune de lungă durată poate produce distrugerea echipamentului alimentat. Se cunosc foarte multe cazuri în care supratensiunile au dus la distrugerea sistemelor de calcul. Uneori se distruge doar sursa de alimentare, alteleori se distrug și consumatorii alimentați de sursă- placa de bază, hard discul, unitatea optică etc. Nu există o regulă câte subansamble se ard la un asemenea eveniment și aceste situații se tratează probabilistic. Un model SIMULINK care încearcă să facă puțină lumină în aceste cazuri este dat în figura 14:

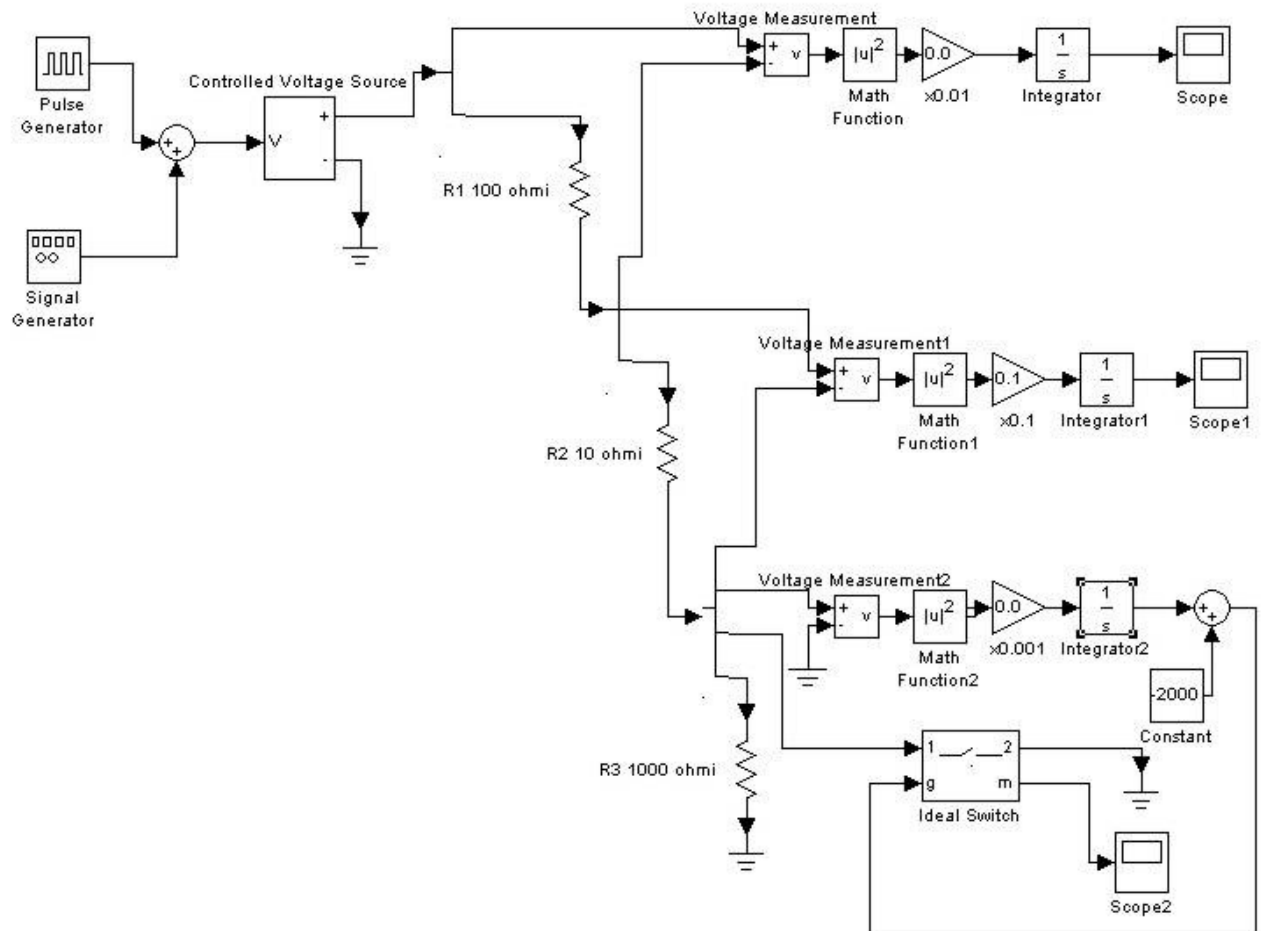


Figura 14: model SIMULINK pentru supratensiuni distructive

Sursa de semnal generează un semnal sinusoidal cu amplitudinea de 300V peste care este suprapusă o supratensiune cu amplitudinea de 1000V care începe la momentul de timp 2 și durează până la 7, figura 15:

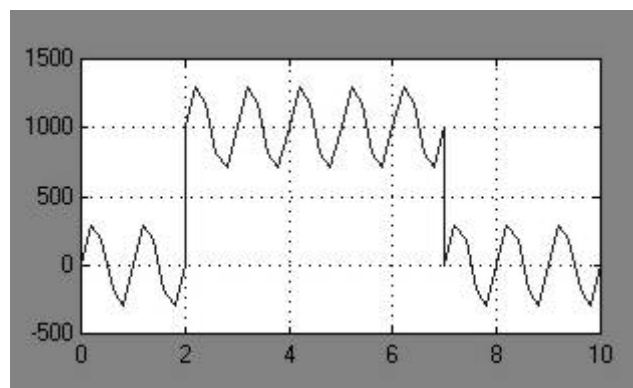


Figura 15: semnal de intrare sinusoidal cu o supratensiune

Sarcina este formată din trei rezistențe în serie cu valorile de 100Ω, 10Ω și 1000Ω. Se calculează pentru fiecare rezistență puterea dezvoltată cu relația U^2/R apoi se reprezintă grafic energia prin integrare. Se obțin rezultatele din figurile 16, 17, 18 :

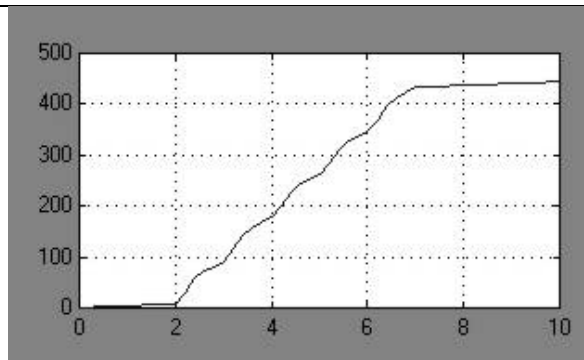


Figura 16: puterea dezvoltată pe R1(100Ω)

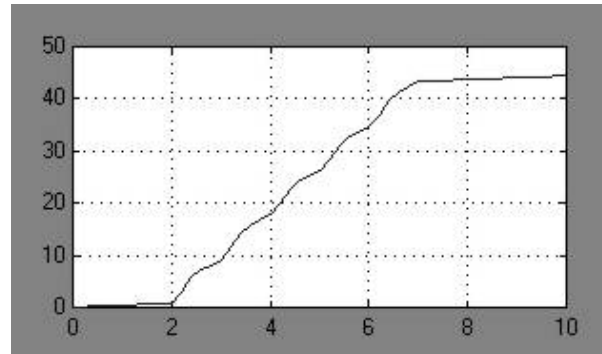


Figura 17: puterea dezvoltată pe R2(10Ω)

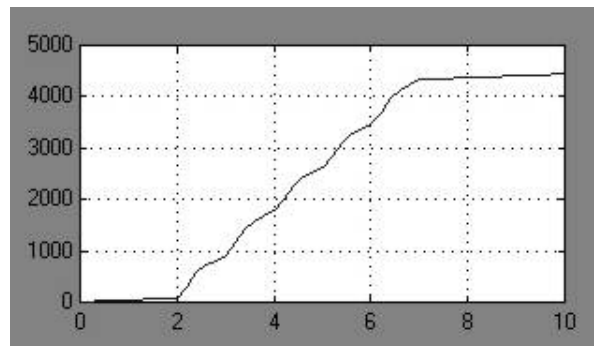


Figura 18: puterea dezvoltată pe R3(1000Ω)

Evident energia cea mai mare este dezvoltată pe rezistența de valoarea cea mai mare și aceasta se va distruge prima. Să presupunem că puterea la care se distruge rezistența este de 2000W. Distrugerea componentelor se poate face prin întrerupere sau scurtcircuitare. Dacă distrugerea se face prin întrerupere restul consumatorilor sunt protejați pentru că nu mai circulă curentul mare datorat supratensiunii. De aceea sistemele de protecție care ard o siguranță la apariția unei supratensiuni sunt preferate. Dacă distrugerea se face prin scurtcircuitare curentul prin restul consumatorilor va crește și mai mult. Detectarea valorii de 2000W și scurtcircuitarea lui R3 (singura rezistență care ajunge la 2000W) se simulează cu un SWITCH ideal comandat de integrator. Forma de undă pe R3 este dată în figura 19:

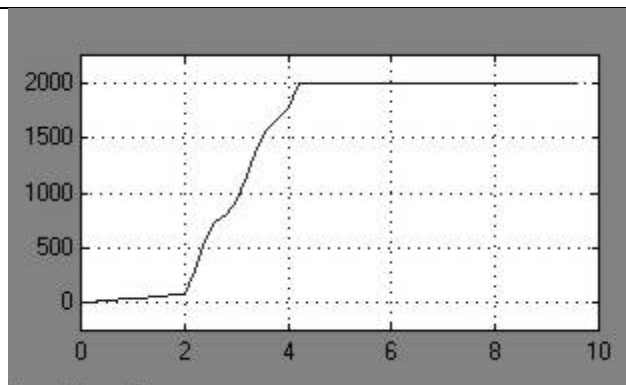


Figura 19: puterea dezvoltată pe R3 (în situația scurtcircuitării)

Se observă că în momentul de timp 4 puterea atinge 2000W, rezistența se scurtcircuitază și energia rămâne constantă. Diagramele de timp pentru R1 și R2 se schimbă astfel:

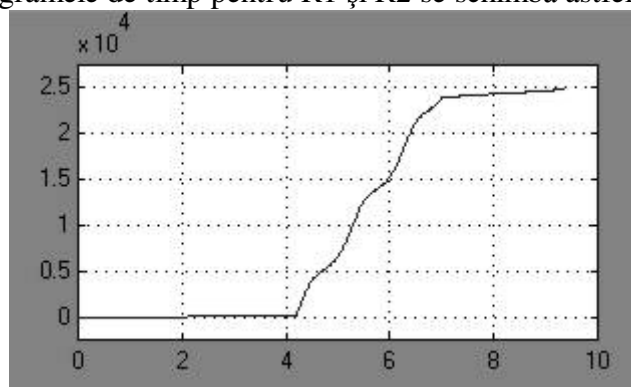


Figura 20: puterea dezvoltată pe R1 (în situația scurtcircuitării lui R3)

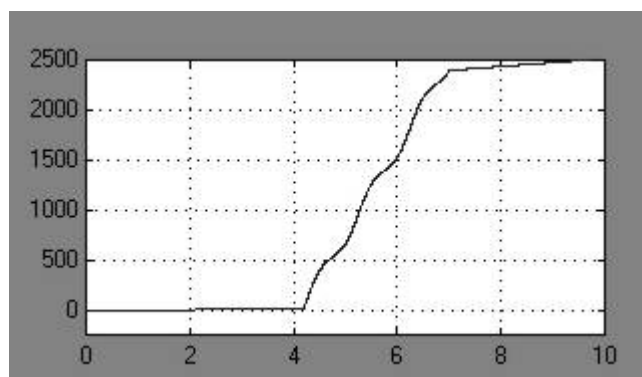


Figura 21: puterea dezvoltată pe R2 (în situația scurtcircuitării lui R3)

Se poate observa o mică creștere a puterii la momentul 2 (apariția supratensiunii) care este greu vizibilă la scara de reprezentare a puterii și creșterea majoră a puterii pe R1 (până la 25000W. Atingerea pragului de distrugere (2000W) se realizează aproximativ la momentul 4,5, ceea ce înseamnă că distrugerea celei de a doua rezistențe se întâmplă mult mai repede (0,5 față de 2 în unități arbitrare de timp). În mod firesc prima dată se va realiza scurtcircuitarea rezistenței R1 care ajunge prima la 2000W, apoi curentul va crește și mai mult și se va scurtcircuita și ultima rezistență. Dacă supratensiunea ar fi durat mai puțin de 2 s-ar fi ars doar rezistența R3. Numărul de consumatori care se ard depinde de amplitudinea și durata supratensiunii. După arderea primului consumator prin scurtcircuitare procesul de ardere se accelerează devenind un proces avalanșă. Dacă consumatorii sunt protejați prin siguranțe și siguranțele se ard într-un timp mai mare decât cel necesar distrugerii consumatorului atunci siguranțele nu sunt utile.

4. Dispozitive comerciale pentru eliminarea supratensiunilor

Se definesc 5 clase de dispozitive de protecție împotriva supratensiunilor:

Clasa A- destinate montării în rețele electrice

Clasa B- destinate montării în tablourile principale de distribuție ale clădirilor

Clasa C- destinate montării în tablourile secundare ale clădirilor

Clasa D- destinate protecției exterioare a receptoarelor electrice și care se montează imediat în amonte sau la punctul de racordare la circuitul electric de racordare

Clasa E- destinate protecției interioare a aparatelor electrice

Un sistem de protecție de la DEHN-SOHNE este prezentat în figura 22:

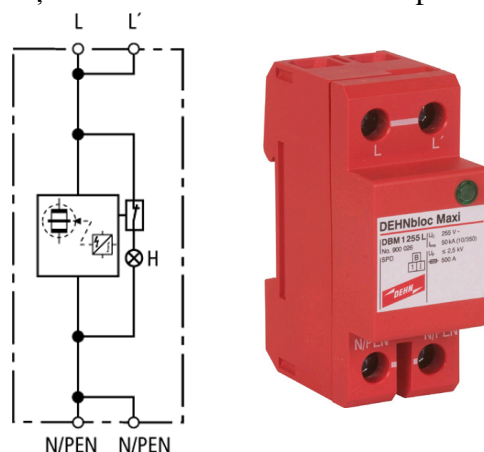


Figura 22: schema electrică și dispozitivul de protecție DEHNBloc Maxi

Dispozitivul se încadrează în clasa A de protecție pentru rețele de 220V (EN 61643-1), tensiunea maximă nominală fiind de 255V. Dispozitivele sunt construite cu varistoare zinc-oxid și tuburi cu descărcare în gaze. Curentul de descărcare poate fi de maximum 50kA (impulsuri mai scurte de 20 μ s) iar supratensiunea maximă 2,5kV, timpul de răspuns fiind mai mic de 100ns. Dispozitivul este completat cu o siguranță (timp de acțiune 0,2s dependent de valoarea curentului) și cu un indicator LED al funcționării. O familie de astfel de dispozitive sunt echipate cu o interfață pentru fibră optică pentru transmiterea la distanță a stării de funcționare. Există dispozitive pentru alimentare monofazată și trifazată și dispozitive cu conectare între conductorul de nul și împământare pentru protecție suplimentară.

Un sistem complet de dispozitive de protecție (clasa B) este dat în figura 23:

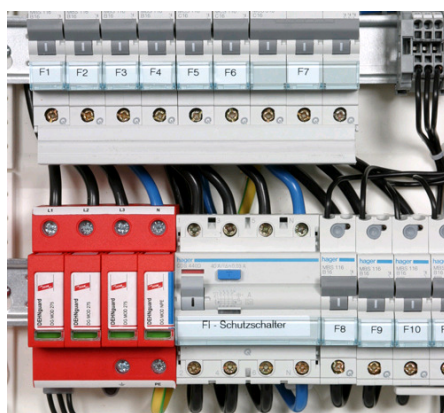


Figura 23: tablou electric cu siguranțe și protecție la supratensiuni și supracurent

Dispozitivele care echează acest modul au performanțe electrice asemănătoare cu cele prezentate anterior. Sistemul este completat cu un sistem de protecție termică și semnalizare la distanță.

Un dispozitiv de protecție pentru medie tensiune este dat în figura 24:

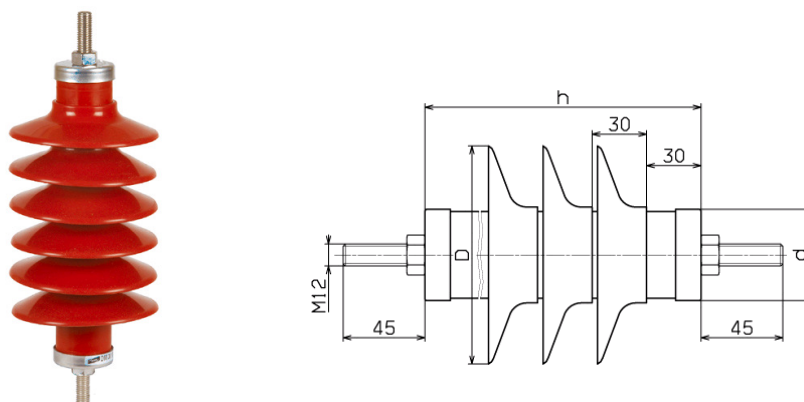


Figura 24: dispozitiv de protecție de medie tensiune

Dispozitivele de medie tensiune pot absorbi curenți de maximum 100kA (10 μ s) și 250A (2ms) la o tensiune nominală de 12kV și supratensiuni de maximum 16kV (1s).

Dispozitivele în clasă D sunt cele mai larg răspândite pentru că sunt ușor de utilizat și ieftine. Gama constructivă a acestor dispozitive este foarte largă, de la cele mai simple până la dispozitive care dispun suplimentar și de sisteme de protecție pentru liniile de semnal.

Un dispozitiv complex de la Tripp Lite sub forma unui prelungitor de alimentare este dat în figura 25:



Figura 25: prelungitor de alimentare cu protecție

Dispozitivul este echipat cu 10 prize pentru alimentare (există modele cu prize standard USA, Anglia sau Europa) care permit absorbția supratensiunilor cu energii de până la 3345j. Dispozitivul permite eliminarea supratensiunilor de pe 3 linii coaxiale pentru protecția sistemelor audio Home Theater sau a recepției de la satelit. Pentru protecția acestor linii dispozitivul este echipat cu 6 cuple BNC aurite. Poate fi protejată și o linie de date Ethernet sau telefon. Două LED-uri avertizează despre existența/ absența protecției la supratensiuni și despre existența/ absența împământării. Suplimentar față de funcția de protecție la supratensiuni se asigură și o filtrare a zgomotului (aproximativ 40dB).

Cel mai simplu dispozitiv de la tripp Lite pentru protecția unui singur consumator este dat în figura 26:



Figura 26: dispozitiv de protecție pentru un singur consumator

La un preț de 20 de ori mai mic decât dispozitivul precedent, acesta poate elimina supratensiuni cu energia de maximum 750j atât între fază și nul cât și între fază și împământare respectiv nul și împământare. Tensiunea nominală este de 120V și se elimină vârfuri mai mari de 150V. Timpul de intrare în funcțiune este mai mic de 1ns. Un LED indică prezența protecției.

Pentru proiectanții de aparate și plachete electronice este important să includă în echipament sisteme de protecție la supratensiuni (clasa E de protecție). Există multe tipuri de componente pot fi folosite în acest scop dintre care cele mai folosite sunt varistoarele și tuburile cu descărcare în gaze. Un tub cu descărcare în gaze cu doi electrozi de la Sankosha este prezentat în figura 27:

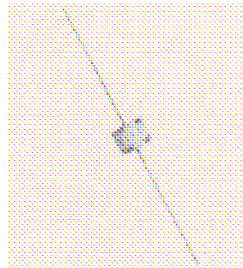


Figura 27: tub cu descărcare în gaze cu 2 electrozi Sankosha

Tubul intră în conducție la tensiuni între 290V-430V (în c.c.) și la impulsuri de peste 700V. Curentul maxim absorbit poate fi de 20kA pentru o alternanță, 15kA pentru 10 alternanțe și 20A pentru 1s. Tensiunea pe tubul în conducție se limitează la 52V.

Modelele cu 3 electrozi se pot conecta între cele două linii ale rețelei și împământare și au performanțe asemănătoare: tensiunea de amorsare 90V, 145V, 200V, 230V, 250V, 300V (+/-20%) curentul maxim absorbit poate fi de 2x10kA pentru o alternanță, 2x5kA pentru 10 alternanțe și 2x5A pentru 1s.

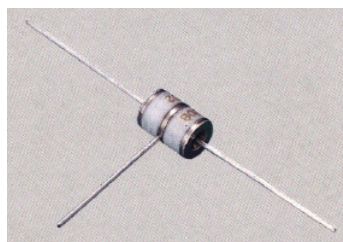


Figura28: tub cu descărcare în gaze cu 3 electrozi Sankosha

Varistoarele sunt folosite pe scară largă pentru protecția surselor de alimentare pentru aparatura electrică, prețul lor fiind mai mic decât al tuburilor cu descărcare în gaze. Câteva varistoare sunt reprezentate în figura 29:



Figura 29: varistoare

Tensiunea de intrare în conducție este de la 18V la 1100V în funcție de tip. Energia absorbită este în gama 0,4j-480j iar curentul absorbit 100A-15kA. Timpul de răspuns este mai mic de 25ns. Majoritatea varistoarelor sunt construite din oxid de zinc.

În lipsa unor componente specializate se pot folosi scheme electronice de protecție la supratensiuni, figura 30:

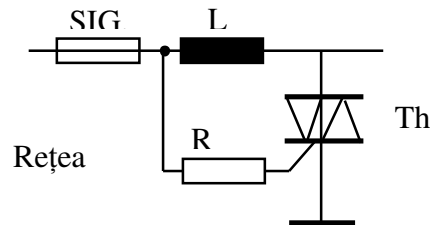


Figura 30: circuit de protecție la supratensiuni

La depășirea unei tensiuni de prag tiristorul Th intră în conducție și scurtcircuitază tensiunea de intrare producând arderea siguranței și prin urmare decuplarea consumatorului protejat de circuit. Inductivitatea L are rolul de a elimina efectul de intrare în conducție a tiristorului datorită vitezei de variație a tensiunii anodice.

Bibliografie

1. www.altelicon.com dispozitive de protecție la supratensiuni
2. www.hyperlinktech.com dispozitive de protecție la supratensiuni
3. www.dehn.de dispozitive de protecție la supratensiuni
4. www.tripplite.com dispozitive de protecție la supratensiuni
5. F.D. Martzloff, Line conducted disturbances- origins and control, in "Power and Grounding for a computer Facility", National Bureau of Standards, 1994
6. C. Stoian, T. Mircea, Soluții privind protecția la supratensiuni atmosferice și de comutație, Simpozionul interdisciplinar de Compatibilitate Electromagnetică, Băile Herculane, 2004

