

**Lucrare de laborator la
COMPATIBILITATE ELECTROMAGNETICA**

Avansati

**Lucrarea 2
Supratensiuni pe liniile de transmisii de date. Analiză și
simulare în SPICE și SIMULINK.**

Cuprins:

- 1.Suport teoretic**
- 2.Simularea în SPICE a supratensiunilor pe liniile de transmisie și măsuri de eliminare**
- 3.Simularea în SIMULINK a supratensiunilor pe liniile de transmisie și măsuri de eliminare**
- 4.Dispozitive comerciale pentru reducerea supratensiunilor**

Supratensiuni pe liniile de transmisii de date

1. Suport teoretic

Supratensiunile pe liniile de transmisie pot apărea datorită unor cauze interne cum ar fi de exemplu reflexiile sau externe prin cuplaje electromagnetice.

Reflexiile se analizează detaliat în capitolul dedicat microundelor. Dacă impedanța de sarcină nu este egală cu impedanța caracteristică a liniei de transmisie pot apărea reflexii care în anumite situații duc la supracreșteri ale tensiunii pe linia de transmisie. Alte cauze interne pot fi de exemplu defecte ale porților de ieșire pe linie sau tensiunea de mod comun care se adaugă potențialului liniei. Unele dintre aceste situații vor fi simulate în Spice și Simulink.

Supratensiunile pot apărea datorită cuplajelor care pot fi capacitive, inductive, galvanice și prin radiație.

- **galvanic**, suportul este un material conductor,
- **inductiv**, dacă circuitul perturbator este parcurs de un curent mare care crează un câmp magnetic important. Cuplajul se face prin fluxul magnetic care înconjoară circuitul perturbat. Se definește o inductanță mutuală între sursă și victimă, care caracterizează cuplajul;
- **capacitiv**, dacă circuitul perturbator se află la un potențial ridicat în raport cu o referință (pământul) ceea ce crează un câmp electric între sursă și victimă. Cuplajul este caracterizat prin capacitatea echivalentă.
- prin **radiații**, dacă circuitul perturbator și perturbat sunt destul de îndepărtate pentru ca inductanța mutuală și capacitatea echivalentă să fie foarte mici.

Dacă distanța între sursă și victimă $d < \lambda$ unde λ este lungimea de undă a fenomenului perturbator, atunci se consideră fenomene de joasă frecvență. Dacă $d > \lambda$ fenomenele sunt de înaltă frecvență și trebuie ținut cont de fenomenele de propagare.

Cuplarea capacitivă, ca și cea inductivă este proprie situației în care perturbatorul este cuplat față de perturbat la distanțe mai mici decât lungimea de undă λ a perturbației. În general, în interiorul aparaturii electrice, distanțele sunt mai mici decât lungimea de undă, și efectul perturbator este determinat de capacități și inductivități parazite și nu prin radiație electromagnetică.

Influențele între circuitul perturbat și perturbator sunt arătate în figura 1:

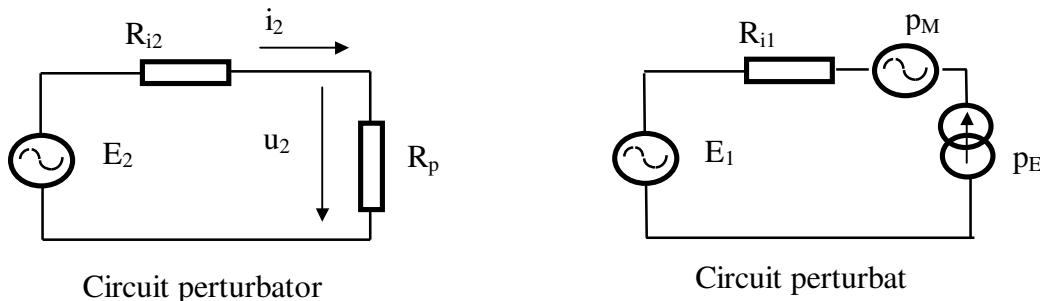


Figura 1: cuplaje capacitive și inductive între 2 circuite

E_1, E_2 sunt tensiunile utile proprii, sursele având rezistențele interne R_{i1} și respectiv R_{i2} .

$$p_M(t) = -M_{12} \partial i_2(t) / \partial t$$

p_M este tensiunea perturbatoare prin cuplaj inductiv, M_{12} fiind inductivitatea mutuală dintre cele două circuite.

$$p_E(t) = C_{12} \partial u_2(t) / \partial t$$

p_E este curentul perturbativ prin cuplaj capacitiv, C_{12} fiind capacitatea între cele două circuite.

$$i_2 = E_2 / (R_{i2} + R_p)$$

iar pentru $R_p \gg R_{i2}$

$$p = p_M(t) + p_E(t) \cdot R_{i1} = (-M_{12} / (R_p + R_{i1}) \cdot C_{12}) \partial E_2(t) / \partial t \quad (1)$$

p fiind perturbația totală

Cuplarea parazită capacitivă

Circuitul perturbator (1) are un potențial ridicat față de circuitul perturbat (2), figura 2:

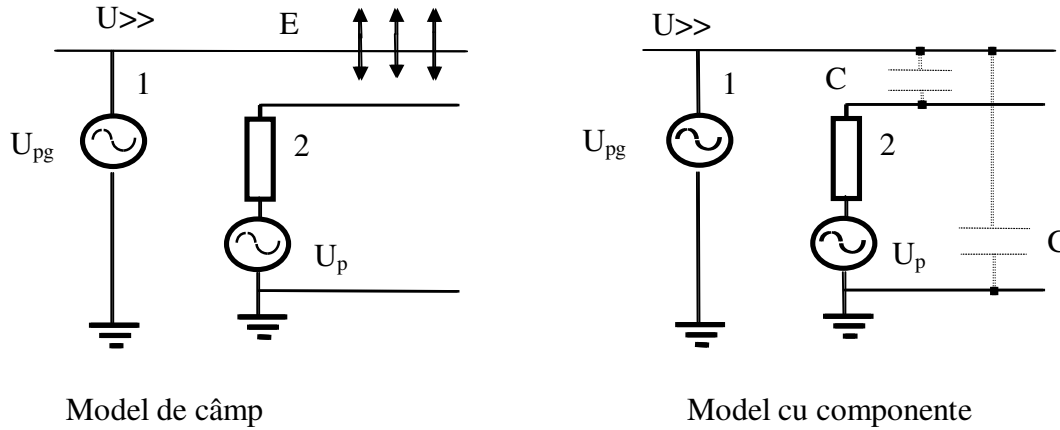


Figura 2: cuplaj capacitiv

Dacă receptorul de perturbații (în cazul simplificat) posedă o impedanță de intrare rezistivă tensiunea la perturbat prin cuplaj capacitiv este (relația 1, perturbația capacitivă în regim sinusoidal):

$$\underline{U}_p = R C j\omega \underline{U}_{pg}$$

Cuplarea parazită inductivă

Circuitul perturbator (1) este parcurs de un curent mare care creează un câmp magnetic important, figura 3:

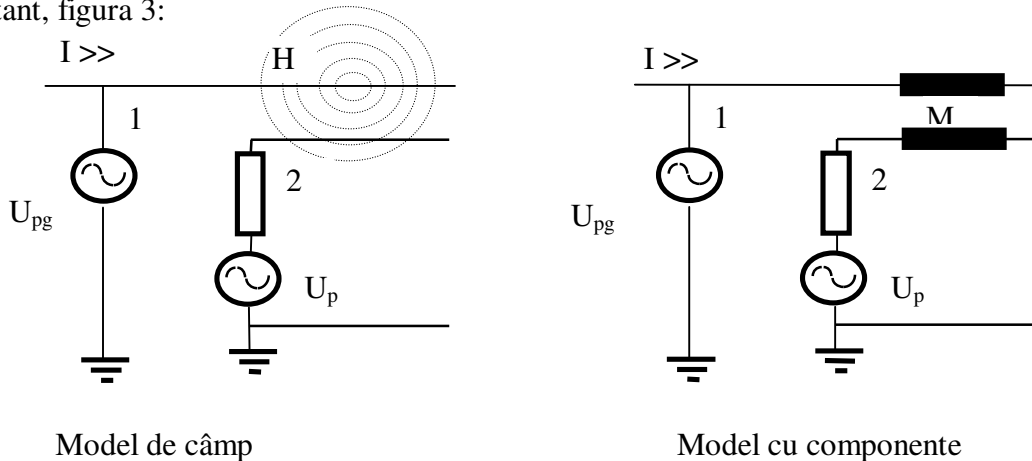


Figura 3: cuplaj inductiv

Din relația 1, perturbația inductivă în regim sinusoidal rezultă:

$$\underline{U}_p = -M j\omega \underline{I}$$

ceea ce arată dependența tensiunii în circuitul perturbat de curentul din circuitul perturbator.

Rezultă măsurile pentru minimizarea tensiunii perturbative:

1.-prin reducerea spectrului perturbant (atenuarea fronturilor rapide), această cerință este contradictorie cu necesitatea fronturilor rapide pentru reducerea puterii disipate pe elementele de comutație;

2.-prin reducerea rezistenței de intrare a receptorului în limita acceptată de schemă sau prin reducerea impedanței de intrare selectiv cu frecvența;

3.-reducerea influenței perturbatorului, micșorarea tensiunii perturbatoare prin separarea traseelor și alte metode geometrice: scurtare, distanțare, perpendicularizare, simetrizare, radializare;

4.-micșorarea inductivității mutuale prin metode geometrice ca distanțare, separare, perpendicularizare, simetrizare. Tot în cadrul metodelor geometrice se pune condiția ca circuitul perturbat să închidă o suprafață cât mai redusă.

5.-micșorarea capacității parazite de cuplare, reducerea suprafeței, distanțare, ecranare, gardare.

Influențele parazite datorate cuplării sunt puternic rejectate prin recepția diferențială (analogică sau digitală) a semnalelor. Este necesar ca influențele parazite să penetreze în mod identic în ambele trasee ale transmisiei diferențiale, deci ambelor trasee trebuie să li se creeze condiții electrice și constructive similare față de perturbatorii învecinați.

Cuplarea parazită galvanică

Cuplaje galvanice pot apare în următoarele moduri:

- 1.-prin rețeaua de alimentare de 220Vc.a.,
- 2.-la subansamblele cuplate prin legături de semnal ;
- 3.-prin împământare.

La două circuite având aceeași masă, sau la două circuite utilizând o impedanță comună Z curenții unui circuit pot influența curenții celui alt circuit. Între cele două circuite apare un cuplaj galvanic.

Cuplaje prin radiații electromagnetice

Acest tip de cuplaj este caracteristic situației în care circuitul perturbat este față de circuitul perturbator la o distanță mai mare decât lungimea de undă a perturbației, figura 2.8:

Atenuarea acestor perturbații se realizează cu ecrane. Atenuarea prin absorbție depinde de grosimea materialului ecranului, de frecvența perturbatoare și de natura materialului. Atenuarea prin reflexie depinde printre altele de unghiul de incidență la ecran. Cablurile cu ecrane concentrice, producând multe reflexii, sunt foarte eficiente la eliminarea acestui tip de cuplaj. Dificultăți mari sunt la frecvențe joase unde atenuările prin reflexie și absorbție sunt mici.

2.Simularea în SPICE a supratensiunilor pe liniile de transmisie și măsuri de eliminare

Deseori pot apare supratensiuni pe liniile de transmisie RS232 sau Ethernet care duc de regulă la pierderi de date dar uneori și la distrugeri de circuite. În primul rând se defectează circuitele driver dar uneori se poate defecta chiar interfața serială.

Principalele cauze care produc apariția supratensiunilor sunt:

- Descărcările electrostatice și atmosferice.
- Linie de masă de calitate necorespunzătoare.
- Neadaptarea de impedanțe.

Pentru verificarea eficienței măsurilor antiperturbative se simulează supratensiuni provenite din neadaptarea de impedanțe. Simularea s-a făcut în SPICE cu o sursă de semnal dreptunghiular de frecvență unui semnal RS232 la viteza cea mai mare (115kBd). Schema electrică pentru realizarea simulării în SPICE este dată în figura 4:

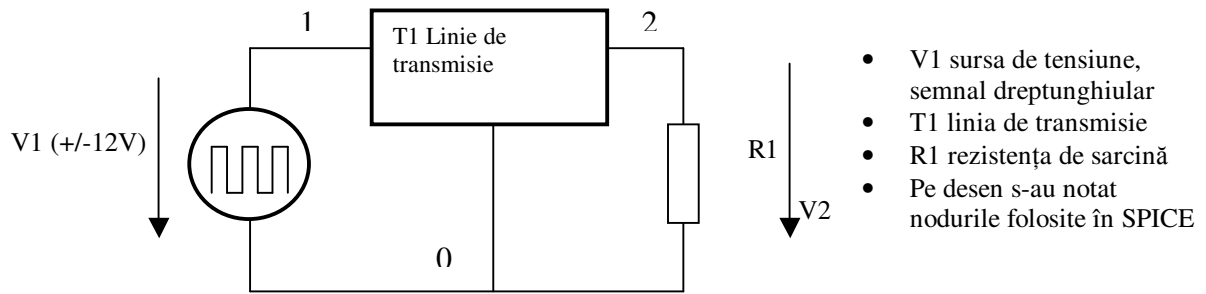


Figura 4: schema electrică a unei transmisii pentru modelare în SPICE

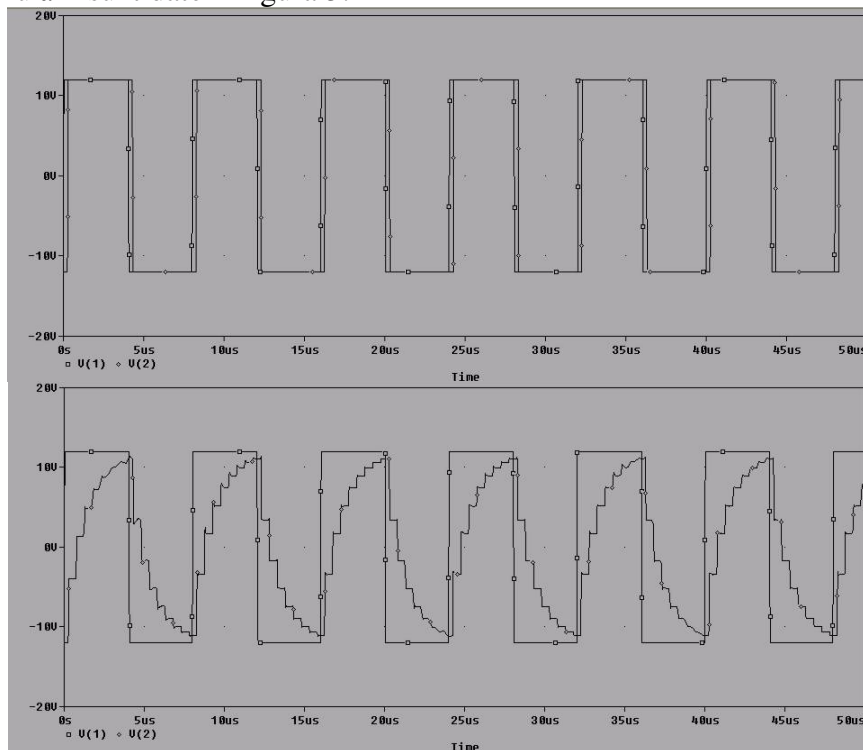
Programul în SPICE:

```
*TEST1
V1 1 0 AC 1 PULSE -12V 12V 0 0 0 4u 8u
R1 2 0 600ohm
T1 1 0 2 0 ZO=50 NL=0.025 F=100KHZ
.PROBE
.tran 40n 50.000u 0 0 ; *ipsp*
.END
```

Parametrii modelului sursei de semnal dreptunghiular sunt: valoarea inițială (-12V), valoarea în starea opusă (12V), timpul de întârziere (0), timpul de creștere (0), timpul de scădere (0), durata nivelului 1 (0,4 μ s), perioada (0,8 μ s). Semnalul de intrare are factor de umplere 0,5.

Pentru linia de transmisie se folosește un model al liniei fără pierderi. Lungimea liniei poate fi exprimată în două moduri, prin specificarea întârzierii pe linie sau prin frecvența transmisă (F) împreună cu lungimea normalizată a liniei cu lungimea de undă (NL). Principalul parametru al liniei de transmisie este impedanța caracteristică Z0.

Rezultatele simulării sunt date în figura 5:



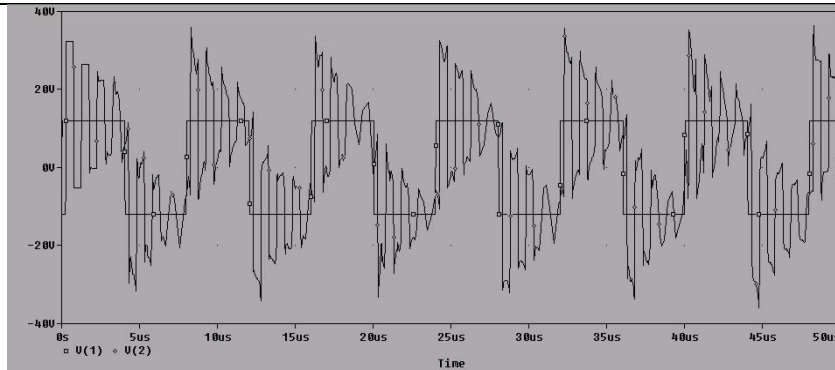


Figura 5: rezultatele simulării transmisiei unui semnal dreptunghiular printr-o linie de transmisie

Prima figură reprezintă rezultatele simulării pentru o transmisie adaptată, adică cu impedanța de sarcină egală cu impedanța caracteristică a liniei (50Ω). Se observă că forma semnalului de ieșire este la fel cu cea a semnalului de intrare și linia de transmisie nu distorsionează semnalul. Semnalul de intrare este marcat cu mici dreptunghiuri goale iar semnalul de ieșire cu mici dreptunghiuri pline. În a doua figură impedanța de ieșire este mai mică decât impedanța caracteristică a liniei și semnalul de ieșire prezintă fronturi curbate, ceea ce poate conduce la recepții eronate ale informației recepționate. În al treia figură impedanța de ieșire este mai mare decât impedanța caracteristică și apar supratensiuni de amplitudini destul de mari (peste $30V$ la un semnal emis cu $12V$) care pot produce distrugerea receptoarelor. Prin urmare, din punct de vedere practic al treilea caz este cel mai periculos și trebuie realizate măsuri de protecție a receptorului.

Cea mai eficientă metodă de eliminare a supratensiunilor este conectarea a 2 diode, una spre $+12V$ și una spre $-12V$. Schema de conectare este dată în figura 6:

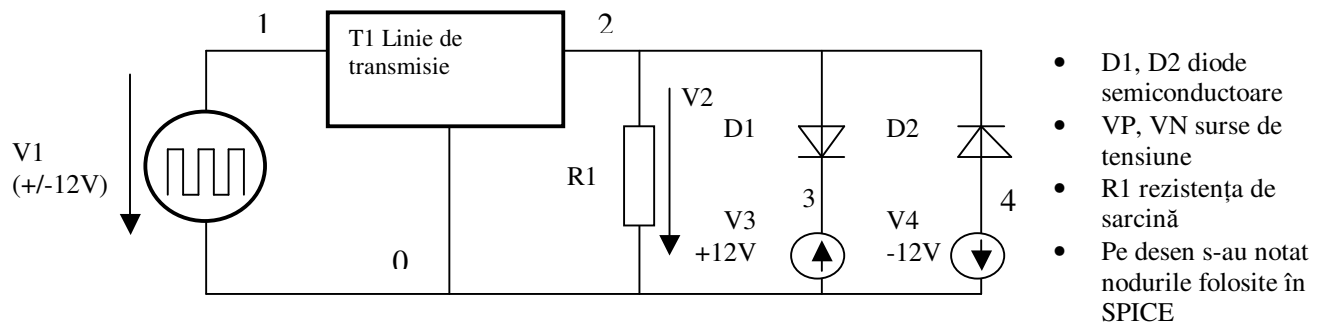


Figura 6: protecția la supratensiuni cu 2 diode

Programul SPICE este:

```
*TEST2*
V1 1 0 AC 1 PULSE -12V 12V 0 0 0 4u 8u
R1 2 0 300ohm
T1 1 0 2 0 Z0=50 NL=0.025 F=100KHZ
D1 2 3 D1
V3 3 0 DC 12V
D2 4 2 D2
V4 4 0 DC -12V
.MODEL D1 D
.MODEL D2 D
.PROBE
.tran 40n 50.000u 0 0 ;*ipsp*
.END
```

Analiza tranzitorie se realizează pe un interval de timp de $50\mu\text{s}$ iar pasul de calcul este 40ns . Se poate alege un pas mai fin dar timpul de calcul crește, diagramele având aceeași formă.

În figura 7 este arătat rezultatul simulării care demonstrează dispariția totală a supratensiunilor și confirmă eficiența acestei metode. Pentru ca această variantă de eliminare a supratensiunilor să fie posibilă trebuie ca liniile de $\pm 12\text{V}$ să fie accesibile, ca la varianta de transmisie cu circuitele Motorola 1488 și 1489. La circuitele mai noi, cum ar fi MAX232 liniile de $\pm 12\text{V}$ nu sunt accesibile și nu se pot conecta diode spre liniile de alimentare.

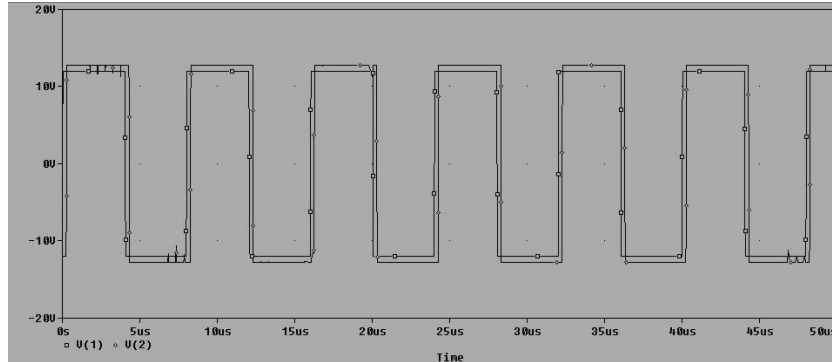


Figura 7: rezultatele simulării în cazul conectării a 2 diode spre liniile de alimentare

O altă variantă este conectarea a două diode Zener în serie, pentru ca la depășirea tensiunii de prag să se deschidă una dintre diode, cealaltă fiind în zona de conducție directă. Diodele sunt conectate între linia de semnal și masă ceea ce elimină necesitatea ca liniile de alimentare să fie accesibile. Schema electrică este dată în figura 8:

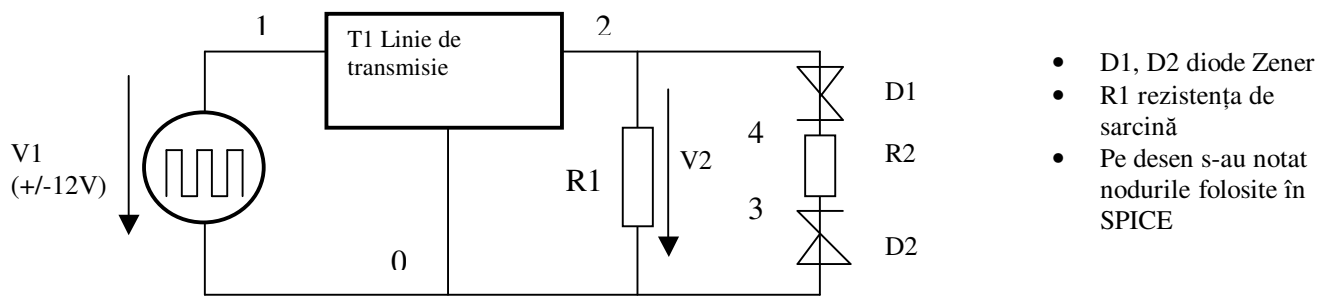


Figura 8: schema electrică pentru protecția cu două diode Zener

Programul SPICE este:

```
*TEST3
V1 1 0 AC 1 PULSE -12V 12V 0 0 0 4u 8u
R1 2 0 300ohm
T1 1 0 2 0 Z0=50 NL=0.025 F=100KHZ
D1 2 4 D1N967A
R2 4 3 20ohm
D2 0 3 D1N967A
.model D1N967A D(Is=7.021f Rs=5.619 Ikf=0 N=1 Xti=3 Eg=1.11 Cjo=60p M=.4093
+ Vj=.75 Fc=.5 Isr=1.461n Nr=2 Bv=18 Ibv=23.333m Nbv=1.2074
+ Ibvl=215.7u Nbv1=.71348 Tbv1=888.9u)
* Motorola pid=1N967A case=DO-35
* 89-9-18 gjg
* Vz = 18 @ 7mA, Zz = 37 @ 1mA, Zz = 11 @ 5mA, Zz = 7.9 @ 20mA
.PROBE
.tran 40n 50.000u 0 0 ;*ipsp*
.END
```

Pentru dioda Zener s-a definit un model nou. Diagrama de semnal în acest caz este dată în figura 9:

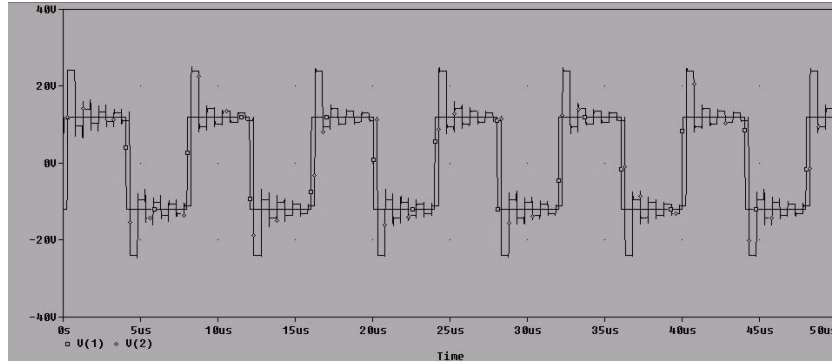


Figura 9: rezultatele simulării în cazul conectării a 2 diode Zener între linia de semnal și masă

Se observă reducerea vârfurilor de tensiune până la valori sub 30V dar și faptul că supratensiunile nu au fost eliminate. De asemenea, diodele Zener nu pot disipa energii de valori mari, așa încât este posibil ca în cazul descărcărilor electrice atmosferice protecția să nu fie eficientă.

Toate elementele antiperturbative care intră în funcțiune la depășirea unei tensiuni de prag sunt eficiente atunci când există o masă comună de bună calitate între echipamentele cuplate prin RS232 sau Ethernet. De multe ori însă sistemele nu sunt cuplate la împământare și între carcusele lor și implicit între masele lor apar tensiuni de ordinul zeci de V care dau naștere unui curent important prin linia de masă. Linia de masă între 2 echipamente cuplate este subțire și căderea de tensiune pe linie poate fi mare. Acest lucru a fost rezolvat în cazul transmisiei prin rețea Ethernet prin decuplare galvanică. La legătura RS232 circuitele de interfață pot fi distruse fără ca dispozitivele de protecție să intre în funcțiune din cauza acestor diferențe de potențial. Un sistem de protecție format din optocuploare și elemente de limitare a vârfurilor de tensiune este extrem de eficace.

3.Simularea în SIMULINK a supratensiunilor pe liniile de transmisie și măsuri de eliminare

Un impuls de tensiune suprapus peste un semnal dreptunghiular care poate proveni de exemplu de la o descărcare electrostatică se poate simula în SIMULINK cu următoarea schemă, figura 10.

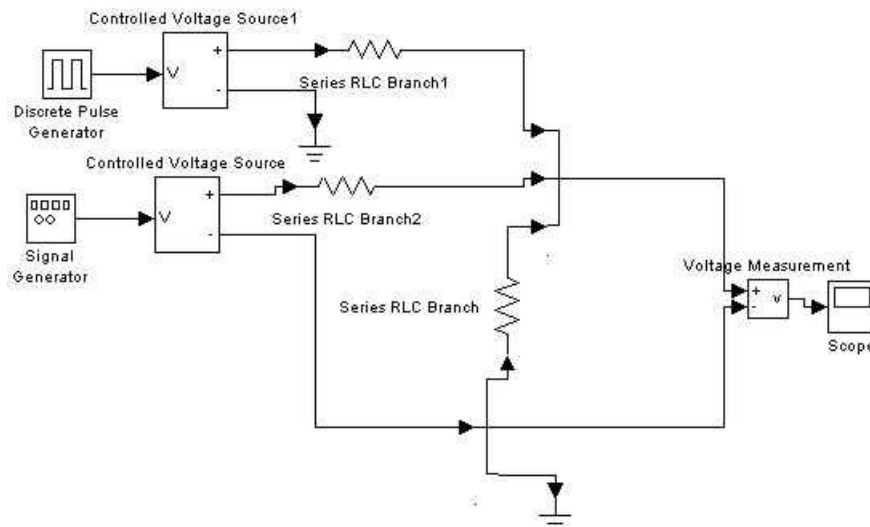


Figura : schema de simulare a unui impuls suprapus peste un semnal dreptunghiular

Un generator de semnal dreptunghiular (Signal Generator) generează impulsuri pe o rezistență și un impuls este suprapus peste acest semnal cu un generator de impulsuri (Discrete Pulse Generator). Aceste generatoare comandă sursele de tensiune (Controlled Voltage Source) care sunt cuplate împreună pe aceeași rezistență de sarcină. Generatoarele sunt programate astfel, figura 11:

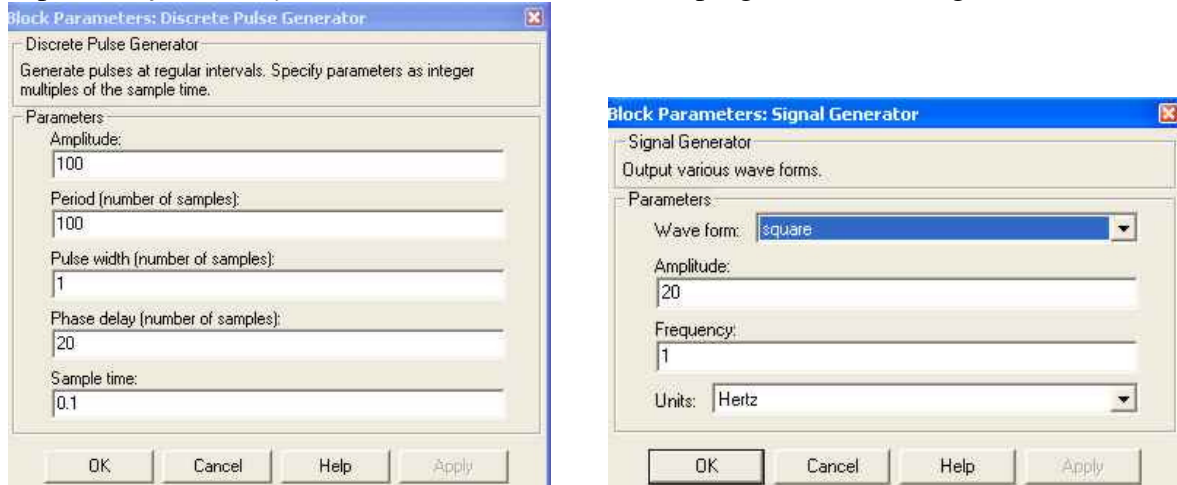


Figura 11: generatoarele de semnal

Generatorul de semnal dreptunghiular (dreapta) generează un semnal cu amplitudinea de 20, frecvența de 1Hz iar impulsul generat de generatorul de impulsuri (stânga) are amplitudinea de 100 și este deplasat față de începutul semnalului dreptunghiular cu 20 de eșantioane.

După simulare, osciloscopul conectat arată următoarea formă:

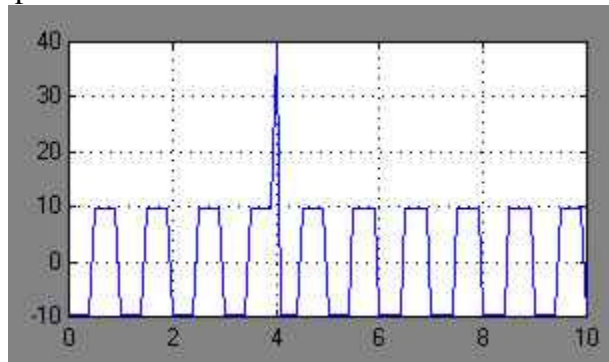


Figura 12: un impuls suprapus peste semnalul dreptunghiular

Dacă se folosește un element de limitare a vârfurilor de tensiune (surge arrester) schema de simulare devine cea din figura 13.

Osciloscopul conectat va arăta o amplitudine mult mai mică a supratensiunii, care a fost micșorată de la aproximativ 30V la mai puțin de 10V, figura 14.

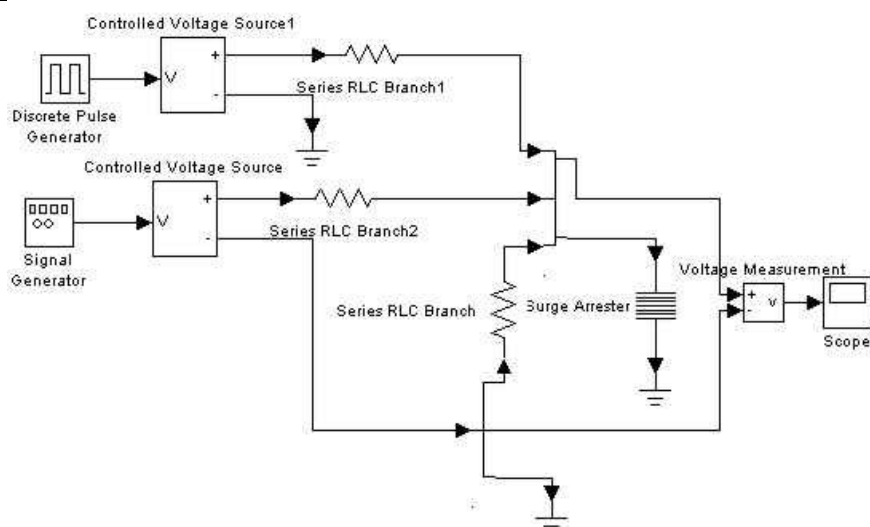


Figura 13: schema de simulare a micșorării impulsului cu un element de limitare

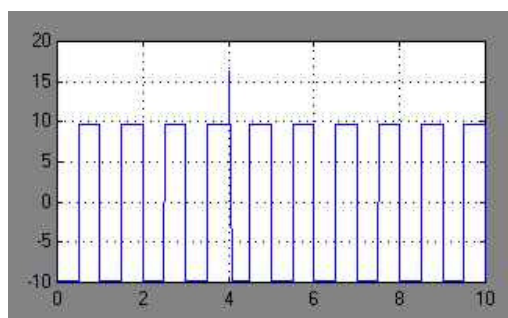


Figura 14: un impuls atenuat cu un element de limitare

Pentru reducerea supratensiunii se poate conecta o diodă semiconductoră spre o bornă de alimentare, figura 15:

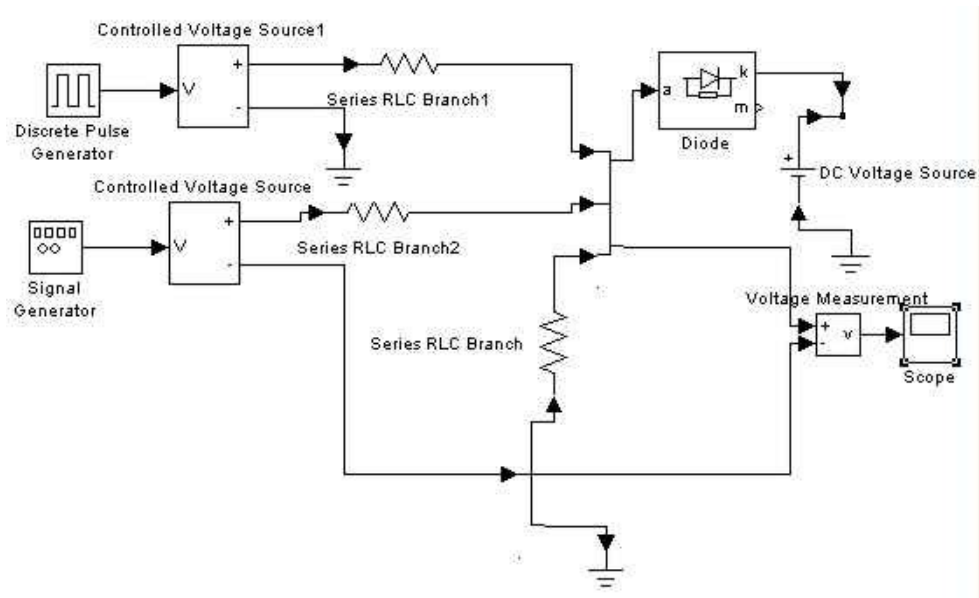


Figura 15: simularea cu o diodă spre o bornă de alimentare

Rezultatele simulării arată ca în figura 16. Se observă că după intrarea în conducție a diodei semnalul are oscilații mari și prin urmare supratensiunile sunt importante, de ordinul 20V. Forma semnalului transmis este distorsionată și este foarte posibil să apară recepția de caractere false. Această comportare este dată de faptul că dioda se deschide și supratensiunea este condusă spre borna de alimentare, tensiunea revine la o valoare mică, dioda se blochează și apare din nou supratensiune, ș.a.m.d.

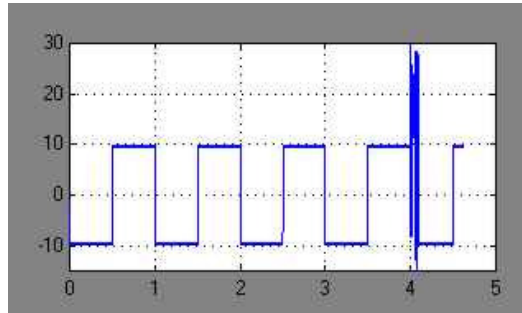


Figura 16: impuls atenuat cu o diodă semiconductoare

O soluție pentru remedierea acestei situații este conectarea în loc de diodă a unui element care să intre în funcțiune la un prag dar să se blocheze la alt prag sau în alte condiții, cum este un tiristor, figura 17:

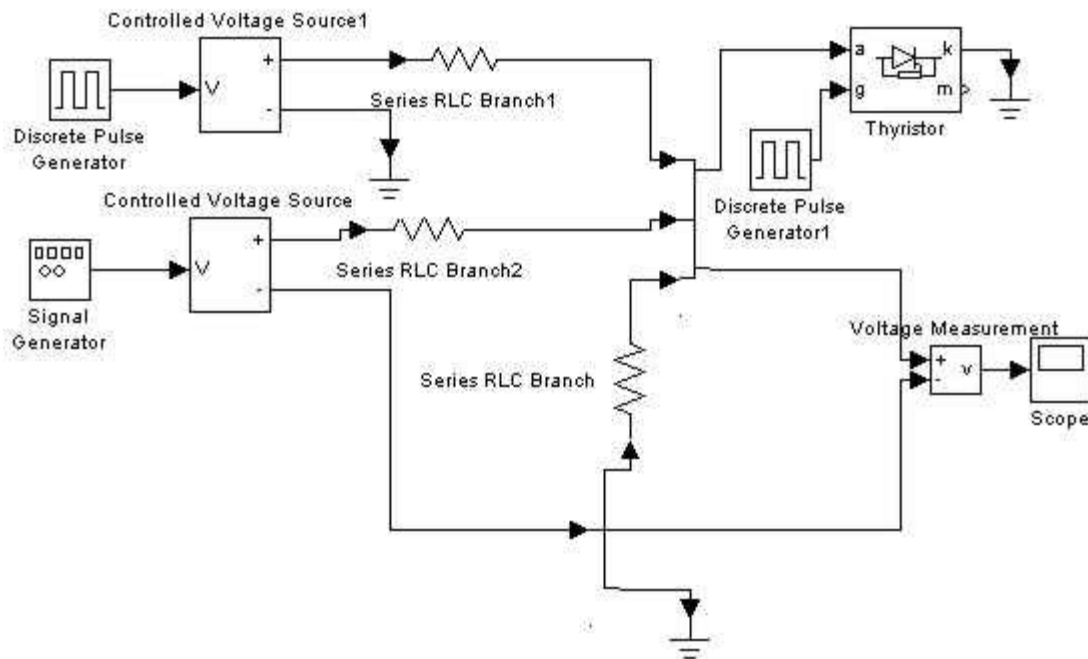


Figura 17: atenuarea impulsului cu tiristor

Tiristorul intră în conducție comandat de apariția impulsului și este comandat de generatorul de impulsuri. Practic el va putea fi comandat de tensiunea dintre linii divizată cu un divizor rezistiv. Forma de undă este dată în figura 18. Se observă atenuarea foarte bună, supratensiunea scăzând sub 5V.

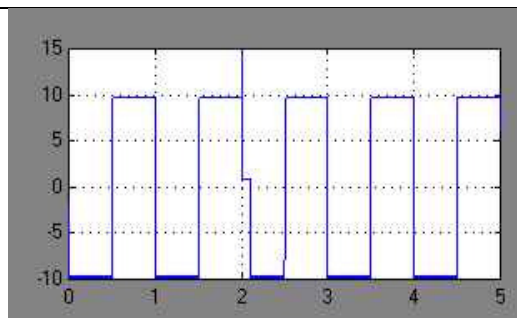


Figura 18: atenuarea cu tiristor

Una dintre problemele mari care pot apărea este tensiunea de mod comun care poate fi simulată cu o sursă de tensiune în serie cu tensiunea utilă, figura 19:

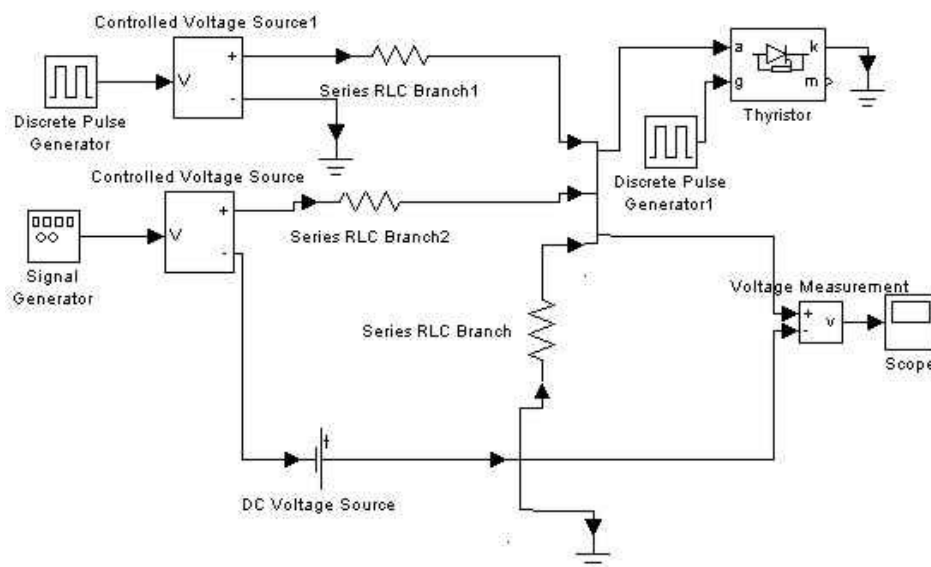


Figura 19: inserarea unei tensiuni de mod comun

Forma de undă obținută în acest caz, figura 20 arată o decalare a nivelului care face ca citirea datelor să fie imposibilă. Dacă amplitudinea tensiunii de mod comun este 10V semnalul dreptunghiular va avea valori între 0 și -20V, ceea ce face recepția imposibilă. Chiar protejat față de impulsuri cu același sistem cu tiristor supratensiunea crește de la 5 la 10V.

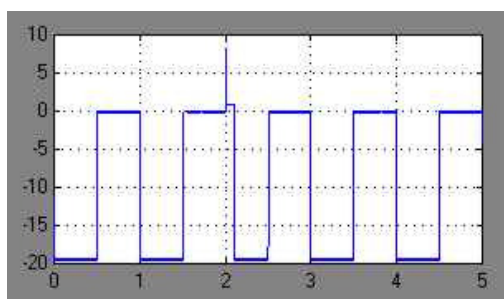


Figura 20: inserarea unei tensiuni de mod comun

Soluția necesară în acest caz este decuplarea galvanică. Aceasta s-a simulat cu un transformator liniar, figura 21:

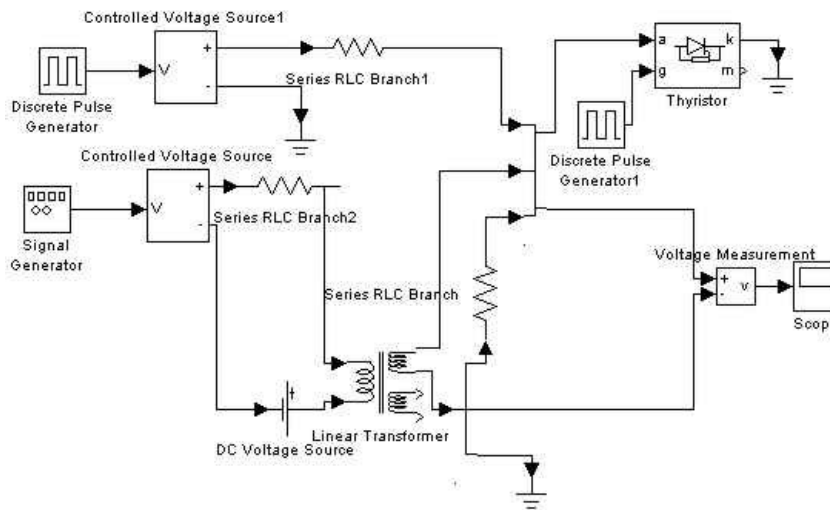


Figura 21: transmisia cu izolare galvanică

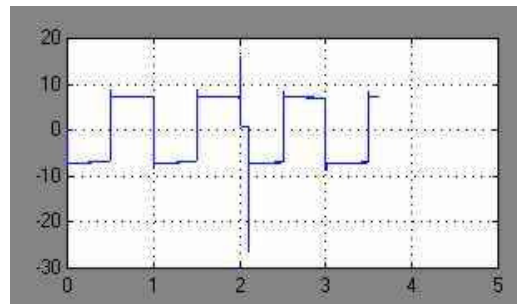


Figura 22: transmisia cu izolare galvanică

Rezultatele arată că transmisia poate fi interpretată corect de receptor. Supratensiunea a crescut însă și mai mult, având în acest caz și o componentă negativă. Componentele negative pot fi atenuate dacă se folosește un sistem simetric de atenuare de exemplu cu 2 diode conectate spre ambele tensiuni de alimentare sau o componentă bidirecțională cum este un triac.

4. Dispozitive comerciale pentru reducerea supratensiunilor

Minimizarea supratensiunilor produse de descărcările electrostatice, de impulsurile nucleare, datorate reflexiilor etc. este o cerință importantă în special în domeniul militar. Filtrele pentru linii de transmisie înglobate în conectori sunt componente des utilizate în domeniul militar, mai ales în aviație pentru că îndeplinesc o serie de cerințe specifice:

- Folosirea conectorilor cu mai mulți pini minimizează numărul de orificii în ecranul carcasei
- Supratensiunile sunt absorbite și transformate în căldură prin materialul filtrului
- Se pot folosi metode combinate prin adăugarea la filtre a componentelor neliniare de tăiere a supratensiunilor
- Ecranarea cablurilor face posibilă scurgerea tensiunii perturbatoare spre masă prin legătura la masă a conectorului

Un număr mare de standarde militare se ocupă cu efectele EMI așa cum sunt: MIL-DTL-38999, MIL-C-26482, MIL-C-83723, MIL-C-5015, MIL-C-27599, MIL-C-26500 (filtre în conectori cilindrici).

Un astfel de conector cu filtre este dat în figura 23:

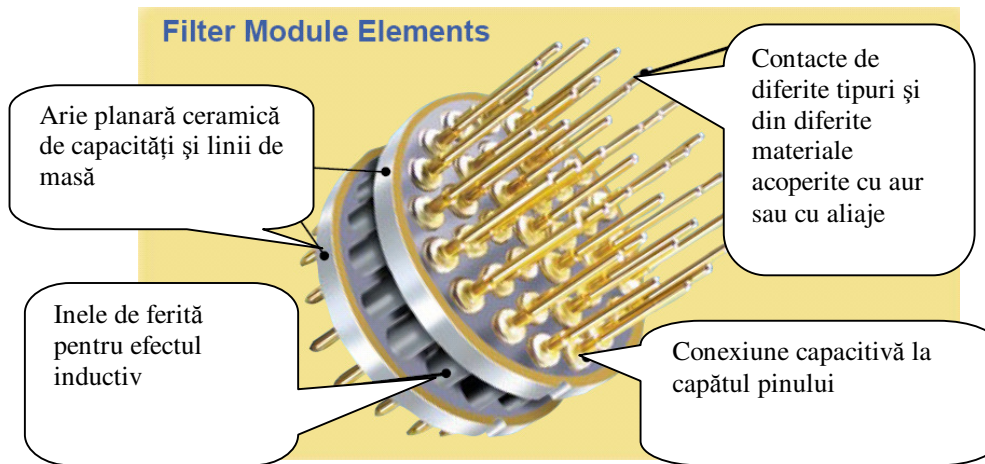


Figura 23: conector cu filtre (Glenair)

Filtrele sunt de tip trece jos cu structuri de tip Pi, LC, C. Pentru a verifica comportarea unui filtru Pi, acesta este poziționat la ieșirea unei linii de transmisie. Sursa de semnal generează un semnal dreptunghiular cu frecvența de 1MHz iar recepția nu este adaptată pentru a genera supratensiuni. Schema de simulare este dată în figura 24 iar programul SPICE urmează după figură:

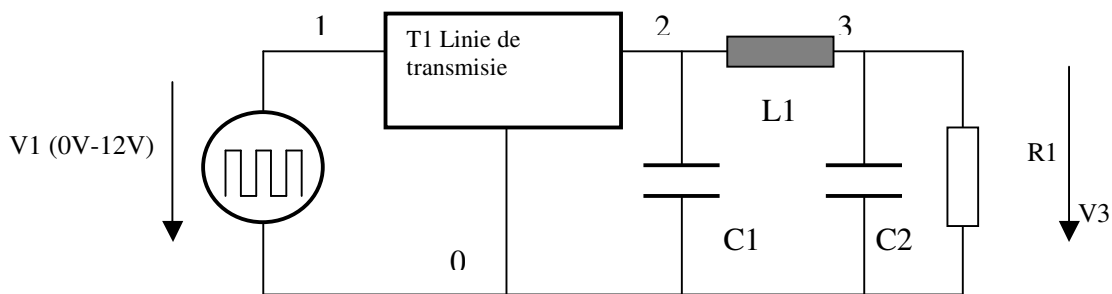


Figura 24: filtru Pi la ieșirea unei linii de transmisie

```
*TEST1
V1 1 0 AC 1 PULSE 0 12V 0 0 0 0.5u 1u
T1 1 0 2 0 Z0=50 NL=0.025 F=1000KHZ
R1 3 0 200ohm
C1 2 0 10p
L1 2 3 100p
C2 3 0 10p
.PROBE
.tran 40n 20.000u 0 0 ;*ipsp*
.END
```

Rezultatele simulării sunt date în continuare, în prima figură în lipsa filtrului iar în a doua cu filtru.

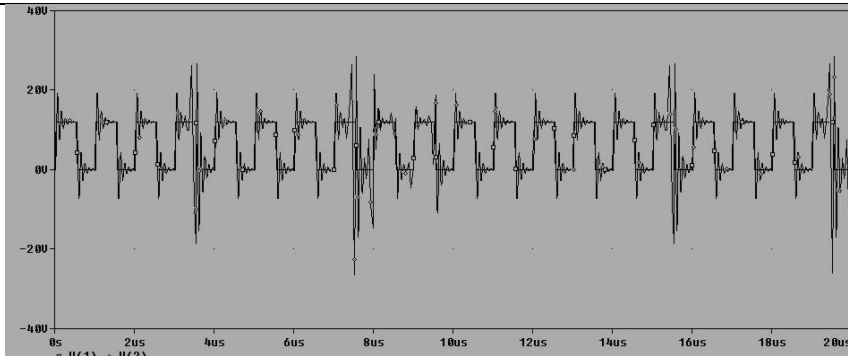


Figura 25: simulare fără filtru, 1MHz

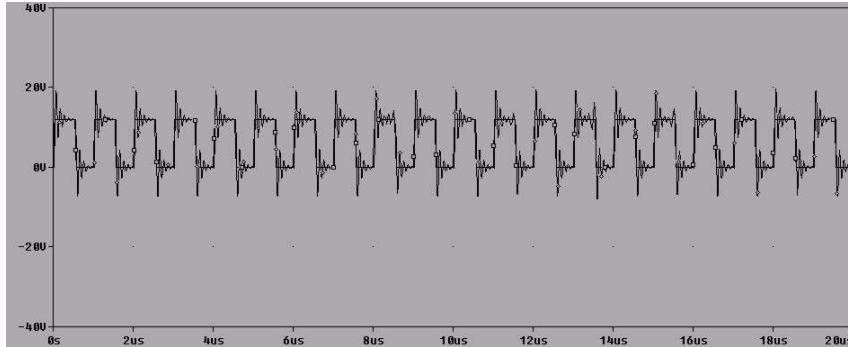


Figura 26: simulare cu filtru, 1MHz

Se observă din simulări că supratensiunile sunt de ordinul $-30V$ până la $30V$ în fără filtru și -8 până la $8V$ cu filtru.

Un conector de uz militar (aviație) este dat în figura 27:



Figura 27: conector militar cu filtre

Un filtru de uz general Micro-D echipat cu filtre este dat în figura 28:



Figura 28: conector Micro-D cu filtre

Filtrele se aleg în funcție de frecvența semnalului transmis. O alegere nepotrivită poate duce la deteriorarea semnalului. În figura se văd rezultatele simulării aplicând la intrare un semnal de $50MHz$ și se poate observa deteriorarea formei semnalului la ieșire.

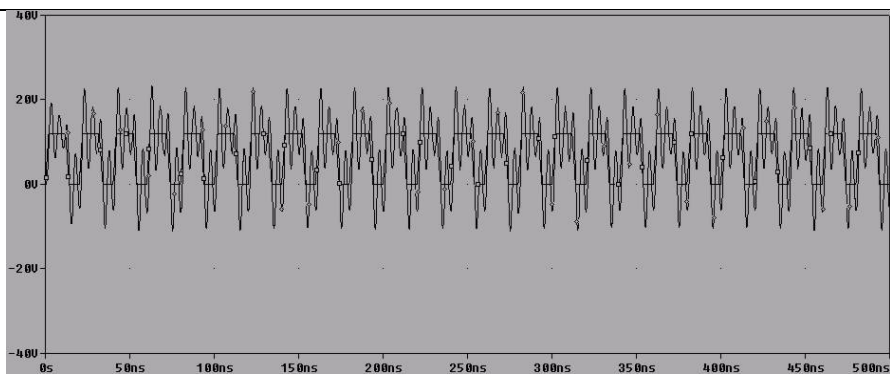


Figura :simulare cu filtru, 50MHz :

Bibliografie

- (1) P. Ogruțan, F. Sandu, Compatibilitate electromagnetică, Editura Universității Transilvania Brașov, 1999, ISBN 973-98796-9-1
- (2) L. E. Aciu, P. Ogruțan, Compatibilitate electromagnetică: perturbații și influențe asupra mediului, Editura Universității Transilvania Brașov, 2006, ISBN 973-635-673-6
- (3) www.glenair.com