



Introducere in alimentarea cu energie a echipamentelor electronice

Curs de Electronica Aplicata



Bibliografie

- Jerry C. Whitaker, *The Electronics Handbook*, CRC Press, 1996.
- Dorin Petreus, *Electronica Surselor de Alimentare*, Editura MEDIAMIRA, Cluj-Napoca, 2002.
- N. Palaghiță, D. Petreus, C. Fărcaș, *Electronică de comandă și reglaj*, Ed. Mediamira, Cluj-Napoca, 2006.
- Dorin Petreus, Lungu Serban, *Surse in Comutatie*, Ed. Mediamira, Cluj Napoca, 1999.
- Cristian Farcas, Dorin Petreus, Niculaie Palaghita, *Imbunatatirea Factorului de Putere in Sistemele Moderne de Alimentare*, Cluj-Napoca, 2003.
- V. Popescu, D. Lascu, D. Negoțescu, *Surse de alimentare in telecomunicații*, Ed. De Vest, 2002.
- Serban Lungu, Ovidiu Pop, *Modelarea circuitelor electronice*, Casa Cartii de Stiinte, Cluj Napoca, 2006.



- 1: Introducere
- 2: Redresoare monofazate
- 3: Regulatori liniari
- 4: Surse în comutație
- 5: Convertoare rezonante
- 6: Factorul de putere

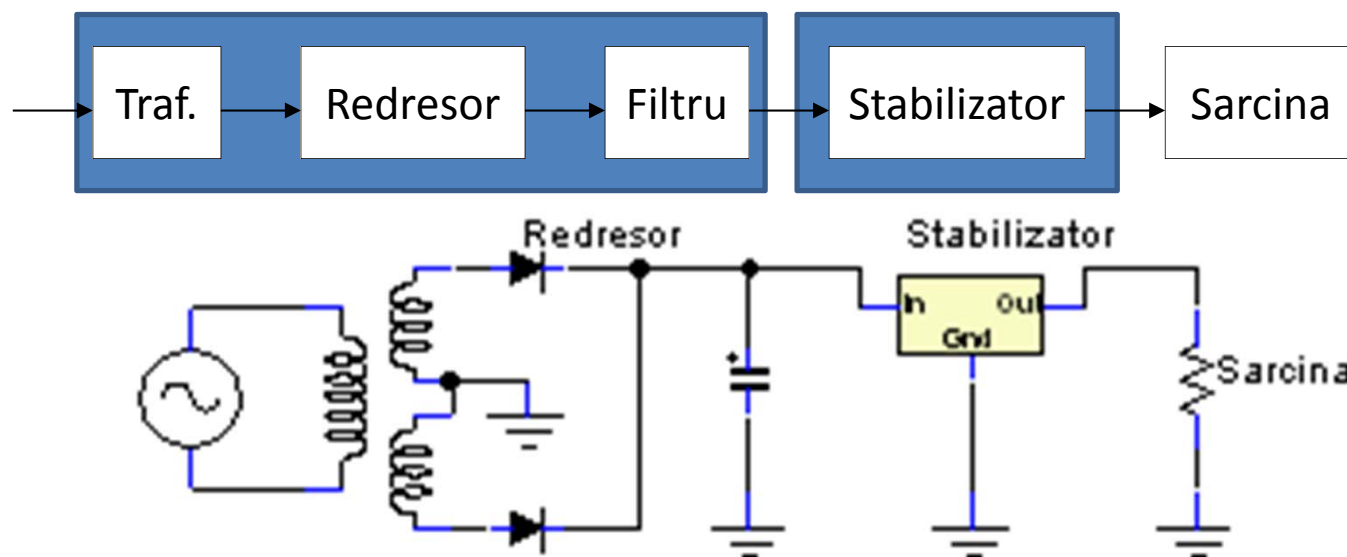


1.Introducere

Cele mai importante din cerintelele care influenteaza alegerea tehnologiei pentru proiectare sunt:

1. Costul.
2. Spatiu si forma.
3. Ce cantitate de caldura poate fi generata.
4. Tensiunea de la intrare.
5. Zgomotul care poate fi acceptat de circuitul de sarcina.
6. Durata de viata a bateriei (daca produsul trebuie sa fie portabil).
7. Numarul de iesiri in tensiune a sursei.

1. Introducere



Transformatorul - are rolul de a separa de rețea aparatul electronic. În același timp acesta modifică tensiunea rețelei la valoarea necesară pentru a obține o anumită tensiune continuă.

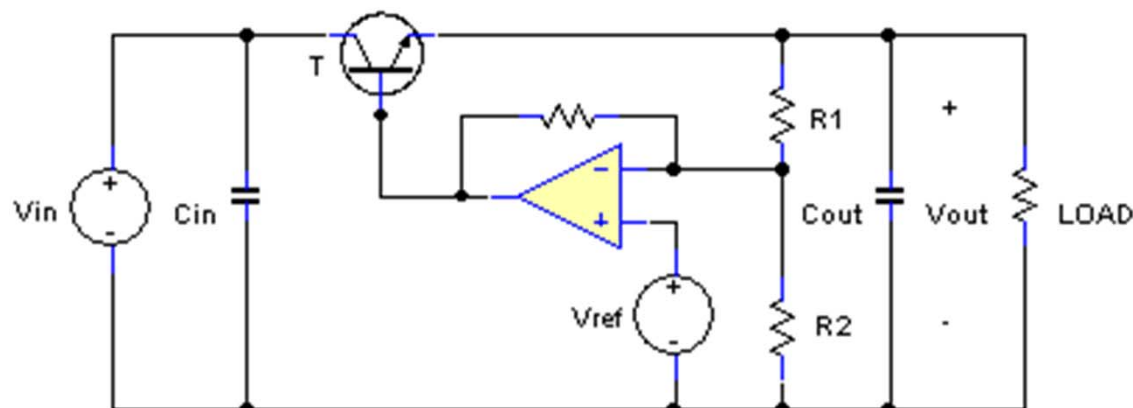
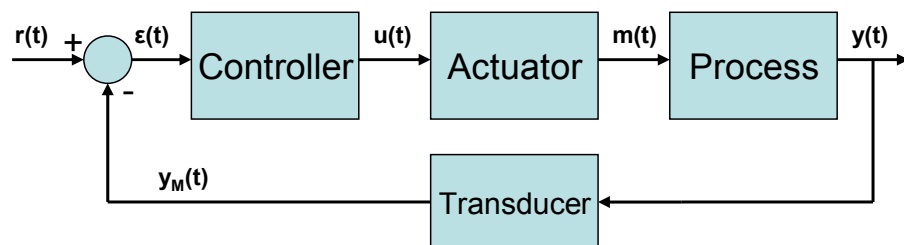
Redresorul - circuit cu elemente neliniare capabil să transforme tensiunea alternativă într-un semnal cu componentă continuă diferită de zero.

Filtru - are rolul de a atenua ondulațiile. Tensiunea de la ieșirea filtrului este dependentă de U_i , de sarcină și de temperatură.

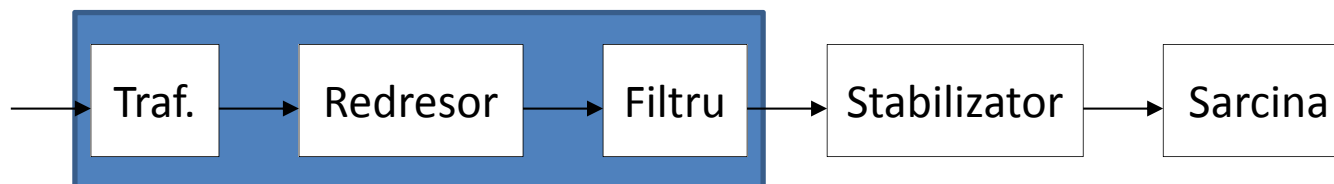
Stabilizatorul - are rolul de a face ca tensiunea de la ieșirea sursei stabilizate să fie independentă de acești factori și să se apropie cât mai mult de o tensiune continuă.

1.Introducere

Din dorinta de a mentine valoarea tensiunii de iesire la o valoare constanta majoritatea surselor de alimentare au in componenta lor un sistem de control in bucla inchisa.



Circuitul principal este un amplificator operational numit si amplificator de eroare. Rolul acestuia este de a compara diferenta dintre o tensiune de referinta, foarte stabila, si tensiunea de iesire.

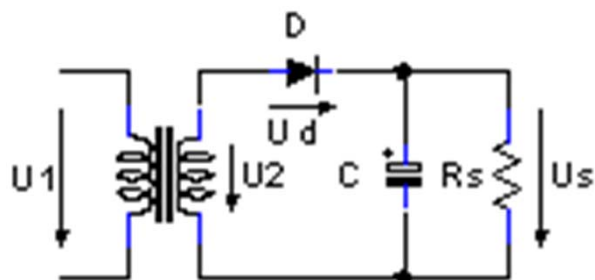


Redresoare monofazate - monoalternanta

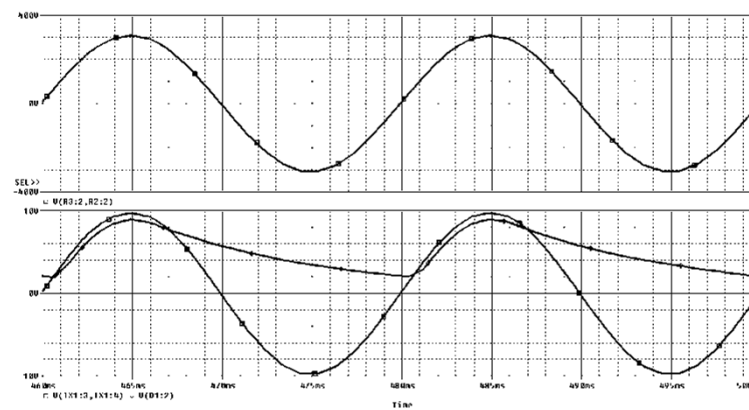
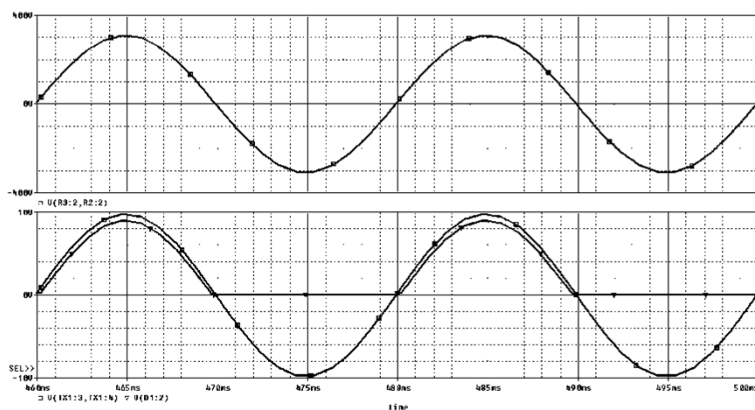
Redresoare monofazate – dubla alternanta

- Cu priza mediana
- In punte

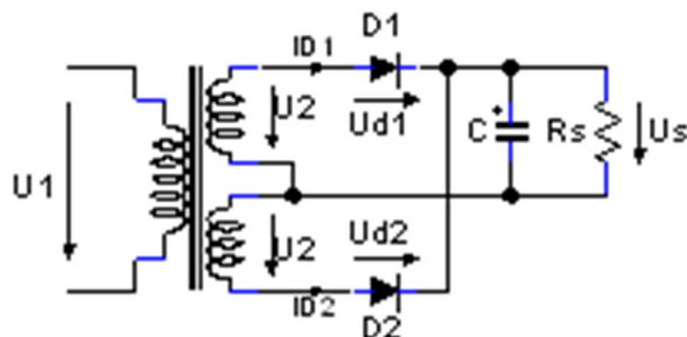
2.Redresoare monofazate - monoalternanta



Acest circuit este un circuit cu rezultate slabe de redresare avand un randament de sub 40%, si un factor de ondulație mult prea mare, 1.57.

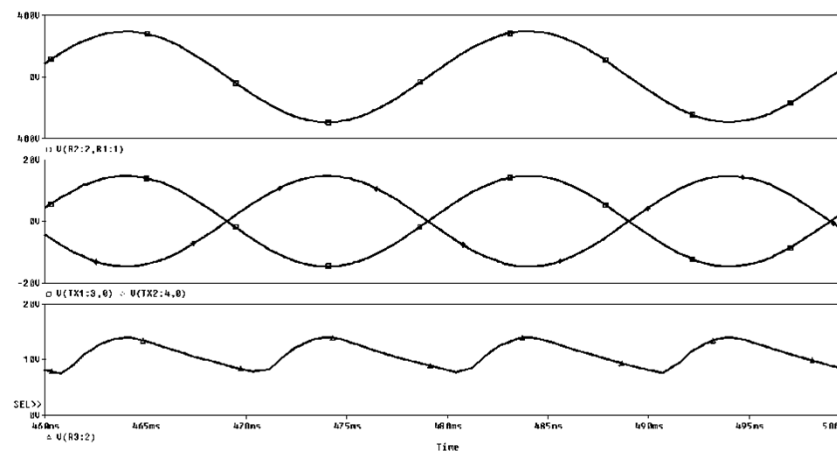
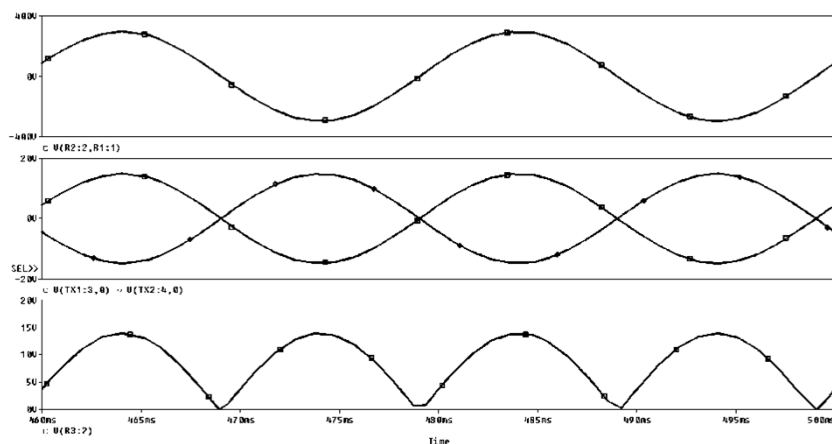


2.Redresoare monofazate – dubla alternanta

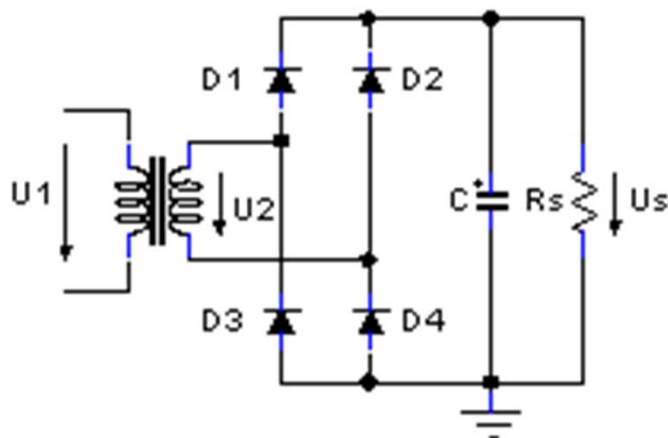


Acest circuit este un circuit cu rezultate mai bune de redresare avand un randament de pana la 80%, si un factor de ondulație sub 1, 0.67.

$$U_{dmax} = 2U_i$$

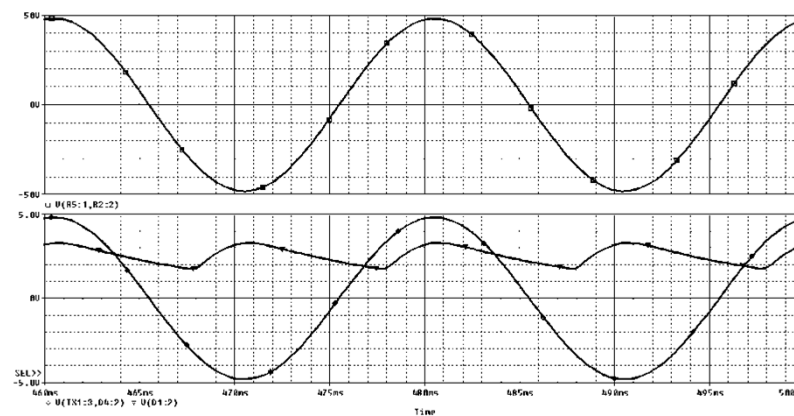
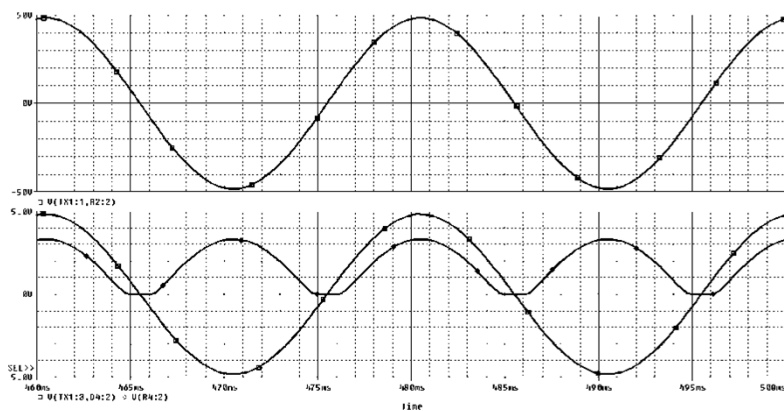


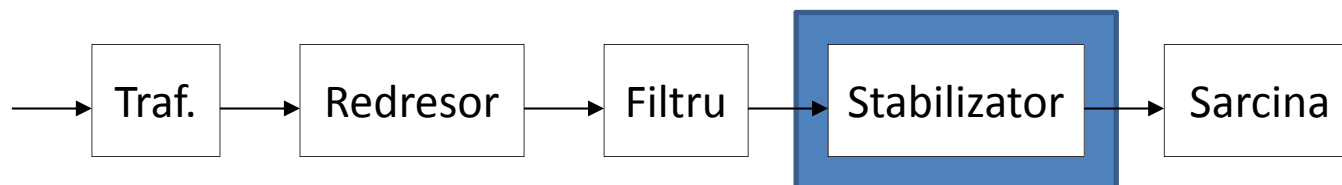
2.Redresoare monofazate – dubla alternanta



Acest circuit este un circuit cu rezultate mai bune de redresare avand un randament de pana la 80%, si un factor de ondulație sub 1, 0.67.

$$U_{dmax} = U_i$$





Regulatoare liniare

- regulatoare cu sunt,
- regulatoare serie.

Surse in comutatie

- convertoare fara izolare galvanica:
 - convertorul Buck;
 - convertorul Buck-Boost.
 - convertorul Boost;
- convertoare cu izolare galvanica:
 - convertorul Flyback;
 - convertorul Forward;
 - convertorul Push-Pool.

Convertoare Rezonante

- Comutatie la curent zero
- Comutatie la tensiune zero

3.Regulatoare liniare

Regulatoarele liniare se folosesc de obicei in circuitele care au ca referinta pamantul sau pinul de masa, unde generarea de caldura si eficienta scazuta nu sunt asa de importante si unde, de asemenea, costul scazut si timpul de proiectare scurt sunt dorite. Sunt foarte utilizate in circuitele de stabilizare a tensiunilor, unde tensiunea de intrare este mai mica de 40 Vcc. Aceste circuite pot produce doar o tensiune mai mica la iesire decat cea de la intrare si pot avea doar o singura iesire. Au o eficienta medie cuprinsa intre 35 si 50 %. Pierderile sunt disipate prin caldura.

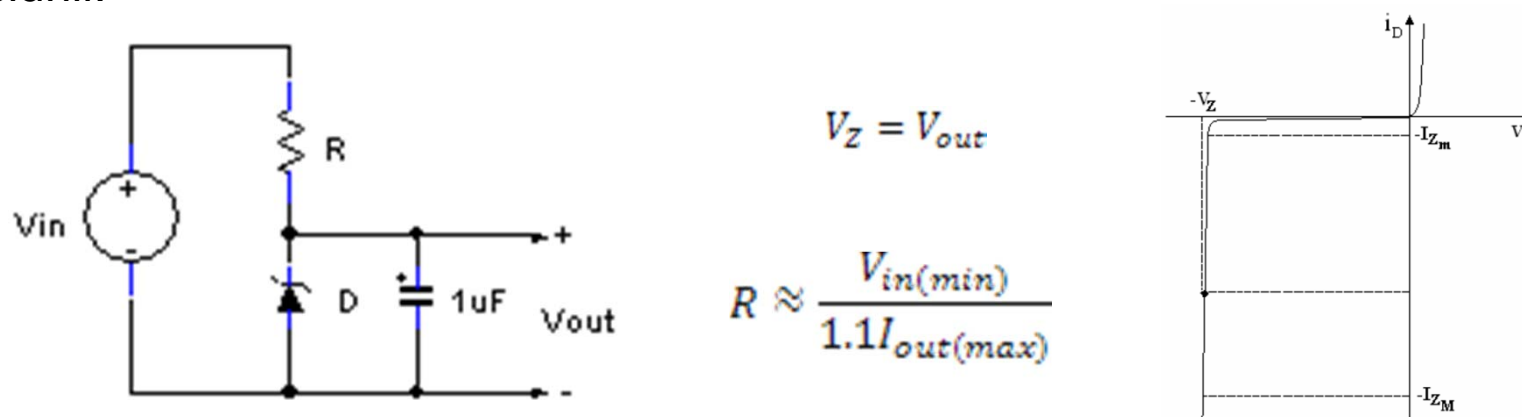
Acestea functioneaza pe principiul modificarii conductivitatii unui element activ de circuit in vederea reducerii variatiei unei tensiuni de intrare transformand-o intr-o tensiune stabilizata. Transforma o parte importanta de putere in caldura si din punct de vedere electric sunt foarte putin zgomotoase.

Se folosesc in aplicatii care nu au nevoie de mai mult de 10W. Peste aceasta valoare caldura degajata va fi prea mare, pierderile crescand si facand astfel mai atractive sursele in comutatie.

- regulatoare cu sunt,
- regulatoare serie.

3. Reglatoare liniare cu sunt

Reglatoarele cu sunt sunt reglatoarele de tensiune care sunt plasate în paralel cu sarcina. Un exemplu comun este stabilizatorul parametric, dioda Zener funcționând pe principiul că la variații mari ale curentului corespund variații mici ale tensiunii.

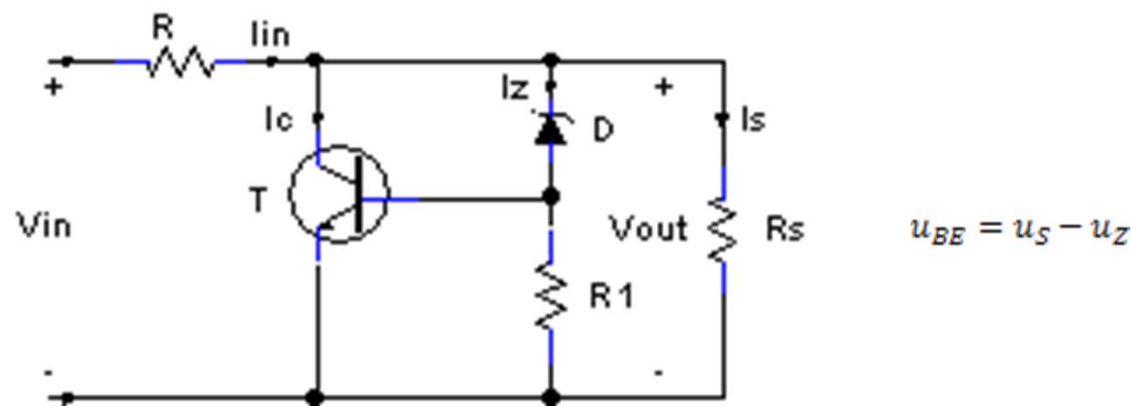


Parametrii principali în evaluarea performanțelor stabilizatoarelor sunt:

$$S_{UI} = \left(\frac{\Delta U_I}{\Delta U_S} \right)_{I_S = ct} \quad - \text{coeficientul de stabilitate};$$

$$R_0 = \left(\frac{\Delta U_S}{\Delta I_S} \right)_{U_I = ct} \quad - \text{rezistența de ieșire}.$$

3.Reglatoare liniare cu sunt

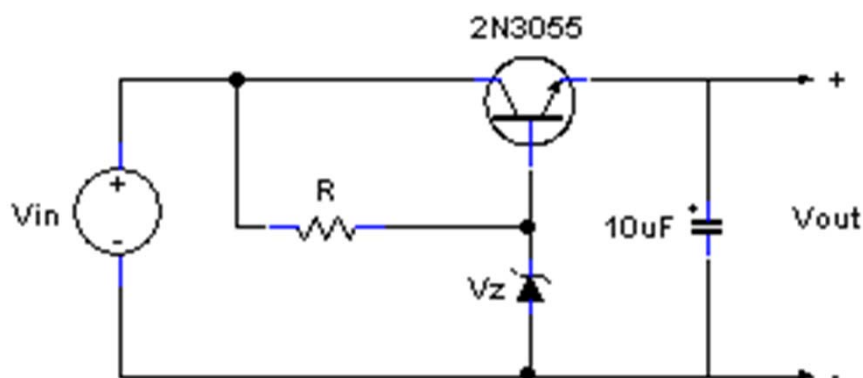


Întreaga tensiune de ieșire se compară cu tensiunea de referință direct pe baza tranzistorului reglator. Tensiunea de ieșire este în fază cu tensiunea de intrare astfel ca dacă aceasta crește, crește curentul prin tranzistorul reglator și deci tensiunea pe rezistența R crește, preluând variația tensiunii de ieșire.

3.Reglatoare liniare serie

Regulatorul cu sunt este cel mai des folosit in stabilizari locale unde puterea este de sub 200mW. Resistenta are rolul de a limita curentul prin sarcina si dioda. Tensiunea zener va fluctua odata cu temperatura.

Prin introducerea unui transistor, avem avantajul amplificarii acestuia. Aceasta amplificare face posibil marirea disponibilitatii in curent a circuitului. In acest caz tranzistorul functioneaza ca un amplificator de eroare.

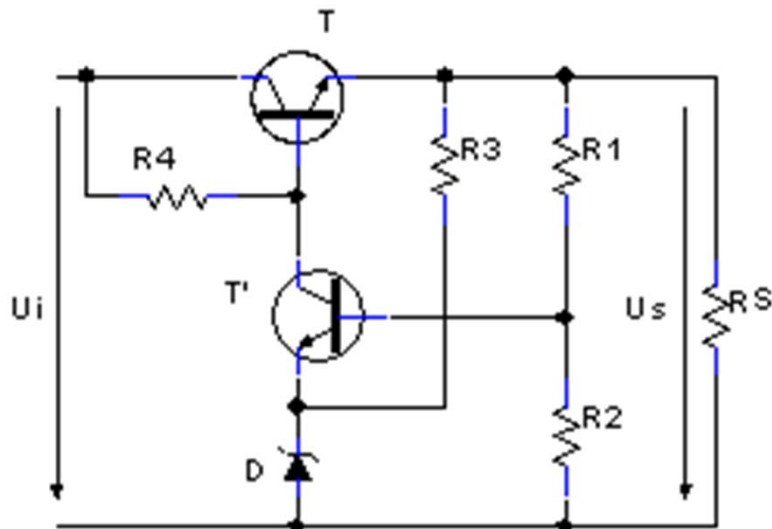


$$V_Z = V_{BE} + V_{out}$$



Intreaga tensiune de iesire se compara cu tensiunea de referinta data de dioda zener. Variatia tensiunii BE a tranzistorului este in antifaza cu variatia tensiunii de iesire. Atunci cand Vout creste, va creste tensiunea pe tranzistorul regulator care va prelua cresterea tensiunii de intrare.

3. Reglatoare liniare serie cu amplificator de eroare

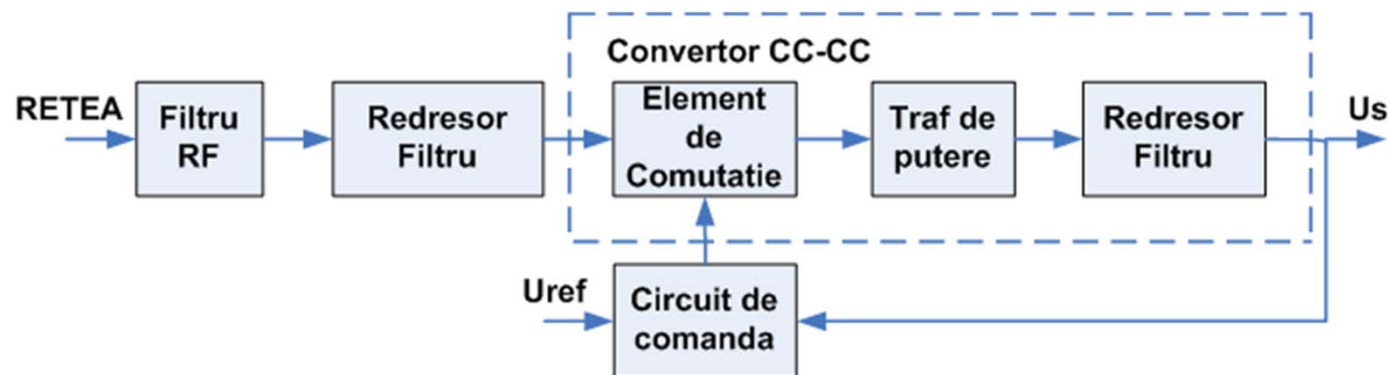


Amplificatorul de eroare este folosit pentru îmbunătățirea eficacității buclei de reacție. Se vor îmbunătăți considerabil caracteristica de stabilitate, precum și rezistența de ieșire.

Funcționarea acestui stabilizator este puțin mai complexă. În momentul în care U_s crește, tensiunea pe R_2 crește, va crește tensiunea U'_{be} , tranzistorul T' se deschide mai mult, curentul prin colectorul lui T' va crește, va scădea curentul prin bază tranzistorului T , va scădea curentul ce colector prin T și astfel se realizează compensarea creșterii tensiunii de ieșire. Se observă faptul că, tensiunea de ieșire se aplică diagonalei unei punți (R_1 , R_2 , R_3 , D) din cealaltă diagonală culegându-se tensiunea de intrare a amplificatorului de eroare U'_{be} .

$$u_s = \frac{(u_Z + u'_{BE})(R_1 + R_2)}{R_2}$$

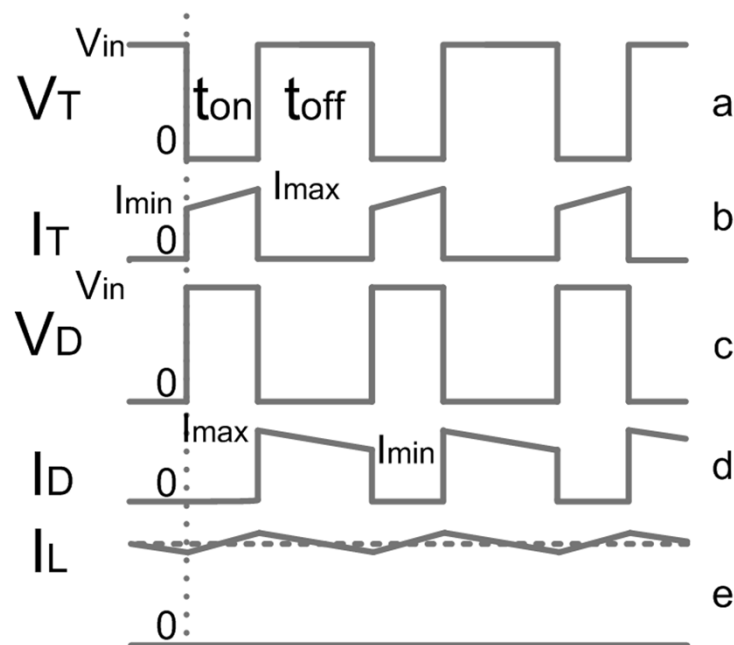
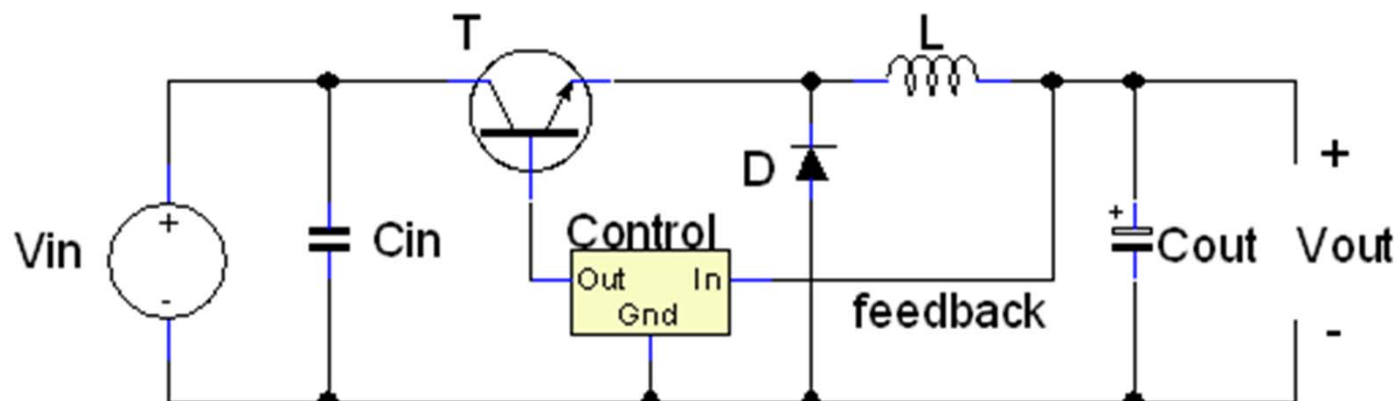
4. Surse in comutatie



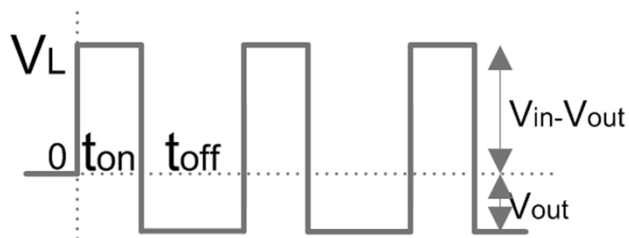
Exista doua mari categorii de surse in comutatie:

- convertoare fara izolare galvanica:
 - convertorul Buck;
 - convertorul Buck-Boost.
 - convertorul Boost;
- convertoare cu izolare galvanica:
 - convertorul Flyback;
 - convertorul Forward;
 - convertorul Push-Pool.

4. Surse in comutatie – Convertorul Buck



4. Surse in comutatie – Convertorul Buck



- pe durata conductiei tranzistorului

$$V_L = V_{in} - V_{out} = L \frac{\Delta I_L}{t_{on}}$$

- pe durata cat tranzistorul este blocat

$$V_L = -V_{out} = -L \frac{\Delta I_L}{t_{off}}$$

Tinand seama ca in regim stationar valoarea medie a tensiunii pe bobina este nula rezulta:

$$(V_{in} - V_{out})t_{on} = V_{out}t_{off}$$

$$V_{out} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} * V_{in}$$

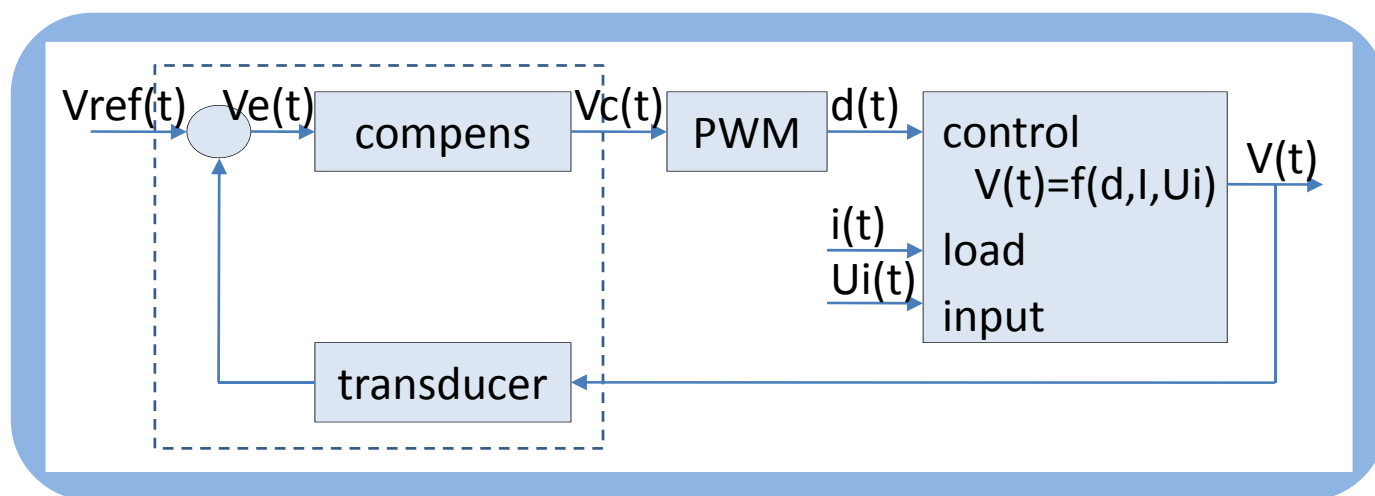
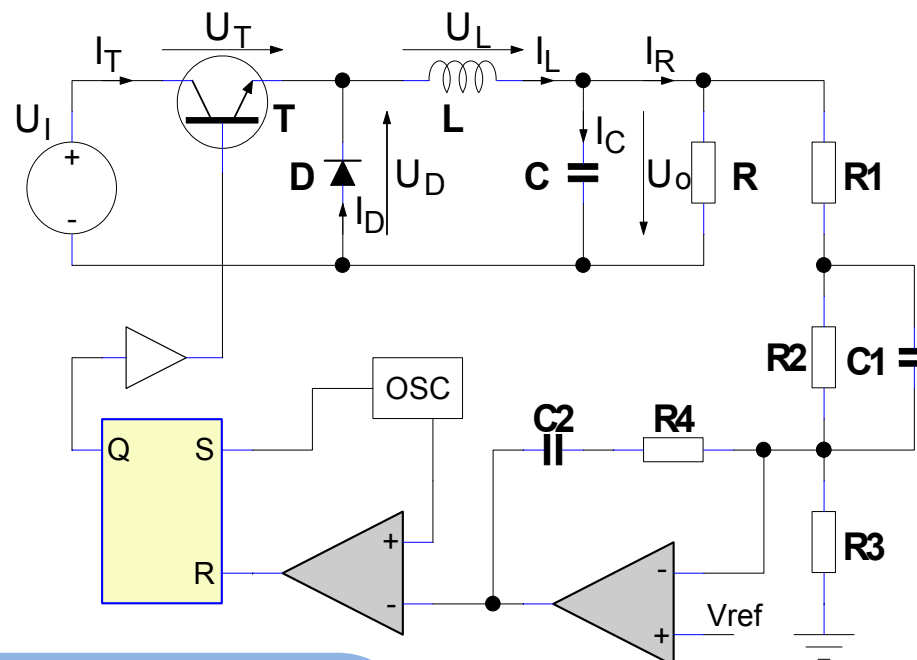
T - ON – dioda D este blocata, potentialul in catod fiind mai mare decat in anod intreaga tensiune fiind aplicata filtrului LC. In bobina se acumuleaza energie. Curentul prin sarcina este suportat de curentul prin tranzistor.

T – OFF – datorita efectului de autoinductie, polaritatea pe bobina se inverseaza avand ca rezultat deblocarea diodei. Curentul prin sarcina este suportat de curentul prin condensator.

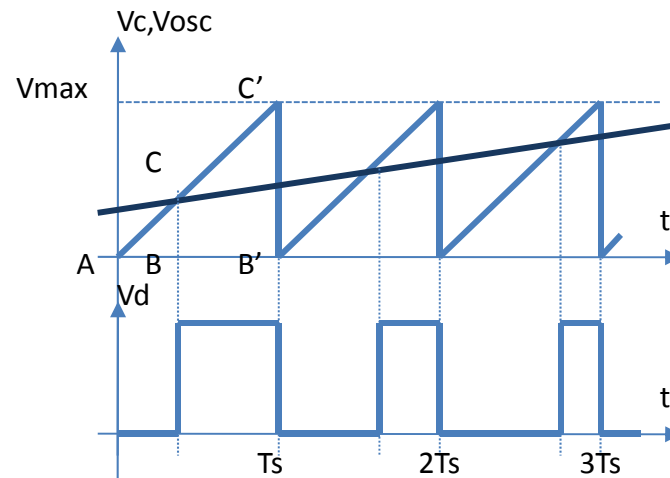
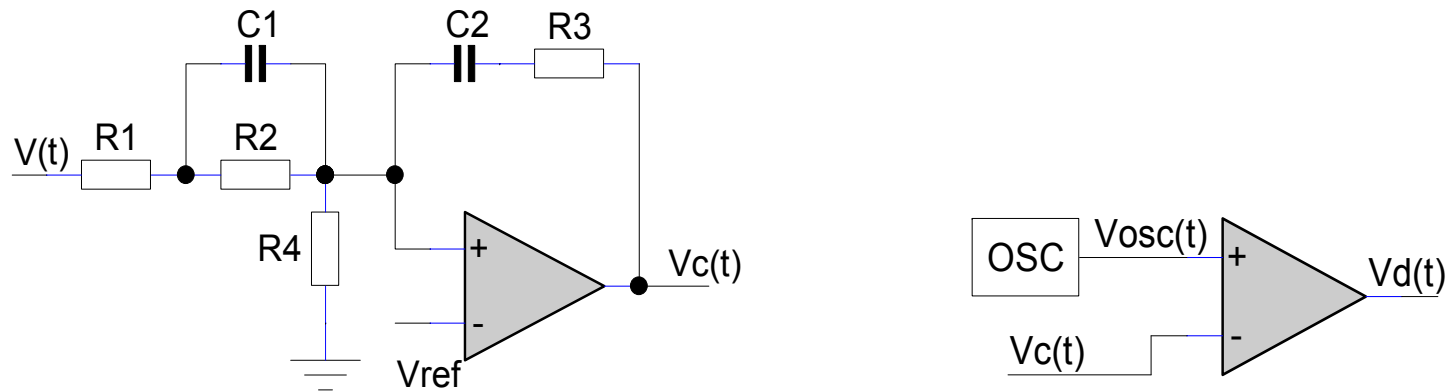
In functie de valoarea curentului prin bobina avem functionare in conductie intrerupta, atunci cand valoarea curentului prin bobina atinge valoarea zero, si functionare in conductie neintrerupta.

4. Surse în comutație – Convertorul Buck

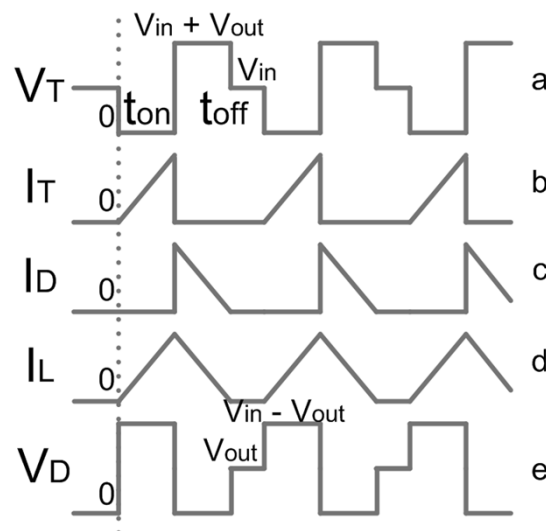
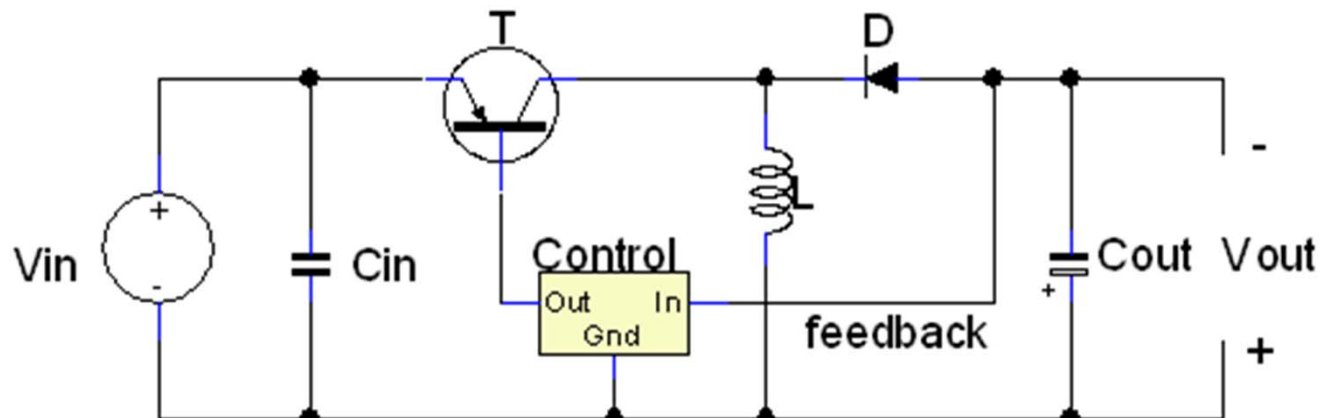
Traductorul este inclus în blocul de compensare fiind reprezentat printr-un simplu divizor rezistiv. În configurația acestei bucle de control se poate observa faptul că blocul traductorului, blocul controlerului și blocul de compensare sunt incluse în același bloc.



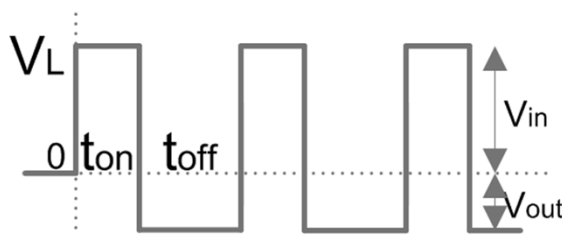
4. Surse in comutatie – Convertorul Buck



4. Surse in comutatie – Convertorul Buck-Boost



4. Surse in comutatie – Convertorul Buck-Boost



- pe durata conductiei tranzistorului

$$V_L = V_{in} = L \frac{\Delta I_L}{t_{on}}$$

- pe durata cat tranzistorul este blocat

$$V_L = -V_{out} = -L \frac{\Delta I_L}{t_{off}}$$

Tinand seama ca in regim stationar valoarea medie a tensiunii pe bobina este nula rezulta:

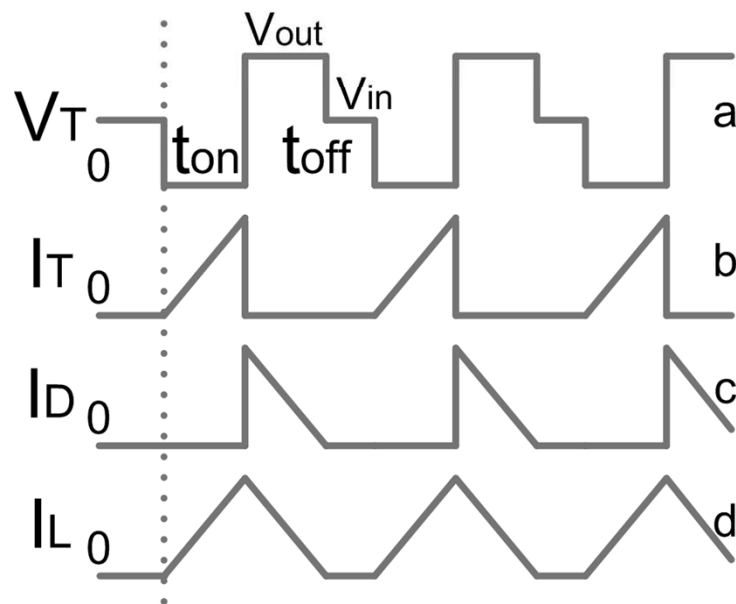
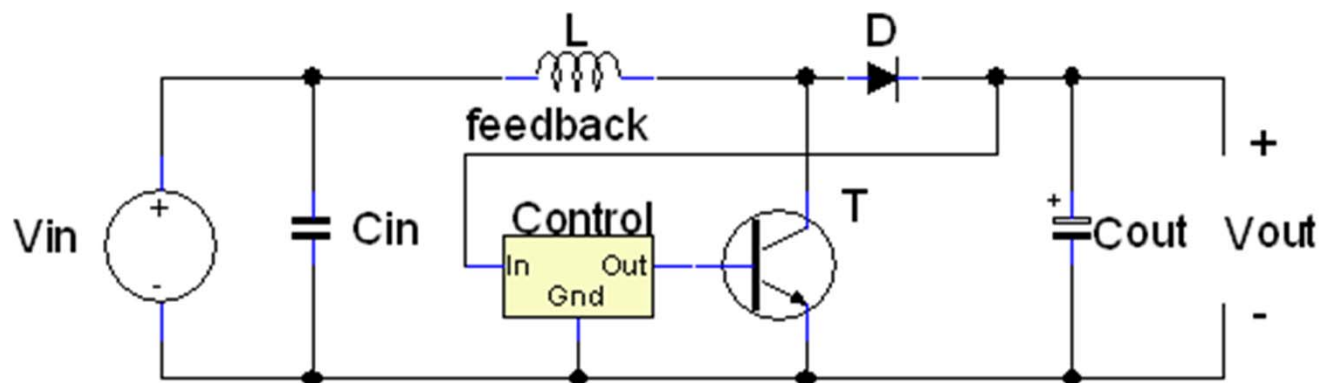
$$V_{in} t_{on} = V_{out} t_{off}$$

$$V_{out} = \frac{t_{on}}{t_{off}} * V_{in}$$

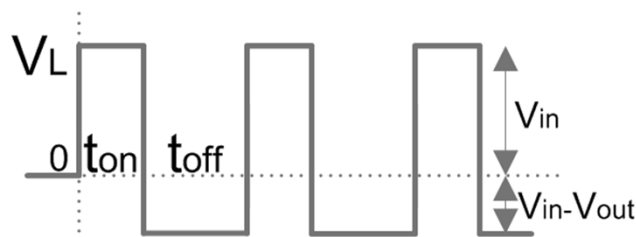
T - ON – dioda D este blocata, potentialul in catod fiind mai mare decat in anod intreaga tensiune de la intrare fiind acumulata in L. Curentul prin sarcina este suportat de curentul prin condensator.

T – OFF – datorita efectului de autoinductie, polaritatea pe bobina se inverseaza avand ca rezultat deblocarea diodei. Curentul prin sarcina si cel de incarcare al condensatorului este suportat de curentul prin bobina.

4. Surse in comutatie – Convertorul Boost



4. Surse în comutație – Convertorul Boost



- pe durata conductiei tranzistorului

$$V_L = V_{in} = L \frac{\Delta I_L}{t_{on}}$$

- pe durata cat tranzistorul este blocat

$$V_L = V_{in} - V_{out} = -L \frac{\Delta I_L}{t_{off}}$$

Tinând seama că în regim staționar valoarea medie a tensiunii pe bobina este nulă rezulta:

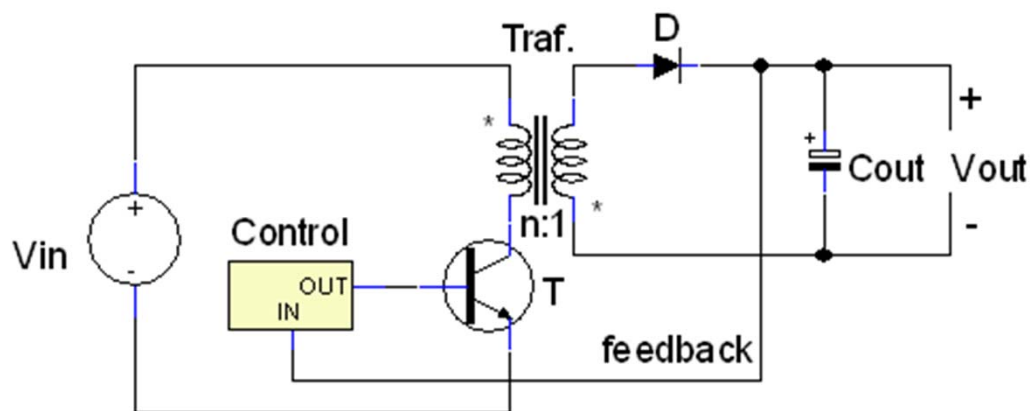
$$V_{in} t_{on} = (V_{out} - V_{in}) t_{off}$$

$$V_{out} = \left(1 + \frac{t_{on}}{t_{off}}\right) * V_{in}$$

T - ON – dioda D este blocată, potențialul în catod fiind mai mare decât în anod întreaga tensiune de la intrare fiind acumulată în L. Curentul prin sarcină este suportat de curentul prin condensator.

T – OFF – datorită efectului de autoinducție, polaritatea pe bobina se inversează având ca rezultat deblocarea diodei. Curentul prin sarcină și cel de încărcare al condensatorului este suportat de curentul prin bobina.

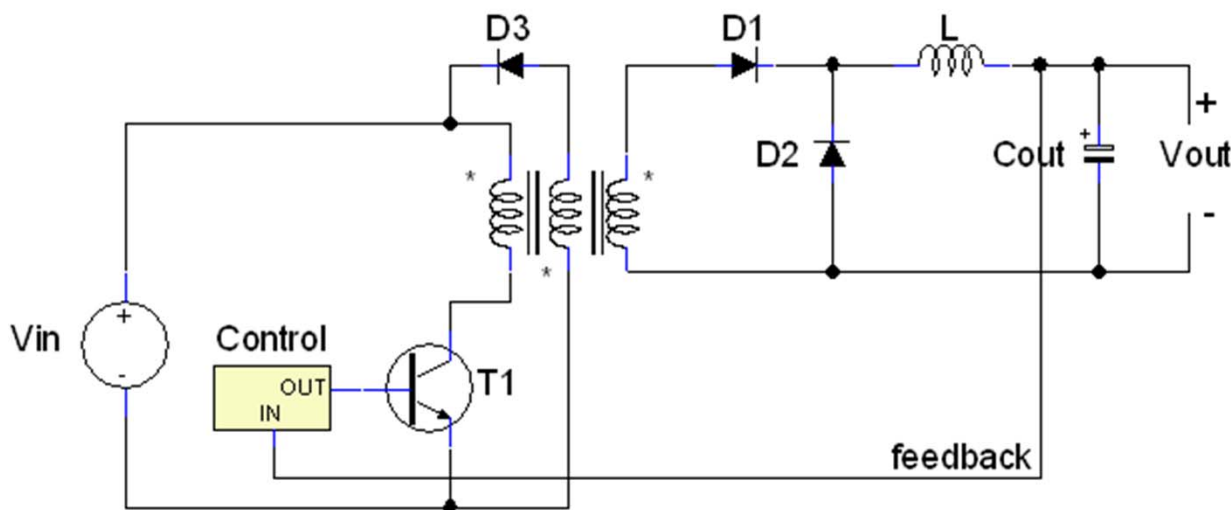
4. Surse în comutație – Convertorul Flyback



T - ON – dioda D este blocată, întreaga energie fiind stocată în primarul transformatorului. Curentul prin sarcină este suportat de curentul prin condensator.

T – OFF – tensiunea pe înfășurările transformatorului se inversează, dioda începe să conducă, iar energia acumulată în transformator este transmisă către ieșire. Curentul prin sarcină și cel de încărcare al condensatorului este suportat de curentul prin diodă.

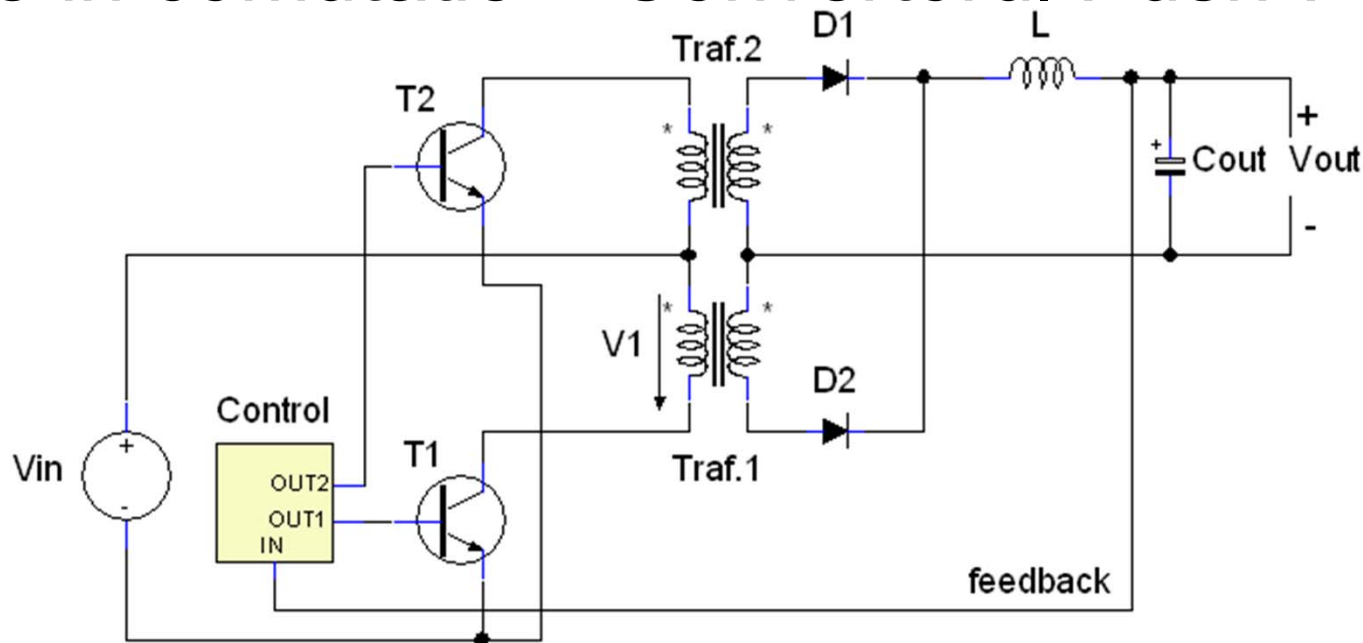
4. Surse in comutatie – Convertorul Forward



T - ON – dioda D1 fiind polarizata direct este de asemenea in conductie, energia absorbita din sursa de intrare fiind transmisa mai departe catre sarcina.

T – OFF – tensiunea pe infasurarile transformatorului se inverseaza, dioda D1 se blocheaza si ea. Pe baza energiei acumulate in bobina L, aceasta i-si inverseaza polaritatea ducand la deschiderea diodei D2.

4. Surse in comutatie – Convertorul Push-Poll



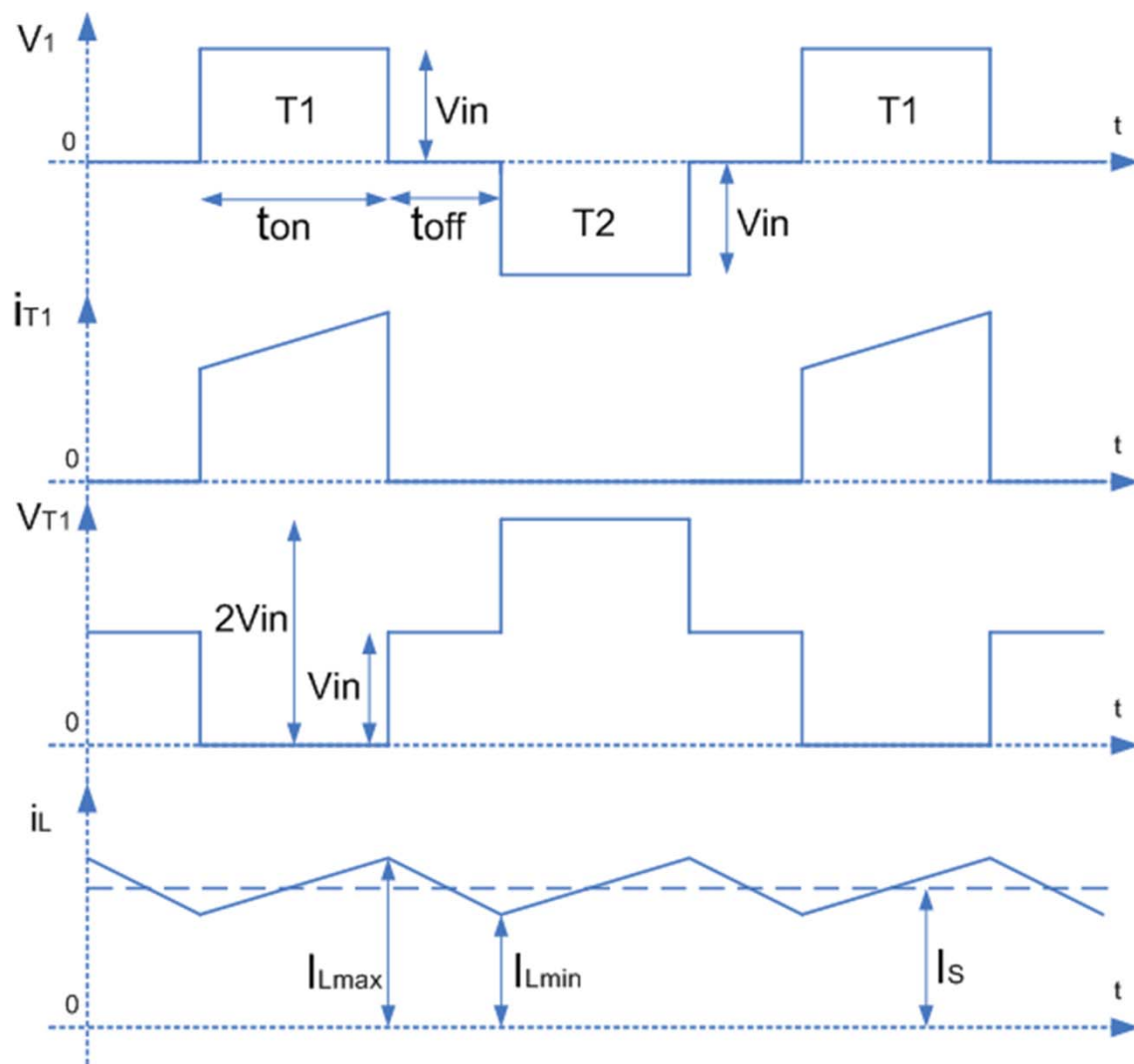
Convertorul in contratimp este prevazut cu doua comutatoare care functioneaza in antifaza:

T1-ON, T2-OFF– dioda D1 conduce, si dioda D2 blocata;

T1-OFF, T2-ON– dioda D1 blocata si dioda D2 conduce.

Rolul diodelor D1, D2 este acela de a redresa tensiunea din secundarul transformatorului. Pe durata cat ambele tranzistoare sunt blocate, secundarul transformatorului este scurtcircuitat de diodele care ambele sunt in conductie din cauza energiei din bobina L.

4. Surse în comutație – Convertorul Push-Poll

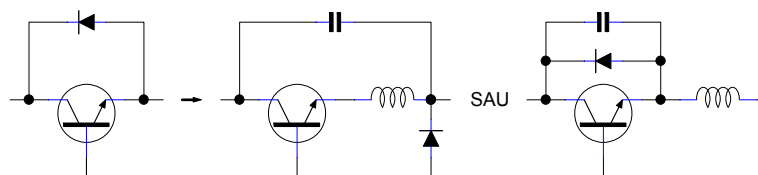


4. Surse in comutatie

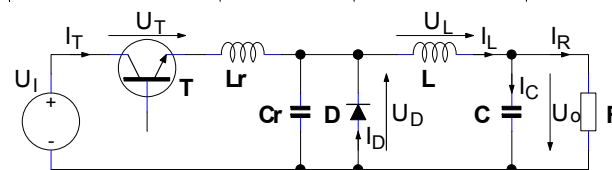
	Putere (W)	Vin (DC)	Separare In/Out	Eficienta %
Buck	0-1000	5-40	NU	78
Buck-Boost	0-150	5-40	NU	80
Boost	0-150	5-40	NU	80
Flyback	0-150	5-500	DA	78
Forward	0-150	5-500	DA	80
Push-Pull	100-1000	50-1000	DA	75
Half-bridge	100-500	50-1000	DA	75
Full-bridge	400-2000+	50-1000	DA	73

5. Convertoare Rezonante

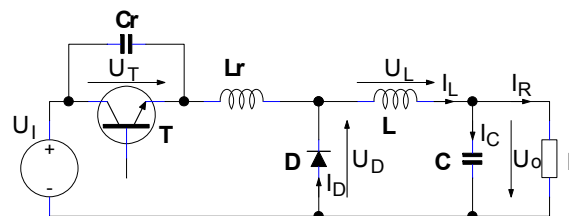
Convertoarele rezonante se bazează pe comutația cu elemente care înmagazinează energie și care permit comutări la tensiune și curent zero. O bobină în serie cu elementul de comutație permite comutații la curent zero, iar o capacitate în paralel cu elementul de comutație permite comutație la tensiune zero. Aceste convertoare sunt derivate din convertoarele de putere în comutație și sunt realizate pentru aplicații unde reducerea greutateii și a dimensiunilor sunt necesare pe lângă cea a emisiei de zgomot. Aceste circuite se utilizează în aviație, în electronica spațială și în echipamentele portabile. Dezavantajul acestor circuite este costul și timpul de proiectare mult mai mare.



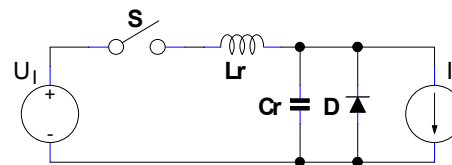
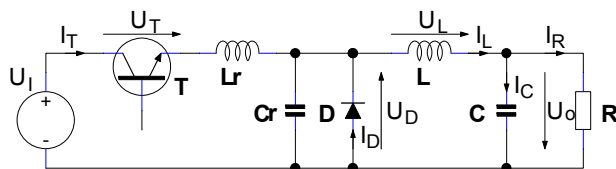
- Comutația la curent zero



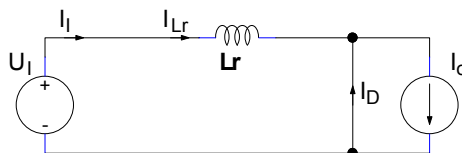
- Comutația la tensiune zero



5. Convertoare Rezonante – Comutarea la curent zero

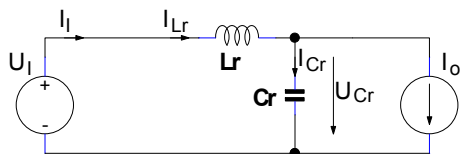


Intervalul de timp $[0, t_1]$



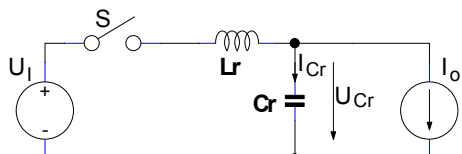
$$\begin{cases} \frac{di_{Lr}(t)}{dt} = \frac{U_I}{L_r} \\ \frac{du_{Cr}(t)}{dt} = 0 \end{cases}$$

Intervalul de timp $[t_1, t_2]$



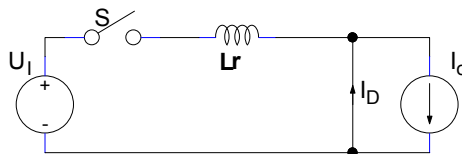
$$\begin{cases} \frac{di_{Lr}(t)}{dt} = \frac{U_I - u_{Cr}}{L_r} \\ \frac{du_{Cr}(t)}{dt} = \frac{i_{Lr} - I_o}{C_r} \end{cases}$$

Intervalul de timp $[t_2, t_3]$



$$\begin{cases} \frac{di_{Lr}(t)}{dt} = 0 \\ \frac{du_{Cr}(t)}{dt} = -\frac{I_o}{C_r} \end{cases}$$

Intervalul de timp $[t_3, T]$



$$\begin{cases} \frac{di_{Lr}(t)}{dt} = 0 \\ \frac{du_{Cr}(t)}{dt} = 0 \end{cases}$$

5. Convertoare Rezonante – Comutatia la curent zero

Intervalul de timp $[0, t_1]$

La momentul de timp $t = 0$ comutatorul comandat S este trecut din starea de blocare în starea de conducție, și în consecință, o parte din curentul sursei de curent I_0 va începe să circule și prin inductanța L_r și prin comutatorul comutat S. Ca urmare a faptului că $i_{L_r}(0) = 0$, dioda D este și ea în stare de conducție, pentru a asigura circulația restului din curentul de ieșire, I_0 .

Intervalul de timp $[t_1, t_2]$

La momentul de timp $t = t_1$, dioda D se blochează, iar comutatorul comandat S rămâne în continuare în stare de conducție. Blocarea diodei D determină ca tensiunea de la bornele condensatorului C_r să nu mai fie forțată la o valoare constantă, egală cu 0, și ca urmare, condensatorul C_r poate contribui la tendința de creștere a curentului care circulă prin inductanța L_r peste valoarea I_0 a sursei de curent de la ieșirea circuitului echivalent. Ca urmare, curenții prin inductanța L_r , i_{L_r} , și respectiv prin comutatorul comandat S, i_S , pe durata intervalului de timp $[t_1, t_2]$, sunt egal cu $I_0 + i_{C_r}$.

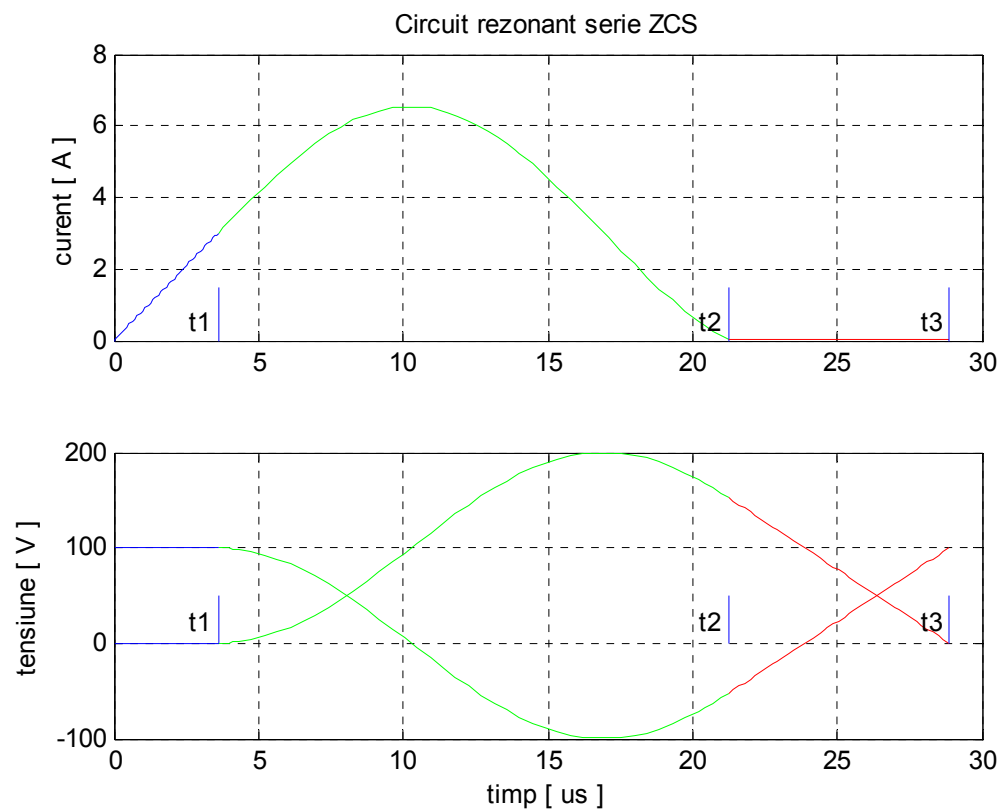
Intervalul de timp $[t_2, t_3]$

Ca urmare a anulării curentului care circulă prin inductanța L_r și comutatorul comandat S, la momentul de timp $t = t_2$, comutatorul comandat S trece în regim de blocare, chiar dacă acesta este comandat în continuare să conducă.

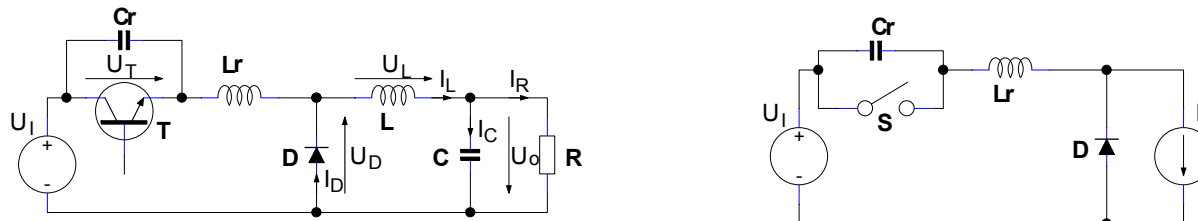
Intervalul de timp $[t_3, T]$

La momentul de timp $t = t_3$, tensiunea de la bornele condensatorului C_r , și respectiv tensiunea inversă de la bornele diodei D, devine egală cu 0 și în consecință, dioda D intră în regim de conducție.

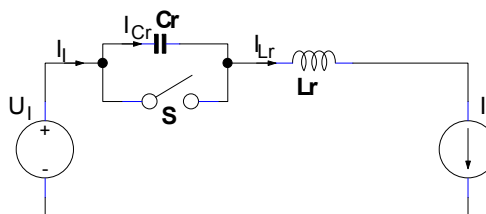
5. Convertoare Rezonante – Comutarea la curent zero



5. Convertoare Rezonante – Comutarea la tensiune zero

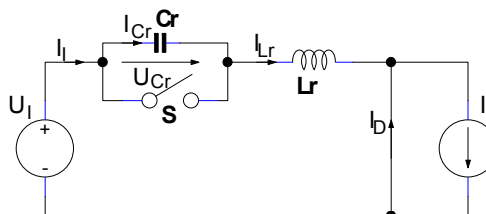


Intervalul de timp $[0, t_1]$



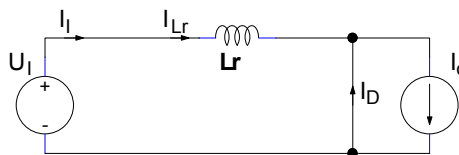
$$\begin{cases} \frac{di_{Lr}(t)}{dt} = 0 \\ \frac{du_{Cr}(t)}{dt} = \frac{I_o}{C_r} \end{cases}$$

Intervalul de timp $[t_1, t_2]$



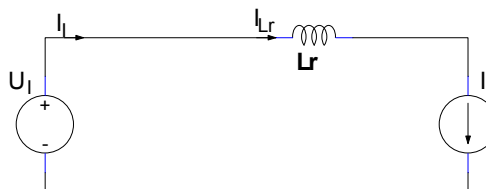
$$\begin{cases} \frac{di_{Lr}(t)}{dt} = \frac{U_I - u_{Cr}}{L_r} \\ \frac{du_{Cr}(t)}{dt} = \frac{i_{Lr}}{C_r} \end{cases}$$

Intervalul de timp $[t_2, t_3]$



$$\begin{cases} \frac{di_{Lr}(t)}{dt} = \frac{U_I}{L_r} \\ \frac{du_{Cr}(t)}{dt} = 0 \end{cases}$$

Intervalul de timp $[t_3, T]$



$$\begin{cases} \frac{di_{Lr}(t)}{dt} = 0 \\ \frac{du_{Cr}(t)}{dt} = 0 \end{cases}$$

5. Convertoare Rezonante – Comutatie la tensiune zero

Intervalul de timp $[0, t_1]$

La momentul de timp $t = 0$ comutatorul comandat S este trecut în starea de blocare și în consecință, curentul prin el se anulează. Tensiunea la bornele condensatorului C_r este inițial egală cu 0, ca urmare a stării de conducție a comutatorului anterior momentului de timp $t = 0$. În aceste condiții, curentul care trece prin inductanța L_r va circula și prin condensatorul C_r , determinând încărcarea acestuia. Trecerea conducției curentului i_{L_r} de pe comutatorul comandat S pe condensatorul C_r nu modifică tensiunea din catodul diodei D și în consecință, aceasta rămâne în continuare blocată ca și înainte de momentul de timp $t=0$.

Intervalul de timp $[t_1, t_2]$

La momentul de timp $t = t_1$ dioda D se deschide, iar comutatorul comandat S rămâne în continuare în starea de blocare. Intrarea în conducție a diodei D determină ca o parte din curentul sursei de curent I să circule și prin dioda D și ca urmare, curenții care circulă prin inductanța L_r , i_{L_r} , și respectiv prin C_r , i_{C_r} , sunt egali cu diferența dintre curentul de ieșire și curentul prin dioda D : $i_{L_r} = i_{C_r} = I_O - i_D$. Condensatorul C_r și inductanța L_r formează un circuit rezonant serie alimentat de sursa de tensiune E și respectiv sursa de curent I .

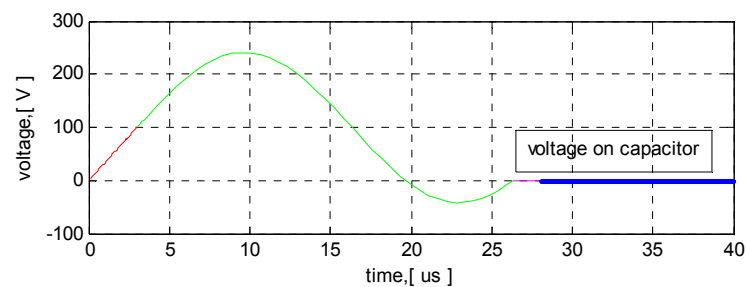
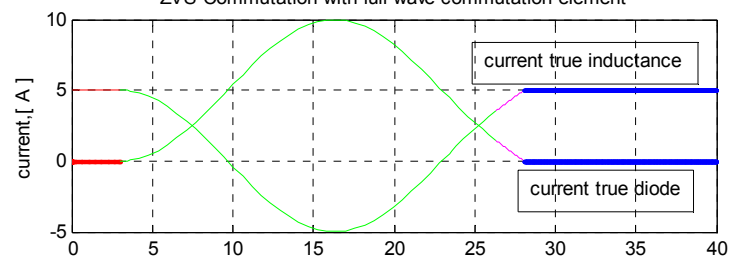
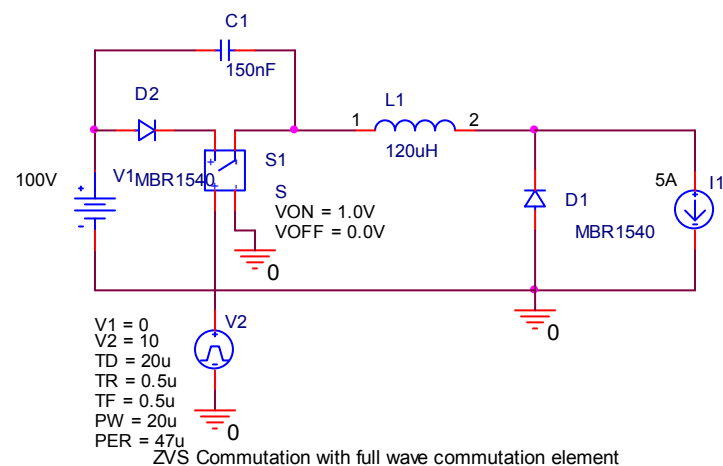
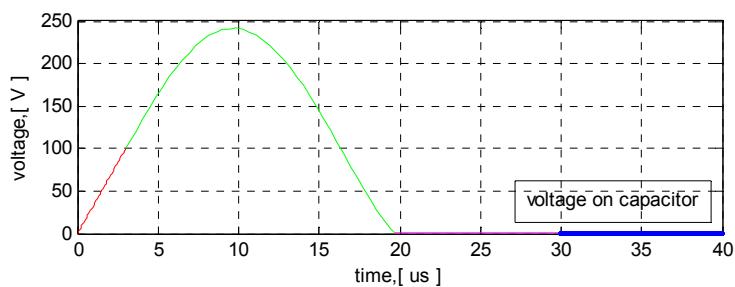
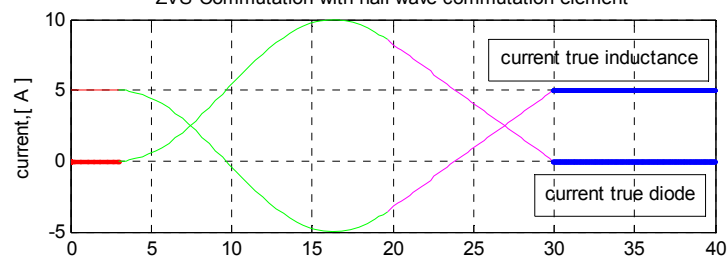
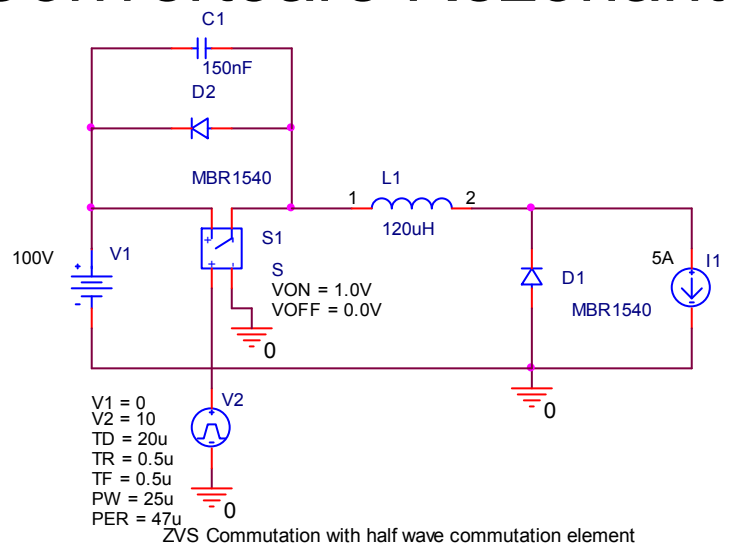
Intervalul de timp $[t_2, t_3]$

Ca urmare a faptului că tensiunea de la bornele comutatorului comandat S , u_S , devine egală cu 0 la momentul de timp t_3 , acesta poate fi adus (și este adus) în starea de conducție începând cu acest moment de timp, chiar dacă semnalul de comandă este anterior momentului respectiv. Pe același interval de timp, dioda D rămâne în continuare în conducție, asigurând circulația unei părți a curentului sursei de curent I .

Intervalul de timp $[t_3, T]$

La momentul de timp $t = t_4$, curentul care circulă prin dioda D se anulează și ca urmare, dioda se blochează, iar comutatorul comandat S rămâne în continuare în regim de conducție.

5. Convertoare Rezonante – Comutarea la tensiune zero





Concluzii

	Reglatoare Liniare	Surse in Comutatie	Convertoare Rezonante
Cost	mic	mare	mare
Greutate	mare	mica-medie	mica-medie
Zgomot	deloc	mare	mediu
Eficienta	35-50%	70-85%	80-90%
Iesiri multiple	NU	DA	DA
Timp de executie	mic	mare	mare

6. Factorul de putere

Se definește factorul de putere ca raportul între puterea activă și puterea aparentă:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{(\text{average_power})}{(\text{rms_voltage})(\text{rms_current})}$$

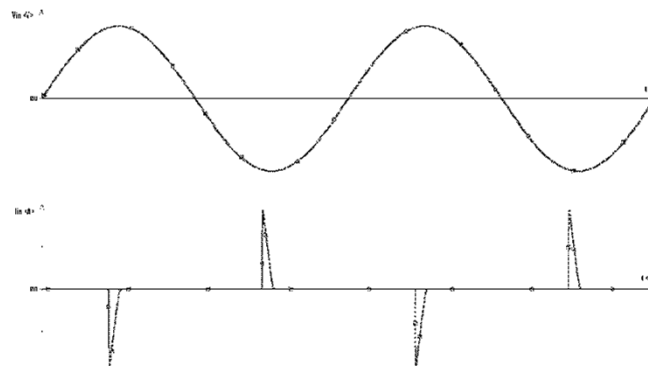
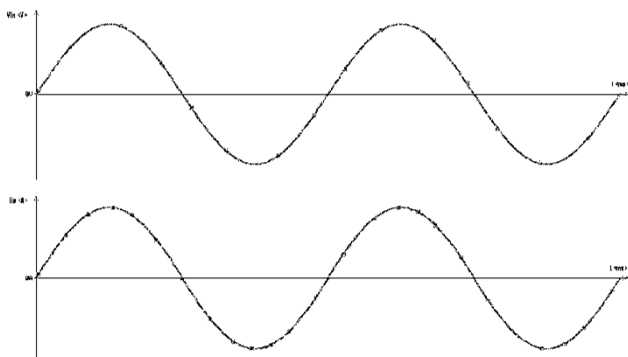
Cu alte cuvinte, factorul de putere arată ce cantitate din puterea aparentă reprezintă puterea activă.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{S \cdot \cos \alpha}{S} = \cos \alpha$$

deci factorul de putere este egal cu cosinusul unghiului de defazaj dintre tensiune și curent, putând varia în intervalul (0, 1).

Când factorul de putere are valoarea sa maximă, adică $\cos(\alpha) = 1$, puterea activă devine $P = UI$ și are valoarea maximă, egală cu puterea aparentă. Prin urmare puterea aparentă S este puterea activă maximă care poate să fie dată de o sursă pentru o anumită tensiune U un anumit curent I . Neegalitatea dintre puterea aparentă și cea activă se datorează faptului că în afara de curentul activ, în fază cu tensiunea, receptorul mai absoarbe un curent reactiv, defazat cu $\pi/2$ în urmă sau înaintea tensiunii (la receptori inductivi respectiv capacitivi), corespunzător, receptorul absoarbe o putere reactivă $Q = UI \times \sin(\alpha)$.

6. Factorul de putere



Datorita faptului ca tensiunea de intrare are o forma sinusoidala putem spune ca $V_0 = V_2 = V_3 = \dots = 0$. In acest caz, componentele Fourier ale tensiunii respectiv curentului devin:

$$v(t) = V_1 \cos(\omega t + \varphi)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t + \theta_n)$$

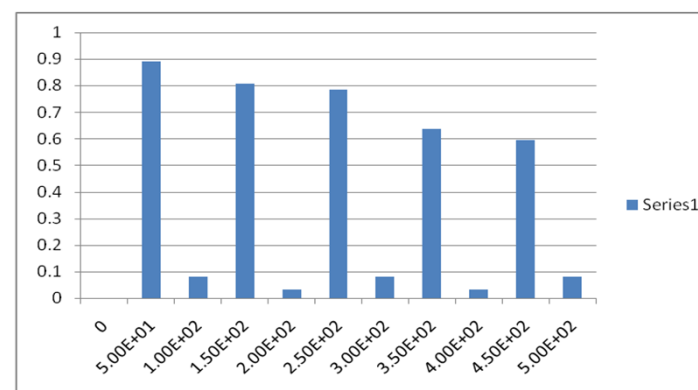
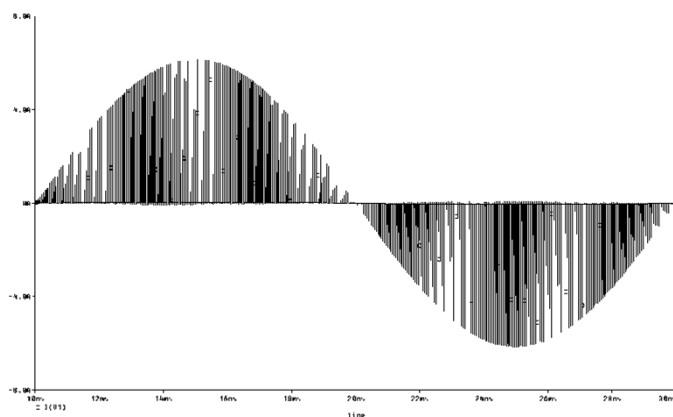
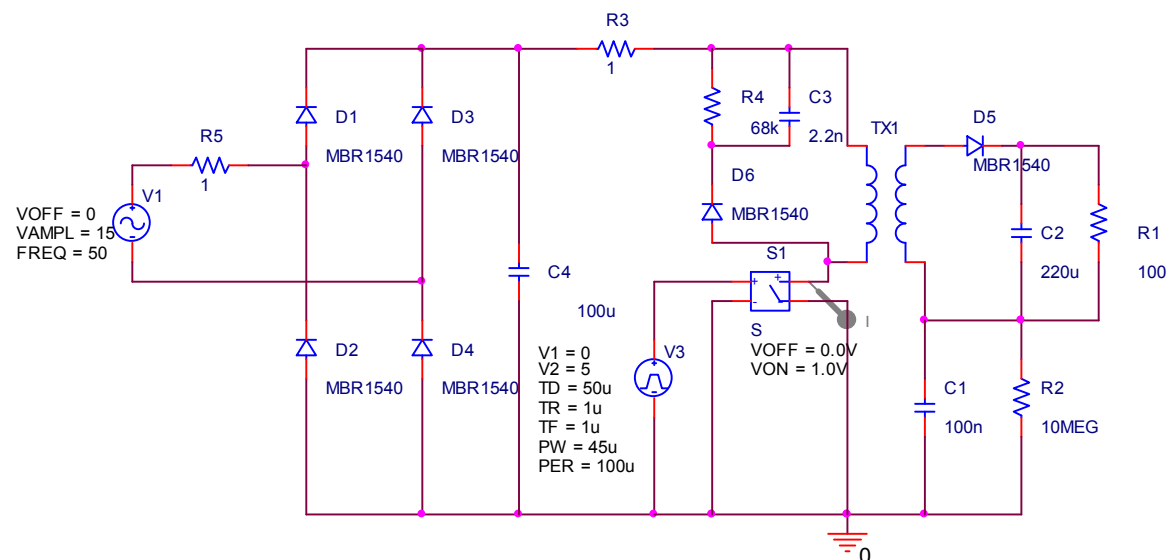
$$P = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos(\varphi_k - \theta_k) = \frac{V_1 I_1}{2} \cos(\varphi - \theta_1)$$

$$S = U_{ef} I_{ef}$$

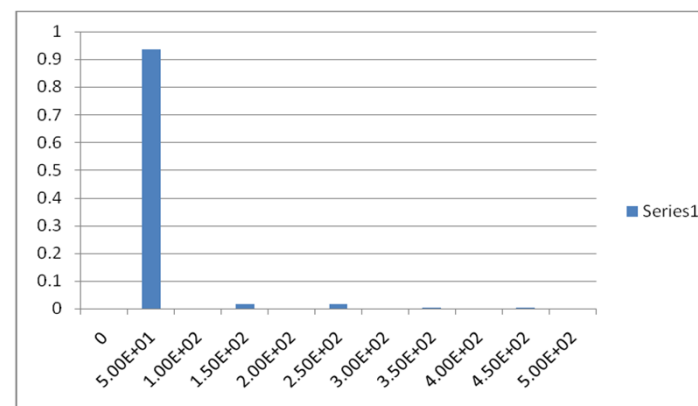
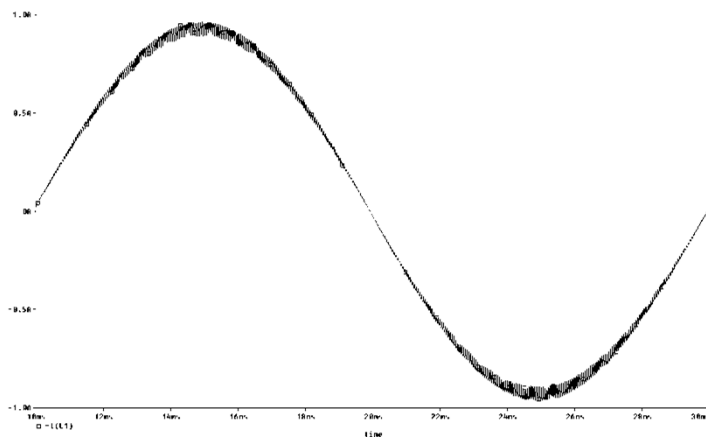
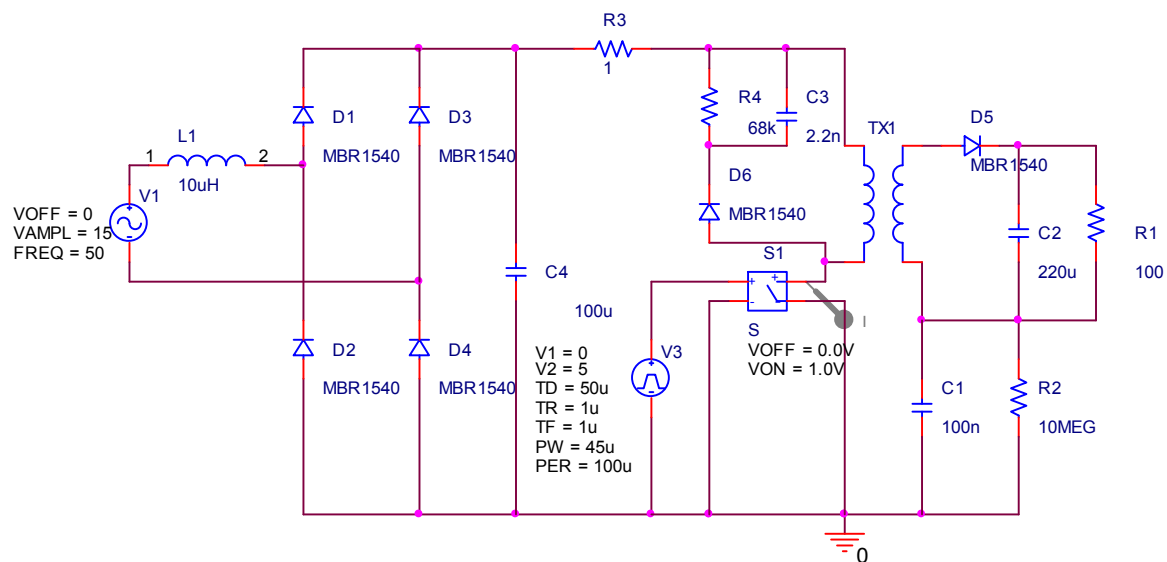
$$I_{ef} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}} \quad ; \quad V_{ef} = \frac{V_1}{\sqrt{2}}$$

$$PF = \left(\frac{\frac{I_1}{\sqrt{2}}}{\sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{2}}} \right) (\cos(\varphi_1 - \theta_1))$$

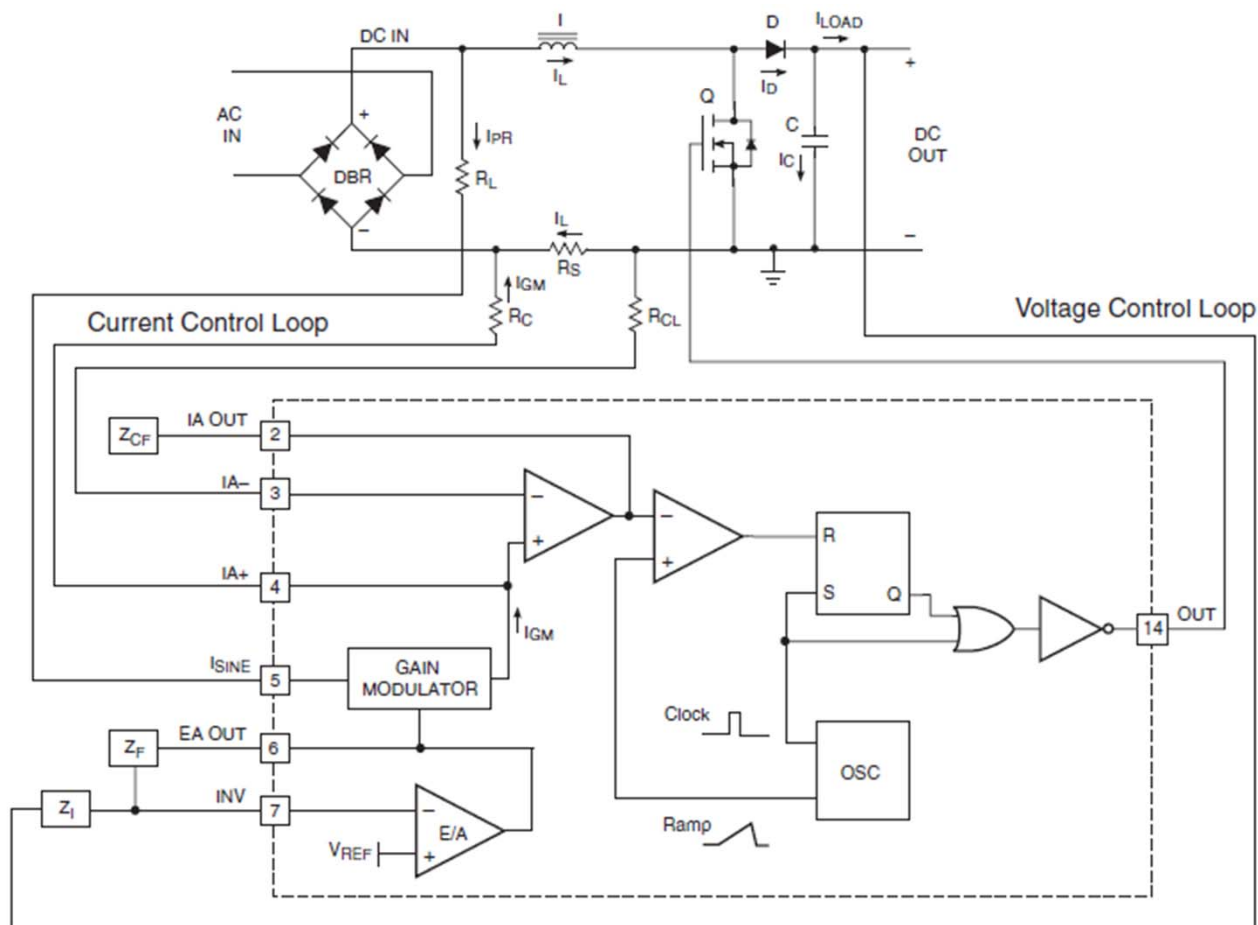
6. Factorul de putere



6. Factorul de putere



6. Factorul de putere





Mulumesc !!!