# Buck konvertor, primer

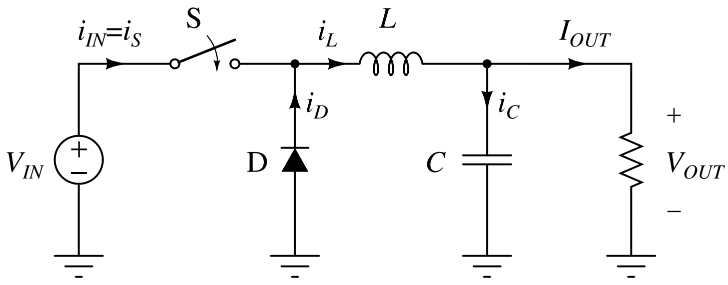
Predrag Pejović

2. april 2011

U cilju ilustrovanja postupka formiranja usrednjenog modela stanja prekidačkih konvertora i modela koji se iz njega mogu izvesti: nelinearnog dinamičkog modela, modela za ustaljeno stanje i linearizovanog modela, ovde će biti prikazana navedena izvođenja za buck konvertor. Takođe, biće prikazano izvođenje funkcija prenosa za linearizovani model konvertora.

## 1 Modeli stanja za pojedinačna stanja konvertora

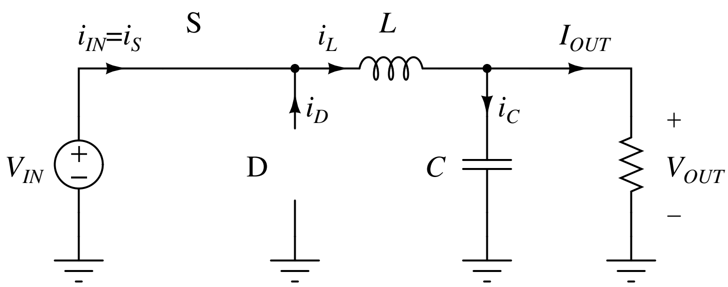
Buck konvertor koji će biti razmatran je prikazan na slici 1. Kako bi analiza bila jednostavnija, smatraćemo da su prekidač i dioda idealni. Osim toga, smatraćemo da su i kalem i kondenzator idealni, bez gubitaka. Upravo u suprotnoj situaciji, u prisustvu gubitaka, vrednost formalizovanog postupka usrednjavanja modela stanja se jasno vidi, pre svega kod modela ustaljenog stanja.




Slika 1: Buck konvertor

### 1.1 Stanje 1

U stanju koje će biti označeno kao „stanje 1“ vodi prekidač, dok je dioda neprovodna. Ekvivalentno kolo je prikazano na slici 2. Ekvivalentno kolo je linearno i stacionarno.




Slika 2: Buck konvertor, uključen prekidač

Jednačine stanja kola sa slike 2 se izvode iz

$$v_L = L\,\frac{di_L}{dt} = v_{IN} - v_{OUT} = v_{IN} - v_C$$

i

$$i_C = C\,\frac{dv_C}{dt} = i_L - i_{OUT}.$$

Pod izlaznim promenljivim ćemo smatrati izlazni napon $v_{OUT}$ i ulaznu struju $i_{IN}$. Izbor je donekle proizvoljan, u ovom slučaju uslovljen željom da se konvertor predstavi preko dvoportne mreže. Skup promenljivih koje se posmatraju preko jednačina izlaza može biti i drugačiji. Pri usvojenom skupu izlaznih promenljivih imamo jednačine izlaza

$$v_{OUT} = v_C$$

i

$$i_{IN} = i_S = i_L.$$

U matričnoj formi jednačine stanja se mogu zapisati kao

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{IN} \\ i_{OUT} \end{bmatrix}$$

odnosno

$$\frac{d\,\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}_1\,\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\,\mathbf{u}$$

gde je

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix}$$

vektor promenljivih stanja,

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

i

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

su matrice koeficijenata jednačina stanja linearnog stacionarnog sistema, a vektor

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} v_{IN} \\ i_{OUT} \end{bmatrix}$$

je vektor ulaznih promenljivih.

Jednačine izlaza zapisane u matričnoj formi su

$$\begin{bmatrix} v_{OUT} \\ i_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{IN} \\ i_{OUT} \end{bmatrix}$$

gde je

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_1\,\mathbf{x} + \mathbf{D}_1\,\mathbf{u}$$

vektor izlaznih promenljivih, a

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

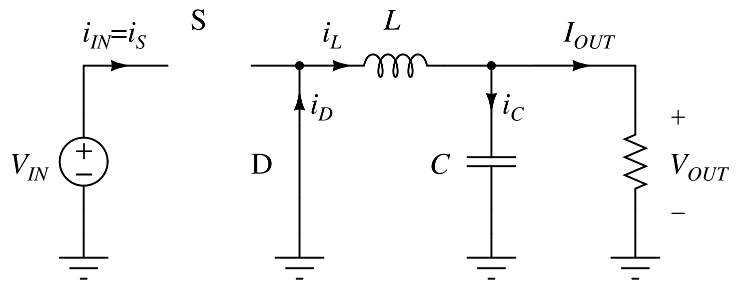
i

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

su matrice koeficijenata jednačina izlaza linearnog stacionarnog sistema.

## 1.2 Stanje 2

U stanju koje će biti označeno kao „stanje 2“ prekidač ne vodi, dok je dioda provodna. Ekvivalentno kolo je prikazano na slici 3. Ekvivalentno kolo je linearno i stacionarno.




Slika 3: Buck konvertor, isključen prekidač, dioda vodi

Jednačine stanja kola sa slike 2 se izvode iz

$$v_L = L\,\frac{di_L}{dt} = -v_{OUT} = -v_C$$

i

$$i_C = C\,\frac{dv_C}{dt} = i_L - i_{OUT}.$$

Uzimajući isti vektor izlaznih promenljivih kao i za sistem jednačina za „stanje 1“, jednačine izlaza su

$$v_{OUT} = v_C$$

i

$$i_{IN} = 0.$$

Jednačine stanja zapisane u matričnoj formi su

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{IN} \\ i_{OUT} \end{bmatrix}$$

što se sažima na

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}_2\,\mathbf{x} + \mathbf{B}_2\,\mathbf{u}$$

gde je

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

i

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

dok su $\mathbf{x}$ i $\mathbf{u}$ isti kao i u slučaju „stanja 1“.

Jednačine izlaza u matričnoj formi su

$$\begin{bmatrix} v_{OUT} \\ i_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_L \\ v_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_{IN} \\ i_{OUT} \end{bmatrix}$$

što se sažima na

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_2\,\mathbf{x} + \mathbf{D}_2\,\mathbf{u}$$

gde je

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

i

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

a $\mathbf{y}$ je vektor izlaznih promenljivih, isti kao i za „stanje 1".

# 2 Usrednjene matrice modela stanja

U skladu sa prethodno prikazanim izvođenjima, usrednjene matrice modela stanja koje učestvuju u formiranju jednačina stanja su

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1\, D_0 + \mathbf{A}_2\, D_0' = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

i

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1\, D_0 + \mathbf{B}_2\, D_0' = \begin{bmatrix} \frac{D_0}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix}$$

dok su usrednjene matrice koje učestvuju u formiranju jednačina izlaza

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_1\, D_0 + \mathbf{C}_2\, D_0' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ D_0 & 0 \end{bmatrix}$$

i

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_1\, D_0 + \mathbf{D}_2\, D_0' = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Vektor koji se u linearizovanom modelu množi sa $\widehat{d}$ i učestvuje u jednačinama stanja je

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= (\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2)\ \mathbf{X}_0 + (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2)\ \mathbf{U}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{IN} \\ I_{OUT} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{V_{IN}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

dok je odgovarajući vektor koji učestvuje u jednačinama izlaza

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= (\mathbf{C}_1 - \mathbf{C}_2)\ \mathbf{X}_0 + (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2)\ \mathbf{U}_0 \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{IN} \\ I_{OUT} \end{bmatrix}. \\ &= \begin{bmatrix} 0 \\ I_L \end{bmatrix} \end{aligned}$$

# 3 Mirna radna tačka

Jednačine koje karakterišu konvertor u mirnoj radnoj tački su

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D_0}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{IN} \\ I_{OUT} \end{bmatrix}$$

što se svodi na

$$0 = -\frac{1}{L}\,V_C + \frac{D_0}{L}\,V_{IN}$$

i

$$0 = \frac{1}{C}\,I_L - \frac{1}{C}\,I_{OUT}$$

odakle je

$$V_C = D_0\,V_{IN}$$

i

$$I_L = I_{OUT}.$$

Jednačine izlaza u mirnoj radnoj tački su

$$\begin{bmatrix} V_{OUT} \\ I_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ D_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{IN} \\ I_{OUT} \end{bmatrix}$$

što se svodi na

$$V_{OUT} = V_C$$

i

$$I_{IN} = D_0\,I_L.$$

Izvedene jednačine je bilo moguće dobiti i direktno, neposrednom analizom ustaljenog stanja primenom *Vs-balance* i *As-balance*, ali je formalni postupak preko usrednjenog modela stanja jednostavniji kada se parazitni elementi uključuju u analizu.

# 4 Nelinearni dinamički model

Nelinearni dinamički model konvertora zanemaruje visokofrekvencijsku talasnost, ali uključuje deo nelinearnih efekata u konvertoru. Jednačine stanja nelinearnog dinamičkog modela razmatranog buck konvertora su

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \overline{i_L(t)} \\ \overline{v_C(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{i_L(t)} \\ \overline{v_C(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d(t)}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{v_{IN}(t)} \\ \overline{i_{OUT}(t)} \end{bmatrix}$$

i

$$\begin{bmatrix} \overline{v_{OUT}(t)} \\ \overline{i_{IN}(t)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ d(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{i_L(t)} \\ \overline{v_C(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{v_{IN}(t)} \\ \overline{i_{OUT}(t)} \end{bmatrix}.$$

Numeričkom simulacijom jednačina nelinearnog dinamičkog modela se može dobiti dosta dobar uvid u događanja u konvertoru tokom prelaznih režima, ali zbog nelinearnosti on ne omogućuje jednostavnu primenu algoritama sinteze regulatora razvijenih za linearne sisteme automatskog upravljanja.

# 5 Linearizovan model

Linearizovan model konvertora je na nivou jednačina stanja dat sa

$$\frac{d\,\widehat{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{A}\,\widehat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\,\widehat{\mathbf{u}} + \mathbf{E}\,\widehat{d}$$

što se posle zamene svodi na

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \widehat{i}_L \\ \widehat{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{i}_L \\ \widehat{v}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D_0}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{v}_{IN} \\ \widehat{i}_{OUT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{IN}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \widehat{d}.$$

Jednačina izlaza u linearizovanom modelu je

$$\widehat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\,\widehat{\mathbf{x}} + \mathbf{D}\,\widehat{\mathbf{u}} + \mathbf{F}\,\widehat{d}$$

što se posle zamene svodi na

$$\begin{bmatrix} \widehat{v}_{OUT} \\ \widehat{i}_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ D_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{i}_L \\ \widehat{v}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{v}_{IN} \\ \widehat{i}_{OUT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I_L \end{bmatrix} \widehat{d}.$$

Dobijene jednačine linearizovanog modela u potpunosti karakterišu konvertor. Međutim, forma jednačina se ne poklapa sa uobičajenom formom jednačina stanja koja se koristi u teoriji sistema automatskog upravljanja. Ovo se pre svega odnosi na vektor ulaznih promenljivih koji je u prikazanoj formi jednačina razdvojen na $\widehat{\mathbf{u}}$ i $\widehat{d}$. U cilju direktnog korišćenja gotovih rezultata izvedenih u teoriji sistema automatsko upravljanja, povoljno je preimenovati promenljive kako bi jednačine dobile standardnu formu.

# 6 Promena označavanja

Kako je nagovešteno u prethodnom odeljku, povoljno je jednačine stanja svesti na standardnu formu koja se koristi u teoriji sistema automatskog upravljanja,

$$\frac{d\,\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\;\;\mathbf{x} + \mathbf{B}\,\mathbf{u}$$

i

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\,\mathbf{x} + \mathbf{D}\,\mathbf{u}.$$

Kako je

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \widehat{i}_L \\ \widehat{v}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{i}_L \\ \widehat{v}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D_0}{L} & 0 & \frac{V_{IN}}{L} \\ 0 & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{v}_{IN} \\ \widehat{i}_{OUT} \\ \widehat{d} \end{bmatrix}$$

i

$$\begin{bmatrix} \widehat{v}_{OUT} \\ \widehat{i}_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ D_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{i}_L \\ \widehat{v}_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{v}_{IN} \\ \widehat{i}_{OUT} \\ \widehat{d} \end{bmatrix}$$

vektori i matrice modela stanja se u skladu sa **novim** označavanjem definišu kao

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \widehat{i}_L \\ \widehat{v}_C \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{D_0}{L} & 0 & \frac{V_{IN}}{L} \\ 0 & -\frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \widehat{v}_{IN} \\ \widehat{i}_{OUT} \\ \widehat{d} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ D_0 & 0 \end{bmatrix}$$

i

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_L \end{bmatrix}.$$

Novouvedeno označavanje će biti korišćeno u daljoj analizi funkcija prenosa. Uvodjenje „novih“ označavanja gde ranije korišćeni simboli dobijaju novo značenje nikada nije popularno. Ipak, u ovom slučaju je to rešenje izabrano kao manje loše, pošto bi uvođenje brojnih nestandardnih oznaka, koje je alternativa, izazvalo veću pometnju nego što bi stvari učinilo jasnim. Dakle, od uvođenja **novog** označavanja u linearnom modelu, koje je karakterisano time što $\widehat{d}$ nema poseban vektor kojim se množi, već ulazi u standardan vektor ulaznih promenljivih, oznake za matrice **A**, **B**, **C** i **D** imaju novo značenje. Takve, izmenjene, matrice se koriste u izvođenjima funkcija prenosa.

# 7 Funkcije prenosa

Primenom Lapalasove transformacije i prelaskom u kompleksni domen jednačine stanja dobijaju formu

$$s\,\mathbf{x}(s) = \mathbf{A}\,\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}\,\mathbf{u}(s)$$

i

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{C}\,\mathbf{x}(s) + \mathbf{D}\,\mathbf{u}(s).$$

Pošto su jednačine stanja primenom Laplasove transformacije svedene na algebarske jednačine, njihovo rešavanje je pojednostavljeno i svodi se na

$$(s\,\mathbf{I} - \mathbf{A})\ \mathbf{x}(s) = \mathbf{B}\,\mathbf{u}(s)$$

odakle je

$$\mathbf{x}(s) = \big((s\,\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\ \mathbf{B}\big)\ \mathbf{u}(s).$$

Iz gornje jednačine se identifikuje matrica funkcija prenosa od ulaznih promenljivih do promenljivih stanja

$$\mathbf{T}_{\mathbf{xu}}(s) = \big((s\,\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\ \mathbf{B}\big)$$

pa je

$$\mathbf{x}(s) = \mathbf{T}_{\mathbf{xu}}(s)\,\mathbf{u}(s).$$

Zamenom u jednačinu izlaza se dobija

$$\mathbf{y}(s) = \big(\mathbf{C}\ (s\,\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\ \mathbf{B} + \mathbf{D}\big)\ \mathbf{u}(s).$$

pa je

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{T}_{\mathbf{yu}}(s)\,\mathbf{u}(s).$$

gde je

$$\mathbf{T}_{\mathbf{yu}}(s) = \mathbf{C}\ (s\,\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\ \mathbf{B} + \mathbf{D}$$

matrica funkcija prenosa od ulaza do izlaza.

U razmatranom slučaju buck konvertora koji služi kao primer imamo

$$s\,\mathbf{I} - \mathbf{A} = \begin{bmatrix} s & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s \end{bmatrix}$$

pa je

$$(s\,\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \frac{LC}{1 + s^2 LC} \begin{bmatrix} s & -1 \\ 1 & s \end{bmatrix}.$$

Daljom zamenom se dobijaju funkcije prenosa od ulaznih promenljivih do promenljivih stanja

$$\widehat{i}_L(s) = \frac{s\,C\,D_0}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{v}_{IN}(s) + \frac{1}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{i}_{OUT}(s) + \frac{s\,C\,V_{IN}}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{d}(s)$$

i

$$\widehat{v}_C(s) = \frac{D_0}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{v}_{IN}(s) - \frac{s\,L}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{i}_{OUT}(s) + \frac{V_{IN}}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{d}(s)$$

dok su funkcije prenosa od ulaznih promenljivih do izlaznog napona

$$\begin{aligned}\widehat{v}_{OUT}(s) &= \widehat{v}_C(s)\\ &= \frac{D_0}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{v}_{IN}(s) - \frac{s\,L}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{i}_{OUT}(s) + \frac{V_{IN}}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{d}(s)\\ &= H_{vv}(s)\,\widehat{v}_{IN}(s) + H_{vi}(s)\,\widehat{i}_{OUT}(s) + H_{vd}(s)\,\widehat{d}(s)\end{aligned}$$

gde je

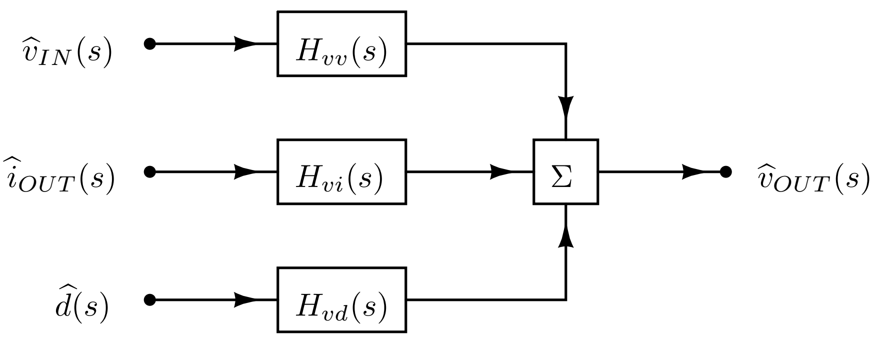
$$H_{vv}(s) = \frac{D_0}{1+s^2\,L\,C}$$

$$H_{vi}(s) = -\frac{s\,L}{1+s^2\,L\,C}$$

i

$$H_{vd}(s) = \frac{V_{IN}}{1+s^2\,L\,C}.$$

Dobijene tri funkcije prenosa koje povezuju ulazne promenljive i izlazni napon su od velike važnosti za zatvaranje povratne sprege primenom impulsne širinske modulacije, kada je $\widehat{d}$ upravljačka promenljiva, a $\widehat{v}_{IN}$ i $\widehat{i}_{OUT}$ su poremećaji čiji uticaj na izlazni napon treba kompenzovati, odnosno svesti na najmanju moguću meru. Strukturni blok dijagram sistema karakterisanog sa tri izvedene funkcije prenosa je dat na slici 4.




Slika 4: Strukturni blok dijagram funkcija prenosa do izlaznog napona

Slično kao i izlazni napon, i ulazna struja, koja je druga izlazna promenljiva, može se funkcijama prenosa povezati sa ulaznim promenljivim,

$$\widehat{i}_{IN}(s) = \frac{s\,C\,D_0^2}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{v}_{IN} - \frac{D_0}{1+s^2\,L\,C}\,\widehat{i}_{OUT} + \left(I_L + \frac{s\,C\,D_0\,V_{IN}}{1+s^2\,L\,C}\right)\,\widehat{d}.$$

Ove funkcije prenosa neće biti od značaja za projektovanje regulatora izlaznog napona, sve dok se podrazumeva da se konvertor napaja iz idealnog naponskog izvora. Međutim, ako se na ulazu konvertora nalazi filter za uklanjanje elektromagnetske interferencije, ove funkcije prenosa dobijaju na značaju, delom zbog projektovanja filtra, delom zbog mogućeg uticaja filtra na regulaciju izlaznog napona.

# 8 Nelinearna ograničenja

Izvedeni linearni model konvertora je jednostavan i povoljan za primenu uobičajenih algoritama za projektovanje regulatora linearnog sistema automatskog upravljanja. Međutim, treba imati u vidu da je model samo aproksimacija realne situacije i da ne uzima u razmatranje niz nelinearnih efekata.

Jedan od nelinearnih efekata koje treba imati u vidu je zasićenje impulsnog širinskog modulatora, po kome je

$$0 \le d(t) \le 1$$

što se u terminima vrednosti $d(t)$ u mirnoj radnoj tački i perturbacije svodi na

$$0 \le D_0 + \widehat{d}(t) \le 1$$

odakle je

$$-D_0 \le \widehat{d}(t) \le D_0'.$$

Drugo izraženo nelinearno ograničenje je prelazak konvertora u diskontinualni režim rada. Po ovom ograničenju izraženom u najgrubljoj formi je

$$i_L(t) > 0.$$

Međutim, treba imati u vidu da će pre nastupanja ovog ograničenja konvertor preći u diskontinualni režim rada koji je karakterisan potpuno drugačijom dinamikom.