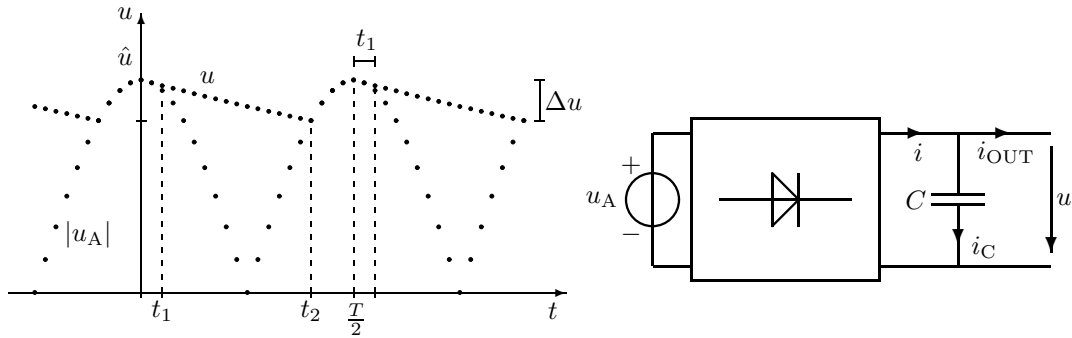


Kirjasta pois jätettyä materiaalia. Versio 25.9.2003.

Huipputasasuuntaajan tarkempi analyysi

Käsitellään **vakiovirtakuormaa** ja **vakioresistanssikuormaa** erikseen¹. Yksinkertaisuuden vuoksi diodien kynnysjännitteitä ei kuitenkaan oteta huomioon. Koska kondensaattorin purkauskäyrä putoaa aluksi nopeammin kuin sinikäyrä, latautuu kondensaattori vielä hieman huippukohdan jälkeenkin (hetki t_1 kuvassa 1).



Kuva 1. Kondensaattori purkautuu ajan $t_1 \dots t_2$ ja varautuu jakson $t_2 \dots (T/2 + t_1)$.

Vakiovirtakuorma

Vakiovirtakuormalla ($i_{\text{OUT}} = I_{\text{OUT}}$) kondensaattorin jännite on muotoa:

$$u = \begin{cases} \hat{u} \cos \omega t & 0 \leq t \leq t_1 \\ \hat{u} \cos \omega t_1 - \frac{I_{\text{OUT}}}{C} (t - t_1) & t_1 \leq t \leq t_2 \\ -\hat{u} \cos \omega t & t_2 \leq t \leq \frac{T}{2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

Kohdassa t_2 jännite on rippelin Δu verran alempana kuin huippukohdassa:

$$-\hat{u} \cos \omega t_2 = \hat{u} - \Delta u \Rightarrow \cos \omega t_2 = \frac{\Delta u}{\hat{u}} - 1 \quad (3)$$

Tasasuuntaajalta otettu virta:

$$i = \begin{cases} I_{\text{OUT}} + C \frac{du}{dt} = I_{\text{OUT}} - \omega C \hat{u} \sin \omega t & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ I_{\text{OUT}} + C \frac{du}{dt} & t_2 \leq t \leq \frac{T}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Kun latautuminen päättyy kohdassa t_1 , on virta $i = 0$:

$$i(t_1) = I_{\text{OUT}} - \omega C \hat{u} \sin \omega t_1 = 0 \Rightarrow \sin \omega t_1 = \frac{I_{\text{OUT}}}{\omega C \hat{u}} \quad (5)$$

¹Tässä esitetty "tarkka" analyysi perustuu Shermanin ja Hamacherin artikkeliin: *Power Supply Design in Undergraduate Curriculum*, IEEE Trans. Educ. Vol. 40(4): 278-282.

Virta i on maksimissaan hetkellä, jolla laskeva ramppi on kohdannut nousevan sinikäyrän (kohta t_2).

$$i_{\max} = I_{\text{OUT}} \left(1 + \frac{\sin \omega t_2}{\sin \omega t_1} \right) \quad (6)$$

Jännitteen tulee olla jatkuva myös kohdassa t_2 :

$$\hat{u} \cos \omega t_1 - \frac{I_{\text{OUT}}}{C} (t - t_1) = -\hat{u} \cos \omega t \quad (7)$$

$$\Rightarrow \cos \omega t_1 + \cos \omega t_2 - \omega(t_2 - t_1) \sin \omega t_1 = 0 \quad (8)$$

Kaavasta voi laskea t_1 :n iteroimalla. Seuraava kokeellisesti johdettu likiarvokaava antaa tuloksen alle puolen prosentin virheellä, kun $\Delta u \leq 0,8\hat{u}$:

$$\sin \omega t_1 = \frac{I_{\text{OUT}}}{\omega C \hat{u}} \approx \frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{\Delta u}{\hat{u}}} - 0,07 - 0,195 \left(\frac{\Delta u}{\hat{u}} \right)^2 \right) \arccos \left(\frac{\Delta u}{\hat{u}} - 1 \right)} \quad (9)$$

Tasasuuntaajan ja toisiokäämin virran tehollisarvoksi voidaan johtaa:

$$\frac{I}{I_{\text{OUT}}} = \sqrt{\frac{\pi - \omega t_{12}}{\pi} + \frac{\cos \omega t_1 + \cos \omega t_2}{\frac{1}{2}\pi \sin \omega t_1} + \frac{\pi - \omega t_{12} + \frac{1}{2}(\sin 2\omega t_2 - \sin 2\omega t_1)}{2\pi \sin^2 \omega t_1}}$$

missä $t_{12} = t_2 - t_1$. Virran tehollisarvo on aina vähintään 1,22-kertainen verrattuna kuormavirtaan I_{OUT} ja kohoaa hyvin paljon suuremmaksi pienillä Δu :n arvoilla. Tällekin tulokselle on johdettu kokeellinen likiarvokaava (virhe alle 0,5 %, kun $0,1\hat{u} \leq \Delta u \leq 0,9\hat{u}$).

$$I = I_{\text{OUT}} \sqrt{\frac{3,96 - 1,37 \left(\frac{\Delta u}{\hat{u}} \right)}{\pi - \arccos \left(\frac{\Delta u}{\hat{u}} - 1 \right)}} \quad (11)$$

Vakioresistanssikuorma

Vakioresistanssikuorma ($i_{\text{OUT}} = \frac{u}{R}$) eroaa edellisestä siinä, että nyt jännitteen laskeva ramppi on eksponenttikäyrän muotoinen.

$$u = \begin{cases} \hat{u} \cos \omega t & 0 \leq t \leq t_1 \\ \hat{u} \cos \omega t_1 e^{-\frac{t-t_1}{RC}} & t_1 \leq t \leq t_2 \\ -\hat{u} \cos \omega t & t_2 \leq t \leq \frac{T}{2} \end{cases} \quad (12)$$

Välillä $0 \leq t \leq t_1$ virta on muotoa:

$$i = \frac{u}{R} + C \frac{du}{dt} = \frac{\hat{u}}{R} \cos \omega t - \omega C \hat{u} \sin \omega t \quad (13)$$

$$i(t_1) = 0 \Rightarrow \tan \omega t_1 = \frac{1}{\omega C R} \quad (14)$$

Myös tässä tapauksessa ωt_2 on verrannollinen rippeliin:

$$\cos \omega t_2 = \frac{\Delta u}{\hat{u}} - 1 \quad (15)$$

Jatkuvuusehdon perusteella:

$$\cos \omega t_2 + \cos \omega t_1 e^{-\omega(t_2-t_1) \tan \omega t_1} = 0 \quad (16)$$

Yhtälöstä voi ratkaista t_1 :n iteroimalla. Approksimaationa (virhe alle 0,5 %, kun $\Delta u \leq 0,8\hat{u}$):

$$\tan \omega t_1 = \frac{1}{\omega CR} \approx \frac{1}{\left(\frac{1}{\frac{\Delta u}{\hat{u}}} - 0,586 - 0,358 \left(\frac{\Delta u}{\hat{u}}\right)^2\right) \arccos\left(\frac{\Delta u}{\hat{u}} - 1\right)} \quad (17)$$

Tasasuuntaajan virta suhteutettuna maksimikuormavirtaan:

$$\frac{i}{\frac{\hat{u}}{R}} = \begin{cases} \cos \omega t - \frac{\sin \omega t}{\tan \omega t_1} & 0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ -\left(\cos \omega t - \frac{\sin \omega t}{\tan \omega t_1}\right) & t_2 \leq t \leq \frac{T}{2} \end{cases} \quad (18)$$

Se saavuttaa maksiminsa kohdassa t_2 , jos rippeli on pieni tai keskisuuri ($\Delta u < 0,57\hat{u}$):

$$i_{\max} = \frac{\hat{u}}{R} \left(-\cos \omega t_2 + \frac{\sin \omega t_2}{\tan \omega t_1} \right) \quad (19)$$

Jännitteen funktiona vaihtelevan kuormavirran keskiarvoksi tulee:

$$I_{\text{OUT}} = \frac{\hat{u}}{\pi R} \left(\sin \omega t_1 + \sin \omega t_2 + \frac{\cos \omega t_1}{\tan \omega t_1} \right) \left(1 - e^{-\omega(t_2-t_1) \tan \omega t_1} \right) \quad (20)$$

$$I_{\text{OUT}} \approx \frac{\hat{u}}{R} \left(1 - 0,521 \left(\frac{\Delta u}{\hat{u}} \right) - 0,128 \left(\frac{\Delta u}{\hat{u}} \right)^2 \right) \quad (21)$$

Approksimaatiokaavan virhe on alle puoli prosenttia, kun $\Delta u \leq 0,85\hat{u}$. Toisio- ja diodivirran tehollisarvon tarkka kaava on melko hankala:

$$I = \frac{\hat{u}}{R\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{2(\pi - \omega t_2 + \omega t_1) - \cos 2\omega t_1 (\sin 2\omega t_1 - \sin 2\omega t_2)}{4 \sin^2 \omega t_1} + \frac{\cos 2\omega t_1 - \cos 2\omega t_2}{2 \tan \omega t_1}} \quad (23)$$

$$I \approx I_{\text{OUT}} \sqrt{\frac{4,11 - 2,38 \left(\frac{\Delta u}{\hat{u}}\right)}{\pi - \arccos\left(\frac{\Delta u}{\hat{u}} - 1\right)}}$$

Huomaa, että approksimaatiokaava antaa virran tehollisarvon ja keskiarvon välisen suhteen. Sen virhe on alle 0,85 %, kun $0,0001\hat{u} \leq \Delta u \leq 0,9\hat{u}$. Pienillä rippelin arvoilla toisiovirran tehollisarvo on moninkertainen kuormavirran keskiarvoon verrattuna.