

haittaa. Mikäli riittävän korkeata tulojännitettä ei ole saatavissa, voidaan vakiovirtalähde toteuttaa melko yksinkertaisesti parilla transistorilla (vrt. virtapeili).

10.4 HAKKURITEHOLÄHTEET

Yleistä

Hakkuriteholähteiden merkittävin etu on hyvä hyötysuhde. Suurivirtaisetkin laitteet voidaan tehdä kohtuullisen kokoisiksi, koska lämmöntuotto on vähäisempää. Hyvä lämpötalous johtuu siitä, että hakkuri ottaa lähteestä energiaa pulssimaisesti; virtaa siis katkotaan. Kytkeäntaajuus voi olla jopa satoja kilohertsejä. Koska tehon virtaus ei ole jatkuvaa, on mahdollista ottaa juuri kuorman tarvitsema määrä energiaa. Osien kokoon vaikuttaa myös korkea taajuus, mikä näkyy suoraan muuntajan, suodatuskondensaattorin ja kelan mitoissa. Hakkuriteholähteellä on mahdollista toteuttaa tulojännitettä suurempi lähtöjännite. Myös jännitteen napaisuuden kääntäminen on tarvittaessa mahdollista: maahan nähden positiivisesta jännitteestä (esim. auton akku) voidaan muodostaa maahan nähden negatiivinen jännite.

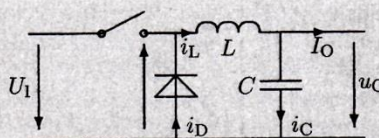
Huonoja puolia ovat suurempi häiriösaiteily, epätasaisempi tasajännite ja monimutkaisempi rakenne. Viime mainittu kompensoituu melko hyvin valmiiden mikropiirien avulla; hakkuriteholähteen ohjauselektronikka on lähes aina integroitu yhteen mikropiiriin, johon liitetään ulkopuolelta vain muutama erilliskomponentti, kuten kela, suodatuskondensaattori, kytkintransistori ja diodi sekä muutama vaihtuva-arvoinen osa. Hakkuriteholähteen jännitettä säädetään, joko pulssisuhdetta tai joskus kytkeäntaajuutta muuttamalla. Tavoiteltu lähtöjännite määrätään usein takaisinkytkentälenskissä olevalla jännitteenjakajalla. Tulovirran katkomisen takia hakkuriteholähteen lähtöjännite on luonnostaan pulssimaista. Hyvän tasajännitteen aikaansaaminen edellyttää hyvää suodatusta tai lineaarista regulaattoria. Yksi mahdollisuus onkin muuttaa jännite ensin hakkurilla sopivaan suuruusluokkaan, jotta lineaariregulaattorilla on tarpeeksi helpot oltavat.

Perusrakenteet ja aaltomuodot

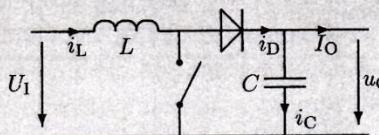
Kuvissa 10.11 – 10.13 on kolme hakkuriteholähteiden perusrakennetta: *step-down*, *step-up* ja *invertteri*. Esimerkiksi mikropiirillä 78S40 voidaan toteuttaa mikä tahansa näistä vaihtoehdoista vähäisin kyt-

kentämuutoksia. Tietokoneiden ATX-povereissa on muuntajaan perustuva rakenne. Verkojännite tasasuunnataan ja suodatetaan jo ennen muuntajaa. Tästä muuntajalle tulevaa virtaa katketaan, jolloin muuntaja voi toimia suuremmalla taajuudella kuin verkkojännite; muuntajaa käytetään siis poikkeuksellisesti pulssimaisella tasajännitteellä. Emolevyn tarvitsemat 5 erilaista käyttöjännitettä (± 5 V, ± 12 V ja $+3,3$ V) voidaan muodostaa kukin omalla toisiokäämilään. Erityisesti $+3,3$ V olisi lineaariselle regulaattorille hankala, koska mikroprosessorin ottama virta voi tyypillisesti olla jopa 30 A ja eräillä malleilla enemmänkin.

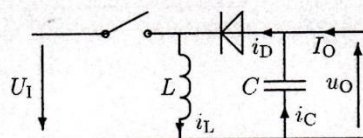
Kuva 10.11. *Step-down*-tyyppinen (*buck*) hakkuriteholähde, jonka lähtöjännite on aina tulojännitettä pienempi. Tässä tyypissä tulo- ja lähtöjännitteet ovat samanmerkkiset.



Kuva 10.12. *Step-up*-tyyppinen (*boost*) hakkuriteholähde. Kuten nimikin sanoo, on lähtöjännite aina tulojännitettä suurempi, mikä on tilanteesta riippuen rajoitus tai etu. Jännitteen merkki säilyy nytkin.



Kuva 10.13. *Invertterissä* (*buck-boost*) lähtö- ja tulojännitteet ovat vastakkaismerkkiset (kuvaan on piirretty jännitteiden positiiviset suunnat). Lähtöjännitteen itseisarvo on pulssisuhteesta riippuen suurempi tai pienempi kuin tulojännite.

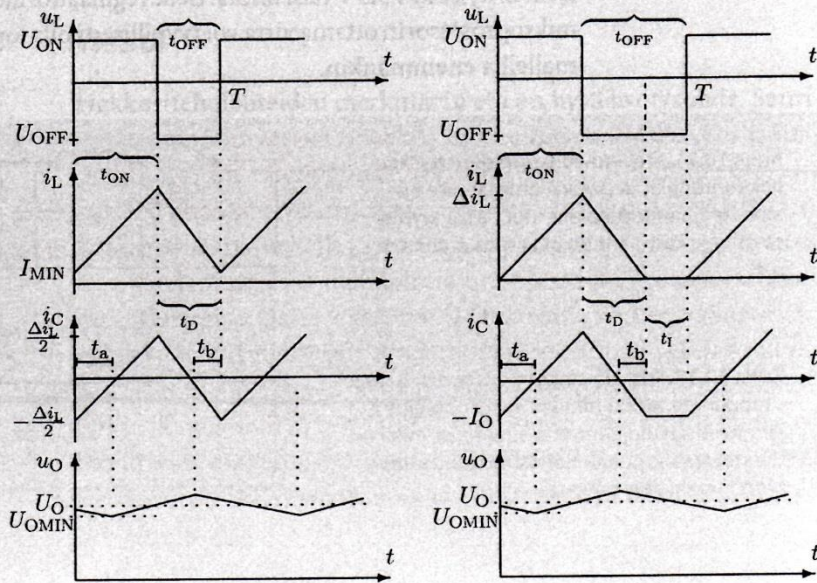


Kuvassa 10.14 on *step-down*-regulaattorin virtojen ja jännitteiden yksinkertaistetut aaltomuodot jatkuvassa ja epäjatkuvassa toiminnassa. Epäjatkuvassa toiminnassa kelan virta i_L on nolla ajan t_1 (*idle*, joutilas). Suuremmilla kuormavirran arvoilla toiminta on kuitenkin aina jatkuvaa. Kytin on kiinni ajan t_{ON} ja auki ajan t_{OFF} . Kelan jännite u_L on samana aikana joko U_{ON} tai U_{OFF} . Kondensaattorin virta i_C on samanmuotoinen kuin kelan virta, mutta kuormavirran I_O verran alempana. Tässä kuormavirta on yksinkertaisuuden vuoksi oletettu vakioksi. Kuormajännite on likimain vakio U_O , mutta vaihtelee noin $0,5\Delta u_O$:n verran sen molemmin puolin; rippeli on siis Δu_O . Vastaavasti kelan virran heilahtelu eli rippeli on Δi_L . Lähtöjännite pienenee, kun kondensaattorin virta on negatiivinen, kondensaattori siis purkautuu ajat t_a , t_b ja t_c , mutta latautuu muun ajan. Jaksonaika eli kytkentätaajuuden käänteisluku on

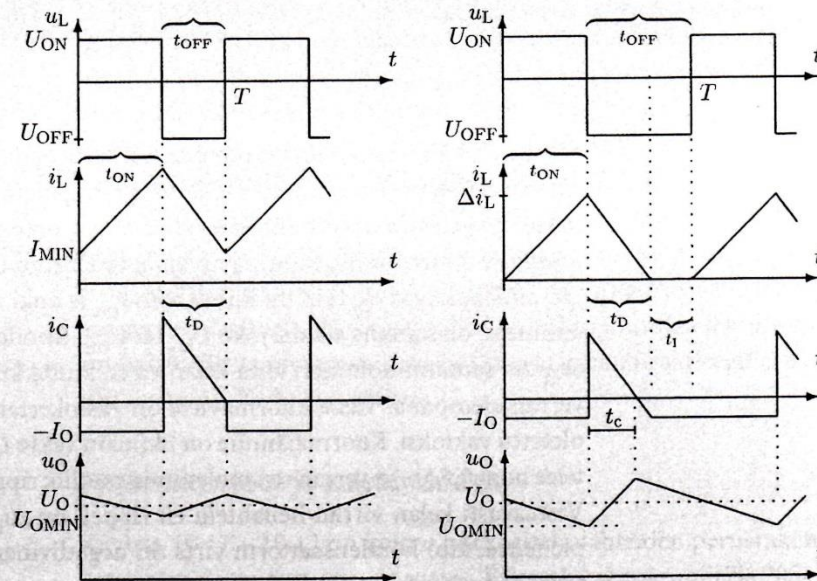
$$T = t_{\text{ON}} + t_{\text{OFF}} + t_1$$

missä t_1 on tietysti jatkuvassa toiminnassa nolla. Kelan "purkausai-
ka" t_D (discharge) on jatkuvassa toiminnassa sama kuin t_{OFF} . Kuvassa
10.15 on vastaavat aaltomuodot *step-up*- ja *invertteri*-tyyppisille re-
gulaattoreille. Kaksi viime mainittua ovat aaltomuodoltaan samat.
Aika t_c tarkoittaa kondensaattorin varautumisaikaa.

Kuva 10.14.
Step-down-
tyyppisen
hakkurin
jännitteiden
ja virtojen
idealisoit
aaltomuodot. Vasem-
malla jatku-
va ja oikeal-
la epäjatku-
va toiminta



Kuva 10.15.
Step-up- ja
invertteri-
regulaatto-
reiden aal-
tomuodot
jatkuvassa
ja epäjatku-
vassa toi-
minnassa



Mitoitus ja hyötysuhde

Taulukkoon 10.1 on koottu tärkeimmät mitoituskaavat. Tässä kuten käyrissäkin diodi, kela, kondensaattori ja kytkin on oletettu ideaalisiksi. Tietokonesimuloinnilla on helppo tutkia kelan ja kytkimen sarjavastuksen sekä diodin jännitehäviön vaikutusta piirin toimintaan. Simuloitaessa on oleellista valita kelan alkuvirta ja kondensaattorin alkujännite mahdollisimman lähelle oikeaa. Muutoin voi kestää kauan ennen kuin piiri saavuttaa lopulliset aaltomuotonsa. Taulukon mitoituskaavat on tässä esitetty valmiina tuloksina, mutta kaavat voi johtaa melko yksinkertaisesti kahden perussäännön avulla.

1. Kelan käämivuo pysyy keskimäärin vakiona:

$$L\Delta i_L = U_{ON}t_{ON} = -U_{OFF}t_D$$

ja

2. Kondensaattorin varaus pysyy keskimäärin vakiona

$$C\Delta u_O = Q^+ = Q^-$$

missä Q^+ on sen kolmion pinta-ala, joka i_C -käyrässä jää nollan yläpuolelle ja Q^- nollan alapuolinen pinta-ala jakson aikana.

Tarkastellaan vielä esimerkkinä ideaalisen *step-down*-hakkurin hyötysuhdetta jatkuvassa toimintamoodissa. Jännitelähteestä U_{IN} otetaan energiaa kelan läpi aika t_{ON} . Koska jännite on vakio, voidaan energia laskea varauksen ja jännitteen tulona ($W_1 = Pt = U_{IN}Q$), missä varaus Q on i_L -käyrän alapuolelle jäävä pinta-ala (välillä $0 \dots t_{ON}$). Minimivirta $I_{MIN} = I_O - 0,5\Delta i_L$. Kuorman käyttämä energia yhden jakson aikana on yksinkertaisesti $W_2 = U_O I_O T$.

$$W_1 = U_{IN} \left(\frac{1}{2} \Delta i_L t_{ON} + I_{MIN} t_{ON} \right) = U_{IN} \left(\frac{1}{2} \Delta i_L t_{ON} + \left(I_O - \frac{1}{2} \Delta i_L \right) t_{ON} \right) = U_{IN} I_O t_{ON}$$

Taulukosta 10.1 nähdään, että $U_{IN} t_{ON} = U_O T$, joten energiat W_1 ja W_2 ovat yhtä suuret ja hyötysuhde on teoriassa 100 %.

Hakkuriteholähteen käytännön suunnittelu on melko helppoa valmistajien data-lehtien perusteella. Niitä on nykyisin kattavasti saatavilla mm. internetistä. Komponenttien epäideaalisuudet vaikuttavat erityisesti jänniterippeliin, joka käytännössä on yleensä selvästi suurempi kuin teoriassa.

TAULUKKO 10.1. KOLMEN HAKKURITEHOLÄHDETYYPIN MITOITUSKAAVAT JATKUVASSA TOIMINNASSA

	step-down	step-up	inverter
Δi_L	$(U_I - U_O) \frac{U_O}{U_I} \frac{T}{L}$	$\frac{U_I}{U_O} \frac{U_O - U_I}{L} T$	$\frac{U_I U_O}{U_O + U_I} \frac{T}{L}$
Δu_O	$\frac{1}{8} \frac{\Delta i_L}{C} T$	$\frac{U_O - U_I}{U_O} \frac{I_O}{C} T$	$\frac{U_O}{U_O + U_I} \frac{I_O}{C} T$
U_O	$\frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_D} U_I$	$\left(1 + \frac{t_{ON}}{t_D}\right) U_I$	$\frac{t_{ON}}{t_D} U_I$
$\frac{t_{ON}}{t_D}$	$\frac{U_O}{U_I - U_O}$	$\frac{U_O - U_I}{U_I}$	$\frac{U_O}{U_I}$
t_{ON}	$\frac{U_O}{U_I} T$	$\frac{U_O - U_I}{U_O} T$	$\frac{U_O}{U_O + U_I} T$
t_D	$\frac{U_I - U_O}{U_I} T$	$\frac{U_I}{U_O} T$	$\frac{U_I}{U_O + U_I} T$

TEHTÄVIÄ

- 10.6. Laske *step-down*-, *step-up*- ja *invertteri*-tyyppisen hakkuriteholähteen lähtöjännite, kun suhde $t_{ON}/t_{OFF} = 0,6$ ja tulojännite $U_I = 10$ V.
- 10.8. Mitoita kela ja kondensaattori edellisen tehtävän piireissä, jos kytkentätaajuus $f = 100$ kHz, lähtövirta $I_O = 1$ A, kelavirran rippeli $\Delta i_L = 1,5$ A ja lähtöjännitteen rippeli $\Delta u_O = 200$ mV.

10.5 JÄÄHDYTYSELEMENTIN MITOITUS

Tehovahvistimissa ja teholähteissä on tehokomponentit kiinnitettävä jäähdytyselementtiin eli -ripaan, jotta ne eivät kuumenisi liikaa. Monissa komponenteissa yksi johtimista on kuoressa (esimerkiksi TO-3 -kotelaisen tehotransistorin kollektori), joten jäähdytysrivat on joko eristettävä laitteen kotelosta ja toisistaan tai komponentit on eristettävä jäähdytyselementeistä kiilleliuskoilla ja ruuvien ympärille tulevilla muoviholkeilla.

Jäähdytyselementin mitoitus perustuu erityiseen virtapiirianalogaan (kuva 10.16): lämpötila T vastaa jännitettä, tehohäviö P virtaa ja lämpövastus R_{TH} resistanssia. Alaindeksi $_{TH}$ tulee sanasta *thermal*, yleensä sen tilalle tulevat kuitenkin resistanssin sijaintia osoittavat kirjaimet:

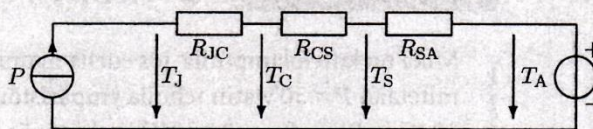
J = puolijohdeliitos (*junction*) eli komponentin ydin

C = komponentin kuori (*case*)

S = jäähdytyslevy (*sink, heat sink*)

A = ympäristö (*ambient*)

Kuva 10.16. Virtapiiri-analogia jäähdytyselmentin mitoituksen apuna



Lämpövastuksia voidaan kytkeä normaalisti sarjaan, esim. $R_{JA} = R_{JC} + R_{CS} + R_{SA}$. Ohmin laki ja Kirchhoffin jännitelaki ovat myös analogisesti voimassa. TO-3-kotelossa (lierihatun näköinen metallikotelo) R_{JC} on tyyppillisesti noin 2 °C/W , mutta R_{JA} (ilman jäähdytyselmenttiä) noin 35 °C/W . Vastaavasti TO-220-kotelossa (usein musta muovikotelo) luvut ovat tyyppillisesti vähän suuremmat, 3 °C/W ja 50 °C/W . Suurimmilla jäähdytyselmenteillä lämpövastus R_{SA} jää alle 1 °C/W , mutta se edellyttää jo desimetriluokkaa olevaa korkeutta ja leveyttä. Pienen rivan lämpöresistanssi voi helposti ylittää 10 °C/W . Rivan ja komponentin välinen liitos R_{CS} kasvattaa resistanssia vain vähän, mutta suurilla tehoilla tälläkin voi olla merkitystä. Kiille-eriste lisää sarjavastusta, mutta piitahna oikein käytettynä (ohut, tasainen kerros) pienentää sitä.

Lineaarisen regulaattorin tehohäviö lasketaan kaavalla

$$P = (U_{IN} - U_{OUT}) I_{OUT}$$

ja transistorin häviöteho

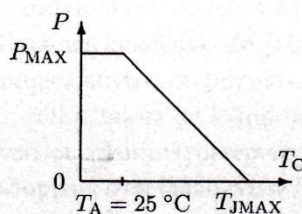
$$P = U_{CE} I_C + U_{BE} I_B \approx U_{CE} I_C$$

Puolijohdekomponenteille ilmoitetaan yleensä suurin sallittu liitoslämpötila $T_J = 125\text{ °C} \dots 200\text{ °C}$, koska kotelon ja ytimen lämpötila-ero riippuu komponentin tehohäviöstä. Jos lämpöresistanssia ei ole ilmoitettu, se voidaan laskea *power derating* -käyrän perusteella (kuva 10.17):

$$R_{JC} = \theta_{JC} = \frac{T_{JMAX} - T_A}{P_{MAX}}$$

missä T_A on normaalisti 25 °C . Jos esimerkiksi $T_{JMAX} = 125\text{ °C}$ ja $P_{MAX} = 100\text{ W}$, tulee lämpövastukseksi $R_{JC} = 1\text{ °C/W}$.

Kuva 10.17. Tehokomponenteille ilmoitetaan yleensä suurin sallittu teho kotolämpötilan funktiona.



ESIMERKKI 10.3

Mikä on kotelolämpötila, jos edellä mainittua transistoria kuormitetaan $P = 30$ watin teholla ympäristön lämpötilassa $T_A = 30$ °C ja $R_{CS} + R_{SA} = 2$ °C/W? Laske myös liitoslämpötila T_J .

$$T_C = (R_{CS} + R_{SA})P + T_A = 2 \text{ °C/W} \cdot 30 \text{ W} + 30 \text{ °C} = 90 \text{ °C}$$

$$T_J = R_{JC}P + T_C = 1 \text{ °C/W} \cdot 30 \text{ W} + 90 \text{ °C} = 120 \text{ °C}$$

Tätä voi jo pitää liian täpäränä mitoituksena.

Prossessorituulettimien teho ilmoitetaan samalla tavalla lämpöresistanssina. Huomaa että nykyaikaisen mikroprosessorin tehohäviö on 50 watin luokkaa, mutta korkein järkevä pintalämpötila (jossa toiminta on vakaata) yleensä selvästi alle 60 °C. Mikroprosessori kestää rikkoutumatta selvästi korkeampiakin lämpötiloja, mutta useimmat prosessorit tuhoutuvat muutamassa sekunnissa, jos prosessorituuletin jäähditysripoineen irtoaa kokonaan!

TEHTÄVIÄ

- 10.9. Toista esimerkki 10.3 muuttamalla lukuarvoiksi $T_{JMAX} = 150$ °C, $P_{MAX} = 125$ W ja $T_A = 25$ °C.
- 10.10. Mikä on suurin sallittu jäähdytyslementin lämpöresistanssi kysymyksen 1 tapauksessa, jos $R_{CS} = 0,5$ °C/W?
- 10.11. Laske transistorin tehohäviö, jos sen $U_{CE} = 9,6$ V, $I_C = 5,2$ A, $U_{BE} = 0,7$ V ja $\beta = 50$.
- 10.12. Paljonko prosessorin (teho 50 W) pintalämpötila nousee, jos piirin ja jäähdytysriivan välissä on huonon kontaktin takia $0,5$ °C/W ylimääräinen lämpöresistanssi? Paljonko nousee ytimen lämpötila?