

(19)



SUOMI - FINLAND

(FI)

PATENTTI- JA REKISTERIHALLITUS

PATENT- OCH REGISTERSTYRELSEN

FINNISH PATENT AND REGISTRATION OFFICE

(10) FI 964878 A7

**(12) JULKISEKSI TULLUT PATENTTIHAKEMUS
PATENTANSÖKAN SOM BLIVIT OFFENTLIG
PATENT APPLICATION MADE AVAILABLE TO THE
PUBLIC**

(21) Patentihakemus - Patentansökan - Patent application **964878**

(51) Kansainvälinen patenttiluokitus - Internationell patentklassifikation -
International patent classification
G01R 33/04

(22) Tekemispäivä - Ingningsdag - Filing date **08.06.1995**

(23) Saapumispäivä - Ankomstdag - Reception date **05.12.1996**

(41) Tullut julkiseksi - Blivit offentlig - Available to the public **31.01.1997**

(43) Julkaisupäivä - Publiceringsdag - Publication date **13.06.2019**

(86) Kansainvälinen hakemus - **08.06.1995 PCT/US1995/006885**
Internationell ansökan - International
application

(32) (33) (31) Etuoikeus - Prioritet - Priority

08.06.1994 US 255651

(71) Hakija - Sökande - Applicant

1 • Magknowledge Inc., Apartment 19, 542 Forest avenue Mountain View, CA 94043-2618, USA, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)

(72) Keksijä - Uppfinnare - Inventor

1 • Hawks, Timothy J., USA, AMERIKAN YHDYSVALLAT, (US)

(74) Asiamies - Ombud - Agent

Berggren Oy Ab, Antinkatu 3 C, 00100 Helsinki

(54) Keksinnön nimitys - Uppfinningens benämning - Title of the invention

Matalatehoinen magnetometripiiri

Magnetometerkrets med låg effekt

Pienitehoisia magnetometripiirejä - Magnetometerkretsar med låg effekt

Tämä keksintö liittyy laitteisiin ja piirijärjestelyihin magneettikenttien mittausta varten, ja tarkemmin magnetometripiireihin magneettikenttien mittausta varten.

- Joukko eri tyyppisiä magnetometreja on saatavilla. Saatavilla olevista eri tyypeistä heikkojen staattisten magneettikenttien mittaamiseksi eräs käytännöllisemmistä tyypeistä on kuitenkin ns. fluxgate-magnetometri. Fluxgate-magnetometrit perustuvat magneettisydämen kyllästymiseen, josta saadaan lähtökohta absoluuttisen magneettikentän mittaamiseen. Sydämen kyllästämiseen tarvittava virta on magnetometrin virrankulutuksen päälähde. Vaikka tavanomaisen fluxgate-magnetometri - tekniikan virrankulutusta voidaan pienentää pienitehoisia sovellutuksia varten lyhentämällä näytteenotto- eli mittausaikaa, nämä sovitukset tarjoavat eräitä huomattavia suunnitteluhaasteita. Luotettavamman toisen harmonisen vuon ilmaisun menetelmässä ei ole helppoa yksinkertaisella tavalla vähentää heräteaalto-energioiden jaksojen lukumäärä; useimmat järjestelmät sisältävät jonkinasteisen suodatuksen, joka asettuakseen vaatii monia herätejaksoja. Vaikka huippuilmaisun soveltaminen on helpompaa vain muutamilla herätejaksoilla, kuten on havaittu US-patentissa 4,668,100 (26.5.1987, Murakami ym), fluxgate-huippuilmaisujärjestelmillä on yleensä huonompi tarkkuus. Patentissa 4,668,100 käytetään rengaskelaa. Paljon suoraviivaisempaa on soveltaa taajuusmuotoista magnetometri-ilmaisua, kuten US-patentissa 5,239,264 (24.8.1993, Timothy J. Hawks). Hawksin patentissa käytetään solenoidikelaa permalloy-rengaskelan sijasta, jota selitettiin patentissa 4,668,100. Käyttäen yksinkertaista L/R-relaksaatio-oskillaattoria solenoidikelan yhteydessä magnetometripiirillä on lähes välitön käynnistys. Tämän suorana seurauksena oskillaattori voidaan varsin helposti ohjata päälle lyhyeksi ajaksi ja samalla säilyttää mahdollisuus saada aallonmuodon jakso magneettikentän mittausta varten. Tällä piirillä on edelleen vaatimuksena huomattavan suuri huippuvirta anturin käänin käyttöä varten.

- Toinen aikaisempi magnetometri esitettiin US-patentissa 4,851,775 (25.7.1989, Kim ym). Tässä patentissa käytetään solenoidi-anturikelaa. Tämän patentin magnetometrillä on kuitenkin samat puutteet kuin US-patentissa 5.239.264 pienen virrankulutuksen sovellutuksia varten.

Magnetometrien kokonaistehonkulutusta olisi pienennettävä tekniikan tason magnetometreissa saatavasta tasosta. Esillä olevan keksinnön eräänä tavoitteena on pienentää magneettikentän mittaukseen tarvittavan tehon määrää.

- Esillä olevan keksinnön mukaan aikaansaadaan magnetometripiiri, jossa eräässä suoritusmuodossa kyllästyvän sydämen sisältävälle anturikelalle syötetään lähdepotentiaali kelan saattamiseksi kyllästyspistettä kohti, jonka jälkeen tapahtuu kelan potentiaalin poistaminen. Kelan läpi kulkeva virta ilmaistaan, ja kelaan vaikuttava magneettikenttä voidaan määrittää sen ajan perusteella, jonka kelaan johdettu virta tarvitsee laskeakseen ensimmäisestä ennalta määrätystä arvosta toiseen ennalta määrättyyn arvoon. Virta-anturi tuottaa ensimmäisen lähtösignaalin anturikelan läpi kulkevan virran kasvaessa ensimmäiselle kynnysarvotasolle jakson ensimmäisellä osalla, ja tuottaa toisen lähtösignaalin anturikelan läpi kulkevan virran laskiessa toiselle kynnysarvotasolle. Ensimmäisen ja toisen lähtösignaalin välinen aika osoittaa kelaan vaikuttavan kentän suuruuden.

- Esillä olevan keksinnön erään toisen suoritusmuodon mukaan aikaansaadaan magnetometripiiri, jossa toteutetaan nollakompensointi. Nollakompensoinnin eräässä suoritusmuodossa on ensimmäinen ja toinen toimintatila. Ensimmäisessä toimintatilassa anturikelan ensimmäinen liitäntä kytketään vuorotellen ensimmäiseen potentiaalilähteeseen ja sitten toiseen potentiaalilähteeseen, ja kelan toiseen liitäntään on kytketty virta-anturi kelan läpi kulkevan virran mittaamiseksi. Toisessa toimintatilassa kelan toinen liitäntä kytketään vuorotellen ensimmäiseen potentiaalilähteeseen ja sitten toiseen potentiaalilähteeseen, ja virta-anturi kytketään kelan ensimmäiseen liitäntään anturikelan läpi kulkevan virran mittaamiseksi.

Keksinnön muut tavoitteet ja edut käyvät ilmeisiksi tutkimalla selitystä ja piirustuksia, joissa:

- kuvassa 1a on esillä olevan keksinnön erään suoritusmuodon mukaisen magnetometripiirin piirikaavio;
- 25 kuva 1b havainnollistaa kuvan 1a piirin aaltomuotoja, joita käytetään selitettäessä kuvan 1a laitteen toimintaa;
- kuva 2 esittää esillä olevan keksinnön erään toisen suoritusmuodon mukaisen magnetometripiirin;
- 30 kuva 3 havainnollistaa muita aaltomuotoja, jotka ovat käyttökelpoisia esillä olevan keksinnön selityksen yhteydessä;
- kuvat 4a, 4b ja 4c esittävät jänniteanturipiirejä, joita voidaan käyttää esillä olevaa keksintöä sovellettaessa;
- kuva 5 esittää esillä olevan keksinnön toisen suoritusmuodon, jossa käytetään nollakompensointia;

kuva 6 esittää esillä olevan keksinnön erään toisen suoritusmuodon, jossa käytetään nolla-kompensointia;

kuva 7 esittää esillä olevan keksinnön erään toisen suoritusmuodon, jossa käytetään nolla-kompensointia;

- 5 kuva 8 on esillä olevan keksinnön mukaisen magnetometripiirin piirikaavio, jossa käytetään kahta anturia ilmaisemaan magneettikenttää ensimmäisen ja toisen akselin suunnassa; ja

kuvat 9a ja 9b esittävät lohkokaaviomuodossa kaksi elektronista kompassijärjestelmää, joissa käytetään esillä olevan keksinnön mukaisia magnetometripiirejä.

- 10 Kuten edellä mainittiin, fluxgate-magnetometrissa sydämen kyllästämiseksi tarvittu virta on merkittävä virrankulutuksen lähde. Esillä olevan keksinnön mukaan käytetään seuraavaa kahta perusstrategiaa sydämen kyllästymisestä johtuvan kokonaistehonkulutuksen pienentämiseksi: 1) pienennetään sydämen kyllästämiseksi tarvittua virtaa; ja 2) lyhennetään sitä aikaa, jonka sydämen on oltava kyllästyneenä kentän
- 15 mittauksen aikana. Edellinen strategia toteutetaan kahdella eri tavalla: ensinnäkin käyttämällä magneettisen sydämen materiaaleja, jotka kyllästyvät pienellä kentällä; ja toiseksi lisäämällä herätekalan kierrosten lukumäärää. Esillä olevassa keksinnössä käytetään näitä molempia menetelmiä merkittävän parannusaskelen aikaansaamiseksi olemassa olevaan fluxgate-tekniikkaan verrattuna. Käyttämällä ohutta
- 20 amorfista metallikalvosydäntä permalloy-rengaskalan sijasta anturi vaatii jonkin verran pienemmän kyllästyskentän. Solenoidigeometrian ja yhden ainoan herätys/ilmaisukäämin avulla voidaan taloudellisesti käämiä enemmän lankakierroksia. Suurempi kierrosmäärä pienentää osaltaan kyllästysvirtavaatimusta herätteen aikana. Näistä parannuksista huolimatta merkittävin tehon pienennys saadaan toisen
- 25 strategian johdosta, eli pienentämällä sydämen kyllästystä mittauksen aikana. Seuraavassa selitetään tapaa, jolla tehon pienentämisen toinen strategia toteutetaan.

Esillä olevan keksinnön mukainen pienitehoinen magnetometri ei pelkästään voita edellä selitettyjä tekniikan tason ongelmia lyhyen jakson näytteenoton osalta, vaan se myös pienentää anturin tarvitsemaa huippuvirtaa. Magnetometri tarvitsee vain

30 yhden herätejakson näytteen ottamiseksi magneettikentästä. Lisäksi kaikki anturin tarvitsema teho voidaan syöttää yhden ainoan kondensaattorin kautta, joka pienentää virtalähteelle asetettua huippuvirran vaatimusta lähempänä keskiarvoa olevaan arvoon.

Anturin perusteoria

- 35 Esillä olevan keksinnön mukaisen magnetometripiirin toiminnan ymmärtämiseksi

- käytetään edullisesti yksinkertaista mallia anturin käyttäytymisestä. Esimerkiksi kuvan 1a magnetometripiirissä 1 anturi L on solenoidi-induktori, jonka sydän 2 on kyllästävää erittäin suuren permeabiliteetin omaavaa materiaalia. Tyypillinen suuren permeabiliteetin omaava materiaali sydäntä 2 varten on kobolttipohjainen amorfinen metalli-lasikalvo, jota valmistaa Allied Signal, tuotenumero 2705M. Yhtä ainoata käämiä 3 käytetään sekä herätesignaalin aikaansaamiseksi että sydämen vaihtuvan kentän ilmaisemiseksi. Magneettisen sydänmateriaalin läpi kulkeva kokonaismagneettikenttä on ulkoisen magneettikentän ja kelan 3 läpi kulkevan virran muodostaman kentän summa. Tätä yhteyttä kuvaa seuraava kaava:

$$H = k_0 I + H_E \quad (1)$$

- jossa H on sydänmateriaalin 2 läpi kulkeva kokonaismagneettikenttä, H_E on ulkoisesti kohdistuva magneettikenttä, joka on sydänmateriaalin 2 suuntainen, ja I on induktorikelan 3 läpi kulkeva virta. Vakio k_0 on kelan 3 fyysisten parametrien, esimerkiksi sen kierroksiheyden, funktio. Kun suuren permeabiliteetin omaavaan materiaaliin kohdistuu magneettikenttä, se tehokkaasti vahvistaa tätä kenttää suurella kertoimella, joka tunnetaan suhteellisena permeabiliteettina. Monien materiaalien osalta tämä kerron voi maksimipisteessä olla missä tahansa välillä 100 - 100.000. permeabiliteetti on tyypillisesti suuri vain pienellä alueella pienten kenttien osalta. Kun materiaaliin kohdistuva kenttä kasvaa jompaan kumpaan suuntaan, materiaalin permeabiliteetti pienenee kertoimeksi yksi. Tämä heijastaa näiden materiaalien kyllästymisominaisuuksia. Suhteellinen permeabiliteetti kohdistuvan kentän funktiona merkitään $\mu(H)$. Anturikelan yli vaikuttava jännite on materiaalissa tuloksena olevan magneettikentän muutoksen funktio. Tämä voidaan ilmoittaa seuraavasti:

$$V = k_1 \mu(H) dH/dt \quad (2)$$

- jossa V on anturikelan yli vaikuttava jännite, $\mu(H)$ on sydämen suhteellinen permeabiliteetti, ja dH/dt on vaikuttavan kentän aikaderivaatta. Vakio k_1 on anturin monen fyysisen parametrin, kuten kelan kierroksiheyden ja kelamateriaalin tilavuuden funktio. Kun ulkoinen kenttä H_E on vakio (eli vaihtelee hitaasti ajan mukana) yhtälöt (1) ja (2) voidaan yhdistää, jolloin saadaan:

$$V = k_0 k_1 \mu(H) dI/dt \quad (3)$$

Kuten normaalin induktorin osaltakin, jännite on yhteydessä virran aikaderivaataan, ja se voidaan vaihtoehtoisesti ilmaista seuraavasti:

$$V = L(H) dI/dt \quad (4)$$

jossa $L(H)$ vastaavasti määritellään:

$$L(H) = k_0 k_1 \mu(H) \quad (5)$$

- Tässä on huomattava, ettei induktanssi ole vakio, vaan materiaaliin kohdistuvan magneettikentän epälineaarinen funktio. Kun muuttuvan induktanssin kaava on annettu, voidaan magnetometriin lähtö kuvata analyttisesti kohdistetun kentän funktiona. Tässä ei erikseen käsitellä materiaalin hystereesin vaikutuksia. Rajatapauksessa, jossa mitataan vakiokenttää monen identtisen muutoskohdan yli, suhteellisen permeabiliteetin funktio kuitenkin pyrkii suppenemaan kohti toistuvaa arvoa, joka tekee edellä mainitut yhteydet käyttökelpoisiksi approksimaatioiksi.
- Anturin L solenoidirakenteella on eräitä ratkaisevia etuja rengaskäämirakenteeseen fluxgate-vastineeseen verrattuna. Yleisesti ottaen käämien tilavuuden kasvattaminen (joka on sekä langan halkaisijan että kierrosmäärän funktio) anturin sydämen ympärillä pienentää anturin tehonkulutusta; jos joko langan halkaisijaa tai kierrosten lukumäärää lisätään, anturin sydämen kyllästystilaan saattamiseksi tarvittava teho pienenee. Lisäksi ilmaisukäämissä käytetty kierrosmäärä on verrannollinen lähtösignaalin voimakkuuteen; ilmaisukäämien lukumäärän lisääminen voi pienentää ilmaistun signaalin vahvistustarvetta. Solenoidianturilla L on yksi käämi 3, joten herättäminen ja ilmaisu tehdään samalla kelalla. Herätetehon pienentämiseksi solenoidianturiin L voidaan tehdä enemmän kierroksia kuin vastaavankokoiseen fluxgate-anturiin, jossa heräteäämit on pujotettava renkaan läpi. Lisäksi solenoidianturin L kierrosten suurempi lukumäärä nostaa lähtösignaalin voimakkuutta. Monissa tekniikan tason antureissa kierrosten lukumäärä ilmaisu- ja heräteäämeissä kilpailee fluxgate-anturin sydämen ympärillä olevasta rajallisesta tilasta.
- Kuvassa 1a oleva magnetometripiiri 1 havainnollistaa esillä olevan keksinnön mukaisen magnetometrin erästä suoritusmuotoa, ja se tarjoaa keinon magnetometripiirin toiminnan perusteiden selittämiseksi. Kuvan 1a magnetometripiirissä magnetometrin lähtöä ei ole "nolla-kompensoitu", eli magnetometripiirin lähtö ilman ulkoista kenttää ei käytännössä ole toistettavissa lämpötilan ja komponenttiarvojen muuttuessa. Vaihtoehtoisissa, myöhemmin selitettävissä suoritusmuodoissa tämä puute korjataan. Magnetometripiirissä 1 lähtönä (esitetty kuvassa 1b) on looginen signaali, jonka pulssin leveys $t(H_E)$ muuttuu anturiin L kohdistuvan magneettikentän muuttuessa. Anturin L läpi kulkeva virta muunnetaan jännitteeksi vastuksen R2 avulla ja mitataan invertoivalla Schmitt-liipaisinpiirillä 4. Kuvaan 1a viitaten anturin L kyllästämiseen tarvittava energia saadaan kondensaattorilla C, jonka maaliitانتä muodostaa ensimmäisen teholiitännän ja liitospiste N1 (kondensaattorin C yläpäässä) muodostaa toisen teholiitännän. Liitospiste N3 on anturikelan L ensimmäinen liitانتä, joka vuorotellen kytketään liitospisteeseen N2 kytkimellä S1 ja toisaalta maahan kytkimellä S2. Anturin L läpi kulkevan virran mittaamiseksi anturi-

kelan L toisen liitännän N2 ja maan väliin on kytketty vastus R2. Virta-anturi täydennetään inverttoivalla Schmitt-liipaisinpiirillä 4, jonka tulo on kytketty liitospisteeseen N2 ja lähtö liitospisteeseen N4. Looginen ylätila (joka kuvassa 1a on merkitty H) johdetaan jatkuvasti D-kiikun 5 D-tuloon. Mittausjakson käynnistämiseksi D-kiikulle 5 tuodaan jakson aloitussignaali (Initiate Cycle, esitetty kuvassa 1b) johdolla 22. D-kiikku 5 aktivoi analogiset kytkimet S1 ja S2 vuorotellen, kuten yksinkertaisemmin selitetään alla. Kondensaattori C tuottaa anturin kyllästämiseksi tarvittavan energian, ja se varautuu hitaasti vastuksen R1 kautta positiivisesta virtalähteestä V_s . Vaihtoehtoisesti voitaisiin anturikelan L kyllästämiseksi tarvittava teho saada kytkemällä virtalähde suoraan liitospisteeseen N1.

Kuvassa 1b esitetyt aaltomuodot osoittavat prosessin, jossa otetaan yksi mittaus magneettikentästä H_E . Prosessi aloitetaan aloitussignaalin nousevalla reunalla, joka syötetään johtoon 22 ja joka asettaa kiikun 5 sellaiseen tilaan, että kytkin S1 menee kiinni. Toiminnan ensi vaiheessa kondensaattori C, anturi L ja vastus R2 muodostavat alivaimennetun RLC-piirin, jossa varaus C puretaan anturin induktoriin. Kun anturin induktorin läpi kulkeva virta kasvaa, vastuksen R2 yli vaikuttava jännite kasvaa, kunnes se saavuttaa Schmitt-liipaisinpiirin positiivisen suunnan kynnysarvojännitteen V_H . Tällä hetkellä Schmitt-liipaisinpiirin lähtö menee alatilaa nollaten kiikun 5. Kytkin S1 avataan ja kytkin S2 suljetaan, jolloin anturin L liitospiste N3 kytketään maahan. Tämän jakson toisen vaiheen aikana anturiin L varattu energia purkautuu vastuksen R2 kautta, kunnes vastuksen R2 yli vaikuttava jännite saavuttaa Schmitt-liipaisinpiirin negatiivisen suunnan kynnysarvojännitteen V_L . Schmitt-liipaisinpiirin lähtö menee taas ylätilaan, lopettaen lähtöpulssin. Pulssin ajallinen leveys lähdön laskevasta reunasta nousevaan reunaan, joka on merkitty $t(H_E)$ kuvassa 1b, on likimain verrannollinen anturiin L vaikuttavaan ulkoiseen magneettikenttään H_E . Jos anturin L induktanssi olisi lineaarinen, lähtöpulssin leveys voitaisiin laskea seuraavasti:

$$t = \frac{L}{R2} \ln \left(\frac{V_H}{V_L} \right) \quad (6)$$

Tässä tapauksessa pulssin leveys olisi verrannollinen anturin L induktanssiin. Anturin L induktanssin ominaiskäyrän epälineaarisuudesta johtuen pulssin leveys on kuitenkin laskettava seuraavasti:

$$t(H_E) = \frac{1}{R2} \int_{I_L}^{I_H} \frac{L(k_0 I + H_E)}{I} dI \quad (7)$$

jossa ylempi ja alempi kynnysvirta I_L ja vastaavasti I_H määritellään:

$$I_L = V_L/R_2 \quad (8)$$

$$I_H = V_H/R_2 \quad (9)$$

- Integraaliyhtälö (7) osoittaa miten induktanssin funktioon on liitetty hyperbolinen painotusfunktio, joka vastaa sitä seikkaa, että anturin induktanssi purkausjakson alussa (lähellä I_H) osallistuu lähtöpulssin kokonaisleveyteen vähemmän kuin purkausjakson lopussa (lähellä I_L) oleva induktanssi.

- Kuva 3 esittää miten kenttä H ajan suhteen liittyy anturin muuttuvaan induktanssiin. Kuvassa 3 toimintapisteet on esitetty ilman ulkoista kenttää. Ulkoinen kenttä H_E muuttaa toiminta-aluetta induktanssikäyrällä muuttaen siten lähtöjaksoa. Ulkoinen kenttä H_E , joka magnetoi anturin sydäntä samaan suuntaan kuin herätekenttä (joka tuotetaan johtamalla potentiaali anturille L), pyrkii pienentämään keskimääräistä induktanssia ja siten lähtöpulssin jaksoa. Kuvan 3 induktanssikäyrällä tämä siirtäisi toimintapisteitä oikealle. Herätekentän suhteen vastakkainen ulkoinen kenttä sitä vastoin lisää induktanssia ja lähtöpulssin jaksoa. Kynnysvirrat I_L ja I_H määritetään Schmitt-liipaisinpiirin kynnysjännitteiden avulla, kuten yhtälöissä (8) ja vastaavasti (9) on esitetty. Näitä kynnysarvoja voidaan muunnella sydämen fyysisen rakenteen yhteydessä, niin että optimoidaan lineaarisuus ja kokonaisvirrankulutus.

- Tässä on huomattava, että mitattu pulssin leveys ei riipu kondensaattorin C kapasitanssista. Ensimmäisenä approksimaationa kondensaattorin C arvo ei vaikuta anturiin L , kunhan se tuottaa riittävän energian kynnysvirran I_H saavuttamiseksi. Kynnysarvon sinänsä määrää R_2 ja positiivisen suunnan kynnysjännite V_H . Koska tarvittavalla arvoalueella $0,1 \mu F - 0,47 \mu F$ (jotka ovat nimellisarvoja tässä piirissä) olevilla tyypillisillä kondensaattoreilla on suhteellisen heikko lämpötilakerroin, piiri saa hyötyä tästä epäherkkyydestä kapasitanssin vaihtelun suhteen. Vaikka kondensaattorin C kapasitanssin arvo jonkin verran riippuu anturin L kulloisistakin fyysisistä parametreista, se on riittävän pieni, jotta voitaisiin käyttää monoliittista kondensaattoria. Kondensaattori C toimii vain puskurina anturin kyllästysenergiaa varten. Kondensaattorin C optimaalisen kapasitanssiarvon tulisi todennäköisesti olla lähellä sellaista pienintä arvoa, jolla anturi L saavuttaa ylemmän virtakynnyksen I_H , kondensaattorin C varauksen ja ulkoisen magneettikentän pahimmassa tapauksessa. Kondensaattorin C arvo määritetään parhaiten empiirisesti, koska se riippuu anturin L epälineaarisesta induktanssista. Kondensaattorin on tuotettava suurin varausmäärä, kun ulkoinen magneettikenttä H_E estää anturia L kyllästymästä. Saat-taa kuitenkin olla toivottavaa, että arvoa C lisätään toisen kertaluokan tarkkuusongelmien välttämiseksi; jos Schmitt-liipaisinpiirillä 4 on huomattava viive, kapasitanssin C pienellä arvolla voi olla merkittävä vaikutus anturin vasteeseen aiheuttamalla ylemmän kynnyksen I_H ilmeisen siirtymisen. Suurempi arvo C hidastaa virran

muuttumisnopeutta anturin varausvaiheen aikana, joka pienentää kapasitanssin C vaikutusta kynnysarvoon I_H .

Virtalähteestä otettu huippuvirta on ohjelmoitavissa: se riippuu valitusta arvosta R_1 . Vaikka R_1 voidaan tehdä mielivaltaisen suureksi ja virta pienentää pelkäksi noroksi, tämä pidentää jaksoa, joka tarvitaan jotta kondensaattori C varautuisi uudelleen näytteenottojen välillä. Suurilla R_1 -arvoilla voidaan käyttää virtalähteitä, joilla on suuri lähtöimpedanssi. Kellopiirien kohdalla voidaan käyttää kapasitiivisen jännitekahdentajan lähtöä, joka ei suoraan pystyisi syöttämään anturia. Samalla tavalla varausvirtaa syöttämään voidaan käyttää pienitehoisia aurinkokennoja. Sellaisissa sovellutuksissa, joissa on toisenlaiset virtalähteen ominaisuudet, saattaa komponenttien R_1 ja C muodostama RC-verkko käydä tarpeettomaksi; riittävällä virralla varustettu virtalähde voidaan kytkeä suoraan analogiseen kytkimeen S_1 . Yleensä magnetometrin peruspiirin avulla voidaan anturin käyttövirta syöttää kondensaattorilta, vaikka tämä ei ole välttämätöntä. Tätä kondensaattoria voidaan varata vastuksen kautta tai muilla keinoin (esimerkiksi virta-antolähteestä).

Kuvan 1a piirissä D-kiikku 5 voitaisiin myös korvata yksinkertaisella viritysnollaus-pitopiirillä, jos aloitussignaalksi voidaan taata pulssi, joka on lyhyempi kuin anturin induktorin lyhyin varausjakso. Magnetometripiirin 1 alkuperäisen logiikan tällaiset ja muut muunnelmät ovat digitaalisen logiikan suunnittelun ammattilaiselle ilmeisiä.

Kuvassa 1a olevan Schmitt-liipaisinpiirin 4 toteuttama jännitteen mittaustoiminta voidaan vaihtoehtoisesti toteuttaa esimerkiksi yhdellä tai useammalla komparaattorilla, joiden tulot on kytketty liitospisteeseen N2. Tarkemmin ottaen kuvat 4a, 4b ja 4c havainnollistavat magnetometripiirissä 1 käytettäviä vaihtoehtoisia piirejä.

25 Kuvassa 4a jänniteanturilaitteen hystereesin aikaansaamiseksi käytetään Schmitt-liipaisinpiiriä, joka on toteutettu käyttäen komparaattoria 6 positiivisella takaisin-kytkennällä vastuksen R_{41} kautta, joka on kytketty komparaattorin 6 lähdön ja sen ei-invertoivan tulon väliin. Komparaattorin 6 ei-invertoiva tulo on kytketty liitospisteeseen N2, ja komparaattorin 6 lähtö on kytketty liitospisteeseen N4, jolloin näillä

30 pisteillä on vastaavat paikat kuvan 1a magnetometripiirissä. Schmitt-liipaisinpiiriin täydentää jännitejakaja, jossa käytetään syöttöjännitettä $+V$ ja vastuksia R_{42} ja R_{43} , joiden väliotto on kytketty komparaattorin 6 ei-invertoivaan tuloon. Syöttöjännite $+V$, komparaattorin lähtöjännitteet, ja vastusten R_{41} , R_{42} ja R_{43} muodostama vastus-jakajaverkko asettaa ylemmän ja alemman kynnysarvon.

35 Kuvassa 4b käytetään kahta komparaattoria 8 ja 9, kahta jännitereferenssiä V_H ja V_L ja pitopiiriä, joilla toteutetaan sama toiminta kuin invertoivalla Schmitt-liipaisinpiirillä 4 kuvassa 1a. Kuvan 4b piirissä anturin L liitospiste N2 on kytketty kompara-

raattorin 8 ei-invertoivaan tuloon ja komparaattorin 9 invertoivaan tuloon. Jännite-referenssi V_H on kytketty komparaattorin 8 invertoivaan tuloon, joka nollaa RS-kiikun lähdön liitospisteessä N4, kun liitospisteen N2 jännite ylittää tämän kynnysjännitteen. Referenssijännite V_L on kytketty komparaattorin 9 ei-invertoivaan tuloon, joka tuottaa RS-kiikun 7 lähtöön pisteessä N4 ylätasoa, kun liitospisteessä N2 oleva jännite laskee tämän alakynnysjännitteen alle. Schmitt-liipaisinpiirin invertoiva ominaisuus ei ole olennainen kuvassa 1a esitetyn magnetometrin toiminnan kannalta; tulisi olla ilmeistä, miten voidaan suunnitella loogisesti samanarvoinen piiri ilman Schmitt-liipaisinpiiriä. Samalla tavalla voidaan sanoa kuvassa 4b esitetyn Schmitt-liipaisinpiiri-toteutuksen osalta, että voidaan suunnitella vaihtoehtoisia piirejä, joissa yhdistetään RS-kiikku 7 kuvan 1a D-kiikkuun 5.

Koska kuvan 4b sovellutuksessa komparaattoreita käytetään vain lyhyen aikaa näytteenottojakson aikana, nämä komparaattorit voitaisiin toteuttaa käyttäen näytteenottoperiaatteella toimivia CMOS-komparaattoreita (esitetty viitenumeroilla 41 ja 42 kuvassa 4c). Molemmat komparaattorit 41 ja 42 esivarataan käynnistysvaiheen aikana, kun lisäohjaussignaali (jota sanotaan nollakäynnistykseksi, Zero Initiate) asetetaan ylätilaan, ja johdetaan nollakäynnistystuloliitäntään. Piirin ja kytkimien S15 - S20 toiminta on seuraavanlainen. Nollakäynnistyssignaali on pulssitettava ylätilaan lyhyeksi ajaksi, niin että se sulkee kytkimet S15, S17, S19 ja S20. Tässä tilassa komparaattorin 41 liipaisupiste asettuu arvoon V_H , kun C41 varautuu V_H :n ja invertoivan elementin 11 tulopisteen välisen erotuksen mukaan. Samalla tavalla komparaattorin 42 liipaisupiste asettuu arvoon V_L , kun C42 varautuu V_L :n ja invertoivan elementin 12 tulopisteen välisen erotuksen mukaan. TAI-portti 14 pitää RS-pitopiirin 7 lähdön ylätilassa tämän nollausvaiheen aikana. Magnetometrin normaalin toimintavaiheen ajaksi nollakäynnistyssignaali alennetaan loogiseksi alatilaksi ja tulosignaali liitospisteessä N2 kytkeytyy tehollisesti kondensaattoreiden C41 ja C42 kautta invertoiville vahvistuselementeille 11 ja vastaavasti 12. Invertoivan vahvistuselementin 11 lähtö menee alatilaa, kun liitospisteen N2 jännite ylittää kynnysjännitteen V_H , jonka takia invertterin 13 lähtö menee ylätilaan ja nollaa pitopiirin 7. Invertoivan vahvistuselementin 12 lähtö menee ylätilaan, kun liitospisteen N2 jännite laskee kynnysjännitteen V_L alle, joka nollaa pitopiirin 7. Lukuunottamatta nollakäynnistyssignaalin aloittamaa alkuvarausvaihetta kuvan 4c piiri käyttäytyy samalla tavalla kuin kuvan 4b piiri.

Kuvassa 1a esitetyllä magnetometripiirillä 1 on kaksi perustoimintavaihetta: ensin näkin varausvaihe, jossa anturin induktori L varataan sellaiselle virtatasolle, joka on yhtä suuri tai suurempi kuin virran ylempi kynnysarvo I_H , ja toiseksi purkausvaihe, jossa anturi puretaan ensisijassa resistiivisten elementtien kautta, ja jossa aika siitä, kun anturin virta aloittaa virran ylemmästä kynnysarvosta I_H ja saavuttaa virran

- 5 alemman kynnysarvon I_L edustaa vaikuttavan magneettikentän arvoa. Etu siitä, että anturin induktori L puretaan resistiivisten elementtien kautta, on että anturin toimintatapiste on vain resistanssiarvojen ja kynnysarvojen funktio. Magneettikentän mittauksen kannalta varausvaihe ei ole niin kriittinen kuin purkausvaihe. Näin ollen kuvassa 1a esitetyn piirin tilalle voidaan järjestää monta erityyppistä varauspiiriä. Ensimmäisen eli varausvaiheen osalta on huomattava, ettei anturin virtaa tarvitse nostaa täsmälleen arvoon I_H .

- 10 Kuvan 2 magnetometripiiri 100 esittää esimerkin vaihtoehtoisesta piiristä, jossa anturin virta saa ylittää virran ylemmän kynnysarvon I_H . Eräissä sovellutuksissa saattaa olla toivottavaa, että tämä virran ylempi kynnysarvo ylitetään, niin että helpotetaan sydänmateriaalin hystereesin ei-toivottujen vaikutusten minimoimista. Kuvassa 2 oleva magnetometripiirillä 100 on monia yhteisiä elementtejä kuvan 1a piiriin 1 kanssa. Kuvan 1a D-kiikku 5 on kuvassa 2 pääasiassa poistettu, ja varauspulssi-tulosignaali (Charge Pulse) ohjaa suoraan kytkinten $S1$ ja $S2$ tilaa. Invertteri 15 101 aktivoi vuorotellen kytkimet $S1$ ja $S2$. Kuvan 1a Schmitt-liipaisinpiiri 4 on kuvassa 2 korvattu kahdella komparaattorilla 102 ja 103, portilla 104 ja kahdella jännitereferenssillä V_H ja V_L . Nämä kuvan 2 elementit muodostavat ikkunakomparaattorin, joka tuottaa alatasen lähtöpulssin, kun liitospisteen $N2$ jännite on välillä V_H ja V_L . Porttiin 104 tuleva lisätulo varauspulssi-tulosta estää lähdön näytteenottojakson varausvaiheen aikana. Kuvassa 2 varauspulssi voidaan syöttää magnetometripiirille samaan tapaan kuin jakson aloitussignaali kuvassa 4a, paitsi että varauspulssisignaalin leveys on valittava niin, että varausjakso on riittävän pitkä, jotta anturin L virta voisi nousta vähintään arvoon I_H kaikissa vaihtelevissa toimintaolosuhteissa. Tämä poikkeaa 1a reunalla liipaistusta jakson aloitussignaalista.

- 25 Vaikka kuvissa 1a ja 2 esitetyt magnetometripiirit 1 ja vastaavasti 100 täyttävät pienitehoisten järjestelmien useimmat tarpeet, kuvissa 5 - 7 esitetyt piirit tarjoavat paremman suorituskyvyn. Stabiilia mittausta varten magnetometrin ja anturin tulisi ideaalitapauksessa aiheuttaa vain vähän tai ei lainkaan muutoksia lämpötilan muuttuessa. Käytännössä magnetometripiiri 1 ja magnetometripiiri 100 eivät sovel-
30 lu moniinkaan sovellutuksiin, johtuen niiden heikosta lämpötilakäyttäytymisestä. Kompassisovellutuksissa on varsin ratkaisevaa, että lukemilla on stabiilit "nolla"-arvot, eli magnetometrin lähtölukemien tulisi ilman vaikuttavaa magneettikenttää olla toistettavia. Vaikka kuvan 1a piiri ei ehkä helposti aikaansaa tällaista ominaisuutta, yksinkertaisin muutoksin voidaan saada piirejä, joilla on pieni nollapoikkeama, jolloin poikkeama on ensisijassa piiriin laadun funktio. Kuvassa 5 esitetty magnetometripiiri 50, kuvassa 6 esitetty magnetometripiiri 60 ja kuvassa 7 esitetty magnetometripiiri 70 aikaansaavat nollapoikkeaman kompensoinnin, jolla parannetaan suorituskykyä kuvassa 1a esitettyyn magnetometripiiriin verrattuna. Helposti

nähdään, miten kuvien 5 - 7 piirin parannukset voidaan soveltaa kuvan 2 magnetometriin, niin että saadaan samanlainen parannus nollapoikkeaman osalta. Piirin 50, 60 ja 70 yksityiskohtia sekä niiden toimintaa selitetään alla täydellisesti.

- Hyvin samaan tapaan kuin fluxgate-magnetometrien osalta kuvissa 5 - 7 esitetyt
5 nollapoikkeaman kompensointipiirit käyttävät hyväksi permeabiliteettikäyrän symmetriaa, joka voidaan ilmaista seuraavasti:

$$\mu(H) = \mu(-H) \quad (10)$$

- Anturin sydämellä 2 on tämä symmetriaominaisuus riippumatta lämpötilasta ja useimmista anturin valmistuspuutteista huolimatta. Jos piiri voi ottaa näytteen permeabiliteettikäyrän kummallakin puolella, niin kulloisenkin näytteen pulssileveydet
10 voidaan vähentää toisistaan, niin että saadulla lukemalla ei ole näennäisesti mitään nollapoikkeamaa. Nämä kaksi erilaista mutta symmetristä näytettä voidaan saada vaihtamalla anturin kytkennät magnetometripiiriin näytteiden välillä. Ulkoinen magneettikenttä, joka lyhentää pulssin leveyttä ensimmäisen näytteen aikana, pi-
15 dentää pulssin leveyttä toisen näytteen aikana. Näiden kahden pulssileveyden erotus heijastaa kaksi kertaa yhden näytteen poikkeaman nollakohdasta.

- Vaikka anturin kytkennät piiriin voidaan vaihtaa suoraan analogisten kytkimien avulla, tämä toteutus ei tuota parasta tulosta käytettävissä olevalla piiriteknologialla. Kuvassa 5 esitetty magnetometripiiri 50 on todennäköisesti suoraviivaisin versio
20 pienitehoisesta magnetometrasta, jolla saadaan nollakohdan poikkeaman kompensointi. Magnetometripiirissä 50 osa piiristä on sama, jota käytettiin magnetometripiirissä 1, ja niissä kohdin, joissa kulloinkin elementti on yhteinen, sitä varten käytetään samaa viitenumeroa. Nollakohdan poikkeaman kompensoinnin aikaansaamiseksi varaus-purkausjakso induktorin L kautta on järjestetty niin, että se ensimmäisessä tilassa aikaansaa induktorin L purkauksen ja varauksen liitospisteen N3 kautta, ja toisessa vaiheessa anturin L varauksen ja purkauksen liitospisteen N2 kautta. Nollakohdan poikkeaman kompensoinnin aikaansaamiseksi kytkimiä S3, S4, S5, S6, S7 ja S8 ohjataan kuvassa 5 katkoviivoin osoitetun kaksisuuntaisen ohjauspiirin
15 ohjauslähdeillä alla kuvatulla tavalla. D-kiikun 5 lisäksi kaksisuuntainen ohjauspiiri 15 sisältää JA-portit 16, 17, 18 ja 19. Ennen näytteenoton aloittamista asetetaan joko ensimmäisen tilan valintajohto 20 (First State Select) tai toisen tilan valintajohto 21 (Second State Select) ylätilaan, ja toinen näistä johdoista alatilaa. Näitä tuloja käytetään valitsemaan toinen piirin tiloista, jossa näyte otetaan. Siinä tapauksessa, jossa ensimmäisen tilan valintajohto 20 asetetaan ylätilaan ja toisen tilan valintajohto 21 on alatilassa, analoginen kytkin S7 on kiinni, ja analoginen kytkin S8 on auki. Kun jakson aloitussignaalin johdon 22 nouseva reuna aktivoi D-kiikun 5, analoginen kytkin S3 menee kiinni, jolloin anturi L varataan kondensaattorin C
30
35

kautta. Anturin L kautta kulkeva virta kulkee myös ilmaisuvastuksen R2 läpi analogisen kytkimen S7 kautta. Kun vastuksen R2 yli vaikuttava jännite saavuttaa arvon V_H , Schmitt-liipaisinpiirin 4 lähtö menee alatilaa ja nolaa D-kiikun 5. Sen jälkeen analogiset kytkimet S3 ja S5 avataan ja vastaavasti suljetaan, jolloin anturi L pakotetaan purkautumaan maahan. Kun vastuksen R2 yli vaikuttava jännite laskee arvoon V_L , Schmitt-liipaisinpiirin 4 lähtö palaa ylätilaan. Piirin symmetrian johdosta vastakkaisen napaisuuden näytteen ottaminen (eli kun toisen tilan valinta-johto on ylätilassa ja ensimmäisen tilan valinta-johto on alatilassa) on samanlainen kuin edellä kuvattu tilanne, paitsi että anturi L on piirissä kytketty vastakkaissuuntaiseksi. Nollapoikkeaman kompensoinnin laatu määräytyy lähes yksinomaan kulloisenkin analogisen kytkimen sovituksesta symmetrisesti toiseen kytkimeen: eli S5 ja S6, sekä S7 ja S8. Koska analogisilla kytkimillä S3 ja S4 on merkitystä vain anturia L varattaessa, niillä ei ole mitään suoraan vaikutusta lähtöpulssin leveyteen. Edellyttäen että analogiset kytkinparit S5 - S6 ja S7 - S8 ovat hyvin sovitettuja ja/tai että niillä on pieni johtavan tilan resistanssi virtaa ilmaisevaan vastukseen R2 verrattuna, niin magnetometrin nollakohdan poikkeaman tulisi olla minimoitu. CMOS-piirejä käyttäen, kuten tyypillisessä kellosovellutuksessa, analogiset kytkimet voidaan toteuttaa käyttäen joko välitysportteja (komplementaarinen MOSFET-pari) tai yksittäisiä N- tai P-kanava-MOSFET-transistoreita. Analogiset kytkimet S3 ja S4 voidaan toteuttaa pelkästään P-kanava-MOSFET-transistoreilla, koska jännite kondensaattorin C yli on lähellä positiivista syöttöjännitettä V_s . Samalla tavalla voidaan analogiset kytkimet S5 ja S6 toteuttaa vain N-kanava MOSFET-transistoreilla, koska nämä kytkimet liittyvät maajohtimeen. Analogiset kytkimet S7 ja S8 toteutetaan parhaimmin välitysportteina, koska kytkimien liitospisteiden N2 ja N3 signaalijännitteet kattavan laajan alan syöttöjohtojen jännitteiden välillä.

Eräissä tapauksissa kuvan 5 piirissä analogisten kytkimien S7 ja S8 välillä ei ehkä ole mahdollista aikaansaada oikeata sovitusta pienen nollapoikkeaman saavuttamiseksi. Kuvassa 6 esitetyllä magnetometripiirillä 60 tämä ongelma vältetään käyttämällä analogisia kytkimiä (S9 ja S10), jotka pidetään lähellä maajohtinta. Tämä aikaansaadaan osaksi käyttämällä kahta virran ilmaisevaa sovitettua vastusta R3 ja R4, edellisten piirien yhden vastuksen R2 sijasta. Samaten otetaan käyttöön kaksi uutta analogista kytkintä S11 ja S12, vaikka niillä voi olla suhteellisen suuri johtavan tilan resistanssi, koska niiden ei tarvitse johtaa mitään merkittäviä virtoja. Kuvassa 6 esitetyn magnetometripiirin 60 eräs ensisijaisista eduista on mahdollisuus toteuttaa kaikki ratkaisevat sovitetut parit analogisina kytkiminä (S5 - S6 ja S9 - S10) N-kanava MOSFET-transistoreita käyttäen. Koska näiden kytkimien osalta pieni johtavan tilan resistanssi on selvä etu, N-kanava-transistorit ovat paras valinta laitteiston kannalta. Lyhyesti esittäen magnetometripiiri 60 toimii seuraavalla tavalla. Samaan tapaan kuin magnetometripiirin 50 toiminnassa, kaksisuuntainen ohja-

- uspiiri 15 toimii niin, että kun ensimmäisen tilan valintajohto 20 on ylätilassa ja toisen tilan valintajohto 21 on alatilassa, kytkimet S9 ja S11 ovat kiinni ja vastus R3 toimii impedanssina, jonka yli mitataan anturin L läpi kulkevaa virtaa osoittava jännite. Jakson aloitussignaali (Initiate Cycle Signal) järjestetään jakson aloitusjohdolle 22, joka johtaa kytkimen S3 sulkemiseen, niin että anturille L johdetaan käyttöjännite. Kun vastuksen R3 yli vaikuttava jännite saavuttaa arvon V_H , Schmitt-liipaisinpiirin 4 lähtö menee alatilaan nollaten D-kiikun 5. Sen jälkeen analogiset kytkimet S3 ja S5 avataan ja vastaavasti suljetaan, jolloin pakotetaan anturi L purkautumaan maahan. Kun vastuksen R3 yli vaikuttava jännite laskee arvoon V_L , Schmitt-liipaisinpiirin 4 lähtö palaa ylätilaan, jolloin näytteenotto on valmis. Piirin symmetrian johdosta saadaan toinen näyte käyttäen ylätilan tuloa toisen tilan valintajohdolla 21 ja alatila ensimmäisen tilan valintajohdolla 20. Tässä toisessa toimintatilassa käytetään kytkimiä S4, S6, S10 ja S12, jolloin saadussa jaksossa liitospistettä N2 syötetään ensin kondensaattorista C ja jonka jälkeen se kytketään maahan kytkimen S6 kautta.

- Jos neljän MOSFET-transistorin viemä tila kytkimien S5-S6 ja S9-S10 toteuttamiseksi magnetometripiirissä 60 on merkittävä ongelma, kuvassa 7 esitetty magnetometripiiri 70 tarjoaa toisen vaihtoehdon. Magnetometripiiri 70 tarvitsee vain yhden huolellisesti sovitettua N-kanava MOSFET-transistoriparin analogisia kytkimiä S13 ja S14 varten. Tämä rakenteen yksinkertaistus vaatii vuorostaan kahden uuden seikan huomioonottamista: 1) molempien pienivirtaisten analogiakytöntien S11 ja S12 on nyt estettävä maapotentiaalinalapuolella olevia jännitteitä, kun ne ovat johtamattomia, ja 2) vastusten R5 ja R6 arvot on nyt karkeasti puolitettava magnetometripiirissä 60 käytettyihin arvoihin R3 ja R4 verrattuna, joka vaatii vastaa Schmitt-liipaisinpiirin kynnysarvojen V_L ja V_H puolittamista. Ensimmäinen näkökohta vaatii sen, että analogisilla kytkimillä S11 ja S12 on oltava negatiivinen virransyöttö maajohtimen alapuolella, sekä tason muunnos ohjaussignaalin osalta. Resistanssien ja kynnysarvojen pienentäminen on suhteellisen suoraviivaista, vaikka se lisää häiriöherkkyyttä. Kokonaisuutena magnetometripiirin 70 tulisi olla taloudellisin toteutettavaksi piillä CMOS-teknologiaa käyttäen.

- Käytössä magnetometripiiri 70 käyttää hieman erilaista ohjauspiiriä, joka on osoitettu kaksisuuntaisena ohjauspiirinä 27. Monet kaksisuuntaisen piirin 27 komponenteista ovat yhteisiä magnetometripiireissä 50 ja 60 esitetyn kaksisuuntaisen ohjauspiiriin 15 kanssa, ja vastaavasti niille käytetään samoja viitenumeroita. Magnetometripiirin 70 osalta kaksisuuntainen ohjauspiiri 28 sisältää JA-portit 25 ja 26, jotka ohjaavat kytkimiä S13 ja vastaavasti S14. Ensimmäisessä toimintatilassa ylätason signaalin järjestetään ensimmäisen tilan valintajohdolle 20 ja toisen tilan valintajohdolle 21 järjestetään alatasen signaali. Ensimmäisessä toimintatilassa käytetään

kytkimiä S3, S11, S13 ja S14. Tässä ensimmäisessä toimintatilassa liitospiste N3
 kytketään vuorotellen kondensaattorin C varaukseen ja toisaalta maahan kytkimen
 S13 ja vastuksen R5 kautta. Koko tämän ensimmäisen toimintatilan aikana vastus
 R6 ja kytkimet S14 ja S11 tarjoavat Schmitt-liipaisinpiirille 4 mahdollisuuden mita-
 5 ta jännitettä liitospisteessä N2, ja siten anturin L läpi kulkevaa virtaa. Toisen toi-
 mintavaiheen aikana, jolloin toisen tilan valintajohto 21 on ylätilassa, ja ensimmäi-
 sen tilan valintajohto 20 on alatilassa, käytetään kytkimiä S4, S12, S14 ja S13. Täs-
 sä toimintatilassa liitospiste N2 kytketään vuorotellen kondensaattorin C varauk-
 seen ja toisaalta maahan kytkimen S14 ja vastuksen R6 kautta. Koko tämän toisen
 10 toimintatilan aikana vastus R5 ja kytkimet S12 tarjoavat Schmitt-liipaisinpiirille 4
 mahdollisuuden mitata jännitettä liitospisteessä N3, ja siten anturin L läpi kulkevaa
 virtaa.

Vaikka magnetometriä 1, 50, 60 ja 70 magnetometripiirien arkkitehtuuri soveltuu
 hyvin CMOS-piiriteknologiaan, voidaan muitakin piirikomponentteja käyttää. Kos-
 15 ka piireissä 50, 60 ja 70 käytetty nollapoikkeaman kompensoinnin suorituskyky pe-
 rustuu analogisten kytkimien sovittamiseen, bipolaarisia tai muita teknologioita
 käyttävillä kytkinkomponenteilla on edelleen oltava hyvin sovitettuja jännitehäviöt.
 Jos esimerkiksi N-kanava MOSFET-transistorien sijasta käytetään kyllästyviä yh-
 teisemitteri-NPN-transistoreita, näiden transistorien kyllästysjännitteet tulisi sovit-
 20 taa varsin hyvin. Kuvien 5 ja 6 magnetometripiirien 50 ja 60 tapauksessa analogiset
 kytkimet S5 ja S6 voidaan toteuttaa diodein, joiden anodit on kytketty maahan. Ne
 johtavat anturin L purkamisen aikana vaatimatta mitään erityistä ohjausta. Taaskin
 diodien sovitus on tärkeä tarkkuuden kannalta; polvekejännitteiden tulisi olla hyvin
 sovitettuja. Kun otetaan huomioon sovitukselle asetetut vaatimukset, MOSFET-
 25 transistorit ovat tällä hetkellä edullisimpina pidetyt kytkinelementit. Siinä missä
 MOSFET-transistorien resistanssia johtavassa tilassa voidaan pienentää, niin että
 heikosti sovitetuilla transistoreilla on samanlaiset jännitehäviöt, bipolaarikytkimillä
 tai diodeilla ei ole verrattavissa olevaa mahdollisuutta.

Kun magnetometripiirejä käytetään elektronisessa digitaalisessa kompassissa, on
 30 magneettikenttiä pystyttävä ilmaisemaan monien akseleiden suunnassa. Kuvassa 8
 havainnollistetaan erään kaksiakselisen piirin suoritusmuotoa, jossa esitetään kaa-
 viomaisesti kaksiakselinen magnetometripiiri 80. Kaksiakselisessa magnetometri-
 piirissä 80 käytetään ensimmäistä ja toista akselia varten antureita L1 ja vastaavasti
 L2, sekä magnetometripiirin kuvassa 7 esitettyä tyyppiä. Fyysiseltä kannalta anturit
 35 L1 ja L2 sijoitetaan niin, että niiden sydämet ovat 90°:n kulmassa. Kuvan 8 kaksi-
 akselisessa magnetometripiirissä virran anturi on toteutettu komparaattorilla U4,
 jolla on takaisinkytkentävästus R9 ja jännitteenjakaaja, joka käsittää vastukset R7 ja
 R8. Komparaattori U4 voi olla tavallinen laite, kuten National Semiconductor

- LM311. MOSFET-kytkimiä Q1 - Q8 ohjataan demultiplekserilla U2, joka voi olla 1:8 digitaalinen demultiplekseri, kuten vakiomallinen 74HC138 HCMOS-logiikkalaite. Antureiden L1 ja L2 lähdöt kytketään komparaattorin lähtöön U3-piirin avulla, joka on 8:1 analoginen multiplekseri, kuten vakiomallinen 74HC4051 HCMOS-laite. N-kanava MOSFET-kytkimet Q1, Q3, Q5 ja Q7 ovat pienen signaalin kytkinlaitteita, kuten VN2222, jota valmistaa Siliconix. P-kanava MOSFET-kytkinlaitteet Q2, Q4, Q6 ja Q8 ovat pienen signaalin kytkinlaitteita, kuten VP0610, jota valmistaa Siliconix. Anturin syöttöreitillä olevat neljä vastusta on toteutettu yhtenä vastusverkkona RN1, jotta varmistettaisiin niiden hyvä sovitus; tällä saadaan hyvä tapa varmistaa sovitus sekä niin lämpötilaseuranta. Anturit L1 ja L2 sisältävät kulloinkin kelan 83 ja vastaavasti 84. Molemmissa keloissa on likimäärin 1000 kierrosta kokoa gauge 40 olevaa lankaa, joka oli käämittä kulloisenkin sydämen ympäri solenoidin tavoin. Antureiden L1 ja L2 sydänten 81 ja vastaavasti 82 materiaali voi olla tyypillinen kappale amorfista metalli-lasi-kalvoa 2705M, jota toimittaa Allied Signal. Tyypillistä herkkyyss- ja dynamiikka-aluetta varten anturin sydän on 10,2 mm pitkä ja 0,51 mm leveä. Tyypillisessä kallistuksen suhteen kompensoimattomassa kompassisovellutuksessa anturit L1 ja L2 suunnataan suoraan kulmaan toistensa suhteen niin, että ne ilmaisevat maan magneettikentän kaksi vektorikomponenttia. Ohjaava kiikku U1 voidaan toteuttaa vakiomallisella 74HC74 HCMOS-logiikkalaitteella.

- Kuvassa 8 esitetty kaksiakselinen piiri 80 tarjoaa tavan, jolla otetaan näytteitä kummaltakin akselilta peräkkäin. Magnetometri on tarkoitettu käytettäväksi mikroprosessorin tai muun sekvenssilogiikkapiirin kanssa, joka voi ottaa sarjan näytteitä, ja kun data on digitalisoitu, laskea tuloksena olevan atsimuutin. Atsimuutin datan saamiseksi on otettava yhteensä neljä näytettä; yksi näyte kummassakin suunnassa kummaltakin akselilta. Kun akselitulo (Axis) on alatilassa, anturi L2 ei ole aktiivinen, ja anturilta L1 otetaan näyte. Tällöin napaisuus-tulon (Polarity) alatilassa voidaan anturi L1 varata Q2:n kautta kulkevalla virralla. Anturin L1 läpi kulkeva virta johtaa vastuksen RN1b yli vaikuttavaan jännitteeseen, joka analogisen multiplekserin tulon A0 kautta ilmenee komparaattorin U4 tulossa (invertoiva Schmitt-liipaisinpiiri). Jakson purkausosan aikana Q2 kytketään pois päältä ja Q1 muodostaa anturivirran purkausreitillä maahan. Magneettikentän mittaaminen vastakkaiseen suuntaan anturia L1 pitkin toteutetaan asettamalla napaisuus-tulo ylätilaan. Anturilta L2 voidaan ottaa samanlainen vastakkaisen napaisuuden näytteitä asettamalla akselitulo ylätilaan. Jos 60 Hz magneettikentät muodostavat merkittävän häiriölähteen kohteena olevassa sovellutuksessa, näytteet tulisi ajallisesti tahdistaa tähän taajuu-teen. Eräänä mahdollisena menetelmänä on vastakkaisen napaisuuden näytteiden ottaminen 1/120 sekunnin välein. Jos tämän näytteenottotaajuuus on liian suuri, piiri voi viivastaa toista näytettä 1/60 sekunnin moninkerran verran. Näytteiden erotuk-

set kumoavat häiritsevän 60 Hz -kentän peruskomponentin. Esimerkiksi magnetometripiirissä 70 toisen tilan näytteenotto tulisi aloittaa 1/120 s ensimmäisen tilan näytteenoton aloittamisen jälkeen.

- Kuvat 9a ja 9b esittävät elektronisten kompassijärjestelmien 90 ja vastaavasti 91
- 5 lohkokaaviot, joissa käytetään esillä olevan keksinnön mukaista lyhyen näytteenoton magnetometriä. Molempia järjestelmiä ohjataan mikroprosessorilla 92, ja ne tuottavat ulostulon näytöllä 93. Kuvan 9a järjestelmässä magnetometrin lähdön pulssin leveys digitalisoidaan käyttäen yksinkertaista laskurimenetelmää. Pulssitu-
loa voidaan käyttää avainnussignaalin pulssin leveyslaskuria 93 varten. Laskuria
- 10 93 kelloitetaan stabiililataajuusreferenssiapiirillä 94, joka voidaan aikaansaada kideoskillaattorilla. Eräissä sovellutuksissa vaadittu taajuus tätä referenssiä varten voi aiheuttaa liian suuren tehohäviön. Vaihtoehtoisesti kuvassa 9b esitetty elektroninen kompassipiiri voi mahdollisesti olla pienempitehoinen vaihtoehto. Magnetometrin lähtöpulssin leveys digitalisoidaan käyttämällä magnetometrin 80 lähtöpulssia
- 15 avainnussignaalin analogista integraattoriapiiriä 95 varten. Integraattoriapiirin 95 lähtö johdetaan analogia/digitaali-muuntimelle 96, jossa se mitataan. Integraattoria ja analogia/digitaali-muunninta varten käytettyjä vahvistavia elementtejä voidaan käyttää jaksollisesti, ja tämän vuoksi niillä on pieni keskimääräinen tehonkulutus.



Patenttivaatimukset

1. Magnetometripiiri, joka pystyy mittaamaan magneettikentän yhden kytkentäjaks-
son aikana, **tunnettu** siitä, että mainittu magnetometripiiri käsittää:

- kyllästyvän sydämen käsittävän anturikelan, jolla on ensimmäinen ja toinen liitän-
5 tä;
- ensimmäisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitäntä;
- välineet mainitun ensimmäisen impedanssin mainitun ensimmäisen liitännän kyt-
kemiseksi mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitäntään ja välineet mainitun
ensimmäisen impedanssin mainitun toisen liitännän kytkemiseksi maapotentiaaliin;
- 10 - ensimmäisen kytkimen mainitun anturikelan ensimmäisen liitännän kytkemiseksi
jänniteliitäntäpisteeseen jännitelähteen tuottaman jännitteen vastaanottamiseksi
mainitun yhden jakson ensimmäisen osan aikana;
- toisen kytkimen mainitun anturikelan ensimmäisen liitännän kytkemiseksi mainit-
tuun maapotentiaaliin mainitun yhden jakson toisen osan aikana;
- 15 - jänniteanturin, jolla on tuloliitäntä ja lähtöliitäntä, jolloin mainittu jänniteanturi on
järjestetty tuottamaan mainittuun lähtöliitäntäänsä ensimmäisen suuruuden
omaavan lähtösignaalin sen mainittuun tuloliitäntään johdetun jännitteen ylittäessä
ensimmäisen kynnysarvon, ja jolloin mainittu jänniteanturi on järjestetty tuotta-
maan mainittuun lähtöliitäntäänsä toisen suuruuden omaavan lähtösignaalin sen
20 mainittuun tuloliitäntään johdetun jännitteen alittaessa toisen kynnysarvon;
- välineet, mainitun jänniteanturin mainitun tuloliitännän liittämiseksi mainitun
anturikelan mainittuun toiseen liitäntään;
- ohjauspiirin, jolla on ensimmäinen ja toinen tuloliitäntä ohjaussignaalien vas-
taanottamiseksi sekä ensimmäinen ja toinen lähtöliitäntä ohjaussignaalien tuottami-
25 seksi;
- välineet, mainitun jänniteanturin mainitun tuloliitännän liittämiseksi mainitun
ohjauspiirin mainittuun ensimmäiseen tuloliitäntään;
- välineet, mainitun ohjauspiirin mainitun ensimmäisen lähtöliitännän liittämiseksi
mainittuun ensimmäiseen kytkimeen mainitun ensimmäisen kytkimen toiminnan
30 ohjaamiseksi; ja
- välineet, mainitun ohjauspiirin mainitun toisen lähtöliitännän liittämiseksi mainit-
tuun toiseen kytkimeen mainitun toisen kytkimen toiminnan ohjaamiseksi.

2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että mainittu
jänniteanturi käsittää Schmitt-liipaisinpiirin.

3. Patenttivaatimuksen 1 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että mainittu
jänniteanturi käsittää komparaattorin.

4. Patenttivaatimuksen 1 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että mainittu ohjauspiiri käsittää D-kiikun.

5. Patenttivaatimuksen 1 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että mainittu jänniteanturi käsittää ensimmäisen ja toisen komparaattorin sekä RS-kiikun.

5 6. Patenttivaatimuksen 1 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että se lisäksi käsittää kondensaattorin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitäntä, jolloin mainittu kondensaattorin ensimmäinen liitäntä on kytketty mainittuun jänniteliitäntäpisteeseen ja mainittu kondensaattorin toinen liitäntä on kytketty mainittuun maapotentiaaliin, toisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitäntä, välineet maini-
10 tun toisen impedanssin mainitun ensimmäisen liitännän kytkemiseksi mainittuun jännitelähteeseen, ja välineet mainitun toisen impedanssin mainitun toisen liitännän kytkemiseksi mainittuun jänniteliitäntäpisteeseen.

7. Patenttivaatimuksen 1 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että se lisäksi käsittää välineet, mainitun jännitelähteen ensimmäisen liitännän kytkemiseksi
15 mainittuun jänniteliitäntäpisteeseen, sekä välineet, mainitun jännitelähteen toisen liitännän kytkemiseksi mainittuun maapotentiaaliin.

8. Patenttivaatimuksen 7 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että mainittu jänniteanturi käsittää Schmitt-liipaisinpiirin, ja että mainittu ohjauspiiri käsittää D-kiikun.

20 9. Magnetometripiiri, joka pystyy mittaamaan magneettikentän yhden kytkentäjaks-
son aikana, **tunnettu** siitä, että mainittu magnetometripiiri käsittää:
- kyllästyvän sydämen käsittävän anturikelan, jolla on ensimmäinen ja toinen liitän-
tä;
- ensimmäisen kytkimen mainitun anturikelan ensimmäisen liitännän kytkemiseksi
25 selektiivisesti virtalähteeseen mainitun yhden jakson ensimmäisen osan aikana;
- toisen kytkimen mainitun anturikelan ensimmäisen liitännän kytkemiseksi selek-
tiivisesti maapotentiaaliin mainitun yhden jakson toisen osan aikana;
- virta-anturin mainitun anturikelan läpi kulkevan virran mittaamiseksi, jolloin
mainitulla virta-anturilla on tuloliitäntä ja lähtöliitäntä;
30 - välineet, mainitun virta-anturin mainitun tuloliitännän kytkemiseksi mainitun
anturikelan mainittuun toiseen liitäntään virtatien muodostamiseksi mainitun antu-
rikelan läpi maapotentiaaliin, jolloin mainittu virta-anturi voi mitata mainitun
anturikelan läpi kulkevan virran; ja
- piirijärjestelyn mainitun ensimmäisen ja mainitun toisen kytkimen ohjaamiseksi
35 mainitussa kytkentäjaksossa siten, että mainitun kytkentäjaksoson mainitun ensim-
mäisen osan aikana säilytetään yhteys mainitun anturikelan mainitun toisen liitän-

nän ja maapotentiaalin välillä ja mainittu ensimmäinen kytkin liittää mainitun virtalähteen mainitun anturikelan ensimmäiseen liitäntään, ja että mainitun kytkentäjaksen mainitun toisen osan aikana säilytetään yhteys mainitun anturikelan mainitun toisen liitännän ja maapotentiaalin välillä ja mainittu toinen kytkin liittää mainitun anturikelan ensimmäisen liitännän maapotentiaaliin, jolloin mainittu virta-anturi on järjestetty tuottamaan mainittuun lähtöönsä ensimmäisen lähtösignaalin, kun anturikelan läpi kulkeva virta nousee ensimmäiselle kynnystasolle, ja jolloin mainittu virta-anturi on järjestetty tuottamaan mainittuun lähtöönsä toisen lähtösignaalin, kun anturikelan läpi kulkeva virta laskee toiselle kynnystasolle.

10 10. Patenttivaatimuksen 9 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että mainittu virta-anturi käsittää:

- impedanssin, jonka ensimmäinen liitäntä on kytketty mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitäntään, ja jonka toinen liitäntä on kytketty mainittuun maapotentiaaliin;

15 - Schmitt-liipaisinpiirin, jolla on tuloliitäntä ja lähtöliitäntä, jolloin mainittu magnetometripiiri sisältää välineet mainitun Schmitt-liipaisinpiirin mainitun tuloliitännän liittämiseksi mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitäntään.

11. Patenttivaatimuksen 9 mukainen magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että mainittu virta-anturi käsittää

20 - impedanssin, jonka ensimmäinen liitäntä on kytketty mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitäntään, ja jonka toinen liitäntä on kytketty mainittuun maapotentiaaliin; ja

25 - komparaattorin, jolla on tuloliitäntä ja lähtöliitäntä, jolloin mainittu magnetometripiiri sisältää välineet mainitun komparaattorin mainitun tuloliitännän liittämiseksi mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitäntään.

12. Magnetometripiiri, **tunnettu** siitä, että se käsittää:

- ensimmäisen ja toisen teholiitännän potentiaalin liittämistä varten;

- kyllästyvän sydämen sisältävän anturikelan, jolla on ensimmäinen ja toinen liitäntä;

30 - ensimmäisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitäntä;

- välineet mainitun ensimmäisen impedanssin mainitun toisen liitännän kytkemiseksi mainittuun ensimmäiseen teholiitäntään;

- jänniteanturin, jolla on tuloliitäntä ja lähtöliitäntä, joka jänniteanturi on järjestetty

35 - vasteena tuloliitännässä esiintyvälle ensimmäisen jännitetason suuruiselle jännitteelle tuottamaan lähtöliitäntään ensimmäisen lähtösignaalitason suuruisen signaalin, ja

- vasteena tuloliitännässä esiintyvälle toisen jännitetason suuruiselle jännitteelle tuottamaan lähtöliitántään toisen lähtösignaalitason suuruisen signaalin;
 - ensimmäisen kytkimen mainitun toisen teholiitännän selektiivistä mainitun anturikelan mainittuun ensimmäiseen liitántään kytkemistä varten;
 - 5 - toisen kytkimen mainitun anturikelan mainitun ensimmäisen liitännän selektiivistä mainittuun ensimmäiseen teholiitántään kytkemistä varten
 - kolmannen kytkimen mainitun anturikelan mainitun toisen liitännän selektiivistä mainitun jänniteanturin mainittuun tuloliitántään kytkemistä varten;
 - neljännen kytkimen mainitun toisen teholiitännän selektiivistä mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitántään kytkemistä varten;
 - 10 - viidennen kytkimen mainitun anturikelan mainitun toisen liitännän selektiivistä mainittuun ensimmäiseen teholiitántään kytkemistä varten;
 - kuudennen kytkimen mainitun anturikelan mainitun ensimmäisen liitännän selektiivistä mainittuun jänniteanturiin kytkemistä varten;
 - 15 - kaksisuuntaisen ohjauspiirin, jolla on ensimmäisen tilan valinnan tuloliitántä ensimmäisen tilan valintasygnaalin vastaanottamiseksi, toisen tilan valinnan tuloliitántä toisen tilan valintasygnaalin vastaanottamiseksi, kolmas tuloliitántä, jakson aloitustuloliitántä jakson aloitussygnaalin vastaanottamiseksi, ja joukko lähtöliitántöjä, kulloinkin yksi jokaista mainittua kytkintä varten;
 - 20 - välineet mainitun jänniteanturin mainitun lähtöliitännän kytkemiseksi mainitun kaksisuuntaisen ohjauspiirin mainittuun kolmanteen liitántään;
 - välineet mainitun kaksisuuntaisen ohjauspiirin jokaisen lähtöliitännän kytkemiseksi kulloiseenkin kytkimeen, jolloin mainittu kaksisuuntainen ohjauspiiri käsittää logiikkapiirin, joka on aloitussygnaalin ja ensimmäisen tilan valintasygnaalin
 - 25 vastaanottamisen perusteella järjestetty selektiivisesti ohjaamaan mainittuja ensimmäistä, toista ja kolmatta kytkintä lähtösignaalin tuottamiseksi mainitun jänniteanturin lähtöliitántään, jonka logiikkapiirin lisäksi mainittu kaksisuuntainen ohjauspiiri käsittää logiikkapiirin, joka on aloitussygnaalin ja toisen tilan valintasygnaalin vastaanottamisen perusteella järjestetty selektiivisesti ohjaamaan
 - 30 mainittuja neljättä, viidettä ja kuudetta kytkintä lähtösignaalin tuottamiseksi mainitun jänniteanturin lähtöliitántään.
13. Magnetometripiiri, joka pystyy mittaamaan magneettikentän yhden kytkentäjaksen aikana, tunnettu siitä, että mainittu magnetometripiiri käsittää:
- kyllästyvän sydämen sisältävän anturikelan, jolla on ensimmäinen ja toinen liitántä;
 - 35 - jänniteanturin, jolla on tuloliitántä ja lähtöliitántä;
 - impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitántä, sekä välineet impedanssin mainitun ensimmäisen liitännän kytkemiseksi maapotentiaaliin ja välineet impedanssin mainitun toisen liitännän kytkemiseksi mainitun jänniteanturin mainittuun

tuloliitántään;

- piirijärjestelyn virran kaksisuuntaisen virtauksen aikaansaamiseksi mainitun anturikelan läpi ensimmäisessä ja toisessa toimintatilassa, niin että ensimmäisessä toimintatilassa anturikelan toinen liitántä on kytketty mainitun jänniteanturin tuloliitántään ja anturikelan ensimmäinen liitántä on kytketty peräkkäin ja vuorotellen ensin virtalähteeseen ja sitten maapotentiaaliin, ja niin että toisessa toimintatilassa anturikelan ensimmäinen liitántä on kytketty mainitun jänniteanturin tuloliitántään ja anturikelan ensimmäinen liitántä on kytketty peräkkäin ja vuorotellen ensin mainittuun virtalähteeseen ja sitten maapotentiaaliin.

10 14. Magnetometripiiri, tunnettu siitä, että se käsittää:

- ensimmäisen ja toisen teholiitännän potentiaalin liittämistä varten;
- kyllästyvän sydämen sisältävän anturikelan, jolla on ensimmäinen ja toinen liitántä;

15 - jänniteanturin, jolla on tuloliitántä ja lähtöliitántä, joka jänniteanturi on järjestetty
- vasteena tuloliitännässä esiintyvälle ensimmäisen jännitetason suuruiselle jännitteelle tuottamaan lähtöliitántään ensimmäisen lähtösignaalitason suuruisen signaalin, ja

- vasteena tuloliitännässä esiintyvälle toisen jännitetason suuruiselle jännitteelle tuottamaan lähtöliitántään toisen lähtösignaalitason suuruisen signaalin;

20 - ensimmäisen kytkimen mainitun toisen teholiitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainitun anturikelan mainittuun ensimmäiseen liitántään;

- toisen kytkimen mainitun anturikelan mainitun ensimmäisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainittuun ensimmäiseen teholiitántään;

- ensimmäisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitántä;

25 - välineet mainitun ensimmäisen impedanssin mainitun ensimmäisen liitännän kytkemiseksi mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitántään;

- kolmannen kytkimen mainitun ensimmäisen impedanssin mainitun toisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainittuun ensimmäiseen teholiitántään;

30 - neljännen kytkimen mainitun anturikelan toisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainitun jänniteanturin mainittuun tuloliitántään;

- viidennen kytkimen mainitun toisen teholiitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainitun anturikelan toiseen liitántään;

- kuudennen kytkimen mainitun anturikelan toisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainittuun ensimmäiseen teholiitántään;

35 - toisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitántä;

- välineet mainitun toisen impedanssin ensimmäisen liitännän kytkemiseksi mainitun anturikelan ensimmäiseen liitántään;

- seitsemännen kytkimen mainitun toisen impedanssin toisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainittuun ensimmäiseen teholiitántään;

- kahdeksannen kytkimen mainitun anturikelan ensimmäisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainitun jänniteanturin tuloliitántään;
- kaksisuuntaisen ohjauspiirin, jolla on ensimmäisen tilan valinnan tuloliitántä ensimmäisen tilan valintasihtaalín vastaanottamiseksi, toisen tilan valinnan tuloliitántä toisen tilan valintasihtaalín vastaanottamiseksi, kolmas tuloliitántä, jakson aloitustuloliitántä jakson aloitussihtaalín vastaanottamiseksi, ja joukko lähtöliitántöjä, kulloinkin yksi jokaista mainittua kytkintä varten;
- välineet mainitun jänniteanturin mainitun lähtöliitännän kytkemiseksi mainitun kaksisuuntaisen ohjauspiirin mainittuun kolmanteen liitántään;
- 10 - välineet mainitun kaksisuuntaisen ohjauspiirin jokaisen lähtöliitännän kytkemiseksi kulloiseenkin kytkimeen, jolloin mainittu kaksisuuntainen ohjauspiiri käsittää logiikkapiirin, joka on aloitussihtaalín ja ensimmäisen tilan valintasihtaalín vastaanottamisen perusteella järjestetty selektiivisesti ohjaamaan mainittuja ensimmäistä, toista, kolmatta ja neljättä kytkintä lähtösihtaalín tuottamiseksi
- 15 mainitun jänniteanturin lähtöliitántään, jolloin mainittu kaksisuuntainen ohjauspiiri lisäksi käsittää logiikkapiirin, joka on aloitussihtaalín ja toisen tilan valintasihtaalín vastaanottamisen perusteella järjestetty selektiivisesti ohjaamaan mainittuja viidettä, kuudetta, seitsemättä ja kahdeksatta kytkintä lähtösihtaalín tuottamiseksi mainitun jänniteanturin lähtöliitántään.
- 20 15. Magnetometripiiri, tunnettu siitä, että se käsittää:
 - kyllästyvän sydämen sisältävän anturikelan, jolla on ensimmäinen ja toinen liitántä;
 - ensimmäisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitántä;
 - välineet mainitun ensimmäisen impedanssin mainitun ensimmäisen liitännän kytkemiseksi mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitántään;
 - 25 - toisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitántä;
 - välineet mainitun toisen impedanssin ensimmäisen liitännän kytkemiseksi mainitun anturikelan ensimmäiseen liitántään;
 - piirijärjestelyn virran kaksisuuntaisen virtauksen aikaansaamiseksi mainitun anturikelan läpi ensimmäisessä ja toisessa toimintatilassa, niin että ensimmäisessä toimintatilassa anturikelan toinen liitántä on kytketty mainitun ensimmäisen impedanssin ensimmäiseen liitántään ja mainitun anturikelan toinen liitántä on kytketty peräkkäin ja vuorotellen ensin virtalähteeseen ja sitten maapotentiaaliin, ja niin että toisessa toimintatilassa mainitun anturikelan ensimmäinen liitántä on kytketty
 - 30 mainitun toisen impedanssin ensimmäiseen liitántään ja mainitun anturikelan toinen liitántä on kytketty peräkkäin ja vuorotellen ensin mainittuun virtalähteeseen ja sitten maapotentiaaliin.
 - 35

16. Magnetometripiiri, tunnettu siitä, että se käsittää:

- ensimmäisen ja toisen teholiitännän potentiaalin liittämistä varten;
- kyllästyvän sydämen sisältävän anturikelan, jolla on ensimmäinen ja toinen liitäntä;

5 - jänniteanturin, jolla on tuloliitäntä ja lähtöliitäntä, joka jänniteanturi on järjestetty - vasteena tuloliitännässä esiintyvälle ensimmäisen jännitetason suuruuselle jännitteelle tuottamaan lähtöliitántään ensimmäisen lähtösignaalitason suuruisen signaalin, ja

10 - vasteena tuloliitännässä esiintyvälle toisen jännitetason suuruuselle jännitteelle tuottamaan lähtöliitántään toisen lähtösignaalitason suuruisen signaalin;

- ensimmäisen kytkimen mainitun toisen teholiitännän selektiivistä mainitun anturikelan mainittuun ensimmäiseen liitántään kytkemistä varten;

- ensimmäisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitäntä;
- välineet mainitun ensimmäisen impedanssin mainitun ensimmäisen liitännän kytkemiseksi mainitun anturikelan mainittuun ensimmäiseen liitántään;

15 - toisen kytkimen mainitun impedanssin mainitun toisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainittuun ensimmäiseen teholiitántään;

- kolmannen kytkimen mainitun anturikelan mainitun toisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainitun jänniteanturin mainittuun tuloliitántään;

20 - neljännen kytkimen mainitun toisen teholiitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitántään;

- toisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitäntä;
- välineet mainitun toisen impedanssin mainitun ensimmäisen liitännän kytkemiseksi mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitántään;

25 - viidennen kytkimen mainitun toisen impedanssin mainitun toisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainittuun ensimmäiseen teholiitántään;

- kuudennen kytkimen mainitun anturikelan ensimmäisen liitännän kytkemiseksi selektiivisesti mainitun jänniteanturin mainittuun tuloliitántään;

30 - kaksisuuntaisen ohjauspiirin, jolla on ensimmäisen tilan valinnan tuloliitäntä ensimmäisen tilan valintasiignaalin vastaanottamiseksi, toisen tilan valinnan tuloliitäntä toisen tilan valintasiignaalin vastaanottamiseksi, kolmas tuloliitäntä, jakson aloitustuloliitäntä jakson aloitussignaalin vastaanottamiseksi, ja joukko lähtöliitántöjä, kulloinkin yksi jokaista mainittua kytkintä varten;

35 - välineet mainitun jänniteanturin mainitun lähtöliitännän kytkemiseksi mainitun kaksisuuntaisen ohjauspiirin mainittuun kolmanteen liitántään;

- välineet mainitun kaksisuuntaisen ohjauspiirin jokaisen lähtöliitännän kytkemiseksi kulloiseenkin kytkimeen, jolloin mainittu kaksisuuntainen ohjauspiiri käsittää logiikkapiirin, joka on aloitussignaalin ja ensimmäisen tilan valintasiignaalin vastaanottamisen perusteella järjestetty selektiivisesti ohjaamaan mainittuja

- ensimmäistä, toista, kolmatta ja viidettä kytkintä lähtösignaalin tuottamiseksi mainitun jänniteanturin lähtöliitانتään, jolloin mainittu kaksisuuntainen ohjauspiiri lisäksi käsittää logiikkapiirin, joka on aloitussignaalin ja toisen tilan valintasiignaalin vastaanottamisen perusteella järjestetty selektiivisesti ohjaamaan
- 5 mainittuja toista, neljättä ja kuudetta kytkintä lähtösignaalin tuottamiseksi mainitun jänniteanturin lähtöliitانتään.

17. Magnetometripiiri, tunnettu siitä, että se käsittää:

- kyllästyvän sydämen sisältävän anturikelan, jolla on ensimmäinen ja toinen liitانتä;
- 10 - jänniteanturin, jolla on tuloliitانتä ja lähtöliitانتä;
- ensimmäisen impedanssin, jolla on ensimmäinen ja toinen liitانتä;
- välineet mainitun ensimmäisen impedanssin mainitun ensimmäisen liitانتännän kytkemiseksi mainitun anturikelan mainittuun toiseen liitانتتään;
- piirijärjestelyn virran kaksisuuntaisen virtauksen aikaansaamiseksi mainitun anturikelan läpi ensimmäisessä ja toisessa toimintatilassa, niin että ensimmäisessä toimintatilassa mainitun anturikelan toinen liitانتä on kytketty mainitun jänniteanturin tuloliitانتتään, mainitun toisen impedanssin toinen liitانتä on kytketty maapotentiaaliin, ja mainitun anturikelan ensimmäinen liitانتä on kytketty peräkkäin ja vuorotellen ensin virtalähteeseen ja sitten maapotentiaaliin mainitun ensimmäisen impedanssin kautta, ja niin että toisessa toimintatilassa mainitun anturikelan ensimmäinen liitانتä on kytketty mainitun jänniteanturin tuloliitانتتään, mainitun ensimmäisen impedanssin toinen liitانتä on kytketty maapotentiaaliin, ja mainitun anturikelan toinen liitانتä on kytketty peräkkäin ja vuorotellen ensin virtalähteeseen ja sitten maapotentiaaliin mainitun toisen impedanssin kautta.
- 20

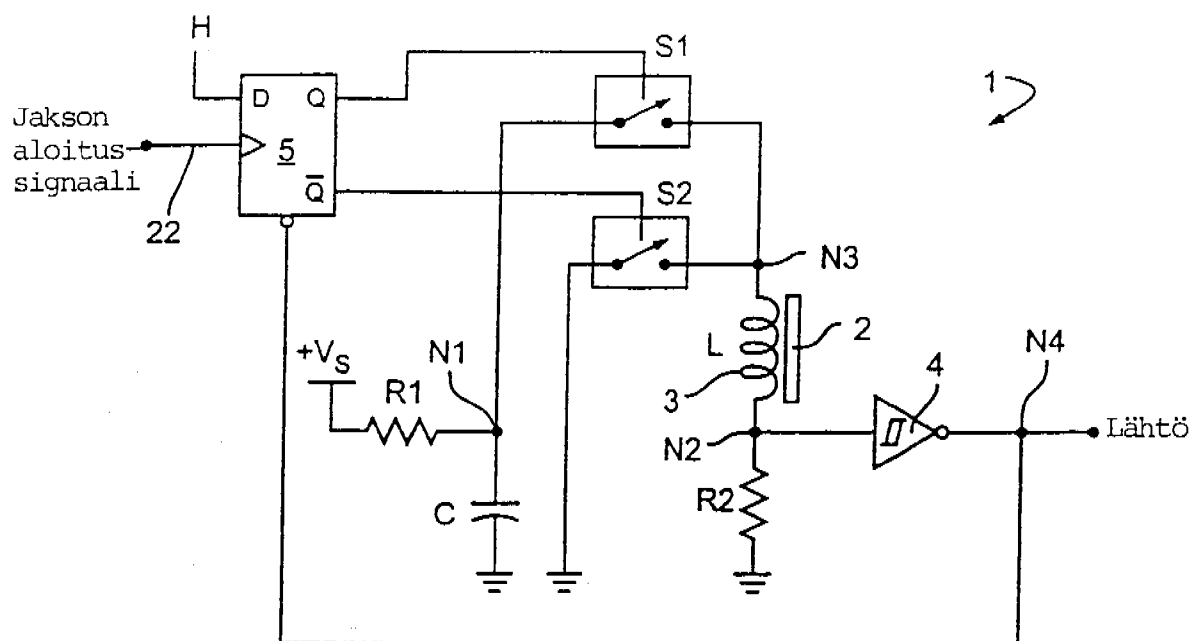


Fig. 1a

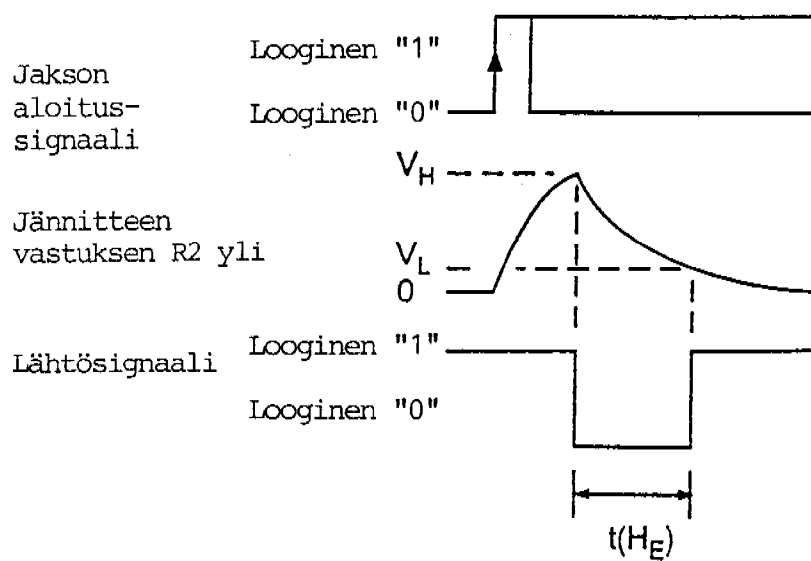


Fig. 1b

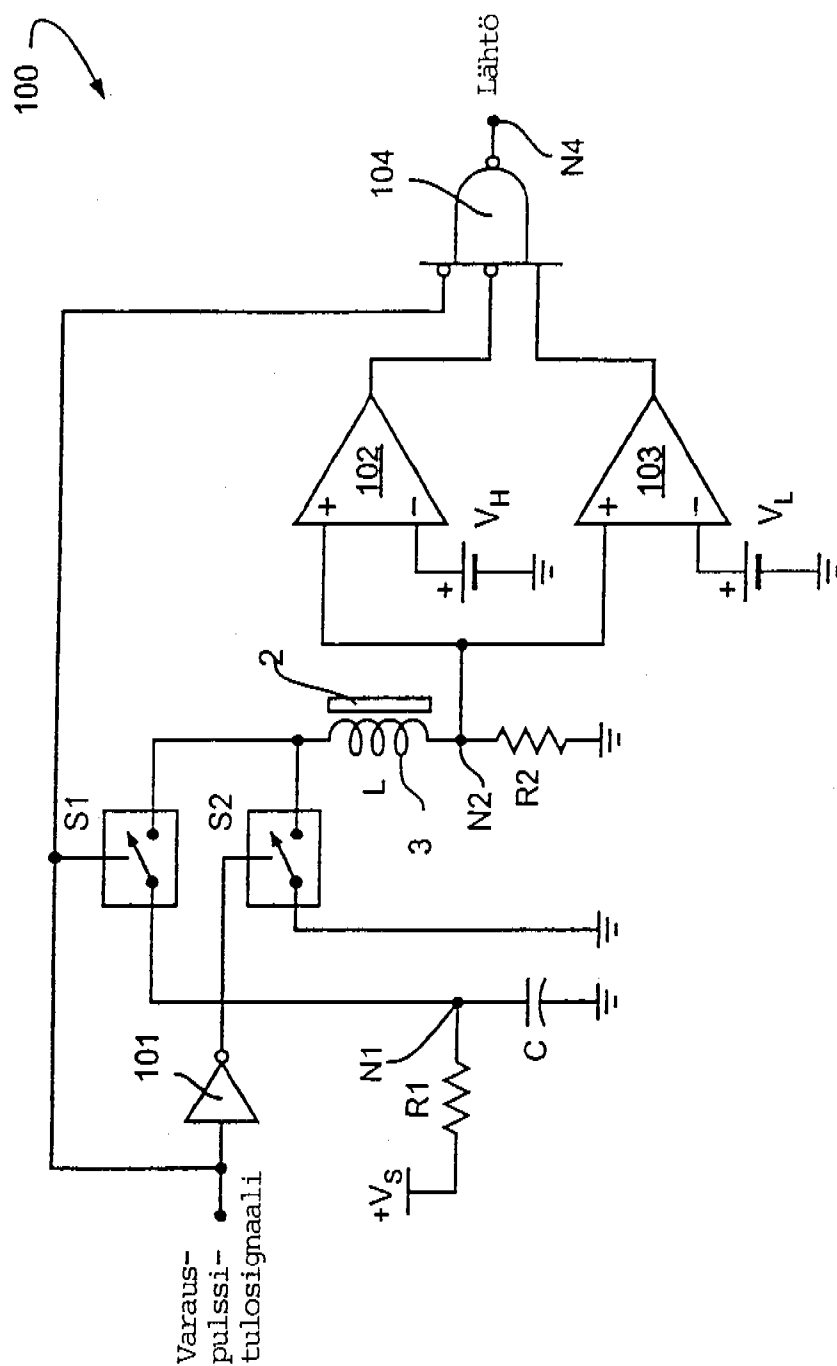


Fig. 2

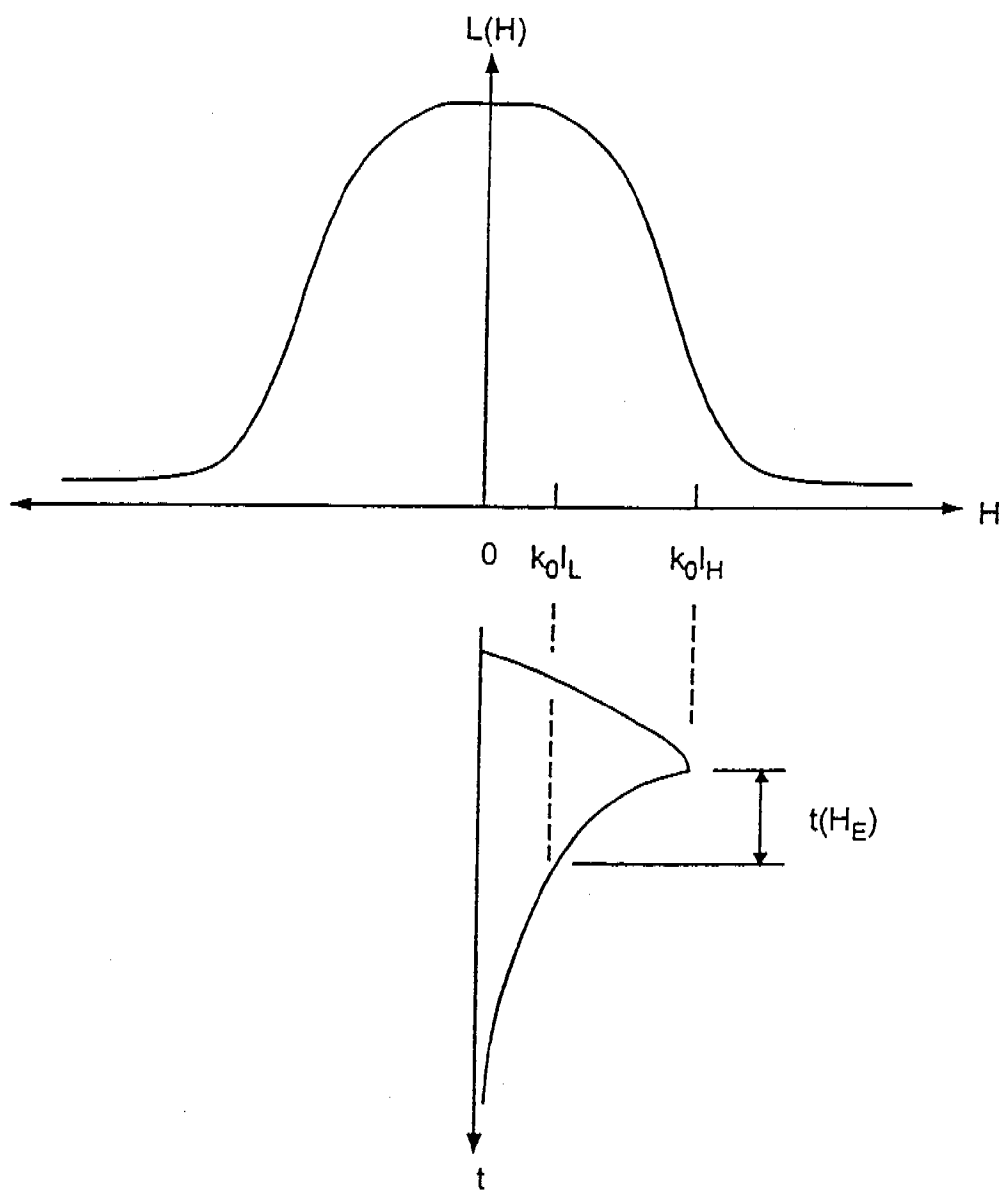


Fig. 3

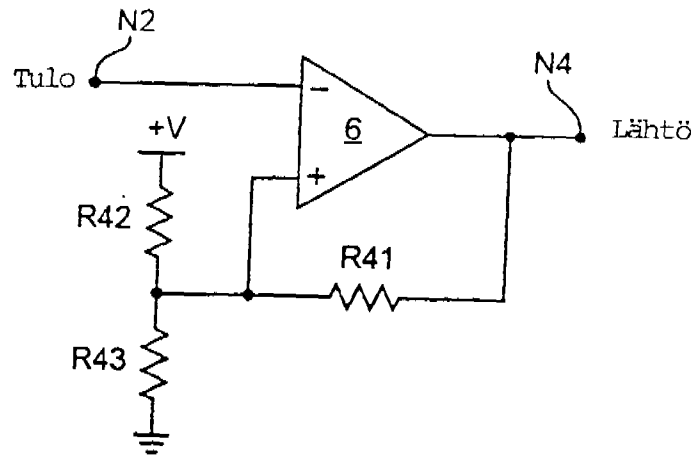


Fig. 4a

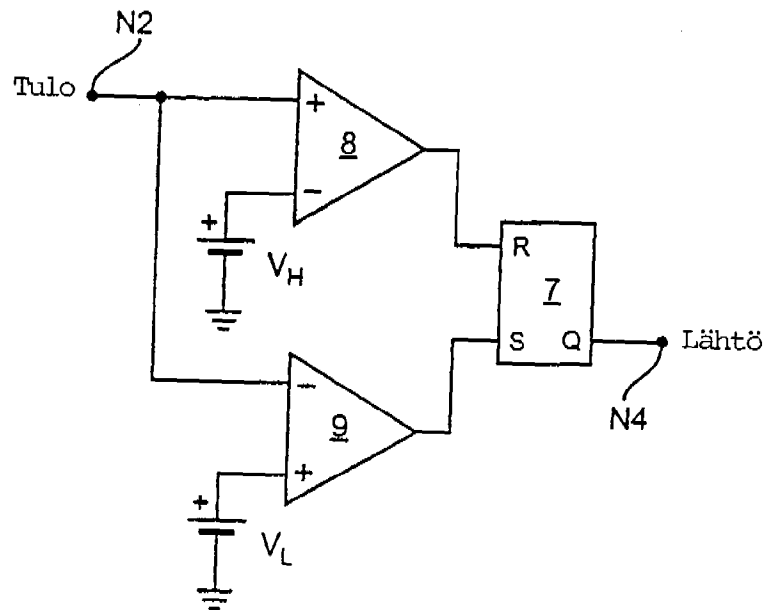


Fig. 4b

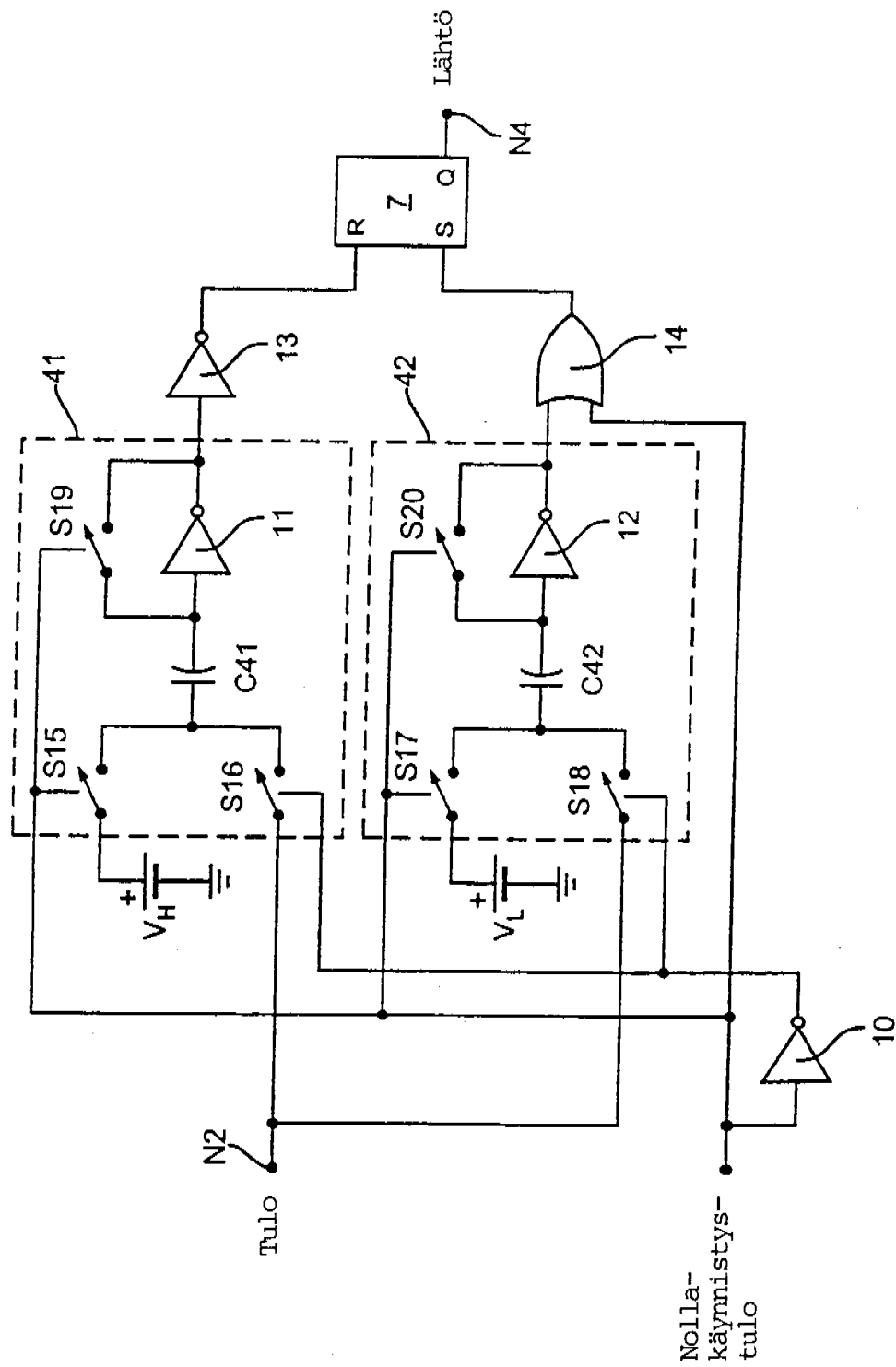


Fig. 4c

310137 864888

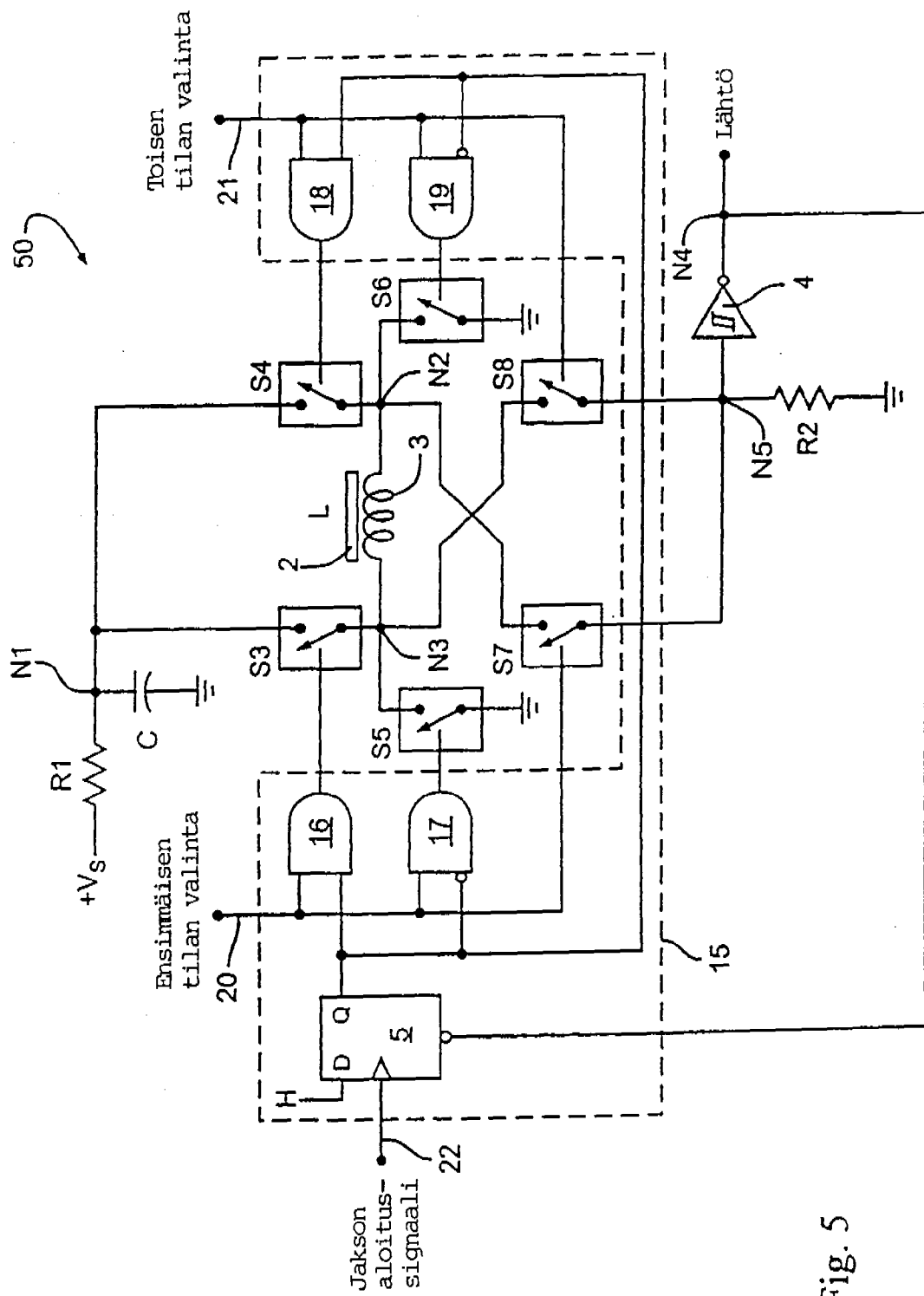


Fig. 5

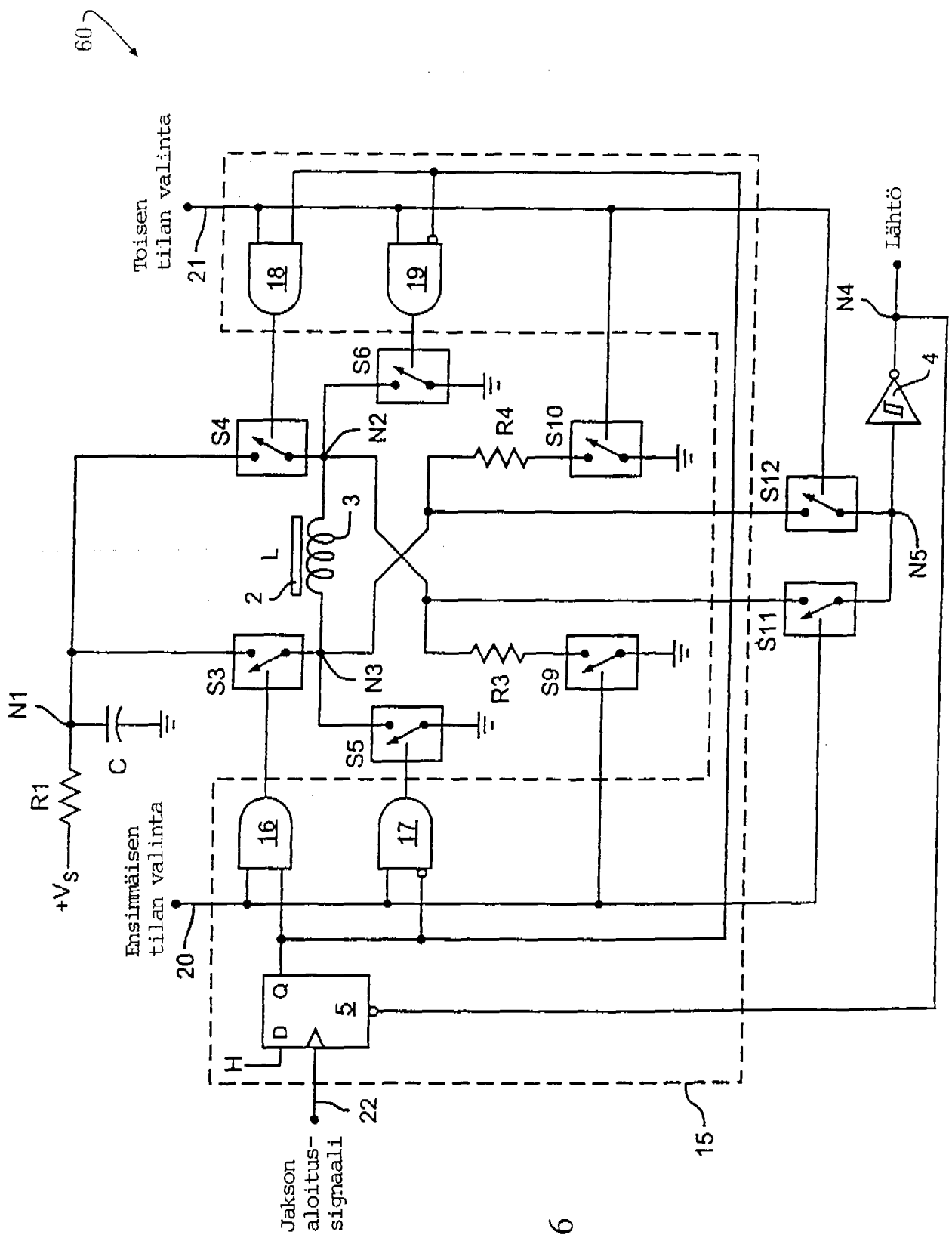


Fig. 6

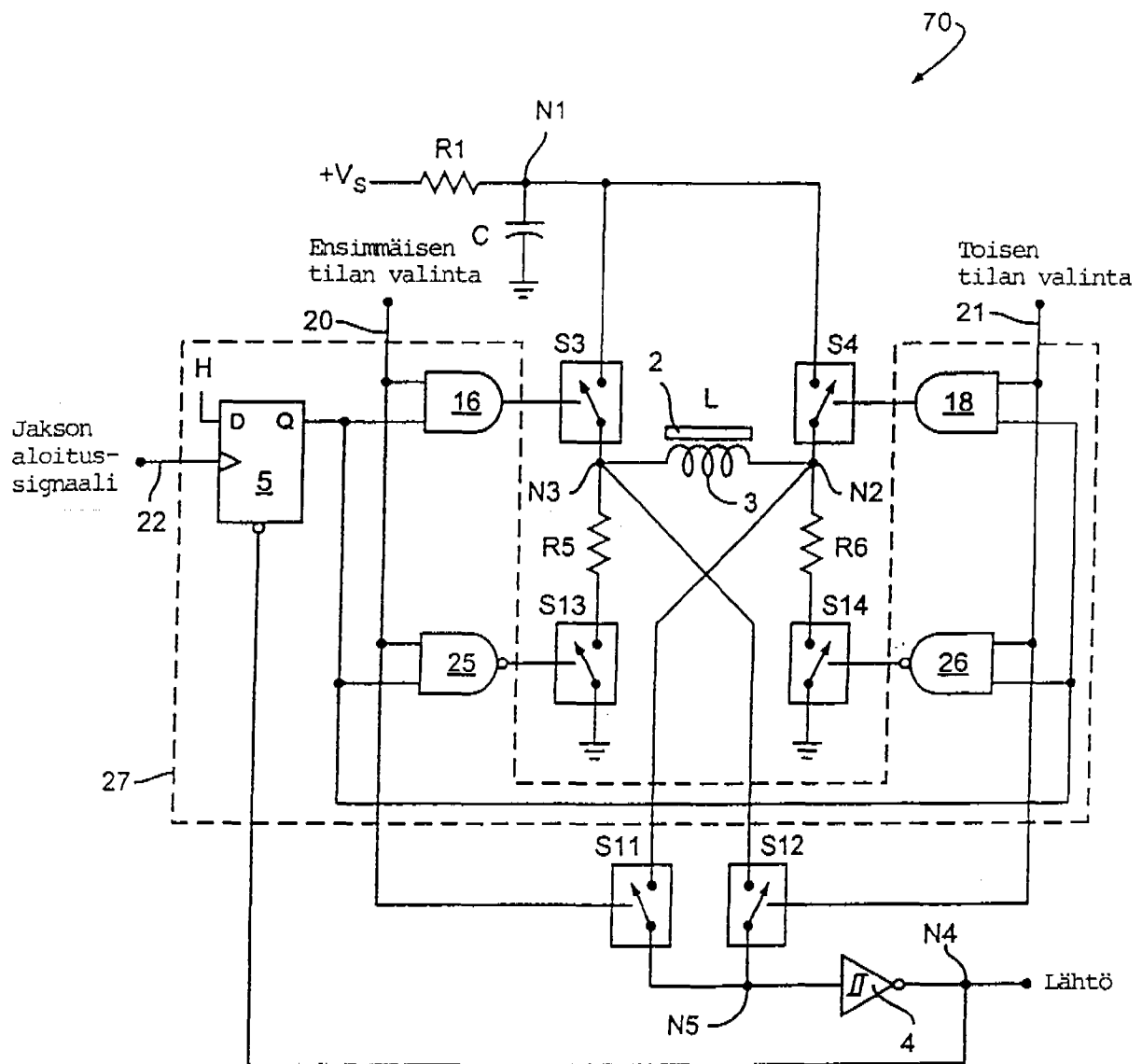


Fig. 7

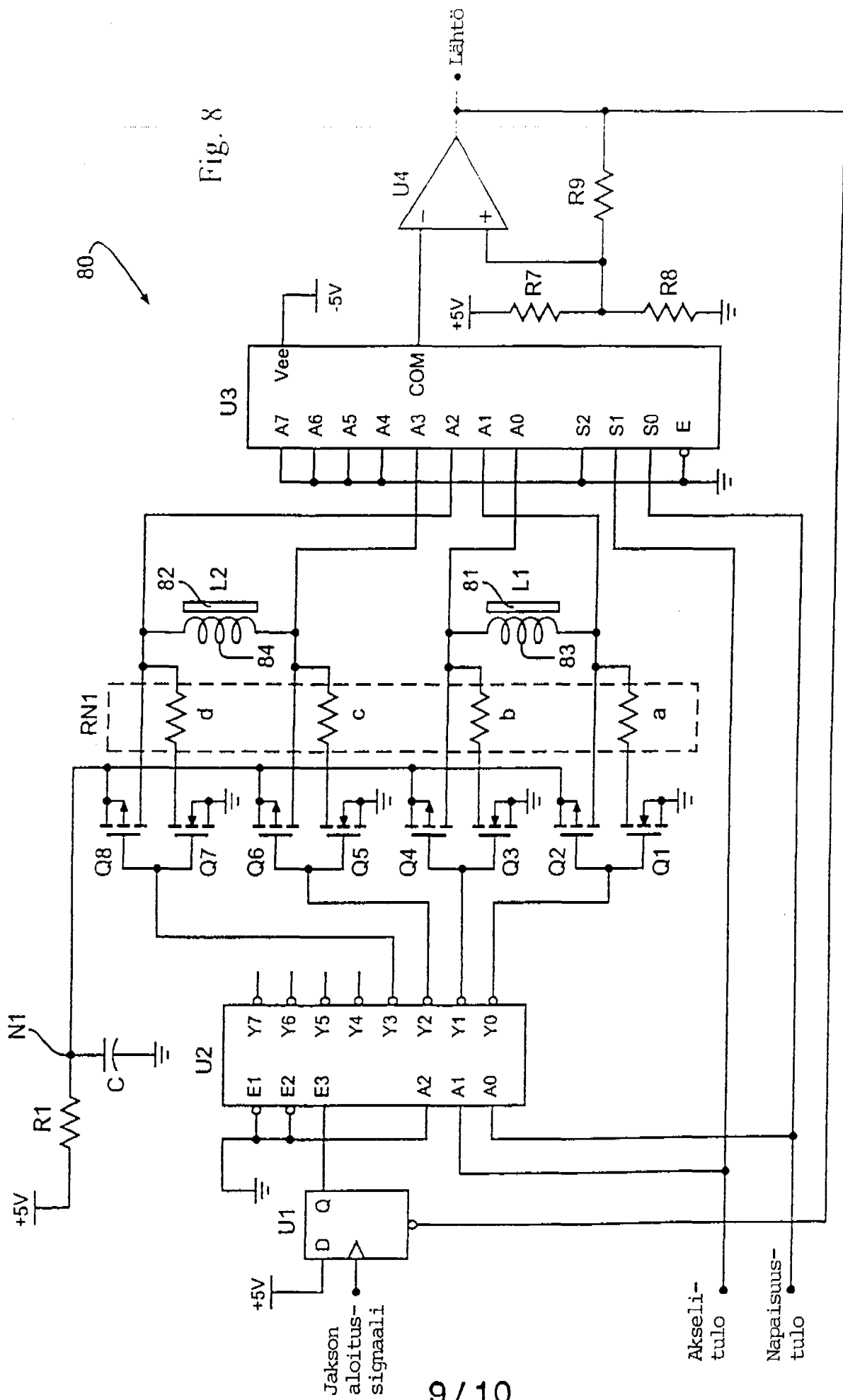


Fig. 8

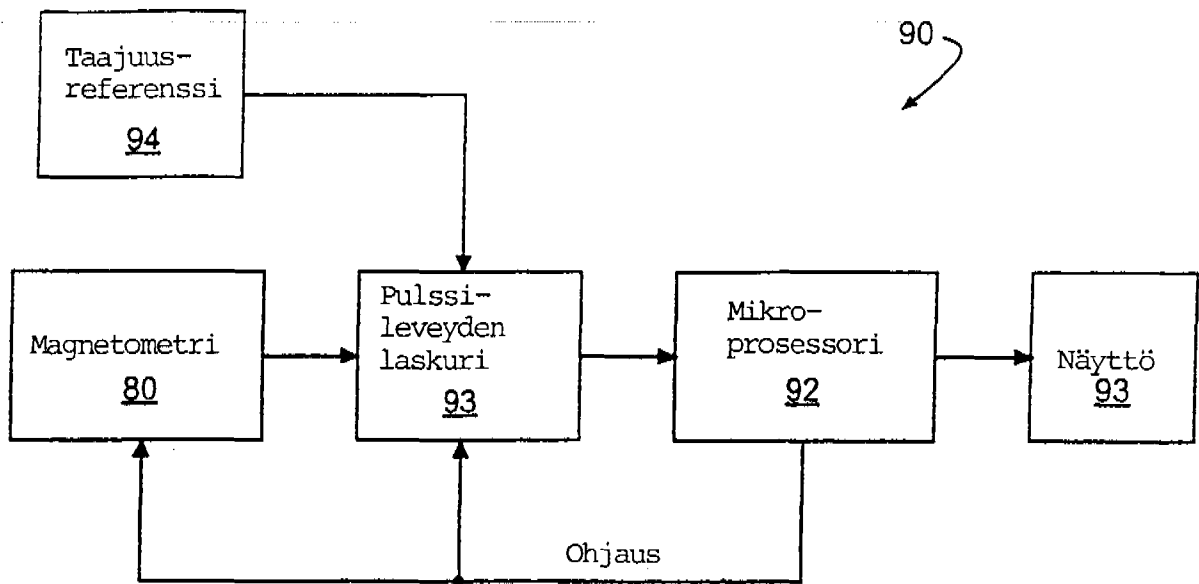


Fig. 9a

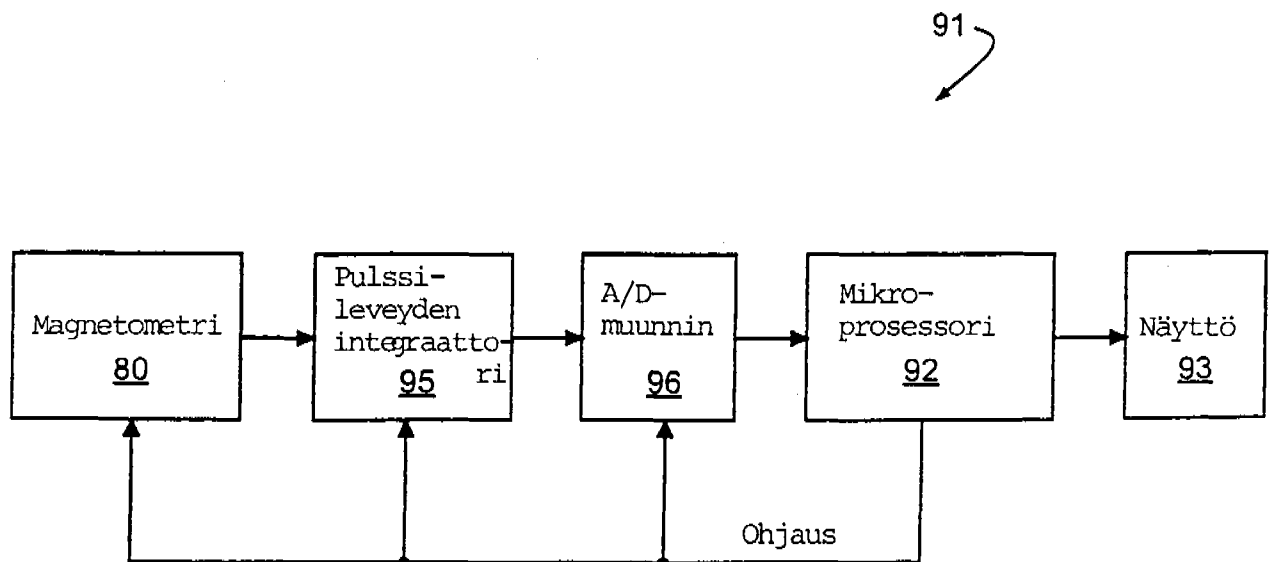


Fig. 9b