

# Neuromorfiset tietokoneet suprajohtavalla elektroniikalla

Pro Gradu  
Turun yliopisto  
Fysiikka  
2025  
Fil. yo. Ossama Esseddiki  
Tarkastaja:  
Prof. P. Paturi

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

**Esseddi, Ossama** Neuromorfiset tietokoneet suprajohdettavalla elektroniikalla

Pro Gradu, 15 s., 3 liites.

Fysiikka

Joulukuu 2025

---

Tutkielmassa käsitellään suprajohdettaviin liittyvä Josephsonin ilmiö ja miten sitä voidaan hyödyntää rakentamalla niin sanottuja Josephsonin liitoksia neuromorfisissa systeemeissä. Tutkimuksen päämääränä on saada ymmärrys RSFQ-elektroniikassa hyödynnetyistä ilmiöistä ja kuinka tällä elektroniikalla voidaan mallintaa biologisia systeemejä kuten synapseja ja neuroneja, jotka ovat teoreettisesti energiakulutuksen kannalta tehokkaampia ja nopeampia verrattuna nykypäivän piistä valmistettuihin siruihin.

Asiasanat: Josephsonin liitos, Josephsonin ilmiö, SQUID, neuronit, synapsit, RSFQ, neuromorfiset tietokoneet, suprajohdettava elektroniikka

# Sisällys

<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>1 Josephsonin ilmiö ja Josephsonin liitos (JJ)</b>	<b>2</b>
<b>2 Neuromorfisen tietokoneen rakenteet</b>	<b>3</b>
2.1 Neuron	3
2.2 Synapsi	6
<b>3 Neuromorfisen tietokoneen toteutus</b>	<b>8</b>
3.1 Bipolaarisen datan talletus	8
3.2 Bipolaarisen datan lukeminen	9
3.3 Bipolaarisen virran kopiointi	11
3.4 Bipolaarinen kerroin	12
<b>4 Tekniset haasteet</b>	<b>13</b>
<b>5 Yhteenveto ja päätelmät</b>	<b>13</b>

## Johdanto

Nykypäivänä on ilmiselvää, että nykyaikaiset algoritmit ja tekoälylaitteet vaativat erittäin paljon energiaa ja raakaa laskentatehoa. Itse asiassa nopea algoritmien kehitys on ylittänyt jopa viisi kertaa Moore'n lain ennustaman algoritmisen kehityksen [1]. Ongelmana on myös se, että puolijohdemateriaaleista valmistettuja siruja ei voida rakentaa yhtään pienemmiksi ( $a \geq 10$  nm).

Tässä kandidaatintutkielmassa tutkitaan RSFQ-elektroniikkaa käyttävää neuromorfisten tietokoneiden mallia, joka kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa ja jonka nopeus voi saavuttaa yli 300 GHz [2]. Neuromorfisilla tietokoneilla tarkoitetaan tietokonetta, jonka suunnittelussa on otettu inspiraatiota ihmisen aivojen biologisesta rakenteesta. Tutkielmassa tutustutaan muun muassa Josephsonin ilmiöön sekä Josephsonin liitoksen (JJ) malliin, ja vertaillaan sähköisiä komponentteja ihmisen biologisiin neuroneihin ja synapseihin.

Tässä tutkielmassa on käytetty avuksi ChatGPT:tä oikeinkirjoituksen tarkasteluun.

# 1 Josephsonin ilmiö ja Josephsonin liitos (JJ)

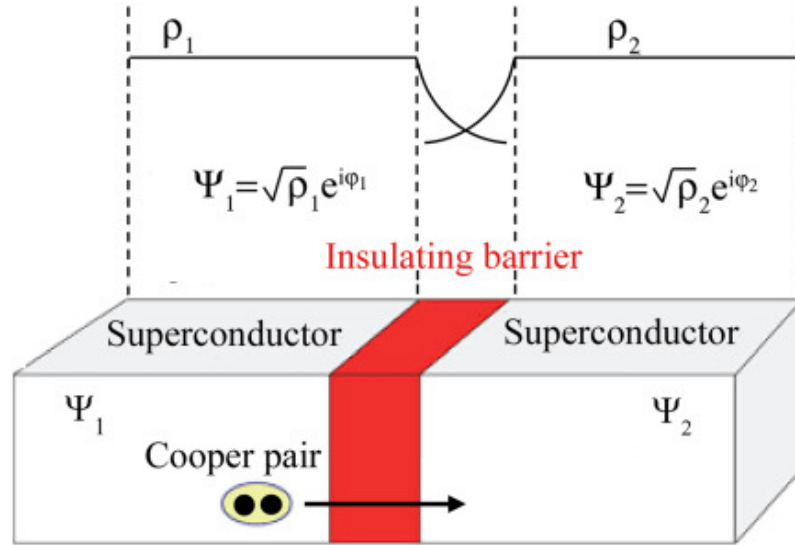
Josephsonin liitos (engl. Josephson junctions, JJ) on vuonna 1962 Brian Josephsonin ennuste ilmiöstä, jossa kaksi suprajohtavaa metallia asetetaan hyvin lähelle toisiaan niin, että niiden väliin jää eristerako (kuva 1). Josephson ennusti elektroniparien (Cooper-parien) tunneloinnin suprajohtavissa metalleissa erittäin matalissa lämpötiloissa, vaikka niiden välinen jännite  $V = 0$ , jolloin virta kulkee raon läpi ilman, että suprajohteilla olisi välinen jännite. Tämä tunnelointi johtuu suprajohteiden välisestä vaihe-erosta  $\phi$ , joka tunnetaan myös nimellä Josephsonin vaihe (engl. Josephson phase).

Suprajohteiden välinen liitos on hyvin heikko, mikä johtaa siihen, että sen läpi kulkeva virta on myös heikko. JJ:t toimivat binäärisesti, sillä niillä on ON-tila ja OFF-tila, riippuen siitä, onko suprajohteissa kulkeva virta suurempi vai pienempi kuin kriittinen virta. Kun  $I < I_c$ , JJ on ON-tilassa, jolloin liitos toimii suprajohtavasti, ja kun  $I > I_c$ , JJ on OFF-tilassa, jolloin virta ei enään tunneloidu läpi liitokseen. [3]. Tämä aiheutuu siitä, että virran  $I$  saavuttuaan kriittisen arvoon  $I_c$ , synnyttää jännitteen

$$V = (\Phi_0/2\pi)d\phi/dt, \quad (1)$$

jossa  $t$  on aika,  $\Phi_0 = h/2e$  on magneettivuon kvantti,  $h$  on planckin vakio ja  $e$  on elektronin varaus.

Aikaisemmin mainittu vaihe-ero on verrannollinen suprajohteiden magneettivuohon, joka voidaan mitata erittäin tarkasti laitteella nimeltä Superconducting Quantum Interferometer Device (SQUID). SQUIDs on kahdenlaisia: DC-SQUID, jossa on kaksi rinnakkain olevaa JJ:tä, ja RF-SQUID, joka sisältää pelkän yhden JJ:n. DC-SQUID toimii mittaamalla virtaeron sen kahden JJ:n välillä. RF-SQUID hyödyntää ulkoista RF-virtaa (RF = radiotaajuutta) mittaamaan magneettikenttää. RF-SQUID ei ole yhtä tarkka kuin DC-SQUID mutta sen valmistaminen on paljon helpompaa joten se on eniten käytetyin SQUID. Näiden avulla voidaan muo-



Kuva 1. Josephsonin liitos, jossa kaksi suprajohtavaa metallia, jolla on eri vaiheet ja jonka välillä on eriste. [4]

dostaa RSFQ-elektronisia verkostoja (Rapid Single Flux Quantum). RSFQ-piireissä signaalit tai informaatio välittyvät lyhyinä jännitepulsseina. Yksittäinen pulssi, eli SFQ (Single Flux Quantum), esittää binääri-informaation erittäin lyhyinä jännitepulsseina [2, 5, 6]

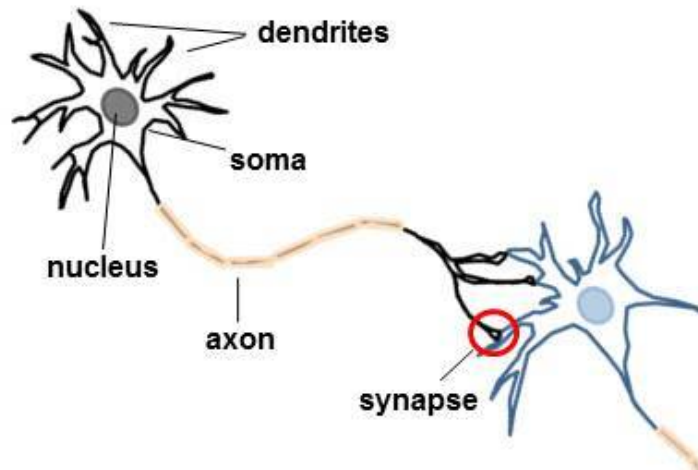
$$\int V(t)dt = \Phi_0 = \frac{h}{2e} \simeq 2.07\text{mV} \times \text{ps}. \quad (2)$$

## 2 Neuromorfisen tietokoneen rakenteet

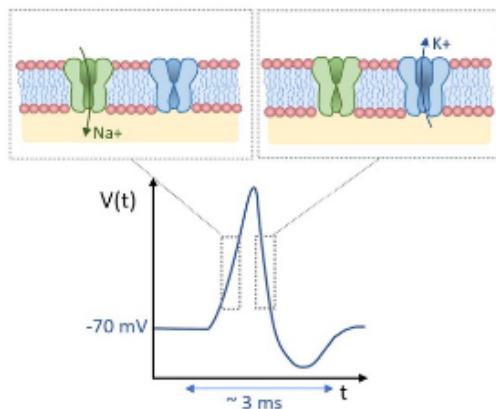
Tässä osiossa käsitellään neuronin ja synapsin biologiset rakenteet, toiminnot ja niiden väliset vuorovaikutukset sekä sitä, miten ne voidaan mallintaa hyödyntämällä aikaisemmin käytyjä SQUIDEja

### 2.1 Neuroni

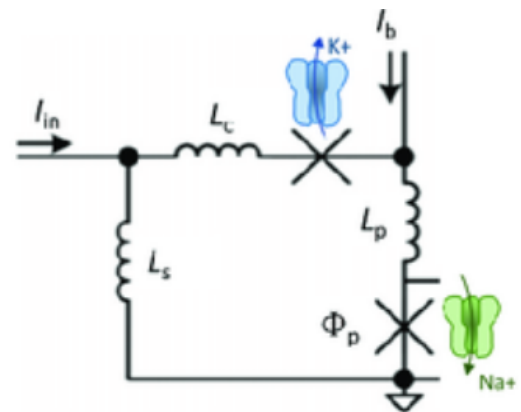
Neuroni (kuva 2) on aivosolu, joka isossa neuroniverkossa lähettää ja vastaanottaa pieniä sähköimpulsseja toisilleen [7] välittääkseen tietoa 100 miljardin muun neuro-



Kuva 2. Kuva neuronin rakenteesta, tämä koostuu tuojahaarakkeista (engl. dendrites), soomasta (engl. soma), ytimestä (engl. nucleus), aksonista (engl. axon) ja synapsista (engl. synapse) [7]



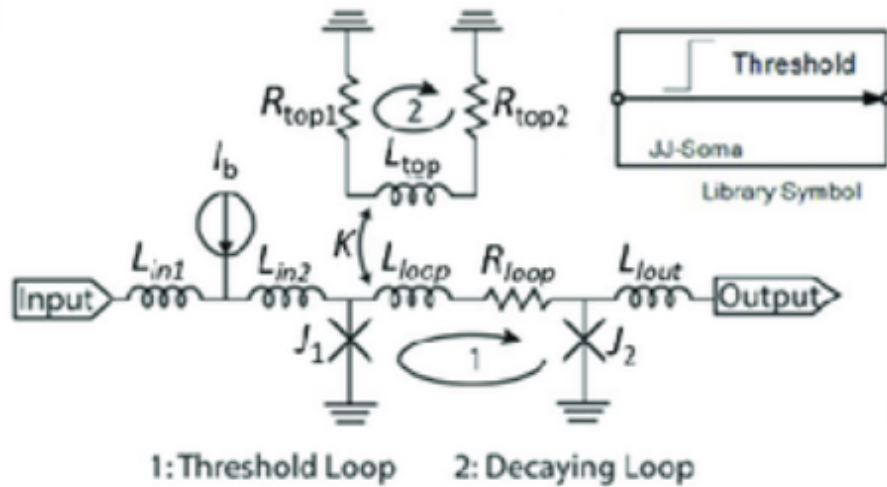
Kuva 3. Yksinkertaistettu kaavio biologisesta AP:stä [1].



Kuva 4. Crotty et al. esittämä sähköpiiridiagrammi silmukka JJ:n yksinkertaistetulle neuronille [1].

nin kanssa [8]. Tuojahaarakkeiden tehtävä on vastaanottaa ja lähettää synapseilta ioneja, jotka luovat aktiopotentiaaleja (AP) eli sähköisen latauksen aaltoja. AP:t vaativat vähintään kaksi jänniteohjattua ionivirtaa, jotka ovat usein Na<sup>+</sup> (nostaa potentiaalia, Kuva 3) ja K<sup>+</sup> (laskee potentiaalin takaisin lepotentiaaliin, Kuva 3) [1, 9].

JJ:n yksi erittäin tärkeä ominaisuus, joka tekee RSFQ-elektroneista mahdollisia, on sen luonnollinen kyky simuloida neuronin biologista AP:ta (eli Na<sup>+</sup> ja K<sup>+</sup> vaiku-



Kuva 5. Bozbey et al. esittämä kynnyspiiri (engl. threshold loop) kaavio JJs neuro-  
nista [10]

tus AP-potentiaaliin) elektronisesti, kuten voimme nähdä kuvasta 4. Kun kuvaan 4 tulevaan piiriin tulee virta  $I_{in}$ , natrium-JJ luo sähkövirran, joka kulkee silmukan läpi vastapäivään. Tämä virta osuu sitten kalium-JJ:hin, joka luo vastakkaisuuntaisen virran, joka kumoaa natriumin luoman virran, näin luoden yhden elektronisen AP:n. On myös osoittautunut, että JJ-neuronilla on kokeellisesti havaittu olevan laukaisukynnys ja lepoaika piikkien välillä, jotka ovat samat ominaisuudet, jotka ilmenevät biologisissa neuroneissa. On myös hyvä mainita, että yksi JJ-neuroni käyttää energiaa noin  $10^{-17}$ J, joka on huomattavasti pienempi kuin nykypäivän piipohjaiset laitteet, jotka käyttävät energiaa noin  $10^{-8}$ J [1].

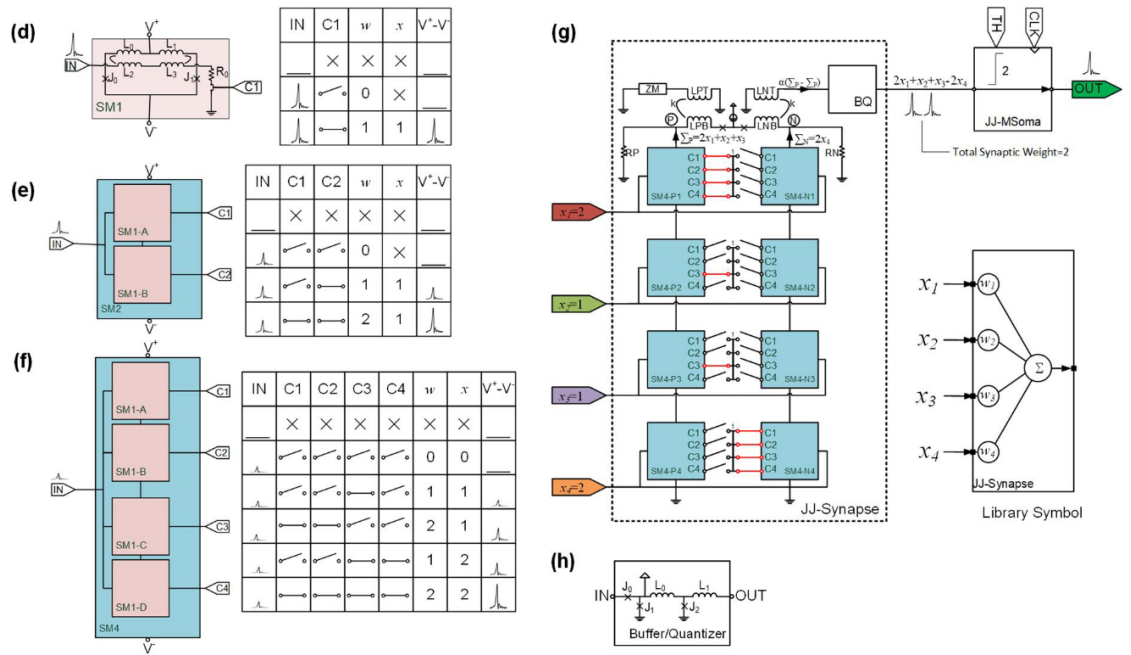
Kuvassa 5 on esitetty malli Bozbey et al.:n [10] esittämästä kynnyspiiristä, joka mallintaa biologisen sooman toimintaa [10]. Tämä säilyttää pulssi, joka heikentyy ajan kuluessa. Piiri lähettää uuden pulssin eteenpäin vasta silloin, kun kokonaispulssi ylittää kynnyksen, jolloin se lähettää pulssin vain, kun piiriin saapuu toinen pulssi ennen kuin ensimmäinen pulssi heikkenee sellaiselle tasolle, että kokonaispulssi ei ole riittävä ylittämään kynnyspulssia [10].

## 2.2 Synapsi

Biologisen synapsin tehtävä on välittää tietoa kahden neuronin välillä. Tämä tietojen välittäminen riippuu neuronien välisistä kulkevista AP:ista. Kyky välittää tietoa kahden neuronin välillä riippuu siitä, kuinka voimakas niiden liitos on, eli se riippuu synaptisesta painosta [11].

Keinotekoisien synapsin toteuttaminen RSFQ-piireillä on haastavampaa kuin JJ-neuronin, koska synapsin tulee pystyä käsittelemään kiihdyttäviä ja estäviä syötteitä. Kuvasta 6 voidaan tulkita synapsimalli, jonka tarjoaa Bozbey et al. [10]. Tämä malli koostuu sarjaan kytketyistä SQUID-silmukoista ja LR-tulopiireistä. Nämä on sitten kytketty SQUID-silmukkaan ja sovitettu SFQ-kirjaston komponenteista. Sarjaan kytketyt SQUID-silmukat ja Buffer/Quantizer-piiri (BQ) (kuva 6h) muodostavat synapsi-piirin, joka näkyy kuvassa 6 SM1 piirinä. Kun C1-kytkin on kiinni ja SFQ-pulssi syötetään tuloporttiin IN, L2 ja L3:n läpi kulkeva virta kytkeytyy SQUID silmukkaan J0, J1, L0 ja L1, aiheuttaen sen, että SFQ-jännitettä havaitaan solmujen  $V^+$  ja  $V^-$  välillä. Tämä tapaus vastaa painoa  $w=1$  ja  $x=1$ . Jos C1-kytkin on auki, virta ei kulje piiriin, jolloin solmujen  $V^+$  ja  $V^-$  välillä ei synny jännitettä, jolloin paino pysyy  $w=0$ . Taulukoissa  $\times$  tarkoittaa 'ei väliä' tilannetta. Toisin sanoen, jos IN=0, niin solmujen  $V^+$  ja  $V^-$  välinen jännite on 0, riippumatta C1:stä, C2:stä, C3:stä, C4:stä,  $w$ :stä ja  $x$ :stä [10].

Koska komponentit on kytketty sarjaan, virrankulutus ja kokonaispoikkeamavir-

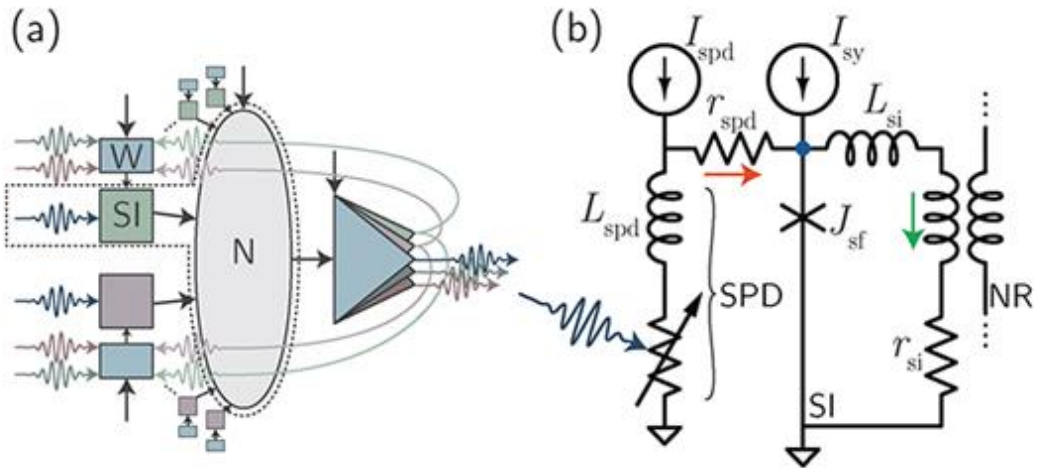


Kuva 6. Bozbey et al. synapsi käyttäen JJs elektroniikkaa johon sisältyy AND-piiri ja muuntaja (digitaalisesta analogiseen). [10]

ta pienenevät huomattavasti. Jokainen yksittäinen synapsipiiri vastaanottaa tuloja ja tuottaa joko positiivisen tai negatiivisen piikin riippuen vastaanotetusta piikistä.

Kuvassa 7 on esitetty Shainline et al. malli optoelektronisesta synapsista hyödyntämällä JJs. Optoelektroninen synapsi hyödyntää yksittäisten fotonien detektorin (engl. single photon detector tai SPD), joka on rinnakkaiskytketty magneettiseen vuon varastointisilmukan JJ:iin. Rakenne toimii vastaanottamalla fotonin ja muuttamalla fotoni-pulssin supravirraksi [12].

Kuvassa 7 SPD on esitetty muuttuvana vastuksena sarjassa induktorin kanssa. Tällä on tasapainotilassa resistanssia  $0 \Omega$ . Kun fotoni absorboituu, SPD siirtyy hetkellisesti korkearesistanssiseen tilaan ja sähkövirta ohjautuu SPD:stä JJ-komponentteihin, jota kutsutaan synaptiseksi laukaisuliitokseksi (engl. synaptic firing junction). SPD:stä ohjautuva virta saa piirin ylittämään sen kriittinen virtarajan, jonka seurauksena muodostuu jännitepulsseja. Synaptinen paino määräytyy virransyötöllä, joka kulkee JJ:n läpi. Mitä nopeammin virta saavuttaa kriittisen virran, sitä suurempi on synaptinen paino. Jos synaptinen paino on suuri, niin jännite-



Kuva 7. Shainline et al. synapsi hyödyntäen yksittäisfotonidetektoria ja JJs elektronikkaa [12]

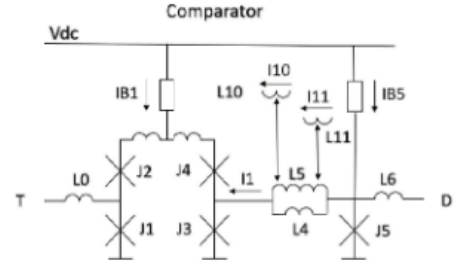
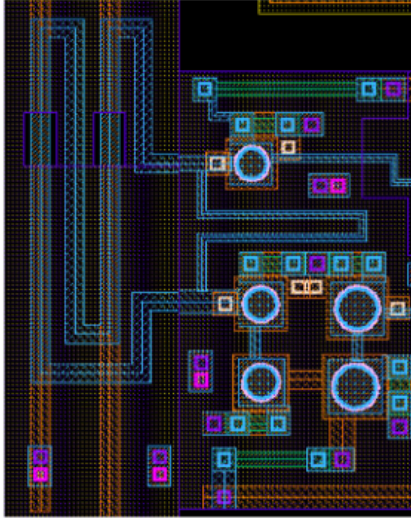
pulsseja on enemmän ja siten suuri määrä suprajohtavaa virtaa synaptisen laukaisutapahtuman aikana [12].

### 3 Neuromorfisen tietokoneen toteutus

Tässä osiossa käymme läpi Semenov et al. [13] malleja, joilla voidaan mallintaa neuromorfinen tietokone.

#### 3.1 Bipolaarisen datan talletus

Analogisen bipolaarisen datan tallentaminen onnistuu hyödyntämällä suljettua suprajohdesilmukkaa, jonka hallinta onnistuu käyttämällä JJs piirejä, tämä data pysyy suprajohdesilmukoihin loputtomiin, vaikka SFQ-pulsseja ei enään saavu. Esimerkkinä on Semenov et al. [13] malli ympyrämäisistä JJs liitoksista ja käämistä (kuva 8a). Kuvassa näkyy itse piirilevyn rakenne ympyrämäisillä JJs ja käämejä (punaiset pystysuuntaiset liuskat). Bipolaarisella virralla tarkoitetaan kaksisuuntaista virran-kulkua.



Kuva 8. Osa asettelusta ympärämäisillä JJs ja käämeillä L10 ja L11 (punaiset pysytysuuntaiset liuskat) jotka ovat osa suprajohtavasta tallennussilmukoista (a) ja piiriagrammi C-SQUID:lle (b) [13]

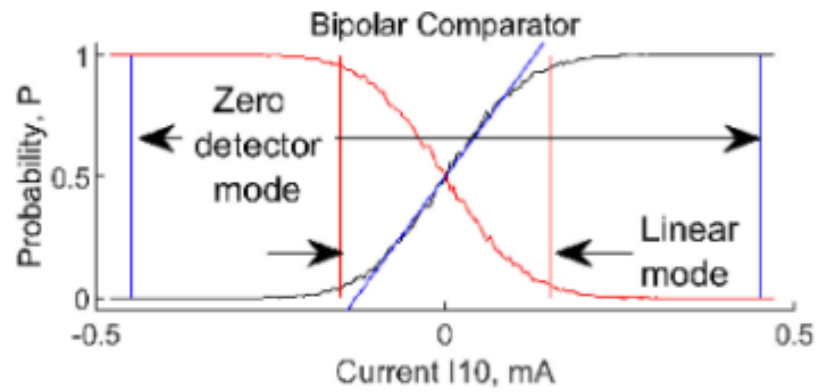
### 3.2 Bipolaarisen datan lukeminen

Analogisen bipolaarisen datan lukeminen onnistuu hyödyntämällä C-SQUID komparaattoria, joka vertailee kahta eri jännitettä ja virtojen perusteella pulssin, joka ei vaikuta mitatuun virtaan. C-SQUID muuttaa virran  $I$  SFQ pulsseiksi. Todennäköisyys SFQ-pulssin pääsyyn komparaattorin läpi on:

$$p(X) = \frac{1}{2}(1 + \operatorname{erf}(\pi^{1/2}X)) \quad (3)$$

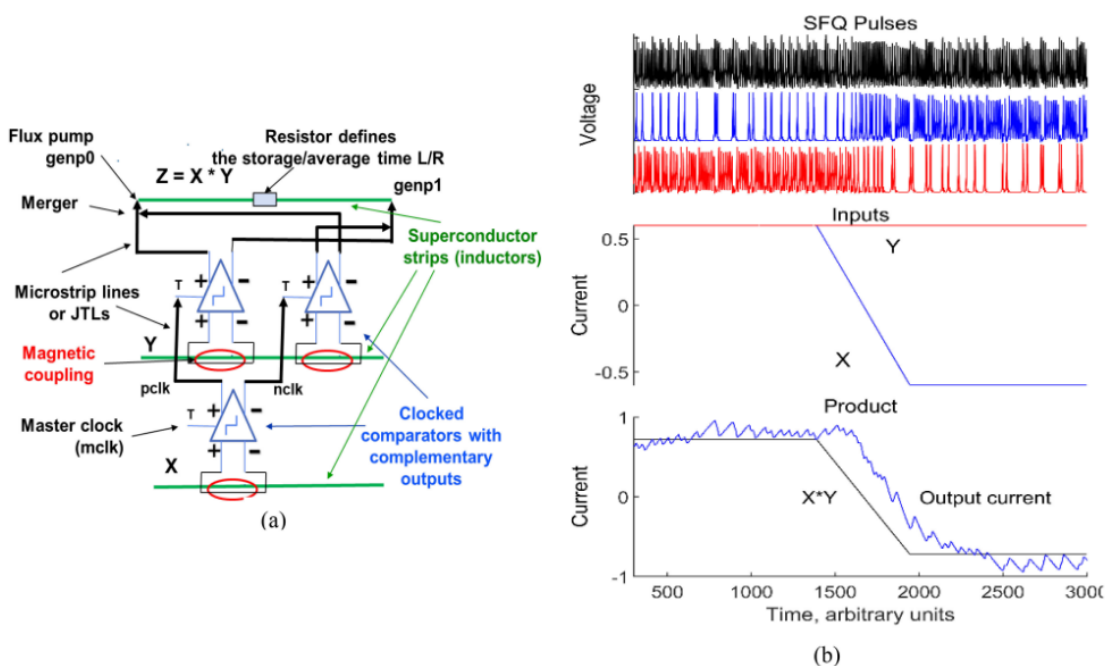
$$X = (I - I_{th})\Delta I, \quad (4)$$

jossa  $I_{th}$  on komparaattorin säädettävä kynnysvirta ja erf on virhefunktio. Jos  $I$  on kuvan 8b:n C-SQUID muuntaja L-10, niin  $\Delta I$  on säädettävä parametri jonka määrää muuntajan L5-L10 haluttuun kaistanleveyteen (noin  $-0.15\text{mA} - 0.15\text{mA}$ ) kuvassa 10. Musta viiva kuvassa 10 kuvaa SFQ pulssin riippuvaisuus todennäköisyyteen että virta kulkee L10 käämin läpi. Haluttu niin sanotun harman alueen leventäminen saavutetaan vähentämällä L5 menevää virtaa ja rinnakkainkytkemällä L4. Tämä



Kuva 9. C-SQUID:n muutosfunktio [13]

sitten aiheuttaa, että L5 ja L4 välinen jakaja vähentää virtaa  $I_1$ , joka menee JJ3:n ja JJ4:n läpi. Punainen viiva näyttää todennäköisyyttä kun SFQ vastatoiminta ei ole käytössä. Komparaattorifunktio on epälineaarinen ja saturoituu kun  $|X| < 1$ . Tämä käyttäytyminen muistuttaa läheisesti neuronin toiminta [13].



Kuva 10. Lohkokaavio (a) ja simulaatio bipolaarisesta kertojapiiristä (b), jossa ylin musta jono näyttää pääkellon läpi meneviä pulssit (mustat), alemmasta komparaattorista läpi menevät negatiiviset SFQ-pulssit (sininen) ja positiiviset SFQ-pulssit (punainen), sovellettuna  $Z$ -linjaan. [13]

### 3.3 Bipolaarisen virran kopiointi

Kuvan 8b piirissä hyödynnetään käämejä  $L_{10}$  ja  $L_{11}$  virtojen  $I_{10}$  ja  $I_{11}$  lineaarisen kombinaation mittaamiseen. Erityisesti, jos  $L_5$  ja  $L_{10}$  sekä  $L_5$  ja  $L_{11}$  keskinäiset induktanssit ovat yhtä suuret tai yksi on negatiivinen toisiin nähden,  $M_{L_5, L_{10}} = -M_{L_5, L_{11}}$ . Komparaattori mittaa näiden kahden virran syöttölaitteiden virtaeron. Kuvassa 9b näkyy jono positiivisia (sinisellä) ja negatiivisia (punaisella) SFQ-pulssijonoja, jotka jatkuvasti tulevat  $Y$ -käämiin, kuten kuvasta 9a näkyy. Seurauksena solu yrittää pitää signaalieron hyvin pienenä. Kuvan 9b alemmat graafit näyttävät kopio-operaation: kopiointi  $X$ -virralla (musta kulku) yhdessä käämissä virtaan  $Y = X$  (sininen kulku) toisessa käämissä. [13]

### 3.4 Bipolaarinen kerroin

Bipolaarisella kertoimella tarkoitetaan SFQ-pulssin kertomista moneen useampaan pulssiin. Kuvassa 9a näkyy bipolaariseen kerrontaan vaadittavat kolme komparaattoria “proportional”-tilassa eli suhteellisessa tilassa. Kuvassa alin komparaattori muuttaa  $X$ -operandin positiiviseksi ja negatiiviseksi SFQ-pulssijonoiksi, jotka sitten jatkuvat ylemmissä  $Y$ -komparaattoreissa kellopulsseina. Bipolaarisen datan talletuksessa käsiteltiin sitä, miten suprajohtavat silmukat pystyvät pitämään dataa loputtomiin. Seuraavaksi näytetään, miten voidaan pitää dataa hetkellisesti. Pieni resistori kuvan 9a yläpuolella saa relaksaatiovirran menemään nolnaan. Relaksaatioajan tälle virralle määrittää  $L/R$ -vakio. Kun  $Z$  (joka tässä tapauksessa on komparaattorien  $X$  ja  $Y$  tulo, kuten näkyy kuvasta 9b) saa  $Z \neq 0$  arvon, positiivisten ja negatiivisten pulssien määrä eivät ole täsmälleen samoja ja siten virran arvo on SFQ-positiivisten ja -negatiivisten pulssien määrän ero. Kuvassa 9b ylempi graafi näyttää tulosignaalien virtojen arvot ajan funktiona. Nähdään, että  $Y$  (punaisella) pysyy positiivisena koko ajan, ja  $X$  (sinisellä) muuttuu positiivisesta arvosta negatiiviseen. Sen alapuolella olevaan graafiin on vielä näiden kahden funktion ideaalinen laskettu tulo  $X \cdot Y$  (mustalla) ja todellinen mutta simuloitu tulon arvo (sinisellä). [13]

## 4 Tekniset haasteet

Jotta suprajohtavuus toimii oikein, tämä vaatii, että lämpötila on 4 – 5 K useimmissa suprajohdemetalleissa. Tämä on jo itsessään erittäin vaikeaa, mutta ei mahdollonta pienissä mittakaavoissa käyttäen nesteheliumia. Suuremmissa piireissä tämän toteuttaminen aiheuttaa ongelmia. Toinen esiintyvä ongelma on ulkoiset ja sisäiset magneettikentät sekä vuopyörteet, jotka voivat läpäistä suprajohtavat kalvot ja laitteet. Tämä johtuu siitä, että näiden magneettiset voimat vaikuttavat SQUIDEihin, virran kulkuun ja datan säilymiseen, mutta niiden suojaaminen voi onnistua erilaisilla menetelmillä, esim. suojilla tai erittäin ohutkerroksisilla polyesterikalvoilla, eli Mylar-esteillä, suuremmissa mittakaavoissa laitteiden suojaaminen on hankalampaa juuri sen takia että niitä magneettikenttiä ja vuopyörteitä on enemmän. [14]

## 5 Yhteenveto ja päätelmät

Neuromorfiset tietokoneet RSFQ-elektronikalla avavat meille maailman, jossa käytössämme on erittäin nopeita ja energiatehokkaita tietokoneita. Tässä tutkielmassa on käyty läpi pelkästään muutamia malleja, josta olen poiminut vain muutamia jotka vaikuttivat helposti luetettavia lukijalle. Haasteita on paljon mutta tämän toteuttaminen ei ole mahdollonta. Olemme tässä kandidutkielmassa saaneet mielikuvan siitä, miten tulevaisuuden RSFQ-elektroninen neuromorfinen tietokone voidaan mallintaa ja rakentaa teoreettisesti. Vaikka neuronin rakenne on yksinkertainen, synapsin mallintaminen meni monimutkaiseksi. Samalla on isompia systeemeja ja piirejä onnistuttu mallintamaan ja simuloimaan. Tästä voidaan päätellä että haasteita on vielä, mutta uskon että kyseistä teknologiaa tullaan näkemään seuraavien vuosikymmenien mennessä tai jopa nopeammin laajassa käytössä. Varsinkin tekoälyn vauhdikas kehitys vaatii yhtä vauhdikasta energian määrän kasvua, joten tällainen ratkaisu olisi erittäin hyödyllinen koko ihmiskunnalle ja toivottavasti vielä meidän

elinaikanamme.

## Viitteet

- [1] M. Schneider, E. Toomey, G. Rowlands, J. Shainline, P. Tschirhart ja K. Segall, *Supercond. Sci. Technol.* **35**, 053001 (2022).
- [2] K. Likharev ja V. Semenov, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **1**, 3 (1991).
- [3] B. D. Josephson, *Physics Letters* (PUBLISHER, 1962), Vol. 1, pp. 251–253.
- [4] A. Vettoliere, P. Silvestrini ja C. Granata, kirjassa *Quantum Materials, Devices, and Applications*, toimittanut M. Henini ja M. O. Rodrigues (Elsevier, 2023), pp. 43–85.
- [5] F. Chiarello, *Physics Letters A* **277**, 189 (2000).
- [6] A. Kraft, C. Rupprecht ja Y.-C. Yam, University of british columbia (2017).
- [7] P. E. Ludwig, V. Reddy ja M. Varacallo, *StatPearls* (StatPearls Publishing Treasure Island (FL), 2024).
- [8] S. Herculano-Houzel, *Front Hum Neurosci* **3**, 31 (2009).
- [9] T. C. Südhof ja R. C. Malenka, *Neuron* **60**, 469 (2008).
- [10] A. Bozbey, M. A. Karamuftuoglu, S. Razmkhah ja M. Ozbayoglu, Single Flux Quantum Based Ultrahigh Speed Spiking Neuromorphic Processor Architecture, 2020, arXiv:1812.10354.
- [11] P. Dayan ja L. F. Abbott, *Theoretical neuroscience: computational and mathematical modeling of neural systems*, *Computational neuroscience* (Massachusetts Institute of Technology Press Cambridge, Mass, 2001).
- [12] J. M. Shainline, S. M. Buckley, A. N. McCaughan, J. T. Chiles, A. Jafari Salim, M. Castellanos-Beltran, C. A. Donnelly, M. L. Schneider, R. P. Mirin ja S. W. Nam, *Journal of Applied Physics* **126**, 044902 (2019).
- [13] V. K. Semenov, E. B. Golden ja S. K. Tolpygo, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* **32**, 1 (2022).
- [14] A. I. Braginski, *J Supercond Nov Magn* **32**, 23 (2019).