

Vili Kautto

# TEHONHALLINTA MOBIILILAITTEISSA

Tehonhallinnan periaatteet ja mahdollisuudet

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä  
Toukokuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Vili Kautto: Tehonhallinta mobiililaitteissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka  
Toukokuu 2020

---

Tässä työssä tutkitaan kannettaville laitteille yhteisiä virranhallinnan tekniikoita, jotka ovat mahdollistaneet muutoksia kuluttajalaitteen koteloinnista komponenttitasolle viime vuosina. Virranhallinnan tekniikat jaotellaan ohjelmistopohjaisiin ratkaisuihin ja laitteistoratkaisuihin, joiden toimintaperiaatteita ja vaikutuksia pohditaan erillään. Tutkimus on toteutettu kirjallisuus selvityksenä, jossa perehdytään tehonhallinnan taustalla vaikuttaviin fysikaalisiin ominaisuuksiin. Lisäksi pohditaan, kuinka niitä halliten nykyään pyritään minimoimaan kannettavan laitteen tehonkulutus ja tehonhallintaan liittyviä ongelmia.

Tehonhallinta on oleellinen osa kannettavaa laitekokonaisuutta. Tutkimuksessa havaittiin, että tehonhallinnan tekniikoiden avulla voidaan saavuttaa laitteelle parempi suorituskyky, pidempi akunkesto, lisää toiminnallisuutta, matalampi melutaso ja luotettavampi laitekokonaisuus. Nämä hyödyt parantavat laitteen käyttökokemusta. Tehonkulutusta voidaan minimoida, kun käyttäjäkokemus heikkenee tekniikoiden käytöstä riittävän vähän, jolloin vähennetään tehonhallinnan haittoja ja säästetään samalla tehoa. Maailmassa käsiteltävä ja talletettava datamäärä kasvaa siirtonopeuksien ohella jatkuvasti, jolloin vastaavasti kasvava tehonsäästö voidaan saavuttaa laitteiden kommunikointia tehostamalla.

Tämän tutkimuksen havaintojen pohjalta pääteltiin, että virtarajoitteisten kannettavien laitteiden kehitys perustuu tehonhallinnan tekniikoiden kehitykseen. Tehonhallinnasta aiheutuvaa viivettä ja käyttäjäkokemuksen epätasalaatuisuutta voidaan minimoida lukuisilla käyttöolosuhteita mittaavilla sensoreilla ja ohjelmallisen tehonhallinnan parametrien hienosäätämällä. Laitteistoratkaisut toteutetaan laitekokonaisuutta hyödyttävällä tavalla laitteen käyttötarkoituksen mukaisesti. Kannettavaa laitetta suunniteltaessa vähävirtaisuuteen panostamista voidaan perustella tasapainoisen laitteen ja kilpailukykyisen tuotteen saavuttamisella. Kaikki laitteen toiminnallisuus saavutetaan käytettyjen komponenttien avulla ja niiden tehonkäyttöön vaikuttamalla voidaan saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä.

Avainsanat: virranhallinta, käyttäjäkokemus, tehonkulutus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on laadittu Tampereen yliopiston tekniikan alan opinnäytetyöohjeen mukaisesti keväällä 2020.

Haluan kiittää Heikki Lahtista, Eetu Mannista ja Samuli Pohjolaa tiedekunnastani vertais-  
tuesta ja ehdotusten esittämisestä tämän opinnäytetyön kehittämiseksi. Kiitän myös  
vanhempiani tuesta kandidaatintyön tekemiseen liittyen. Lisäksi haluan kiittää  
kandidaatintyöseminaarin toteutuskerran vastuuhenkilöä ja opinnäytetyön ohjaajaani  
Erja Sipilää toteutuskerran käytänteiden joustavasta mukauttamisesta tällä hetkellä  
maailmanlaajuisesti levinneen COVID-19 -pandemian Tampereen Yliopiston ja Suomen  
eduskunnan päättämien ehkäisyvarotoimien mukaiseksi.

Tampereella, 25.5.2020

Vili Kautto

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	I
ALKUSANAT .....	II
LYHENTEET JA MERKINNÄT.....	IV
1. JOHDANTO .....	1
2. TEHONHALLINNAN PERIAATTEET .....	3
2.1 Mobiililaite.....	3
2.2 Motiivit tehonhallinnalle.....	4
2.2.1 Ympäristönäkökulma .....	5
2.2.2 Akun kestävyys.....	6
2.2.3 Lämpötehon hallinta.....	8
2.2.4 Suorituskyky .....	10
3. VIRRANHALLINNAN TEKNIIKAT .....	15
3.1 Komponenttivalinta .....	15
3.2 Tehonsyöttö.....	16
3.3 Näyttö.....	17
3.4 Suoritin .....	18
3.5 Muistihierarkia .....	19
3.6 Ohjelmistopohjaiset ratkaisut .....	20
3.6.1 Tehobudjetti.....	20
3.6.2 Dynaaminen jännite-taajuus -käyrä ja virransäästötilat .....	21
3.6.3 Pakkaaminen ja enkoodaaminen .....	22
4. YHTEENVETO.....	24
LÄHTEET .....	26

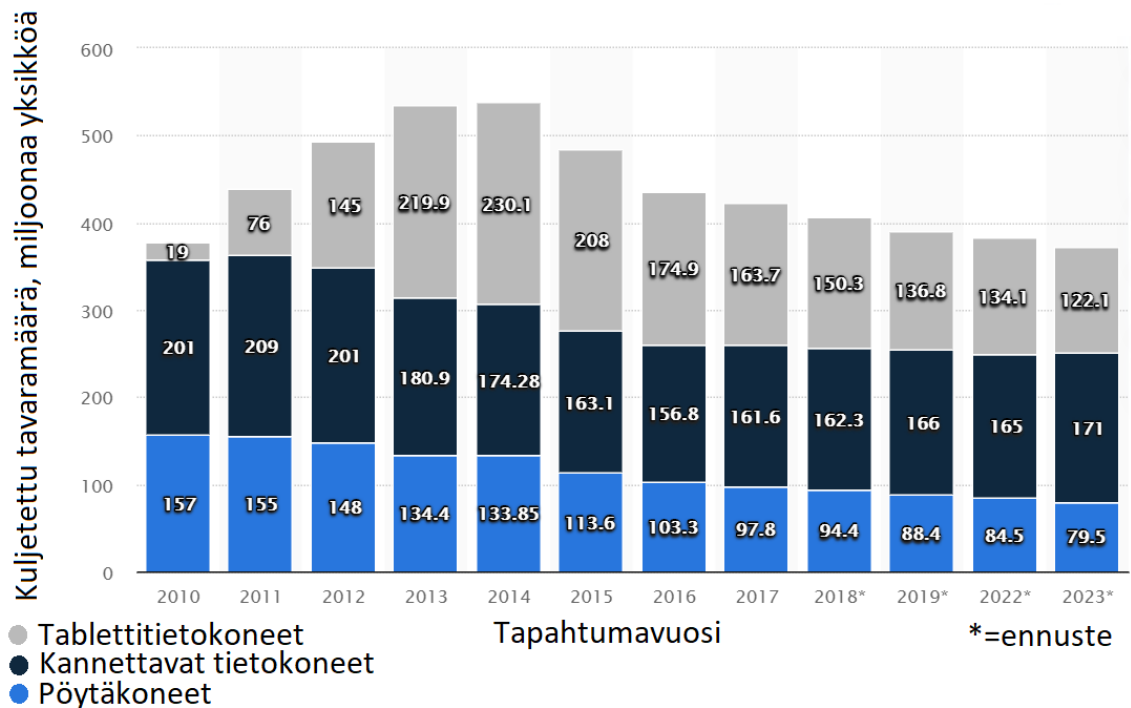
## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	engl. alternating current, vaihtovirta
AC-DC -muunnos	kts. kohdat AC ja DC, vaihtovirran muuntaminen tasavirraksi
binning	engl. kuvainnollinen ilmaus piirien lajittelusta mitatun laadun perusteella
CISC	engl. complete instruction set computer, täydellisen käskykannan tietokone
CMOS	engl. complementary metal oxide semiconductor, kanavatransistori
CPU	engl. central processing unit, tietokoneen suoritin
DC	engl. direct current, tasavirta
DC-DC -muunnos	kts. kohta DC, tasavirtamuunnos piirin jännitealueiden välillä.
DDR	engl. double data rate, kaksinkertainen datanopeus muisteissa kellosignaalin taajuuteen nähden
DRAM	engl. dynamic random-access memory, dynaaminen satunnaiskäyttömuisti
DVFS	engl. dynamic voltage frequency scaling, dynaaminen taajuuden- ja jännitteensäätö
GDDR	engl. graphics DDR, näytönohjaimien muistityyppi, kts. DDR
GPS	engl. global positioning system, maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä
GPU	engl. graphics processing unit, tietokoneen grafiikkasuoritin
HDD	engl. hard disk drive, kiintolevy tietokoneen massamuistina
LED	engl. light-emitting diode, hohtodiodi
Li-Ion	engl. lithium-ion, litiumioni
LPDDR	engl. low-power double data rate, matalatehoinen muistityyppi kaksinkertaisella datataajuudella kellosignaaliin nähden
OLED	engl. organic light-emitting diode, orgaanisia yhdisteitä sisältävä hohtodiodi
PSU	engl. power supply unit, AC-DC -muuntava virtalähde tietokoneelle
PWM	engl. pulse-width modulation, pulssinleveysmodulaatio
RAM	engl. random access memory, keskusmuisti
SDRAM	engl. synchronous dynamic random-access memory, synkroninen dynaaminen satunnaiskäyttömuisti
SMT	engl. simultaneous multithreading, symmetrinen monisäikeistys
SoC	engl. system on a chip, järjestelmäpiiri
SSD	engl. solid-state drive, puolijohdeasema tietokoneen massamuistina
TDP	engl. thermal design power, suurin komponentin tehon lämpöteho
USB	engl. universal serial bus, universaali sarjaväylä

$C$	<i>kapasitanssi</i>
$f$	<i>taajuus</i>
$I$	<i>sähkövirta</i>
$m$	<i>massa</i>
$P$	<i>teho</i>
$Q$	<i>sähkövaraus</i>
$Q_{th}$	<i>lämpömäärä</i>
$R$	<i>resistanssi</i>
$t$	<i>aika</i>
$U$	<i>jännite</i>

# 1. JOHDANTO

Mobiililaitteiden tehonhallinnalla on keskeinen rooli kannettavuuden ja käytettävyyden kehityksessä. Jatkuvasti kasvava osuus maailman väestöstä luottaa päivittäisiä asioita hoitaessaan kannettavaan elektroniikkaan, ja sen takia kannettavien laitteiden suosio on huipussaan [1, s. 1]. Lukuisat henkilöt omistavat useita kannettavia laitteita kaikkeen kykenevän pöytäkoneen sijasta. Kannettavien laitteiden yleistymistä havainnollistetaan kuvassa 1 [2]. Tehonhallinta on vaatinut laitevalmistajilta panostusta laitteen suunnitteluun ja useiden palveluiden siirtymistä pilvipalveluiksi, jolloin paikallista prosessointia voidaan vähentää. Muutosta on lisäksi kiihdyttänyt langattomien tiedonsiirtotekniikoiden kehitys [1, s. 24] viime aikoina, minkä ansiosta etäprosessoinnin haitat, kuten yhteysvirheet ja viive palvelun käytössä, saadaan minimoitua.



**Kuva 1:** Tilattujen tietokoneiden kuljetusmäärät tyypin mukaan viime vuosina. Kannettavien tietokoneiden myyntimäärät pöytäkoneista ja tablettitietokoneista poiketen ovat vakaita. Kuva perustuu lähteeseen [2].

Tehonhallinnan hyödyt näkyvät lisäksi kannettavien laitteiden ulkopuolella: monia tekniikoita voidaan soveltaa tai parhaimmillaan ottaa sellaisenaan käyttöön myös

vastaavia komponentteja hyödyntävissä datakeskuksissa ja perinteisissä pöytä-tietokoneissa, mikä puolestaan tasapainottaa kasvavasta laitemäärästä aiheutuvaa globaalia virrankulutusta tietotekniikassa. Aiempaa matalampia lähetystehoja hyödyntävät nykyaikaiset tietoliikenneyhteydet ovat vähemmän haitallisia niin ympäröivien laitteiden kommunikaatiolle kuin ihmisten terveydelle, sallien silti nopeamman ja luotettavamman tiedonsiirron kuin aiemmin. Sopivalla tehonhallinnalla voidaan saavuttaa laitteelle riittävästi suorituskykyä, pidennetty käyttöikä ja kompaktimpi fyysinen profiili, joka puolestaan helpottaa kannettavuutta ja käytettävyyttä.

Tutkielman aihevalintaan vaikuttivat kirjoittajan ennakkotietous ja mielenkiinto aiheesta henkilökohtaisen alatuntemuksen seurauksena, sekä aiheelle luontainen jatkuva ajankohtaisuus ja kehitys niin ympäristövaikutusten kuin myös käyttökokemuksen ajamina. Virrankäytön vaikutus näkyy useille mobiililaitteiden arkipäiväisessä käytössä sekä suorasti että epäsuorasti, jolloin tekniikoiden vaikutuksen voi lisäksi havaita konkreettisesti.

Tässä tutkimuksessa selvitetään tehonhallinnan motivaatioita, teoreettista taustaa ja välittömiä sekä välillisiä vaikutuksia kannettavassa elektroniikassa. Lisäksi tutkitaan yleisimpiä kannettaville laitteille yhteisiä tekniikoita laitteisto- ja ohjelmistotasolla tehon säännöstelemiseksi. Tutkimus suoritettiin kirjallisuusselvityksenä.

Tämän työn luvussa 2 perehdytään tehonhallinnan taustalla vaikuttaviin motiiveihin, fysikaalisiin ilmiöihin ja niiden ominaisuuksiin. Luvussa 3 tutustutaan yleisimpiin kannettavien laitteiden hyödyntämiin virranhallintateknikoihin laitteisto- ja ohjelmistotasolla. Lopuksi luvussa 4 koostetaan yhteenvetona aiemmissa luvuissa esitetyt havainnot sekä johtopäätökset.

## 2. TEHONHALLINNAN PERIAATTEET

Tehonhallinnan riippuvuuksien ja motiivien tarkastelemista varten on oleellista määritellä laiteformaatti ja fysikaalinen tausta ilmiöille, jotka vaikuttavat laitekokonaisuuden muodostumiseen ja tehonkulutukseen. Tehonhallinnalla saavutetaan moninaisia eri hyötyjä niin laitteen sisällä kuin sen ulkopuolella.

### 2.1 Mobiililaite

Mobiililaite on kannettava tietokone, joka määritelmänsä mukaisesti manipuloi informaatiota tai dataa ja mobiilius nimensä mukaisesti sallii tietokoneen käytön ja datan välittämisen paikasta riippumatta [3, hakusanat "computer" ja "mobile computing"]. Tällöin perinteisistä liikkumista rajoittavista johdoista tulee voida päästä eroon ainakin aktiivisen käyttöjakson ajaksi. Kaikki tietokoneet kuluttavat tehoa, ja näin ollen elektronisen laitteen tehonsyötöstä tulee huolehtia. Vaihtoehtoina ovat sisäiset energiavarastot, langaton tehonsyöttö [4, s. 79] tai energiakeräimet [5, s. 1], jotka saavat käyttötehonsa laitetta ympäröivistä fysikaalisista ilmiöistä. Litiumakkuja on valmistettu suuria määriä pitkän aikaa, jonka seurauksena litiumakut ovat valmistustekniikan hioutumisen seurauksena halpoja suhteessa energiatiheyteensä. Tämän vuoksi litiumakut ovat käytetyin [1, s. 152] sähköenergian välivarasto kannettavassa elektroniikassa. Edeltävään määritelmään vedoten mobiililaitteeksi määritellään myös paristoja, energiaa varaavia kondensaattoreita tai vaihtoehtoisesti kokonaan latauksetonta tehonsyöttöä hyödyntäviä laitteita, mutta akkujen yleisyyden vuoksi tämä työ on rajattu akkukäyttöisten laitteiden tarkasteluun.

Mobiililaitteen ollessa yhteydessä toisiin tietokoneisiin tulee myös aktiivinen datansiirto voida järjestää langattomasti. Vaikka periaatteessa olisikin mahdollista hoitaa tiedonsiirto esimerkiksi ääniaaltoja tai muuta fyysistä ilmiötä hyödyntäen, langattomassa elektroniikassa vakiintunein tapa on siirtää tieto hallitusti radioteitse hyödyntäen sähkömagneettisia aaltoja. Keskeisiä standardoituja langattoman tietoliikenteen tekniikoita ovat muun muassa IEEE 802.11 -standardiin perustuva Wi-Fi [1, s. 33–36], IoT-käyttöön hyvin soveltuva Bluetooth [1, s. 29] tai neljännen sukupolven mobiili-verkkotekniikka LTE [1, s. 28]. Kannettavuuden mahdollistamisen lisäksi tiedonsiirto-tekniikat ja erityisesti tiedon lähettäminen kuluttavat energiaa, ja siksi tekniikoiden tarkastelu on oleellista tehonhallinnan näkökulmasta [6, s. 316]. Mobiililaitteiden



monimuotoisuus on suurta, ja toiminnallisuuden tulee vastata käyttäjän odotuksia laitetyyppi- ja tilannekohtaisesti. Tyypillisimpiä kannettavia laitteita ovat muun muassa älypuhelimet, kannettavat tietokoneet, digitaalikamerat, käsikonsolit, älyrannekellot sekä aikaisemmin suositut kannettavat mediasoitimet. Valtaosa tehonhallinnan lainalaisuuksista ja tekniikoista on sovellettavissa jokaiseen edellä mainittuun laitetyyppiin laajalti yhteisen käyttöympäristön ja tietokonetaustan takia, vaikka yleiset käyttäjän odotukset [1, s. 6] vaihtelevat paljon laitetypistä riippuen. Aikaisemmin suositut kannettavat mediasoitimet ja GPS-paikantimet (engl. global positioning system, maailmanlaajuinen paikannusjärjestelmä), kuten navigaattorit, on nykyään laajalti integroitu älypuhelimiin. Käyttötarkoituksen takia erilaisten kannettavien laitteiden välillä on huomattavia laitteistoeroja, eikä siksi voida yksikäsitteisesti määritellä absoluuttisen vertailukelpoisia tai yleisiä tehosäästöjä eri tekniikoiden välillä. Laitekokonaisuus, käyttökohde ja -olosuhteet ratkaisevat tehosäästöjen määrän.

## 2.2 Motiivit tehonhallinnalle

Tehonkulutus on akkukäyttöisten kannettavien laitteiden toiminnallisuutta eniten rajoittava tekijä. Yleisiä langattoman multimedialaitteen ongelmia ovat riittämätön suorituskyky, suuri koko, korkea hinta ja rajallinen akunkesto. Vastaavasti käyttäjät vaativat enemmän toiminnallisuutta, lisää laskentatehoa, pitempää akunkestoa ja pienempää kokoa halvemmalla. [1, s. 4]

Tehonhallinnalla pyritään vastaamaan edellä mainittuihin ongelmiin minimoiden samalla tehonhallinnan mahdolliset negatiiviset vaikutukset käyttäjäkokemuksessa. Vähävirtainen muuten identtinen laite ei vaadi yhtä massiivista jäähdytysratkaisua toimiakseen spesifikaatiossa pienemmän hukkatohon vuoksi suuritehoiseen laitteeseen verrattuna. Pieni laite maksaa vähemmän valmistaa, varastoida ja kuljettaa kuin vastaava suuri laite painon, koon sekä materiaali- ja kuljetuskustannusten takia. Fyysisen kokoeron takia kompakti ja kevyt laite on vaivatonta pitää mukana ja mahtuu hyvin esimerkiksi reppuun tai taskuun. Koska asiakas lopulta maksaa valmistuksesta aiheutuvat kustannukset, välittyvät kustannussäästöt hyvässä kilpailutilanteessa osittain myös kuluttajalle. Tämän lisäksi yksi tehonhallinnan tavoitteista on minimoida laitteen lataamiseen käytetty aika ja samalla maksimoida akunkesto aktiivisessa käytössä ja passiivisessa valmiustilassa. Ideaalitalanteessa sopivalla tehonhallinnalla voidaan saavuttaa luotettava, kompakti ja hiljainen laite päivittäiskäyttöön, jolloin toiminnallisuudesta karsiminen ei välity loppukäyttäjälle.

## 2.2.1 Ympäristönäkökulma

Mitä vähemmän tehoa laite käyttää, sitä pienemmät ovat latauksesta aiheutuvat ympäristövaikutukset, koska laitteen käyttämä energia useimmiten viime kädessä perustuu sähköverkon sähköntuotannon ratkaisuihin. Huolimatta kyseisten ratkaisujen ympäristövaikutusten laadusta tai määrästä, säästetty energia joka tapauksessa vähentää energiavarojen käyttöä maapallolla. Tehonhallinnalla voidaan suorasti vähentää myös tarpeettomien hiilidioksidipäästöjen syntymistä ja näin keventää elektroniikkateollisuuden epäsuoria ympäristövaikutuksia laitteiden käytön mittaan.

Mainittakoon, että universaali latauskäytäntö olisi laturien välisen yhteensopivuuden vuoksi ympäristövaikutusten kannalta järkevä ratkaisu, sillä rikkoutuneiden tai muuten hylättyjen laitteiden toimivat laturit voitaisiin ottaa käyttöön myös vanhan korvanneessa laitteessa. Nykyaikainen potentiaalinen liitinstandardi voisi fyysisten ominaisuuksiensa [7, s. 126] puolesta olla esimerkiksi USB-C -liitin (USB, engl. universal serial bus, universaali sarjaväylä), joka edeltäjäänsä Micro-USB -liittimeen verrattuna on helpompi käyttää ja kestävämpi. Fyysistä liitinstandardia pohdittaessa tulee harkita myös liittimen sähköisen suorituskyvyn skaalautuvuutta tulevaisuuden tarpeet huomioiden. Siirretty datamäärä kasvaa suuresti: joidenkin arvioiden mukaan 90 % kaikesta maailman datasta on luotu viimeisen kahden vuoden sisään [8]. Vaikka kasvava osuus käytettyjen laitteiden välisestä datasta siirretään osittain langattomasti mobiililaitteiden yleistyessä, on langallinen ratkaisu toistaiseksi yksinkertaisempi, luotettavampi ja nopeampi keino datan välittämiseksi esimerkiksi komponenttien välisessä kommunikaatiossa laitteen sisällä ja runkoverkoissa johtuen langattoman kanavan vaimentumisesta ja useammista häiriölähteistä [9, s. 50].

Elektroniikkateollisuudessa merkittävä osa päästöistä on seurausta uuden laitteen valmistamisesta ja vanhan laitteen hylkäämisestä, jolloin osaltaan voitaisiin pienentää mobiililaitteiden negatiivisia ympäristövaikutuksia tehonhallinnan keinoin [10, s. 134]. Ideaalitulanteessa sopivalla tehonhallinnalla voidaan hidastaa laitteen ennenaikaisen vikaantumisen todennäköisyyttä esimerkiksi riittävällä lämpötilan ja tehon yhteishallinnalla, jolloin laitteen keskimääräinen käyttöikä kasvaisi alentuneiden komponenttien lämpötilojen vuoksi, pienentäen tarvetta vaihtaa laitetta yhtä usein.

Laitteen uusimisen tarpeen pienentämien on lisäksi mahdollista dynaamisten tehonhallintatekniikoiden avulla: tehonkäyttöä sallitaan väliaikaisesti enemmän, kun siitä ei ole järjestelmälle liikaa haittaa. Tämä mahdollistaa tavallista korkeamman hetkellisen huipputehon keskimääräisen tehon jäädessä lähes entiselle tasolle, jolloin laite sallii itselleen tavallista suuremman hetkellisen suorituskyvyn suotuisissa käyttöolosuhteissa,

kun sitä eniten tarvitaan. Tämä saa järjestelmän toimimaan nopeammin käyttäjän sitä vaatiessa, jolloin laitetta ei tarvitse vaihtaa uudempaan yhtä pian sen hitauden vuoksi. Tämä jälleen pidentää laitteen aktiivista elinkaarta, jolloin kysyntä uusien laitteiden valmistamiselle pienenee.

## 2.2.2 Akun kestävyys

Kannettavien laitteiden energian välivarastot ovat pääsääntöisesti litiumakkuja niiden myrkyttömyyden ja muistiominaisuuksien puutteen vuoksi [1, s. 152]. Akuille tyypilliseen tapaan niillä on rajallinen kyky varastoida sähköenergiaa. Akun fyysinen kasvattaminen vastaavasti kasvattaa suurinta mahdollista varastoitua energiamäärää, mutta luonnollisesti tekee akusta komponenttina painavamman, kalliimman ja kookkaamman, osaltaan heikentäen laitteen kannettavuutta. Lisäksi kapasiteetiltaan suuremman akun lataaminen vie vakioteholla enemmän aikaa, rajoittaen osaltaan käytettävyyttä. Akkujen energiatihedyet kasvavat keskimäärin muutaman prosentin vuodessa, kun kannettavan elektroniikan tehotarpeet ovat kasvavat merkittävästi suurempaa vauhtia [1, s. 5–6]. Käytännössä akun riittävyttä voi parantaa joko kapasiteettia kasvattamalla tai käyttövirtaa pienentämällä. Akunkesto on suoraan riippuvainen käytetystä virrasta  $I$ , ja akun sähkövaraus  $Q$  tyypillisesti ilmoitetaan määritelmällisesti virran  $I$  ja ajan  $t$  funktiona

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} I dt, \quad (1)$$

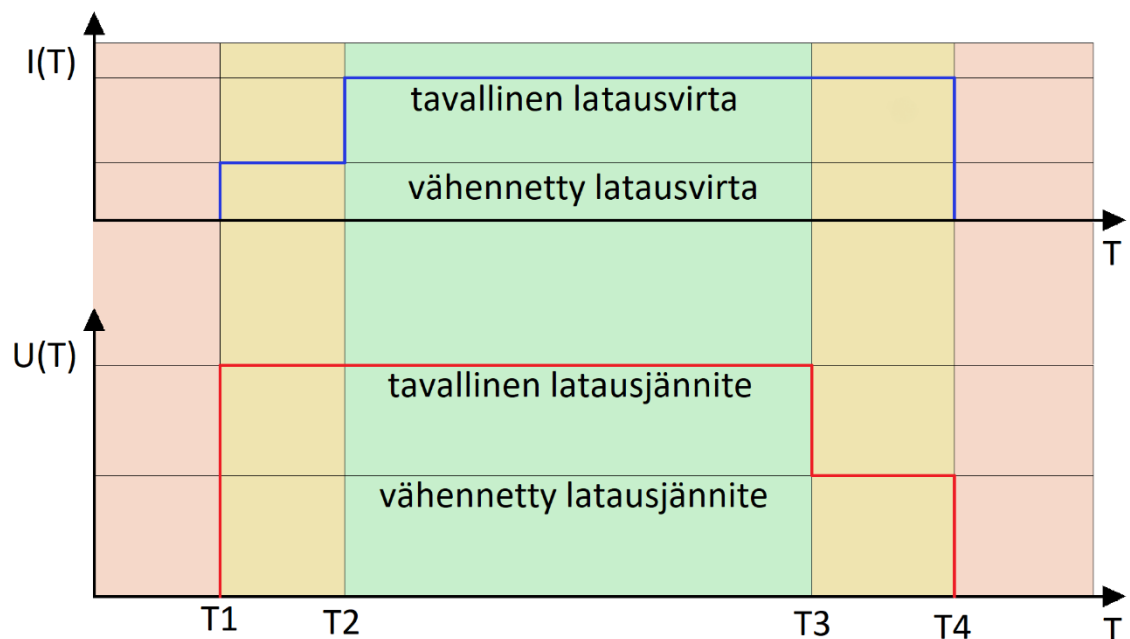
jonka yksikkö SI-järjestelmässä on 1 coulombi, mutta suurempaa virran ja ajan tulona muodostuvaa ampeerituntia [1 Ah] käytetään usein. Muunnos on seuraavasti [11, s. 66]

$$3600 \text{ As} = 3600 \text{ C} = 1 \text{ Ah} = 1000 \text{ mAh}. \quad (2)$$

C-nopeutta käytetään usein ilmaisemaan akun lataus- ja purkautumisnopeutta. Käytännössä 1 C:n latausnopeus kuvaa akun kapasiteettia vastaavan varauksen siirtymistä tunnissa ja vastaavasti C/2:n purkautumisnopeus tarkoittaa, että akun varaus kestää kaksi tuntia jatkuvalla vakiokuormalla. [12, s. 20]

Kannettavan nykyelektroniikan vaatimukset ohjeellistavat latausajan minimoimiseen, minkä seurauksena kehitetyt pikalataustekniikat mahdollistavat suuremmat hetkelliset lataustehot. Tyypillisesti pikalatausnopeutta porrastetaan siten, että mitä matalampi akun varaus on, niin sitä suuremmalla teholla laitetta ladataan. Nopeampi lataus kuormittaa akkua enemmän, mutta mahdollistaa skenaarion, jossa akun loppuminen voidaan välttää tavallista lyhyemmällä pikalatauksella. Akun käyttöiän ja lataus-turvallisuuden takia syötetyn virran määrän tulee riippua akun tilasta ja käyttöolo-suhteista. [12, s. 19–21]

Akku, laturi ja laitteen sisäistä DC-DC -muunnosta (DC, engl. direct current, tasajännite-muunnos) suorittavat komponentit joutuvat suurimmalle kuormitukselle latauksen aikana, jolloin ne lämmitessään lämmittävät ympäröimiään komponentteja [12, s. 22]. Porrastetulla latausprofiililla ehkäistään mahdollisesta kuumenemisesta ja liian suurella virralla lataamisesta aiheutuvaa laitteen kulumista esimerkiksi kuvassa 2 [13, s. 153] esitetyllä latausprofiililla. Kuvassa punertavalla ( $T_0$ – $T_1$ ,  $T_4$ ...) alueella ei tapahdu latausta, kellertävä alue ( $T_1$ – $T_2$ ,  $T_3$ – $T_4$ ) kuvaa tavallisesta latausprofiilista vähennetyn virran tai jännitteen aluetta ensin madaltuneen ja lopuksi kohonneen lämpötilan vuoksi. Vihreä alue ( $T_2$ – $T_3$ ) kuvaa tavallista lataustehoa.



**Kuva 2:** Esimerkki latausprofiilista eri käyttölämpötiloissa. Kuva perustuu lähteeseen [13, s. 153].

Akuilla on taipumus käytön myötä olla ensimmäisiä komponentteja, jotka ikääntyessään vaikuttavat suoraan käyttökokemukseen, kun akun suurin saavutettava varaustaso on madaltunut huomattavasti [13, s. 147]. Tällöin huonokuntoinen akku ei välttämättä kestä kuin muutaman tunnin aktiivista käyttöä kerrallaan, jonka jälkeen akku loppuu. Tällöin syöttöjännitteen taso on madaltunut liikaa ja laitteen virta katkaistaan litiumakun ylipurkautumisen estämiseksi [12, s. 19]. Akunhallintayksikkö huolehtii sopivasta akun käyttöolosuhteista, kuten jännitealueista ja lämpötilasta [1, s. 207].

### 2.2.3 Lämpötehon hallinta

Lämpenemisellä on käyttöiän heikkenemisen lisäksi muitakin seurauksia. Vapautunut lämpöenergia on seurausta elektronisten komponenttien hyötysuhteen epäideaalisuudesta, jolloin lämpöteho määritellään hukkatehona. Hyötysuhde  $\eta$  määritellään seuraavasti sähkötehon avulla kaavoissa 3 ja 4, kun kaikki teho kuluu lämpömäärän kasvattamiseen [11, s. 128, 132].

$$Q_{th} = Pt = UI t = \frac{U^2}{R} t, \quad (3)$$

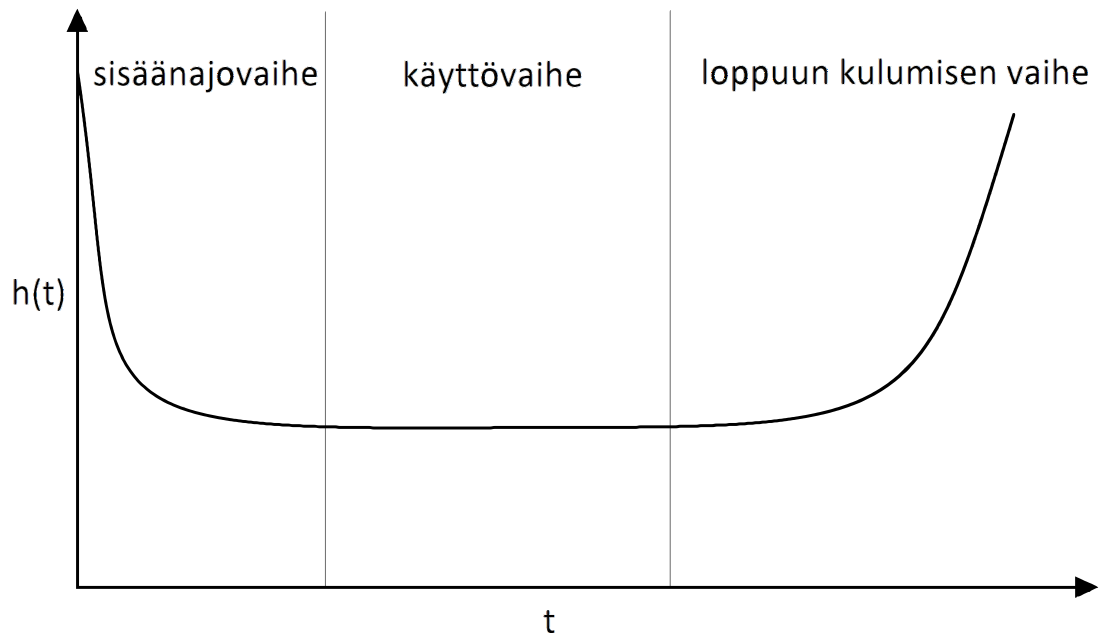
$$\eta = \frac{Q_{th1} - Q_{th2}}{Q_{th1}}, \quad (4)$$

joissa  $Q_{th1}$  kuvaa syötettyä lämpömäärää,  $Q_{th2}$  hukkatehoa,  $t$  kulunutta aikaa,  $I$  komponentin läpi kulkemaa sähkövirtaa ja  $U$  komponentin yli vaikuttavaa jännite-eroa. Periaatteessa hukkateho voi ilmetä myös äänenä kannettavissa laitteissa, esimerkiksi etäisenä sirinänä resonoivan kelan vuoksi tai näytön lämpösäteilynä, mutta tyypillisesti näissäkin tapauksissa komponentin oma lämpöteho on merkittävin hukkaenergian muoto, jolloin laitetasolla sen suuruutta tarkastelemalla päädytään melko tarkkoihin arvioihin. Lisäksi epätarkkuus tämän suhteen johtaa vastaavasti pieneen jäähtytyksen ylimitoitukseen, joka ei toisaalta ole huono asia. Edellä mainitun perusteella hukatun lämpötehon arviointi on yksi tapa määrittellä laitteen tai komponentin TDP-arvo (TDP, engl. Thermal Design Power, terminen suunnitteluteho), joka kuvaa jatkuvaa maksimihukkatehoa lämpönä tavallisissa käyttöolosuhteissa [14, s. 161]. Kaavoissa 5 ja 6 johdetaan aiemmin esitellyn hyötysuhteen määritelmän avulla hukkatehoa kuvaava TDP-arvo, joka kuvaa systeemistä poistettavan lämpötehon määrää.

$$P_{heat} \approx (1 - \eta)P \quad (5)$$

$$P_{TDP} = (1 - \eta)P \quad (6)$$

Kaavojen mukaisesti syötetystä huipputehosta täytyy jäädyttää prosessissa hukkaan menevä teho kokonaan. Vapautunut lämpöenergia täytyy siirtää komponentin sisältä ulkoilmaan joitain lämmönsiirtymistapoja käyttäen tai muuten komponentin oma lämpötila alkaa kasvamaan nopeasti. Tällöin komponentin elinajanodotteen vähenemisen lisäksi komponentti tapauskohtaisesti voi lähettää käyttöolosuhtealueensa ylärajaa, joka ylittäessä laitteen toiminnallisuudesta ei ole takeita. Kuvassa 3 esitetään yleisesti elektroniikkateollisuudessa käytetty kylpyammekäyrämalli vikaantumistodennäköisyydelle  $h(t)$  käyttöajan funktiona [15, s. 49], jossa kasvaneesta lämpötilasta johtuvat vikaantumiset korostuvat tuotteen elinkaaren loppuvaiheessa, kun ongelma on saanut jatkua pitempään.



**Kuva 3.** Yleistetty komponentin vikaantumistodennäköisyyden  $h(t)$  kylpyammekäyrässä ajan  $t$  funktiona. Kuva perustuu lähteeseen [15, s. 49].

Merkittävät rikkomukset laitteen spesifioiduissa käyttöolosuhteissa voivat johtaa ennenaikaiseen vikaantumiseen, vaikka laite kuntosaa puolesta sijaitsisikin käyrällä vakaalla alueella. Useimmiten lämpö johdetaan johonkin rajapintaan, kuten jäähdtyssiiiliin, josta suuren pinta-alan ansiosta lämpö johtuu ympäröivään väliaineeseen, kuten yksinkertaisimmillaan ilmaan. Lämmennyt ilma voidaan poistaa joko aktiivisesti tuulettimia käyttäen tai passiivisesti konvektiovirtaukseen perustuen.

Aktiivinen jäähdtyys käytännössä vie sähköä, mutta vastaava noin watin [16] teho saadaan usein säästettyä lämpötilan mukana pienentyneen kuparin lämpöresistanssin [11, s. 94][17, s. 96] myötä jäähdtytyllä alueella. Riittävä jäähdtyys on laitteelle perusedellytys luotettavan ja pitkäikäisen toiminnan varmistamiseksi, ja siksi panostus lämpösuunnitteluun on tarpeellista, vaikkakin resursseja kuluttavaa. Massatuotetuissa kannettavissa laitteissa on rajallisesti tilaa toteuttaa kymmenien wattien lämpökuorman jäähdtyys sekä halvasti että tehokkaasti myös laitteen melutaso huomioiden. Lisäksi loppukäyttäjä voi kokea huomattavasti kädenlämpöään kuumemman laitteen epämuokavana käyttää, jolloin lämpösuunnittelu voi vaikuttaa suoraan aktiiviseen käyttökokemukseen.

Elektronisten komponenttien pienentyessä on myös huomionarvoista mainita, että kaikkia lämmönhallintaongelmia ei välttämättä voida eliminoida edes riittävän

massiivisilla jäähdytys-elementeillä. Tehotiheyden jatkuva kasvaminen on käytännön ongelma etenkin puolijohdeteollisuudessa: Siirrettäessä prosessorimalli suuremman tiheyden sallivalle valmistusprosessille netotaan laskentatehoa. Piirin pinta-alan pienenytessä koko sirun lämpövuoto kulkee pienemmän poikkipinta-alan halki, jolloin materiaalien ja niiden rajapintojen vaatimukset lämmönjohtavuudelle kasvavat niin lähellä sirun toiminnallisia yksiköitä, ettei jäähdytys-elementillä voida kompensoida riittämätöntä lämmön johtumista komponentin paketoinnin sisällä. [1, s. 51–52]

## 2.2.4 Suorituskyky

Käyttäjäkokemuksen näkökulmasta laitteen suorituskyky määrittelee hyötyohjelmien suoritusajan ja käyttöliittymän vasteajan käyttäjän syönteille. Tämän perusteella riittävä suorituskyky on olennainen komponentti käyttäjäkokemuksen muodostumisessa. Suorituskyvyllä on kuitenkin hintansa: Uusimmalla valmistusprosessilla tuotetut komponentit ovat lähes aina kalliimpia, kun saannot ovat vielä verrattain heikkoja ja puolijohdeteollisuuden tulee saada vastinetta sijoituksilleen uusien prosessien käyttöönottamisesta. Lisäksi uuteen prosessiin perustuvalla tuotteella saattaa olla parantuneeseen suorituskykyyn, pienentyneeseen virrankulutukseen ja sirukokoon [1, s. 51] perustuva kilpailuetu. Tällöin kilpailutilanne voi myös perustella uusien komponenttien kohonnutta hintaa vanhempiin nähden, etenkin jos kilpailu on rajallista.

Synkronisten komponenttien prosessointiteho on suoraan riippuvainen komponentin kellotaajuudesta kaavan 5 mukaisesti. CMOS-valmistustekniikkaan (CMOS, engl. complementary metal oxide semiconductor, kanavatransistori) pohjautuvien komponenttien, kuten prosessorien, muistien ja kiihdyttimien, kellotaajuudella on lineaarinen edellytys riittäväälle käyttöjännitteelle, ja suurempi kellotaajuus vaatii teoriassa ainakin yhtä suuren muutoksen käyttöjännitteeseen. Tehon neliöllistä riippuvuutta kellotaajuudesta tarkastellaan kaavassa 5. Lisäksi käyttöjännitteellä  $V$  on neliöllinen vaikutus aktiiviseen tehonkulutukseen  $P_{active}$ . Toimintataajuudella  $F$  on sellaisenaan lineaarinen vaikutus tehonkulutukseen. Kapasitanssi  $C$  on toteutuskohtainen vakio ja sen suuruuteen voidaan vaikuttaa skaalausteorian mukaisesti valmistustekniikkaa parantamalla [1, s. 51]. Kaavoissa 5–8 ositellaan synkronisen CMOS-komponentin energiankulutus staattisen ja aktiivisen tehonkulutuksen summan aikaintegraalina.  $\alpha$  kuvaa signaalin aktiivisuustekijää. [18, s. 185]

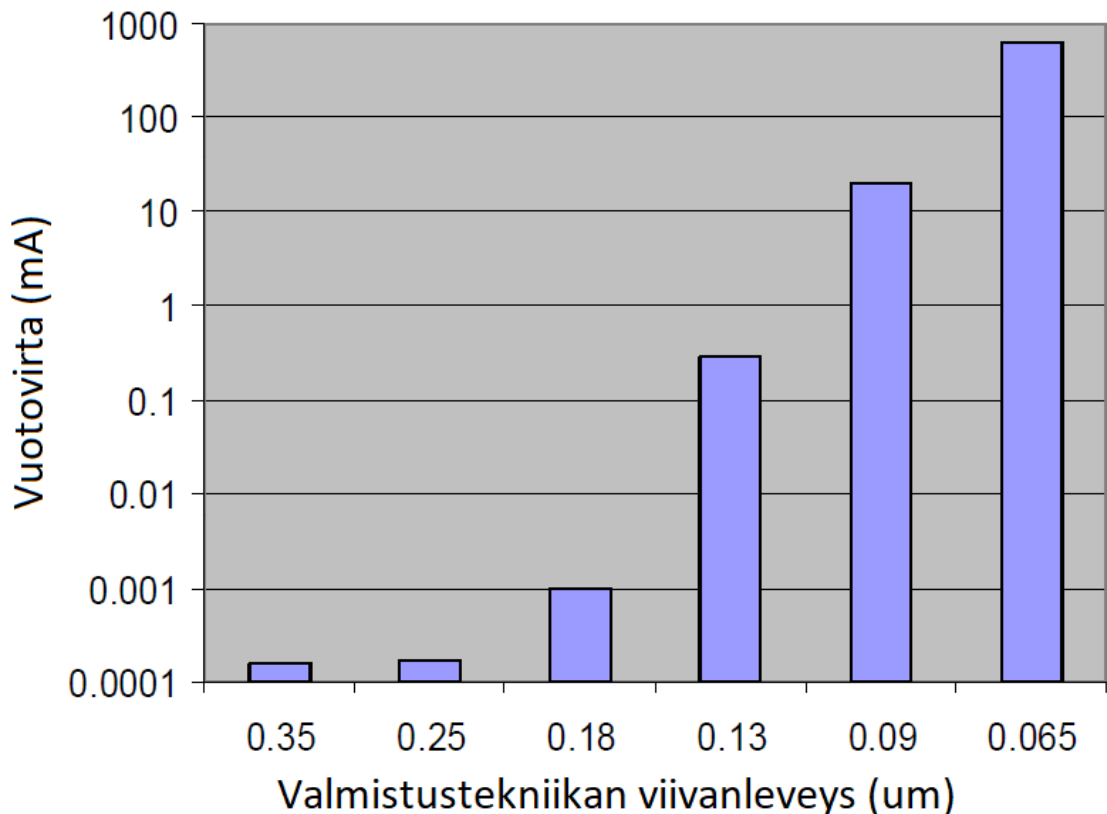
$$P_{active} = \alpha CV^2F \quad (5)$$

$$P_{static} = I_{static}V \quad (6)$$

$$P_{total} = P_{active} + P_{static} \quad (7)$$

$$E_{total} = \int P_{total} dt \quad (8)$$

Kaavojen 6 ja 7 perusteella vuotovirralla  $I_{static}$  voi olla merkittävä vaikutus komponentin passiiviseen tehonkulutukseen, etenkin jos laite viettää merkittävän osan ajasta virransäästötilassa. Seuraavan sukupolven CMOS-valmistustekniikkaa hyödyntämällä voidaan saavuttaa noin 40 %:n parannus komponentin kelloaajuudessa ja kaksinkertainen transistoritiheys 50 %:n tehonkulutuksella vanhempaan tekniikkaan nähden [1, s. 51]. Valmistustekniikan parantamisesta on kuitenkin aikojen saatossa tullut haastavampaa ja näin siis hitaampaa sekä kalliimpaa, eikä toistaiseksi ole varmuutta 3 nm:n viivanleveyden saavuttamisesta [19]. Ongelmallista mobiililaitteen näkökulmasta on viivanleveyden pienentämisestä johtuva vuotovirtojen kasvu kuvan 4 mukaisesti.



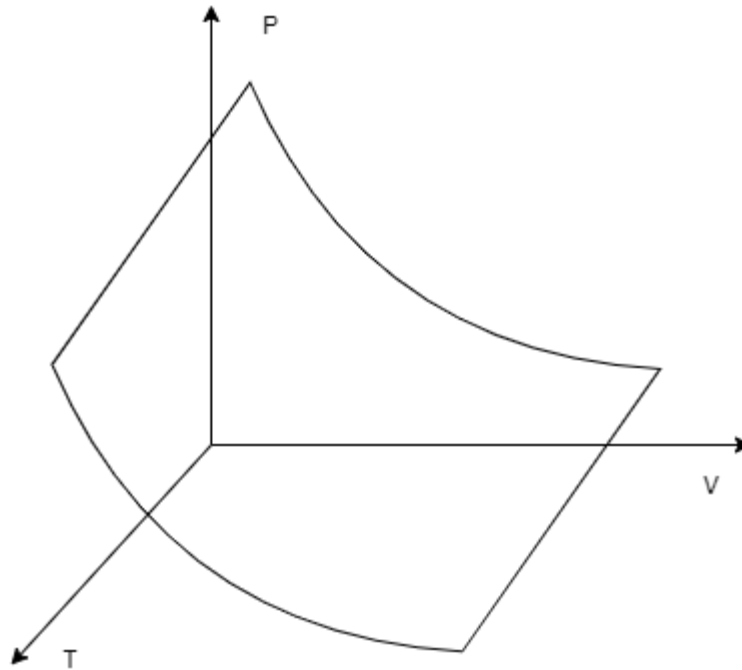
**Kuva 4:** Vuotovirran kasvu CMOS-valmistustekniikan viivanleveyden pienentyessä vuonna 2006. Kuva perustuu lähteeseen [18, s. 186].

Kasvaneet vuotovirrat kasvattavat kannettavan laitteen passiivisessa valmiustilassa käyttämää tehoa kaavojen 6 ja 7 mukaisesti, jolloin akunkesto rajoittuu laitteen viettäessä merkittävän osuuden ajasta latauksen jälkeen valmiustilassa.



Suunniteltavan laitteen CMOS-valmistusprosessiin perutuvien komponenttien toiminta tulee mitoittaa suunnitellun käyttötarkoituksen mukaisesti. Täydellistä mitoitusta on kuitenkin haastavaa toteuttaa, kun suunnittelutyön lisäksi tulee huomioida komponenttimallin, yksilön tai valmistuserän sisäiset vaihtelevuudet testikappaleiden välillä niin vuotovirroissa kuin dynaamisessa tehonkäytössä. Käytännössä tämä edellyttäisi valmiin tuotteen jännite- taajuuskäyrän testaamista, joka voi olla haaste esimerkiksi miljoonittain massatuotetuissa komponenteissa. Valmiiden komponenttien laadunvalvonnassa voidaan mitata sähköisiä ominaisuuksia. Tätä käytäntöä kutsutaan staattiseksi prosessin kompensoinniksi [1, s. 79].

CMOS-prosessille ominainen jännite-taajuus- tehokäyrä esitellään kuvassa 5 [15, s. 87], jossa ilmenee myös kaavan 5 riippuvuus jännitteen ja tehon välillä. Huomionarvoista on tehon neliöllinen ja suorituskyvyn lineaarinen riippuvuus käyttöjännitteestä.



**Kuva 5:** Yleistetty CMOS-piirin toimintapiste kellotaajuuden  $T$ , jännitteen  $V$  ja tehon  $P$  funktiona. Kuva perustuu lähteeseen [15, s. 87].

Suorituskyky riippuu suoraan käytetyn CMOS-prosessin kellotaajuudesta. Kuvassa kappaleen muoto määrittää kasvatetun kellotaajuuden vaatiman suhteessa yhtä suuren käyttöjännitteen noston. Vastaavasti lineaarinen nosto käyttöjännitteessä aiheuttaa tehonkulutukseen neliöllisen nousun. Suurempi suorituskyky saadaan näin asettamalla kuvan kappaleen ylle suurempi samanmuotoinen kappale, joka leikkaa esitetty akselit alkuperäisen kuvion leikkauspisteitä suuremmissa arvoissa. Esimerkiksi 10 % lisää suorituskykyä (eli kellotaajuutta) vaatii kuvan perusteella noin 10 % lisää käyttöjännitettä,

minkä vuoksi tehonkulutus nousee 21 % pelkästään jännitteen kasvattamisen takia. Kellotaajuuden nostamisen vuoksi kokonaiskulutus nousee kaavan 5 mukaisesti  $1,1^3$ -kertaiseksi (= +33,1 %), jolloin huippusuorituskyvyn kasvattaminen riittävän tason yli ainoastaan kellotaajuutta kasvattamalla ei ole virtatehokasta.

Proessorien tapauksessa on mahdollista hyödyntää rinnakkaista laskentaa, jottei kellotaajuutta tarvitsisi kasvattaa aina ominaisuus- ja laskentakykyvaatimusten kasvaessa [20, s. 113]. Useampaa prosessorin laskentasäiettä hyödyntämällä voidaan suorittaa samanaikaisesti toisistaan riippumattomia laskutoimituksia, jolloin toiminta nopeutuu lähes lineaarisesti prosessoriytimien määrän kasvaessa laskentakuorman ja -komponenttien rinnakkaistuksessa hyvin [21, s. 15–17].

Kannettavien laitteiden superskalaareilla (sekä ARM- että x86-pohjaisilla) prosessoriytimillä voidaan lisäksi suorittaa useaa käskysarjaa rinnakkain, jotta ytimen toiminnalliset yksiköt, kuten laskentayksiköt ja välimuistit, saataisiin hyödynnettyä mahdollisimman tehokkaasti. SMT-tekniikalla (engl. simultaneous multithreading, symmetrinen monisäikeistys) haetaan useista suoritettavista säikeistä käskyjä, jotta prosessorin liukuhihnoitettujen toiminnallisten yksiköiden käyttöaste voidaan pitää korkeampana käytön aikana. SMT:n avulla voidaan saavuttaa merkittävä suorituskykyetu monisäieohjelmointia hyödyntävässä laskentakuormassa yksittäisen laskentasäikeen suorituskykyä heikentämättä. [21, s. 13–17]

Osa CPU:n (CPU, engl. central processing unit, suoritin) laskennasta voidaan tarvittaessa ulkoistaa siihen erikoistuneelle kiihdyttimelle. Yleiskäyttöisyyden sijaan kiihdyttimet on rakennettu ja ohjelmoitu toimimaan nopeasti ja vähällä energialla, vapauttaen prosessorille tehobudjettia ja laskenta-aikaa suorittimelle muita sovelluksia varten. Nopeus ja energiatehokkuus saavutetaan kiihdyttimen kehittämisen ohjelmallisella abstrahoimattomuudella ja rajoittamattomilla optimointivapauksilla. [20, s. 113]

Kaikkea laskentaa ei ole välttämätöntä suorittaa kannettavalla laitteella, ja siksi voi käyttäjäkokemuksen ehdoilla olla järkevää ulkoistaa laskenta palvelimille. Esimerkiksi MATLAB:n mobiilisovelluksessa voidaan valita, että suoritetaanko laskenta etänä käyttäjän tietokoneella vai MATLAB:n laskentapalvelimilla [22–23]. Tällöin ainoastaan skripti siirretään palvelimelle laskettavaksi ja lopuksi tulokset siirretään kannettavalle laitteelle, jolloin käyttö luonnistuu lähes normaalisti. Pilvipalveluissa suoritettava laskenta vähentää näin paikallisen laskennan määrää ja käytettyä tehoa kannettavassa laitteessa, pidentäen laitteen käyttöaika latauksetta. Samalla tavalla pilvipalveluiden mahdollistama datan tallennus on mahdollisuus tehonkäytön näkökulmasta: huolimatta

kompaktimman ja pienitehoisen sähköisen tallennustilan yleistymisestä, voidaan useamman tai suurempien puolijohdeasemien sijasta tämäkin tilavuus luovuttaa paremmalle jäähdytykselle tai akulle, jolloin tehobudjettia voidaan mahdollisesti kasvattaa vastaavasti. Haittapuolena käytön sujuvuus altistuu laitteen ulkoisille tekijöille, kuten tiedonsiirron epäideaalisuudelle ja palvelimien valmiudelle vastata käyttäjän pyyntöihin.

## 3. VIRRANHALLINNAN TEKNIIKAT

Tehonhallinta on prioriteettikysymys. Tyypillisesti korostuu tarve tasapainotella kustannusten, tilavuuden, monimutkaisuuden, akunkeston ja suorituskyvyn välillä, joiden muuttaminen vaikuttaa toisiinsa. Laitekokonaisuutta suunniteltaessa tulee huomioida kaikkien parametrien vaikutukset toisiinsa. Valinnat voidaan jaotella joko laitteisto- tai ohjelmistopohjaisiin ratkaisuihin.

### 3.1 Komponenttivalinta

Komponenttivalinnalla voidaan merkittävästi vaikuttaa kannettavan laitteen tehonkulutukseen sekä aktiivisessa että passiivisessa käytössä, sillä kaikki laitteen tehonkulutus suotavasti mahdollistaa juuri komponenttien virheettömän ja suorituskyvyltään riittävän toiminnan. Valittaessa komponentteja tulee huomioida laitteen tarkoitus, sillä ne muodostavat pohjan toiminnallisuudelle. Parhaan laitteen suunnittelu rajoitusten sisässä vaatii holistisen lähestymistavan, joka huomioi kunkin valinnan lukuisat seuraukset koko laitteen skaalassa [24, s. 20]. Kokonaisuuden ominaisuudet priorisoiden täytyy tehdä kompromisseja kustannusten tai saatavilla olevan tilan perusteella, eikä tästä syystä välttämättä voida valita myöskään tehonhallinnan näkökulmasta parasta komponenttia: joskus on kannattavampaa panostaa virtatehokkaimman piirin sijasta halvempaan komponenttiin, mutta sisällyttää budjettiin asianmukainen jäädytys. Kompromisseja tehdään lisäksi kilpailukykyisyyden nimissä. Huomioimalla laitteen tavoitteet ja käyttäjän odotukset jokaisessa suunnittelu-prosessin vaiheessa luodaan perusteet tyydyttävästi toimivalle laitteelle.

Ominaisuuksien ja suorituskyvyn karsiminen on suunnitellun käyttötarkoituksen puitteissa usein perusteltua tehon säästämiseksi. Täysimittaiset lippulaivakomponentit sisältävät enemmän toiminnallista logiikkaa ja sitä ohjaavia transistoreja, jotka käyttävät tehoa ja tilaa komponentin sirulla. Sen sijaan karsittujen komponenttien pienemmän transistorimäärän myötä myös lämmönhallinnalla on tapana helpottua, jolloin voidaan säästää entistä enemmän tilaa, kun jäädytykseen ei välttämättä tarvita yhtä montaa tuuletinta tai isoja jäädytyslaitteita. Tämän seurauksena myös laitteen hinta voi perustellusti olla halvempi, kun toiminnallisesti karsitun laitteen suunnittelemiseen menee vähemmän aikaa sen yksinkertaisuuden vuoksi.

## 3.2 Tehonsyöttö

Kaikkien komponenttien käyttämä teho tulee langattomassa käytössä laitteen akulta. Akun tyyppiä muuttamalla voidaan vaikuttaa sen viemään tilavuuteen, laitteen massaan ja akunkeston, jonka vuoksi akun luonne merkitsee paljon laitteen kannettavuudelle. Akkukennojen tyyppi voi myös määrittää akun muodon, jota laitekohtaisesti voidaan hyödyntää tarjolla olevan koteloinnin muodon ja tilavuuden mukaisesti. Akun valintaan vaikuttaa myös sen kyky tukea pikalataustekniikoita. Litiumakkujen tapauksessa se käytännössä tarkoittaa virransietokykyä vallitsevissa latausolosuhteissa. Lataamisen tehokkuus riippuu akun lämpötilasta ja vastaanotettavan virran määrästä. Litiumakuilla lataamisen tehokkuus alkaa tyypillisesti pienetä huomattavasti  $C/2$  -latausnopeus ylitettäessä. [12, s. 22]

Niin kooltaan kuin kapasiteetiltaan suurempi akku usein mahdollistaa tehokkaampien komponenttien käyttämisen virtarajoitteisessa [1, s. 4] mobiililaitteessa, kasvattaen samalla laitteen kokoa ja massaa, vaikeuttaen laitteen kannettavuutta ja näin myös heikentäen käyttökokemusta. Vaihtoehtoisesti suuremmalla akulla voidaan myös saavuttaa pitempi aktiivinen käyttöaika ilman ulkoista tehonsyöttöä, joka on mobiliteetin näkökulmasta parempi ratkaisu, mutta se tehdään suorituskyvyn ja ominaisuuksien kustannuksella. Fyysisten rajoitteiden lisäksi suurempi akku edellyttää pitempää latausaikaa suuren varaustasonsa ylläpitämiseksi, jolloin laite on suuremman osan ajasta laturissa kiinni, joka osaltaan jälleen rajoittaa liikuteltavuutta.

Laturi suorittaa AC-DC -muunnosta verkkovirrasta, jotta kannettavan laitteen akku voidaan ladata käyttöä varten. Osa kannettavista laitteista voi tukea suoraan USB 2.0-standardin mukaista 500 mA:n latausvirtaa, mutta joihinkin pikalataustekniikoihin ja erillisiin latureihin verrattuna akun lataaminen näin voi viedä kauemmin [7, s. 38]. Laturin tulee olla yhteensopiva akun ja pikalataustekniikkaa säännöstelevän järjestelmäpiirin ja/tai laitteen sisäisen DC-DC -muuntajan kanssa, jotta nopeampaa latausta voidaan hyödyntää. Vaikka laturin hukkateho on kannettavan laitteen akunkeston merkityksetön asia, voi se vaikuttaa heikentävästi käytön turvallisuuteen, mikäli se pääsee kuumenemaan esteettä muodostaen paloturvallisuusriskin. Laadukkaita komponentteja käyttävä hyvin suunniteltu laturi ei lämpene liikaa.

Tietokoneet tarvitsevat lukuisia sisäisiä eri jännitetasoja, jotka muodostetaan DC-DC -muuntamalla virtalähteen jännitetasosta. DC-DC -muunnokseen voidaan käyttää lineaariregulointia eli sähkövastuksia. Kaavan 3 mukaisesti tehohäviö on vastuksessa neliöllinen laskettuun jännitteeseen nähden, jolloin suurilla virroilla tehohäviö on suuri ja

näin hyötysuhde muunnoksessa on pieni. Lämmöntuotosta tulee tällöin huolehtia asianmukaisesti. Lineaarireguloinnilla saavutetaan matala signaalin kohinataso. [25, s. 1]

Transistorien epälineaarisuutta voidaan hyödyntää tehonsyötössä lineaarireguloinnin sijasta hukatehon minimoimiseksi. PWM-signaali (PWM, engl. pulse-width modulation, pulssinleveysmodulaatio) muodostetaan katkomalla kytkintransistorilla syöttöjännitettä pulssimaiseksi aalloksi, joka tasoittamalla saadaan muistuttamaan madallettua DC-jännitettä. Yli 80 %:n hyötysuhteet ovat saavutettavissa, mutta hyötysuhde pienenee suhteessa PWM-signaalin taajuuden kasvaessa. [25, s. 2]

Kyseisiä hakkuriteholähteitä voidaan käyttää tietokoneissa niiden hyvän hyötysuhteen vuoksi suuritehoisille komponenteille, kuten esimerkiksi näytönohjaimille, prosessoreille, järjestelmäpiireille ja DRAM-muisteille (DRAM, engl. dynamic random-access memory, dynaaminen satunnaiskäyttömuisti). Niillä on myös mahdollista nostaa jännitetasoa. Haittapuolena hakkuriteholähteessä on lineaariregulointiin nähden verrattainen monimutkaisuus, korkeammat rippelitasot ja ne tuottavat enemmän sähkömagneettista interferenssiä ympäristöönsä. Niillä on rajallinen taajuudentuottokyky ja aikavaste. [25, s. 20]

Sähkömagneettiseen induktioon perustuva langaton lataus on käytön kannalta vaivaton tapa ladata laite, mutta suuren hukatehon ja ylimääräisten komponenttien vuoksi se ei ole saanut vielä merkittävää suosiota [26, s. 10664–10665] [27, s. 7687]. Tehonkäytön näkökulmasta mielenkiintoisesti langaton lataus mahdollistaa myös tehonvälityksen laitteesta toiseen. Kummankin langattomalla latauksella varustetun laitteen induktiivisesti kytkeytyvät kelat mahdollistavat varauksen jakamisen langattomasti laitteesta toiseen, kun laitteita pidetään riittävän kauan lähekkäin. Mainittakoon vielä, että hukateho [27, s. 7687] on vastaavaa suuruusluokkaa kuin langattomassa latauksessa johtuen saman tekniikan käyttämisestä.

### 3.3 Näyttö

Joissain sovelluksissa näytön tehonkulutus voi olla kannettavan laitteen suurin yksittäinen tehonkulutuksen lähde [1, s. 164]. Virranhallinnan näkökulmasta mielenkiintoisena ilmiönä OLED-paneeleita (OLED, engl. organic light-emitting diode, orgaanisia yhdisteitä sisältävä hohtodiodi) hyödyntävien näyttöjen käyttö kuluttajaelektronikassa on yleistynyt viime vuosina. Perinteisistä taustavalaistuista LED-näyttöistä (LED, engl. light-emitting diode, hohtodiodi) poiketen emissiivinen OLED-

tekniikka ei tarvitse erillistä taustavaloa, jonka pitää olla päällä käytön aikana, vaan jokainen näytön pikseli kontrolloi kirkkaustasonsa, mahdollistaen käytännössä pienemmän virrankulutuksen, kun mustia tai tummia värisävyjä näyttävät pikselit ovat käytännössä lähes tai kokonaan pois päältä. Mainittakoon, että OLED-paneelit omaavat tästä syystä poikkeuksellisen hyvän kontrastintoistokyvyn. Näytön automatisoidulla himmentämisellä ympäristön valaistuksen mukaan voidaan pienentää laitteen jatkuvaa tehonkulutusta [1, s. 165–172]. Dynaamisen kirkkaudensäädön kanssa OLED-paneelin hyödyt voidaan maksimoida käyttämällä tummaa teemaa laitteen käyttöliittymässä ja sovelluksissa, joka vähentää valon tuottamiseen käytettyä energiaa

Itsevalaisevan ja valaistujen näyttötekniikoiden lisäksi on myös ympäristön valoa hyödyntäviä tekniikoita, joilla voidaan saavuttaa parempi akun kestävyys. Reflektiiviset näyttötyypit, kuten esimerkiksi sähköistä paperia hyödyntävät näytöt heijastavat ympäristönsä valoa, muodostaen perinteistä paperitulostetta muistuttavan kuvan näytölle. Mikäli kuvaa ei muuteta sähköisellä paperilla, tehoa ei kulu. Tämä tekee siitä hyödyllisen tekniikan esimerkiksi sähköisten kirjojen lukemiselle tai sähköisille hintalapuille, joita ei tarvitse päivittää lukuisia kertoja sekunnissa. Huonoina puolina tekniikka ei tue lukuisien eri värien toistoa, vaan värintoisto on mustavalkoista. [1, s. 296–298]

### 3.4 Suoritin

CPU on tietokoneille tyypilliseen tapaan kannettavan laitteen toiminnallisuuden perusta. Tällä hetkellä valtaosaa kannettavien laitteiden arkkitehtuureista edustavat superskalaarit ARM- ja x86-pohjaiset järjestelmät. Esimerkiksi x86 on CISC-prosessoriarkkitehtuuri (CISC, engl. complete instruction set computer, täydellisen käskykannan tietokone), jossa yksi käsky voi sisältää useita alkeistason operaatioita. Tästä poiketen ARM-prosessori RISC-pohjaisena (engl. reduced instruction set computer, karsitun käskykannan tietokone) pyrkii tarkoituksella pitämään käskykannan mahdollisimman pienenä ja tehokkaana. RISC-prosessori on helpompi liukuhinoittaa, joka kasvattaa prosessorin käyttöastetta ja laskentatehoa. RISC-prosessorille on CISC-prosessoriin verrattuna yleisempää mittavampi ohjelmistokoodi samalle toiminnallisuudelle sekä virta- ja kustannustehokkuus. Raja RISC:n ja CISC:n jaottelussa on hämärtynyt ajan kuluessa, ja molemmista tyypeistä löytää nykyään alkujaan vastakkaiseen ryhmään kuuluneita ominaisuuksia. Laitesuunnittelussa käskykannan valinnalla on merkitystä virrankulutuksen kannalta. RISC-pohjaiset laitteet ovat olleet kasvavien [2] mobiililaitemarkkinoiden perusta ja valtaosa tablettitietokoneiden ja älypuhelimien toiminnallisuudesta perustuu nykyään ARM-pohjaisiin suorittimiin.

Kannettavissa tietokoneissa on suurempien fyysisten mittojen vuoksi voitu laajalti pitäytyä x86-suorittimissa. [15 s. 68–70]

Valmistusprosessin parantaminen on mahdollistanut kellotaajuuden ja tehonsäästöjen merkittävän kertymisen vuosien kuluessa [1, s. 50–51]. Tehonkulutuksen vähentämiseksi voidaan hyödyntää prosessin parantamista vaihdantakapasitanssin minimoimiseksi, jännitteen vähentämistä järjestelmäpiireillä sekä arkkitehtuurillisten parannuksien ja piirisuunnittelun avulla [1, s. 90]. Kiihdyttimien toteuttaminen pääprosessorin rinnalle on yksi vaihtoehto suorituskyvyn ja virtatehokkuuden parantamiseksi [20, s. 113].

Korkeataajuisen kellosignaalin vieminen laitteessa alueille, joissa sitä ei hyödynnetä, kuluttaa energiaa. Nopeasti muuttuva ja suurelle alueelle toimitettava kellosignaali käyttää merkittävästi tehoa. Yksi yleinen keino kellosignaalin tehon vähentämiseksi on sen portittaminen, jolloin kellosignaalin pääsyä tietyille piirin lohkoille kontrolloidaan lisälogiikalla [15, s. 139]. Samaa tekniikkaa voidaan soveltaa myös analogisille käyttöjännitteille, jolloin on tapana puhua tehon portittamisesta.

### **3.5 Muistihierarkia**

Kommunikointi vie energiaa. Pelkästään loogisen bitin asettaminen komponenttien väliselle väylälle vie energiaa väyläjohtimien välisen loiskapasitanssin takia, vaikka tietoa ei talletettaisi. Varsinaisesta datan siirtämisestä aiheutuvat tehohäviöt ovat myös merkittäviä. Tähän voidaan puuttua pakkaamalla data joko sovellustasolla tai erillisellä pakkainyksiköllä sekä väylän lähettävässä että vastaanottavassa päässä, jolloin pakkaaminen ei näy lainkaan väylän ulkopuolelle. [1, s. 79–82]

Suorittimen valinta vaikuttaa myös muistihierarkiaan, sillä nopeimmat välimuistit ovat useimmiten sijoitettuna prosessoripaketoinnin sisään. Muistihierarkiassa ylimmällä asteella sijaitsevat suorittimen verrattain pienet ja nopeat välimuistit, jotka käyttävät suhteellisen paljon tehoa. Prosessorin välimuisteja astetta alempana hierarkiassa sijaitsee DRAM-muisti, joka on kapasiteetiltaan suurempaa ja halvempaa, mutta myös hitaampaa. Useimmiten käytetään DDR SDRAM -muistia (SDRAM, engl. synchronous dynamic random access memory, synkroninen dynaaminen satunnaiskäyttömuisti), jolle on ominaista sukupolvittain vähenevä käyttöjännite ja kasvava tiedonsiirtonopeus. Lisäksi kyseisestä muistityypistä on olemassa kannettaville laitteille mukautettu pienemmällä käyttöjännitteellä toimiva malli LPDDR SDRAM (LPDDR, engl. low-power



double data rate, matalatehoinen muistityyppi kaksinkertaisella datataajuudella kellosignaaliin nähden). [28, s. 452–456]

Hierarkiassa alimpana on paikallinen massamuisti. Se on kapasiteettiyksikköä kohti halvinta ja hitainta muistia, joka sisältää kaiken kannettavan laitteen toiminnalle riittävän datan. Massamuisti ei ole haihtuvaa, eli tallennettu data säilyy vielä uudelleenkäynnistyksen jälkeenkin, toisin kuin joissain välimuistityypeissä. Kannettavista laitteista ainoastaan kannettaviin tietokoneisiin on saatavilla hitaampia mekaanisia kiintolevyjä, joiden toiminta perustuu alkeismagneettien kääntämiseen pyörivällä levyllä bittien ilmaisemiseksi. Levyn pyörittämiseen tarvitaan täysin sähköisiin puolijohdeasemiin nähden enemmän tehoa, jolloin tehosäästöjä voidaan saavuttaa valitsemalla puolijohdeasema mekaanisen kiintolevyn sijasta. Puolijohdeasemat ovat kapasiteettiin nähden kalliimpia, mutta samalla myös huomattavasti nopeampia satunnaisluku- ja kirjoitusnopeuksiltaan. Pienemmän tehonkäytön lisäksi ne voivat parantaa käyttökokemusta suorituskyvyn osalta. [28, s. 21–24]

## 3.6 Ohjelmistopohjaiset ratkaisut

Tehonkulutukseen voidaan puuttua ohjelmistotasolla säännöstelemällä tehdyn laskennan määrää. Jotta ohjelmisto voisi tehdä päätöksiä tehonkäyttöön liittyen, tulee sen ensiksi voida kommunikoida kannettavan laitteen eri toiminnallisten lohkojen kanssa. Käytännössä ohjelmisto lukee eri antureilta vastaanottamaansa mittausdataa, kuten esimerkiksi eri jännitteitä, virtoja, käytettyä kapasiteettia tai lämpötilaa. Ohjelmisto sovittaa ensin saadut tiedot esimääritettyihin rajoihin, algoritmeihin tai taulukoihin, joiden tarkoituksena on määrittää ja asettaa käyttötilanteeseen sopiva kellotaajuus dynaamisesti. Kellotaajuuden rajoittuessa voidaan vastaavasti myös vähentää käyttöjännitettä ja näin tehonkulutusta kaavan 5 mukaisesti.

### 3.6.1 Tehobudjetti

Laitekohtainen tehonkulutus on seurausta sen toiminnallisten lohkojen yhteistehonkulutuksesta. Rajoittamalla eri komponenttien tehoa voidaan varmistua jäähdytysratkaisun riittävydestä ja parantaa laitteen hyötysuhdetta kaavaan 5 perustuen: lineaarinen hyöty suorituskyvyssä vaatii suuremman suhteellisen muutoksen tehonkulutuksessa. Riittävällä kontrolloinnilla jokaiselle kuormalle on sovittavissa komponenttien välinen yhteinen ja riittävä suorituskyvyn taso, jolloin muuten ylisuoriutuvien komponenttien tapauksissa voidaan säästää energiankulutuksessa

vaikuttamatta suuresti käyttäjäkokemukseen. Jaettuja jäähdytysratkaisuja, virransyöttöä tai tiedonsiirtoväyliä hyödyntäville komponenteille on näin ollen perusteltua määrittää myös jaettuja tehobudjetteja, jotka säännöstelevät tehonkäyttöä erikseen näiden toiminnallisten lohkojen kesken.

Esimerkkinä yhteisestä tehonsäätelystä toimii AMD:n kehittämä SmartShift -teknologia, jonka tarkoituksena on päättää samaan SoC:iin (SoC, engl. system on a chip, järjestelmäpiiri) sijoitettujen CPU:n ja GPU:n (GPU, engl. graphics processing unit, grafiikkasuoritin) tehorajasta. Kuorman perusteella SmartShift tavoitteellisesti määrittää, että kumpi toiminnallinen lohko toimittaa lisäteholla paremman käyttäjäkokemuksen ja painottaa yhteistä tehobudjettia kyseiselle lohkolle. [29]

### 3.6.2 Dynaaminen jännite- taajuuskäyrä ja virransäästötilat

Dynaaminen jännitteen ja kellotaajuuden muuttaminen on suosittu tekniikka CPU:n tehonkäytön kontrolloimiseksi. DVFS-tekniikka (DVFS, engl. dynamic voltage frequency scaling, dynaaminen taajuuden- ja jännitteensäätö) hyödyntää CMOS-digitaalipiirien laajaa toiminta-aluetta eri jännitteillä. Tekniikka perustuu CMOS-piirien ominaisuuteen toimia tehokkaammin matalilla jännitteillä. Vaikka DVFS on toteutettavissa kokonaan laitteistotasolla, useimmiten ainakin osa kontrollialgoritmita toteutetaan ohjelmistolla. [15, s. 86–87]

Kellotaajuuden ja jännitteen säätämällä voidaan saavuttaa tehonsäästöä suorituskvyn kustannuksella kaavan 5 ja kuvan 5 perusteella. CMOS-logiikkapiirin tehonkäyttö on verrannollinen käyttöjännitteen neliöön, kun saavutettavissa oleva suorituskvyy on suoraan verrannollinen käyttöjännitteen arvoon. Hetkellisen kuorman perusteella määritetään sopiva kellotaajuus ja vastaavasti jännitetaso luotettavan toiminnan takaamiseksi. DVFS-kontrolleri pyrkii anturidatan perusteella määrittämään tietyille aikavälille sopivan kellotaajuuden, jotta laskenta saadaan suoritettua tehokkaasti. Lisäksi huomioimalla järjestelmäpiirin lämpötila algoritmissa voidaan saavuttaa merkittäviä tehosäästöjä [1, s. 77–78].

Virransäästötilat rajoittavat komponentin tehonkäyttöä vähentämällä niiden kellotaajuutta DVFS-tekniikalla ja vaiheittain sammuttamalla tarpeettomia toiminnallisia lohkoja ja oheislaitteita tehon säästämiseksi suorituskvyyvaatimuksen ehdoilla. Suurempia tehonsäästöjä tarjoavat tilat vaativat kuitenkin enemmän aikaa palautukseen täyden toiminnallisuuden tilaan [1, s. 88]. Käyttöjärjestelmä ohjaa laitteistotason virranhallintaa säätelemällä kellotaajuutta ja kontrolloimalla globaaleja eri virransäästötiloja. Virransäästötiloja voidaan toteuttaa käyttöjärjestelmissä ja

laitteistotasolla: käyttöjärjestelmä luokittelee käytettävän globaalin tehotilan, muttei erittele mekanismeja sen toteuttamiseksi. Tehotilan toteuttaminen jätetään laitteiston vastuulle. [15, s. 255]

Järjestelmäpiireillä on useita eri tehonsäästötiloja. Laitteistossa virransäästötilat voidaan jaotella esimerkiksi odotustilaan, torkkumiseen, tilansäilytykseen, syväuneen ja horrostilaan. Vaiheittain prosessorin ja oheislaitteiden kellosignaalit portitetaan, jännitteitä minimoidaan ja RAM-muisti (RAM, engl. random access memory, keskusmuisti) ohjelmoidaan ainoastaan säilyttämään dataa virkistämällä muistia säännöllisesti. Horrostilassa käyttöjännitteet voidaan portittaa, kun loppu data on viety talteen pois CPU:n rekistereistä. Syvempi virransäästötila vaikuttaa heikentävästi laitteen heräämisaikaan, mahdollisesti heikentäen käyttäjäkokemusta. Pelkästään näytön herättämiseen voi mennä sekunteja, joka vastaa miljoonia CPU:n kellojaksuja. Näin ollen laitteen herättäminen vaatii myös energiaa, jolloin laitetta ei kannata siirtää virransäästötilaan, ellei prosessissa säästetä enemmän energiaa kuin käytetään [1, s. 88–89, 133–134].

### 3.6.3 Pakkaaminen ja enkoodaaminen

Merkittäviä tehonsäästöjä on saavutettavissa pakkaamalla käännetty ohjelma tai muistin sisältö häviöttömästi. Ohjelmakoodin pakkaaminen on suhteellisen helppo toteuttaa, kun ohjelman kääntäjän toimintaa ei tarvitse muuttaa. Ohjelman dataa ei ole välttämätöntä pakata. Ohjelma pakataan kääntämisen jälkeen ja puretaan siirrettäessä ohjelmakoodia RAM-muistista CPU:n välimuistiin. Purkuyksikkö keskeyttää ohjelman lukemisen RAM:stä ja muuttaa pakatun datan CPU:lle tulkittavaan muotoon. Pakattu ohjelmakoodi ei näin ollen vaikuta prosessorin suoritusyksikköjen toimintaan, jolloin niihin ei tarvitse tehdä muutoksia tekniikan käyttöönottamiseksi. [15, s. 100–102]

CPU:n välimuisteille johtavat väylät ovat leveitä ja pitkiä, joka muodostaa niille huomattavan kapasitanssin eri johtimien välille. Loiskapasitanssi vaikeuttaa väylän arvojen muuttamista nopeasti ja pienellä energialla paljon käytetyllä väylällä. Tämän perusteella tavoitteena on minimoida muuttuvien väylän arvojen lukumäärä aikayksikköä kohden. Väylät kuluttavat huomattavan osan CPU:n kokonaistehosta. Väylällä siirrettävien bittien määrää voidaan vähentää enkoodaamalla väylän sisältö, jolloin vähennetään väylän energiankulutusta. Ehtona enkoodauksen toimivuudelle on väylädatan sisällön täydellinen palauttaminen alkuperäiseen muotoonsa: enkoodaamalla väylän sisältämä data väylän lähettävässä päässä ja dekoodaamalla data vastaanottavassa päässä prosessi on muille komponenteille täysin läpinäkyvä. Tällöin

muutoksia väylän ulkopuolella ei tarvita. Väyläenkoodaustekniikoita on lukuisia. Osa tekniikoista vaatii siirrettäväksi apubittejä dekodauksen mahdollistamiseksi. [15, s. 117–122]

## 4. YHTEENVETO

Tehonhallinta on oleellinen osa kannettavaa laitekokonaisuutta. Laitteen suunnittelun jokaisessa vaiheessa säästetty energia kertyy nopeasti, ja tämä puolestaan mahdollistaa vakaan pohjan hyvälle käyttäjäkokemukselle. Virranhallinnan lukuisten tekniikoiden avulla kannettavan laitteen havaittiin tarjoavan käyttäjälleen enemmän laskentatehoa, pidemmän akunkeston, lisää toiminnallisuutta, hiljaisemman melutason sekä viileämmän että luotettavamman kokonaisuuden. Tavoitteellisesti tehonkulutusta vähennetään silloin kun käyttäjäkokemus kärsii siitä vähiten, jolloin minimoidaan tehonhallinnan haittoja.

Tässä työssä tehonkulutuksen havaittiin olevan merkittävä tekijä laitteen suunnitteluprosessissa. Suunnitteluvaiheessa tehdään tärkeitä valintoja prioriteettien suhteen, sillä lopullisen laitteen profiiliin vaikuttavia tekijöitä on paljon ja osa niistä on toisensa poissulkevia. Kaikki laitteen toiminnallisuus saavutetaan käytettyjen komponenttien avulla ja näiden tehonkäyttöön puuttumalla voidaan saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä. Analogisen tehontarpeen minimoimisen lisäksi voidaan vaikuttaa komponenttien ja kokonaan eri laitteiden välisen kommunikaation tehonkäyttöön. Havainnon pohjalta pääteltiin, että kasvava osuus tehonsäästöistä tapahtuu kommunikaation kautta käsiteltävän ja talletettavan datamäärän kasvaessa siirtonopeuksien ohella jatkuvasti. Työn tavoitteet saavutettiin hyvin, koska virranhallinnan ratkaisujen moniulotteisuus, ongelmat ja seuraukset korostuivat eri näkökulmista sekä teoriapuolella että eri virranhallinnan tekniikoita käsiteltäessä.

Tämän tutkimuksen havaintojen pohjalta pääteltiin, että virtarajoitteisten kannettavien laitteiden kehitys perustuu tehonhallinnan tekniikoiden kehitykseen. Lisäksi, on usein perusteltua panostaa vähävirtaisuuteen tasapainoisen laitteen ja kilpailukykyisen tuotteen saavuttamiseksi. Kannettavan laitteen komponentteja voidaan nykyään kontrolloida ohjelmallisesti sisäänrakennettujen algoritmien lisäksi käyttäjärjestelmätasolla asti. Komponenttien suorituskyvyn hallinnointi mahdollistaa dynaamisen tehonkäytön, joka myöntää suorituskykyä käyttäjän tarpeisiin tarvittaessa ja vähentää laitteen suorituskykyä ja tehonkäyttöä muulloin keinotekoisesti. Tehonhallintafunktiot ovat kehittyneet joustavammiksi viime vuosina, koska kuluttajalaitteissa on nykyään lukuisia käyttöolosuhteita mittaavia sensoreita. Tästä pääteltiin, että päätös suorituskyvyn tarpeesta voidaan tehdä tarkemmin ja nopeammin, jolloin käyttäjän kokema viive virranhallinnan takia pienenee suorituskykytarpeen noustessa. Kuorman

vähennyttä tehoa hallitsevat ohjelmat kytkeytyvät nopeammin päälle, vähentäen hukattua energiaa.

# LÄHTEET

- [1] F. Shearer, Power Management in Mobile Devices, Newenes Publishing, 2008
- [2] Shipments of mobile devices, Statista, verkkosivu, saatavissa (viitattu 30.3.2020) <https://www.statista.com/statistics/272595/global-shipments-forecast-for-tablets-laptops-and-desktop-pcs/>
- [3] A. Butterfield, G. Ngondi, A. Kerr, A Dictionary of Computer Science (7 ed.), E-kirja, hakuteos, Oxford University Press, 2016
- [4] I. Suh, D. Cho, J. Franke, S. Hong, S. Jung, B. Lee, J. Miller, F. Risch, N. Shinohara, F. Turki, Wireless Charging Technology and the Future of Electric Transportation, SAE International, 2015, pp.i-xiii
- [5] K. Allamraju, Linear & Nonlinear Electrical Behavior Of Energy Harvester, Elsevier Ltd, 2017
- [6] A. Baschiroto, K. Makinwa, P. Harpe, Frequency References, Power Management for SoC and Smart Wireless Interfaces, Springer International Publishing Switzerland, 2014
- [7] USB Type-C® Cable and Connector Specification Revision 2.0, August 2019 and ECNs, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 22.03.2020): <https://www.usb.org/sites/default/files/USB%20Type-C%20Spec%20R2.0%20-%20August%202019.pdf>
- [8] Data Never Sleeps 5.0, Domo, verkkosivu, saatavissa (viitattu 22.03.2020): <https://www.domo.com/learn/data-never-sleeps-5>
- [9] A. Snow, U. Varshney, A. Malloy, Reliability and survivability of wireless and mobile networks, in Computer, vol. 33, no. 7, July 2000, pp. 49–55
- [10] J. Mansvelt. Green Consumerism: An A-to-Z Guide. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications Inc, 2010
- [11] R. Seppänen, L. Mannila, M. Kervinen, I. Parkkila, P. Konttinen, L. Karkela, T. Yli-Kokko, MAOL taulukot, Otava, 2012
- [12] J. Lopez, M. Gonzalez, J. C. Viera and C. Blanco, Fast-charge in lithium-ion batteries for portable applications, 26th Annual International Telecommunications Energy Conference, 2004, pp. 19–24
- [13] F. Rezzi, L. Collamati, M. Costagliola, and M. Cutrupi, Battery Management in Mobile Devices, in Frequency References, Power Management for SoC, and Smart Wireless Interfaces, Springer International Publishing, 2014
- [14] M. Ansari, S. Safari, A. Yeganeh-Khaksar, M. Salehi, A. Ejlali, Peak Power Management to Meet Thermal Design Power in Fault-Tolerant Embedded Systems, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Jan 1;30(1), 2019, pp. 161–173

- [15] W. Wolf, High-Performance Embedded Computing: Architectures, Applications, and Methodologies, Burlington: Elsevier Science & Technology, 2006
- [16] Tuuletinkatalogi, Sunon, verkkosivu, saatavissa (viitattu 7.3.2020), <https://www.digikey.dk/en/datasheets/sunon-fans/sunon-fansmaglev20catalog>
- [17] J. Dellinger, The Temperature Coefficient of Resistance of Copper, Vol. 7, No. 1, University of Michigan, U.S. Government Printing Office, 1911
- [18] C. K. Y. Chun, eXtreme Energy Conservation for Mobile Communications, IEEE International SOC Conference, Taipei, 2006, pp. 185–188
- [19] Transistor options beyond 3nm, Semiengineering, verkkosivu, saatavissa (viitattu 22.3.2020) <https://semiengineering.com/transistor-options-beyond-3nm>
- [20] Hoe J. Technical Perspective: FPGA compute acceleration is first about energy efficiency. Communications of the ACM. Oct 28;59(11), 2016, p. 113
- [21] S. Eggers, H Levy, J. Lo, R. Stamm, D. Tullsen, Simultaneous multithreading: A Platform for Next-Generation Processors, ACM SIGARCH Computer Architecture News, May 1;23(2), 1995 pp. 12–19
- [22] MATLAB:n pilvipalvelut, Mathworks, verkkosivu, saatavissa (viitattu 04.4.2020) <https://www.mathworks.com/solutions/cloud.html#cloud-services>
- [23] MATLAB, Google Play, Mathworks, verkkosivu, saatavissa (viitattu 04.4.2020) <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mathworks.matlabmobile&hl=fi>
- [24] J. Bruce, W. Spencer, D. Twang, Memory Systems: Cache, DRAM, Disk, Elsevier Science & Technology, 2007
- [25] M. Kazimierczuk, Pulse-Width Modulated DC-DC Power Converters, John Wiley & Sons Incorporated, 2015
- [26] Z. Wang, X. Wei, Design Considerations for Wireless Charging Systems with an Analysis of Batteries, Energies, vol. 8, (10), 2015, pp. 10664–10683
- [27] S. Hwang et al, Software-Based Wireless Power Transfer Platform for Various Power Control Experiments, Energies, vol. 8, (8), 2015, pp. 7677–7689
- [28] D. Patterson, J. Hennessy, Computer Organization and Design, Fourth Edition: The Hardware/Software Interface, Elsevier Science & Technology, 2008
- [29] AMD technologies, AMD, verkkosivu, saatavissa (viitattu 04.4.2020) <https://www.amd.com/en/technologies/smartshift>