

# KLAVIKORDIN ÄÄNEN SYNTEESI

Vesa Välimäki<sup>1,2</sup> ja Mikael Laurson<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Porin korkeakouluyksikkö, PL 300, 28101 Pori

<sup>2</sup>TKK, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, PL 3000, 02015 TKK, Espoo

<sup>3</sup>Sibelius-Akatemia, Musiikkiteknologian laitos, PL 86, 00251 Helsinki

vesa.valimaki@pori.tut.fi, laurson@siba.fi

## 1 JOHDANTO

Esittelemme klavikordin akustiikkaa sekä klavikordin äänen synteisiin kehittämämme menetelmän, joka perustuu soitinmallinnukseen ja äänitteiden käyttöön eli nämplykseen. Klavikordi on yksi vanhimpia kosketinsoittimia, ja sitä käytetään edelleen renessanssi- ja barokkimusiikin esityksissä ja levytyksissä [1–4]. Klavikordissa on miellyttävä mutta hiljainen ääni. Tavallisen soiton aiheuttama äänipainetaso metrin päässä on noin 50–60 dB soittimesta riippuen. Siksi klavikordia voidaan käyttää vain pienissä konserteissa, joissa kuulijat voivat sijoittua lähelle soitinta. Tämä on myös pääsyy siihen miksi klavikordin tilalle kehitettiin aikanaan uusia äänekkäämpiä kosketinsoittimia, kuten cembalo ja lopulta flyygeli ja piano. Klavikordin heikkoa ääntä on pyritty vahvistamaan myös sähköisesti kontaktimikrofonin avulla [5].

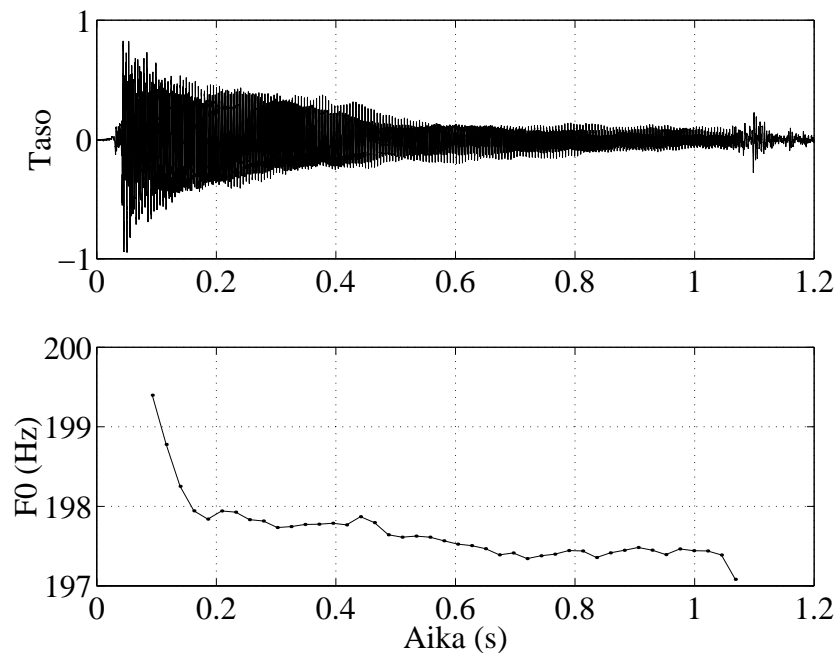
Tässä artikkelissa ehdotamme digitaaliseen aaltojohtomallintamiseen ja nämplykseen perustuvan synteesimenetelmän klavikordin äänelle. Kappale 2 luonnehtii klavikordin akustisia ominaisuuksia ja kappaleessa 3 esitämme synteesimenetelmän. Tämän tutkimuksen tuloksia on julkaistu aiemmin ICMC2000-konferenssissa [6].

## 2 KLAVIKORDIN TOIMINTAPERIAATE JA AKUSTIIKKA

Jokainen klavikordin kosketin soittaa kieliparia, joka on viritetty unisonoon (sama tai lähes sama perustaajuus). Koskettimen toiminta perustuu yksinkertaiseen vipumekanismiin: kun soittaja painaa kosketinta, sen toinen pää kohoaa [2], [3]. Koskettimen soittajasta kauempana olevaan päähän on kiinnitetty tangenti, joka on ohut metallilevy. Kosketinta painettaessa se iskeytyy kiinni kahteen kieleen, jotka alkavat värähdellä. Kielet on kiinnitetty toisesta päästään tallan kautta kaikupohjaan, mutta toisessa päässä kielten välissä on vaimennusmateriaalia. Kun kosketin on alhaalla, tangentin ja tallan välinen kielten osuus värähtelee vapaasti. Tangenttimekanismin liikkuvat osat aiheuttavat mekaanista ääntä, jonka takia klavikordin äänen alukkeeseen sisältyy kolinan kaltainen osuus. Kolina johtuu osaksi myös kaikupohjan moodeista, jotka heräävät koskettimen painalluksen voimasta.

Käytännössä kieliparin kielet ovat aina hiukan eri vireessä, ja koska ne kytkeytyvät toisiinsa joustavan tallan kautta, äänessä kuullaan sekä huojuntaa että kaksivaiheinen vaimeneminen [2]. Kuva 1 näyttää klavikordin äänen aaltomuodon noin sekunnin ajalta. Kuvasta voidaan huomata epäsäännöllinen vaimenemisnopeus, joka poikkeaa huomattavasti teoreettisen kielen eksponentiaalisesta vaimenemisesta.

Kun soittaja vapauttaa koskettimen, tangenti irtoaa kieliparista. Nyt kielten värähtely pääsee etenemään kielten toiseen päähän kiinnitettyyn huopaan asti, joka vaimentaa värähtelyn nope-



Kuva 1. Klavikordin äänen (a, 197,5 Hz) aaltomuoto ja perustaajuus ajan funktiona.

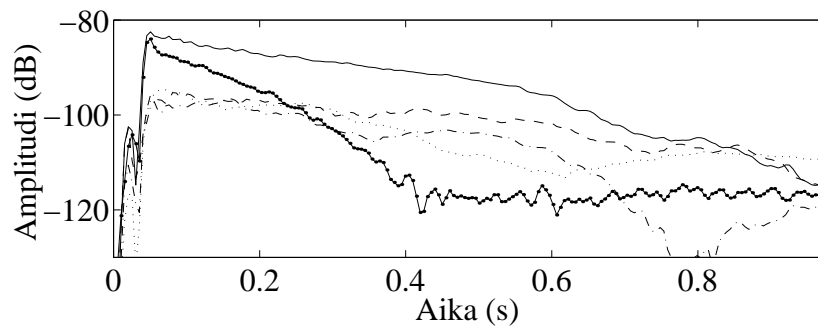
asti. Koskettimen vapauttaminen aiheuttaa sävelten loppuun voimakkaan hälyäänen, joka on klavikordille tyypillinen. Kuvassa 1 nähdään koskettimen nostoon liittyvä purske noin 1,1 sekunnin kohdalla. Samalla signaali alkaa vaimentua.

Kuvan 1 ääni on pienen oktaavin A, mutta sen perustaajuus on vain 197,5 Hz. Tämä on selvästi liian matala viritys, sillä nykyaikaisen virituksen mukaan perustaajuuden pitäisi olla 220 Hz, koska keski-A (oktaavia ylempi A) on nykyään 440 Hz. Soitin on kuitenkin vireessä. Selitys on se, että vanhojen soittimien viritys on ollut alempi kuin nykyisin. Vanhojen soittimien rakenne ei kestäisi kielten suurta voimaa, joka vaadittaisiin nykyaikaiseen viritukseen.

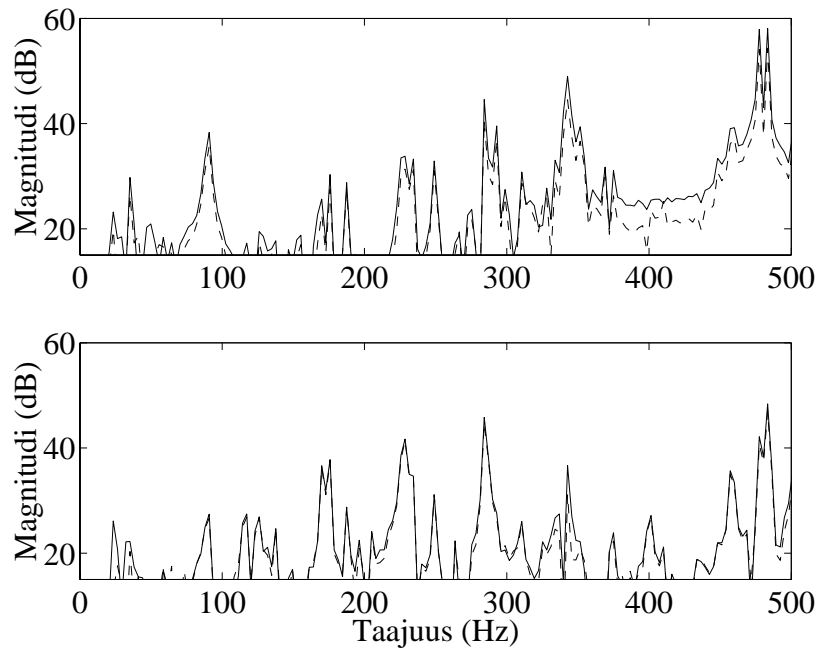
Klavikordin koskettimen ja siihen liittyvien kielten välillä on suora kontakti kielten värähdellessä. Tästä johtuen soittaja voi tuottaa vibraton muuttamalla sormen painetta koskettimella. Kyseessä on mekaaninen 'aftertouch' – erikoisuus, joka yleistyi 1980-luvulla sähköisissä kosketinsoittimissa. Klavikordissa se on ollut käytössä vuosisatojen ajan. Klavikordissa toiminto on tietenkin täysin polyfoninen eli kaikilla koskettimilla voidaan tuottaa yksilöllinen vibrato. Sähköisissä kosketinsoittimissa tämä on harvinaisuus, joka on toteutettu vain arvokkaissa malleissa.

Klavikordin äänen perustaajuuden on todettu laskevan nopeasti alukkeen aikana. Esimerkki nähdään kuvan 1 alaosassa, missä esitetään klavikordin äänen perustaajuus ajan funktiona. Osasy syy saattaa olla kielen jännityksen muuttuminen alukkeen aikana, mutta luultavasti pääsyy on yksinkertaisesti soittajan sormen aiheuttama ylilyönti ennen kuin se jää staattisesti pitämään kosketinta alhaalla. Äänittämässämme sävelissä perustaajuuden lasku tapahtuu nopeasti (noin 100 ms) ja sen laajuus on vain pari hertsiä, mutta se saattaa olla havaittavissa [7].

Kuvassa 2 näytetään klavikordin äänen 5 alimman harmonisen verhoikäyrä desibeliasteikolla. Voidaan nähdä, että niiden vaimeneminen ei ole eksponentiaalista eli desibeliasteikolla lineaarista, vaan mukana on huojuntaa ja muita poikkeamia.



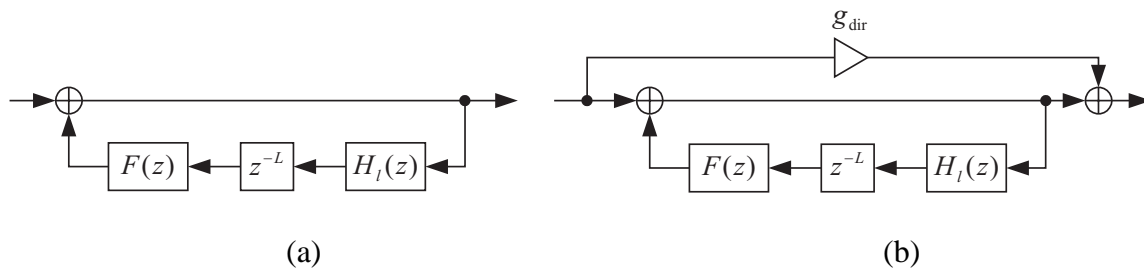
Kuva 2. Klavikordin kaikupohjan taajuusvaste tallan (a) diskantti- ja (b) bassopäästä.



Kuva 3. Klavikordin kaikupohjan taajuusvaste tallan diskantti- ja bassopäästä. Molemmissa kuvissa on 2 eri mittaustulosta päällekkäin.

Mittasimme klavikordin kaikupohjan impulssivasteen selvittääksemme voimakkaimmat moodit. Kuva 3 esittää klavikordin kaikupohjan amplitudivastetta, kun heräte oli impulssivasaran isku tallan yläreunaan ja mikrofoni oli sijoitettu 0,5 metrin korkeudelle kaikupohjan yläpuolelle. Kielet olivat paikallaan, mutta ne oli vaimennettu huolellisesti pehmeällä materiaalilla. Kuvassa 3 nähdään kaikupohjan vaste ylimmän ja alimman kielen kohdalta. Vasteessa on useita teräviä ja korkeita huippuja, jotka erottuvat erikseen. Niiden korkeus riippuu selvästi herätteen paikasta [2]. Esimerkiksi 90 Hz kohdalla kuvan 2 ylemmässä osassa näkyvä terävä piikki on vaimentunut kuvan alaosassa.

Klavikordin äänen hiljaisuus johtuu useista rakenneratkaisuista [3]. Herätmekanismi ei ole voiman välittämisen kannalta kovin tehokas: tangentti lepää vain 2-3 millimetrin päässä kielistä ja kosketinta painettaessa se ei ehdi kiihtyä kovaan vauhtiin ennen kuin se osuu kieliin. Tämän jälkeen soittajan sormen voima menee kielen siirtämiseen pois tasapainotilastaan. Staattinen poikkeama on noin 1-2 millimetriä. Heräte osuu kielen päähän, mikä ei ole tehokas tapa saattaa kieli värähtelemään. Kielten jännitysvoima täytyy klavikordin hennon rakenteen takia pitää melko pienenä, mikä myös vaikuttaa heikkoon äänenvoimakkuuteen. Lopulta kai-



Kuva 4. (a) Peruskielimalli ja (b) sen modifioitu muoto, jossa on alukkeen terävyyden säätö.

kupohja on varsin pieni eikä se vahvista ääntä yhtä hyvin kuin esimerkiksi kitaran kaikukoppa tai varsinkin pianon suuri kaikupohja.

### 3 KLAVIKORDIN SYNTEESIMALLI

Kielten värähtelystä aiheutuva ääni syntetoidaan fysiikkaan perustuvalla digitaalisella aaltojohtomallilla [8]. Klavikordin äänelle tyypillinen kolahtava aluke sisältyy herätesignaaliin, joka on saatu käänteissuodattamalla kaiuttomassa huoneessa äänitettyjä klavikordiääniä. Lisäksi synteettiseen ääneen lisätään kaikupohjan impulssivasteesta editoitu pitkä vaste, jolla saadaan klavikordille luonteenomainen kaiunta. Koskettimen nostamiseen liittyvä mekaaninen ääni on talletettu erikseen ja liipaistaan samaan aikaan, kun kielen värähtely vaimennetaan.

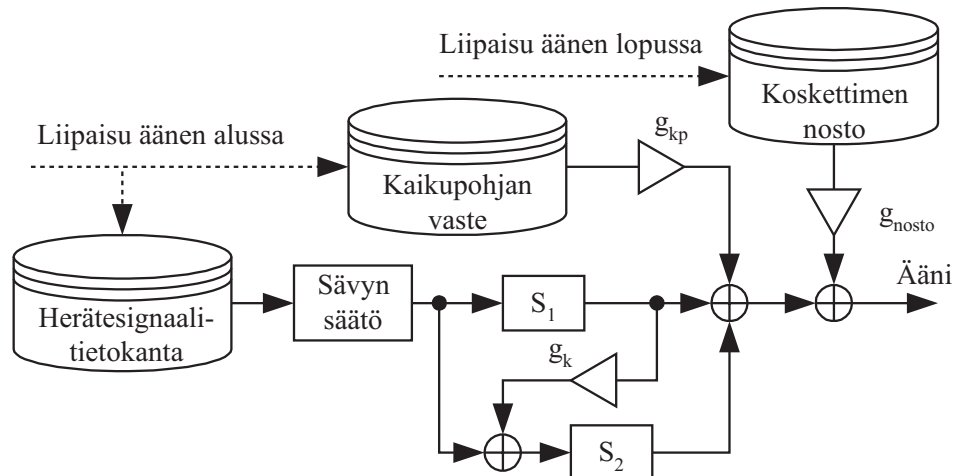
#### 3.1 Kielimalli

Klavikordin kielen malliksi voidaan valita sama rakenne kuin kitaralle ja muille kielisoittimille [8–10]. Menetelmä perustuu kommutoituun aaltojohtosynteesiin, missä kielimallin herätesignaali saadaan käänteissuodattamalla äänitettyjä yksittäisiä ääniä [9], [10]. Näin vältetään kaikupohjan resonanssiominaisuuksien mallintamiselta, koska ne sisältyvät herätesignaaliin.

Synteesikokeiluissa havaittiin, että klavikordin äänen alukkeelle luonteenomainen terävyys menetetään, kun synteesissä käytetään tavallista kielimallia. Ilmeisesti se on liian yksinkertainen klavikordin kielen käyttäytymiseen verrattuna. Kielimallin rakennetta päätettiin modifioida. Kuvassa 4a esitetään tavallinen kielimalli, jossa takaisinkytkentäsilmut sisältää 3 digitaalisuodinta: alipäästösuotimen  $H_1(z)$ , viivelinjan  $z^{-L}$  ja murtoviivesuotimen  $F(z)$ . Periaatteessa tätä samaa mallia on käytetty kielisoitinäänten synteesiin 1980-luvulta alkaen. Kuvassa 4b on modifioidun kielimallin lohkokkaavio, mihin on lisätty suora kytkentä tulosta lähtöön vahvistuskertoimella  $g_{dir}$ . Lähtöön kulkevan herätesignaalin vahvistus on  $1 + g_{dir}$ , joten se on voimakkaampi kuin takaisinkytkentäsilmutta menevä heräte, kun  $g_{dir} > 0$ . Jos  $g_{dir} = 0$ , kuvan 4b rakenne toimii täsmälleen samoin kuin kuvan 4a alkuperäinen rakenne.

Klavikordin äänelle tyypillinen huojunta saadaan tuotettua kahdella kielimallilla per sävel. Kielimallien perustajuuksissa (viivelinjan pituuksissa) on oltava sopivan pieni ero (alle 1 Hz), jolloin ne tuottavat huojuvan äänen.

Synteettisen äänen perustajuuus on kääntäen verrannollinen viivelinjan pituuteen. Perustajuuuden lasku alukkeiden aikana saadaan synteessimallissa asettamalla viive hieman nimellisarvoaan pienemmäksi äänen alkaessa ja pituutta suurennetaan nopeasti kohti nimellisarvoa.



Kuva 5. Klavikordisyntetisaattorin lohkokaavio, joka sisältää kolme signaalitietokantaa ja kaksi kuvan 4b mukaista modifioitua kielimallia  $S_1$  ja  $S_2$  sekä sävynsäätösuotimen.

### 3.2 Samplet

Kosketinta painettaessa kaikupohja saa voimakkaan herätteen, josta seuraa pitkään soiva vaste, jonka jälkikaiunta-aika on lähes 10 s. Synteettisissä äänissä on automaattisesti mukana kaikupohjan vasteen alkuosa kielten herätesignaalissa. Jotta kaikupohjan vaste olisi kuultavissa vielä pitkään sävelen alun jälkeen, se on lisättävä synteettiseen ääneen erikseen. Mahdollisia toteutustapoja ovat kaikupohjan vasteen mallintaminen FIR-suotimella tai kaikualgoritmin sovittaminen vasteeseen. Nämä ovat laskennallisesti raskaita tapoja eikä niitä haluttu käyttää. Sen sijaan todettiin, että kaikupohjan vaste voidaan sämplätä erikseen ja sample voidaan liipaista jokaisen äänen alussa. Tämä on mahdollista, koska vaste on joka kerta hyvin samantapainen eikä suodatusta kaikulaitteiden tapaan siksi tarvita. Periaatteessa joka kosketinta varten pitäisi äänittää oma kaikupohjavaste, mutta kahden vasteen todettiin riittävän: yksi alemmille ja toinen ylemmille sävelille. Samplen pitää joka kerta soida loppuun asti (kuulumattomiin), jotta vaste kuuluu luonnollisesti myös lyhyiden äänten yhteydessä.

Käytännössä kaikupohjasamplet saadaan tallan impulssivasteista, kun niiden alusta poistetaan metallinen kilahdus, joka johtuu impulssivasaran ja tallan kontaktista. Kaikupohjavasteen voimakkuutta voidaan säätää sävelen voimakkuuden mukaan. Lisäksi synteetikokeiluissa todettiin, että ylimmät sävelet kaipaavat voimakkaamman kaikupohjavasteen kuin alemmat, joten samplen voimakkuus asetettiin riippumaan myös perustaajuudesta.

Sävelten lopulle tyypillinen kolahdus äänitetään erikseen, ja sample lisätään synteettiseen ääneen samalla hetkellä kun ääni alkaa vaimentua. Kielimallin äänen nopea vaimeneminen toteutetaan pienentämällä alipäästösuotimen  $H_1(z)$  vahvistusta verhoikäyrfunktion mukaan. Loppukolahduksen irrottamiseksi voidaan äänittää hyvin pitkään soiva sävel, joka lopetetaan vasta kun kielten värähtelyn aikaansaama ääni on vaimentunut kuulumattomiin. Kun kosketin lopulta vapautetaan, tangenttijärjestelmän mekaaninen ääni saadaan äänitettyä erikseen, ja sitä voidaan käyttää synteetissä sellaisenaan. Ainoa erityisvaatimus on se, että äänitys on syytä suorittaa kaiuttomassa huoneessa, mutta mitään monimutkaista signaalinkäsittelyä ei tarvita. Jokaiselle koskettimelle ei myöskään tarvita omaa nostoääntä, vaan yksi tai muutama eri äänite riittää mainiosti, sillä kaikkien koskettimien tangenttimekanismi on lähes identtinen ja tuottaa samanlaista ääntä.

Klavikordisyntetisaattorin lohkokaaavio esitetään kuvassa 5. Siinä nähdään kolme signaalitie- tokantaa (herätteet, kaikupohjavasteet ja koskettimen nostoäänet) sekä kielimallit  $S_1$  ja  $S_2$ , jotka ovat kuvan 4b mukaisia modifioituja rakenteita. Herätesignaali voidaan prosessoida ennen kielimalleihin syöttämistä sävynsäätösuotimella, joka on ensimmäisen asteen IIR-suod- din. Sen tarkoitus on muuttaa äänensävyä dynamiikan mukaan siten, että voimakkaammat äänet ovat kirkkaampia kuin hiljaiset.

#### 4 YHTEENVETO

Tässä artikkelissa esiteltiin varhaisen kosketinsoittimen, klavikordin, akustiikkaa sekä ääni- synteesimenetelmä, joka perustuu mallinnukseen ja näytteenotukseen. Näillä menetelmillä saa- daan aikaan synteesimenetelmä, jossa yhdistyvät soitinmallinnuksen ja näytteenotuksen hyvät puolet: kielen ääntä voidaan muokata, koska sille on parametrinen malli, mutta aina saman- tyyppisenä pysyvät äänen komponentit, kuten kaikupohjan vaste ja koskettimen palautuksesta johtuva kolina, talletetaan ja liipaistaan oikeaan aikaan halutulla voimakkuudella. Menetelmä on yksinkertainen ja tehokas, mutta jättää sointiin säätövaraa enemmän kuin perinteinen näytteenotus tai aaltotaulukkosynteesi. Ääniesimerkkejä on kuultavissa TKK:n akustiikan labo- ratorion WWW-sivuilla:

<http://www.acoustics.hut.fi/demos/>

#### KIITOKSET

Cumhur Erkut on osallistunut tämän hankkeen kaikkiin vaiheisiin. Tero Tolonen osallistui tut- kimuksen alkuvaiheisiin vuonna 2000. Tämän tutkimuksen on rahoittanut Suomen Akatemia.

#### LÄHTEET

1. BENADE A, *Fundamentals of Musical Acoustics*. Oxford, New York 1976, pp. 353–354.
2. THWAITES S & FLETCHER N H, Some notes on the clavichord. *J Acoust Soc Am* **69** (1981)5, 1476–1483.
3. CAMPBELL M & GREATED C, *The Musician's Guide to Acoustics*. Schirmer Books, New York 1987, pp. 234–236.
4. HALL D E, String excitation: piano, harpsichord and clavichord. *Proc Stockholm Music Acoustics Conf*, 28.7.–1.8.1993, Tukholma, Ruotsi, 309–314.
5. BURHANS R W, Clavichord amplification. *J Audio Eng Soc* **21**(1973)6, 460–463.
6. VÄLIMÄKI V, LAURSON M, ERKUT C & TOLONEN T, Model-based synthesis of the clavichord. *Proc Int Computer Music Conf*, 27.8.–1.9.2000, Berliini, Saksa, 50–53.
7. JÄRVELÄINEN H & VÄLIMÄKI V, Audibility of initial pitch glides in string instrument sounds. *Proc Int Computer Music Conf*, 18.–22.9.2001, Havanna, Kuuba.
8. VÄLIMÄKI V & KARJALAINEN M, Soittimien laskennallinen mallintaminen. *Akustiik- kapäivä 1993*, 20.10.1993, Helsinki, 53–60.
9. SMITH J O, Efficient synthesis of stringed musical instruments. *Proc Int Computer Music Conf*, 10.–15.9.1993, Tokio, Japani, 64–71.
10. KARJALAINEN M, VÄLIMÄKI V & JÁNOSY Z, Towards high-quality sound synthesis of the guitar and string instruments. *Proc Int Computer Music Conf*, 10.–15.9.1993, Tokio, Japani, 56–63.