
EESTI TEADUSTE AKADEEMIA
Kohtu 6, 10130 Tallinn
Tel: 644 2129, faks: 645 1805, e-post: akadeemia@akadeemia.ee
<http://www.akadeemia.ee>

Facta non solum verba

SISUKORD

TEHNIKATEADUSED. Saatesõna asemel	
Rein Küttner	6
INTEGRAALNE FOTOELASTSUSMEETOD KLAASTOODETE KVALITEEDI KONTROLLIMISEKS	
Hillar Aben, Leo Ainola, Johan Anton, Andrei Errapart	9
EESTI MÄENDUS	
Alo Adamson, Enno Reinsalu	15
MEHAANIKA – LÕPUTU HULK UUSI PROBLEEME	
Jüri Engelbrecht	21
BIOPLAST	
Ain Heinaru	25
TEHNIKA ELU KVALITEEDI PARANDAMISEKS – BIOMEDITSIINITEHNIKA	
Hiie Hinrikus, Jaanus Lass, Tarmo Liipping, Kalju Meigas, Jevgeni Riipulk.....	31
CYBERNETICA AS TEGEMISTEST	
Ülo Jaaksoo, Monika Oit, Aivar Usk	39
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOI JA EHTUSKONSTRUKTSIOONIDE ARENG EESTIS	
Valdek Kulbach	43
MATERJALIDE JA MATERJALITEHNOLOOGIAALASTEST UURINGUTEST	
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOI	
Priit Kulu	47
ARVUTIPÕHISE TOOTE JA TOOTMISE ARENDAMISKESKKONNA LOOMINE MASINA- JA	
APARAADIEHITUSE ETTEVÕTETELE	
Rein Küttner, Martin Eerme	53
ELASTSUS- JA PLASTSUSTEORIAALASEST UURIMISTÖÖST TARTU ÜLIKOOI	
Jaan Lelley, Ülo Lepik	59

VEEKAITSEUURINGUD TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLIS	
<i>Enn Loigu</i>	63
NANOTEHNOLOOGIA JA TERAVIKMIKROSKOOPIA	
<i>Ants Lõhmus, Ilmar Kink</i>	67
KÕRGTEHNOLOOGILISED MATERJALIUURINGUD TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLIS	
<i>Enn Mellikov, Andres Öpik</i>	73
RAKENDUSI REAAL- JA HUMANITAARTEADUSTE SÜMBIOOSIST	
<i>Einar Meister, Jaan Penjam, Enn Tõugu</i>	77
ELEKTROONIKUTELT INIMESELE JA ÜHISKONNALE: EILSED MÕTTED TÄNA TEOKS, TÄNASED HOMME	
<i>Mart Min</i>	83
ARVUTITE JA REAALSE MAAILMA KOOSMÕJU UURIMISEST EESTIS	
<i>Leo Mõtus</i>	91
PÕLEVKIVI PÕLETUSTEHNIKAALASTEST UURINGUTEST	
<i>Arvo Ots</i>	97
EFEKTIIVSED VÄIKEKATLAD	
<i>Arvo Ots, Jaan Laid, Dmitri Nešumajev, Toomas Tiikma</i>	103
DIGITAALSÜSTEEMIDE DIAGNOSTIKA TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOLIS	
<i>Raimund Ubar</i>	107
AUTORITEST	114

TEHNIKATEADUSED

Saatesõna asemel

Käesoleva kogumiku ülesanne on anda ülevaade Eesti tehnikateadlaste viimase aja töödest ja nende uurimistöö tulemuste rakendamisest Eesti majanduses. Kogumikus käsitletakse peamiselt Eesti Teaduste Akadeemia Informaatika ja Tehnikateaduste Osakonna liikmete ja nendega seotud uurimiskollektiivide töid.

Kogumik on orienteeritud esmajoones tehnikaspetsialistidele-inseneridele, aga on kasulikuks materjaliks ka ettevõtjatele, poliitikutele jt. Artiklite valikul oli eesmärgiks tutvustada tehnikateadlaste olulisemaid saavutusi ning anda lühiülevaade valdkonna arengust. Ükski taoline kogumik ei suuda oma piiratud mahu tõttu kirjeldada kõiki tehnikateadlaste tegemisi Eestis. Kavas on jätkata analoogiliste kogumike väljaandmist ka edaspidi.

Tehnikateaduste üldiseks eesmärgiks on teaduslike uuringute abil uute teadmiste saamine tehnilike ja looduslike süsteemide, toodete või protsesside kohta ning nende teadmiste rakendamine uute või täiustatud omadustega süsteemide või toodete loomiseks, nende tootmisprotsesside arendamiseks, sh kvaliteedi, töökindluse, majandusliku efektiivsuse, konkurentsivõime, keskkonna- ja tarbijasõbralikkuse jne suurendamiseks.

Tehnikateadused hõlmavad nii alusuuringuid, mille eesmärgiks on uute teadmiste saamine ja selle kaudu eelduste loomine otseseks rakenduseks (sh uute toodete ja tehnoloogiate teoreetiliste aluste väljatöötamine, uute tehnomaterjalide, looduslike ja tehnilike süsteemide ning protsesside modelleerimine, nende vastastikuse mõju selgitamine jms), kui ka rakendusuringuid, mille eesmärgiks on tehnikavaldkonda kuuluvate süsteemide ja toodete või nende tootmisprotsesside ja kasutusala arendamine (sh uued arvutus- ja projekterimismeetodid, toetavad töö- või arenduskeskkonnad, riist- ja tarkvarasüsteemid jms).

Tehnikateaduste tulemuste rakendamine on vahetult seotud arendustegevusega, uute konkurentsivõimeliste toodete ja tootmistehnoloogiate arendamise ja evitamisega, mille kõrge tase ja hea korraldus on majanduse konkurentsivõime ja innovatiivse arengu eelduseks.

Kuni 1920. aastani puudus Eestis tehnikateaduste alal uuringuid korraldav keskus. Esimene asutus, mis eesmärgistas tehnikateadusala tegevuse, oli 2. aprillil 1924 Tallinna Tehnikumi juurde asutatud Riiklik Katsekoda (RK). RK moodustati kahe seni tegutsenud asutuse – Riigi Kesklaboratooriumi (asutatud 1919) ning Kaubandus- ja Tööstusministeeriumi juures asunud RK (asutatud 1923) baasil. Alates 1935. aastast tegutses Tartu Ülikooli juures tehnikateaduskond, mis liideti 1936. aastal vastasutatud Tallinna Tehnika-instituudiga. 1. jaanuarist 1938 nimetati Tehnikainstituut Tallinna Tehnika-ülikooliks (TTÜ). TTÜ alustas ehitus- ja mehaanika- ning keemia- ja mäe-teaduskondadega. TTÜ-ga liideti ka RK. Sellest ajast on tehnikateadused Eestis arenenud põhiliselt TTÜ juures.

Eesti Teadusfondi Nõukogu poolt heaks kiidetud teadussuundade ja -erialade klassifikaatori alusel on tehnikateaduste valdkond käesoleval ajal küllalt-

ki lai. Tehnikateaduste alla kuuluvad selle klassifikaatori alusel: materjali-teadus, mehaanika, mäendus, energeetika, keemiatehnika, bio- ja toiduainete tehnoloogia, ehitustehnika ja geodeesia, süsteemitehnika ja infotehnoloogia, masina- ja aparaadiehitus, põllumajandustehnika, elektrotehnika, biomeditsiinitehnika ning keskkonnatehnika.

TTÜ on käesoleval ajal Eesti peamine tehnikateaduste keskus. TTÜ-ga liideti 1990ndatel teadus- ja arendusasutuste staatuses rida endisi Eesti Teaduste Akadeemia instituute, nagu Küberneetika Instituut, Energeetika Instituut jt. See suurendas oluliselt TTÜ potentsiaali ja uurimistööde mahtu. Lisaks TTÜ-le ja eespool nimetatud teadusasutustele viiakse uuringuid tehnikateaduste valdkonnas läbi ka teistes Eesti teadusasutustes – Tartu Ülikoolis, Eesti Põllumajandusülikoolis jt teadus- ja arendusasutustes. Tehnikateadustega ja eriti arendustegevusega tegeletakse ka ettevõtetes. On oodata, et arendustegevuse maht Eesti ettevõtetes kasvab lähitulevikus oluliselt. Huvi kasvu teadustöö tulemuste evitamise vastu on praegu tunda ja majanduse edasise arengu kindlustamiseks peaks koostöö ettevõtete ja teadusasutuste vahel oluliselt suurenema.

17. mail 1985 asutati Eesti Teaduste Akadeemia Füüsika-Matemaatika ja Tehnikateaduste Osakonna (asutatud 1969) baasil iseseisev Eesti Teaduste Akadeemia Informaatika ja Tehnikateaduste Osakond, kelle põhiline missioon on kaasa aidata Eesti teaduse ning riigi sotsiaalsele ja majanduslikule arengule, sh teadmispõhise infoühiskonna arendamisele, toetada majanduse konkurentsivõimet ja innovatiivset arengut. Osakonna akadeemikud osalevad aktiivselt nii vahetus teadus- ja arendustöös kui ka teadusorganisatoorses tegevuses.

Antud kogumik on ette valmistatud Eesti TA Informaatika ja Tehnikateaduste Osakonna poolt.

Kogumikus on materjal esitatud autorite tähestikulises järjestuses.

Mitmete tehnikateadlaste uurimistööde tulemustega võib tutvuda Eesti TA ja TTÜ ühises eelretsenseeritavas ajakirjas Eesti TA Toimetised “Tehnikateadused”, mis ilmub alates 1996. aastast.

Rein Küttner

Eesti TA Informaatika ja Tehnikateaduste Osakonna juhataja
Tallinna Tehnikaülikooli professor

INTEGRAALNE FOTOELASTSUSMEETOD KLAASTOODETE KVALITEEDI KONTROLLIMISEKS

Hillar Aben, Leo Ainola, Johan Anton, Andrei Errapart

Tallinna Tehnikatülikooli Küberneetika Instituut

RESÜMEE

Artiklis kirjeldatakse lühidalt Küberneetika Instituudi fotoelastsuse laboratooriumis välja töötatud integraalset fotoelastsusmeetodit ja selle kasutamist klaastoodete jääkpingete mõõtmiseks.

SISSEJUHATUS

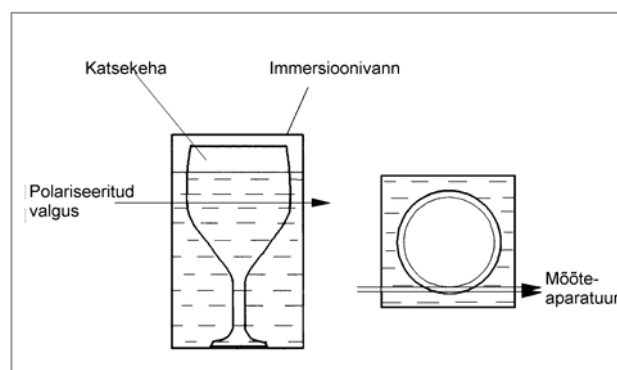
Klaastoodete kvaliteedi üheks oluliseks näitajaks on jääkpinged [1]. Soodsalt jaotatud jääksurvepinged võivad tõsta klaasi tugevust mitmeid kordi, samal ajal kui jääktõmbepinged klaastoote pinnal põhjustavad selle purunemise isegi õrna kriimustuse korral.

Fotoelastsusmeetodit, mis põhineb läbipaistvate materjalide muutumisel kaksikmurdvaks pingete mõjul, on kasutatud klaasi pingete mõõtmiseks juba üle poolteise sajandi. Kui klaasplaatide pingete mõõtmine on suhteliselt lihtne, siis keeruka kujuga klaastoodete puhul nagu joogiklaasid, kineskoobid, elektripirnid jne, on pingete määramine keerukas mitmel põhjusel (optiliste nähtuste keerukus, raskused mõõtmistulemuste interpreteerimisel). Viimasel aastakümnel on selleks uusi võimalusi avanud integraalne fotoelastsusmeetod.

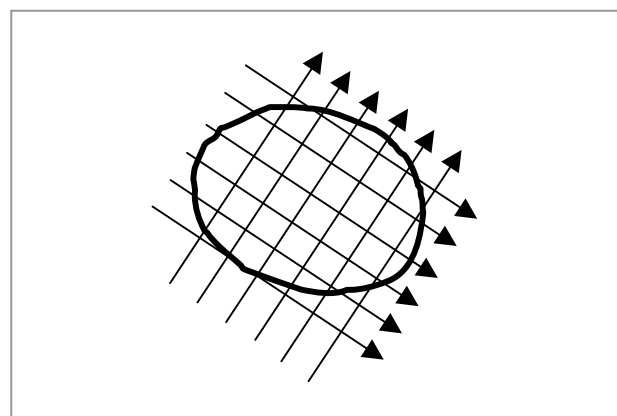
INTEGRAALNE FOTOELASTSUSMEETOD

Integraalse fotoelastsusmeetodi [2] kasutamisel asetatakse läbipaistev katsekeha immersioonivanni, et vältida valguse murdumist, ning suunatakse temast läbi polariseeritud valguse voog (joonis 1). Paljudel valguskiirtel mõõdetakse polarisatsiooni muutus, mis on tingitud katsekehas esinevast pingekaksikmurdvusest. Selle integraalse polarisatsioonoptilise informatsiooni põhjal on mitmetel juhtudel võimalik määrata katsekeha pingeolekut. Juhul kui katsekeha on telgsümmeetriline, piisab selle läbivalgustamisest ainult ühes suunas. Üldjuhul on vajalik katsekeha läbivalgustamine paljudes suundades (joonis 2).

Integraalse fotoelastsusmeetodi otseülesande lahendamiseks, st polarisatsiooni teisenduse määramiseks etteantud pingevälja puhul, võib kasutada Maxwelli võrranditest tuletatud fotoelastsusvõrrandeid [2].



Joonis 1.
Katseskeem.



Joonis 2.
Katsekeha läbivalgustamine paljudes suundades.

Integraalse fotoelastsusmeetodi pöördülesanne, mis seisneb mõõdetud polarisatsiooniteisenduste põhjal pingevälja arvutamises, on üldjuhul mittelineaarne. Selle põhjuseks on mittelineaarsed optilised nähtused, mis tekkivad mittehomoogeense kaksikmurdva keskkonna läbivalgustamisel [3, 4].

Probleem lihtsustub, kui katsekeha kaksikmurdvus on nõrk (nt katsekeha on lõõmutatud klaasist) või peapingete suunad on valguskiirel ligikaudu konstantsed (nt silindrilise kujuga joogiklaasid). Sel juhul on võimalik igal valguskiirel määrata isokliini parameeter φ (annab ligikaudselt keskmise peapinge suuna) ning optiline faasinihe Δ . Need suurused avalduvad pingekomponentide integraalidena järgnevalt:

$$\Delta \cos 2\varphi = C \int (\sigma_z - \sigma_x) dy, \quad (1)$$

$$\Delta \sin 2\varphi = 2C \int \tau_{zx} dy, \quad (2)$$

kus C on fotoelastsuskonstant ning σ_z , σ_x ja τ_{zx} on pingekomponendid valguskiire risttasapinnas.

Asjaolu, et integraalses fotoelastsuses saab mõõta pingevälja komponentide integraale, näitab, et sisuliselt on meil tegemist tomograafiaga [5], mis samuti põhineb välja integraalide mõõtmisel. Kui nn traditsiooniline tomograafia on skalaarvälja tomograafia, kus välja igat punkti iseloomustab skalaar (nt röntgenkiirte neelduvuse tegur), siis integraalne fotoelastsusmeetod on tensorvälja tomograafia, sest igat välja punkti iseloomustab pingetensor. Seetõttu on pingevälja tomograafia oluliselt keerukam traditsioonilisest tomograafiast [6].

TELGSÜMMEETRILISE PINGEOLEKU MÄÄRAMINE

On võimalik näidata, et integraalvõrrandid (1) ja (2) lubavad määrata telgpinge σ_z ja nihkepinge τ_{rz} jaotuse telgsümmeetrilises katsekehas [7]. Et määrata ka radiaalpinge σ_r ja rõngaspinge σ_θ , on vajalikud kaks täiendavat võrrandit. Nendeks on tasakaaluvõrrand

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ning nn üldistatud summareegel [8]

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \sigma_z - 2 \int \frac{\partial \tau_{zr}}{\partial z} dr + C. \quad (4)$$

Seega võib telgsümmeetrilise pingeoлеку määramist vaadelda hübriidmehaanika ülesandena, kus neljast

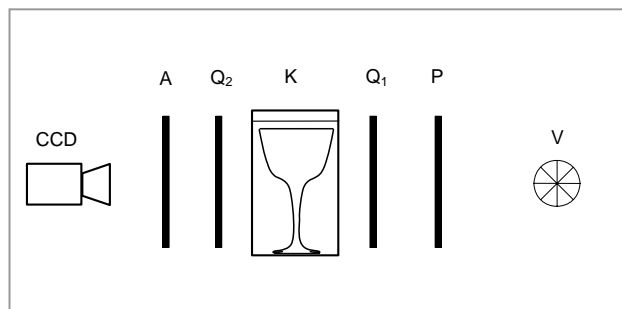
otsitavast pingekomponendist kaks määratakse otse katseandmetest ning kaks elastsusteooria seostest.

Kuivõrd paljud klaastooted omavad telgsümmeetrilist kuju, siis käesolevas artiklis piirdumegi peamiselt selle juhu vaatlemisega.

MÕÕTEAPARATUUR

Integraalses fotoelastsuses kasutatava polariskoobi skeem on joonisel 3 ning Küberneetika Instituudi fotoelastsuse laboratooriumi konstrueeritud automaatpolariskoobi AP-03 SM foto joonisel 4.

Polarisaatorit P ja esimest veerandlaineplaati Q_1 saab pöörata samm-mootorite abil, mis võimaldab automaatselt teostada mõõtmisi faasisammude meetodil [9]. Katsekehaga immersioonivann asetatakse



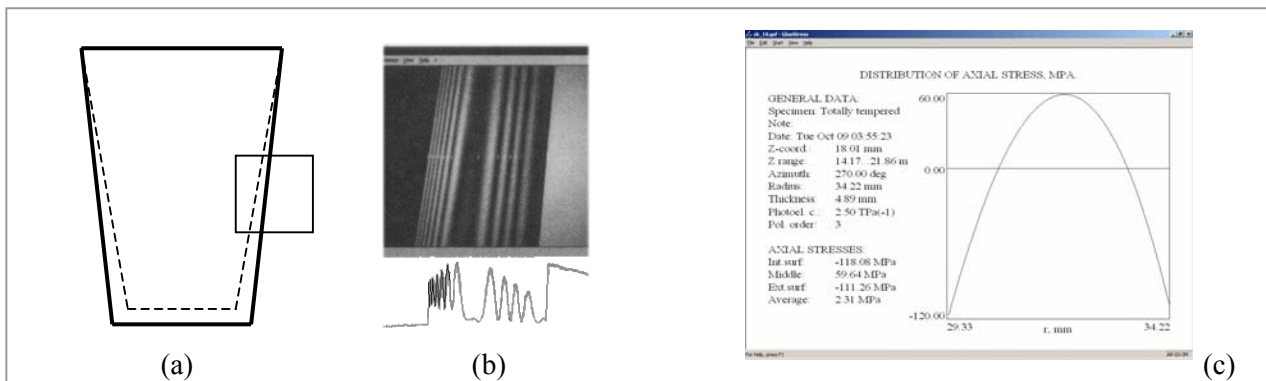
Joonis 3.

Polariskoobi skeem: V – valgusallikas, P – polarisaator, Q_1, Q_2 – veerandlaineplaadid, K – katsekeha immersioonivannis, A – analüsaator, CCD – videokaamera.



Joonis 4.

Automaatpolariskoop AP-03 SM.



Joonis 5.

Karastatud joogiklaasi geometria (a), füüsikaline ja digiteeritud interferentsribade kujutis (b) ning telgpinge jaotus läbi klaasi paksuse (c).

koordinaatseadmesse, mis võimaldab teostada fotoelastsusmõõtmisi katsekeha erinevates piirkondades. Mõõtesüsteemi oluliseks osaks on tarkvara Glas-Stress. Selle abil leiab polariskoop automaatselt katsekeha pinnad, digiteerib interferentsribad ja määrab nende täpsed asukohad, nummerdab interferentsribad ning arvutab pingevälja [10, 11].

Polariskoobi käsitlemine ei eelda mingeid teadmisi fotoelastsusmeetodi kohta ning teda võib kasutada tehases tootmisliini vahetus läheduses.

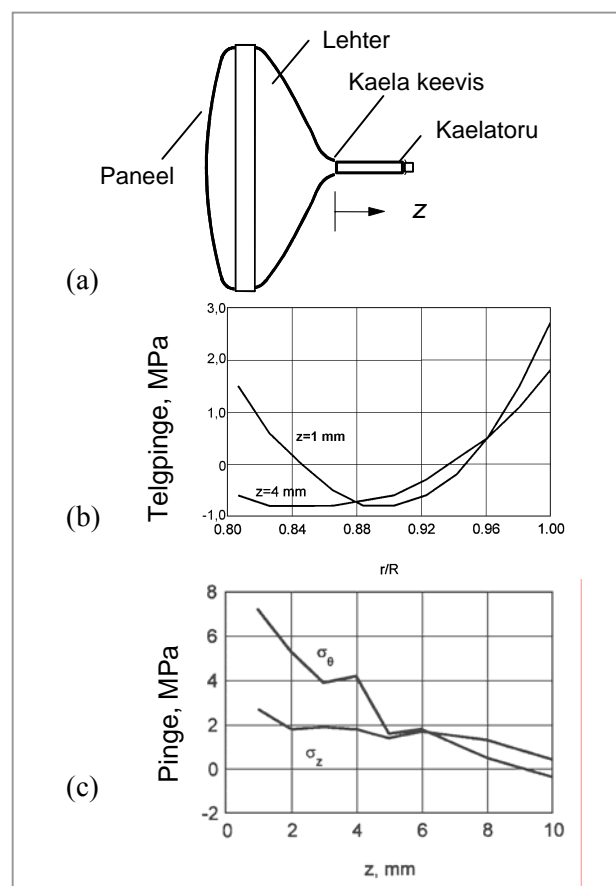
RAKENDUSNÄITED

KARASTATUD JOOGIKLAAS

Joogiklaaside purunemiskindluse tõstmiseks kasutatakse tänapäeval nende karastamist, millega luuakse klaasi pindadele suured survepinged (kuni 150 MPa). Vaadeldaval juhul on polariskoopi juhtiva arvuti kuvarekraanil näha interferentsribade pilt (joonis 5 b). Interferentsribad digiteeritakse ning selle informatsiooni põhjal arvutatakse pingeaotus (joonis 5 c).

KINESKOOBI KAELATORU

Kineskoop on keerukas klaastoode, mis koosneb kolmest osast (joonis 6 a): paneel, lehter ja kaelatoru. Need osad on ühendatud keevitamisega. Kuna kineskoobi osad on valmistatud erinevatest klaasidest, siis kaasnevad keevitamisega jääkpinged, mis on eriti kriitilised kaelatoru keevise lähedal. Joonisel 6 b ja c on toodud jääkpingete jaotus mõnedes kaelatoru lõigetes ja selle pinnal.



Joonis 6.

Kineskoobi konstruktsioon (a) ja pingeaotus mõnedes kaelatoru lõigetes (b) ning välispinnal (c).

ASTMELISELT MUUTUVA
MURDUMISNÄITAJAGA KLAASKIU TOORIK

Jääkpingete jaotus klaaskiu toorikus lubab hinnata sellest valmistatava klaaskiu omadusi. Astmeliselt muutuva murdumisnäitaja puhul on pingejaotuse määramine seotud kolme probleemiga: 1) kuidas kirjeldada adekvaatselt pinge astmelist muutumist kihtide eralduspinnal, 2) kuidas arvestada valguse murdumist kihtides, 3) kuidas määrata kõiki pingekomponente (integraalne fotoelastsusmeetod annab otseselt vaid telgpinge σ_z jaotuse). Neid probleeme arvestav pinge mõõtmise metoodika on kirjeldatud töös [12].

Joonisel 7 a on näidatud ühe astmeliselt muutuva murdumisnäitajaga klaaskiu tooriku murdumisnäitaja profiil. Telgpinge jaotus, mis on määratud diskreetse Abeli inversiooni abil, on toodud joonisel 7 b. Joonisel 7 c näidatud telgpinge jaotus, mille puhul on kasutatud tükati polünoomiaalset aproksimeerimist, kirjeldab pinge astmelist muutumist adekvaatselt. Joonisel 7 d on toodud kõikide pingekomponentide jaotus, mis on määratud hübriidmehaanika algoritmi abil [12].

KIKILIPS-TÜÜPI KLAASKIU TOORIK

Kuna klaaskiu toorikus teljesuunaline pingegradiend puudub, siis puuduvad selles ka nihkepinged ning valemi (1) võib kirjutada kujul ($\varphi = 0$)

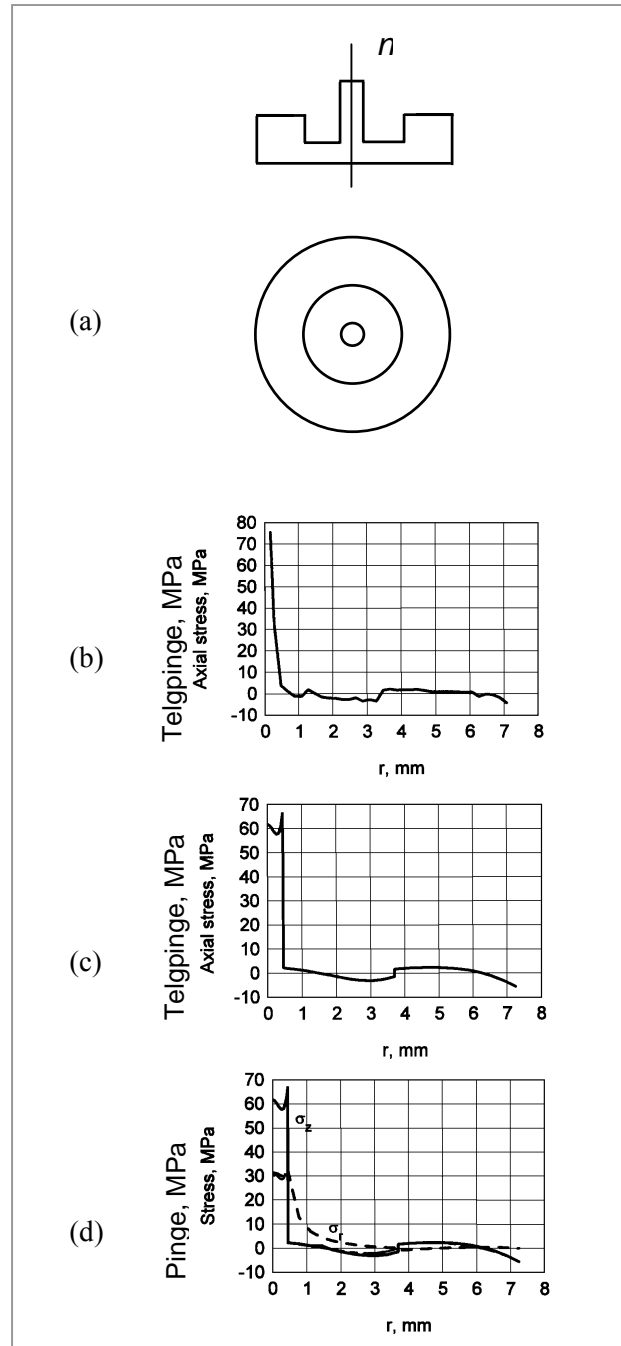
$$\Delta = C \int \sigma_z dy. \quad (5)$$

Seega vaadeldaval juhul taandub pingevälja tomograafiline määramine skalaarvälja tomograafia ülesandeks. Joonisel 8 on toodud kikilips-tüüpi (bow-tie) klaaskiu tooriku põiklõige ja telgpinge jaotus.

Vaadeldaval juhul kasutati tomograafilistel fotoelastsusmõõtmistel 60 erinevat läbivalgustamise suunda ning iga suuna puhul registreeriti optiline faasinihe 140 punktis.

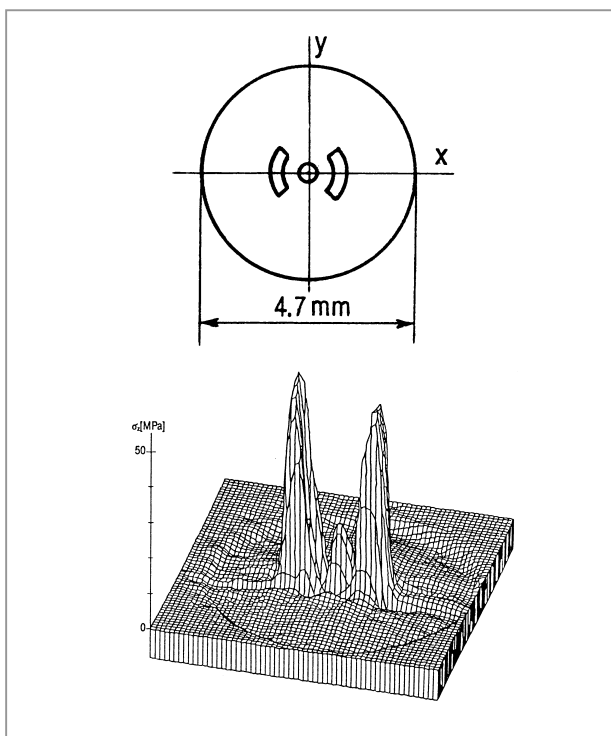
KOKKUVÕTE

Integraalne fotoelastsusmeetod on osutunud efektiivseks vahendiks jääkpingete mõõtmisel keeruka kujuga klaastoodetes. Kübermeetika Instituudi fotoelastsuse laboratooriumis välja töötatud klaasi jääkpingete mõõtmise tehnoloogia (automaatpolariskoop koos tarkvaraga) on erinevate klaastoodete kvaliteedi kontrollimisel kasutusel mitmetes tuntud klaasifirmades Hollandis, Itaalias, Jaapanis, Prantsusmaal, Saksamaal, Türgis ja USA-s.



Joonis 7.

Astmeliselt muutuva murdumisnäitajaga klaaskiu tooriku murdumisnäitaja profiil (a), diskreetse Abeli inversiooniga (b) ja tükati polünoomiaalse aproksimeerimisega (c) määratud telgpinge jaotus, ning kõigi pingekomponentide jaotus (d).



Joonis 8.

Telgpinge jaotus kivilips-tüüpi klaaskiu toorikus.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Scholze, H. *Glass. Nature, Structure and Properties*. Springer, New York, 1991.
2. Aben, H. *Integrated Photoelasticity*. McGraw-Hill, New York, 1979.
3. Aben, H., Josepson, J. Strange interference blots in the interferometry of inhomogeneous birefringent objects. *Appl. Optics*, 1997, 36, 7172-7179.
4. Aben, H., Ainola, L. Interference blots and fringe dislocations in optics of twisted birefringent media. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, 15, 2404-2411.
5. Herman, G. T. *Image Reconstruction from Projections*. Academic Press, New York, 1980.
6. Aben, H. Tomographie optique des champs de contraintes. *Rev. Franç. Méc.*, 1989, 1, 121-130.
7. Aben, H., Guillemet, C. *Photoelasticity of Glass*. Springer, Berlin, 1993.
8. Ainola, L., Aben, H. Hybrid mechanics for axisymmetric thermoelasticity problems. *J. Thermal Stresses*, 2000, 23, 685-697.
9. Aben, H., Ainola, L., Anton, J. Half-fringe phase-stepping with separation of the principal stress directions. *Proc. Eston. Acad. Sci. Eng.*, 1999, 5, 198-211.
10. Anton, J. Automatic measurement of residual stresses in tempered tumblers. *Proc. 18th International Congress on Glass*. San Francisco, 1998, vol. A 11, 9-13, CD-ROM.
11. Aben, H., Ainola, L., Anton, J. Integrated photoelasticity for nondestructive residual stress measurement in glass. *Opt. Lasers Eng.*, 2000, 33, 49-64.
12. Aben, H., Ainola, L., Anton, J., Errapart, A. Détermination des contraintes dans les préformes optiques à saut d'indice. *Colloque "Photomécanique 2001"*. Poitiers, 2001, 71-78.

EESTI MÄENDUS

Alo Adamson, Enno Reinsalu

Tallinna Tehnikaülikooli mäeinstituut

Mäendus on õpetus maavarade uurimisest ja kaevandamisest. Kuigi mäendus tekkis ja arenes meil koos põlevkivi kasutuselevõtmisega, ei ole põlevkivi Eesti mäenduse ainus objekt. Meil on ametlikult 12 maavara¹ ja vähemalt 800 maardlat kogupindalaga üle 6000 km². Umbes sama palju on teada kaevandamiskohtasid – kaevandusi, karjääre, turbavälju, kivimurde, liiva- ja kruusauke. Kuigi osa suurtest maardlatest kattuvad, leidub maavarasid enamal kui 10 %-l Eesti maast.

Üle 200 ettevõtte on ühe oma tegevusena märkinud maavarade kaevandamise. Umbes sama palju on välja antud maavarade kasutamise ja kaevandamise lubasid. Tegutsevate mäeettevõtete² poolt kaevandatava ala kogupindala on üle 150 km² ehk 0,3 % Eesti maast. Allmaa- ja vaalkaevandamisega³ kaevandatud alade pindala on sellest kolm korda suurem ehk ligikaudu 1 % Eesti pindalast. Sellele lisanduvad ammendatud ja hüljatud turbaväljad, mille kohta meil puuduvad täpsemad andmed.

Eesti mäenduse tekke alguses oli teadusharu keskuks Tallinna Tehnikaülikool. Teise maailmasõja järel mäendus hajus ja jaotus ülikoolide ning tööstusinstituutide vahel. Tallinna Polütehniline Instituut spetsialiseerus, peamiselt põlevkivitööstuse vajadusi arvestavalt, kihtmaardlate allmaakaevandamise tehnoloogide õpetamisele. Maavarade uurimise tehnikat ja tehnoloogiat õpetati vähesel määral Tartu Ülikoolis, loodusteadusliku geoloogia kõrvalt. Maavarade uurimine oli liidulise alluvusega geoloogia-teenistuste ja maavarasid kaevandavate ettevõtete käsutuses, kes hankisid töid ja spetsialiste väljast-

¹ Ametlikult käsitletakse maavarana ainult tõestatud kasulikkusega kivimeid, mineraale, setendeid, vedelikke ja gaase.

² 2001. a kehtis 213 mäetööde litsentsi, neist 37 turba tootmiseks ja 5 muda ammutamiseks.

³ Vaalkaevandamine – avakaevandamisviis, mille käigus katend tõstetakse vaaludena kaevandatud alasse. Kasutatakse põlevkivi ja kasutati fosforiidi kaevandamisel.

poolt Eestit. Mäeettevõtete tehnouuringuid ja projekte tegid valdavalt eestivälised, osaliselt ka kohapeal paiknevad tööstusinstituudid ja nende allasutused.

Viimase pooleteise aastakümne vältel oli Eesti sunnitud kohandama oma mäeteaduse uutele tingimustele, ühendama maavarade uuringu, mäetehnika, mäendusliku keskkonnahoiu ja mäemajanduse ning viima need vastavusse kohalike olude ja muutunud majandusega.

MAAVARADE UURING

on inseneriala, mis rakendusgeoloogia haruna kuulub mäenduse alla, haakudes seejuures majandusega. Eesti sai NSV Liidu pärandina suure hulga maardlaid, mille kaevandamisväärsust oli hinnatud plaanimajandusliku suurtööstuse seisukohalt ja maavara omadusi oli uuritud üsna vananenud kasutustehnoloogiale nõuetele vastavalt. Praegusi ja lähituleviku vajadusi silmas pidades on meie maavarad üleuuritud. Nagu illustreerib joonis 1, ületab paljude maavarade arvestatav kogus kümneid kordi mõistliku kasutamise piiri. Maailmas on tavaline, et varu hinnatakse mitte kauemaks kui 20 aastaks. Seejuures pole enamiku Eesti maardlate kaevandamisväärsus kaasaegsetes majandustingimustes tõestatud.

Üks esimesi maavarade kaevandamisväärsuse küsimusi, mis TTÜ mäeinstituudis üleminekuperioodil lahendati, oli fosforiidi keskkonnaohutu ja majanduslikult põhjendatud kaevandamise võimalikkus ning sellega seonduv fosforiidi kui maavara kaevandamisväärsuse hinnang. Uuring näitas, et kaevandamine oleks tulus, kui fosfaattoorme toimeaine hind oleks maailmaturul vähemalt 250 USD/t. Seni on see 100 USD/t piirimail, seega palju madalam kui oleks vaja eesti fosforiidi kaevandamiskulu katmiseks. On vähe tõenäoline, et fosfaattoorme hind tõuseb kunagi meie jaoks sobivale tasemele. Sellest sündis järeldus, et eesti fosforiidi kaevandamine ei oma praegu ega ka prognoositavas tulevikus mõtet. Mäenduse seisukohalt fosforiit ei ole maavara.

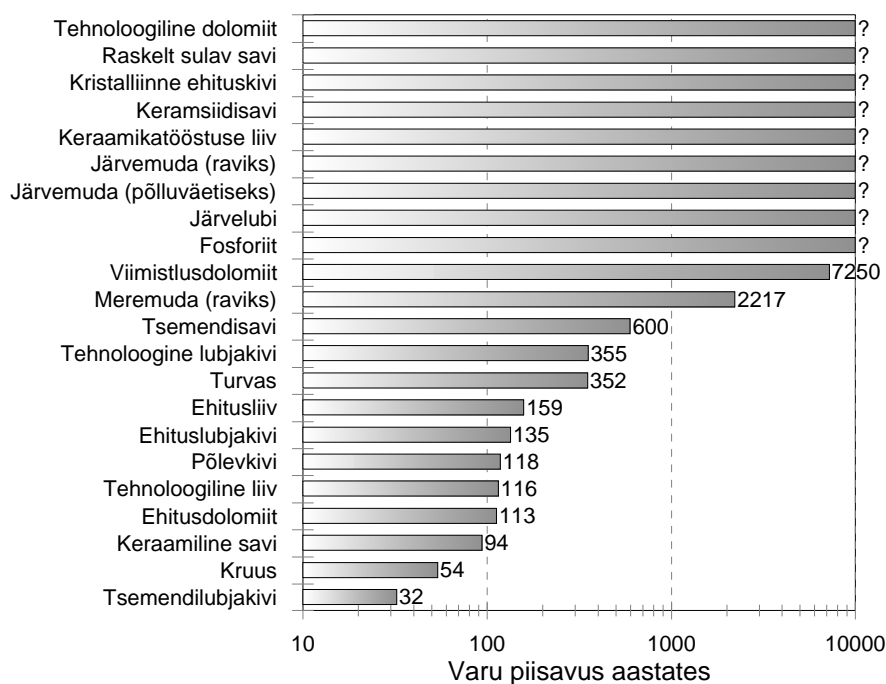
Samal ajal uuriti TTÜ mäeinstituudis ka Maardu graniidimaardlat ja visandati selle hõlvamise põhimõtteline kava. Parim lahendus oleks selle 300 m sügavusel lasuva graniidikeha polüfunktsionaalne kasutamine. See tähendab, et pärast ehituskivi kaevandamist rajataks sinna allmaamahuteid ja -ladusid, jäätmeoidlaid jms. Seoses mõningate viimase aja logistiliste ja energeetiliste projektidega Maardu graniidikeha kasutamise aktuaalsus kasvab.

TTÜ mäeinstituudi uuringute oluliseks tulemuseks oli põlevkivi kaevandamisväärsuse (aktiivsuse) piiritingimused. Lähtuti olemasolevate elektrihaamade vajadustest ja aksioomist, et põlevkivi on kasulik seni, kuni selle kaevandamine tuleb odavam kui sisseveetav kütus. Kui varem olid põlevkivi varu kriteeriumiteks kihindi paksus ja kütteväärtus, siis uueks ja originaalseks kriteeriumiks võeti energiatootlus, mõõtühikuga GJ/m² (ligikaudu

10 MWh/m²). Tõestati, et Eesti tingimustes on põlevkivi kaevandamisväärsus, kui kihindi energiatootlus on üle 35 GJ/m² ja põlevkivi on maavara, kui kihindi energiatootlus on vähemalt 25 GJ/m². Kuna varem oli põlevkivi varu arvestatud NSV Liidu loodeosa kütusevajadusest lähtuvalt, vähenes Eesti põlevkivivaru peaaegu 2 mld t võrra.

2001. aastal muutus aktuaalseks pae- (lubjakivi- ja dolomiidi) ning liivamaardlate piisavus ja nende maa kasutamise majanduslikkus. Ehitamiseks on vaja nii mineraalseid ehitusmaterjale kui ka maad.

Tihedalt asustatud piirkondades, eriti Tallinna lähialal, põrkuvad vastandlikud vajadused kokku. Kuna maardlad on hinnatud vananenud tingimuste alusel, arvestamata seejuures veoteid ning tarbijate paiknemist, puuduvad seni nii kompromiss kui ka optimaalsed lahendused.



Joonis 1.

Eesti maavarade piisavuse diagramm 2001. aastal arvel olnud aktiivse varu ja kasutatud varu jagatisena (kasutatud varu on kaevandatud ja kaduma läinud varu summa).

Maavarade uuringu teoreetilisi ja põhimõttelisi küsimusi on mäeinstituut lahendanud peamiselt Keskkonnaministeeriumi toel ja tellimusel. Selleks, et tulevased geotehnoloogia spetsialistid saaksid selle küsimusteringi lahendamiseks piisava ettevalmistuse, loodi TTÜ-s uus rakendusgeoloogia õppeaine – maavarade uurimine, mille sisu toetub matemaatilisele statistikale, majandusele ning tarbijate tingimuste hindamisele ja arvestamisele.

MÄETEHNIKA

on õpetus maavarade kaevandamise tehnoloogiast ja käsitleb selle kõiki etappe maardlate avamisest kuni kaevanduse sulgemiseni.

Maardla avamine algab kaevanduse projekteeri-

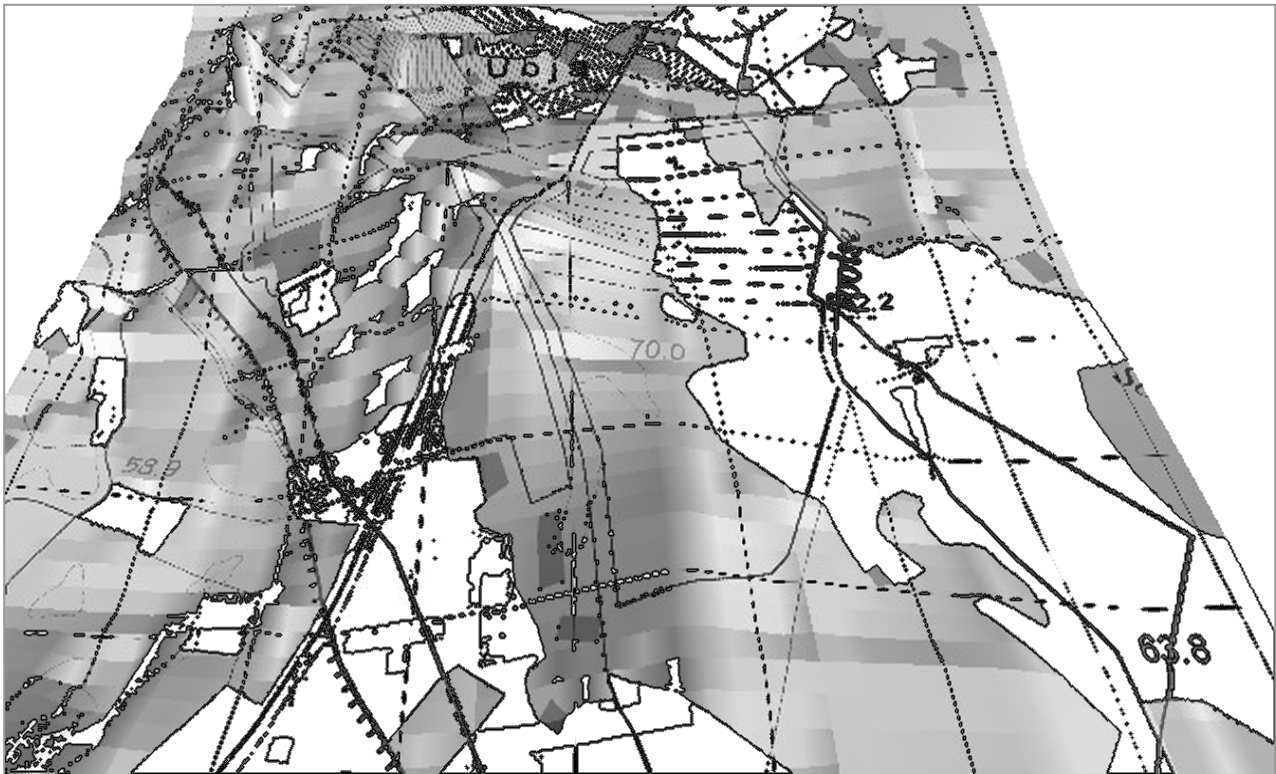
misega, mäettevõtte projekteerimine – maavara kaevandamisloa hankimisega. TTÜ mäeinstituut on pilootprojektide najal kujundanud välja selle tehnoloogilis-õigusliku protsessi meetodilised alused, mida nüüd kasutavad kõik Eesti mäebürood ja -ettevõtted. Mäeinstituudi suuremad pilootprojektid on olnud Paekivitoodete Tehase OÜ ja Kunda Nordik Tsemendi Ubja põlevkivikaevandus. Ubja karjääri projekt on edasi arendatud detailprojekti tasemeni. Mõningaid illustratsioone sellest näeb joonistel 2 ja 3.

Mäetehniliste uuringute peamine koostööpartner on olnud ja on jätkuvalt AS Eesti Põlevkivi. Uuringusuunad on traditsiooniliselt käsitletud kõiki tehnoloogilisi protsesse. Kaevanduste sulgemise ja kaevandatud alade rekultiveerimise alal on rohkem abi vaja läinud väiksematel mäettevõtetel ja keskkonnanahooldega tegelevatel asutustel. Kõverdama turbarabale Läänemaal tehti rekultiveerimise näidisprojekt.

MÄENDUSLIK KESKKONNAHOID

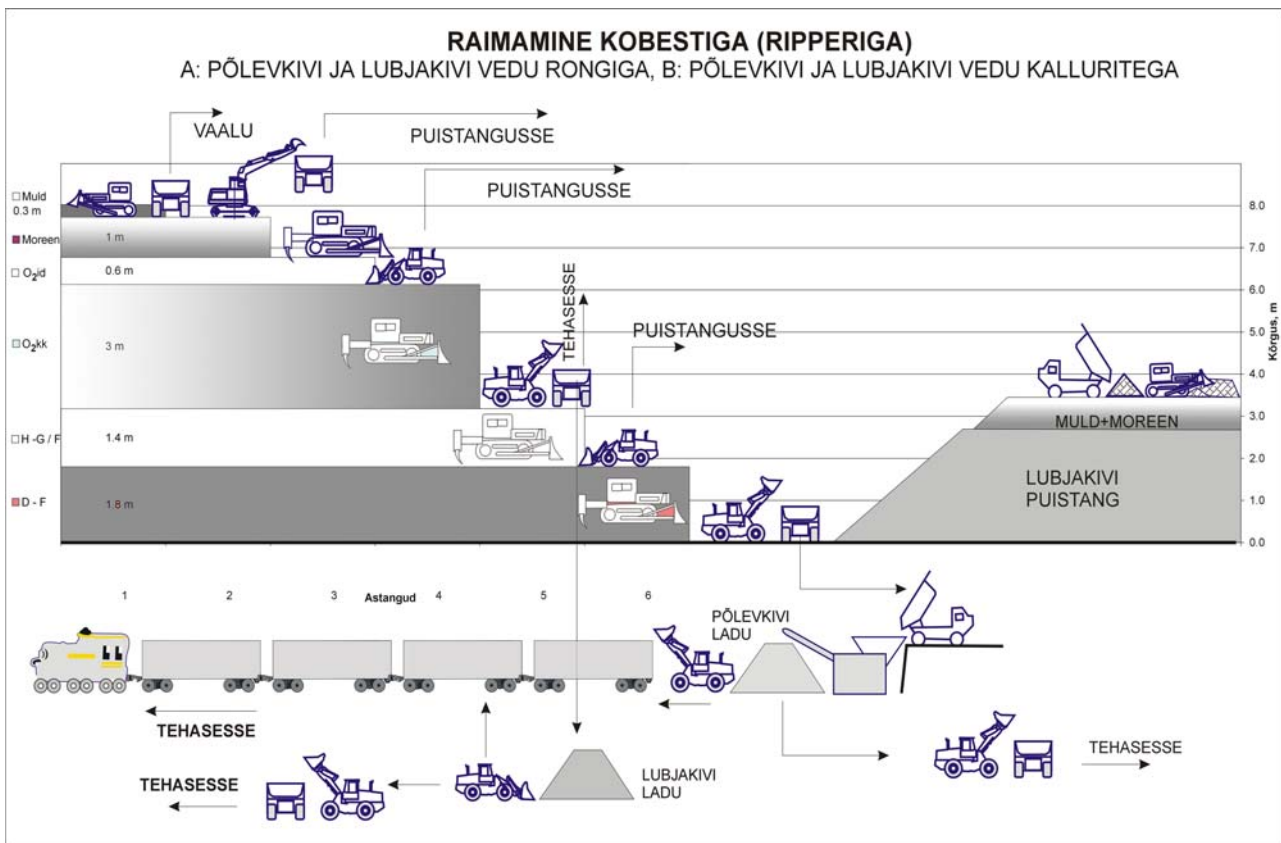
on suunatud nii maavarade kaevandamise vahetu kui ka hilise keskkonnamõju juhtimisele.

Vahetu mõju minimeerimise hea näide on avakaevandamise tehnoloogia, mille kohaselt töötab Narva põlevkivikarjääri Viivikonna jaoskond Kurtina maastikukaitseala naabruses. Ideeks on kuivendava mõju vähendamiseks rajatav veetõke, mis moodustatakse maavara avamise käigus. Projekt valmis 1997. aastal koostöös AS Eesti Põlevkivi ja AS Mavesiga. Keskkonnaekspertiisi tegi mäendusliku keskkonnamõju hindamisele spetsialiseerunud TPÜ Ökoloogia Instituudi Kirde-Eesti osakond. Tänu projekti edukale startimisele on lootus kaevandada kuni 10 mln t väga kõrge kvaliteediga põlevkivi varu alal, kus tavakaevandamine oleks tekitanud keskkonnaprobleeme. Tallinna linna piires ehituslubjakivi kaevandava ettevõtte Paekivitoodete Tehas OÜ mäetööde mõju



Joonis 2.

Ubja karjääri paiknemist demonstreeriv 3D pilt Ingo Valgma doktoriväitekirjast.



Joonis 3.

Kaevandamise tehnoloogia skeem, mis visualiseerib projektarvutusi. Ingo Valgma doktoriväitekeri.

likvideerimiseks loodi kaevise löökpurustamise meetod, mille kohta saadi Eesti patent EE03218 B1.

Mäetööde hiline mõju võib avalduda hulga aastaid pärast mäetööde lõppu. Nähtused, mis ilmnevad kaevandatud aladel, võivad osutada probleemseteks mitte ainult seetõttu, et neid ei osatud ette näha, vaid ka seepärast, et selleks ajaks on kaevandav ettevõtte lõpetanud tegevuse ja kaotanud vastutuse.

Sellesi-sulise uuringu (ETF grant 3403) tulemused ja soovitusel avaldati monograafias Kaevandatud maa (vt kasutatud kirjanduse loetelu). Erilist huvi peaksid pakkuma soovitusel neile kinnistute ja maavalduste omanikele, kelle kasutuses on 300 km² altkaevandatud maad Ida-Viru, Harju ja Põlva maakonnas.

Olenevalt allmaakaevandamisel kasutatud tehnoloogiast ja kaevandamise sügavusest tuleb sellisel maal arvestada, et maa võib olla langetatud, püsiv, stabiilne või kvaasistabiilne. Vastavalt sellele võib maa käituda erinevalt ja selle ignoreerimine võib tekitada õnnetuid ootamatusi nii ehitamisel kui maaviljelusel. Parimaks indikaatoriks otsuste langetamisel kaevandatud alade suhtes on TTÜ mäeinsituudis koostatud digitaalsed kaevandatud alade kaardid, mida oma planeeringutes on juba kasutanud Ida-Viru maakonnavalitsus. Detailsemalt saab altkaevandatud maad hinnata vaid kinnistute kaupa, arvestades nii maapõue omadusi ja kaevandamise omapära selles konkreetses kohas kui ka kinnistu sihtotstarvet. Sedalaadi ekspertiise saab teha vaid erialaste teadmistega geotehnoloog.

MÄEMAJANDUS

käsitleb kaevandamist kui maavara kaubastamist. Mäemajandusega liitub mäeõigus.

Mäeinstituudi suuremad tööd sellel alal on olnud mitmel tasandil tehtud tasuvusuuringud, prognoosid ja arengukavad. Põlevkivi kaevandamise ja kasutamise tasuvusuuringuid on TTÜ mäeinstituut teinud iseseisvalt ja koos kaasosalistega mitmele sise- ja välismaisele suurettevõttele. Vastavalt lepingutingimustele ei kuulu nende projektide maht ega üksikasjad lähemale tutvustamisele. Tasuvusuuringute metoodika aluseks on ettevõtte majandustegevuse bilanssi modelleeriv programmide pakett, mille lähteandmeteks on geoloogiliste uuringute tulemused ja kaevandamise tehnoloogilised variandid. Metoodika põhivõtete omandamine mahub geotehnoloogia magistriõppe raamidesse.

Mäeõigus on klassikaline õpetus ühiskonna, maaomaniku ja mäetöösturi vaheliste suhete õiguslikust reguleerimisest. Eelmine riigikord, kus kõik eelmainitud isikud olid fiktiivsed, sellist õpetust ei vajanud ega pidanud vajalikuks ka õpetada.

Tulemuseks on lünn varasemal ajal hariduse saanud erialainimeste teadmistes. Mäeinstituut on osalenud kogu uue mäendusala seadusandliku ja normatiivdokumentide paketi loomisel ja jätkab tööd selle arendamisel.

KASUTATUD KIRJANDUS

Adamson, A. Brekage of oil shale by mining. *Oil Shale*, 1998, 15, 2, 186-205.

Adamson, A. jt. Sustainable phosphate rock mining. *Proc. Eston. Acad. Sci. Eng.*, 1997, 3, 1, 13-22.

Reinsalu, E. Criteria and size of Estonian oil shale reserves. *Oil Shale*, 1998, 15, 2, 111-133.

Reinsalu, E., Toomik, A., Valgma, I. *Kaevandatud maa*. Tallinn: TTÜ mäeinstituut, 2002. 97 lk.

Valgma, I. *Geographical information system fo oil shale mining - MGIS*. TTÜ Thesis on Power Engineering, Electrical Engineering, Mining Engineering D15. Tallinn, 2002.

MEHAANIKA – LÕPUTU HULK UUSI PROBLEEME

Jüri Engelbrecht

Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituut

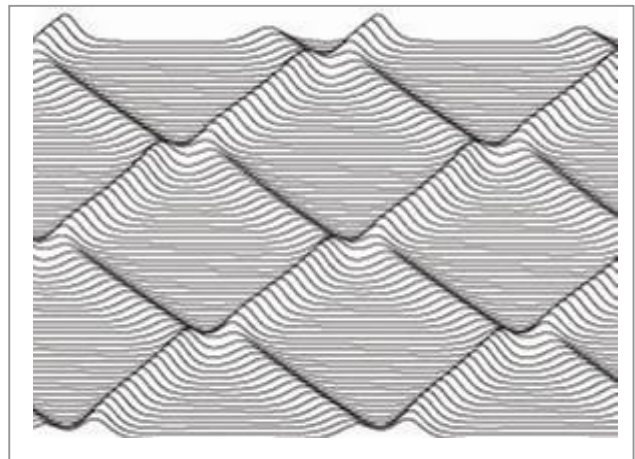
Tänapäeva mehaanikauuringud on seotud põnevate probleemidega ning tundub, et tegemist on Pandora laekaga, mille rikkus ikka ja jälle üllatusi pakub. Mehaanika põhiseoste ja meetodite varasalg on olnud hindamatuks abimeheks naaberdistipliinide väljakujunemisel. Alljärgnevalt on lühidalt kirjas ideed ja tulemused autori poolt juhitud uurimisgruppide tööst Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituudis.

Pikem uuringute ajalugu on leidnud kirjeldamist varem [1], siin saab vaid paari põnevat probleemi lahata. Ometi tuleb alguses üldist tausta kirjeldada. Viimasel poolsajandil on kõigi mehaanika jäävuseaduste, formalismide, üldistuste jm kõrval esile kerkinud üks oluline võtmesõna – “mittelineaarsus”. See aditiivsuse hülgamist iseloomustav mõiste on rikastanud oluliselt arusaamist füüsikalistest protsessidest. Solitoni (üksiklaine) avastamine ja kolme keha (Päike, Maa, Kuu) liikumisülesande lahendamine on olnud aluseks mittelineaarsetele dünaamikale ja nüüd mõistame, mis on kaos, fraktal, perioodi kahendumine jne, jne.

On hea meel, et Nikolai Alumäe rajatud Küberneetika Instituudi mehaanikaosakond oli teadusmõtete arengu mõttes laia maailmaga samal teel. Mittelineaarsete lainelevi alased uuringud intensiivistusid viimase kümnendi jooksul. Mõnedki kokkuvõtted pärinevad sellest perioodist [2, 3]. Et uuringuid tõhustada, tekkis idee kõik sellelaadsed uuringud Eestis ühendada sünergeetiliseks tervikuks – Mittelineaarsete protsesside analüüsi keskuseks (Centre for Nonlinear Studies – CENS). Keskus tegutseb TTÜ Küberneetika Instituudi juures ning Kubi vastavate uurimisgruppide kõrval haarab ka mereteadust (Eesti Mereinstituudi üks rühm), signaalitöötlust (TTÜ biomeditsiinitehnika keskuse üks rühm) ja matemaatikat (TÜ puhta matemaatika instituudi geometria õppetool). CENSil on Rahvusvaheline nõukoda tuntud teadlastest ja tema aastaaruanded on aadressil <http://cens.ioc.ee> kergesti saadaval. Haridus- ja Tea-

dusministeerium tunnistas novembris 2002 CENS-i üheks teaduse tippkeskuseks Eestis ning korralisel evalvatsioonil said põhirühmad samuti kõrged hinnangud.

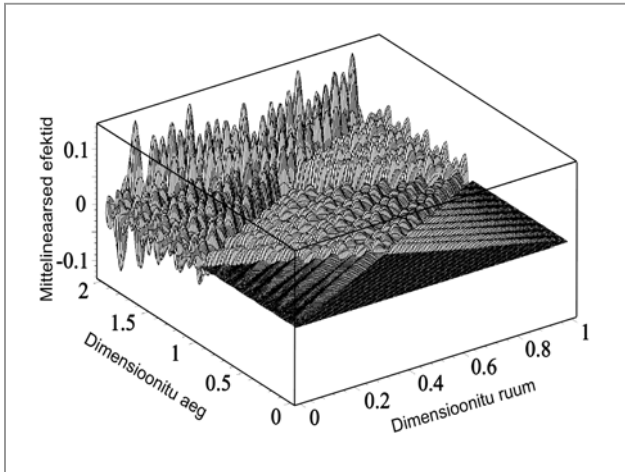
Nüüd aga probleemidest ja tulemustest. Solitonid teatavasti on ühed põnevad lained ning väärivad tähelepanu nii oma füüsikalise sisu kui ka lahendusmeetodite elegantsiga. Lained vee pinnal, lained disperseeruvate omadustega materjalides (sulamid), jm kuuluvad siia klassi. Me oleme avastanud nn peidetud (virtuaalsed) solitonid [3], mis lisajõudude mõjul võivad võimenduda, oleme näidanud, millised on trajektoorie interaktsioonimustrid klassikalises mudelülesandes [5]. Oleme tuvastanud solitonide tekkemehhanismi keeruka mittelineaarsete potentsiaali ja kõrgemat järku dispersiooni korral. Joonis 1 kujutab ühte huvitavat solitonide võimendumisprotsessi, kus jõuvälja mõjul solitonide jada asemel levivad vaid üksiksolitonid. Õnnestunud on näidata, millised on kahedimensionaalsete solitonide interaktsioonil



Joonis 1.

Solitonide formeerumine jõuväljas; horisontaalteljel – ruumikoordinaat, vertikaalteljel – aeg, profiilid erinevatel ajahetkedel näitavad solitonide levi ja interaktsiooni.

tekkivate interaktsioonisolitonide omadused [6] ja kuidas lahendada pöördülesannet (teades interaktsioonimustrit määrata lainete amplituudid ja kiirused). Viimane probleem seob meid selgelt Eesti Me-reinstituudi uuringutega.

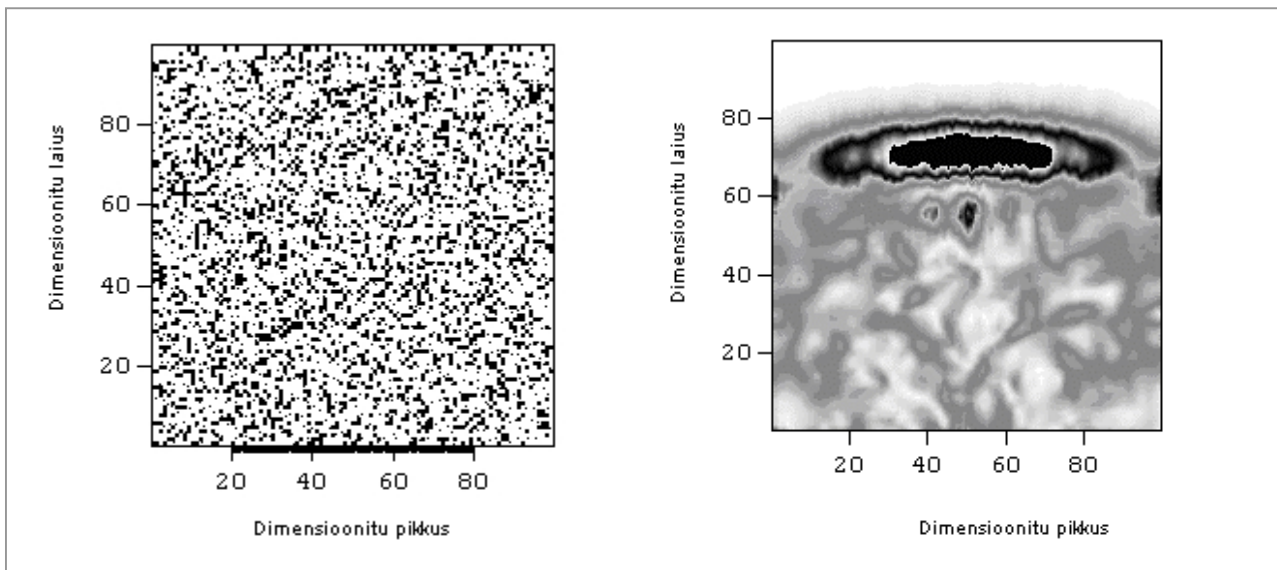


Joonis 2. Teise harmooniku käitumine kahe harmoonilise laine interaktsioonil.

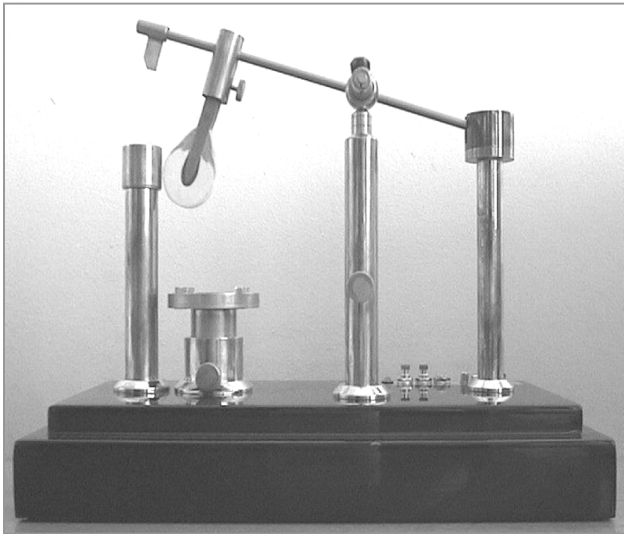
Me oleme koostanud algoritme materjalide omaduste akustodiagnostikaks [7, 8]. Uudne meetod, mis põhineb kahe sondeeriva laine interaktsiooni mõõtmisel, avab täiesti uued võimalused akustodiagnostikaks keerulise struktuuriga materjalide puhul. Joonis 2 näitab, kuidas areneb teine harmoonik kahe harmoonilise laine interaktsioonil (alghetkel eksisteerib vaid esimene harmoonik).

Tänapäeva materjalid on tihti iseloomustatud mikrostruktuuri ja faasiüleminekutega. Mikrostruktuuri modelleerimiseks on kasutatud sisemuutujate formalismi [9], faasiüleminekute mehhanismi iseloomustamiseks aga kontaktmuutujaid [10], mis täpsemini kui teised tuntud meetodid kirjeldavad termodünaamikat faasi piiri vahetus läheduses. Numbriline meetod paistab silma oma täpsusega [11] ja laiema kasutusvaldkonnaga – rakendus mikrostruktuuriga materjalide puhul (“functionally graded materials”) annab häid tulemusi [12]. Lainevälja ebaregulaarsused on selgelt tuvastatavad, nagu demonstreerib joonis 3.

Oleme uurinud koostöös Tallinna Klaverivabrikuga klaverihaamrite dünaamikat. Uus vilthaamri matemaatiline mudel [13] ning originaalne katseseade [14] (joonis 4) lubavad määrata klaverihaamrite karakteristikuid (joonis 5). Tulemused on äratanud suurt huvi.



Joonis 3. Lainelevi mikrostruktuuriga keskkonnas: vasakul – materjali jaotus, paremal – pikilaine väli.



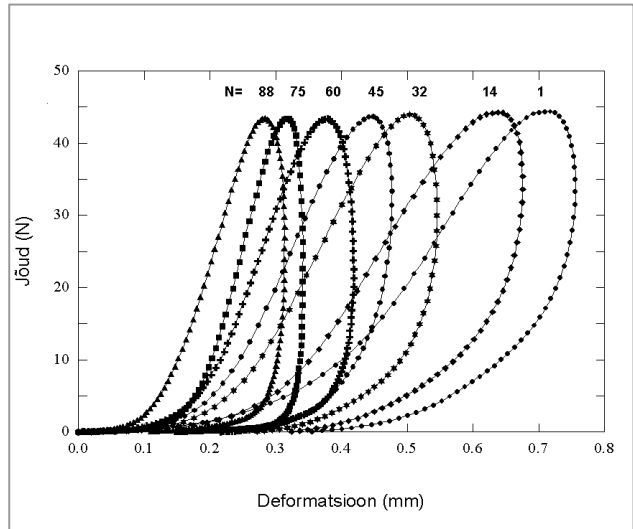
Joonis 4.

Klaverihaamri testimise seade.

Mehaanika on tihedalt seotud bioloogiliste protsessidega. Meie esialgsed ideed närviimpulsi modelleerimisel [15] on arendatud südamerütmide analüüsil [16]. On saanud selgeks, et pinged südamelihases sõltuvad oluliselt rakusisestest protsessidest. Sellalased uuringud *in silico* (s.o arvutis) on andnud suurepäraseid tulemusi, seostades makronäitajad (pinge, deformatsioon) südamelihase rakkude energiatarbimisega [17, 18]. Samal ajal saab fraktalite teooria meetodeid rakendada mõõdetud signaalide analüüsil, antud kontekstis just EKG signaalide analüüsil [19]. Lisateave tõhustab loomulikult diagnostikameetodeid.

Viimased näited iseloomustasid eriti selgelt mehaanika, füüsika ja bioloogia piirimaid. Pole ime, et seal tekkivad põnevad probleemid, mis lausa nõuavad lahendusi – turbulentsi kirjeldamine [20], eneseafiinsete pindade analüüs [21] jpm.

Tegemist on seega ülimalt põnevate probleemidega [22]. Osa nendest on jõudnud ka õppekirjandusse, seda just kaootiliste protsesside maailma kirjeldamisel [22, 23]. Loengukonspekte on ridamisi, oleme eriti hoolikalt suhtunud mehaanika süvaalustesse ning kursus “Pideva keskkonna mehaanika” saab järjest lihvi. Kuid ka solitonide seminar, faasiüleminiku protsesside lühikursus, matemaatilise modelleerimise alused jm on õppematerjalidega kaetud.



Joonis 5.

Abeli tüüpi klaverihaamrite koormuskõverad, N – haamri number.

Samuti koostame aeg-ajalt Eesti Teaduste Akadeemia Toimetiste erinumbreid, nii probleemikeskseid kui ka konverentsikeskseid.

CENS tunnetab enda vastutust mitut moodi – nii kraadiõppes kui ka rahvusvahelises koostöös, nii teadmiste edastamisel Eestis kui ka teadusorganisatsioonilises elus. On väga hea meel, et meil on säravate silmadega noored inimesed, on hea meel, et meil on järjepidevus, on hea meel, et ideedest napust pole. See viimane väide pole loomulikult üllatav, sest vaja ju ainult lahtiste silmadega ringi vaadata.

Koostöös Eesti Mereinstituudi ja Twente Ülikooliga mõtleme näiteks, kuidas kiirlaevade lained interakteeruvad Tallinna lahes, Euroopa Teadusfondi programmi “NATEMIS” raames mõtleme, milline võiks olla mesoskoopiliste materjalide akustodiagnostika, koos KBFI ja Grenoble’i Ülikooliga mõtleme rakuenergeetika mehhanismidele jne. Järge ootavad mitmed artiklid, monograafiad ja õpperaamatud. Ühte pole me veel välja mõelnud – kuidas ööpäeva pikendada...

Ma ei nimetanud siin nimesid, viited annavad teatud ülevaate anno 2002. Juba järgmisel aastal oleks sellises ülevaates uusi nimesid, sest kraadiõppurid töötavad usinalt.

VIIDATUD KIRJANDUS

1. Kutser, M. Mechanics at the Institute of Cybernetics. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 2000, 6, 235-251.
2. Engelbrecht, J. An Introduction to Asymmetric Solitary Waves. Longman, Harlow, 1991.
3. Engelbrecht, J. Nonlinear Wave Dynamics: Complexity and Simplicity. Kluwer, Dordrecht, 1997.
4. Salupere, A., Maugin, G.A., Engelbrecht, J. Korteweg- de Vries soliton detection from a harmonic input. Phys. Lett. A, 1994, 19, 9-23.
5. Salupere, A., Engelbrecht, J., Peterson, P. Long-time behaviour of soliton ensembles. Chaos, Solitons & Fractals, Part I, 2002, 14, 1413-1424; Part II, 2003, 15, 29-40.
6. Peterson, P., Groesen, E. van. A direct and inverse problem for wave crests modelled by interactions of two solitons. Physica D, 2000, 141, 316-322.
7. Ravasoo, A. Nonlinear waves in characterization of inhomogeneous elastic material. Mech. Materials, 1999, 31, 205-213.
8. Ravasoo, A., Janno, J. Nondestructive characterization of materials with variable properties. Acta Mechanica, 2001, 151, 217-233.
9. Engelbrecht, J., Cermelli, P., Pastrone, F. Wave hierarchy in microstructured solids. Maugin, G.A. (ed). Geometry, Continua and Microstructure. Hermann Publ., Paris, 1999, 99-111.
10. Maugin, G.A., Berezovski, A. Material formulation of finite-strain thermoelasticity and applications. J. Thermal Stresses, 1999, 22, 421-449.
11. Berezovski, A., Maugin, G.A. Simulation of thermoelastic wave propagation by means of a composite wave-propagation algorithm. J. Comput. Phys., 2001, 168, 249-264.
12. Berezovski, A., Engelbrecht, J., Maugin, G.A. Numerical simulation of two-dimensional wave propagation in functionally graded materials. Eur. J. Mech. A/Solids (submitted).
13. Stulov, A. Hysteretic model of the grand piano hammer felt. J. Acoust. Soc. Amer., 1995, 97, 2577-2585.
14. Stulov, A., Mägi, A. Piano hammer testing device. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 2000, 6, 259-267.
15. Engelbrecht, J. On theory of pulse transmission in a nerve fibre. Proc. Roy. Soc. London, 1981, A 375, 195-209.
16. Kongas, O., Herten, R. von, Engelbrecht, J. Bifurcation structure of a periodically driven nerve pulse equation modelling cardiac conduction. Chaos, Solitons & Fractals, 1999, 10, 119-136.
17. Vendelin, M., Kongas, O., Saks, V. Regulation of mitochondrial respiration in heart cells analyzed by reaction-diffusion model of energy transfer. Am. J. Physiol. Cell Physiol., 2000, 278, C747-C764.
18. Vendelin, M., Bovendeerd, P.H.M., Arts, T., Engelbrecht, J., Campen, D.H. van. Cardiac mechanoenergetics replicated by cross-bridge model. Ann. Biomed. Eng., 2000, 28, 629-640.
19. Kalda, J., Säkki, M., Vainu, M., Laan, M. The methods of nonlinear dynamics in the analysis of heart rate variability for children. Med. Biol. Eng. and Comp., 1997, 37, Suppl. 1, 27-32.
20. Kalda, J. Simple model of intermittent passive scalar turbulence. Phys. Rev. Lett., 2000, 84, 471-474.
21. Kalda, J. Description of random Gaussian surfaces by a four-vertex model. Phys. Rev. E, 2001, 64, 020101(R).
22. Engelbrecht, J. Beautiful dynamics. Proc. Eston. Acad. Sci. Phys. Math., 1995, 44, 108-119.
23. Engelbrecht, J., Uus, A. Mittelineaarne dünaamika ja kaos. Tallinn, Tartu: TA Kirjastus, 1993.
24. Lepik, Ü., Engelbrecht, J. Kaoseraamat. Tallinn: TA Kirjastus, 1999.

BIOPLAST

Ain Heinaru

Tartu Ülikooli molekulaar- ja rakubioloogia instituut

PETROPLASTID

Inimene nüüdisaegses ühiskonnas on “kokku kasvanud” plastmassidega. Mõtleme, mis juhtuks kui kõigest meid ümbritsevast kõrvaldaksime plastmassist komponendid? Aparaatidest, masinatest, autodest, riietest! Ilmselt oleks tulemuseks kaasaegse tsivilisatsiooni taasasendumine mõne ajalooliselt küllalt varajase tsivilisatsiooniga.

Valdavalt on plastmassid nn petroplastid, mille valmistamise algkomponendid tulenevad naftast. Siin on aga vähemalt kaks suurt häda. Esiteks, nafta on mittetaastuv tooraine ning teda ei jätku enam väga kauaks. Teiseks, petroplastid ei lagune looduslikes tingimustes, mille tulemusena inimene suudab produtseerida juba nii palju jäätmeid, et nende käitlemine on läinud üleloomulikult kalliks.

BIOPLASTID

Bioplastid on biolagundatavad plastmassid, loodusõbralikud materjalid, mida saadakse taastuvast toormest. Biolagundatavate plastide, lahustite, emulgaatorite ja hapete saamine on nüüdisaegse keemiatööstuse üks olulisemaid arengusuundi. Sisuliselt on tegemist uut tüüpi keemiatööstuse tekkega, mis sageli kombineerub mikrobioloogilise tööstusega, kus mikroobide vahendusel toimub keemiliste produktide (näiteks antibiootikumid, muud ravimid, mikroobne valk, mitmesugused biokeemilised ained jm) tootmine. Uute materjalide mehhaano-keemilised omadused ei tohi olla halvemad traditsioonilistest naftakeemial põhinevate toodete omadustest.

Lisanõudeks on veel tootmise keskkonnasõbralikkus ja jätkusuutlikkus. Piimhappe ühe keemilise isomeeri L(+)-piimhappe baasil saadav looduses lagunev polümeer PLA (polylactic acid) ja laia kasutusala piimhappe estrid (mittetoksilised ja stratosfääri osoonikihti mitte ohustavad lahustid) vastavad

nendele nõuetele. Teise grupi bioplaste moodustavad polüalkanoaadid, näiteks polüühüdroksütüüraat. Need ühendid on aga mitte eriti tugevate mehhaaniliste omadustega ja leiavad kasutatamist meditsiinis, näiteks kunstnahana.

LÄHITULEVIKU SUUNDUMUSED PLASTIDE TOOTMISEL

Tulenevalt keskkonnakaitselistest vajadustest on plastikute biodegradeeritavus (bioloogiline lagundatavus) muutunud või just muutumas paljudes riikides tootjatele kehtestatavaks obligatoorseks (seadusega määratud) nõudeks. Ideaalseks bioplastikuks on tehnoloogiliselt varieeritava püsivusega toode, mis on püsiv tarbimiseloomuga ette määratud ajas ja biodegradeeritav pärast toote kasutust. Samal ajal peab sellise bioplasti tootmine olema siiski ka konkurentsivõimelise hinnaga. Selletüübiliste plastmasside nõuetele vastab kõige paremini piimhapest saadav polüester (PLA). Piimhape on üks kesksamaid looduslikke aineid rakus ja organismis.

Maailmas alustati esimese PLA-d tootva tehase ehitamist USA-s, kus selleks otstarbeks loodi uus kompanii CargillDow (www.cdply.com) kahe konglomeraadi, Cargill Incorporated ja Dow Chemicals Inc. võrdsel osalusel. Tehase tootmisvõimsuseks on planeeritud 140 000 t PLA-d aastas ja tehase ehitusmaksumus on orienteeruvalt 300 mln USD.

Teised konkurendid on juba samuti välja ilmunud. Saksamaal on moodustatud konsortsium ja Jaapanis koguni kolm üksust, kes tegelevad analoogse probleemistikuga. Me teame, et nende tegijate peamiseks probleemiks on momendil L-laktaati tootva mikroobitüve mitmed puudulikud omadused, mis teevad piimhappe tootmise liialt kulukaks. Võtmeküsimuseks PLA hinna puhul ongi piimhappe tootmise hind.

PIIMHAPPE SAAMINE KUI VÕTI PLA TOOTMISEKS

Lisaks PLA sünteesile on piimhappe kasutatav ka rea teiste toodete saamiseks toiduainete-, farmaatsia-, parfümeeria- ja keemiatööstuses. Toiduainete tootmisel kasutatakse L-piimhapet säilitus- ja maitseainena, piimhappe estreid emulgaatoritena ja vahustusainetena (jäätis, kreemid, majoneesid, ketšup, happendatud produktides äädikhappe asendajana, kohupiima ja juustu saamine ja maitsestamine, dieettoidud metallide paremaks omastamiseks). Piimhappe estrid leiavad lisaks PLA tootmisele rakendamist veel lennuki-, auto-, ja elektroonikatööstuses keskkonnakahjulike kloororgaaniliste ühendite jm asendajatena. Teatavasti ei lagune kloorühendid looduses kergesti ning nad on üldjuhul elusorganismidele väga mürgised. Kloorühendid on nüüdisajal üheks kõige tõsisemaks keskkonna reostusohuks inimesele.

Olmesfääris väärib eraldi rõhutamist lähiajal prognoositav üleminek piimhappe baasil valmistatavatele keskkonnasõbralikele ja vähetoksilistele lahustitele ja detergentidele. Kosmeetikatööstuses on piimhappe ühenditel tähtis roll näiteks nahahooldevahendite koostise ja organismiläheduse tagamisel. Juba praegusel tasemel kasutamisel on viimastel aastatel piimhappe tootmismahud suurenenud maailmas kuni 15% aastas. Piimhappe e L-laktaadi suuremahuline tööstuslik tootmine muutub majanduslikult mõttekaks vaid mikrobioloogilisel kääritamisel suhkrutest.

PIIMHAPPE TOOTMISVÕIMALUSED

Senini on piimhappe tootmisel maailmas toormena kasutatud valdavalt piiratud kättesaadavusega, kalteid ja tehnoloogiliselt tülikaid toormeid, näiteks vadakut ja melasse. Piimhappe mikroobsel produktsioonil on produtsenttivedena kasutatud peamiselt laktobatsille, näiteks *Lactobacillus delbrueckii* NCIB 8183. Nimetatud laktobatsill eeldab aga hulgaliselt täiendavate kallihinnaliste kasvufaktorite kasutamist ja madalaid kultiveerimistemperatuure. Seega on tootmisel vajalik mikroobse söötme ja seadmete steriilimine. Kokkuvõttes teeb see tootmise väga kalliks. Meie poolt viljeldava projekti aluseks on TÜ molekulaar- ja rakubioloogia instituudis välja töötatud mikroobitüvi, mis toodab suhkrutest PLA tootmiseks vajalikku L(+)-piimhapet senisega võrreldes majanduslikult tulusamalt.

TARTUS AVASTATUD UUS UNIKAALNE MIKROOB *BACILLUS COAGULANS* SIM-7 DSM 14043

PLA tootmise majanduslik otstarbekus põhineb mikroobitüve ainulaadsetel omadustel võrreldes teiste senituntud mikroobitüvedega. Õigemini sellesse mikroobi on nagu kokku koondatud kõik need kasulikud tunnused, mis esinevad ühel või teisel viisil erinevates mikroobides. Nendeks tunnusteks on:

TERMOTOLERANTSUS e vastupidavus kõrgetele temperatuuridele. Mikroobi optimaalseks kasvutemperatuuriks on 57° C. Sellisel temperatuuril pole võimelised kasvama inimpatogeensed mikroobid ning tehnoloogilises protsessis pole vajalik steriilida eelnevalt ei söödet ega seadmeid, sest nn kõrvalreostust teiste mikroobidega ei toimu. Seetõttu saab tootmistsükli disainida aseptilisena, millega kaasneb oluline energia kokkuhoid ja sellega alaneb ka toote omahind.

KASVUFAKTORITE madalatasemeline vajadus. Mikroobide kasvuks on vajalikud nii kasvufaktorid kui ka mineraalelemendid. Tavaliselt on mikroobisöötmetes kasvufaktorite allikaks lihaekstrakt või pärmihüdrolysaat. Mõlemad on tööstusliku tootmise jaoks liialt kallid. See tingib vajaduse kasutada tööstuses just selliseid mikroobe, mille kasvufaktorite nõudlus on tagasihoidlik. ESTAG-i poolt finantseeritavas projektis õnnestus meil hiljuti välja töötada mikroobisöötme koostisest pärmiekstrakti kõrvaldamise viis. Selgus, et seda on võimalik asendada tohutult odavamaga teravilja idufraktsiooniga. Teravilja komponentidest piisab ka mikroobide kasvuks vajalike mineraalelementide vajaduste rahuldamiseks.

MIKROOBI GLÜKOSIDAASNE AKTIIVSUS JA KÕRGE AFIINSUS GLÜKOOSI SUHTES (saab kasutada kõrgeid glükoosi kontsentratsioone) võimaldab tärklise suhkrustamist koos fermentatsiooniprotsessiga.

Mikroobitüve unikaalsete omaduste hulka kuuluvad ka laktaadi saagise näitajad fermenteeritud suhkrutest, saavutatav laktaadi lõppkontsentratsioon, kultiveerimistsükli kestus perioodilises kultuuris, produktiivsus glükoosi erinevatel kontsentratsioonidel ning produktiivsus fermentatsioonitsükli. Laktaadi maksimumproduktsioon saavutatakse standardsetes kasvutingimustes 96-tunnises mikroobi kasvatus- ja laktaadi produktsioonitsükli. Söötme neutraliseeri-

mistingimuste optimeerimisega ning söötme koostise varieerimisega õnnestus meil hiljaegu välja töötada tingimused, kus laktaadi produktsiooni optimaalsed näitajad saavutatakse 96 tunni asemel 48 tunniga. Arusaadavalt kaasneb sellega fermentatsioonikulude vähenemine ja toote omahinna veelgi suurem alanemine. Need näitajad on meie mikroobil selgelt paremad kui seni tuntud analoogidel. See võimaldas meie mikroobitüve rahvusvaheliselt patenteerida.

Erinevalt laktobatsillidest on meie mikroob sporegeenne e spoore moodustav. Selles erinevuses on konks, mida tavaliselt ei märgata. Esiteks, mikroobide kasvuks ja elusrakkude eksisteerimiseks vajatakse olulisel määral energiat, mistõttu oluline osa mikroobide kasvusubstraadist (siin glükoos) kasutatakse mitte piimhappe kui mikroobse metaboliidi produktsiooniks, vaid mikroobirakkude elutegevuseks. Spooride moodustumisel võimaldatakse rakkudel kasutada ära praktiliselt kogu olemasolev energia ja see konverteerida piimhappeks. Seega mikroob annab endast kõik, rohkemgi veel, ta annab enda kogu energia, mikroobirakk ise hävib, kuid säilib tema geneetiline materjal järelejäänud spooris. Teiseks, mikroobide kasvatamise ja paljundamisega kaasneb mikroobide muteerumisoht – algsete omaduste kaotamise oht. Selle vältimiseks hoitakse tööstuses väga täpsetes ja kontrollitavates tingimustes nn emakultuuri. Sporegeense mikroobi puhul on mikroobiomaduste muutumise vältimise ja säilitamise kindlustamine palju lihtsam.

MIKROOBIDE KASVATAMISE JA PIIMHAPPE TOOTMISE ALGSUBSTRAAT – TERAVILI

Majanduslikult tasuva PLA tootmine Eestis on arvutuslikult 60 000 t aastas. Selline kogus eeldab aastas kuni 75 000 t piimhappe tootmist. Arvestades piimhappe sünteesiks vajalike suhkrute koguseid on Eestis ilmselt ainsaks arvestatavaks toormeks teraviljatärklis, õigemini teraviljatärklisest saadud suhkur (glükoos). Kui PLA tootmiseks vajalikku teravilja hakatakse kasvatama Eestis, siis toetaks see oluliselt ka Eesti põllumajanduse ja maaelu arengut. Toiduainete tootmisega saavutatavat põllumajanduslike mittetoiduainete tootmist (ingl *non-food products*) käsitletakse maailmas kui üht võtit põllumajandusproduktide tootmise jätkamiseks suuremates mahtudes kui seda on vaja toidulaua kindlustamiseks. Kuivõrd siin on tegemist ka maa-piirkondade arendamise vajadustega, siis kuulub selline

teraviljatootmine kindlasti ka doteeritavate (riigi poolt soodustatavate) tegevuste hulka.

TERAVILJA KOMPLEKSNE KASUTAMINE

Teravili on taastuv tooraine. Teravilja kompleksne kasutamine käesoleva projekti raames tähendab seda, et lisaks teravilja tärklisele kasutatakse ära ka teravilja muu osis uute produktide saamiseks.

TERA TÄRKLISOSA. Senine teraviljade sordiaretus on läinud eelkõige tera valgusisalduse suurendamise suunas. Käesolevas projektis on arvestatud hinna aluseks selline teravili, mis sisaldab vähemalt 60% tärklisist, et valmistada mikroobide fermentatsiooni toitekeskkonda. Kui tärklisesisaldus on kõrgem, peab põllumees saama kõrgemat hinda, kui madalam, siis on hind madalam, sest väiksema tärklisesisalduse korral saab ju ka vähem toota piimhapet. Oluliseks on muidugi ka saagikus. Sellest aspektist oleks kõige kasulikum kasutada nisu ja rukki hübriidsorte (*Triticale*). Ka piimhappe produktsiooninäitajad oleme saanud tritikalega väga head. Kahjuks on aga siin kaks piirangut, mis ei võimalda projektil orienteeruda sellele algsubstraadile. Esiteks, Eestis pole põllumees veel piisava sügavusega võtnud omaks teadmist, et hübriidsordid lahknuvad järgmistes põlvkondades ja seetõttu tuleb seemnevilja üha jälle ja jälle uuendada (see on aga kallis). Teiseks, Eesti kliima on muutlik, mõnel aastal ei valmi meie kliimas tritikale ja kui koristame vilja vahaküpsuses, siis tekitab see vajaka jäämisi nii tera tärklisesisalduses kui ka juba säilitamisel. Lähtuvalt senistest katsetulemustest on meil optimaalseks lahenduseks orienteeruda teraviljadest nisule. Seega sisaldab teravilja kompleksse kasutamise tehnoloogia väljatöötamine tera tärklisosa (ca 60%) kasutamist mikroobse fermentatsiooni toitekeskkonnana.

Terade teine komponent, KLEEPVALK e GLUTEEN, mis sisaldub terades koguses 10...15%, on viimasel ajal samuti muutunud biodegradeeruvate valkplastide saamise lähtematerjaliks. Sellega seoses on kiiresti arenenud teraviljavalgust saadavate kattekilede (sh toiduainete kattekiled) valmistamise võimalused. Seoses arvatava infektsiooniohuga loomsete valkude kasutamisel söödalisisandina on viimasel ajal järsult kasvanud taimse päritoluga valgukontsentraatide vajadus. Teravilja fraktsioneerimisel on võimalik eraldada nn idufraktsioon, mis asendab teatud hulgas lisatuna mikroobide vajaduse kasvufaktorite järele. Ülejäänud osa sellest kõrval-

produktist, kuni 85% toorproteiinisisaldusega valgufraktsioon, on kommertsiaalse väärtusega toiduainete-, sööda- ja keemiatööstuses. Seega, teravilja natiivset valku kasutatakse toidulisanditena, valgulist kattekihedena, liimide valmistamiseks ja emulgaatoritena. Need oleks uued, ökoloogiliselt puhtad tooted.

Tera ülejäänud osa moodustab eelkõige kiudmaterjal, mida nimetatakse tavaliselt KLIKS. Selle kasutamise võimalused sõltuvad loomasööda vajadustest piirkonnas ja tootja asukohast. Oluliseks küsimuseks on siin transpordikulud.

TÄRKLISE SUHKRUSTAMINE JA ISOSIIRUPID

Senised katsetulemused on näidanud, et mikroobisöödet on otstarbekas valmistada terades sisalduva A-tärklise baasil. Ilmselt tuleks tehnoloogiate valikul leida optimaalne lahend terade kuiv- või märgfraktsioneerimise vahel. Ehkki meie bakteritüvi võimaldaks kasutada tera dekstraanide ja nende osalise hüdrolyüsi teostamist koos mikroobide kasvuga, ei ole see ilmselt optimaalne, sest protsessi juhtimine muutuks sel juhul oluliselt kallimaks. Siiski, tärglise vedeldamise ja suhkrustamise tehnoloogia peab võimaldama maksimaalselt ära kasutada *Bacillus coagulans* SIM-7 DMS 14043 glükosidaasest aktiivsust. Eeldame, et tärglise tootmine võib toimuda suuremas mahus kui PLA tootmiseks vaja. See võimaldaks tootmistüklisse lülitada uute produktidena isosiirupid. Turu olemasolul on mõttekas arvestada erinevate isosiirupite kui kõrvalproduktide tootmisega. Meie käsitleme isosiirupite tootmist aga kui võimalust, mille realiseerimine piimhappe, piimhappe estrite ja PLA optimaalse tootmistüklis tarvis pole vajalik.

FERMENTATSIOONI OPTIMEERIMINE

Võtmeküsimuseks on siin kasvufaktorite asendamise võimaluste kasutamine. Teraviljalgalgu proteolüüsi saavutatakse aminohapete segu, mis katab mikroobitüve lämmastikühendite vajaduse. Meie katsetes selgus, et iduvalgu hüdrolysaati tuleb lisada optimaalsetes kogustes. Liialt suurte koguste puhul moodustuvad värvilised ühendid, mis edaspidi raskendavad laktaadi puhastamist söötmesegust. L-laktaadi produktsiooni optimeerimine seisneb suuresti ka selles, et leida tingimused, kus fermentatsiooniprotsessis tekkivate jääkproduktide hulk on minimeeritud. Mikroobi kasvuparameetrite alusel

koostatakse tehnoloogiliselt ja majanduslikult põhjendatud optimaalne pH-vahemik (söötme happesus/neutraliseerimine), kasvutemperatuur, fermentatsioonitsükli kestus ning L-laktaadi produktsiooni kestus ja hulk. Väga tähtis on ka temperatuurioptimumi määramine L-laktaadi ja kõrvalproduktide tehnoloogiliselt sobivaima vahekorra saamiseks.

Teiseks ülesandeks on optimaalse pH määramine. See on väga tähtis, sest L-laktaadi produktsiooni korral muutub sööde happeliseks ja kui söödet ei neutraliseerita järk-järguliselt, siis mikroobid hukuvad ja L-laktaadi produktsioon alaneb. Oleme leidnud tingimused, kuidas kasutada neutraliseerijaks ammoniaaki. Töötasime välja esmavariandid fermentatsioonikeskkonna pH ja temperatuuri pidevaks registreerimiseks ning piimhappe produktsiooni kiiruse pidevaks hindamiseks, lähtudes neutraliseerija kulust. See saab optimeeritud fermentatsioonitsükli automaatselt integreeritud kontrollisüsteemi aluseks.

PIIMHAPPE PUHASTAMINE, PIIMHAPPE ESTRITE SAAMINE

Piimhappe ja tema estrite saamise tehnoloogiad jagunevad põhimõtteliselt kahte gruppi. Esimesel juhul, kui näiteks söötme pH neutraliseerijaks kasutatakse lupja, sadestatakse söötmest välja kaltsiumlaktaat, muud jääkained jäävad söötmevedelikku. Negatiivseks küljeks on siin piimhappe produktsiooni aeglus ja lubja (kipsi) kui jääkahainemägede kogunemine. Teisel juhul on olukord vastupidine. Kui näiteks kasutada neutraliseerijana ammoniaaki või aluseid, siis tuleb söötmest eelkõige kõrvaldada kõik muud kõrvalained. See on kaasajal võimalik, kasutades uudseid membraantehnoloogiasid. Sel juhul on tegemist uuetasemelise kaas-aegse tehnoloogiaga, mida pole käesoleva projekti tarvis kuskilt üks-ühele üle võtta. Oleme leidnud, et selline suundumus on siiski ainuõige. Sel juhul saavutame piimhappe kontsentreerimise energiasäästlikult ja keskkonnasõbralikul viisil, asendades senise nn kipsitehnoloogia näiteks membraantehnoloogiaga. Meie produktsiooni kõrge termofiilsus ja tolerantsus suhkrute ning piimhappe soolade kõrgete kontsentratsioonide suhtes annab väljatöötavale tehnoloogiale senistega võrreldes olulised eelised. Tehnoloogia põhimõttelise skeemi koostamisel on siin eriti tähtis ka vee korduvkasutuse võimaluste rakendamine. Veelgi enam, meie mikroobitüvi on

rakendatav ka muude tööstusjäätmete kõrvaldamisel. Näiteks selle mikroobitüve abil on võimalik puhastada heitvett suhkrutest. Arvutused näitavad, et meie mikroobitüve abil on võimalik toota piimhapet vähemalt 30% odavamalt.

PREPOLÜMERISATSIOONIL LAKTIIDI JA POLÜMERISATSIOONIL PLA SAAMINE

Kogu projekti kontekstis on siin tegemist teise, suhteliselt iseseisva osaga. Valdavalt on siin tootmisprobleemid nn keemilised. Piimhappe polümerisatsiooni osas on teostatud palju uuringuid, paljud tööstuslikud väljatöötused on autorikaitse all. Seega me palju juurde lisada ilmselt ei saa. Esimeseks võtmeküsimuseks on prepolümerisatsioonil saadava laktiidi saamisviiside ja -võimaluste valik. Eelkõige seostub see vajadusega määrata prepolümerisatsiooni tingimused temperatuuri ja katalüsaatori osas. On vaja teha valik katalüsaatori kustutajate osas etteantud polümerisatsiooniastmega stabiilse polümeeri saamiseks. Eeldame, et PLA polümerisatsiooni läbiviimise optimaalseim võimalus on PLA polümerisatsioon polüetüleenglükooliga. Selle kohta on olemas laboratoorsed tõestused, kuid seda pole veel tööstuslikult rakendatud. Sõltuvalt tehnoloogiate valikust on võimalik toota erineva bioloogilise lagundatavusega plastikut. Piltlikult öeldes viiakse polümeersesse ahelasse sisse nagu "nööbid", kust saab hakata polümeeri lahti harutama, biodegradeerima.

BIOPLASTI PROJEKT JA EESTI

PLA tehase ehitamisega Eestisse saaks oluliselt suurendada põllumeeste tööhõivet ja põllumaa ratsionaalset kasutust. Tekiks juurde oluline hulk uusi töökohti. Sellise tehase ehitamisega kaasneksid aga ka märksa suuremad "kaasnähud". Sisuliselt oleks siin tegemist uuetüübilise kõrgtehnoloogilise tööstusharu tekkega. Sellega peaks kaasnema ka spetsialistide ettevalmistus. Arvame, et siin oleks ka Eesti riigil selged huvid ja loodetav toetuslik suhtumine. Senine PLA projekti realiseerimine teadus- ja rakendusuringute finantseerimise Keskonnainvesteeringute Fondi, teaduse sihtfinantseerimise, ESTAG-i projekti ja erafinantseeringutega Eesti firmade poolt on olnud meie jaoks igati positiivne. Projekt on jõudnud staadiumisse, kus on vaja hakata kaasama nii kodumaiseid kui ka välismaiseid firmasid. See töö on käimas ja edukat jätku on võimalik juba prognoosida.

INTELLEKTUAALSE OMANDI KAITSE

Tehnoloogiaprojektid pole ilma intellektuaalse omandi kaitseta kindlasti rakendatavad. Patendi või patentide omamine on siin sisuliselt prerogatiiv. Meie bakteritüvi *Bacillus coagulans* SIM-3 DSM 14043 L(+)-laktaadi tootmiseks fermenteeritavatest suhkrutest on autoriõigusega kaitstud. Lisaks Eestile on meie patenditaotlus hinnatud rahvusvahelise patendi tasemele vastavaks [1]. Tööstusliku tähtsusega mikroobi tuleb kaitsta kaasaegsete meetoditega. Meie mikroobitüvi on deponeeritud Saksamaal asuvas rahvusvahelises mikroorganismide kollekttsioonis numbri all DSM 14043. Samas oleme määranud ka mikroobitüve "sõrmejäljed", milleks on 16SrRNA ja glükosidaasi geenide nukleotiidsed järjestused ning muu informatsioon DNA primaarjärjestuste tasemel. Ülalnimetatud autorikaitse õigused on autorid andnud Tartu Ülikoolile.

ÜLIKOOLID JA TEHNOLOOGIAD

Kaasajal on teadus ja tehnoloogiad sageli nii tihedalt seotud, et isegi raske on neid komponente eristada. See on põhjustanud ka erinevaid arvamusi. Omades juba teatud kogemusi tehnoloogilises arendustegevuses leian, et tehnoloogiliste ideede genereerimiseks ja esmaseks uuringuks on vajalik valdavalt ainult teadustöö. Muidu neid ideid lihtsalt ei tekki.

Kui tehnoloogiline idee on aga konkurentsivõimeline, siis saab ja peab ta olema kaitstud patendiga, kusjuures eraldi otsustused tuleb võtta vastu siis, kui tuleb kõne alla vastava patendi kaitse erinevates riikides. See on kallis ja niisama patente kollekttsioneerida pole mõtet, st rahvusvaheline kaitse on vajalik juhul, kui vastaval tehnoloogial põhinev toode tekib. Tehnoloogilise arendustegevusega peavad tegelema kõik ülikoolid, kellel on selleks vastav potentsiaal olemas. See on aja märk.

VIIDATUD KIRJANDUS

1. Simisker, J., Nurk, A., Heinaru, A. Thermophilic microorganism *Bacillus coagulans* strain SIM-7 DSM 14043 for the production of L(+)-lactate from fermentable sugars and their mixtures by means of named microorganisms. International Patent Application number PCT/EE02/0003. International Publication Number WO 02/074934 A1 26.09.2002.

TEHNIKA ELU KVALITEEDI PARANDAMISEKS – BIOMEDITSIINITEHNIKA

Hiiu Hinrikus, Jaanus Lass, Tarmo Lipping, Kalju Meigas, Jevgeni Riipulk

Tallinna Tehnikaülikooli biomeditsiinitehnika keskus

Biomeditsiinitehnika on kiiresti arenev interdistsiplinaarne teadusharu, mis ühendab endas täppis- ja loodusteadusi ning tehnika põhimõtteid nii teadusuuringuteks bioloogias, meditsiinis ja tervise süsteemides kui ka kasutamiseks tervist ning elu kvaliteeti parandavates tehnoloogiates.

Eesti teadlased on viimase kümnekonna aasta jooksul – biomeditsiinitehnika lülitati iseseisva teadusuunana tehnikateaduste nimistusse 1993. aastal – edukalt ühendanud oma jõupingutused selles paeluvas valdkonnas. Kaalukas teoreetiline baas elektrodünaamikas, mehaanikas ja infotehnoloogias ning lisaks kogemus-kompetents bioelektromagnetismis, biosignaalides, ja biooptikas loob perspektiivse tuumiku biomeditsiinitehnika-alasteks teadusuuringuteks rahvusvahelisel tasemel. Paljulubavad on ka rakenduslikud perspektiivid uute põhimõtete kasutamisel meditsiinitehnoloogias.

Anname lühikese ülevaate Tallinna Tehnikaülikooli biomeditsiinitehnika keskuse tegemistest, mis on seotud bioelektromagnetiliste signaalide interpreteerimisega. Millised on kaasaja meditsiini kõige kriitilisemad probleemid? Teatavasti on suremuses esikohal südame-veresoonkonna haigused ja teisel kohal vähk.

KARDIAALNE ÄKKSURM

on ootamatult tekkinud ja südamehaigusest tingitud surm, mille peamiseks põhjustajaks on spetsiifilised südame vatsakeste rütmihäired, näiteks vatsakeste tahhükardia või fibrillatsioon. Eestis sureb umbes 12 000 inimest aastas (60% kõikidest surmadest) kardioloogilistel põhjustel.

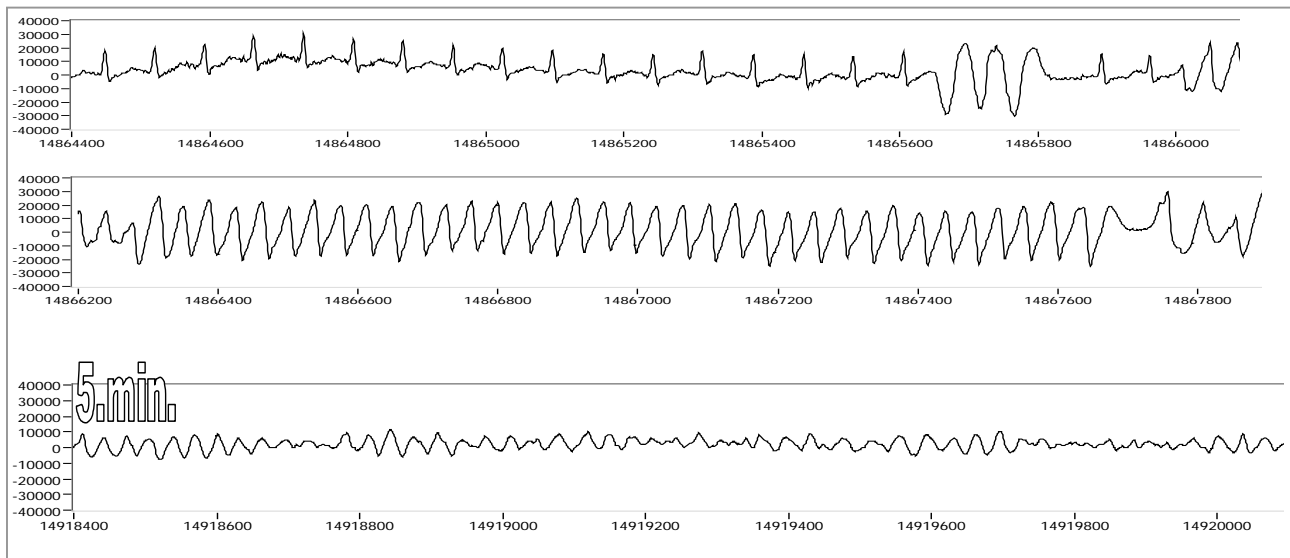
Rahulolekus süda tõmbub kokku 60–75 korral minutis ning selle kokkutõmbe juures on äärmiselt oluline, et üksikud südamelihase osad tõmbuksid kokku kindlas järjekorras ehk oleksid omavahel sünkroniseeritud – et eksisteeriks kindel rütm kindlas sageduspiiris (50–180 lööki/min). Eluohtliku rütmihäire

tekkides see sünkroonsus kaob ja lihase eri osad aktiveeruvad ja deaktiveeruvad juhuslikult ning südamelihase ei ole enam võimeline efektiivselt kokku tõmbuma. Selle tulemusena verevool kudedesse lakkab ja umbes kolme minuti möödudes hakkavad ajurakud massiliselt hävima ning saabub lõplik ja pöördumatu bioloogiline surm. Joonisel 1 on näide sellest, kuidas äkksurm paistab elektrokardiogrammit (EKG).

Ülemisel ribal on põhiosas näha südame normaalne rütm, mis lõpuosas tekkinud rütmihäire tõttu muutub fibrillatsiooniks. Keskmisel osal on näha, et süda ei ole iseseisvalt võimeline sellest seisundist enam välja tulema – on saanud äkksurm. Alumisel joonisel on südamelihase fibrillatsioon kestnud juba viis minutit ja seda seisundit võib lugeda bioloogiliseks surmaks.

Äkksurm on ravitav ja selle vastu on efektiivne ja suhteliselt lihtne ravimeetod – defibrillatsioon, mille käigus välise elektriimpulsi abiga süda taas sünkroniseeritakse. Probleemiks on aga see, et nimetatud defibrillatsioon tuleb sooritada esimese kolme minuti jooksul alates eluohtlike rütmihäirete tekkimisest, vastasel korral võime küll südame taas normaalselt tööle saada, aga ajusurmast ehk bioloogilisest surmast inimest tagasi tuua ei ole võimalik.

Biomeditsiinitehnika keskuses uuritakse, kas on võimalik ette ennustada äkksurma ehk teisisõnu püütakse leida spetsiifilisi muutusi normaalses EKG signaalis (enne vastavate rütmihäirete tekkimist), mis võiksid viidata rütmihäirete tekkimise suurenenud tõenäosusele. Kuni käesoleva ajani oleme peamiselt tegelenud südame repolarisatsioonifaasi (ajaintervall pärast südame elektrilist aktivatsiooni, mille käigus südame lihased taastuvad järgmiseks kokkutõmbeks) uurimisega pikaajaliselt (24h) salvestatud EKG signaalide baasil. Praegused tulemused lubavad väita, et enam kardiaalset äkksurmast ohustatud patsientidel on olemas spetsiifilised muutused ka normaalses EKG-s



Joonis 1.

EKG signaali muutused äkksurma puhul.

Üks huvitavamaid parameetreid selles osas on nn RT-segmeni kestus, mis iseloomustab südame taastusfaasi esimesi momente ja kust saavad alguse enamus eluohtlikest rütmihäiretest. Käesolev töö toimub koos Eesti Kardioloogia Instituudi ja Tallinna Diagnostikakeskusega.

PULSILAINE

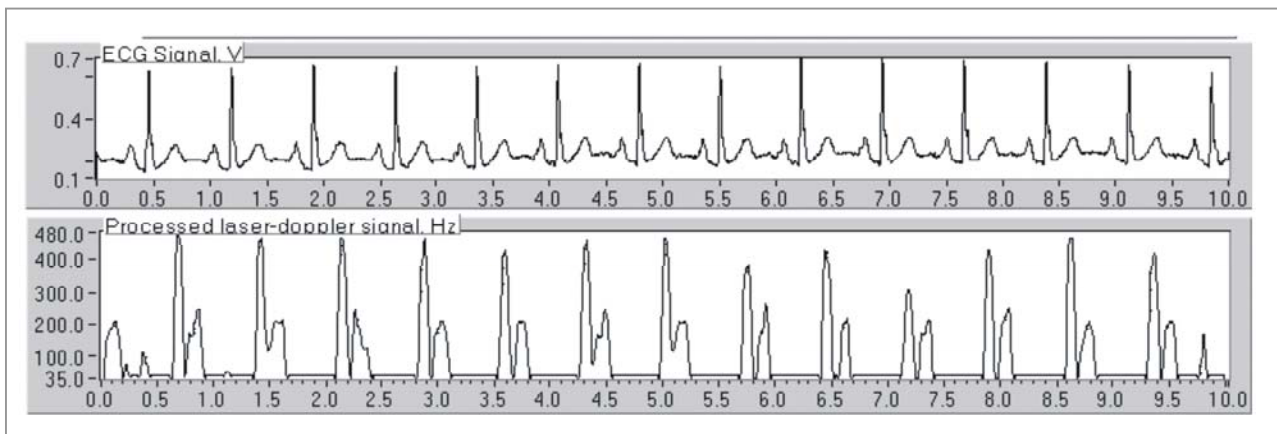
on nahapinna mehaaniline vibratsioon, mille põhjustab arteri diameetri muutumine ja mida saab mõõta mitteinvasiivselt naha pinnalt. Pulsilaine kuju ja levi kiiruse muutuste analüüs nii ühe arteri piires kui inimese keha erinevates piirkondades võimaldavad hinnata kardiovaskulaarse süsteemi seisundit ja teha järeldusi nii veresoonte seisundist kui ka südame töö jõudlusest ja vererõhust.

Biomeditsiinitehnika keskuses kasutatakse pulsilaine registreerimiseks laserit [1], mis tagab hea eraldusvõime ja tundlikkuse. Isesegustamine võimaldab kasutada sama laserit nii kiirusallikana kui ka vastuvõtjana üheaegselt. Isesegustamine laseris toimub, kui osa laseri poolt väljakiiratud võimsusest peegeldub tagasi laserisse ja selle aktiivkeskkonnas toimub kahe kiiruse segustamine. Kui laserikiirguse tagasi-

peegeldajaks on liikuv objekt, siis tagasipeegeldunud kiirgus omab Dopplerilist sagedusnihet, mis on mõõdetav kui vahelduvkomponent laseri toitevoolust. Doppleriline sagedusnihe on proportsionaalne peegeldava objekti liikumiskiirusega. Isesegustamisega koherentne mõõtesüsteem, kus kasutatakse fiibriga sobitatud pooljuhtlaserit, ehk "pigtail" konstruktsiooni, on eriti atraktiivne, kuna on väga lihtne suunata peegeldunud kiirgust tagasi laseri keskkonda ilma mingeid lisakomponente kasutamata.

Pulsilaine parameetrite mõõtmisel on inimese nahk optilise kiirguse peegeldajaks ja sama laseri abil registreeritud Doppleriline sagedusnihe hakkab sõltuma nahapinna liikumisest. Selliselt mõõdetud nahapinna mehhaanilise liikumise dünaamika ehk pulsilaine kuju on toodud joonisel 2. Pulsilaine kiiruse hindamiseks kasutatakse ajalise viite mõõtmist tugisignaali suhtes, milleks sobib näiteks EKG signaal, mis on toodud ülemisel joonisel. Kuna pulsilaine levimise kiirus sõltub vererõhust, siis on selline meetod kasutatav vererõhku kontrollivates seadmetes.

Laseriseadme prototüüpi kardiovaskulaarseks diagnostikaks demonstreeriti Hannoveri messil 2000. aastal.



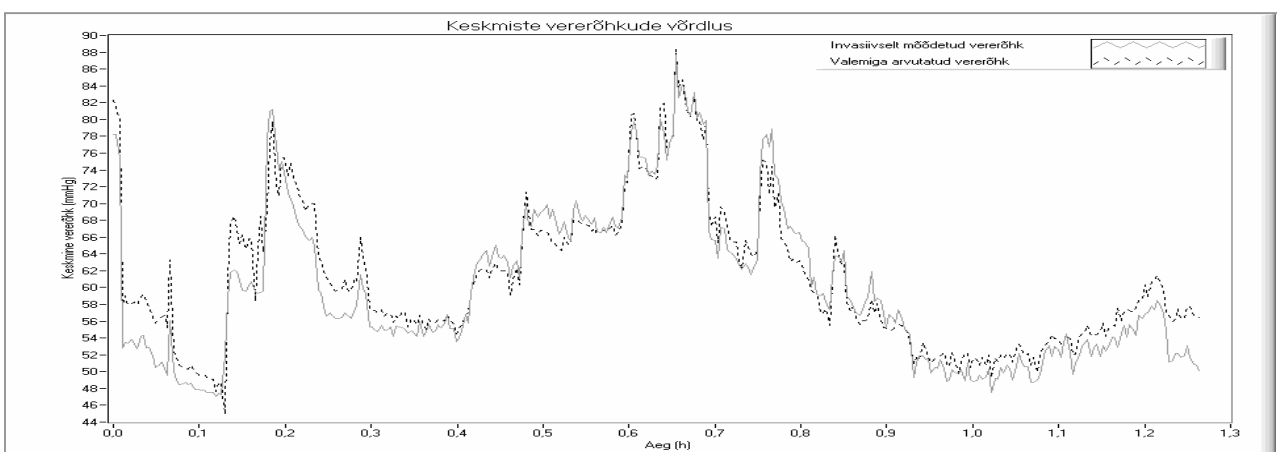
Joonis 2.
EKG signaal (ülemine) ja pulsiline kuju (alumine).

ARTERIAALNE VERERÕHK

on esimane näitaja, mis annab informatsiooni häiretest südame-veresoonkonna süsteemis. Kõik teame, kui ebamugav on vererõhu mõõtmine – käsi tõmmatakse mansetiga kõvasti kinni, et välise rõhu abil sulgeda arter. Kas lihtsamalt ei saaks? Pealegi on paljudel juhtudel manseti kasutamine peaaegu võimatu, näiteks vererõhu kontrollimisel joostes või muus tegevuses olles.

Meie poolt pakutud meetod [2] kasutab arteriaalse vererõhu ja pulsiline levi kiiruse vahelist seost. Re-

gistreeritakse ajainterval südame elektrilise aktiivsuse signaali (EKG) ja pulsiline kindlasse perifeersesse punkti saabumise momendi vahel. Vererõhu saab välja arvutada kindla algoritmi järgi iga südame löögi puhul. Vaja on kaht andurit – EKG ja pulsiline detekteerimiseks. Kalibreerimine toimub kahe mõõtmisega kahe erineva arteriaalse vererõhu väärtuse juures. Meetodi abil saadud mõõtetulemuse täpsust ja stabiilsust kontrolliti võrreldes arvatud väärtusi intensiivselt mõõdetud arteriaalse vererõhu väärtustega (vt joonis 3). Keskmine pikaajaline (kuni 62 tundi) ruutkeskmine viga jääb 10% piiridesse.



Joonis 3.
Arvutatud ja intensiivselt mõõdetud vererõhkude võrdlus.

Tavaliselt kasutatakse vererõhu registreerimiseks nn vasturõhu meetodit, kus mõõtmised teostatakse arteri osalise või täieliku kokkusurumise abil. Antud meetodi eelised on mõõtmisprotseduuri lihtsus (mansett puudub), mõõtmise teostamise lühike aeg (tulemuse saab iga südamelöögi kohta) ja mõõtmisprotseduuri mõju puudumine mõõdetavale suurusele (kui pulsilaine andur on optiline, siis mehhaaniline mõju soonele puudub).

IMPLANTEERITAVAD KARDIOSTIMULAATOREID

kasutatakse, kui südame elektriline juhtsüsteem ei suuda enam iseseisvalt südant tüürida. Oluline ülesanne on kardiostimulaatori taktsageduse vastavusse viimine naturaalse aktsioonipotentsiaali (südame löögi-) sagedusega ja adapteerimine organismi füsioloogilisele seisundile. Kahjuks on tootmises olevate stimulaatorite adapteerimisvõime mitteküllaldane ja laialt on levinud arvamus, et tüürparameetrite arvu suurendamisega (mis muudaks seadme tehniliselt oluliselt keerukamaks) ja/või tüürimisalgoritmi täiustamisega on võimalik kardiostimulaatori kvaliteeti parandada.

Rahvusvahelise Euroopa Komisjoni poolt toetatud projekti käigus uuriti koos Prantsuse ja Poola teadlastega uusi meetodeid kardiostimulaatorite täiustamiseks. Rea füsioloogiliste signaalide (südame kontraktsiooni tekitava impulsi pikkus, füüsiline liigutuste aktiivsus, hingamise sagedus ja sügavus) üheaegsete mitteinvasiivsete mõõtmiste tulemusena grupil tervetel inimestel koostati nn terve inimese mudel, mis sai aluseks uute tüürimisalgoritmide loomisel [3]. Töötati välja paralleelselt kaks tüürimisudelid: hägusloogikal baseeruv mudel Pariisis ja matemaatiline mudel Tallinnas. Nende kvaliteeti hinnati katseliselt grupil inimestel nii Tallinnas kui Pariisis, kui ka Euroopa juhtiva kardiostimulaatoreid tootva firma ELA testsignaale kasutades.

Mõlemad uued mudelid tagasid parema tulemuse südame naturaalse rütmi taastamisel kui ELA toodetavatel stimulaatoritel kasutatavad. Erinevate matemaatiliste algoritmide võrdluse alusel tehti järeldus, et optimaalne adaptiivse südamestimulaatori tüürparameetrite arv on kaks, kolmanda lisamine mudelile ei tõsta märkimisväärselt selle kvaliteeti. Optimaalsete parameetrite kombinatsioonid erinevad patsientidel individuaalselt. Perspektiivne võimalus adapteeruvuse parandamiseks on tüürimisalgoritmi individualiseerimine, antud kindlale patsiendile iseloo-

mulike tüürparameetri(te) väärtuste sissetoomine. Tulemuste põhjal on esitatud patenditaotlus [4].

VÄHI VARANE AVASTAMINE

on äärmiselt oluline ravi heade tulemuste tagamiseks. Lõpptulemusel kasvajani viivate raku anomaaliade kasvamiseks avastamist tagavate mõõtmeteri (ligikaudu 2mm) kulub umbes kaheksa aastat. Kuni morfoloogilised muutused pole märgatavad, on röntgen- või muud kiirgust kasutavad uuringud kasutatud. Enamgi – kiiritus võib stimuleerida protsessi. Mikrolaine radiomeetria on ainus passiivne meetod vähi varaseks avastamiseks. Meetod baseerub vähirakkude temperatuuri erinevusel normaalsete rakkude omast 1–2 K võrra. Registreerides mikrolaine radiomeetriga inimkudede raadiokiirgust saab avastada temperatuurianomaaliaid, mis on vähi või vähi-eelse seisundi signaaliks.

Vaatamata idee geniaalsele lihtsusele tekivad selle rakendamisel mitmed probleemid. Kiirguse intensiivsus sõltub mitte ainult kiirgava objekti temperatuurist, vaid ka kiirgustegurist, st selle elektrilistest parameetritest, samuti ümbritseva keha elektrilistest parameetritest, mis samuti kiirgavad ning milles kasulik signaal neeldub. Kuna inimkeha on mittehomoogeenne, tekkivad peegeldused nii radiomeetri sisendist kui ka erinevate kudede kihtidelt kehas. Signaali on raske identifitseerida.

Biomeditsiinitehnika keskuses modelleeriti radiomeetrilist signaali arvestades radiomeetri sisendit ja mitmekihilist keha struktuuri kasutades numbrilist FDTD meetodit. Tehtud arvutused olid aluseks mõõtemetodi valikule [5]. Diferentsiaalse sisendiga Dicke radiomeetril on sümmeetriline sisend, mis arvestab automaatselt keha elektrilisi omadusi ja kindlustab peegeldunud müra kompensatsiooni. Koostöös firmaga MITEQ-Eesti on valmistatud 4,5 GHz diapasooni Dicke'i radiomeeter tundlikkusega 0,1 K, mis on praktiliselt küllaldane 2 mm mõõtmega temperatuurianomaalia registreerimiseks umbes 4 cm sügavusel.

Radiomeetrilise signaali visualiseerimiseks temperatuurijaotuse kujutisena arvuti ekraanil (mõõdetud signaali nivoo värvide punane-valge intensiivsuse abil) on koostatud originaalne programm. Selline mõõtetulemuste graafiline kujutamine muudab radiomeetri kasutamise oluliselt mugavamaks ja arstile vastuvõetavaks. Seadme prototüüpi demonstree-riti Hannoveri messil 1998. aastal. Radiomeetri mikrolaine osa on paigutatud liigutatavasse karp. Ma-

dalsageduslik osa on lisatud personaalarvuti korpusesse.

Seadme katsetuste tulemused näitavad, et arenenud vähivormide puhul registreeritakse anomaalia alati. Vähi varase staadiumi puhul (kaasates ka kirjanduse andmeid lähedaste seadmete katsetamisest) on oodata kokkulangevust mammograafiliste uuringutega umbes 75% ulatuses. Erinevused võivad olla tingitud ka mammograafia mittetundlikkusest temperatuurianomaaliatele millega ei kaasne veel morfoloogilised muutused. Meetod on perspektiivne elanikkonna läbivaatusel. Anomaalia avastamisel tuleb selle põhjuse selgitamiseks kasutada teisi meetodeid.

ELEKTROMAGNETKIIRGUSE MÕJU

elavatele organismidele on olnud diskussiooni objektiks pikki aastaid. Olemasolevad ohutusnormid arvestavad ainult suure intensiivsusega kiirgust, mis kutsub esile soojusliku efekti. Kas leiab aset ka otsene elektromagnetiline mõju? Kas mobiiltelefon mõjutab tervist? Veelgi intrigeerivam – kas elektromagnetkiirgusega on võimalik mõjutada aju tegevust?

Viimastel aastatel on eksperimentaalselt tõestatud, et madala intensiivsusega elektromagnetkiirgus tõesti mõjutab füsioloogilisi protsesse: on registreeritud kaltsiumi ioonide voo muutus läbi üheraksete membraani, on kindlaks tehtud aju hematoloogilise barjääri nõrgenemine rottidel ja sel aastal avaldatud töös näidati, et mikrolaine kiirgus mõjub bioloogiliselt närvitegevusele kui stressor.

Meil tehtud aju elektrilise aktiivsuse uuringud ja psühholoogiliste testide tulemused on näidanud, et kiirgus mõjub ajutegevusele tõesti kui nõrk stressor [6]. Moduleeritud mikrolaine mõju uurimisel aju elektrilisele aktiivsusele kasutati võrdlust neurofüsioloogias tuntud mõjuri – valgusstimulatsiooniga. Eksperimentaalsed uuringud noortest tervetest inimesest koosnevatel gruppidel andsid tulemuse, et tugeva mõjurina tuntud 16 Hz sagedusega valgusstimulatsioon ja 7 Hz sagedusega moduleeritud mikrolainekiirgus kutsuvad esile ühesuunalised muutused, peamiselt aju elektrilise aktiivsuse vähenemise, mis taastub paarikümne sekundi jooksul pärast kiirituse lakkamist. Psühholoogiliste testide tulemused näitasid, et keerulisemate testide puhul ilmneb tendents vigade arvu suurenemise suunas [6]. Kas saab kindlaid sagedusi kasutada inimese psühholoogiliseks mõjutamiseks? See küsimus on tõstatatud ja ootab vastust.



Joonis 4.

Töökeskond intensiivravi palates.

Kõige kriitilisem on olukord, kui inimese elu on otseselt ohus. Selleks, et teha võibolla ainuvõimalikku õiget otsust, vajab arst palju ja mitmesugust informatsiooni.

PATSIENDI MONITOOING OPERATSIOONI AJAL JA INTENSIIVRAVI PALATIS

peab seda tagama.

Intensiivravi palat ja operatsioonisaal on tehniliselt komplekssemaid ruume kogu haiglas. Seda põhjustab mitte niivõrd üksikute seadmete keerukus kui võrd vajalike seadmete ja aparaatide hulk ja nende koosmõju (näiteks mürad). Keerukamate operatsioonide puhul (näiteks aju- ja südamekirurgia) on pidevat tähelepanu nõudva informatsiooni hulk suur ning otsuseid tuleb langetada kiiresti. See seab monitooringus kasutatavale aparatuurile ja algoritmidele olulisi nõudeid:

- analüüsimeetodid peavad olema usaldusväärsed, ja põhjalikult testitud;
- monitori kasutajaliides peab olema selge ja kergesti loetav;
- monitoril esitatavad parameetrid peavad olema üheselt ja selgelt interpreteeritavad.

Samas võib iga mõõdetevatest signaalidest ammen-datav lisainformatsioon päästa elusid.

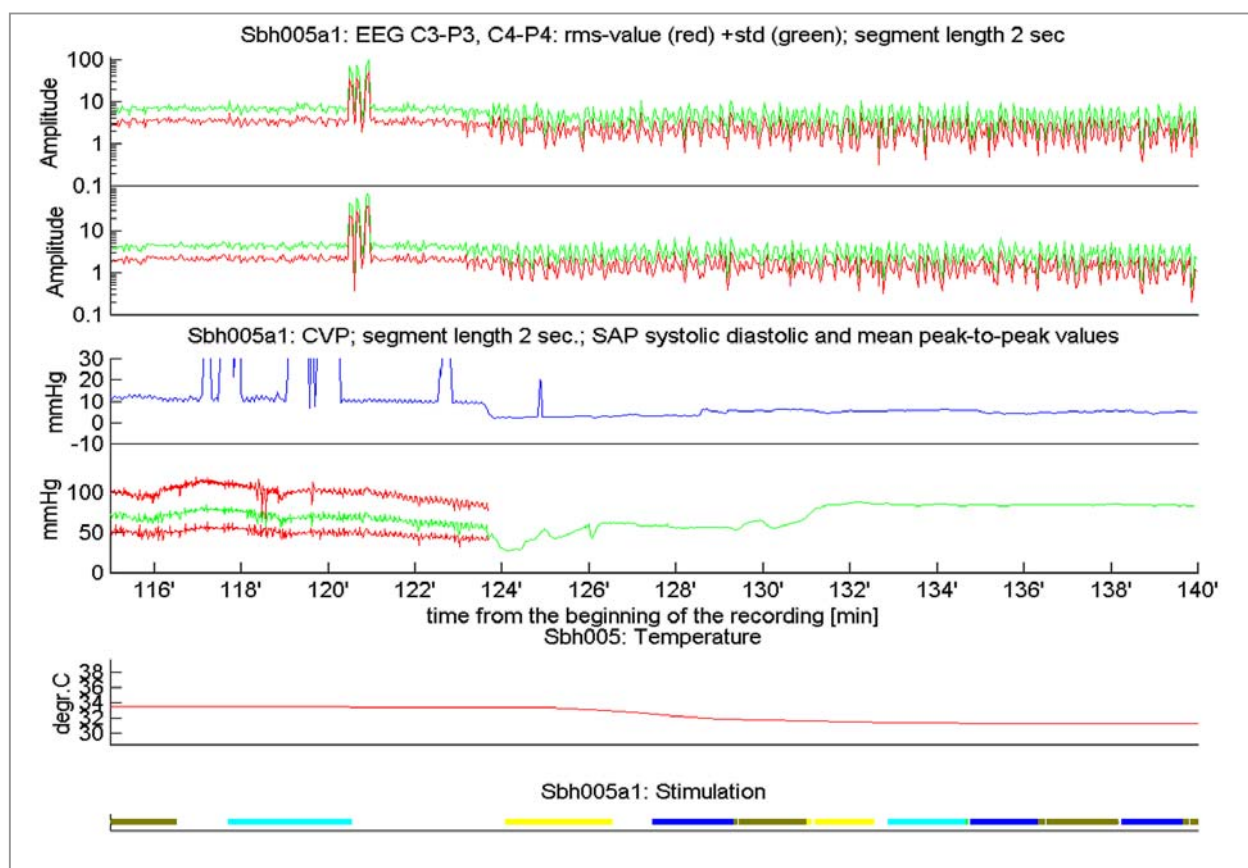
Konkreetselt uurimisobjektiks on viimastel aastatel olnud elektroentsefalogrammi (EEG) kasutamise võimalused patsientide monitooringul avatud südameoperatsiooni puhul. Statistiline analüüs osutab, et

1–3 protsendil patsientidest tekib sellise operatsiooni tagajärjel ajukahjustus. Põhjuseks on aju verevarustuse häired operatsiooni ajal. Analüüsidest tavapärastelt taoliste operatsioonide käigus mõõdetavate füsioloogiliste signaalide salvestisi ei ole võimalik kindlaks teha, millisel hetkel aju verevarustus on ohtlikult häiritud. EEG signaalis toimuvad muutused võiksid olla kasulikuks indikaatoriks aju verevarustuse hindamisel. Paraku on EEG interpreteerimine keeruline, eriti kui arvestada, et operatsiooni ajal mõjutavad seda veel mitmed muud tegurid, näiteks anesteesia.

Analüüsi aluseks olid kahes Londoni haiglas tehtud salvestised kokku rohkem kui 50lt patsiendilt. EEG signaali mõõdeti kahest lülitusest: C3-P3 ja C4-P4. Suhteliselt lihtsaid ja töökindlaid signaalitötluse algoritme kasutades töötati välja monitooringusüsteem, mis võimaldab ülevaatlilikult jälgida operatsiooni käiku eri füsioloogiliste parameetrite kombineerimise teel.

teem, mis võimaldab ülevaatlilikult jälgida operatsiooni käiku eri füsioloogiliste parameetrite kombineerimise teel.

Joonisel 5 on esitatud lõik salvestisest, kus vereringe lülitatakse ümber pumbale ja süda peatatakse. On näha, et arteriaalse vererõhu pulseerimine lakkab ja EEG signaalist arvutatud ruutkeskmise väärtuse variantsus kasvab. Viimane on tingitud nn “burst-suppression” signaalijoonise ilmumisest EEG-s. Tihti taoliste operatsioonide puhul patsiendi keha jahutatakse, et vähendada tundlikkust verevarustuse häirete suhtes. See ilmneb joonisel kehatemperatuuri kõvera languse näol. Kuna samal ajal mõõdeti ka eri stimulatsiooni allikate poolt esilekutsutud potentsiaale, mis võib samuti esile kutsuda muutusi EEG signaalis, on stimulatsiooni liigid ja kestvus ära näidatud värvikoodidega.



Joonis 5.

Näide väljatöötatud monitooringusüsteemist. Joonisel on esitatud signaalid (ülalt alla): EEG signaali ruutkeskmise väärtuse kahesekundilistest lõikudest (kaks kanalit), venoosne vererõhk, arteriaalne vererõhk (süstoolne, diastoolne ja keskmine väärtus), kehatemperatuur, stimulatsioon (originaalis monitoril värvikoodidega).

Väljatöötatud monitooringusüsteem on hinnatud füsioloogide poolt informatiivseks ja ülevaatlikuks. See on aidanud leida kasutatud salvestistes mitmeid huvitavaid nähtusi. Süsteemist on huvitunud ka anesteesiamonitore tootev firma.

Uurimustööd jätkuvad väljapakutud ideede arendamisel ja uute avastamisel selliste nähtuste ja parameetrite leidmise suunas, mis aitaksid detekteerida eelkõige südamele ja ajule ohtlikke häireid.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Meigas, K., Hinrikus, H., Kattai, R., Lass, J. Coherent photodetection for pulse profile registration. Proc. of Coherence Domain Optical Methods in Biomedical Science and Clinical Applications III 27-29 January, 1999, San Jose, California, 195-202.
2. Hinrikus, H., Lass, J., Meigas, K., Tepner, I. Meetod arteriaalse vererõhu pidevaks mitteinvasiivseks jälgimiseks. Kasuliku mudeli tunnistus EE 00287 U1, 15.04.2002.
3. Lass, J., Kaik, J., Meigas, K., Hinrikus, H., Blinowska, A. Evaluation of the quality of rate adaptation algorithms for cardiac pacing. *Europace*, 2001, 3, 221-228.
4. Blinowska, A., Pencionelli, A., Bardossy, A., Ollitreault, J., Walkanis, A., Wojtasik, A., Jaworski, Z., Wielgus, A., Sadowski, M., Hinrikus, H., Meigas, K., Lass, J., Kaik, J. Dispositif électronique non-tamment programmable a caractéristique de transfert non lineaire, et application a un dispositif de controle, et notamment a un stimulateur cardiaque. France patent FR 2 790 620, International patent publication number WO 00/52630, publ. 08.09.00.
5. Riipulk, J., Hinrikus, H. Microwave radiometry for medical applications. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 1999, 37, Suppl. 1, 99-102.
6. Lass, J., Tuulik, V., Ferenets, R., Riisalo, R., Hinrikus, H. Effects of 7 Hz modulated 450 MHz electromagnetic radiation on human performance in visual memory tasks. *Int. J. Radiat. Biol.*, 2002, 78, 10, 937-944.

CYBERNETICA AS TEGEMISTEST

Ülo Jaaksoo, Monika Oit, Aivar Usk

Cybernetica AS

PROLOOG

Reede. Osakonna nõupidamine. Selleks, et tellija saaks uue tulemüüri Barrikaad 2 õigeaegselt välis-turule jõuda, on arendustöö tähtaeg viidud äärmiselt lühikeseks. Esmaspäeval tuleb toode tellijale üle anda. Otsustati, et projekti meeskond töötab nädalava-hetusel. Keegi avaldas soovi riigitööle minna. Osa-konnajuhataja lubas projektimeeskonnale nädalava-hetusel suppi keeta.

Veeteede Ametilt on laekunud allkirjastatud leping, mille alusel Cybernetica koordineerib Eesti poolt uue laevaliiklussüsteemi (*Vessel Traffic Management and Information System*) väljaehitamiseks sõlmitud lepingut firmaga Holland Institute of Traf-fic Technology. Aastatepikkused kogemused navi-gatsioonisüsteemide infotehnoloogiliste alamsüs-teemide integreerimise vallas on leidnud tunnustust ja on taas rakendatud meresõiduohutuse riiklike ko-hustuste täitmise seisukohast kriitiliste projektide teenistusse.

Toimuvad läbirääkimised välisinvestoriga, kes plaanib Eestisse ehitada elektroonikatoodete tehase. Arutluse all on koostööleping, millega Cybernetica kohustub tegema vastavat arendustööd. Mõned le-pingu punktid, mis puudutavad intellektuaalset omandit ja Cybernetica toodete turustamist, kutsu-vad ettevaatusele ja vajavad muutmist. Leping jääb allkirjastamata.

Tarkvarapaketi DEKLARANT müük läheb endist-viisi hästi.

Mõni päev tagasi esitati Sertifitseerimise Riiklikule Registrile ajatempli teenuse osutaja registreerimis-taotlus. Ettevalmistuseks on juba kulunud mitusada tuhat krooni, mille tagasisaamine vastava teenuse müügist ei ole lähiajal reaalne. Kuid Eesti Asi vajab ajamist, ID-kaardi kasutusvaldkonda tuleb laiendada ning ID-kaardi kasutamine pikaajalise tõestusväärtusega digitaaldokumendi allkirjastamiseks on üks

oluline rakendus. Selleks aga on vaja ajatempli tee-nust.

AJATEMBELDAMINE

Digitaaldokumendile allkirja andmiseks on vaja luua avaliku ja salajase võtme paarid. Eesti ID-kaardi omanikel on võimalus lasta Sertifitseerimis-keskuses genereerida vastavad võtmed, salvestada salajane võti oma ID kaardil ja hoida avalik võti ser-tifikaadi kujul kõigile asjast huvitatutele kättesaadava-na Sertifitseerimiskeskuses. Salajase võtmega saab allkirjastada digitaaldokumente ja avaliku võt-mega on võimalik kontrollida, kas allkiri on ehtne.

Võtmete ja sertifikaadi eluiga on reeglina lühem kui seda on dokumendi eluiga. Kui näiteks, salajane võti on lekkinud, siis tuleb võtmepaar ja vastav sertifikaat tühistada. Selleks on vaja pöörduda Sertifitsee-rimiskeskuse poole, kes tühistab sertifikaadi ja saadab selle kohta vastava kinnituse. Sertifikaadi tühistamise võimalus tekitab aga uue probleemi – allkirja salgamise probleemi. Oletame, et keegi on allkirjastanud dokumendi, seejärel aga tahtlikult või tahtmatult kaotanud oma ID-kaardi (salajase võtme) ja seejärel teavitanud sellest Sertifitseerimiskeskust. Oletame, et see oli dokument, millele antud allkirja tahab isik salata, st väita, et ta ei ole seda allkirjasta-nud ja kui sellel dokumendil on tema salajase võt-mega moodustatud allkiri, siis seda on kaotatud ID-kaardiga teinud keegi teine. Salgamise vääramiseks on oluline kahe sündmuse – dokumendi allkirjasta-mine ja sertifikaadi tühistamine – järjestus. Juhul kui sertifikaadi tühistamine toimus enne dokumendi allkirjastamist, siis võis seda tõepoolest teha keegi teine ja mitte ID-kaardi omanik ning allkiri on tühi-ne. Kui aga allkirjastamine toimus enne sertifikaadi tühistamist, siis allkiri on moodustatud salajase võtmega, mille hoidmise eest vastutab ID-kaardi omanik, järelikult digitaalallkirja olemasolu eest do-kumendil vastutab ID kaardi omanik.

Kuna salgamise vääramine põhineb dokumendi allkirjastamise ja sertifikaadi tühistamise sündmuse ajalisel järjestusel, siis tõestusväärtusega digitaalallkirja moodustamiseks on ajatempli sissetoomine möödapääsmatu.

Ajatempel on kindla vorminguga elektrooniline andmekogum, mis aitab tõestada või kinnitab mingite sündmuste toimumise ajalisi suhteid, näiteks digitaalallkirja moodustamist ja ajatempli enda moodustamist.

Kõige lihtsam moodus on selline, kus nii allkirjastamise hetkel kui sertifikaadi tühistamise hetkel pöördutakse ajatempliserveri poole, mis vaatab kella ja vastab päringule, lisades ajatempliserverile saadetud allkirjale ja tühistamiskinnitusele ajanäidu. Selle meetodi üheks oluliseks puuduseks on see, et me peame ajanäiduallikat täielikult usaldama.

Tegelikult ei huvita meid üldse absoluutne aeg, vaid võimalus tõestada, et üks bitijada eksisteeris ajaliselts enne mingit teist bitijada. Matemaatikas on tuntud kollisioonivabad räsifunktsioonid, mis teisendavad suvalise pikkusega bitijadad mingi kindla pikkusega bitijadadeks, räsiks. Kollisioonivaba räsifunktsiooni on väga raske pöörata, st teisendatud bitijadast lähtebitijada saamine on peaaegu võimatu. Selgub, et kollisioonivabad räsifunktsioonid võimaldavad ajatempleid niimoodi kokku linkida, et iga ajatempel sisaldab eelmisena väljaantud ajatempli ja mõne varem välja antud ajatempli räsi. Viimaste aastate teoreetiline uurimistöö, mis on toimunud Ahto Buldase juhtimisel, ongi suunatud efektiivsete linkimisskeemide väljatöötamisele ja nende omaduste uurimisele [1,2,3].

SÜSTEEMIDE INTEGRATSIOONIST

Kuidas optimeerida Balti mere rasketes keskkonnatingimustes töötava navigatsioonitule automaatika-, side- ja positsioneerimissüsteemi toitva akumulaatori laadimisrežiimi selliselt, et aastaid hoolduseta töötama määratud akumulaatori vahetus uue vastu toimuks optimaalsel ajahetkel, ilma et rahvusvahelisel mereteel paiknev objekt ootamatu toitekatkestuse tõttu töövõime kaotaks, kuid samas kasutataks ära kogu akumulaatori ressurs?

Kui täpselt õnnestub ennustada võimsa tuletorni lambi jääkressurssi plinkimiskarakteristiku ja tööaja alusel ning millised oleks vastava elueamudeli ülejäänud võimalikud olulised sisendid?

Milline on pooljuht-valgusdiodide (Light Emitting Diodes, LED) optimaalne paigutus poitule kiirguris, mis tagaks tule küllaldase nähtavuskauguse ka soolases mereudus ja linnatulede taustal, jättes seejuures komponentide arvu ja voolutarbe sellisele tasemele, mis võimaldaks toodet maailmaturul konkurentsivõimelise hinnaga müüa?

Millistest materjalidest valmistada suurte temperatuurikõikumistega välitingimustes töötava, kliendi poolt nõutava pika elueaga toote korpuse erinevad komponendid ning kuidas tagada ühekorriga löögi- ja veekindlus, remonditavus ja komponentide piisav jahutus?

Kuidas organiseerida tõrkekindlat kauginfovahetust seirekeskuse ja piiratud toitevooluga autonoomse sardsüsteemi (poitule) vahel ning viimase kohtvõrgus minimaalse energiakuluga?

Selliseid ja sarnaseid väljakutseid esitab alatihti meie süsteemi- ja tootearendusprojektide argipäev, saades meie inseneriteadust viljevalt meeskonnalt nii mõnelgi juhul vastuseks ka patendikõlbuliku lahenduse. Käesolevaks hetkeks on navigatsioonisüsteemide osakonnal käes kaks kasuliku mudeli tunnistust, kolm taotlust on hetkel töötluses.

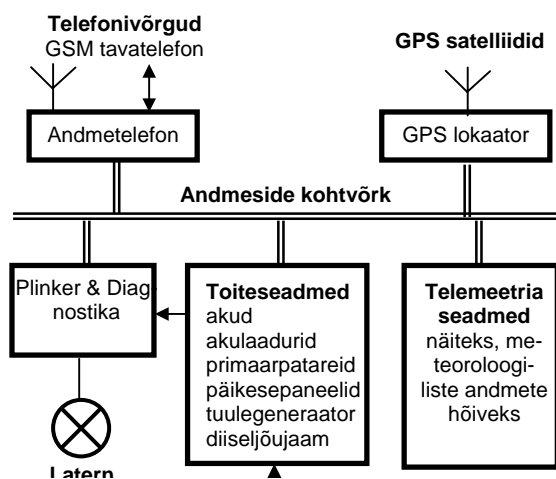
Ühena 72-st Rahvusvahelise Meremärgistuse ja Tuletornide Assotsiatsiooni (IALA) tööstusliikmest oleme keskendunud eelkõige merenavigatsioonisüsteemide temaatikale, kusjuures tegevusvaldkond ulatub lähteuringutest, tootearendusest, tootmistegusest ja süsteemide integreerimisest projektijuhitumise ning nõustamis- ja koolitusteenusteni. Mahuka arendustöö tulemusena on valminud seiretarkvarast ja navigatsioonivahendite riistvarast koosnev hajutatud mitmetasandiline Navigatsioonimärkide seire- ja juhtimissüsteem, mis pärast kasutuselevõttu Eesti Veeteede Ametis aitab ööpäevaringselt tõsta meresõiduohutuse taset Eesti vastutusallas, võimaldades samaaegselt ka kokkuhoidu personalikulude arvelt.

Tänapäevane poi- või majakasüsteem on suhteliselt keerukas elektronmoodulite kompleks, milles võib sisalduda mitu üksteisest sõltumatult töötavat mikroprotsessorjuhitavat plokki, mis vahetavad omavahel andmeid kohtvõrgu vahendusel. Mitte iga süsteemi tarvis pole kogu vajaminevat funktsionaalsust tagavaid valmismooduleid võimalik sisse osta, samas pole ka kogu juhtsüsteemi loomine nullist alates otstarbekohane, seetõttu tuleb süsteemi optimaalse hinna saavutamiseks enamasti teha mitmeid

otsuseid – kas luua vajaminev sõlm ise või omanda sobiv ostutoode ja integreerida see loodavasse süsteemi.

Funktsionaalsete moodulite elektrilise ja konstruktiivse ühildatavuse kõrval nõuab süsteemide projekteerimisel ja integreerimisel märkimisväärset tähelepanu ka informatiivne külg – pole sugugi haruldased juhtumid, kus innovatiivse toote turule paisanud nimekas firma võib olla mõnda standardit tavatult tõlgendanud ja seade üritab “rääkida” teises järjekorras baitidega kui võiks standardit tundes eeldada. Sarnaste ootamatuste õigeaegne tuvastamine eeldab lisaks heale õnnele ka läbimõeldud testimisplaani. Ka peab olema väljastatud kogu süsteemi tõrge mõne alamsüsteemi kapriissuse tõttu, mis vastutusrikaste süsteemide, nagu radarsüsteemi või ka võimsa tule torni automaatikasüsteemi puhul, nõuavad kriitiliste moodulite dubleerimist.

Joonis 1 annab ülevaate tulemärgi (tule torni või poitule) tüüpilisest lokaalsüsteemist, mille RS485-põhine kohtvõrk on sisuliselt avatud vajalikku funktsionaalsust tagavate moodulite lisamiseks. Tänu sellele on võimalik loodud arhitektuuri taaskasutada ka muude ülesannete lahendamiseks: laterna plinkimist juhtiv moodul – plinker – on programmeeritav vajaliku juhtfunktsiooni täitmiseks, mõõte- ja juhtmooduleid võib vastavalt vajadusele lisada.



Joonis 1.
Tulemärgi automaatikasüsteem.

Sidemoodul (“andmetelefon”) võimaldab objekti seiret, kaughaldust ja -juhtimist. Tänapäevases variandis on ka GPS positsioneerimis- ja süsteemse aja hoidmise funktsioonid viidud sidekontrolleri tasemele.

Kasutaja suhtleb sellise süsteemi komponentidega personaalarvuti vahendusel, mis seirekeskusena ka kogub ja analüüsib sõlmede olekuinfot. Loodud arhitektuur võimaldab mõningaste muudatuste järel rakendamist ka teistes seire- ja kaugjuhtimisülesannete lahendamist nõudvates valdkondades.

EPILOOG

Esmaspäev. Vaatamata nädalavahetusel tehtud pingelisele tööle uus toode – Barrikaad 2 – ei saanud ikkagi valmis. Töö alustamisel võetud riskid osutusid liiga suureks. Tellijaga alustati uusi läbirääkimisi teemal, kuidas toimida edasi.

Ajatepliserver töötab, nõutud formaalsused on täidetud ja Cybernetica on esimene täievoliline registreeritud ajatepliteenuse osutaja Eestis. Juba on Cyberneticas välja töötatud tehnoloogia äratanud rahvusvahelist huvi.

Cybernetica arendusosakondades on 58 töötajat, sealhulgas 11 teaduste doktorit. Kaks neist, Jan Villemson ja Peeter Laud, kaitsesid oma doktoritöö tänavu.

Cybernetica AS on ISO 9001:2000 kvaliteedisertifikaati omav rahvusvaheliselt evalveeritud teadus- ja arendusasutus.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Ansper, A., Buldas, A., Laud, P., Saarepera, M., Willemson, J. Improving the availability of time-stamping services. The 6th Australasian Conference on Information Security and Privacy – ACISP'2001, Sydney, Australia, July 2-4, 2001. LNCS 2119. Springer-Verlag, 2001, 360-375.
2. Buldas, A., Laud P. New linking schemes for digital time-stamping. The 1st International Conference on Information Security and Cryptology – ICISC'98. Seoul, Korea, 18–19 December 1998, 3–14.
3. Buldas, A., Laud, P., Lipmaa, H., Villemson, J. Time-stamping with binary linking schemes. Krawczyk, H. (ed.). Advances in Cryptology – CRYPTO '98, NCS 1462. Springer-Verlag, 1998, 486-501.

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL JA EHTUSKONSTRUKTSIOONIDE ARENG EESTIS

Valdek Kulbach

Tallinna Tehnikaülikooli ehitiste projekteerimise instituut

AJALOOLINE TAGASIVAADE

II MAAILMASÕJA EELNE PERIOOD

19. sajandiks oli konstruktsioonide tugevus- ja stabiilsusarvutus jõudnud tasemele, mis võimaldas normaalselt projekteerida erinevaid sillakonstruktsioone. Hooneehituses piirduti sel ajal suhteliselt lihtsate konstruktsioonidega, mille projekteerimisega said hakkama arhitektid ilma ehitusinseneride abita. Eestis oli juba 16. sajandi alguses püstitatud Euroopa mastaabis silmapaistvaid ehitisi (näiteks selle aja kohta rekordilise 159 m kõrgusega Oleviste kiriku torn), kuid need ehitati ilma teooria abita.

Ehitusmehaanika märkimisväärse arengu algus Eestis on seotud Peterburi Teedeinstituudis professorikutseni jõudnud ja 1921. aastal Eestisse naasnud Ottomar Maddisoni nimega. Ta oli klassikalise ehitusmehaanika väga hea tundja ning juba kogemustega sillaehitaja. Töötanud TTÜ-s ja selle eelkäijates ühe kõige autoriteetsema õppejõuna, õpetas ta välja esimese märkimisväärse ehitusinseneride-konstruktorite põlvkonna. Oma professoritegevuse viimastel aastatel õpetas ta ka selle aja kohta uudseid elastsusõpetuse ja ehitusdünaamika kursusi. Uusi tuuli TTÜ ehitusteaduskonda tõi Dresdenist 1934 naasnud August Komendant, kes kujunes Eesti üheks tähtsamaks insenerikonstruktsioonide projekteerijaks ning õpetas raudbetoonkonstruktsioone TTÜ-s 1937–1939, võttes esimesena kasutusele ajakohase plaatide teooria. 1944 lahkus ta Eestist ning töötas edukalt USA Euroopa väekoondises ning hiljem USA-s inseneri ja Pennsylvania Ülikooli õppejõuna. Ameerika Ühendriikidest 1935. aastal doktorikraadiga Eestisse naasnud Leo Jürgensoni teadustöö oli seotud pinnase stabiilsuse küsimustega. Enne II maailmasõda alustasid TTÜ-s oma tegevust O. Maddisoni assistentidena tulevased autoriteetid Heinrich Laul, Nikolai Alumäe ja Johannes Aare. Ennesõja-aastate teadustegevust Eestis iseloomustas

kohalike rakendusprobleemide lahendamise vajadus. Nii pidi O. Maddison silla- ja vundamendiehituse huvitavatele probleemidele ümber lülituma Eestile vajalikumale kohalike ehitusmaterjalide uurimisele, L. Jürgenson aga pidi asendama pinnase stabiilsuse probleemide uurimise sel ajal veel lapsekingades oleva hoonete soojapidavuse küsimuste lahendamisega.

20. sajandi esimesel poolel püstitati Eestis mitu silmapaistvat ehitist. Neist tähtsamateks on järgmised.

- 1904 ehitatud Kasari jõe sild, mis oli selle aja kohta pikim (308 m) raudbetoonsild maailmas.
- 1917 ehitatud Tallinna sadama vesilennukite angaari kolmest positiivse kõverusega raudbetoonkoorikust (36,4 x 36,4 m) koosnev katusekonstruktsioon, mis on üks varasemaid kuplist erinevaid raudbetoonkoorikuid maailmas.
- Narva raudteesild, mis ehitati 1923. aastal 107 m sildega sõrestik -konstruktsioonina O. Maddisoni järelevalve all ning hävis 2. maailmasõjas.
- Türi raadiojaama 197 m kõrgune tornmast, mis ehitati 1937. aastal ning hävis II maailmasõjas.
- Kadrioru staadioni tribüüni huvitavalt kujundatud varikatus 1937. aastast – selle aja kohta märkimisväärse 12 m konsooli pikkusega.

EHITUSTEADUS JA -KONSTRUKTSIOONID NÕUKOGUDE OKUPATSIOONI PERIOODIL

Ennesõja-aegses Eestis polnud väitekirjade kaitsmine ega teaduskraadide taotlemine ehitusalal populaarne. Sõjajärgsetel aastatel ellu viidud NSV Liidu kõrgkoolisüsteem, mis jätkas Tsaari-Venemaa traditsioone, nõudis aga professorikutse saamiseks teadusdoktori ja dotsendikutse saamiseks teaduskandidaadi kraadi. Üliõpilaste arvu märgatava kasvu tingimustes oli 1950ndatel aastatel vaja oluliselt täiendada sõja-aastatel kahanenud õppejõudude koossei-

su. Teaduskraadide taotlemise vajadus viis ehitusmehaanika ja -konstruktsioonide ala uurimistöö märgatavale elavnemisele. Suunaandjateks kujunesid N. Alumäe, Hugo Oengo ja H. Laulu kandidaativäitekirjad, millele järgnesid N. Alumäe (1951) ja H. Laulu (1955) doktoritööd. Selleks ajaks oli juba alguse saanud teoreetiliselt huvitavate ja majanduslikult otstarbekate õhukeseseinaliste ja ruumsete konstruktsioonide töö uurimine. Selle ala uurimistöö tulemuste alusel omistati 1950ndate aastate esimesel poolel tehnikakandidaadi kraad Leonid Allikasele, Enno Soonurmele ja J. Aarele.

Raudbetoonkonstruktsioonide ala uurimistööde aluseks oli paljudel juhtudel H. Laulu loodud nihkejõudude aproksimatsiooni meetod silinderkoorikute arvutamiseks. Seda täiendati koorikute põikjõukindluse uurimisega. Nende alade uurimistöö alusel said kandidaadikraadi praegused õppejõud Allan Sumbak, Vello Otsmaa ja Väino Voltri. Ülo Tärno laiendas oma doktoritöös (1983) nihkejõudude aproksimatsiooni meetodit teistele koorikutüüpidele. V. Otsmaa ja tema õpilaste hilisemates töödes lahendati lühikeste raudbetoonkonsoolide kandevõime olulisi küsimusi. Raudbetoonkoorikute alaste uurimistööde tulemusi kasutati mitmete koorikkatuste projekteerimisel; nendest tähtsamateks on Viljandi ja Narva mööblivabrikute, praeguse välisministeeriumi hoone saali ning TTÜ auditooriumi katusekonstruktsioonid.

Teraskonstruktsioonide alases uurimistöös oli pioneeriks J. Aare, kelle doktoriväitekirja (1971) andis aluse õhukeseseinaliste talade ja raamide projekteerimiseks, võttes arvesse ristlõike seina kriitilise järgset töötamist ning vööde ja ribide jäikuse mõju konstruktsiooni kandevõimele. Selle töö meetodikat rakendati hiljem ka õhukeseseinalistele koorik- ja tahkkanduritele. J. Aare tööde jätkajateks olid tema juhendamisel kandidaadikraadi kaitsnud praegused TTÜ professorid Kalju Loorits ja Siim Idnurm. J. Aare uurimistulemuste peamisteks rakendusteks on tema projekteeritud Kadrioru tennishalli 55 m sildega terasraamid ning koos käesoleva kujutise autori- ja projekteeritud jalakäijate-suusatajate sild Nõmmel. Tartu jalakäijate terrassild kujutab endast suurima sildega (86 m) Eestis seni ehitatud konstruktsiooni. Teraskonstruktsioonide omaette uurimissuunaks oli eriti raskete seadmete ja konstruktsioonide montaaži- ja koostamisprobleemide lahendamine. Koostöös Moskva asjaomaste asutustega loodi J. Aare ja V. Kulbachi osavõtul kõrged masttõstukid kuni 1000 t raskuste reaktorite monteerimiseks ning

lahendati tõstetavate seadmete koorikkesta haardesõlmede arvutuse ja konstrueerimise küsimusi. Suurte vedelikumahutite montaažil on üheks keskseks küsimuseks rullitud korpuse ääreala järeldeformeerimine projekteeritud kõverusele. Selle probleemi uurimise tulemusel konstrueeriti originaalne painutusseade, mida kasutati ka Muuga naftaterminali suuremahuliste reservuaaride montaažil.

Tallinna laululava kõlaekraani kavandamise aegu ilmusid maailma ehituspraktikasse esimesed kaas-aegsed rippkatused. Seda kasutas oskuslikult arh. Alar Kotli, kes koostöös prof. H. Lauluga lahendas kõlaekraani omapärase sadulakujulise rippkatuse. Tallinna laululava kõlaekraani projekteerimise ja ehitamisega seotud probleemid said aluseks rippkonstruktsioonide pikaajalisele uurimistööle TTÜ-s, mille tulemusel koostati mitu kandidaativäitekirja (Jüri Engelbrecht, Karl Öiger, Arvi Ravasoo, Ivar Talvik, Peeter Paane) ning käesoleva kirjutise autori doktoriväitekirja. Töötati välja meetodika, mis võimaldab arvesse võtta trossidevõrgu ja kontuuri koostööd. Lisaks sadulakujulisele võrkrippkatusele koostati meetodika üksikkaabli ja kahest kaablist moodustatud eelpingestatud tasapinnalise konstruktsiooni arvutamiseks.

K. Öigeri selle perioodi uurimistöö keskendus laudadest kokkunaelutatud puitkoorikute töö uurimisele. Sellele lisandus trossidevõrgu ja puitkooriku või telkkatuse koostöö uurimine. Selle töö tulemusi kasutati mitme puitkooriku ja telkkatuse projekteerimisel koostöös selleaegse projekteerimisinstituudiga "EKE Projekt".

EHITUSKONSTRUKTSIOONIDE JA EHITUSTEADUSE ARENG PÄRAST EESTI ISESEISVUSE TAASTAMIST

Eesti iseseisvuse taastamisele järgnenud esimesi aastaid iseloomustas ehitustegevuse järsk vähenemine ning suurte ehitus- ja projekteerimisasutuste lagunemine. See viis omakorda märgatavale tööpuudusele ehitusinseneride peres. Mõne aasta jooksul kujunesid aga välja uued ehitusfirmad ning projektasutused. Mitmed neist on asutatud rahvusvaheliste ettevõtetenä. Ehitus- ja projekteerimistööde mahu kiire suurenemise ja vanema põlvkonna inseneride tööst eemalejäämise tõttu on olukord radikaalselt muutunud – projekteerimisvõimelistest inseneridest on suur puudus. Nende töötasugi ületab märgatavalt keskastme juhtide oma. Nii meil kui ka välisriikides teaduskraadi saanud noori insenere ei

rahulda näiteks kõrgkooli professori töötasu. Suuresti on muutunud püstitavate ehitiste nomenklatuur. Varem vohanud suurpaneelalammute ehitus on soikunud. Möödunud sajandi viimase aastakümne tähtsamateks ehitisteks kujunesid sadamate reisijate- ja õliterminalid, kütusetanklad ja -reservuaarid, ärikeskused, panga- ja büroohooned ning transpordi- ja sideehitised. Neile lisandusid ka mõned sakraalehitised.

Alates eelmise sajandi lõpuaastatest on märgatavalt suurenenud elamuehitus. Hooneehituses on tähtsal kohal ka renoveerimistööd. Siin pole põhjuseks mitte ainult hoonete funktsioonide muutumine, vaid suurel määral ka nende soojapidavuse olulise suurendamise vajadus. Nimelt soodustasid NSV Liidu oludes üliodavalt müüdnud kütus ja energia ning ehituse madalad piirmaksumused väikese soojapidavusega ja madala kvaliteediga hoonete püstitamist. Eesti tänased raudbetoonitehased on võimelised tootma NSV Liidu oludega võrreldes palju suurema pikkuse ja nomenklatuuriga, aga ka kõrgema kvaliteediga elemente.

TTÜ struktuursete ümberkorralduste tulemusel asutati ehitusteaduskonnas ehitiste projekteerimise instituut, mis koondab raudbetoonkonstruktsioonide, puit- ja plastkonstruktsioonide, teraskonstruktsioonide, geotehnika ning arhitektuuri õppetoolid. Struktuursete õnnestunud ümberkorralduse kõrval viidi aga ellu ebaõnnestunud õppekorraldus. Valdavalt ilma täiendava magistriõppeta ning suhteliselt suure tehnikavälise üldõppega 4-aastane bakalaureuseõpe viis arvukalt ellu oma erialal poolikult koolitatud inimesi.

Ka ehituserialade (nagu ka teiste klassikaliste inseneri-, eeskätt mehaanika- ja energeetikaerialade) õppesüsteemi ühendamise uute spetsiifiliste informaatikaaladega on allakirjutanu arvates ebaõige. Need teadmised, mis on informaatika aladel lõppeesmärgiks, on klassikaliste insenerialade jaoks vaid abivahendiks. Nii näiteks on ehitusprojekteerimise ala õppekavades lisaks matemaatika, kujutava geomeetria, füüsika ja informaatika kõrval tähtsal kohal mitte ainult spetsiifilised teoreetilised ained (ehitustaatika ja -dünaamika, elastsus- ja plastsusõpetus, plaatide ja koorikute teooria, pinnasemehaanika, raudbetooni ja pingebetooni teooria, ehitusfüüsika), vaid ka ehitusega seotud kõrvalained (arhitektuur, ehitusmajandus ja juhtimine, ehituskommunikatsioonide kursused jne). Õppetöö väga tähtsaks osaks on iseseisva tööna koostatavad kursuseprojektid. Oma mahult saab ehitusala insenerikoolitust võrrel-

da vaid meditsiiniõppega. Võõrastust tekitab ka diplom kui inseneriharidust tõendava dokumendi devalveerimine ning asendamine ebamäärase tunnistusega. Eriti tekitab võõrastust olukord, kus Kõrgema Tehnikakooli lõpetajad saavad inseneridiplomi, TTÜ lõpetajad vaid lõputunnistuse. Kõrgema Tehnikakooli õppejõud saavad suhteliselt kergesti professori ametinimetuse, samal ajal kui TTÜ ehitusteaduskonnas on professori nimetusest ilma jäetud mitme eriala parimad asjatundjad. Kahjuks on vajaliku tähelepanuta jäänud Põhjamaade kõrgkoolide õppekorralduse ja õppejõudude konkursi positiivsed kogemused.

TTÜ ehitiste projekteerimise instituudi teadustegevus taasiseseisvunud Eestis on suurel määral kaldunud rakendusuuringute suunda. Põhiülesandeks kujunes Eesti ehituskonstruktsioonide projekteerimismuutuste koostamine vastavalt Euroopa ühtsele Eurokoodeksi süsteemile. Lisaks varasematele normidele tuli koostada ka normid konstruktsioonide arvutamiseks tulekahju oludes. Mitmeid norme on täiendatud arvutusnäiteid sisaldavate rakendusjuhiste ja juhenditega. Pärast mõningat vaheaega käivitus üleminekuperioodil uuesti instituudi koostöö Eestis tegutsevate ehitus- ja projekteerimisfirmadega. Tähtsamateks probleemideks kujunesid suurte mastide ja reservuaaride, aga ka sildade ja suuremate hoonete ehitamise ja rekonstrueerimise küsimused.

Koostöös Rootsi ehitusfirmaga viidi läbi laiaulatuslik eksperimentaalne uuringud uut tüüpi seenlaadega. Teoreetilise kallakuga teadustegevus jätkus erinevate rippkonstruktsioonide ja kergete puitkonstruktsioonide uurimisel. Tähtsamateks teadustulemusteks tuleb lugeda K. Öigeri doktorikraadi kaitsmist Tampere Tehnikaülikoolis 1993. aastal ja Indrek Tärno litsentsiaadikraadi kaitsmist Rootsi Kuninglikus Tehnoloogiainstituudis. Neile lisandus arvukalt magistratöö kaitsmisi kohapeal. Rippkonstruktsioonide uurimise käigus tõestati ja formuleeriti tingimused pingete superpositsiooni printsiibi rakendamiseks geomeetriliselt mittelineaarsete konstruktsioonide arvutamisel. Erinevate rippkonstruktsioonide arvutamiseks töötati välja kontinuaalsel mudelil põhinev ühtne arvutusmetoodika.

Arenes koostöö Soome kõrgkoolide ja Riikliku Tehnikauuringute Keskusega, Rootsi tehnikaülikoolidega, Lausanne'i Tehnikaülikooliga, Leedu, Läti ja Saksamaa tehnikaülikoolidega. Koostöö Tampere Tehnikaülikooli ehitusteaduskonnaga leidis äramärkimist selle ülikooli audoktori tiitli omistamisega käesoleva kirjutise autorile. K. Öiger, V. Kulbach ja

I. Talvik on korduvalt esinenud rahvusvahelistel konverentsidel Euroopas, Ameerikas ja Aasia maa-des.

Taasiseseisvunud Eestis püstitatud huvipakkuvamateks ehitisteks on 1984. aastal valminud Tartu laululaeva kõlaekraan, Tartu jalakäijate terassild, mis käesoleva kirjutise autori andmetel on seni suurima (86 m) sildega konstruktsioon Eestis ning 2001. aastal valminud Saku Suurhall Tallinnas, mis on suurima (ca 70 m) sildega hoone Eestis. Kõigi nende konstruktsioonide projekteerimisel osalesid TTÜ ehitiste projekteerimise instituudi professorid – toodud järjekorras vastavalt J. Aare ja V. Kulbach, V. Kulbach ja K. Õiger ning K. Loorits. Märkimist väärivad ka Viljandi ripsilla rekonstrueerimise projekt (V. Kulbach ja S. Idnurm) ning Kurgja ripsilla projekt (S. Idnurm). Samas tuleb ära märkida ka mõne välismaise firma koostatud teraskonstruktsioonide projektis esinevaid tõsiseid vigu. Nendest tähtsamateks on Moskvas projekteeritud mitme kütusereservuaari varisenud või tugevdamist nõudnud konstruktsioonid, Soomes projekteeritud Tartu Ülikooli spordihoone tugevdamist vajanud raamid ja Soomes projekteeritud Neste kütusetanklate varikatuste konstruktsioonid.

EESTI EHITUSE NING TTÜ EHITISTE PROJEKTEERIMISE INSTITUUDI TEADUSTÖÖ ÜLESANDED LÄHITULEVIKUKS

Tänase Eesti üheks tähtsamaks ülesandeks on tasakaalustatud regionaalse arengu ja riigi majanduse säästva arengu tagamine. See puudutab otseselt ka Eesti ehitustegevust. Sellele nõudele vastav ehitustegevus on arusaadavalt seotud materjalide ja energia ökonoomse kasutamisega, aga ka taastuvate ressursside laiema rakendamisega. Juba on alustatud Eesti jõgedel paiknevate hüdroelektrijaamade taastamisega. Seda soodustab kaasaegsete efektiivsete

madalsurveturbiinide olemasolu. Senisest suuremat tähelepanu tuleb pöörata ehitusmaterjalide otstarbekale valikule. Nähtavasti tuleb eelistada erinevate kergkonstruktsioonide, aga ka puitkonstruktsioonide kasutamist. Puitarindite efektiivsust saab suurendada liimpuidust talade ja plaatide, aga ka terase või betooniga koos töötavate komposiitsüsteemide kasutamisega, samuti elementide eelpingestamise teel. Teraskonstruktsioonides tuleb eelistada õhukeseseinaliste ja kõrgtugevatest trossidest konstruktsiooni-elementide kasutamist. Nende suundade arendamine nõuab vastavat uurimis- ja arendustegevust. TTÜ ehitiste projekteerimise instituudi õppetoolide tänane teadustegevus vastab põhiliselt nende ülesannete lahendamise vajadusele.

Tõmbelused õppesüsteemi väljaarendamisel on loodetavasti jõudmas lõppfaasi – õppetegevuse põhivormiks kujuneb nähtavasti katkematu bakalaureuse-magistriõpe, mis võimaldab koolitada inseneritegevuseks võimelisi spetsialiste. Stabiliseeruva õppetegevuse baasil saab enam tähelepanu pöörata teadus- ja arendustegevuse aktuaalsetele probleemidele. Puitkonstruktsioonide alal pööratakse lisaks puitdekiga vantsildade uurimisele tähelepanu ka konstruktsioonide kahjustuste uuringutele puithoonetes ja kahjustuste kõrvaldamise abinõudele. Geotehnika suunal on päevakorras suure läbimõõduga pikkade puurvaiade kandevõime eksperimentaalsed uuringud ning vastava arvutusmetoodika täiustamine.

Seoses Saaremaa püsiühenduse esialgse projekteerimisega arendatakse edasi ripsildade arvutusküsimusi, pöörates peatähelepanu nn “iseankurduva” silla uurimisele. Seejuures on põhiprobleemiks lisaks paindele surutud jäikurtala stabiilsuse küsimus. Teoreetiliste uuringute kõrval jätkuvad mudelkatsetused. Lähima aja kavas on ka kombineeritud rippvantsüsteemi käitumise uurimine. Sellise komposiitsüsteemi kasutamine võimaldab lihtsustada silla montaaži.

MATERJALIDE JA MATERJALITEHNOLOOGIAALASTEST UURINGUTEST TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO LIS

Priit Kulu

Tallinna Tehnikaülikooli materjalitehnika instituut

Uued materjalid ja materjalide kõrgtehnoloogiad on üks neljast prioriteetsest teadusvaldkonnast, milledeks materjaliteaduse kõrval on infotehnoloogia, bio- ja geenitehnoloogia ning keskkonnatehnoloogia. Seda ka Tallinna Tehnikaülikoolis, kus materjalialaste uuringutega tegeldakse mitmes instituudis ja keskuses (materjaliteaduse instituut, materjalitehnika instituut, polümeerimaterjalide instituut, materjaliteaduse valdkonnas TTÜ-s on saanud kõrge hinde 2002. a läbi viidud teaduse evalveerimisel ning teadustöö tulemused on leidnud tee ka praktikasse.

Läbi aastate on uute materjalide ja materjalitehnoloogiaalaste uuringute põhiliseks läbiviijaks mehaanikateaduskonnas olnud materjalitehnika instituut. Teadus- ja arendustegevuse osakaal instituudi tegevuses moodustab ca 70% (rahalisest mahust). Selle tööga on hõivatud 11 teadurit, 7 õppejõudu ning arvukalt magistrante ja doktorante.

ALUS- JA RAKENDUSUURINGUD

UURIMISVALDKONNAD JA UURIMISGRUPID (GRUPIJUHI D):

- ✓ pinded ja pinnatehnoloogia (Priit Kulu);
- ✓ materjalide desintegraatoritehnoloogia (Dmitri Goljandin);
- ✓ materjalide ja toodete katsetamine (Riho Päärsoo);
- ✓ kulumis- ja korrosioonikindlad pulbermaterjalid (Jakob Kübarsepp, Jüri Pirso);
- ✓ kulumiskindlate materjalide triboloogia (Irina Hussainova);
- ✓ materjalide liitetehnoloogiad (Andres Laansoo).

PINDED JA PINNATEHNOLOOGIA

Pinded, õhukesed mikromeetrilised ja paksud (kuni mõni mm) on leidmas üha laialdasemat kasutust nii uute toodete (tööriistad, masinaosad) tugevdamisel kui ka kulunud detailide jms taastamisel. Enam kui

viisteist aastat on tegeldud kulumiskindlate pinnetega, eelkõige uute pindmaterjalide ja neist pinnete saamisega, pulberpinnete kulumisega ning pinnete valikuga seotud küsimustega.

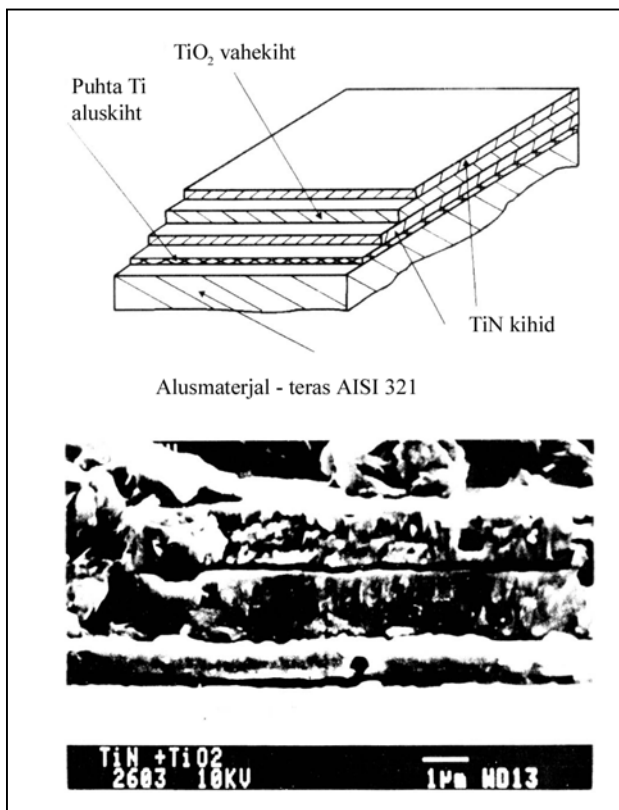
Töö uute pindmaterjalide ja neist pinnete loomisel on toimunud põhiliselt kahes suunas:

- mitmekihiliste ja struktuursete õhukeste (kuni 10 µm) füüsikalise aurustussadestuse (PVD) teel saadud titaannitriidsete (TiN) pinnete tehnoloogia ja omaduste uurimine;
- kulumiskindlate kiirleekpihustus- (*high velocity oxy-fuel* – *HVOF*) ja pihustussulatuskomposiitpinnete saamise tehnoloogia ja omaduste uurimine.

Esimesel uurimissuunal on uurimisobjektiks õhukesed PVD-pinded. Pinnete korrosioonikindluse tõstmiseks on mindud defektivabade homogeensete monopinnete ja mitmekihiliste kombineeritud pinnete (titaan-titaanoksiid-titaannitriid) suunas. Eriomadustega pinnete loomisel on aga orienteeritud sammasstruktuuriga sadestuspinnete ja duplekspinnete kasutamisele (joonis 1).

Teisel uurimissuunal on põhitähelepanu pühendatud järgmistele küsimustele:

seniste kulumiskindlate pinnete korrosioonikindluse tõstmiseks sideainena puhaste metallide pulbrite (Co, Ni) asemel legeersulamite ülipeente pulbrite kasutamine. Tööd viiakse läbi Põhjamaade (Norra, Rootsi, Soome ja Eesti) ühisprojekti tingnimetusega NOVCOAT raames. TTÜ materjalitehnika instituudi osa projektis seisneb desintegraatoritehnoloogia abil alla 3–5 µm osise suurusega pulbrite saamises, nende omaduste (osiseline koostis, eripind, morfoloogia jt) uurimises ning volframkarbiidmetall-süsteemi aglomereeritud komposiitpulbrite saamises pihustamise-kuivatamise-paagutamise teel. Viimane viiakse läbi Fraunhoferis (FhG);



Joonis 1.
Mitmekihiline titaani baasil eriomadustega pinne.

jäätmekõvasulami korduvkasutus: kasutatud kõvasulamist kõvasulampulbri saamine desintegraatorjahvatamise teel, pulbri omaduste uurimine, pulbrist aglomeratsiooni teel pihustuspulbrite ning neist kiirleekpihustuspinnete saamine;

tööks abrasiiverosiooni tingimustes pinnete struktuuri optimeerimine ja pinnete valiku põhimõtted. Tööks keerukates löökerosiooni tingimustes on välja pakutud nn topeltarmeeritud struktuur (*double-cemented structure*), selle realiseerimise teed, pinnete valiku tribotehnilised, struktuursed ja kvalitatiivsed (kõvadus-sitkus) parameetrid ning vastavad valikudiagrammid.

Väljundiks tööstuses pinnete uurimisvaldkonnas on paberimasinate võllide taastamine ja tugevdamine kulumiskindlate pinnetega AS-le Kohila Paber, õhkjahuti bimetalsete torulaudade tehnoloogia AS-le

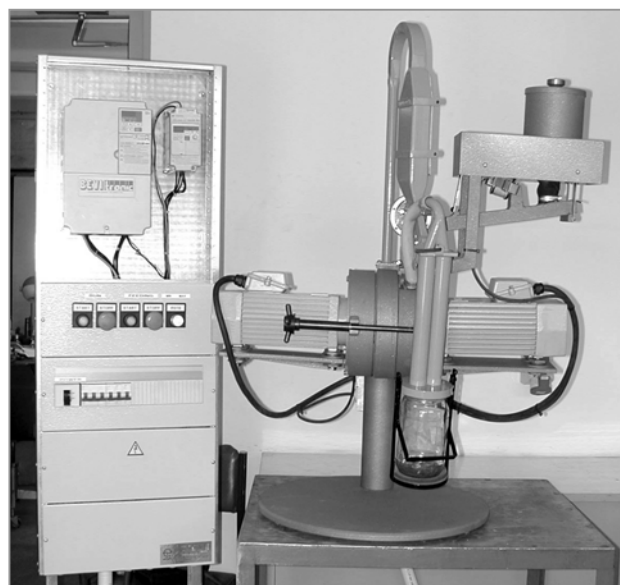
Tallinna Masinatehas, tehnoloogilise aparatuuri kaitsmine barjäärpinnetega AS-le Silmet jpt.

DESINTEGRAATORID JA DESINTEGRAATORTEHNOLOGIA

Antud uurimisvaldkonnas on jätkatud töid kahel suunal:

- desintegraatorite edasiarendus, jahvatusseadmete ja jahvatusprodukti klassifitseerimise efektiivsuse tõstmine;
- desintegraatorjahvatuse uute kasutusvaldkondade uurimine.

Esimesel suunal on välja töötatud tänapäeva tehnikal – sagedusmuunduritega kiirelektr mootoritel baseeruv laboratoorne desintegraator (joonis 2), mis võimaldab saavutada jahvatamiserienergiad enam kui 20 kJ/kg ja jahvatada praktiliselt igasuguseid materjale – elatsetest haprateni. On valmistatud kummi jahvatamise eksperimentaalseadmed ja projekteeritud tööstuslik seade OÜ-le Kiviõli Keemiatööstus. Ülipeente materjalide saamiseks on teoreetiliste uuringute alusel välja töötatud tsentrifugaalprintsibil töötav laboratoorne ja tööstuslik ülipeenjahvatusseade.



Joonis 2.
Laboratoorne desintegraator DSL-175.

Tänu seadme erikonstruktsioonile ja tööorganeil kaitsva jahvatatava materjali kihi moodustumisele on võimalik saada ülipuhtaid ja ülipeeni (alla 1 µm) jahvatusprodukte. See on tinginud ka jahvatusprodukti klassifitseerimisseadmete edasiarendamisest. Plastsetest metallidest desintegraatorjahvatamise teel saadud peenpulbrite puhul ei sobi sõelklassifitseerimine (praktiliselt alla 20 µm osise korral kõlbmatu) ega ka õhkklassifikaatorid. Seda silmas pidades on välja töötatud tsentrifugaalpõhimõttel töötav jahvatusprodukti klassifikaator, mis võimaldab saada peente pulbrite (alla 5 µm) kitsa osiselise koostise jaotuse (suurusega 2...5 µm osiste osakaal kuni 80%). Jahvatusprodukti osiselise koostise määramiseks on võetud kasutusele lasergranulomeetria seade, mis võimaldab uurida pulbrilisi materjale osise suurusega 0,3–600 µm. Jahvatusprodukti osise morfoloogia kirjeldamiseks on arendatud edasi kujutise analüüsimeetodeid ja võetud kasutusele matemaatilisi meetodeid osakese kuju kirjeldamiseks. Siin toimub tihe koostöö Slovakkia TA Materjaluuringu Instituudiga (prof M. Besteri) ja Eesti Sisekaitseakadeemiaga (prof H. Käerdi).

Teisel uurimissuunal – desintegraatorite ja desintegraatorjahvatuse uued kasutusvaldkonnad – on põhitähelepanu pühendatud desintegraatoritehnoloogia kasutamisele jäätmetöötles. Olgu näitena siin toodud:

- ✓ jäätmekõvasulamist kõvasulampulbri saamine selle edasiseks kasutamiseks komposiitpindepulbri materjalina;
- ✓ mitmesuguste metallide ja sulamite tööstuslike jäätmete – laastu ümbertöötamine metallipulbriks selle edasiseks kasutamiseks pulbermetallurgias;
- ✓ akrüülplastiku tööstuslike jäätmete ümbertöötamine selle edaspidiseks kasutamiseks plastikust toodete valmistamiseks;
- ✓ põllumajandusjäätmete ümbertöötamine nende keevkihtpõletamiseks mobiilsetes energiajäämades;
- ✓ autokummide tükeldamine ja jahvatus nende edasiseks kasutamiseks kummipuruna või pürolüüsiga kütteõli tootmiseks jpt.

KULUMISKINDLAD PULBERMATERJALID JA KULUMINE

Enam kui neli aastakümnet on olnud materjaliuurijate uurimisobjektiks abrasiiverosioonkulumine. On tegeldud põhiliste pulbermaterjalide ja -pinnete

abrasiiverosioonkulumisega: materjalide ja pinnete suhteline kulumiskindlus, kulumismehhanism, materjalide ja pinnete valik tööks konkreetsetes kulumistingimustes. Uudseks teemaatikaks on materjalide ja pinnete abrasiiverosioonkulumine kõrgetel temperatuuridel – kuni 700 °C, võimaldamaks määrata nende kasutust energeetikaseadmes jm.

Kõrvuti abrasiiverosioonkulumisega uuritakse ka teisi kulumise meetodeid:

- ✓ pulbermaterjalide ja -pinnete abrasiiv- ja hõõrdekulumist,
- ✓ pulberkõvasulamite korrosioonerosioonkulumist;
- ✓ materjalide ja kaitsekilede nanotriboloogiat (koostöö Tartu Ülikooli Füüsika Instituudiga).

Sihtteema raames on toimunud teadustöö neljal uurimissuunal:

- projekteeritud omadustega kulumiskindlad pulbertribomaterjalid;
- materjalide tribomeetriliste karakteristikute uurimine;
- miniatuursed täppis- ja biotribosüsteemid;
- pinded tribotehnoloogias.

Esimesel suunal on uuringud suunatud karbiidkermiste (Cr_3C_2 , WC, TiC, B_4C) kulumiskindluse suurendamisele. Tehnoloogia valdkonnas on mindud TiC-NiMo ja Cr_3C_2 -Ni kermiste legerimisele muldmetallide (Y, Ce, Nd) oksiididega ja Cr_3C_2 -Ni kermiste legerimisele molübdeeni ja booriga. Legerimine molübdeeni ja booriga võimaldab tõsta Cr_3C_2 -Ni kermiste erosioonikindlust 2–4 korda.

On uuritud erinevatel meetoditel saadud (astmeline ja otsesüntees) Cr_3C_2 pulbri baasil valmistatud kermiste omadusi ja võrreldud neid uue, TTÜ-s väljatöötatud Cr_3C_2 baasil kermiste reaktsioonpaagutamise teel saadud kermiste omadustega. Viimased on peenema ja ühtlasema struktuuriga ning ligi 2 korda suurema erosioonikindlusega. Samas on uuritud sulami ja struktuuri moodustumist TiC ja Cr_3C_2 baasil kermiste paagutamisel.

On alustatud uuringuid nanostruktuursete WC, TiC ja Cr_3C_2 baasil kermiste valmistamiseks. Selleks on valmistatud kõrgenergeetilised jahvatusseadmed – atriitorveskid ja välja töötatud režiimid TiC nanopulbrite (osise suurus alla 100 nm) saamiseks mehaanilise sünteesi teel atriitoris toatemperatuuril.

On selgitatud välja Sinter HIP-tehnoloogia positiivne mõju survetöötlemisel kasutatavate kermiste töökind-

luskarakteristikutele, mis põhineb eksperimentidel katsestantsil perspektiivsete TiC-baasil kermiste uurimiseks (joonis 3).

On uuritud termotöötuse mõju iselevi-kõrgetemperatuursünteesi meetodil toodetud kergkermistes B_4C -Al-sulam toimuvatele faasimuutustele, mis mõjutavad oluliselt materjali tribokarakteristikuid.

Karbiidkermiste väsimuskarakteristikute uurimisel on selgitatud välja TiC-FeNi kermiste väiksema väsimustundlikkuse põhjuseid võrreldes WC-Co ja TiC-NiMo kermistega – karbiiditerade morfoloogia ja metallsideaine struktuuri erinevused jt.

Teisel suunal on senisest suuremat tähelepanu pööratud erinevate kulumisliikide mikrostruktuursete ja füüsikaliste aspektide – termomehaanilised nähtused, mikrodefektid jms – väljaselgitamisele. Karbiidkermiste abrasiiv- ja abrasiiverosioon-kulumiskindluse uurimisel on tuvastatud kahe kulumisliigi vaheline korrelatsioon. Kermiste kulumise uurin-gutel kombineeritud tingimustes – piiskerosioon-korrosioonil ning korrosioonil ja piiskerosioonil on välja selgitatud kulumise kineetika ja mehhanism. Selleks töötati välja vastav katsemetoodika. On välja selgitatud kergkermise B_4C -Al-sulam kulumismehhanism ja kulumiskindlus, mis abrasiivkulumisel sõltuvad peamiselt sideaine struktuurist.

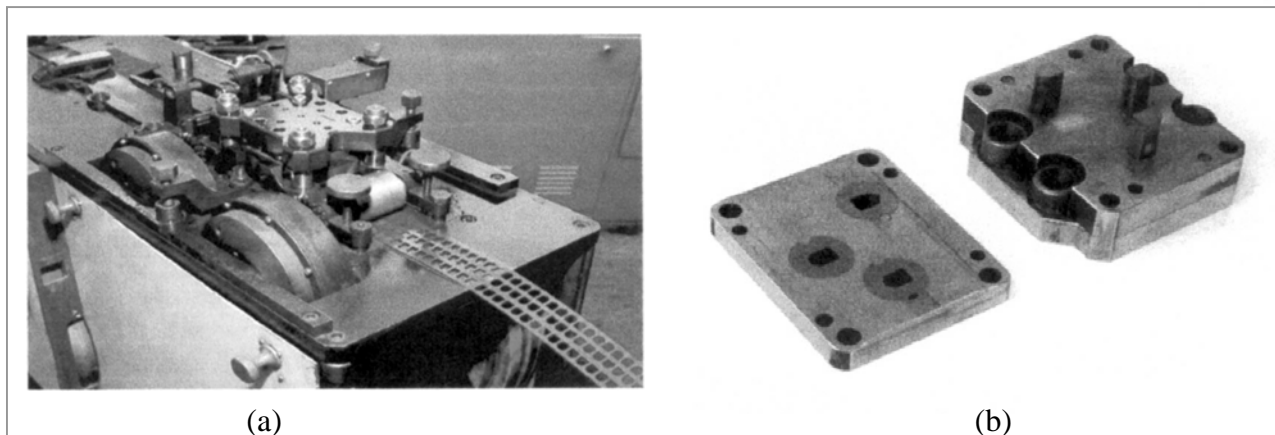
Katsemetoodika valdkonnas on jätkunud kõrgetemperatuurse kulutamise meetoodika väljatöötamine.

On toimunud keraamiliste materjalide abrasiivse erosiooni uuringud toa- (20°) ja kõrge temperatuuril ($600^\circ C$). On valmistatud seade ja juurutatud abrasiivkulumise katsetamise metoodika vastavalt USA standardile ASTM B611-85. Samuti on täiustatud eelnimetatud seadet ja välja töötatud metoodika hõõrdeteguri ja -kulumise määramiseks. On uuritud erineva koostise ja struktuuriga WC, TiC ja Cr_3C_2 baasil kermiste abrasiiv- ja hõõrdekulumist ning selle mehhanismi erinevatel koormustel.

Mikro- ja nanotriboloogia suunal on elastohüdrodünaamiliste määrimise alaste tööde tulemusena õnnestunud tuvastada tahkete mikroosakeste toime-mehhanismid määrimisprotsessis ja luua lähted saastatud keskkonnas töötavate tribosüsteemide insenerarvutusteks. Leitud on hõõrde- ja kulumisprotsessi simuleerimisülesannete lahendused. On tehtud algust uuringutega pulbermaterjalide ja õhukeste kilede nanotriboloogia suunal.

Viimase suuna uuringutest oli pikemalt juttu pinnete uurimisvaldkonna all. Lisaks uuringute jätkumisele jahvatatud WC-baasil kermistest pihustatud ja sulatatud pinnete valdkonnas alustati uuringuid uudsete pindamismooduste – lokaalgalvaanika ja fluorpolümeerse materjalidega pindamise valdkonnas.

Üheks huvipakkuvamaks on termo- ja fluorpolümeerpinnete kombinatsioon ja nende hõõrdekulumise uurimine.



Joonis 3.

Uudse TiC-baasil kermisest elementidega armeeritud lõikestants lehtmaterjali stantsimiseks: (a) katsestants, (b) kermisega armeeritud stantsiosad.

MATERJALIDE LIITETEHNOLOOGIAD

Põhiliselt on uuritud võimalusi liita volframivabu titaan- ja kroomkarbiidi baasil kõvasulameid ja kermiseid terastega survetöötusriistade ja masinaosade valmistamisel. On välja töötatud tehnoloogilised parameetrid bimetalsete toorikute saamiseks, kasutades difusioonkeevituse ja kõvajootmise protsesse. Uute amorfsete joodiste kasutamisel on võimalik saada tugevaid liiteid, kuid rakendatava survejõu puudumine lihtsustab tehnoloogiat ja madalam liitmistemperatuur vähendab sisepeingeid liidetes. Eelmainitud liitmisprotsessid sobivad keramiika, titaani, jt materjalide liitmiseks metallidega. On uuritud võimalust kasutada uusi kaasaegseid joodiseid ning rübusteid põlevkivi kaevandusmasinate löiketerade kõvasulamplaadidega armeerimisel. Tööstuslikud kõvajoodised võimaldavad tõsta liidete tugevust ja töökindlust kõrgendatud temperatuuridel, mis kaasnevad põlevkivi töötlemisel uute puurseadmetega.

On teostatud Eesti suuremate metallitööstusettevõtete keevituse kvaliteedi ja tehnilise taseme analüüs ning arendamisel on metoodika keevituse kvaliteedisüsteemide rakendamise efektiivsuse hindamiseks. Eriteraste keevituse kvaliteedisüsteemide väljaarendamine on seostatud ettevõtete ettevalmistamisega kvaliteedisüsteemi sertifitseerimiseks.

Alusuuringuid viiakse läbi Haridusministeeriumi poolt sihtfinantseeritavate teemadena, ETF grantide alusel ning Eesti tööstuse tellimisel lepingute raames. On käimas rahvusvahelised projektid: Põhja-maade ühisprojekt NOVCOAT "Uued kulumis- ja korrosioonikindlad termopindad" (koostööpartnerid: 4 teadusarendusasutust ja 11 tööstuspartnerit Norrast, Rootsist, Soomest ja Eestist. Eesti poolt osaleb TTÜ materjalitehnika instituut ja Sihtasutus TTÜ Materjalitööstustehnoloogiate Siirdekeskus); Laboratoorse desintegraator DSL-175M väljatöötamine ja valmistamine VTT-le (Soome).

Uute kõrgtehnoloogiliste materjalide ja materjalitehnoloogiate evitamiseks 1999. a loodud Materjalitööstustehnoloogiate Siirdekeskus (asutajad: TTÜ, Eesti Masinatööstuse Liit, TTÜ Innovatsioonikeskus, AS Kuusalu Tehas, OÜ Setton, Jena Liitetechnika ja Materjalide Katsetamise Instituut) on realiseerinud rea Eesti tööstusele orienteeritud projekte:

- kõrgtehnoloogiliste pindamistehnoloogiate evitamine (1999–2001);

- sulatusmetallurgia ja termotöötus (2000–2001);
- materjalide katsetus- ja vastavushindamise alase tegevuse laiendamine (TTÜ Katsekoja mehaanikalaboris).

Siirdekeskuse käimasolevateks projektideks on:

- uued kulumis- ja korrosioonikindlad pindad karbiid-metall-komposiitpulbrite baasil;
- Sinter HIP paagutustehnoloogia kõvasulamite omaduste tõstmiseks;
- uute kõrgtehnoloogiliste sulatus- ja keevitusviiside evitamine.

Siirdekeskuse tulevikku näeme selle integreerumises kavandatava masinaehituse ja materjalitehnika arenduskeskusega.

Koostööpartneriteks on arvukad teadus- ja arendusasutused välismaal, Eesti tööstusettevõtted jm organisatsioonid:

- ✓ Eesti Masinatööstuse Liit;
- ✓ EML Tööriistatootjate Assotsiatsioon;
- ✓ tööstusettevõtted (AS Sumar, OÜ Setton, AS Silmet, AS ELME Masinaehitus, Balti ES AS jt);
- ✓ välismaa teadusarendusasutused (SINTEF, Norra; VTT, Tampere ja Lappeenranta Tehnikaülikoolid, Soome; Kuninglik Tehnikakõrgkool KTH, Rootsi; Taani Tehnoloogia instituut, Taani jt).

MUU ARENDUSTEGEVUS

Alus- ja rakendusuuringute kõrval on materjalitehnika instituut kujunenud ka oluliseks teenuse osutajaks Eesti majandusele, eelkõige TTÜ katsekoja mehaanikalabori näol. Olgu siin loetletud olulisemad valdkonnad ja projektid:

- Eesti Raudtee metallurgialabor (PHARE projekt), koordinaator Riho Päärsoo;
- Materjalide katsetus- ja vastavushindamisalaste võimaluste laiendamine, koordinaator Riho Päärsoo;
- Uute kõrgtehnoloogiliste materjalide ja materjalitehnoloogiate evitamine (Materjalitööstustehnoloogiate Siirdekeskus);
- Täiendõpe keevituskoordinaatoritele ja surveadmete keevitustööde koordinaatoritele;
- Materjalide andmebaaside koostamine: Euro-metallid (materjalide Eurostandardid; markeerimine, omadused ja vastavus); terminoloogia arendus.

ARVUTIPÕHISE TOOTE JA TOOTMISE ARENDAMISKESKKONNA LOOMINE MASINA- JA APARAADIEHITUSE ETTEVÕTETELE

Rein Küttner, Martin Eerme

Tallinna Tehnikaulikooli masinaehituse instituut

Raalprojekteerimissüsteemide (CAD/CAM süsteemide) väljatöötamist ja evitamist on hinnatud üheks 20nda sajandi väljapaistvamaks saavutuseks tehnika- teadustes ja tehnoloogias (National Academy of Engineering ja American Society of Mechanical Engineering (USA) hinnangud).

Selle valdkonna töödega alustati tolleaegses TPI masinaehitustehnoloogia kateedris varakult, 1965 aastal. Kuni 1990ndate alguseni tehti lepingulisi uurimistöid valdavalt NSV Liidu suurtele energeetikamasinaehituse firmadele ja vähesemal määral ka Eestis asuvatele ettevõtetele (Pioneer, Tallinna Masinatehas, Dvigatel jt). Loodi esmane vajalik infrastruktuur, mis võimaldas alustada TPI-s võrreldes teiste tolleaegsete NSVL ülikoolidega suhteliselt varakult raalprojekteerimisalast õpetamist, kaasata üliõpilasi sellealastesse projektidesse. Raalprojekteerimise tarkvara väljatöötamise alal akadeemikute B. Tamme ja E. Tõugu juhendamisel tehtavad tööd olid rahvusvaheliselt tunnustatud, TTÜ masinaehituse instituudil oli tihe koostöö.

Alates 1990ndate algusest tuli oluliselt muuta teadus- ja arendustöö eesmärgid, moderniseerida arvuti- baas. Avanes võimalus kasutada maailma juhtivate tarkvarafirmade toodangut. Kõik see nõudis mahukat ümberõpet ja nn "oma uute nišside" leidmist, teenindamiseks Eesti tööstust, sh eriti masina- ja aparaadiehitust.

Kaasaja avatud majanduse tingimustes peab ettevõtte, kes soovib oma tootega konkurentsivõimeliselt püsida, jõudma turule enne konkurente, tagades sh toote konkurentsivõimelisuse, st toode peab olema sobiva hinnaga ja vastama turu nõuetele. Kõik see tingib vajaduse kasutada uusi täiustatud projekteerimis- meetodeid, uusi tehnilisi lahendusi jm uuendusi konstrueerimise ja tehnoloogia vallas, lühendada toote turule toomise aega, tõsta kvaliteeti jms.

Projekteerimine peab kaasajal kindlustama olukorra, kus võimalikult varakult, st juba projekteerimise algetappidel, oleks võimalik hinnata tulevase toote põhilisi näitajaid, vähendada võimalikke vigu projekteerimisel, koordineerida edasisi tegevusi tootmise käivitamisel jms. See nõuab süsteemi adekvaatselt kirjeldavate mudelite koostamist ja kasutamist.

Ettevõtte konkurentsivõime seisukohalt on oluline koguda ja süstematiseerida nii oma ettevõttes kui maailmas (koostööpartnerite ja sh ka turukonkurentide juures) olemasolevat informatsiooni ja oskusteavet. Kõik see nõuab mahukate ja projekteerimist toetavate andme- ja teabebaaside loomist ja kasutamist projekteerimisel.

Keerukad masinaehituslikud tooted (näiteks autod) koosnevad ligikaudu 10 000 detailist/komponendist ja nende projekteerimine nõuab 4 aastat 750–1500 inseneri tööd. Lennuk koosneb ligikaudu 3 miljonist komponendist ja lennuki projekteerimine nõuab 5 aastat tööd 5000 inimeselt. Võib öelda, et Eesti masina- ja aparaadiehituse tööstus taolisi keerukaid tooteid ei tooda. Tooted tuhande ja enam komponendi- ga pole aga ka meie tööstusele mingi erand.

Kaasaegne CAD/CAM/CAE süsteemidel põhinev tootearendus kasutab toodete mahulist (3D) modelleerimise tehnoloogiaid. Olemasolevad baassüsteemid (näiteks Pro/ENGINEER, SolidEdge jt) pakuvad terve rea üldkasutatavaid vahendeid toodete digitaalseks simulatsiooniks ja nn "virtuaalseks testimiseks", sh geomeetria, kinemaatika ja dünaamika, tugevusomaduste jms modelleerimiseks, nende animatsiooniks, kontrollimaks toote komponentide liikumiste järjestust, võimalikke kokkupõrkeid ja muid ajalisi nähtusi.

Turulolevate süsteemide poolt pakutavad võimalused on reeglina liialt üldised, et neid kasutada efektiivselt konkreetsetes ettevõttes. Üldkasutatavate süs-

teemide kasutamisel ja loomisel on eeldatud, et kasutajad ettevõtted täiustavad neid ja adapteerivad vastavalt konkreetsetele oludele, luues ettevõttele või nende grupile orienteeritud arvutipõhiseid keskkondi.

Kui tinglikult jagada süsteemid “ühe inseneri või ühe inseneride grupi” süsteemiks ja “kogu ettevõtte või ettevõtete koostöövõrgu tööd toetavateks süsteemideks”, siis meie huvi on esmajoonel seotud teist tüüpi süsteemide arendamisega, mis toetavad kogu ettevõtte tootearenduse ja toomisega seotud tegevusi, alates projekteerija ideedest läbi tootmise kuni toote eksploatatsioonini, sh dokumentide haldamist, projektijuhtimist jms. Tuleb arvestada, et ettevõttes on vaadeldaval ajaperioodil projekteerimises või tootmises mitmeid sarnaseid tooteid. Toote ja tootmise arendamisel tuleb arvestada koostööpartnerite võimalusi, tehnika arengutrende jms. Kõik see nõuab vastavate meetodite loomist ja evitamist, mis ongi TTÜ masinaehituse instituudi teadus- ja arendustöö peamiseks eesmärgiks.

Teadus- ja arendustegevus antud valdkonnas on jaotatud järgmiselt:

1. integreeritud tootearenduse ja tootmissüsteemi optimaalse dekompositsiooni ja koordineerimisteooria probleemide uurimine ja realiseerimine ettevõttele ja ettevõtete koostöövõrgule;
2. erinevate Eesti tööstusele huvi pakkuvate tooterepere (näiteks tehnoloogilised abinõud, metallkonstruktsioonid, jms) projekteerimist toetavate arvutipõhiste projekteerimiskeskondade, sh teabe- ja andmebaaside loomine ning evitamine;
3. toodete staatiliste tugevusomaduste, dünaamiliste omaduste jt omaduste hindamisel baseeruvate analüüsi- ja projekteerimise meetodite (CAE ja lõplike elementide meetod) arendus sarnaste toodete peredele, toodete omaduste katsetamine (CAT).

RAALPROJEKTEERIMISKESKKONDE ARENDUS

Arvutipõhine projekteerimiskeskond arendatakse välja järgmiste ülesannete lahendamiseks [2]:

- Projekteeerimise lähteülesande koostamine. Kontseptuaalne projekteerimine.

Lähteülesande koostamine ja kontseptuaalne projekteerimine sisaldab endas arvutuskeemi täpsustamist ja eelnevaid projektarvutusi (mõjuvad jõud, täpsus jms).

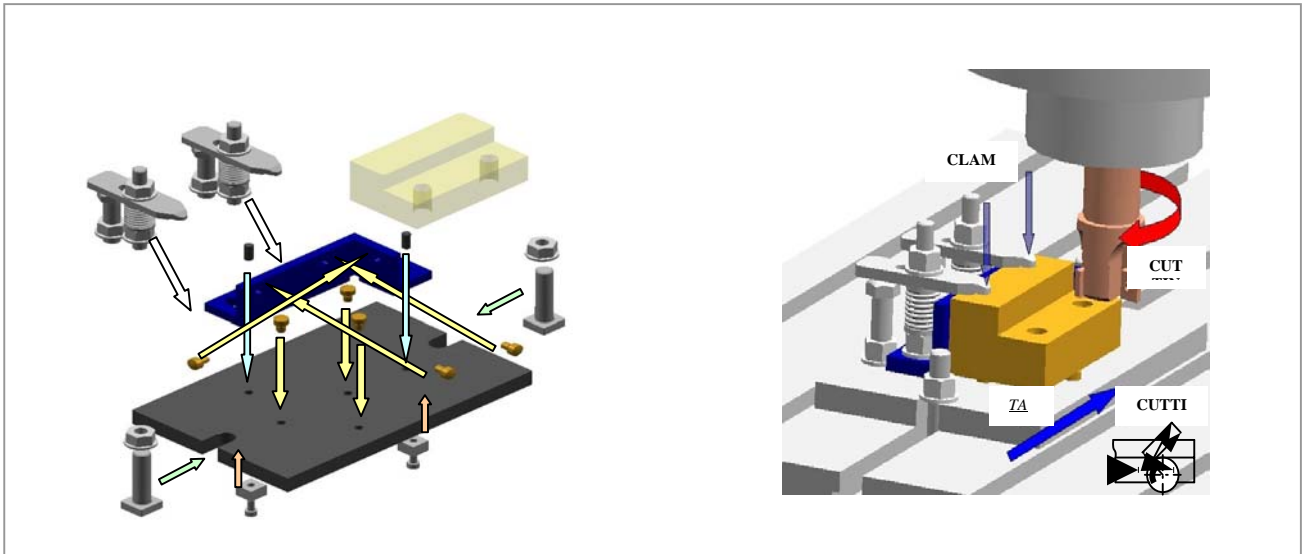
- Standard- ja tüüplahendite teekide kasutamine projekteerimisel. Lahenduste (komponentide, moodulite jms) otsing Internetis.
- Toodete ruumiliste (3D) mudelite koostamine. Toote 3D mudeli koostamine graafilises dialoogis moodulite teegist valitud komponentide mudelite ja projekteeritud originaaldetailide/koostude baasil.
- Toote omaduste hindamine 3D mudelite analüüsi teel, sh animatsiooni kasutades.
- Projekteeerimise dokumentatsiooni automatiseeritud koostamine.

Projekteerimisel kasutab insener hinnanguliselt üle 80% olemasolevaid lahendeid. Iga konstruktsioon sisaldab hulgaliselt standardseid, normaliseeritud ja unifitseeritud komponente. Standard- ja tüüplahendite teegid võivad olla kas spetsiaalsed (koostatakse teatud ettevõtte tarvis) seniste lahenduste (üldistuse) alusel või moodustatakse väljavõtetena (piiratud nomenklatuurina) erinevate tarnijate kataloogidest (kasutades näiteks Internetis olevaid pakkumisi). Nimetatud teekide tasemest sõltub suuresti ka projekteeritavate toodete tehniline tase, nende kasutamise otstarbekus, jm tehnilis-majanduslikud näitajad.

Projekteerimiseks vajalike tüüplahendite ja standardelementide/moodulite mudelid salvestatakse 3D mudelite kujul süsteemi teabebaasi, kust saab neid vaadelda ja valida konkreetse projekteerimisülesande tarvis välja parimad lahendid. Komponentide valikuks salvestatakse koos geomeetrilise mudeliga ka nende mõõtmed, aga samuti näitajad, mis on vajalikud valiku otstarbekuse hindamiseks (hind, senise kasutamise sagedus, tellimiseks/valmistamiseks kuluv aeg, võimalik tarnija jms) [1].

Lihtsustatud näide toote (pingi rakise) 3D mudeli koostamise graafilises dialoogis moodulite teegist valitud komponentide mudelite ja projekteeritud originaaldetailide/koostude baasil on toodud joonisel 1. Valmis 3D mudelit tuleb analüüsida mitmest aspektist, sh näiteks animatsiooni teel (joonis 1).

Ettevõtetes realselt toodetavate ja kasutatavate toodete mudelid on keerukad, sisaldavad sadu erinevaid



Joonis 1.

Pingirakise 3D mudeli koostamine tüüpelementidest ja rakise kontroll sisselõikele animatsiooni teel.

komponente, mille valiku otstarbekusest sõltub kogu toote konkurentsivõime (vaata näide suhteliselt lihtsast tootest – lõikestantsist joonisel 2). Kaasajal puuduvad üldistatud ja teoreetiliselt põhjendatud lahendid antud ülesande lahendamiseks, eriti kui arvestada mitte ühte toodet, vaid omavahel tehnilis/tehnoloogiliselt ja majanduslikult seotud toodete kogu sortimenti antud ettevõttes. Taoliste meetodite ja neid toetavate instrumentide arendamisega tegeleb ka TTÜ masinaehituse instituut.

STRUKTUURIDE JA MEHHAANISMIDE TUGE- VUSOMADUSTE ANALÜÜS JA HINDAMINE

Mis tahes masina või seadme projekteerimine eeldab mahukaid ja keerukaid tugevusomaduste kontrollarvutusi, mille realiseerimiseks kasutatakse inseneriarvutuste süsteeme (CAE – Computer Aided Engineering). Analüütiline masina tugevus-tingimuste analüüs on rakendatav reeglina lihtsa geometriaga juhtudel, praktikas ettetulevate keeruliste süsteemide puhul aga mitte, siin sobivad numbrilised meetodid paremini. Seni teadaolevatest on praktikas end kõige paremini õigustanud numbriliseks meetodiks Lõplike Elementide Mee-

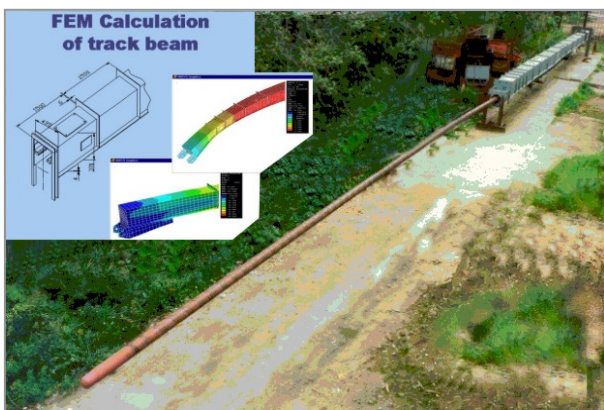


Joonis 2.

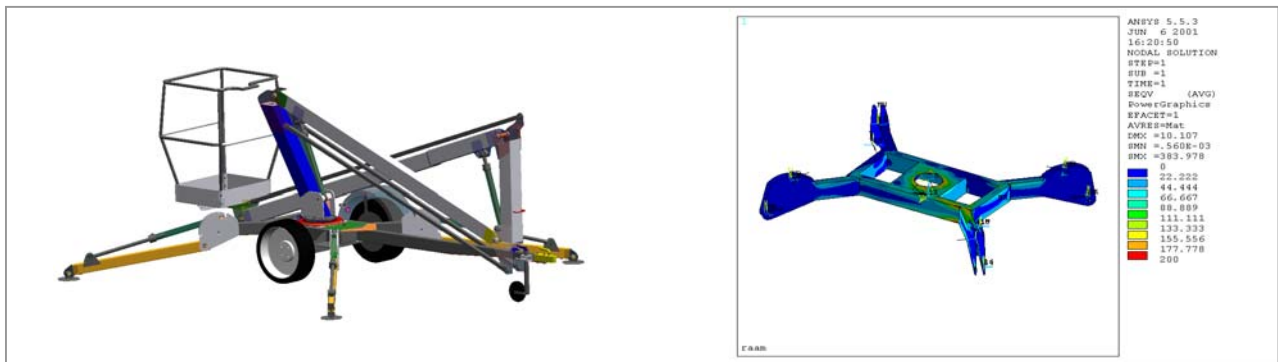
Lõikestantsi 3D mudel.

tod (LEM). TTÜ masinaehituse instituudis on pikaajalised kogemused LEM programmipakettide ANSYS ja CosmosM kasutamisel, mis võimaldavad lahendada erinevat tüüpi ülesandeid. LEM võimaldab lahendada järgmisi analüüsi ja projekteerimisülesandeid: struktuuride staatika, struktuuride dünaamika, temperatuuri- ja elektromagnetväljad, akustika, arvutuslikud voolamist kirjeldavad ülesanded (Computational Fluid Dynamics), löögi (crash) simulatsioon, sügavtõmbamine, metallide painutamine ja sepistamine ning paljud teised.

Oleme teinud koostööd Eesti ettevõtetega tugvusarvutuste teostamiseks ja konstruktsioonide analüüsiks tootearenduse projektides. Meie poole on pöördutud ka ekspertiisi tellimustega, kui on vajadus uurida toote purunemise põhjust.



Joonis 3. 18m tahmapuhur.



Joonis 4.

11,5m tõsteulatusega korvtõstuki 3D CAD ja LEM mudelid.

Lahendatavate ülesannete näited:

PINGETE JAOTUSE ANALÜÜS (staatiline koormusolukord)

Konstruktsioonide näidetena võib vaadata sõrestikke, raame, surveanumaid jne. Enamasti viiakse arvutused läbi struktuuridele, mille ruumiline pingede-/deformatsiooni olukord on kriitiline. Taoliste konstruktsioonide praktilised näited Eesti ettevõtete toodangust on toodud joonistel 3 ja 4.

TOOTE TOPOLOGIA JA PARAMEETRITE OPTIMEERIMINE

Topoloogia optimeerimise puhul antakse ette ruumi piirkond ja seal mõjuvad jõud ning sihi-funktsioonina näiteks eemaldatava materjali hulk. Vastavad algoritmid hindavad/kuvavad materjali otstarbeka jaotuse (joonis 5).

Struktuuride optimeerimise puhul antakse ette optimeeritavad parameetrid. Defineeritakse sihi-funktsioon, mida tahetakse saavutada/optimeerida (näiteks mass) ja kirjeldatakse piiravad tingimused (näiteks lubatud pingete piirväärtus). Lõpptulemusena saame optimeeritud toote.

Pidevalt muutuvate materjalide ja uute konstruktsioonelementide kasutamise tingimustes on lisaks arvutuslikule modelleerimisele vajalik täpsustada arvutusmodelite parameetreid ja hinnata arvutusmodelite vastavust tegelikule tööolukorrale. Eriti vajalik on see keerukamate ja vastutusrikaste konstruktsioonide juures, mis töötavad ekstreemsetes tingimustes [3].



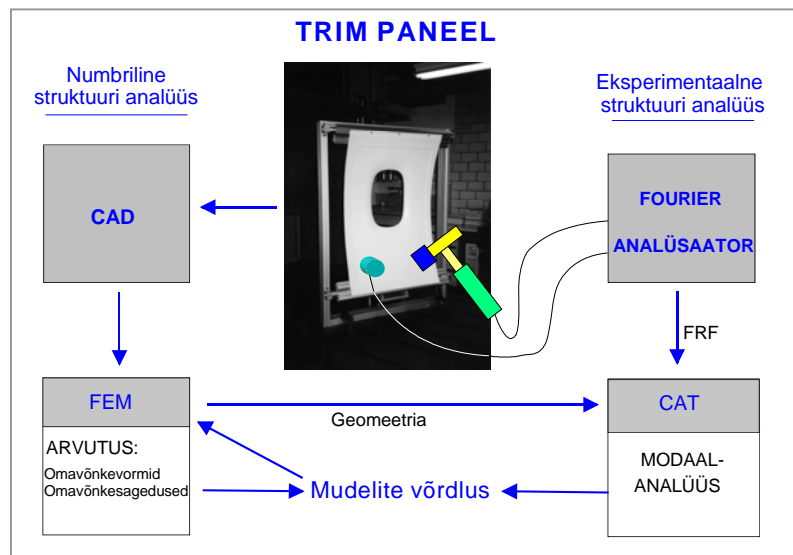
Joonis 5.

Kabinetiklaveri 3D CAD mudel ja malmraami optimeerimise LEM mudel.

Taolises olukorras on vajalik testida kas toodete prototüüpe või nende vähendatud mudeleid. Masinaehituse instituudis on sisustatud modaalanalüüsi laboratoorium konstruktsioonide või nende mudelite testimiseks, kus läbiviidavad katsed võimaldavad suurendada arvutuslike LEM mudelite usaldusväärsust (joonis 6).

Joonis 6.

Lennuki Do328 Trim paneeli LEM mudeli täpsustamine mõõtetulemustega [1].



KASUTATUD KIRJANDUS

1. Nekrassov, G., Küttner, R. Development an intelligent, integrated environment for computer-aided design of work-holders. Proc. of the 3rd International DAAAM Conference. Tallinn, 2002, 124-127.
2. Küttner, R. A framework for collaborative product and production development system. Proc. of the 3rd International DAAAM Conference. Tallinn, 2002, 34-37.
3. Resch, M., Eerme, M., Final report of ASANCA II Subtask 2.1 Deliverable 14/3, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Laboratory of Design and Construction Methods, 1996.

ELASTSUS- JA PLASTSUSTEORIAALASEST UURIMISTÖÖST TARTU ÜLIKOOLIS

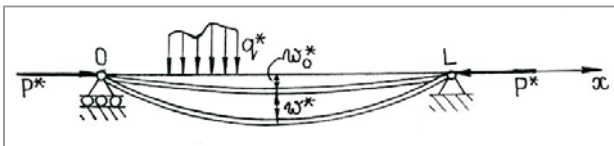
Jaan Lelley, Ülo Lepik

Tartu Ülikooli rakendusmatemaatika instituut

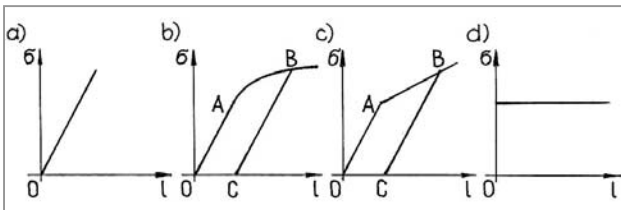
Mitteelastsete konstruktsioonide uurimisega on tegeldud Tartu Ülikooli teoreetilise mehaanika õppetoolis alates 1950. aastast. Alljärgnevalt on ära toodud selle töö lühiiseloost.

UURIMISOBJEKTID

On käsitletud mitmesuguseid konstruktsioonelemente (vardad, plaadid, koorikud), millele mõjub kas staatiline või dünaamiline koormus. Mõjuda võivad nii rist- kui ka pikisuunalised jõud (joonis 1).



Joonis 1.
Varda koormamine.



Joonis 2.
Konstruktsiooni materjalide tõmbediagrammid a) elastne materjal, b) elastne-plastne materjal, c) lineaarselt kales-
tuv materjal, d) plastne materjal.

Konstruktsiooni materjal võib olla elastne või elastne-plastne (joonisel 2 a ja b on toodud nende materjalide tõmbediagrammid).

Elastse-plastse materjali korral elastsuspiiri ületamisel algab diagrammi kõverdumine punktis A ja ilmnevad jääkdeformatsioonid. Et sellise diagrammi kasutamine konkreetsete ülesannete lahendamiseks on tülikas, siis seda sageli lihtsustatakse. Üks lihtsustamisvõimalusi on esitatud joonisel 2 c (lineaarselt kales-
tuv materjal).

Teatud ülesannete korral võib jätta kales-
tumise ja elastsuse deformatsioonide osa arvestamata ja me saame nn jäik-plastse materjali diagrammi (joonis 2 d). Vaatamata oma erakordsele lihtsusele annab selline mudel siiski praktikaga heas kooskõlas olevaid tulemusi.

Elastse-plastse materjali korral tuleb arvestada materjali duaalset käitumist koormuse langusel, sel juhul liigume piki sirget BC joonisel 2 b ja c.

Et plastsusteooria loodi olulises osas alles pärast 1940. aastat, on siin veel mitmeidki lahendamata ülesandeid. Lisaks sellele tuleb arvestada ka teisi efekte, nagu konstruktsioonide tsükliline koormamine, viskoossus, lainelevi, konstruktsiooni käitumine pärast kriitilises staadiumis. Nende ülesannete lahendamiseks oleme koostanud sobivad mudelid, mis enamikul juhtudel on kirjeldatavad diferentsiaalvõrranditega. Seejärel koostatakse arvutusprogrammi ja realiseeritakse see personaalarvutil. Saadud arvutustulemusi on hinnatud olemasolevate katseandmetega võrdlemise teel.

STAATIKA

Jäik-plastse keha kontseptsioonile on leitud mitmeid rakendusvõimalusi. Üks esimesi ja võimalik, et ka efektiivsemad rakendusi on seotud piirkandevõime teooriaga. Piirkandevõime teooria võimaldab määrata konstruktsioonelemendi kandevõime ülem- ja alampiiri eeldusel, et elemendi materjali võib lugeda ideaalselt jäik-plastseks ning et pinged keha üheski punktis ei ületa lubatavaid väärtusi.

Kui teooria loomise algaastail uuriti D. Druckeri, W. Prageri, H. Hopkinsi, P. Hodge'i jt poolt geometriliselt lineaarsete plaatide ja koorikute paindeülesandeid, siis TÜ teadlaste poolt on seda suunda laiendatud geometriliselt mittelineaarsete konstruktsioonide jaoks. On vaadeldud ümar- ja rõngasplaatide, samuti silindriliste koorikute deformeerumist mitmesuguste koormuste ja kinnitusviiside korral.

Erilist teoreetilist (ja ka praktilist) huvi pakuvad plaatide ja koorikute ülesanded sel juhul, kui plaadi või kooriku paksus ei ole konstantne.

Muutuva paksusega konstruktsioonide korral vaadeldakse kahte tüüpi ülesandeid, kui

- 1) paksuse jaotus on ette antud,
- 2) paksuse (massi) jaotus on otsitav.

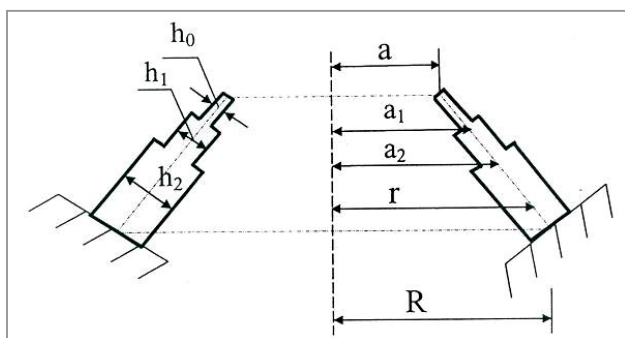
Esimesel juhul on tegemist nn otsese ülesandega, teisel juhul optimeerimisülesandega.

Tuleb kohe öelda, et mitte kõigi optimeerimisülesannete puhul ei ole otsitavaks (võrreldes otsese ülesandega) paksuse jaotus. Tundmatuks võib olla ka näiteks koormuste või materjali konstantide jaotus, samuti sisetugede asend jne.

TÜ teadlaste poolt on viimastel aastatel uuritud muutuva paksusega rõngasplaate, silindrilisi, koonilisi ja sfäärilisi koorikuid.

Plastsete kooniliste (joonis 3) ja sfääriliste (joonis 4) koorikute jaoks on leitud optimaalsed projektid nii, et

- 1) materjalikulu on minimaalne ette antud kandevõime korral;
- 2) kooriku kandevõime on maksimaalne ette antud materjali hulga korral.



Joonis 3.
Plastsete kooniliste koorikute optimaalne projekt.

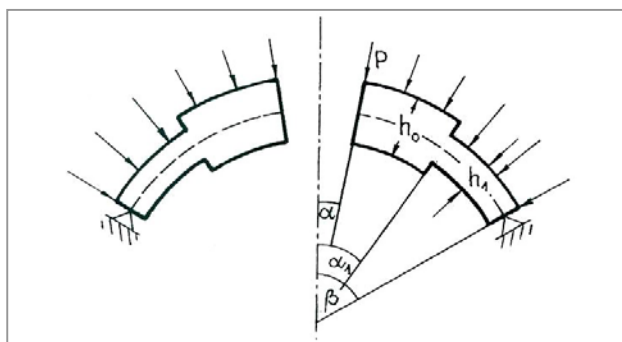
Vaadeldes tükiti konstantse paksusega koorikuid erineva astmete arvu korral on näidatud, et ülesannete “üks” ja “kaks” lahendid on suhteliselt lähedased, ent mitte kokkulangevad. Parameetrite optimaalsed väärtused sõltuvad plaadi või kooriku geometriilistest ja füüsikalistest parameetritest.

Väga üldistatult võib öelda, et ühe astmega projekti efektiivsus on 2–3% kõrgem võrreldes samaväärsel konstantse paksusega koorikuga. Kahe astme puhul on see näitaja keskmiselt 3–5%. Astmete arvu edasisel suurendamisel tõuseb konstruktsiooni efektiivsus aeglaselt; ülempiiriks on see efektiivsuse koefitsiendi väärtus, mis vastab pidevalt muutuva paksusega projektile.

JÄIK-PLASTSETE KONSTRUKTSIOONIDE DÜNAAMIKA

Siin on analüüsitud põhiliselt tükiti konstantse paksusega konstruktsioone, millele mõjub lühiajaline ristkoormus. Konstruktsiooni materjal loetakse jäik-plastseks. Pärast koormuse eemaldamist konstruktsiooni läbipainded kasvavad veel veidi inertsil mõjul, mille järel liikumine seiskub. Meie eesmärgiks on konstruktsiooni lõppläbipainde kuju määramine.

Lihtsamatel juhtudel (näiteks kahe astmega konstruktsioonid) on sellele ülesandele võimalik leida analüütiline lahendus. Tingituna jäik-plastse materjali kontseptsioonist koosneb kiiruste epüür sirglõikudest, mis on omavahel ühendatud nn plastsete šarniiridega (nurkpunktidega). Kui aga mõjuvad mitmed koormused ja astmete arv on suurem kui kaks, muutub pilt üsna komplitseerituks: plastseid šarniire on enam kui üks, neid võib liikumise käigus juurde tekkida või ära kaduda. Selliste ülesannete



Joonis 4.
Sfääriliste koorikute optimaalne projekt.

lahendamiseks on meil loodud nn kvaasimodaalsete lahendite meetod, mis võimaldab arvuti abil lahendada kui tahes keerulisi ülesandeid.

Jäik-plastse materjali kontseptsiooni oleme kasutanud talade, ümarplaatide, silindriliste, sfääriliste ja kooniliste koorikute puhul. Siia kuuluvad ka optimeerimisülesanded, kus on ette antud konstruktsiooni ruumala; üksikute kihtide paksusi püütakse valida nii, et konstruktsiooni läbipaine oleks vähim. On vaadeldud ka juhtumeid, kus painduvuse vähendamiseks on pandud konstruktsioonile lisatugi; püütakse leida selle optimaalset asendit.

ELASTSETE-PLASTSETE KONSTRUKTSIOONIDE DÜNAAMIKA

Jäik-plastse materjali puuduseks on asjaolu, et pole võimalik arvestada materjali duaalset käitumist koormuse tõusul ja langusel. Seetõttu jäik-plastne mudel ei sobi mittelineaarsete võnkumiste kirjeldamiseks.

Elastsete-plastsete süsteemide korral lähtutakse tavaliselt liikumise diferentsiaalvõrranditest, milles sisalduks ka geomeetriline mittelineaarsus (nn Kármáni tüüpi võrrandid). Paljudel juhtudel integreeritakse need võrrandid lõplike elementide meetodil. Sel juhul saadakse tulemused suure hulga arvuliste andmete (või graafikute) kujul, mis on raskesti interpreteeritavad, selles arvude rägastikus võib kaduma minna probleemi sisu. Seepärast oleme pidanud vajalikuks alternatiivse lahendusmeetodi väljatöötamist. See lahendusviis baseerub Galjorkini meetodil (Galjorkini meetod elastsete ülesannete lahendamiseks on laialt levinud, kuid väga vähe on ära tehtud elastsete-plastsete deformatsioonide juhul).

Meie poolt pakutud meetod seisneb järgnevas. Konstruktsioonile võivad mõjuda nii rist- kui ka pikikoormused. Galjorkini meetodi abil integreeritakse liikumisvõrrandid koordinaadi järgi (tulemus sisaldab mitmeid integraale, mis arvutatakse numbriliselt). Diskretiseerimiseks ajas kasutatakse tsentraalsete vahede meetodit. On välja töötatud ja reali-

seeritud arvutiprogramm ning lahendatud rida konkreetseid ülesandeid varraste ja silindriliste koorikute kohta. Tulemustest nähtub, et mitmetel juhtudel, näiteks pulseeriva väliskoormuse mõjul, võib liikumine muutuda kaootiliseks. Eriti huvitavad on ülesanded, kus konstruktsioonile mõjub suruv pikikoormus (näiteks pikisuunas langeva massi mõjul) ja võib ilmnedä dünaamiline stabiilsuse kadu. Siin tuleb eristada kahte juhtu: (a) aeglane koormamine, kus pikiinertsjõudusid ei pruugi arvestada, ja (b) kiire koormamine. Viimasel juhul tuleb arvestada ka pikilaineid ning piki- ja ristlainete superpositsiooni, korduva peegeldumise tõttu ilmneb üsna komplikseeritud seisund.

UUSI SUUNDI

Viimastel aastatel oleme oma teadustemaatikat mõnevõrra muutnud.

LAINIKUD

Oleme huvitunud ka lainikutest (wavelets) ja kavatseme neid edaspidi kasutada elastsete ja elastsete-plastsete konstruktsioonide dünaamikas. Lainikute kasutamine on eriti otstarbekas ülesannete korral, kus esinevad järsud koormuse muutused või lokaalsed hälbed konstruktsiooni kujus.

PRAGUDE MEHAANIKA

Purunemismehaanika probleemide uurimist alustati teoreetilise mehaanika õppetoolis üsna hiljuti. Põhiliseks uurimisteenaks on pragude leviku dünaamika ja prao stabiilsus elastses-plastses keskkonnas. Seni on uuritud plastset tala ja silindrilist koorikut, mille kinnituskohas on mitteläbiv pragu. On tuletatud tingimused prao stabiilsuseks, kasutades J-integraali kontseptsiooni.

Edaspidises uurimistöös püütakse siduda purunemismehaanika kriteeriumid nende kitsendustega, mis on pandud peale pinge- ja deformatsiooniseisundile elastsete-plastsete kehade optimeerimisel. Teise suunana tasub mainida niisuguste mittepuras-tavate meetodite väljatöötamist, mis võimaldavad avastada pragusid ja teisi defekte elastses-plastses kehas võnkumiste abil.

VEEKAITSEUURINGUD TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO LIS

Enn Loigu

Tallinna Tehnikaülikooli keskkonnatehnika instituut

40 AASTAT KOGEMUST

2001. aastal täitus 40 aastat veekaitsealaste teadusuuringute algusest Tallinna Tehnikaülikoolis ning 35 aastat rahvusvahelist koostööd Soome lahe vete kaitse alal. Uuringute põhitähelepanu oli eelkõige suunatud siseveekogude vee kvaliteedi kujunemise protsesside ja isepuhastusvõime väljaselgitamisele ning reoveepuhastustehnoloogiate rakendamisele. Eeskätt Euroopa Liidu teadus- ja arendus-programmide (Raamprogrammid, Phare) ning Läänemere Keskkonnakaitse Konventsiooni (HELCOM) raames tehtud uuringud on leidnud rahvusvahelist tunnustust.

Inimtegevuse mõju leevendamiseks on vaja senisest paremini tunda veekvaliteeti mõjutavaid protsesse, reostuse mõju vee ökosüsteemidele ning nende taluvusvõimet, et tagada sotsiaalmajanduslikke aspekte arvestades veeressursside säästlik kasutus ja kaitse. See eeldab süvendatud alus- ja rakendus-uuringuid interdistsiplinaarsel tasandil, integreerides erinevate erialade – inseneride, tehnoloogide, loodusteadlaste vahelist koostööd pinnavete ökosüsteemide seisundi kompleksel hindamisel ja jätkusuutliku veemajanduse korralduse strateegiate väljatöötamist. Tuginedes eeltoodud uuringutele on välja töötatud veekogude keskkonnaseisundi ühtsed hindamiskriteeriumid, tänu millele on kasutusele võetud ja kavandatud efektiivseid veekaitse meetmeid.

KOOSTÖÖVÕRK

Teadusprojektidesse on kaasatud erinevate teadusalade ja uurimisasutuste spetsialiste Eesti Põllumajandusülikoolist, Saku Põllumajanduse Mehhaniseerimise Instituudist ning Jäneda Nõuande- ja Koolituskeskusest. Tõhusat koostööd on arendatud Utrechti Ülikooliga (Holland), Kuningliku Tehnoloogiainstituudiga (Rootsi), Rootsi Põllumajandus- ja Keskkonnatehnika Instituudiga, Norra Mulla- ja

Keskkonnauuringute Instituudiga, Kalmari Ülikooli ja paljude teiste välispartneritega. Osaletakse Euroopa Liidu 5. Raamprogrammis, projekti MANTRA-East (Integreeritud veemajanduskavade väljatöötamine piiriveekogudele Ida-Euroopas – Peipsi järve ja selle valgala pilootprojekt) täitmisel. PHARE projekti FEMP raames töötati välja põllumajandus- tootja keskkonnategevuskava karstialal. Samuti osaletakse teistes rahvusvahelistes projektides kaasaegsete keskkonnakaitsemeetmete väljatöötamisel ja rakendamisel, eesmärgiga oluliselt vähendada jõgede reostuskoormust ning parandada vee sanitaarset olukorda. Edukalt on ühistööd tehtud Keskkonnaministeeriumiga ja Põllumajandusministeeriumiga.

SISEVETE KESKKONNASEIRE

Erinevate keskkonnatehnoloogiate efektiivseks rakendamiseks ja otsuste tegemisel on vaja objektiivselt hinnata praegust keskkonna seisundit ning kavandatavate meetmete mõju keskkonnale lähemas ja kaugemas perspektiivis. Sellest tulenevalt on üheks oluliseks uurimissuunaks kujunenud pinnaveeseire metodoloogiliste aluste väljatöötamine. Uuritakse veekvaliteedi kujunemise üldisi seaduspärasusi nii looduslikes kui ka erineva inimõju tingimustes ja regionaalseid iseärasusi. Interpreteeritakse veekvaliteedis aset leidnud pikaajalisi muutusi, sesooneid ja ruumilisi trende ning nende põhjusi, kaasa arvatud muutused maakasutuse struktuuris.

Instituut on jõgede riikliku seire koordinaator ja meetodiline juhendaja. Veeseire eesmärgiks on objektiivse, usaldusväärse ja võrreldava informatsiooni saamine, et hinnata vee kvaliteedi vastavust kehtestatud standarditele, vees toimuvaid muutusi ja rakendatud veekaitsemeetmeid ning nende tõhusust (joonis 1). Riiklik seire hõlmab 59 jõelävendit, mis vastab vaatlusjaamade tiheduse, proovivõtu sageduse ja analüüsitava näitajate osas igati rahvusvahelistele nõuetele.

Pidevalt jälgitakse pinnavee kvaliteedi seisundit nii taustjaamades, kus puudub otsene inimõju, kui ka peamistes jõelävendites, eesmärgiga hinnata inimtegevuse keskkonnamõjusid. Viimastel aastatel on TTÜ keskkonnatehnika instituudi poolt arendatud automaatseirejaamadel põhinevat väikejõgede seiret põllumajandusliku hajureostuse mõju hindamiseks. Seire eesmärgiks on:

- usaldusväärsete ja võrreldavate andmete kogumine toitainete kadude hindamiseks;
- andmete kogumine toitainete äravoolu mõjutavate protsesside kohta;
- pikaajaliste vaatlusandmete kogumine muutustest maakasutuses ja tootmistegevuses;
- veekaitsemeetmete väljatöötamine ja nende tõhususe hindamine; keskkonnasõbraliku põllumajandusala näidistegevuse arendamine.

VEEKEEMIA LABORATOORIUM

Selleks, et tagada veeseire andmete kvaliteet, on veekeemia laboratooriumis juurutatud kvaliteedi tagamise kontrollprogramm ja standardiseeritud laboratoorse analüüsi meetodid.

Labor teostab pinnavee, heitvee ja põhjavee analüüsi mitmesuguste uurimisprojektide täitmiseks (joonis 2). Laboratooriumi kvaliteedisüsteem loodi lähtudes standardi EVS EN 45001 nõuetest. Ajavahemikul 1997–2001 täiustati juba sisseviidud ja toi-

mivat kvaliteeditagamise- ja kvaliteedikontrolli-süsteemi vastavalt uue täiendatud standardi EVS ISO/IEC 17025 nõuetele. Laboratoorium akrediteeriti 04.10.2001 Eesti Akrediteerimiskeskuse poolt vee kvaliteedi analüüsides valdkonnas. Laboratooriumis väljatöötatud kvaliteedi tagamise ja kvaliteedikontrolli süsteem on eelduseks, et laboris saadud keemilise analüüsi tulemused on usaldusväärsed ja tõepärased. Kvaliteedi tagamine kindlustatakse laboratooriumi sise- ja väliskontrolliga ning süstemaatilise osalemisega riiklikel ja rahvusvahelistel võrdluskatsetel.

Laboratooriumi töötajad osalevad süstemaatiliselt vabariigis korraldataval kvaliteedi tagamise ja kvaliteedikontrolli seminaridel. Veekvaliteedi laboratoorium osaleb regulaarselt heit-, pinna-, põhja- ja joogivee, aga võimalusel ka merevee laboratooriumidevahelistel võrdluskatsetel nii riiklikul (kaks korda aastas) kui ka rahvusvahelisel tasandil. Määratavate näitajate arv ja analüüsitud kontsentratsioonid varieeruvad laias diapasoonis, hõlmates kõiki veekvaliteeti iseloomustavaid parameetreid.

Laboratoorium on nimetatud Keskkonnaministeeriumi poolt pinnavee referentslaboratooriumiks, kes viib kaks korda aastas pinnaveeseire programmi täitvatele laboratooriumidele läbi pinnavee keemiliste näitajate laboritevahelisi võrdluskatseid. Vastavalt referentslabori kohustustele korraldab laboratoorium võrdluskatsete tulemuste arutelusid, võrd-



Joonis 1.
Veeseire automaatjaam veekvaliteedi ja äravoolu kontrolliks.



Joonis 2.
Vee keemilised analüüsid.

luskatsete tulemuste arutelusid, laborite metoodilist nõustamist ja kvaliteeditagamise seminare. Keskkonnaministeeriumi poolt on keskkonnatehnika instituudi laboratoorium nimetatud pinnavee referentslaboratooriumiks ka HELCOMi programmi täitmisel.

Laboratoorium on õppebaasiks ja uurimiskeskuseks bakalaureuse, magistri- ja doktori tasandi üliõpilastele.

Veekvaliteedi laboratoorium on võimeline tegema ettevõtetele, firmadele, asutustele ja eraisikutele erinevaid analüüse loodus- ja heitveest. Laboris määratakse:

- füüsikalisi ja füüsikalise-keemilisi parameetreid;
- summaarseid mõju- ja ainenäitajaid (orgaanilised ained, lämmastiku- ja fosforühendid, lahustumata ja lahustunud lisandid);
- anioone ja katioone;
- ainerühmadena määratavaid ühendeid (kloororgaanilised taimekaitsevahendid-pestitsiidid, mineraalõlid ja nafta päritoluga süsivesinikud, üldorgaaniline süsinik).

PILOOTUURINGUD

Keskkonnakaitse nõuete rakendamisel on sageli üheks takistuseks teadmiste ja kogemuste puudumine. Selleks on vajalik tõhustada koolitust ja infovahetust. Väikevesikonnad on samaaegselt ka näidialadeks, et demonstreerida erinevate keskkonnatehnoloogiate ja veekaitsemeetmete tõhusust.

Eesti jõed on üldiselt hea puhverdusvõimega. Transformeerumine ja peetus jõesüsteemides vähendab oluliselt jõgede reostuskoormust järvedesse ja merelehtedesse. Veekogudes toimuvate isepuhastusprotsesside tundmine võimaldab välja töötada meetmeid lämmastikreostuse vähendamiseks. Seetõttu viiakse pilootaladel läbi kompleksuuringud, mis annavad aluse jõgedes toimuvate füüsikalise-keemiliste ja bioloogiliste protsesside modelleerimiseks.

MUDELID KIRJELDAVAD KEERULISI PROTSESSE

Mudelite kasutamisel hinnatakse mitmesuguseid stsenaariume, mis põhinevad erinevatel veekaitsemeetmete rakendamise prognoosidel. Modelleeritakse toitainete ärakande- ja isepuhastusprotsesse ning reostusainete transformeerumist jõesüsteemides. On

juurutatud ja kasutatakse edukalt PolFlow, QUAL2, MESAW, HBW jt mudeleid.

Suurt rõhku on pandud veekvaliteedi standardite ja nõuete väljatöötamisele ning Euroopa Liidu veealastest direktiividest tulenevate nõuete ühtlustamisele Eesti olude ja keskkonnaningimustega. Tegeldakse jõgede tüpiseerimisega nende loodusliku eripära alusel ja töötatakse välja pinnaveekogude klassifitseerimise alused nende kvaliteedi alusel vastavalt EL direktiivide nõuetele.

Seoses kliima globaalse soojenemisega uuritakse muutusi jõgede hüdroloogilises režiimis. Eesti pikaajalised vaatlusread (70–80 aastat) võimaldavad välja selgitada muutusi ja trende. Muutused hüdroloogilises režiimis kajastuvad otseselt toitainete ärakande- ja fosforiühendite ja mõjuna vee ökosüsteemidele, eeskätt kasvab suviste tulvadega toitainete ära-kanne, mis soodustab otseselt eutrofeerumist.

Meie uurimisteedad käsitlevad järgmisi põhilisi probleeme:

- toitainete (lämmastik ja fosfor) liikumine vesikonnas ja neid mõjutavad protsessid;
- veekogude saastumine ja eutrofeerumine;
- põllumajanduse hajureostuse veekaitsemeetmete väljatöötamine.

VALGLA PRINTSIIP

Koostöös Euroopa Liidu partneritega oleme jõudnud järeldusele, et veekeskonna kaitset saab tõhusalt korraldada vaid uurides ja majandades kogu jõgede ja järvede valglat kui tervikut. Meie uurimistulemused on suunatud veekogude taustsüsteemide (s.o loodusliku seisundi) iseärasuste väljaselgitamisele, millele tugineb inimõju hindamine vee ökosüsteemidele. Uurime veekogu mõjureid, nii punktallikaid kui ka põllumajanduslikku hajureostust ja maakasutuse struktuuris aset leidnud muutusi, et välja selgitada säästlikke ja efektiivseid veekaitsetehnoloogiaid, eriti väikejõgede tingimustes. Meie poolt teostatavad tegevused:

- valgla keskkonnakaitse seisundi uuringud, analüüsid ja sünteesid;
- veemajanduskavad ning juhised nende teostamiseks, sealhulgas keskkonnanõukonoomilised analüüsid;
- statistilised ja kartograafilised mudelid veekvaliteedi prognoosimiseks ning reostusallikate mõju identifitseerimiseks.

HEITVEE PUHASTUSTEHNOLOOGIAD

VEEVARUSTUSE JA KANALISATSIOONI ALASED RAKENDUSUURINGUD

Nii loodusliku kui reovee puhastustehnoloogia valas on viimastel aastatel põhitähelepanu osutatud reovete puhastusele. Koostöös Tallinna ja teiste Eesti linnade vee-ettevõtetega on uuritud toitainete (fosfori, lämmastiku) ärastamisprotsesse reovetest, reoveemuda käitlusega seonduvaid probleeme.

Uuritud on jääkmuda stabiliseerimise täiustamist suurtes reoveepuhastusjaamades. Koostatud on variantskeemid mudamajanduse optimeerimiseks väikese ja keskmise suurusega reoveepuhastusjaamades. On uuritud termiliselt eelkäideldud muda stabiliseerimise hügieenilist efekti ja mõjusid järgnevale muda tahendamisele, nende mõju muda stabiliseerimisele kontakttingimuses. Uurimuste tulemusena on antud soovitusel ja põhilised projektparameetrid linna reoveepuhastusjaama mudakäitluse täiustamiseks. Veevarustuse alal on osaletud mitme Eesti linna veeskeemide koostamisel, antud soovitusi veeallika ja põhjavee vajaliku puhastusmeetodi valikuks. Uuritud on veesäästu ja veekvaliteedi probleeme linnade veevõrkides.

JÕGEDE HÜDROENERGEETILISE POTENTSIAALI KASUTAMINE

Seoses vajadusega selgitada välja alternatiivenergia saamise võimalikke allikaid teostasid TTÜ veeuurijad Põhjamaade Nõukogu NOPEF'i tellimisel koostöös Rootsi kompaniiga DriveTech Intl. AB eeluringu Eesti hüdroressursside väljaselgitamiseks, mida oleks otstarbekas kasutada elektrienergia tootmiseks. Uuringud näitasid, et potentsiaalsetest hüdroressurssidest (~50 MW) on tehnilis-majanduslikel kaalutustel otstarbekas kasutada ~ 20 MW keskmise aastase toodanguga 8 kuni 10 Gwh/aastas, mis kataks kuni 2–3% Eesti energiatarbest. TTÜ teadlaste uuringud on näidanud, et vanade paisude – hüdrotehniliste ehitiste taastamine ei ole oluline ainuüksi alternatiivenergia tootmiseks, vaid võimaldab eelkõige lahendada vooluvete äravoolu sesoonset reguleerimist, taastada maastikuhooldust, edendada rekreatsiooni, parandada jõevete kvaliteeti. Kalavarude rände ja taastootmise eesmärgil on vajalik rajada optimaalsed kalakäigud. TTÜ koostöös Keskkonna- ja Põllumajandusministeeriumidega on taotlenud ÜRO FAO toetust pädevate kalaekspertide osalemiseks ning koolitamiseks Eestis.

NANOTEHNOLOOGIA JA TERAVIKMİKROSKOOPIA

Ants Lõhmus, Ilmar Kink

Tartu Ülikooli Füüsika Instituut

NANOTEHNOLOOGIAST ÜLDISELT

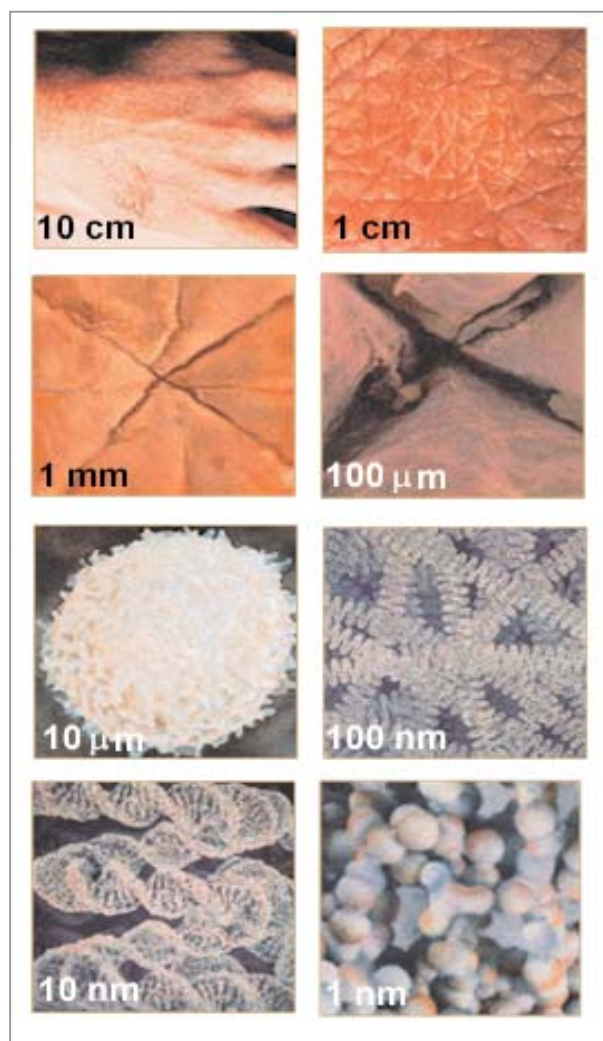
Nanotehnoloogia on multidistsiplinaarne tehnoloogia ja fundamentaalteaduste piirimaile olev uurimisvaldkond, mida peetakse peamiseks tuleviku kõrgtehnoloogilise tööstuse aluseks. Nagu nimigi viitab, tegeleb nanotehnoloogia objektide ja nähtustega nanomeetrilises skaalas (10^{-9} m, joonis 1) alates umbes 100 nanomeetrist ja lõpetades üksikute aatomite mõõtmetega. Nanotehnoloogia põhieesmärgiks võib lugeda püüdu üksikute aatomite või molekulide (või ka nende väikearvuliste kogumite) manipuleerimisega saavutada lõppkokkuvõttes makroskoopilises skaalas kasutatav efekt või tulemus. Nanotehnoloogiat püütakse rakendada väga erinevates valdkondades alates biotehnoloogiast ja meditsiinist lõpetades elektroonika ja masinaehitusega ja seetõttu on valdkonna konkreetne ja selgepiiriline kirjeldamine üsnagi keeruline ja definitsioon jääb paratamatult pisut laialivalguvaks.

NANOTEHNOLOOGIA ARENGU PÕHJUSED

Kõrgtehnoloogiline areng on viimasel ajal väga tihti seotud olnud mikro- ja nanomaailma nähtustega ja objektidega. Eriti drastiliseks näiteks, kus viimasel ajal on edu saavutatud põhiliselt seadmete töötavate komponentide mõõtmete vähendamise teel, on kahtlemata elektroonikatööstus ja põhjused on ilmselged. Elektroonika- ja andmetööstuses peetaksegi nanotehnoloogia rakendamise lähimateks eesmärkideks veelgi väiksemaid transistore, mis toovad endaga kaasa veelgi suuremaid protsessorite kiiruseid, veelgi tihedamat infosalvestust, veelgi väiksemaid arvuteid jne. Aga lisaks sellele pole välistatud ka täiesti uutel põhimõtetel töötavad seadmed, sest nanomeetriliste mõõtmete juures hakkavad ilmema uued nähtused, nagu näiteks kvantefektid.

Teistes valdkondades on üldistamine pisut keerulisem, aga ühiseks jooneks võib lugeda püüdu arenda ressurside vähendamise ja protsesside efektiivsuse tõstmise suunas. On ju selge, et palju kasuli-

kum on näiteks viia ravim otse haige raku juurde kui jääda lootma statistilisele tõenäosusele ja kogu organismi ravimiga üle ujutada. Aga just selliseid nano-



Joonis 1.

Nanomeeter *zoomituna* inimese käe sisse.

meetrilisi ravimikandjaid või markereid peetakse üheks nanotehnoloogia rakenduseks meditsiinis. Sarnaseid kujukaid näiteid võib ridade tuua väga erinevatelt elualadelt.

Üldistades võib öelda, et nanotehnoloogia võtmesõnadeks on kiirus, efektiivsus ja ressursisäästlikkus.

PEAMISED PROBLEEMID

Nanotehnoloogia kiire tööstusliku rakendamise põhitakistuseks on nanostruktuuride valmistamise odava tehnoloogia puudumine. Käesoleval ajal uuritakse väga mitmeid erinevaid potentsiaalseid mooduseid, aga ühist seisukohta, milline neist tulevikus prevaleerima hakkab, veel ei ole. Praegu elektroonikatööstuses peamiseks tehnoloogiaks oleva fotolitoograafia rakendamisel on fundamentaalsed takistused, sest valguse lainepikkus jääb suuremaks kui objektide mõõtmed. Lahendus oleks kas elektron- või röntgenlitoograafia kasutuselevõtt ja kogu maailmas käib aktiivne sellesuunaline uurimistöö, kuid siiani on need meetodid veel liiga kulukad otseses tootmistegevuses rakendamiseks. Aga kaugelki mitte kõik ei pea ülalmainitud meetodeid perspektiivseteks ja uurimistöö käib väga mitmes erinevas suunas.

NANOTEHNOLOOGIA JA MAJANDUS

Probleemidest hoolimata on nanotehnoloogia kiiresti laienev valdkond, mis tungib järjest enam ka tööstusesse. Uuringud on näidanud, et just nanotehnoloogiat peetakse peamiseks majanduse mõjutajaks tulevikus. Seda kinnitab ka fakt, et kulutused nanotehnoloogiale on viimaste aastate jooksul kasvanud kogu maailmas. USA valitsus alustas spetsiaalset programmi (*National Nanotechnology Initiative*), mille ainus eesmärk on toetada ja arendada nanotehnoloogiat. Antud programmi eelarve on võrreldes aastaga 2000 kasvanud 56%, s.o. 422 miljonit dollarit ning kasvab samas tempos, jõudes järgmiseks 2003. aastaks, 710 miljonini. Euroopa kulutused on tagasihoidlikumad, kuid suund on sama. Euroopa Liidu liikmesmaades on näiteks valitsuse toetus nanotehnoloogiale aastatel 1997–2000 suurenenud üle 40% – 130 miljonilt eurolt aastal 1997, 184 miljoni euronil aastal 2000.

Ka Kaug-Idas on kulutused nanotehnoloogiale muljetavaldavalt. Kõige kiirem on kasvutempo Jaapanis: aastal 1998 kulutas valitsus nanotehnoloogiale 113 miljonit dollarit, 2001. aastal oli summa 466 miljonit ning 2002. aastal 650 miljonit dollarit.

Kuna nanotehnoloogia piirid on muutunud hägusemaks, ei pruugi antud statistika reaalsust täpselt kajastada. Mitmeid teadusuuringute valdkondi (näiteks biotehnoloogiat) peaks samuti nanotehnoloogia hulka arvestama, kuna need on muutunud multidistsiplinaarseks. Seega võivad näitajad veelgi suuremad olla.

Mitmetes riikides on käivitatud erinevad nanotehnoloogia tugiprogrammid (suurimad USA-s ning Jaapanis), mis toetavad nii ettevõtteid kui teadusasutusi. Nanotehnoloogia firmade vastu tunnevad varasemast rohkem huvi riskikapitalifirmad. Mitmed maailma suuremad ettevõtted jagavad oma pikaajalistest uurimis- ja arendustegevuse eelarvest kuni poole nanotehnoloogiale. Peamised suuretted, kes on 2000. aastal investeerinud nanotehnoloogiasse, on IBM, Motorola, Hewlett Packard, Hitachi, Dow Chemical ja 3M.

USA *National Science Foundation* ennustab, et nanotehnoloogia toodete turg jõuab aastaks 2015 triljoni dollarini. Samas võib innovatsioonikiirus ning nanotehnoloogia areng tugevalt varieeruda erinevates tööstusharudes. Näiteks nanomaterjalidele ennustatakse kõige kiiremat kommertsialiseerumist.

Seega ennustatakse nanotehnoloogia toodete turule hüppelist kasvu. Käesoleval hetkel on kogutulu antud tööstuses 45,5 miljonit USA dollarit, kuid aastaks 2005 ennustatakse nanotööstuse tuludeks 225,5 miljonit USA dollarit. Nanotehnoloogia toodete kasutajate ring laieneb järjest, kuna nanotoodete valmistamine muutub lihtsamaks, kiiremaks ja odavamaks.

NANOTEADUS

Kui eespool sai mainitud, et nanotehnoloogia laiaulatuslikuks rakendamiseks majandustegevuses käib alles ettevalmistus, siis nanoteadus – teadus nanoobjektide omadusest, nanomaailma protsessidest ja kuidas seda kõike kasutada saaks – on viimasel ajal jõudsalt arenenud. Seda eeskätt tänu sellele, et on välja arendatud piisavalt tõhusad vahendid ja meetodid nanostruktuuride uurimiseks. Just nanotehnoloogia rakenduste leidmisel ja nanoteaduses saab Eesti teadus edukalt kaasa rääkida, sest vajaminev aparatuur ei ole astronoomiliselt kallis ning uuritavad nähtused ja objektid on ülimalt mitmekesised ja laiaulatuslikud, mis tähendab et ka “väiksematele tegijatele” leidub oma “nišš”.

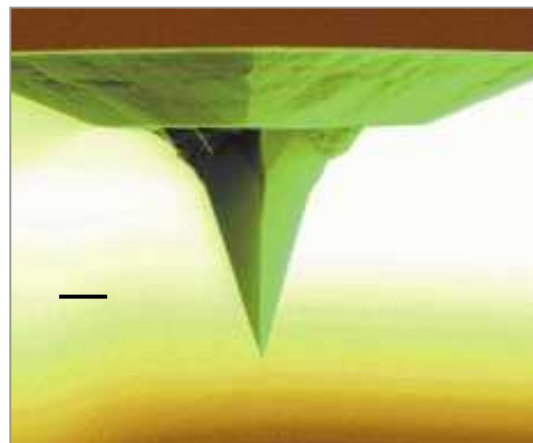
Üheks olulisemaks “nanoinstrumendiks” on teravikmikroskoop (*Scanning Probe Microscope*). Teravik-

mikroskoopia põhiolemus seisneb selles, et miniaturne ja üliterav teravik (joonis 2) “tunnetab” uuritavat pinda ja edastab oma seisundi muutuse kontrollaparatuuri kaudu arvutile, kus omakorda on võimalik saadud andmetest vajalik informatsioon välja filtreerida. Tavalise mikroskoobiga seob teravikmikroskoopi ainult nimi, kõik ülejäänud alates ehitusest ja lõpetades tööprintsipidega on täiesti fundamentaalselt erinev. Kõige tavalisemalt kasutatakse teravikmikroskoopi pinna profiili kujutamiseks, aga võimalikud kasutusvaldkonnad on palju laiemad, milledest märkimisväärseim on võimalus teravikuga kontrollitaval pinnal üksikuid aatomeid või nende väikeseid kogumeid ruumiliselt liigutada, neid näiteks nanostruktuuride “ehitusblokkidena” kasutades.

NANOTEHNOLOOGIA JA EESTI

Laiemas mõttes nanotehnoloogiaga tegelejaid on Eestis mitmetes valdkondades, alates geenitehnoloogidest (peamiselt TÜ allüksustes ja ka mõnedes kommertsettevõtetes), lõpetades materjaliteadusega (nii TTÜ kui TÜ vastavad allasutused). Teravikmikroskoopiaga aga tegeletakse peamiselt TÜ Füüsika Instituudis, kus vastava programmiga alustati juba 6–7 aastat tagasi. Üheks esimeseks suuremaks kordaminekuks võib lugeda universaalse tööstus- ja tehnikaõppe teravikmikroskoobi väljatöötamist ja väikeseerias tootmist (joonis 3). Vastav projekt käivitati koostöös Eesti Tehnoloogiaagentuuriga ja kümned eksemplarid on juba müüdnud Rootsi ülikoolidele. Seadmel on rida olulisi uuendusi, mis teevad selle eriti sobivaks õppetöös – odavus, avatud arhitektuur (kõik tööelemendid on hästi nähtavad) ning ta ei vaja tööks eritingimusi. Lisaks on seade konstrueeritud nii, et õppetöö käigus purunevaid detaile on võimalik kiiresti asendada õppeprotsessi oluliselt pidurdamata.

Siinkohal on sobiv märkida, et nagu tänapäeval kõikjal kõrgtehnoloogilises teaduses, on ka TÜ FI teravikmikroskoopia programmi edu üheks aluseks koostöö, seda nii rahvusvahelises (peamiselt Lundi Ülikooli ja Chalmeri Tehnikaülikooliga Rootsis ning Läti Ülikooliga) kui kodumaises (TTÜ ja TÜ allasutused) ulatuses. Tippaparatuur on muutunud piisavalt kalliks ja samas väga spetsiifiliseks, mistõttu igal grupil pole lihtsalt mõistlik igat seadet endale hankida. Veelgi olulisem (ja ka ressursisäästlikum) on aga spetsiifilise *know-how* ja kogemuste vahetamine, mis aga sageli selles kontekstis märkimata jäetakse.



1 μm

Joonis 2.

Teravikmikroskoobi teravik.



Joonis 3.

TÜ FI-s loodud õppeotstarbeline aatomjõumikroskoop – EduScope.

Käesoleval ajal hõlmab TÜ FI teravikmikroskoopia uurimisprogramm mitmeid erinevaid suundi, mis küll ühest küljest moodustavad omaette terviklikke projekte, teisalt aga täiendavad üksteist ressursside ja tulemuste jagamise ning ühise kasutamise teel. Üheks selliseks uurimissuunaks, millega TÜ FI-s aktiivselt tegeletakse, on hübriidmikroskoopide väljatöötamine ja rakendamine uurimistöös. Hübriidmikroskoop on teravikmikroskoobi kombinatsioon mingi teist tüüpi mikroskoobiga, mille korral samaaegselt uuritakse objekti täpselt sama osa erinevate meetoditega. Tulemuseks on rikkalikum ja mitmekülgsem informatsioon objekti omadustest. Käesoleval ajal on loomisel ja kasutusel kaks hübriidmikroskoopi: TEM-SPM [1] (joonis 4) ja SPM-SNOM [2] (vastavalt TEM – *Transmission Electron Microscope*, transmissioon-elektronmikroskoop ja SNOM – *Scanning Near-field Optical Microscope*, lähiväljamikroskoop). Nendest esimene võimaldab teravikmikroskoobi tööd vahetult jälgida, st vaadelda, kuidas teravik ja pind omavahel üksteist mõjutavad, kui kiiresti ja millistel kaugustel kasvavad nanokontaktid nende vahele jne. Vahetult saab mõõta näiteks elektrijuhtivuse iseärasusi nanokontaktides. Samuti saab visualiseerida aatomjoomikroskoobi režiimis töötava teraviku objektiga kontakti hüppamise kaugust, sealt lahtirebimise jõudusid ja kõike seda reaalses aegruumis filmida.

Vaatamata ahvatlevatele võimalustele on aga maailmas vaid paar teadlaste gruppi, kes sellist tööd püüavad teha (peamiselt Jaapanis [3] ja Rootsis [4]). Põhiprobleemiks, mis piirab niivõrd huvitavate nähtuste jälgimist, on teravikmikroskoobi mõõtmed. Tuleb ju terve teravikmikroskoop mahutada 5 mm siseläbimõõduga toru sisse ja seal teha ka vajalikud liigutused kolmes ruumikoordinaadis. Teravikmikroskoop ise aga koosneb mõnekümnest mikrodetailist, mis tuleb ükskhaaval suure täpsusega valmistada. Peale kõige muu ei tohi elektronkiirte teele sattuda isoleeritud juhtmeid. Seega tuleb nii teravikmikroskoobi montaaž kui eeljusteering teostada optilise mikroskoobi all.

TÜ FI-s loodud seade on juba leidnud rakendust mitmetes teadusuuringutes [5].

Hiljuti töötati välja koostöös TÜ Orgaanilise ja Bioorgaanilise Keemia Instituudiga uudne materjal, mida on võimalik kasutada lähiväljamikroskoobi teravike valmistamiseks. Läbipaistev ja samaaegselt hea elektrijuhtivusega teravik (joonis 5) avaks uued võimalused tunnelmikroskoopia baasil pinna spekt-

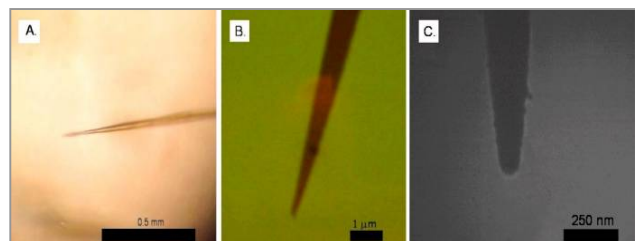
raaluuringuteks. Senini on seda üritatud teha, kasutades helesinist looduslikku India teemanti, mille kõrge hind ja eriti veel selle töötlemise kallidus ei võimalda seda materjali praktikas kasutada.

Perspektiivseks uurimismetoodikaks nanotehnoloogias on saamas nanotomograafia [6]. See on uurimismeetod, mis võimaldab uuritavate objektide pinnalähedase ruumala kolmedimensionaalset ülitäpset (teoreetiliselt kuni aatomlahutuseni) kujutamist ja rakendada seda erinevate objektide ruumstruktuuride kindlakstegemisel. Meetod annab unikaalset informatsiooni aine ehituse ja struktuuri kohta, mille saamiseks puuduvad üldiselt alternatiiv-



Joonis 4.

Teravikmikroskoop, mis elektronmikroskoobi sees võimaldab otseselt ja reaaliajas jälgida teraviku ja objekti vahel toimuvaid protsesse.

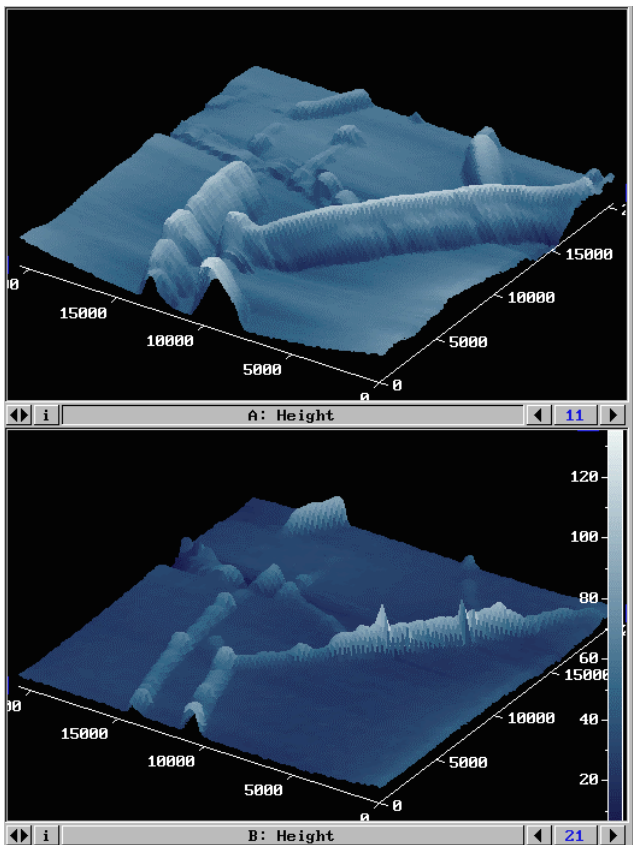


Joonis 5.

Läbipaistev ja elektrit juhtiv teravik, mida saab kasutada üheaegselt nii lähivälja- kui tunnelmikroskoobi andurina.

sed võimalused ja mida saab kas otseselt rakendada mitmetes teistes teadusuuringutes või mis üldiselt rikastavad teadmisi fundamentaalsete seoste kohta aine struktuuri ning omaduste vahel (joonis 6).

Uurimismetoodika ühendab endas traditsioonilise teravikmikroskoopia tehnoloogiaga, mis võimaldab objekti pindmise aatomkihi järjestikulist eemaldamist. Pärast igat eemaldamist võetud teravikmikroskoobi pildist moodustatakse kompuutertöötlu abil objekti ruumiline kujutis. Põhimõtteliselt on eemaldamiseks kasutatavad mitmed erinevad meetodid. Antud projektis on põhiliselt kavas kasutada laserablatsiooni, sest sellel on mitmed eelised teiste meetodite (nt keemiline söövitamine, plasmaerosioon jne) ees.



Joonis 6.

TÜ FI nanotomograafia projekti esmased katsetused näitavad meetodi perspektiivsust nanotehnoloogilistes uuringutes. Pildil on nanostruktuurne objekt enne ja pärast laserablatsiooni.

Üheks huvitavaks teadussuunaks, kus nanotehnoloogiat otseselt rakendatakse ja mis põhimõtteliselt võib kiiresti igapäevaelus rakendatavaid tulemusi saavutada, on nanotriboloogia (triboloogia – teadus hõõrdumisest). See on uus tehnika ja füüsika piirimal oleval uurimissuund, kus selgitatakse nakkumise (ehk teisisõnu kleepumise), hõõrdumise, kulumise ja määrimise, keemilise aktiivsuse ning triboelektromagnetismi olemust nanostruktuursel tasandil [vt. nt [7]]. Üheks nanotriboloogia levinud uurimismeetodiks on skaneeriva nanoteraviku kasutamine ülaltoodud protsesside uurimiseks. Nanotriboloogia arengus oli oluline mõistmine, et pindade hõõrdumisel on printsiipaalne tähtsus mikro- ja nanokontaktidel, mille üldpindala on tunduvalt väiksem hõõrduvate pindade pindalast. Ühtset hõõrdumise-kulumise teooriat, mis põhineks keemilise sideme aatomudelil ja elektron-foononprotsessidel, ei ole veel loodud. Pole isegi selge, kas libisemisel pindade liikumine toimub ühtlase kiirusega või seeriana diskreetsetest kleepumis-libisemisprotsessidest.

TÜ FI vastav uurimissuund on osa üleeuroopalisest Euroopa Teadusfondi koostööprogrammist “Nanorobo”.

Lisaks ülalkirjeldatule mõnevõrra “eksootilistele” teravikmikroskoopia rakendamistele kasutatakse seda TÜ FI-s igapäevaselt ka “traditsiooniliselt” – mitmesuguste objektide pindade nanostruktuuride kujutamiseks. Märkimisväärne on, et seejuures tehakse aktiivset koostööd väga paljude teadusharudega ja uurimisobjektide nimistu on parajalt kirev, alates biokeemilistest DNA-ga seotud objektidest, lõpetades geoloogiliste proovidega. Kitsamalt füüsikateadustest rääkides, tuleks lugeda enimarendatuks nanotehnoloogia valdkonnaks, kus teravikmikroskoopiat edukalt rakendatakse, kilede- ja ka üldisemalt materjalitehnoloogiat.

TULEVIKUPERSPEKTIIVID

Nanotehnoloogia lubadused on suured ja ambitsioonikad ning teatud skeptitsism on igati õigustatud. Aga isegi juhul, kui ainult murdosa visioonidest kunagi igapäevaelus kasutamist leiavad, on arengusuund ilmselt ennast õigustanud. Positiivsete tulemuste saavutamine on tõenäoline juba ainuüksi seetõttu, et erinevalt paljudest varasematest teaduse “suurtest lubadustest” (nagu näiteks juhitava ja kasutatava termotuumareaktsiooni projekt, mis laias laastus omab kahte võimalikku tulemit), on nanotehnoloogiliste visioonide spekter väga lai. See-

ga on ka tõenäosus, et osadki tulemused rakendamist leiavad, üsna suur.

Lisaks ei tohi ära unustada saadud kogemuste ja uute teadmiste tunnetuslikku väärtust. Nanostruktuurides lakkab mateeria olemast ainult aatomite ja molekulide statistiline kogum ja iga aatom omandab individuaalse mõõtme, mis toob endaga kaasa kontseptuaalselt erineva lähenemise vajaduse, mis omakorda viib tunnetusliku maailmapildi uuele tasemele.

Nanotehnoloogia olulisust tulevikus on teadvustanud endale nii Eesti teadlaskond kui ka laiem üldsus. Kuigi praegu leiab nanotehnoloogia Eesti majanduses vaid minimaalsel tasemel rakendamist, on tulevikule mõeldes oluline Eesti teadus- ja uurimisasutustes nanoteadusega aktiivselt edasi tegeleda, et olla valmis murranguks – nanotehnoloogia laialdaseks rakendamiseks kõrgtehnoloogilises tööstuses. Olemasolev tase lubab edukalt osaleda nanoteaduste arengus ja kaasa aidata murrangu kujundamisele, aga pidev ja laiaulatuslik töö

on hädavajalik taseme säilitamiseks ja valmisoleku kindlustamiseks nii tehnilise kui ka intellektuaalse külje pealt.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Lõhmus, R., Erts, D., Lõhmus, A., Jompol, J., Olin, H. Phys. Low-Dim. Struct., 2001, 3/4, 81.
2. Tätte, T., et al. Materials Sci. Eng., 2002, C 19, 101.
3. Kizuka, T., Yamada, K., Deguchi, S., Narusk, M. Phys. Rev., 1997, B 55, R7398.
4. Erts, D., Lõhmus, A., Lõhmus, R., Olin, H. Appl. Phys., 2001, A72, S71.
5. Erts, D. et al. Proc. 12th European Congress on Electron Microscopy, Brno, Czech Republic, 2000, 1271.
6. Magerle, R. Phys. Rev. Lett., 2000, 85, 2749.
7. Detkov, D.V. Phys. Uspekhi, 2000, 6, 541.

KÕRGTEHNOLOOGILISED MATERJALIÜRINGUD TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO LIS

Enn Mellikov, Andres Öpik

Tallinna Tehnikaülikooli materjaliteaduse instituut

Materjaliteadus ja -tehnoloogia on valdkonnad, ilma milleta ei kujuta tänapäeval tehnoloogia arengut ette ükski arenenud tööstusriik. Samas aga on väga raske üheselt ja ammendavalt määratleda neid kitsamaid valdkondi, mida materjaliteadus ja -tehnoloogia hõlmavad. Piisavalt näiteid võib tuua nii keemilise tehnoloogia, biotehnoloogia, metallide tehnoloogia kui ka paljudest teistest kitsamatest teadusvaldkondadest. Seega on tegemist tõeliselt interdistsiplinaarse teadusvaldkonnaga. Materjaliteadust ja tehnoloogiat käsitletakse tavaliselt ka koos nende materjalide praktiliste rakendustega ja siin on pilt juba hoopis lai, kattes pea kõik eluvaldkonnad. Tallinna Tehnikaülikoolis tegeldakse materjaliteaduse ja -tehnoloogiaga nii keemia- ja materjalitehnoloogia teaduskonnas, matemaatika-loodusteaduskonnas kui ka mehaanikateaduskonnas ning praktilised rakendused ulatuvad elektroonika, energeetika, ehituse ja mehaanika valdkondadesse.

Käesolev ülevaade piirdub ülevaatega vaid viimaste aastate tulemustest kõrgtehnoloogiliste materjalide teaduses ja tehnoloogias ning nendel põhinevatel rakendustel, mis on loodud põhiliselt TTÜ materjaliteaduse instituudi teadurite ja õppejõudude poolt. Need rakendused on olnud suunatud põhiliselt pooljuht-päikesenergeetikasse, mis on üheks võimalikuks alternatiiviks inimkonna üha suureneva energiavajaduse rahuldamiseks looduslike energiakandjate põletamise kõrval. Pooljuht-päikesenergeetikal on terve rida erilisi omadusi, mis teeb selle eriti perspektiivikaks. Nendeks on: päikese kui energiaallika ammendamatus; väga väikesed jooksvad kulutused päikesepatareide hooldusele; päikesepatareide pikaealisus ja usaldusväärsus, nad ei saasta loodust ja neil puuduvad liikuvad osad, mis muudaksid süsteemi tarbetult keerukaks; neid saab toota moodulitena, millest võib komplekteerida nii väikese mõne millivattise võimsusega süsteemi kui ka suure megavattidesse ulatava võimsusega jõujaama, mille võib ühendada tavaelektrivõrku või kasutada seal, kus teised energiaallikad puuduvad.

MATERJALIDE TERMODÜNAAMILINE MODELLEERIMINE

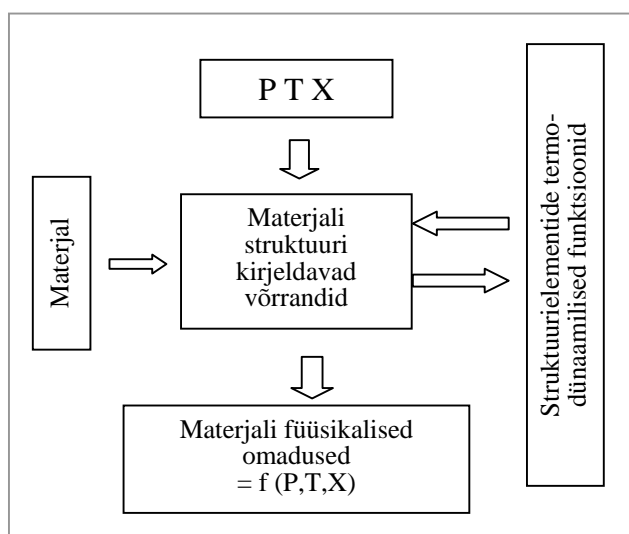
Igasugust keemilisel reaktsioonil põhinevat tehnoloogilist protsessi on võimalik kirjeldada teatud hulga iseloomulike seostega (võrranditega). Peaaegu alati on võimalik leida ka selle protsessi lõpptulemust kirjeldavaid füüsikalisi suurusi. Samuti on klassikalise keemilise termodünaamika mõistes alati olemas vähemalt kolm olulist tehnoloogilist protsessi mõjutavat parameetrit – P (rõhk), T (temperatuur) ja X (koostis). Kui nüüd õnnestub siduda omavahel matemaatiliselt lõpptulemust kirjeldavad füüsikalised suurused ja protsessi mõjutavad parameetrid süsteemi kirjeldavate võrranditega, on piisava hulga lähteandmete olemaolu korral teoreetiliselt võimalik modelleerida mis tahes tehnoloogilist protsessi. Antud valdkonnas oleks soovitud lõpptulemuseks etteantud omadustega elektronmaterjalid ja protsessi võiks tinglikult nimetada termodünaamiliseks modelleerimiseks.

Ükski teoreetiline modelleerimine aga ei ole tõselt võetav ilma selle praktilise kontrolli võimaluseta. Elektronmaterjalide korral on tavaliselt materjalide füüsikalised omadused määratud nende defektstruktuuriga. Lihtsaim mõõdetav füüsikaline parameeter on elektrijuhtivus. Seega on teoreetiliste arvutuste tõesuse kontrollimiseks vaja mõõta materjalide elektrijuhtivust sõltuvalt materjalide valmistamise protsessi (üldjuhul tehnoloogilise protsessi) parameetritest.

Sellist meetodilist lähenemist on tehnikaülikooli teadlased elektronmaterjalide uurimisel ja valmistamisel kasutanud aastakümneid. Aegade jooksul on oluliselt täienenud materjalide loetelu, alates klassikalistest A_2B_6 (CdS, CdSe, CdTe, ZnS, ZnSe) tüüpi elektronmaterjalidest, kolmikühenditest (CuInSe₂ ehk CIS), elektrit juhtivatest polümeeridest (polüparafenüleen – PPP, polüpurrool – Ppy, polüaniliin – PANI) ja lõpetades juba nimetatud klassikaliste ühendpooljuhtmaterjalide ühendamise mitmekihi-

listeks struktuurideks koos elektrit juhtivate polümeeridega.

Elektronmaterjalide termodünaamilise modelleerimise skeem on kirjeldatud joonisel 1. Protsessi edukus sõltub suurel määral sellest, kuidas täpselt on süsteemi struktuuri võimalik kirjeldada, kui palju ja kui usaldatavad on struktuurielementide termodünaamilist olekut kirjeldavad funktsioonid. Tavaliselt leidub neid enim kvantkeemiliste arvutuste tulemusena, samuti optiliste ja magnetiliste meetodite abil määratuna.



Joonis 1.

Elektronmaterjalide termodünaamilise modelleerimise põhimõtted.

Järgnevad osad kirjeldavad ülalnimetatud valdkonnas saavutatut.

A_2B_6 TÜÜPI POOLJUHTMATERJALIDE DEFEKTSTRUKTUURI UURINGUD

Sellist tüüpi materjalide defektstruktuuri uuringuid on maailmas viljeldud suhteliselt vähe. Alusepanijaks füüsikalise-keemilisele lähenemisele defektstruktuuri uuringutel oli F. Kröger [1] ja tehnika-ülikooli teadlased on seda klassikalist lähenemist aastakümnete jooksul arendanud [2, 3]. Defektstruktuuri on uuritud nii kõrgtemperatuurse elektrijuhtivuse meetodil kui ka madalatel temperatuuridel. Uuringute tulemusena valmivad defektide kontsentratsioonide sõltuvused materjali käsitluse tempe-

ratuurist või komponendi aururõhust. Seda tüüpi lahendused pakuvad nii teoreetilist laadi huvi kui on ka oluliseks abivahendiks etteantud omadustega valgustundlike pooljuhtmaterjalide valmistajatele. Reaalselt töötavad näiteks seda tüüpi materjalidel põhinevad optoelektronsed seadised aga madalatel temperatuuridel (enamuses toatemperatuuril) ja seetõttu on samavõrra oluline teada ka defektstruktuuris toimuvaid muutusi materjalide jahutamisel toatemperatuurile ja madalamatele temperatuuridele. Siin on võimalik palju olulist informatsiooni hankida optilistest mõõtmistest, mida siis omakorda seostatakse materjalide elektriliste omadustega.

Pooljuhtmaterjalide tehnoloogia õppetooli teadlaste poolt on välja töötatud originaalne meetod materjalide madaltemperatuursete optiliste omaduste, nagu fotojuhtivus ja luminesents, sidumiseks materjali valmistamise kõrgtemperatuurse protsessi käigus tekkivate struktuuridefektidega [4, 5]. Uurides materjalide valmistamisprotsessi tehnoloogiliste parameetrite – rõhu, temperatuuri ja koostise – mõju luminesentsspektrite intensiivsusele, õnnestus kindlaks määrata rida olulisi struktuuridefekte ning siduda need ka vastavate kiirguse lainepikkustega. Täiendava informatsioonina määrati veel rida struktuuridefektide termodünaamilisi funktsioone. Seda meetodit edasi arendades määrati ka keerukamate, mitmest struktuurielemendist koosnevate defektide koostiseid, arvestades seejuures ka ümbritseva kristallvõre mõju defektide koostisele [6].

Ühendpooljuhtmaterjalide, eriti kolmekomponentiliste süsteemide kirjeldamisel on väga oluline teada erinevate faaside koeksisteerimise piirkondi sõltuvana samuti materjali valmistamise protsessi tehnoloogilistest parameetritest. Uurides selliseid tasakaalulisi süsteeme on teist teed kaudu välja jõutud komponentide lahustuvust ja samal ajal ka defektstruktuuri kirjeldavate faasidiagrammideni [7].

ELEKTRIT JUHTIVAD POLÜMEERID

Elektrit juhtivad polümeerid on oma struktuurilt oluliselt erinevad ja nn “vähemkorrastatud” võrreldes klassikaliste ühendpooljuhtmaterjalidega. Ligikombavaks ja uurijatele ahvatlevaks muudab aga need materjalid võimalus muuta laiades piirides (5–6 suurusjärku) nende materjalide elektrijuhtivust ligikaudu samades väärtustes kui klassikalistel pooljuhtmaterjalidel. See on teostatav samuti nn legerimisega, ehk teatud kindlate lisandite lisamisega põhipolümeerile. Elektrit juhtivate polümeerimaterjalide omahind on võrreldes klassikaliste pooljuht-

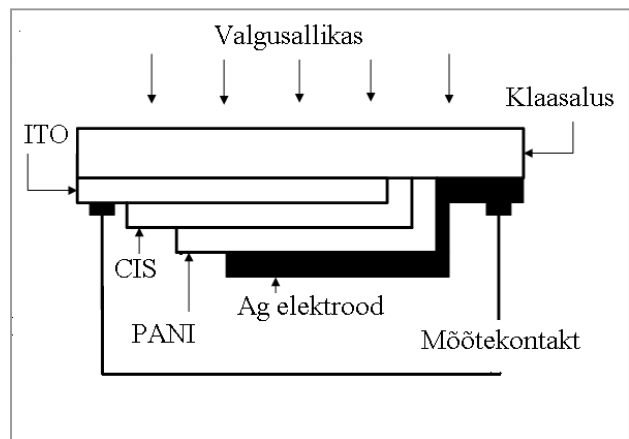
materjalidega palju odavam, samal ajal kui nende materjalide mehaanilised omadused on võrreldavad. Täiendavateks eelisteks on elektrit juhtivate polümeermaterjalide kerge kaal ja suhteliselt lihtne valmistamise tehnoloogia. Et elektrit juhtivate polümeermaterjalide elektrilised, optilised ja teised füüsikalised omadused on samuti võrreldavad klassikaliste pooljuhtmaterjalidega, ongi teadlastel väljakutses valmistada nendest konkurentsivõimelisi baasmaterjale (sageli kindlate omadustega nn funktsionaalseid materjale) elektronseadiste valmistamiseks. Kuna tehnikaülikoolis on nende materjalide uurimine sisuliselt välja kasvanud klassikaliste ühendpooljuhtmaterjalide uurimise kogemusi arvestades, on ka siin leidnud kasutust juba eespool kirjeldatud termodünaamiline lähenemine. Suhteliselt põhjalikult on uuritud polüparafenüleeni kui omalaadse mudelobjekti füüsikalisi omadusi ning laiendatud neis uuringutes saadud seaduspärasusi ka teistele elektrit juhtivatele polümeeridele nagu polüpürrool ja polüaniliin [8].

KLASSIKALISED ÜHENDPOOLJUHTMATERJALIDE JA ELEKTRIT JUHTIVATE POLÜMEERIDE KOMPOSIIDID – UUS VÄLJUND FUNKTSIONAALSETE MATERJALIDE LOOMISEKS?

Viimastel aastatel on kogu maailmas intensiivselt uuritud mitmekihiliste struktuuride valmistamise võimalusi anorgaaniliste ja orgaaniliste pooljuhtmaterjalide, elektrit juhtivate polümeeride ja fullereenide baasil. Erinevad kombinatsioonid loetletud materjalidest moodustavad küll heteroüleminekuid, kuid soovida jätab struktuuride valmistamise tehnoloogia korratavus, tehnoloogia on omakorda keeruline ning ka struktuuride efektiivsus on suhteliselt madal.

Pikaajaline kogemus A_2B_6 ja CIS tüüpi ühendpooljuhtmaterjalide ning viimastel aastatel elektrit juhtivate polümeermaterjalide omaduste uurimise alal on võimaldanud Tallinna Tehnikaülikooli teadlastel luua nendest materjalidest mitmekihiliste ja komposiitsete struktuuride baasil p-n üleminekuid. Joonisel 2 on kujutatud TTÜ materjaliteaduse instituudis väljatöötatud ja katsetatud struktuur nn “päikeseparatareide” tarbeks, milles heteroüleminek koosneb elektrit juhtivast polümeerist (Ppy) ja ühendpooljuhtmaterjalist CIS ($CuInSe_2$) [9].

Struktuur on valmistatud elektrokeemilise sünteesi meetodil, sünteesides esmalt ITO alusele CIS kile ja seejärel teise järgneva elektrokeemilise sünteesi teel juba saadud struktuurile omakorda Ppy kile. CIS on



Joonis 2.

ITO/CIS/Ppy/Ag struktuur nn “päikeseelemendi” tarbeks.

suhteliselt odav ja lihtsa tehnoloogia abil valmistatav n-juhtivuse tüübiga pooljuhtmaterjal, mille optilise neeldumise koefitsient on sobilik päikeenergia muundamiseks. Seega võib see materjal piisavalt usaldatava tehnoloogia väljatöötamisel osutada konkurentsivõimeliseks materjaliks päikeseneergeetikas. Küllalt lai on materjali valik ka elektrit juhtivate polümeermaterjalide osas (Ppy, PANI, PPP-Ppy komposiidid) p-tüüpi struktuurilelemendi valmistamiseks. Käesoleval momendil on selliste struktuuride omadusi määravaks CIS kile parameetrid, mis omakorda on määratud elektrokeemilise sünteesi ja kile termilise järeltöötuse parameetritega. Tõenäoliselt avaldab olulist mõju ka CIS ja elektrit juhtiva polümeeri vahelise kontaktpinna kvaliteet. Struktuuride parendamise üheks võimaluseks on püüda valmistada nn homogeniseeritud komposiite CIS ja elektrit juhtivast polümeerist minimiseerides kontaktpinna mõju.

Kokkuvõtteks võib nentida, et paarkümmend aastat uurimistööd ühendpooljuhtmaterjalide alal ja üle kümne aasta elektrit juhtivate polümeeride alal on jõudnud teineteisele sedavõrd lähedale, et luua juba koos perspektiivikaid uusi funktsionaalseid materjale ja seadiseid. Samal ajal on kirjeldatu vaid üheks võimaluseks uute ja efektiivsete päikeseelementide loomiseks. TTÜ teadlased uurivad intensiivselt ka paljusid teisi tehnilisi lahendusi ja on saanud huvitavaid tulemusi. Selle kinnituseks on tõsiasi, et sel aastal omistati antud teadus- ja tehnika suunas tegutsevale TTÜ materjaliteaduse instituudile Euroopa Liidu Päikeseneergeetika Materjalide ja Seadiste Tippkeskuse nimetus.

KASUTATUD KIRJANDUS:

1. Kröger, F. A. The Chemistry of Imperfect Crystals, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, 1964.
2. Lobanov, A., Nirk, T., Öpik, A. The System for Modification of the Semiconductive Materials Defect Structure- Transactions of Tallinn Techn. Univ., 1994, 737, 55-62.
3. Kuk, P., Aarna, H., Voogne, M. High-temperature point defects in CdS:Cu. Phys. Stat. Sol. (a), 1981, 63, 389.
4. Kuk, P., Altsaar, M. Defect structure of Cl and Cu doped CdS heat treated in Cd and S₂ Vapour. J. of Solid State Chemistry, 1989, 48, 1-10.
5. Krustok, J., Valdna, V., Hjelt, K., Collan H. Deep centre luminescence in p-type CdTe. J. Appl. Phys., 1996, 80, 3, 1757-1762.
6. Krustok, J., Mädasson, J., Hjelt, K., Collan, H. 1.4-Ev photoluminescence in chlorine-doped polycrystalline CdTe with a high density of defects. J. Mat. Sci., 1997, 32, 6, 1545-1550.
7. Lott, K., Raukas, M., Vishnjakov, A., Grebenik, A. High temperature electrical conductivity in the Cu solubility limit range in ZnS:Cu. J. of Crystal Growth., 1999, 197, 489-492
8. Golovtsov, I., Öpik, A. Conducting polyparaphenylene prepared by high temperature doping.- Proc. Eston. Acad. Sci.Eng., 1996, 2, 1, 107-123.
9. Bereznev, S., Kois, J., Mellikov, E., Öpik, A., Meissner, D. CuInSe₂/Polypyrrole Photovoltaic Structure Prepared by Electrodeposition, Proceedings of Seventeenth European Photovoltaic Solar Energy Conference, München, Germany, October 22-26, 2001, 2002, 1, 160-163.

RAKENDUSI REAAL- JA HUMANITAARTEADUSTE SÜMBIOOSIST

Einar Meister, Jaan Penjam, Enn Tõugu

Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituut

Seosed inseneri- ja humanitaarteaduste vahel on tihedamad kui ehk tavaliselt arvatakse. Tänapäeval ei saada klassikalistel humanitaaraladel läbi oma tehnoloogiateta (keeletehnoloogia, õpetamise tehnoloogia jms), ammuigi siis loodusteadustes, mille rakendused on tehnoloogiatega oluliselt läbi kasvanud (keemiatehnoloogia, geenitehnoloogia, biotehnoloogia). Aga õige on ka vastupidine – inseneriteadused, mille peamiseks sihiks on uute tehnoloogiate ja tehniliste lahenduste väljatöötamine, baseeruvad olulisel määral loodus- ja ka humanitaarteadustel. Käesolevas artiklis vaatame lähemalt arvutiteaduse ja lingvistika vastastikuseid rakendusi. Arvutiteadust on aegade jooksul viljeldud Küberneetika Instituudi mitmes osakonnas, arendatud on nii teoreetilisi aluseid kui saadud ka huvitavaid ja praktikas kasulikke tulemusi.

Arvuti- ja kommunikatsioonitehnika kiire areng on innustanud ulmekirjanikke ning teadlasigi unistama arvutist kui inimese intellektuaalsest abimehest. Ning kuigi infotehnoloogia on tõepoolest muutnud paljudel elualadel töökeskkonda, muutnud isegi inimsuhtluse olemust, nii et teatud mõttes saame rääkida uuest kooselu vormist – infoühiskonnast, jääb arvuti siiski just intellektuaalsetes valdkondades inimesele nõrgaks partneriks. Arvuti kasutamise tõttu on vaieldamatult kasvanud ning mitmekesis- tunud infotöötlaste võimalused. Tervikuna pole aga edusammud nii suured kui oleks võinud oodata, sest me ei saa hakkama üha kasvavas infohulgas orienteerumisega, vajaliku ülesleidmisega, arvuti juhita- vate protsesside jälgimisega ning suunamisega. Üheks probleemiks on kommunikatsioon arvuti ja inimese vahel. Keel (märgisüsteem), mida kasutame lävimi- sel teiste inimestega, sisaldab signaale ja sümboleid, mida tajume kompimise, haistmise ja maitsmise kaudu, mis arvuti käsitsemisel on peaaegu kasutud. Küllalt vähe kasutatakse tänapäeval ka kuulmis- meelt. Peamiselt on loetletud meeleorganeid kasuta- tud vaid arvuti korrasoleku tuvastamiseks kõige primitiivsemal tasemel. Ka inseneride poolt laialt

kasutatavad visuaalsed keeled on arvutile raskelt mõistetavad.

Maailmas püütakse arvuti ja inimese kommu- nikatsiooniprobleemi lahendada korruga mitmest otsast ning erineval moel. Üheks populaarsemaks teoreetiliseks rakenduslikuks uurimisteenaks on nn semantilise veebi temaatika, kus kirjeldatakse mõis- tete ja nähtuste ontoloogiaid, nende semantikat, lähtudes mõistete omavahelistest seostest. Küber- neetika Instituudis on see valdkond esindatud tee- maga “Ontoloogiale orienteeritud programmeeri- mine” (programmide süntees, ontoloogiate kirjel- damine). Seda tööd võib klassifitseerida tehisintel- lekti ja selle rakenduste uurimiseks mis on saanud instituudi üheks traditsiooniliseks suunaks. Siin teh- tavad tööd kajastavad ilmekalt alus- ja raken- dusuuringute omavahelisi seoseid. Ühelt poolt moo- dustavad kõnealusele valdkonnale teoreetilise aluse matemaatiline loogika ja teoreetiline informaatika. Teisalt, kuivõrd tegu on nii või teisiti algteadmiste kirjeldamisega ning tulemuse esitamisega inim- keeles, kasutatakse lingvistikale ja semiootikale omaseid tehnikaid. Mitmed Küberneetika Instituudis loodud tehnikatel põhinevad süsteemid on leidnud täiesti praktilise kasutuse [1].

Allpool tutvustame radarseire süsteemide modelleerimist, hüdrosüsteemide simuleerimist ning mõnin- gaid keeletehnoloogial põhinevaid rakendusi. Modelleerimisel kasutatakse täpselt defineeritud semantikaga visuaalset ontoloogiate kirjelduskeelt, mille kiireks projekteerimiseks ja realiseerimiseks on teadlased pakkunud lahenduse ning toetava tarkvara. Visuaalkeelte semantika realiseeritakse, kasutades eesti teadlaste väljatöötatud programmide automaatse sünteesi meetodit.

RADARKATTE MODELLEERIMINE

Radarseadmeid kasutatakse territooriumi jälgimi- seks nii kaitse-süsteemides kui transpordis. Radarite optimaalne paigutamine ning töörežiimi leidmine on

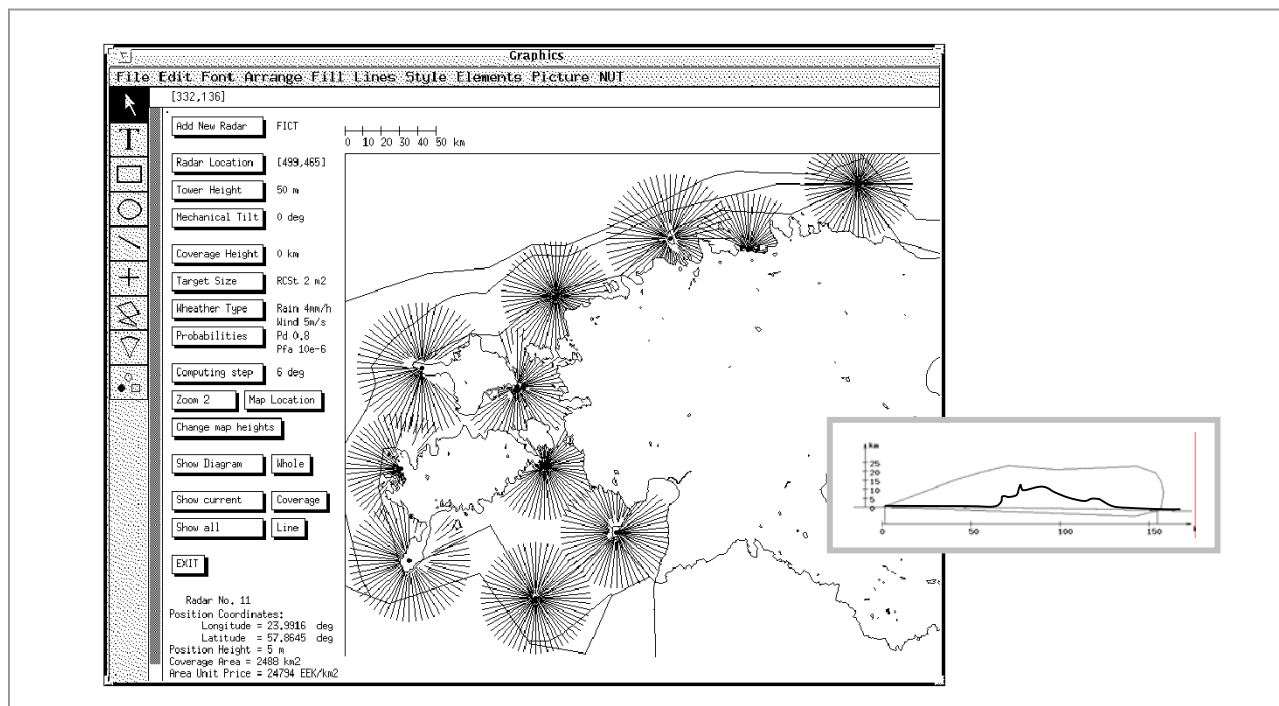
keerukas ülesanne, sest arvestama peab väga paljude teguritega, mis mõjutavad elektromagnetlainete levi. Loomulikult mõjutavad radari seireulatust geograafilised tingimused, sest sarnaselt valguskiirega ei saa radarikiirega “näha” mäe, maja või metsa taha.

Tuleb silmas pidada, et radarikiir peegeldub kõigilt ümbruskonna objektidelt ning sõltub nende füüsikalistest omadustest (pinnatemperatuur, liikumine jms murdumis-pegelduskoeffitsiente muutvad tegurid), keskkonnast, mida radarikiir peab läbima (udu, vihm, tõusvad õhuvoolud jms nähtused segavad elektromagnetkiirguse levikut raadiolokatsiooniasutustel kasutatavatel sagedustel, samuti nagu nähtava valguse sageduste piirkonnas). Radari vastuvõtja antenn registreerib nii enda väljasaadetud kiire peegelduse kui ka kõigi teiste raadiosaatjate kiired ja nende peegeldused tuhandetelt muudelt objektidelt. Ka kosmiline kiirgus on üheks raadiokiirguse allikaks. Seepärast tuleb hoolega valida aparatuuri, andmetöötlusalgoritme ning nende konfiguratsiooni, et lõpptulemusena näha ekraanil just neid objekte, mida on tarvis registreerida või jälgida.

Seiresüsteemi modelleerimiseks arvutil on loodud visuaalkeel, kirjeldatud ja realiseeritud selle süntaks ja semantika. Selles keeles “kirjutamine” toimub arvuti ekraaniaknasse kuvatud maakaardil, mille iga punkt on seotud vastava paikkonna digitaalkaardiga. Viimane määrab iga punkti geograafilised koordinaadid, maapinna kõrguse, taimkatte kõrguse ja liigid, ehitiste ja rajatiste olemasolu jms.

Kasutaja (seiresüsteemi projekterija) saab valida hiire abil positsioone kaardil ning proovida paigutada neisse erinevaid raadiolokatsiooniseadmeid, määrata ilmastikutingimusi, määratleda millised ilmastikutingimused võiksid esineda ning objektid, mida seiresüsteem peaks suutma avastada.

Tuginedes sellisele situatsiooni kirjeldusele ning keele semantika kirjeldusele sünteesib arvuti programmi, mille alusel leida toodud seadmete seireulatuse arvutamise tulemusi kujutatakse samal kaardil, nii et radarsüsteemi projekterija saab üsna hea ettekujutuse, millise ala tema kujutatav radarite süsteem võiks katta (joonis 1).



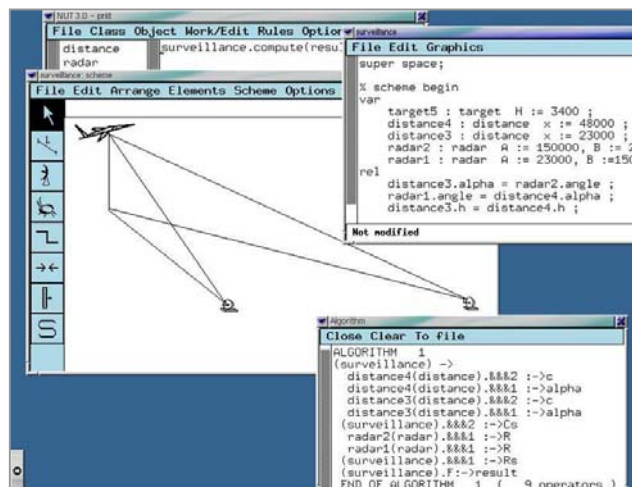
Joonis 1.

Rannikumere seiresüsteemi model.

Saadud kujutisel võib valida ühe radaritest, määrata suuna ning lasta süsteemil kuvada radari katte vertikaallõike koos maismaareljefiga (joonise 1 parempoolne aken), mille järgi saab teatud liseteavet, miks antud radari seireulatus ei olnud antud suunas võib-olla soovitud ulatusega.

Paigutades radarid digitaalsele kaardile ja/või täpsustades vastavates dialoogiakendes radarite parameetreid (joonis 2), arvutatakse nende poolt kaetav ala, ning seda tööd korratakse kuni rahuldava paigutuse saamiseni. Töö üheks põhitäitjaks on olnud Vahur Kotkas. Arvutus on tehtud Küberneetika Instituudi tööjaamadel, neid tööd kiirendamiseks paralleelselt kasutades.

Töö tulemusi on kasutada piirivalveameti, veeteedeameti ja kaitseministeeriumi radarsüsteemide paigutuse optimeerimisel. Lisaks radarkatte arvutustele on kasutatud sama visuaalkeelt ning arvutisüsteemi hindamiseks, kuidas ühe radari töö võib teisi mõjutada, milline on projekteeritava süsteemi tekitatav raadiokiirguse tase asulates jms. Süsteem on kergesti laiendatav, nii et projekteeritavas seiresüsteemis saaks kasutada peale radarite muid elektroonseid seireseadmeid. Põhimõtteliselt saaks sellist süsteemi kasutada ka mobiilsidesüsteemide optimeerimiseks.



Joonis 2.
Radarite parameetrite täpsustamine.

Visuaalset kommunikatsiooni arvutiga kasutatakse ka masinaehituslikeks inseneriarvutusteks vajalike tarkvarapakettide loomisel Ahto Kalja juhtimisel [4].

HÜDROSÜSTEEMIDE SIMULEERIMINE

Visuaalsete keelte üheks edukamaks rakenduseks on hüdrostsüsteemide simuleerimine, mida tehakse koostöös Tallinna Tehnikaülikooliga [2, 3], põhitäitjad Mait Harf, Gunnar Grossschmidt. Selle töö tulemusena on saadud maailmas ainulaadseid tulemusi hüdraulika aparatuuride ja süsteemide dünaamika alal, mis võimaldavad väga täpsete mudelite peal analüüsida tööpinkide ning robotite hüdrostsüsteemide dünaamikat, lennukite maandumistelikute ja autode käigutuse vibratsioone dünaamilise koormuse all jne.

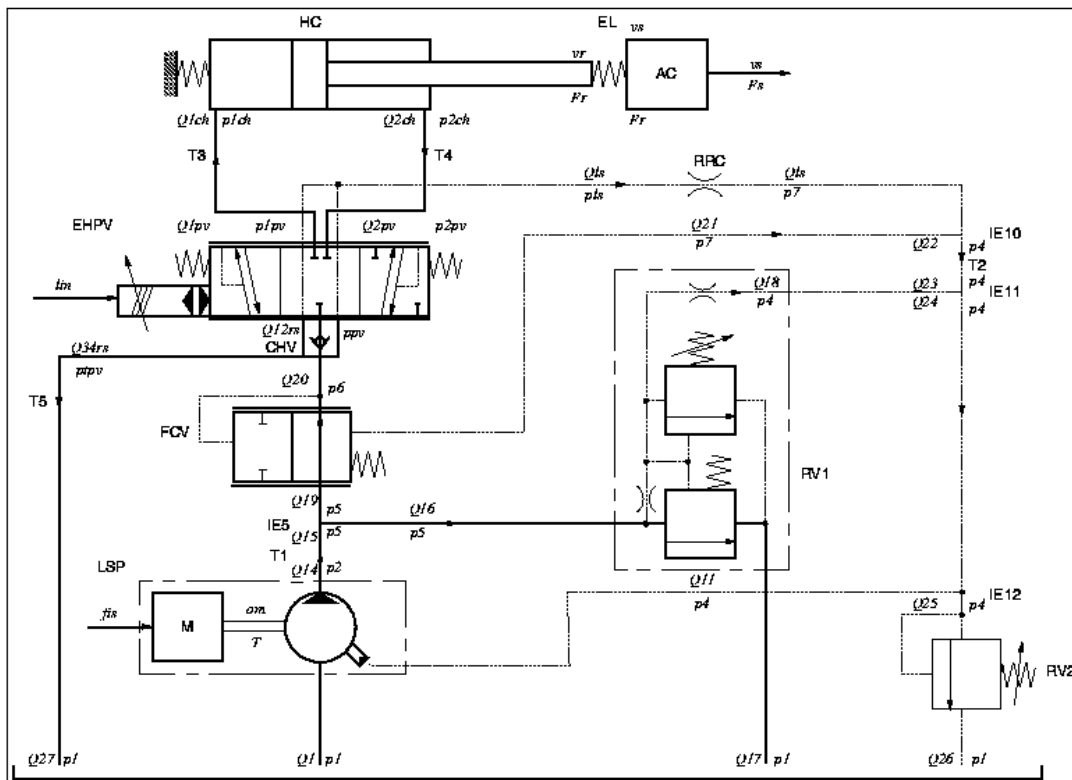
Selline ülesanne on arvutuslikult raske, kuna on tegemist nn jäiga süsteemiga, milles tuleb jälgida üheaegselt nii kõrgsageduslikke võnkumisi kui aeglaselt kulgevaid protsesse. Kogu see keerukus on peidetud konstrueeritud visuaalkeele semantikkasse, kontseptuaalne tase, milles peab süsteemi koostaja simuleeritavat objekti kirjeldama, on sarnane sellega, mida kasutati radarkatte modelleerimisel. Joonistada tuleb seadme põhimõtteline skeem (joonis 3), määrata komponentide parameetrid, seadme töö üldised nõuded ning arvutada seadme efektiivsust, turvalisust jt projekteerimisel vajalikke näitajaid.

UURINGUD KEELETEHNOLOOGIA VALDKONNAS

on teiseks rakenduslikuks suunaks Küberneetika Instituudis. Eesmärgiks on ka siin kommunikatsiooniprobleemi lahendamine. Loomulik keele kasutamine arvutiga suhtlemisel muutub reaalsuseks lähematel aastatel. Esmajoones saavad sellise suhtluskeele õigused nn “suured” keeled (inglise, prantsuse, hispaania, hiina ja jaapani keel), mille jaoks on vastav baastehnoloogia juba praeguseks suures osas olemas. Meie uuringute üheks oluliseks sihiks on luua arvutisuhtluses eesti keelele võrdsed võimalused võrreldes teiste keeltega.

Selle eesmärgi saavutamiseks on vajalikud järgmised komponendid:

- teadmised foneetikast, fonoloogiast, morfoloogiast, süntaksist ja semantikast;
- keeleressursid – suuremahulised kõne- ja tekstikorpused;
- tehnoloogilised lahendused – algoritmid ja programmid kõnesünteesiks ja -tuvastuseks, teksti morfoloogiliseks ja süntaktiliseks analüüsiks, jms.



Joonis 3.

Koormustundliku pumba skeem

Küberneetika Instituudi foneetika ja kõnetehnoloogia labori uurimisvaldkonnad haaravad ainult osa eelnimetatutest, keskendudes eelkõige eestikeelse suulise kõne ja -tehnoloogia uuringutele.

FONEETILISTE UURINGUTE

tulemusena esitatud eesti hääliku- ja vältesüsteemi akustilis-pertseptiivsed kirjeldused [5, 6, 7] on eelkõige keeleteaduse valdkonda kuuluvad, kuid samas leiavad need ka otsest rakendust eestikeelse kõne sünteesi- ning tuvastusalgoritmide loomisel.

Olulisel kohal on ka korduvkasutatavate keeleressursside loomine. EU Copernicus-projekti raames kogutud EESTI KEELE FONEETILINE ANDMEBAAS [8] sisaldab salvestusi 70lt kõnelejal ja on koostatud eelkõige foneetiliste uuringute vajadusi silmas pidades. Kõnetuvastussüsteemide treenimiseks vajatakse aga vähemalt 1000 inimese kõnenäiteid salvestatuna

erinevates akustilistes tingimustes. Sellise suuremahulise andmebaasi loomine on parajasti käimas (vt <http://www.phon.ioc.ee/base>).

Koostöös Eesti Keele Instituudi ja firmaga Filosoft on loodud eestikeelse KÕNESÜNTEESI prototüüp [9], mis oskab ette lugeda suvalist eestikeelset teksti. Programm on saadav vabavarana Intenetist (<http://www.phon.ioc.ee/synt>). Antud prototüübi baasil on välja töötatud Windows-keskkonnaga ühilduv kõnesüntesaator nägemispuuetega arvutikasutajatele. Kõnesünteesi kasutamine elektronposti ettelugemiseks mobiiltelefonis on tõenäoliselt üks lähitulevikus realiseeritavatest rakendustest.

Eriliseks väljakutseks on kindlasti EESTIKEELSE KÕNETUVASTUSE väljatöötamine. Kõnetuvastusest rääkides on sageli oluline täpsustada, millist tuvastussüsteemi silmas peetakse – kas tegu on väikese (< 100 sõna), keskmise (100–1000 sõna), suure

(>1000 sõna) või lausa piiramatu sõnastikuga, kas sõnu hääldatakse ühekaupa või sidusalt, kas süsteem on kõnelejast sõltuv või sõltumatu, kas süsteemi sisendiks on signaal kõrgekvaliteedilisest mikrofonist või hoopiski mobiiltelefoni kanalist, jms. Väikese sõnastiku mahuga isoleeritult hääldatud sõnade tuvastust on reaalne rakendada juba lähitulevikus. Üheks sellise süsteemi rakenduse võimaluseks oleks näiteks Eesti Mobiiltelefoni poolt realiseeritud mobiilse parkimise teenus. Vastav pilootprojekt andis küll paljulubavaid tulemusi heakvaliteedilise kõne puhul (tuvastuskorrektsus 98%), kuid reaalse mobiilside kanali sageduspiirangute ja häirete korral tuvastati korrektselt vaid ligikaudu 75% sõnadest [10].

Piiramatu sõnastikuga eestikeelse kõne tuvastus jääb lähiaastatel kahjuks ainult unistuseks, sest vastavad uuringud on alles algusjärgus ja lahendamist vajavate probleemide hulk suur.

Kõnetuvastusega mõneti sarnane ülesanne on KÕNELEJATUVASTUS, s.o. kõneleja isiku kindlakstegemine tema kõnenäidete alusel. Uuringud selles valdkonnas on suunatud eelkõige kõneleja-spetsiifiliste tunnuste analüüsile [11]. Viljakaks on osutunud mitmeparameetrilise normaliseeritud kõneleja-profiili idee, mida on edukalt rakendatud kõnesalvestuste ekspertiiside teostamisel kriminalistikas ja automaatse kõnelejatuvastussüsteemi prototüübi loomisel.

Rakendusuurimustel on oma positiivne tagasimõju teoreetilistele distsipliinidele, näiteks on arvutiteadlaste uurimistööd (sh ka ülalkirjeldatud rakendused) olnud aluseks mitmetele uutele uurimissuundadele üldises algebras ja loogikas (temporaalloomika mitmed süsteemid, mittemonotoonne loogika jm). Praktiliste inseneriülesannete lahendamine on viinud visuaalse programmeerimise meetodite tekkeni, tehisintellekt on stimuleerinud tõestusteooria arengut formaalloomikas ning kõnetehnoloogia on loonud uusi võimalusi eksperimentaalfoneetikas.

KASUTATUD KIRJANDUS:

1. Tyugu, E., Matskin, M., Penjam, J. Applications of structural synthesis of programs. Lecture Notes in Comp Sci., Vol.1708, Springer-Verlag, 1999, 551-569.
2. Grossschmidt, G., Harf, M. Modelling and simulation of hydraulic systems in NUT programming environment. Viertes Deutch-Polnishes Seminar "Innovation und Fortschritt in der Fluidtechnik", September 20-21, 2001, Sopot, 329-348.
3. Grossschmidt, G., Harf, M. Simulation of an electro-hydraulic servo-valve in NUT programming environment. Proc. of the 13th European Simulation Symposium "Simulation in Industry" ESS'2001, October 18-20, 2001, Marseille, France, 229-233.
4. Kalja, A., Kotkas, V., Tiidemann, T. CAD problem solving and technical systems modelling using the AI programming environments. Jaakkola, H. et al. (eds.) Information modelling and Knowledge Bases XII. IOS Press, Amsterdam, 2001, 284-290.
5. Eek, A., Meister, E. Acoustics and perception of Estonian vowel types. Phonetic Experimental Research, Institute of Linguistics, University of Stockholm, PERILUS XVIII, 1994, 55-90.
6. Eek, A., Meister, E. The perception of stop consonants: locus equations and spectral integration. Proc. of the XIIIth International Congress of Phonetic Sciences, August 13-19, Stockholm, 1995, 1, 18-21.
7. Eek, A., Meister, E. Simple perception experiments on Estonian word prosody: Foot structure vs. segmental quantity. Lehiste, I., Ross, J. (eds.). Estonian Prosody: Papers from a Symposium. Tallinn, 1997, 71-99.
8. Eek, A., Meister, E. Estonian speech in the BABEL multi-language database: Phonetic-phonological problems revealed in the text corpus. Proc. of LP'98. Vol II The Karolinum Press, Prague, 1999, 529-546.
9. Mihkla, M., Eek, A., Meister, E. Text-to-speech synthesis of Estonian. Proc. of 6th European Conference on Speech Communication and Technology, Vol. 5. Budapest, 1999, 2095-2098.
10. Meister, E., Lobanov, B., Vahisalu, R. Spoken dialogue system for mobile parking. Proc. of the International Workshop SPEECH and COMPUTER (SPECOM'2001), Moscow, Russia, 29-31 October, 2001, 123-126.
11. Meister, E. Kõneleja-spetsiifiliste tunnuste otsingul. Tähendusepüüdja. Pühendusteos professor Haldur Öimu 60. sünnipäevaks. Tartu, 2002, 266-284. (Tartu Ülikooli üldkeeleteaduse õppetooli toimetised; 3).

ELEKTROONIKUTELT INIMESELE JA ÜHISKONNALE: EILSED MÕTTED TÄNA TEOKS, TÄNASED HOMME

Mart Min

Tallinna Tehnikaülikooli elektroonikainstituut

SISSEJUHATUS

Missugune osa teadusest, tehnoloogiast ja inseneriasjandusest on elektroonikute jagu? Elektroonika oleks nagu pea kõikjal, samas pole just üheselt selged valdkonnad, kus elektroonika roll oleks määrav. Elektroonika justkui lahustuks infotehnoloogias ja arvutitehnikas, aparaadiehituses ja meditsiinitehnoloogias, energeetikas ja olmetehnikas.

Kindlaks pärusmaaks on siiski vast pooljuhtide ja mikroelektroonikaga seotud valdkonnad, kaasa arvatud tohutuid edusamme tegev ülikeerukate kiipide (chip – integraallülituse või mikroskeem) arendamine.

Ülalkirjeldatud kinnitab Rootsi Kuningliku Teaduste Akadeemia pressiteade 10. oktoobrist 2000: "...Akadeemia otsustas anda tänavuse Nobeli füüsikapreemia teadlastele ja leiduritele, kelle tööd panid aluse kaasaegsele informatsiooni ja kommunikatsiooni tehnoloogiale, eriti just kiiretoimeliste transistoride, laserdiodide ja integraallülituste leiutamise läbi. Ühise Nobeli preemia said aastal 2000 kolm elektroonikut: venelane Zores Alfjorov A. F. Joffe nimelisest Peterburi Füüsika-Tehnika Instituudist ja Ameerika sakslane Herbert Krömer Santa Barbara Kalifornia Ülikoolist "pooljuhtide heterostruktuuride arendamise ja rakendamise eest kiirtoime- ja optoelektronikas" ning ameeriklane Jack Kilby firmast Texas Instruments "tema panuse eest integraallülituse leiutamisesse".

Elektroonikal on tihe seos loodusteadustega (füüsika, keemia) ühelt poolt ja inseneriteaduse ning leiutamise teiselt poolt. On väga sümptomaatiline, et tervelt pool 2000. aasta Nobeli füüsikapreemiaga kaasnevast summast läks seekord elektroonikainseneri ja leiduri Jack Kilby kätte. Raske on leida sarnast tehnikaharu, kus baasteadus, arendus- ja inseneritöö ning tööstuslik tootmine oleksid üksteisele nii lähedal kui elektroonikas.

MIS ON EESTIS TOIMUNUD JA MIS ON TEOKSIL?

On siis ülalkirjeldatud nobelistide lugu iseloomulik ka meie koduse elektroonika arengule? Mõnevõrra üllatuslikult on see tõepoolest nii, ehkki "vana" elektroonikatööstus kukkus kokku 1990ndate aastate alguses, tõmmates osaliselt kaasa ka teaduse ja õppetöö. Töötuks jäi ligi 15 tuhat inimest, sealhulgas tuhanded insenerid ja sadakond teadlast/õppejõudu, kellest erialase töö on taas leidnud vähesed. Varasemad saavutused, kas või kosmoselabori MIR pardainstrumendid, tuntust toonud jõuelektroonika komponendid, pooljuhtseadised ja laserseadmed, mõõte- ja raadioaparatuur ning mikroskeemid ja mikroarvutid, samuti välisriikides patentitud skeemilahendused, vajusid nostalgilisse minevikku.

Õnneks kontsentreerus tõsine rahvusvaheline teadus- ja arendustöö Tallinna Tehnikaülikooli ja Cybernetica AS navigatsioonisüsteemide osakonna EKTA juurde. Tänapäevaks on lisandunud mitmed eraõiguslikud firmad, mille juures on käimas rakendusuringud ning kus töötavad doktorikraadiga teadurid, näiteks olgu firmad AnalooGdisaini AS, National Semiconductor Estonia, ArtecDesign, AS Clifton, M&T Elektroonika. Välja kujunenud on sidemed tugevate Põhjamaade ja USA firmadega, kusjuures mitmega neist on käimas lepingulised uurimistööd. Võiks öelda, et tänaseks on juba taastumas uurimis- ja arendustegevus tosina aasta eest olnuga võrreldavas mahus, ainult partnerid on teised, töö mõtestatum ja tulemusedki kaalukamad.

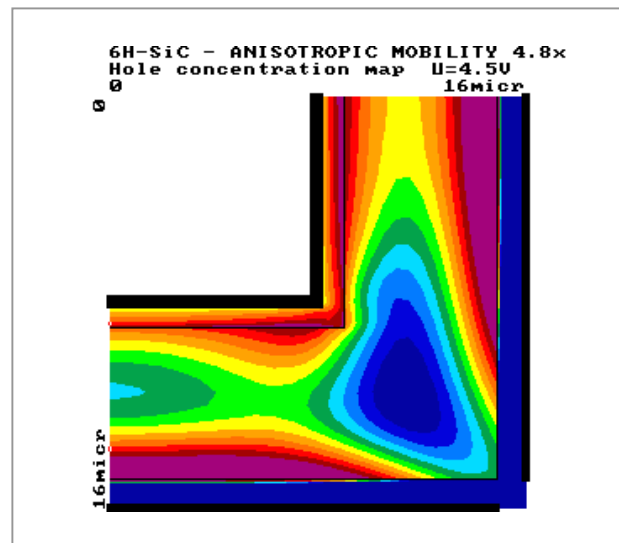
Uusi perspektiive avab tehnoloogia arenduskeskuste programmi käivitamine. Elektroonikute projekt "Elektroonika ja kommunikatsiooni tehnoloogiate arenduskeskus ELKO" pälvis esialgse heakskiidu. Oluliseks sammuks on teadustegevuse koordineerimine Elektroonika ja bioonika tippkeskuse raames, mis moodustati TTÜ juures 2002. aasta kevadel.

POOLJUHTELEKTRONIKA

Ei ole meil enam tuhandete töötajatega mikroelektronikatehast Tondi Elektroonika ega jõupooljuhtseadiste uurimise ja arendamisega tegelevat Pirita tee instituuti koos tuhandepealise töötajaskonnaga tehasega. On aga uued mikrokiipide disainifirmad AnalooGDisaini AS ja National Semiconductor Estonia, Inc. (endine ARSmikro), kus parkümmend eestlast projekteerivad aastas kümneid tellijale orienteeritud mikrolüliti. Disainitakse mikrolüliti telekommunikatsiooni- ja autotööstusele ning meditsiini tarbeks, näiteks implanteeritavatele närvpooljuhtühendusega kuuldeaparaatidele ja katseliselt ka südamestimulaatoritele. Elektroonikafirmas ArtecDesign Group arendatakse ühekiibi arvuteid koostöös Ameerika firmadega. Mikrolülitude tootmistehnoloogiat Eestis pole, meie firmad on "tootmiseta vabrik" (fabless factory) tüüpi. Toodetakse seal, kus tagatakse parim hinna/kvaliteedi suhe, näiteks Taivanis. Küll aga töötab meil Tartus uute materjalide (GaAs) baasil jõupooljuhtseadiseid tootv ja arendav firma AS Clifton.

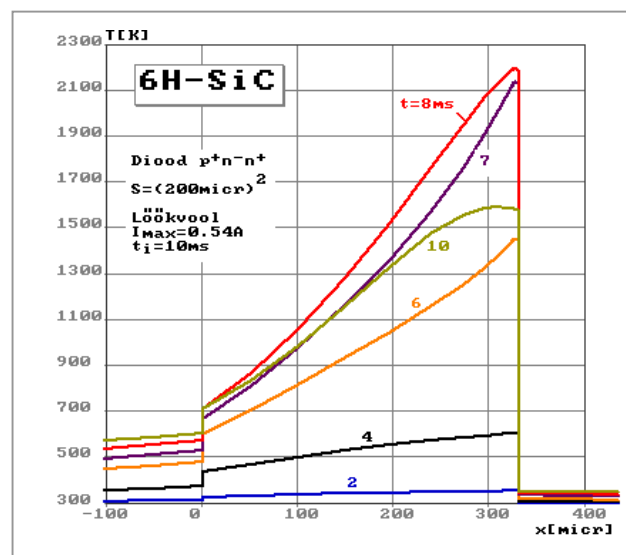
Kas on taastuval ja uueneval ettevõtlusel ka olulist seost Eesti teadusega? Ühte aspekti sai juba mainitud, nimelt töötab nendes firmades kümnekond doktorikraadiga inimest, kellest vähemalt osa on Eesti teadusmaastikul hästi tuntud. Mitmed firmade töötajad õpivad aga doktorantuuris TTÜ juures. Nende firmade ja TTÜ vahel on sõlmitud pikaajalised finantsiliselt tagatud uurimislepingud, sest eralduskiht baasestusest tootmistehnoloogiani on mikroelektronikas sedavõrd õhuke, et koostöö olemasolu on lihtsalt eksistentsi tingimus mõlema poole jaoks. Selles, et USA tuntud elektroonikakontsern National Semiconductor ostis ära disainifirma ARSmikro, oli oma osa ka perspektiivse koostöö olemasolul ülikooli ja selle teadusega.

Mis on siis silma hakanud Eesti teadlaste tööd pooljuhtelektronika vallas? Vast esmajoones uute pooljuhtmaterjalide elektrilis-füüsikaliste omaduste uurimine ja selle tulemustel põhinev pooljuhtstruktuuride numbriline modelleerimine ning nendes struktuurides toimuvate elektriliste ja termiliste protsesside simuleerimine arvutil (joonised 1 ja 2). Selleks töötati välja arvutisimulaatorite perekond DYNAMIT, mis juurutati USA firma Silvaco International produktis – jõuelektroonika komponentide projekteerimise tarkvarasüsteemis GIGA/ATLAS. Uut hoogu on andmas meie uurimisrühma eeldatav lülitamine Euroopa Liidu 6. Raamprogrammi toel organiseeritavasse laia keelutsooniga pooljuhtide



Joonis 1.

Simulaatoriga SiC-DYNAMIT-2DT arvatud laengukandjate tihedusjaotus päripingestatud 6H-SiC diodstruktuuris, kus liikuvuste anisotroopia kutsus esile paradoksaalse laengute kuhjumise väiksema liikuvusega suunale.



Joonis 2.

Simulaatoriga SiC-DYNAMIT-IDT arvatud temperatuurijaotuste dünaamika SiC valgusdiodi reaalse lõõkvoolueksperimendi korral struktuuri purunemiseelses režiimis, kus lokaalne hetketemperatuur jõuab väärtuseni 2200°K.

(SiC, GaAs jt) uurimise ja rakendamise koostöövõrku (Network of Excellence).

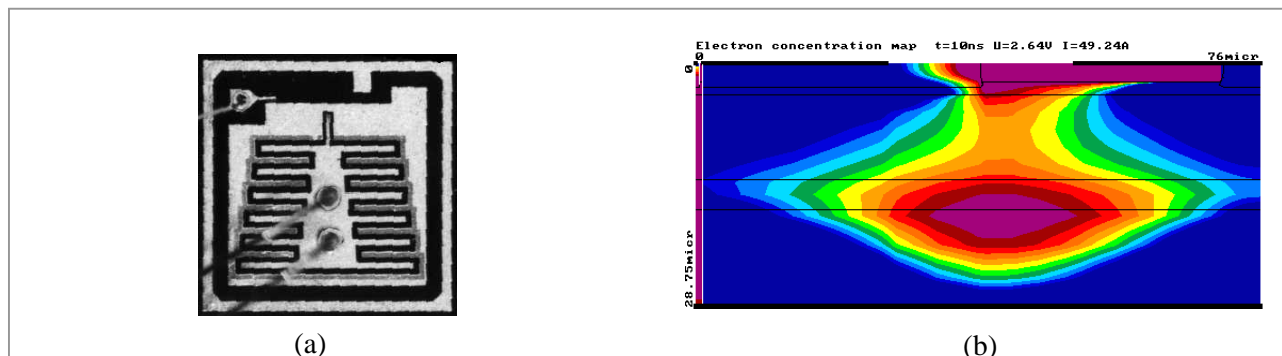
Osutub, et tööstuslikult perspektiivsed ränikarbiidi polütüübid 4H- ja 6H-SiC on makroskoopiliselt anisotroopsed materjalid, st et elektrivoolu tugevus katsekehas sõltub mitte ainult rakendatud elektrivälja tugevusest, vaid ka selle suunast kristallograafiliste telgede suhtes. Näiteks tuntud materjali räni (Si) korral niisuguseid komplikatsioone ei esine.

Kui hetkel veel on pooljuhtelektronikas valitsevaks materjaliks keemiline element räni (Si), siis on teed rajamas selle keemiline ühend – nn laia keelutsooniga materjal ränikarbiid (SiC). Esmajoones jõuelektronikas, kus on tarvilikud erakordselt suured voolutihedused, millega kaasneb kõrge sisemine temperatuuritõus. Aga samuti seal, kus töökeskkonna temperatuur on kõrge, näiteks sisepõlemismoo-

tori põlemiskambris või siis kosmoseaparaadi töötamisel planeet Veenuse atmosfääris (450°C). Analüüs näitab, et SiC struktuuride temperatuuritaluvus ulatub 2000°C, vt joonis 2. Väljapaistev on samuti ränikarbiidi radiatsioonikindlus. Perspektiivne on SiC kasutamine raadioside saatjates, kus suured võimsustihedused on esmatähtsad.

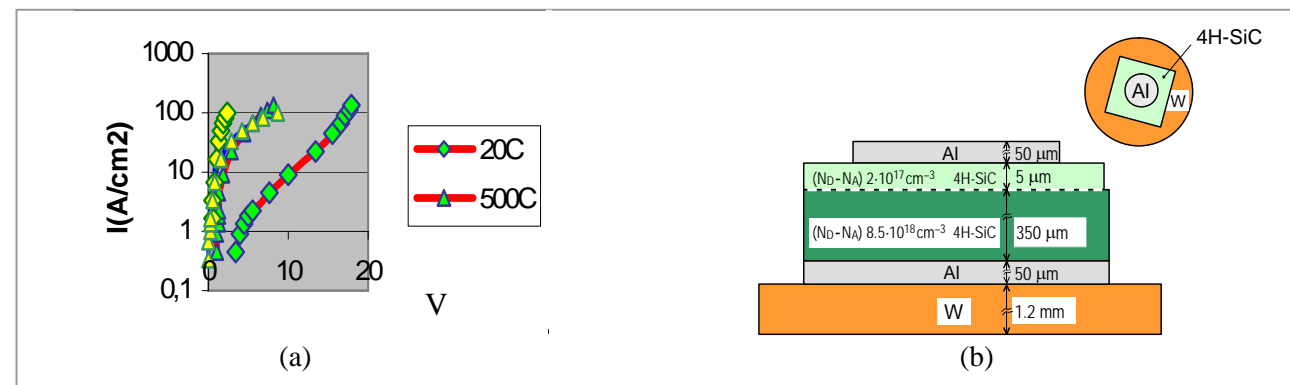
Perspektiivsed on teisedki laia keelutsooni gruppi kuuluvad materjalid, nagu galliumnitriid (GaN) ja teemant (C), kusjuures üks neist – galliumarseniid (GaAs) – on TTÜ teadlaste toel juba kasutusele võetud. Käimas on originaalsete GaAs jõudiodide ja pingekordistite katsetootmine firmas AS Clifton. Samuti on TTÜ-s välja töötatud ülikiire (lülitusaeg 10ns) kesk võimsusega (50A, 60V) kaksiktüristor Soome firma Noptel Oy tellimusel (joonis 3).

Joonisel 4 on esitatud TTÜ-s välja töötatud metall-pooljuht-siirdega SiC Schottky jõudiod.



Joonis 3.

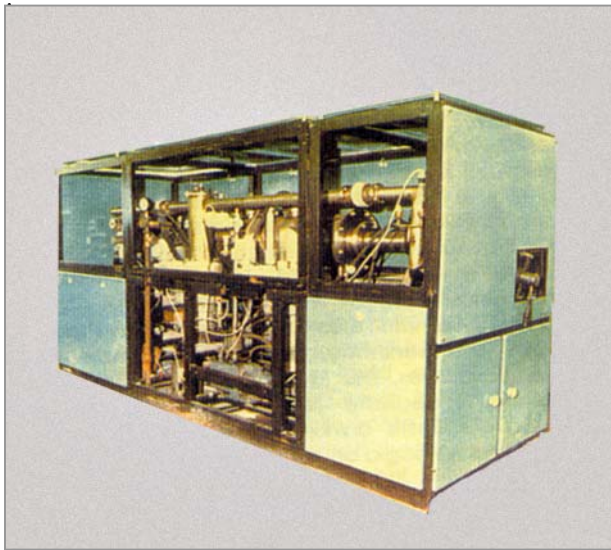
Ülikiire 10ns lülitamisfrondiga kaksiktüristori 2mm x 2mm kristalli pealtvaade (a) ja simulaatoriga DYNAMIT-2DT arvutatud elektronide injeksioonijaotus (b) voolu kiire kasvu etapil.



Joonis 4.

SiC diodi päri voolu ja pinge sõltuvused erinevatel temperatuuridel (a) ja diodi pilooteksemplari patenditud struktuur (b).

Võimsate Schottky diodide valmistamiseks on TTÜ teadlased välja töötanud vastava madala energiatarbega suurepinnaliste pooljuhtstruktuuride metalliseerimise tehnoloogia, kasutades elektroonika-instituudi tehnoloogialaboris üles seatud vaakuum-difusioonkeevituse seadet UDS-6 (joonis 5). Väidetavalt on meie teadlased selle tehnoloogia abil saanud kõige suurema kasuliku pinnaga kontakti SiC ja metalli vahel (50mm²) maailmas!



Joonis 5.

Vaakuum-difusioonkeevituse seade UDS-6, mille abil on valmistatud joonisel 4 esitatud SiC diodi pilooteksemplarid.

SÜSTEEMIELEKTROONIKA

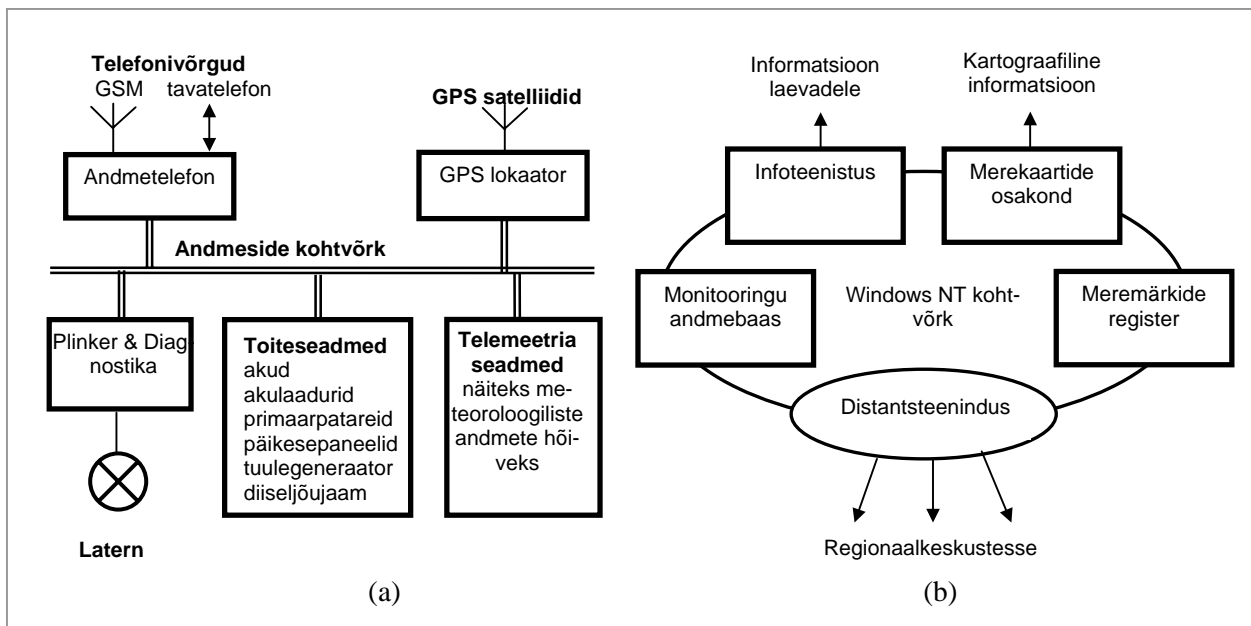
Selles alalõigus kirjeldatakse elektroonikute töid ja kordaminekuid mõõte-, andmehõive-, juhtimise ja monitooringu ülesannete täitmisel, kaasa arvatud nende süsteemide komponendid, nagu signaalprotsessorid ja nende funktsioneerimise algoritmid, sidesüsteemide sõlmed jms. Uurimistööd selles valdkonnas viiakse läbi peamiselt sihtfinantseeritava teema "Seire- ja andmehõivesüsteemid" raames TTÜ elektroonikainstituudi (alusuringud) ja Cybernetica AS (rakendusuringud) jõududega. Uurimistöö sihiks on leida kõige mõistlikumad teed erinevate süsteemikomponentide elektrilise, energeetilise ja informaatilise ühilduvuse saavutamiseks. On ju tänapäeva elektroonikas ühes süsteemis koos kasutusel pidevatoimelised ehk analoogikomponendid, diskreettoimelised ehk impulss-sõlmed, samuti

puhtdigitaalsed ehk loogikalülitused ning täisnumbrilised arvutikomponendid (kontrollerid, signaalprotsessorid, mikroarvutid). Ratsionaalselt toimivates süsteemides peaksid kõik need erinevat liiki komponendid omavahel sobima. Esmajoones elektriliselt ja seejärel informaatiliselt, mis tähendab süsteemikomponentide ühilduvust töödeldava, säilitatava ja transporditava infohulga ja sellega ümberkäärimise kiiruse suhtes.

Oluline roll on siin signaalide analoog-digitaal (A/D) ja digitaal-analoog (D/A) muundamise meetodite analüüsil. Tehtud on ettepanek käsitleda nii analoog-, diskreet-, kui digitaalsõlmi ühe ja sama parameetri – efektiivse bittide arvu (ENOB – effective number of bits) järgi, mis peaks süsteemi komponentidel ligilähedane olema. Energeetiline ühilduvus tähendab tasakaalu energiaga varustamise ja tarbimise vahel. Põhiküsimuseks on hakkama saamine ülipiiratud energiaressurssidega, sest tänapäeva süsteemid on sagedasti patarei (aku-)toitega kantavad ja tasku pistetavad asjad (mobiiltelefon), või koguni naha alla paigaldatavad mikrovahendid (implanteeritavad meditsiiniseadmed).

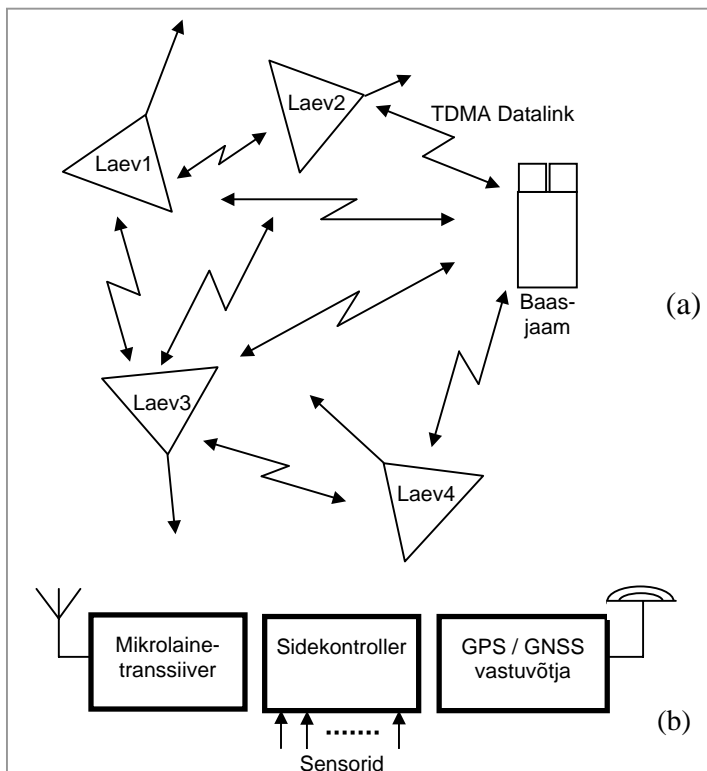
Eeltoodut kokku võttes on tegemist süsteemi-integratsiooni meetodite uurimise ja arendamisega. Need meetodid on kasutamist leidnud paljudes infrastruktuuri arendamise ülesannetes Eesti riigi ja ühiskonna jaoks. Esmalt mainiksin automaatse valvesignalisatsiooni süsteemi turvafirmade tellimisel (TTÜ), väljatöötamisel on Tartu linna tänavavalgustuse jälgimise ja juhtimise süsteem. Eraldi tuleks märkida ulatuslikku projekti veeteede valgusnavigatsioonisüsteemide automatiseerimiseks (Cybernetica EKTA), mis mobiilse GSM andmeside ja globaalse positsioneerimise süsteemi GPS abil seob ühtsetesse lokaal-, regionaal-, ja tsentraalkeskustesse (joonis 6) tuletornid, poid, sadamatuled ja muud laevasõidu valgusmärgid ning navigatsiooni alamsüsteemid. Selle projekti järgi on üles ehitatud terved Eesti ja Leedu merenavigatsioonisüsteemid ning osaliselt ka Läti sadamate (Ventspils, Liepaja, Riia) ja Kaliningradi sadama omad. Lisaks eksporditakse valgussignalisatsiooni süsteemide elektroonseid komponente Rootsi ja Inglismaale.

Käesoleval hetkel on väljatöötamisel Tallinna sadama ja selle akvatooriumi mitmepoolse transponderside baasil toimiv ajajaotusega (TDMA) raadionavigatsiooni süsteem koos juurde kuuluva informaatilise osaga. Töö lõpp-produktina peaks valmima VTIMS – vessel traffic informational and management system (joonis 7).



Joonis 6.

Meremärkide lokaalse (a) ja tsentraalse (b) juhtimise ja jälgimise keskuste struktuur.



Joonis 7.

Laevadevaheline ning laevade ja kalda vaheline transponderside korraldus VTIMS navigatsioonisüsteemis (a) ning transponderi struktuurskeem (b).

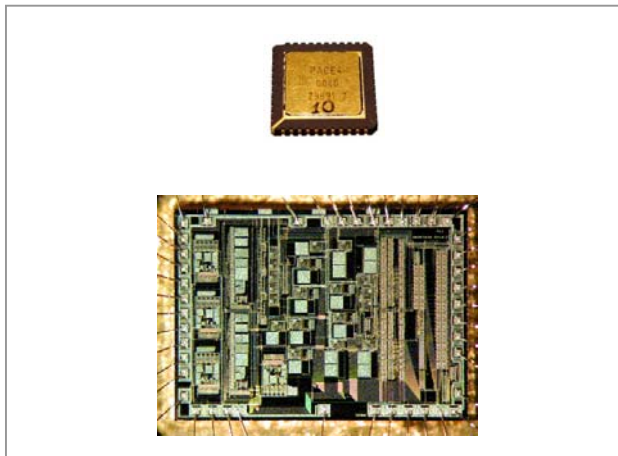
Tänu meie elektroonikateadlaste ja -inseneride professionaalsusele on Cybernetica AS osa võtnud mitmesuguse otstarbega radarseiresüsteemide uurimisest ja arendamisest Eestis.

Kui radarsüsteemide mõjuvälja geograafia võib ulatuda sadadesse kilomeetritesse, siis ühel pooljuhtkristallil realiseeritud mikrosüsteemide geomeetrilised mõõtmed piirduvad paari millimeetriga, kujuures süsteemi komponentide mõõtmed jäävad mikromeetrite suurusjärku. TTÜ teadlased ja insenerid on osalenud ka selliste mikrosüsteemide väljatöötamisel, mis sisaldavad nii analoog-, diskreet- kui digitaalkomponente.

Näideteks võiks olla kuni 1,2 GHz sageduseni töötav automaatse faasisünkronisatsiooniga (PLL – phase locked loop) sagedussüntesaator (PLL synthesiser), mis töötati välja siduteooria ja -disaini õppetoolis NOKIA uurimiskeskuse (Soome) tellimusel, ning elektrilise bioimpedantsi analüsaator, mis töötati välja elektroonikainstituudis firma St.Jude Medical Sweden tellimusel. Mõlemad mikrosüsteemid valmistas Analogdisaini AS (Eesti) partner Micro Analog Systems Oy (Soome).

MEDITSIINIELEKTRONIKA

Selle sajandi esimesel kümnendil saab teoks pooljuhtstruktuuride ja bioloogiliste kudede sümbioosi laialdane rakendamine meditsiinis. Teame juba närvide ja elektroonikakiipide ühendamise edukatest rakendustest kuulde- ja nägemisaparaatides. Peagi on järgnemas implanteeritud kiipide kasutamine transplanteeritud organite seisundi jälgimiseks ja vajaduse korral ka juhtimiseks. Eesti elektroonikud ja meedikud töötavad selles põnevas valdkonnas



Joonis 8.
Bioimpedantsi mõõtmise kiip ja selle kristalli ehitus suurendusega 20.

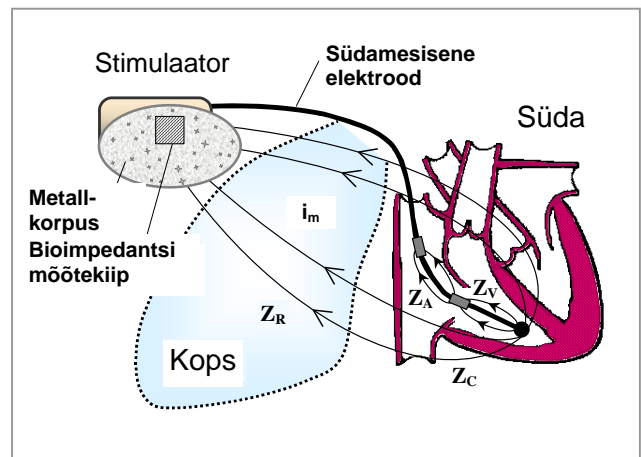
KOKKUVÕTE

Eesti elektroonikud on tihedas koostöös välismaa kolleegidega aktiivselt lülitunud Eesti riigi ja ühiskonna ees seisvate ülesannete lahendamisse, kaasa

koos Karolinska Instituudi ja firma St.Jude Medical Sweden teadlastega südame töö jälgimise ja juhtimise alal koos rakendustega südamestimulaatorites.

Seoses hiljutise lülitumisega EL 5. Raamprogrammi projekti täitmisesse on meie teadlaste tööga liitunud Ragnar Granit Instituudi teadlased Soomest. Eristavaks omapäraks on meie töö juures kudede elektrilise bioimpedantsi muutumise ärakasutamine informatsiooni saamiseks kogu organismi ja selle organite (süda, kops) funktsioneerimise kohta. Bioimpedantsi mõõtmise ja analüüsi kaudu õnnestus kätte saada seos organismi füüsilise töö mahu, südame tegevuse intensiivsuse ja südame potentsiaalse võimekuse vahel. Meetodid ja vahendid selle seose praktiliseks kasutamiseks südamestimulaatorites on patentimisel Euroopa Liidus ja USA-s.

Oma meetodi efektiivsuse katsetamiseks töötasid TTÜ elektroonikainstituudi teadlased välja vastava bioimpedantsi mõõtmise kiibi (joonis 8), mis monteeritakse südamestimulaatori metallkorpusesse (joonis 9).



Joonis 9.
Südamestimulaatorisse monteeritud bioimpedantsi mõõtmise lülitus südamesisese elektroodi abil, kus Z-tähistatud vastavad osaimpedantsid ning i_m on mõõtevool.

arvatud majandustegevuse edendamine, kaitsevõime tugevdamine ja tervishoiu parandamine. Artiklis on käsitletud peamiselt teadlaste töö praktilisi tulemeid

koostöös ettevõtlusega. Autor peab seda tööloiku väga tähtsaks akadeemilise uurimistöö kõrval. Eraettevõtluse huvi on kõigepealt üheks objektiivsemaks indikaatoriks teadlaste töö tulemuste väärtuse ja vajalikkuse kohta. Teiseks on ettevõtluse tellimused kaasfinantseerimise allikaks teadustööle. Ja kolmandaks, teadlased ja ettevõtlus koos loovad kohaliku infrastruktuuri lokaalse tegevuse eduks. Vastasel korral tuleks meil vähese motiveerituse tõttu liituda rahvusvaheliste töökollektiividega ning jätkata oma tegevust välismaal.

Suhteliselt edukad on elektroonikud olnud ka akadeemiliste uuringute alal. Rahuldavalt töötab doktorantuur, igal aastal pälvib doktorikraadi paar teadu-

rit, sama arv noori ka alustab. Teadustöö tulemusi publitseeritakse maailma juhtivates ajakirjades, mitmed meie teadlased on nende ajakirjade toimetuskolleegiumide liikmed. Populaarseteks ja jätkuvalt osavõturohketeks on kujunenud TTÜ teadlaste korraldatavad Balti Elektroonikakonverentsid. Tänavu toimus juba kaheksas konverents.

Autor tänab oma kolleege-elektroonikuid, eriti dr Harry Tani, professoreid Enn Velmret ja Toomas Rangi ning vanemteadureid Toomas Parvet ja Andres Udalit, kes lahkelt aitasid koguda faktilist informatsiooni ja graafilist materjali selle artikli jaoks.

ARVUTITE JA REAALSE MAAILMA KOOSMÕJU UURIMISEST EESTIS

Leo Mõtus

Tallinna Tehnikaülikooli automaatikainstituut

REAALAJASÜSTEEMIDE GRUPI ARENG JA TEGEVUS (1984 – 2002)

RESÜMEE

Reaalajasüsteemide grupp koosneb TTÜ automaatika instituudi reaalajasüsteemide õppetooli inimestest ja IB Krates OÜ töötajatest. Algselt oli grupi huvi keskendunud reaalaja tarkvarale (st rakendustele, kus arvuti ja välismaailm suhtlevad ilma inimese vahenduseta) omaste nähtuste teoreetilisele analüüsile. Seoses arvutikasutuse valdkonna arenguga ja grupis omandatud uute teadmiste kasvuga on huvi laienenud ka agentitarkvara omapäradele ning kogu vaadeldava tarkvaraklassi teoreetiliseks aluseks olevale interaktiivsele arvutusele. Selles valdkonnas on alates 2001. aastast tekkinud koostöö TÜ Tehnoloogia instituudi infotehnoloogia osakonnaga. Artikkel annab ülevaate reaalajasüsteemide grupi arengust ja tegevusest, võimalust mööda võrdluses maailmas toimunuga. Teoreetilised tööd on tehtud peamiselt reaalajasüsteemide õppetoolis, praktilised realisatsioonid ja rakendused (näiteks AS Tallinna Vesi pumplate võrgu kaugseire, diagnostika ja juhtimine) aga IB Krates'es. Mitmed grupis väljatöötatud ideed on mõne aja pärast leidnud kasutamist OMG¹ poolt, näiteks:

1. teadaolevatel andmetel on Q-mudel teine interaktsioonikeskne ja esimene ajatundlik interaktsioonikeskne arvutusmudel maailmas;
2. meie grupp demonstreeris 1986. aastal, et interaktsioonikeskse arvutusmudeli esitamiseks loogikas on vaja kõrgemat kui esimest järku predikaatarvutust, oluliselt teist teed mööda jõudis sama väiteni P. Wegner (Browni ülikool, USA) 10 aastat hiljem;

¹ OMG (Object Management Group) on rohkem kui 800 tarkvara ja tarkvaratehnika tööriistu väljatöötava, tootva, ja/või kasutava firma konsortsium, mis koordineerib objekt-orienteeritud tarkvaratehnika arengut maailmas, standardiseerib toodete spetsifikatsioone ja nende liideid.

3. Q-mudeli tarbeks loodud ajamudeli põhiprintsiibid võeti 10 aastat hiljem kasutusele OMG toodete (CORBA², RT UML³) ajateenuseid pakkuva osa ajamudeli alusena;
4. meie grupis väljatöötatud ja katsetatud ajatundlike objektide idee leidis neli aastat hiljem pisut lihtsustatud kujul rakendust OMG poolt tellitud RT UML profiilis;
5. LIMITS⁴ ja OMT⁵ integreerimisel väljatöötatud ja katsetatud meetod (klassimudeli teisen-damine formaalseks verifitseerimiseks sobivaks mudeliks, verifitseerimine sellel mudelil ja korrigeeritud mudeli tagasiteisendus klassimudelis-se) on neli aastat hiljem leidnud rakendust RT UML profiilis ja on aluseks MDA⁶ ideoloogia väljatöötamisel OMG poolt.

² CORBA (Common Object Request Broker Architecture) on hajussüsteemide vahekihi spetsifikatsioon, mis võimaldab erinevates keeltes programme koostöö geograafiliselt hajutatud arvutisüsteemis (OMG toode).

³ RT UML (tegelikult UML Profile for Performance, Scheduling, and Time) on väljatöötatav UML (Unified Modelling Language) profiil, mis sobib ajatundliku tarkvara projekteerimiseks (OMG toode).

⁴ LIMITS – Reaalajasüsteemide grupis väljatöötatud tarkvaratehnika tööriist süsteemi ajalise korrektsuse analüüsiks, baseerub Q-mudeli teorial, on kasutatud õppe- ja uurimistööks mitmes ülikoolis.

⁵ OMT (Object Modelling Technique) oli üks peamisi UML tegemisel kasutatud eeskujusid.

⁶ MDA (Model Driven Architecture) on OMG uus tarkvaratehnoloogia projekt, mille kohasel tarkvara arendatakse algmudelist (spetsifikatsioon UML-s) lõppmudeli (objektkoodini) poolautomaatsete teisenduste abil infrastruktuurist sõltumatul platvormil.

MIS TOIMUB ARVUTITE JA TARKVARA MAAILMAS?

Arvutirakenduste mitmekesisuse ja neile esitatavate nõuete (näiteks, töö- ja veakindlus, muutuste sisseviimise lihtsus, vahetu side väliskeskkonnaga ja/või täielik kokkusulamine väliskeskkonnaga) ranguse kiire kasv on tekitanud vastuolu traditsioonilise arvutiteaduse poolt pakutava ja sisuliselt vajaliku ning seadusandlikult eeldatava (näiteks tarkvara sertifitseerimisel) analüüsivõimsuse vahel. Selle tulemuseks on tekkinud olukord, kus tarkvara praktilise loomise meetodid on arenenud kiiremini kui nende meetodite kasutamisel esinevaid nähtuseid selgitav teooria.

Arvutiteadust ja reaalselt maailma ühendab tehnoloogiline uurimisvaldkond nimega tarkvaratehnika (software engineering). Ülalnimetatud mittevastavus arvutiteaduse suhteliselt piiratud analüüsivõimsuse ja programmisüsteemidele vajalike omaduste tõestamiseks vajaliku kirjeldus- ja analüüsivõimsuse vahel muutus 1970ndatel tarkvaratehnikas sedavõrd häirivaks, et tehti esimesed, osaliselt empiirilised, katsed loobuda arvutiteadusele omasest algoritmikesksest paradigmast ja keskenduda algoritmide interaktsioonile. Interaktsioonikeskse käsitluse näiteks on objekt-orienteeritud programmeerimise ja projekteerimise meetodid, aga ka märksa teoreetilisemad (kuid mitte algoritmikesksed) *Calculus for Communicating Systems* [1,2] ja Q-mudel [3,4]). Uudse lähenemise filosoofiliseks aluseks võib pidada H. Simoni poolt esiletoodud loodusteaduste ja tehismaailma teaduste põhimõttelist erinevust [5].

Interaktsioonikesksuse idee on osutunud äärmiselt viljakaks ja suur osa kaasajal tegelikult kasutatavast arvutisüsteemide loomise tehnoloogiast põhineb sisuliselt interaktsioonikesksel mõttel. Kahjuks on üldjuhule sobiv interaktsioonikeskne arvutusmudel esialgu ikka veel empiirilisel matemaatilisel baasil, või siis kirjeldab üksikuid probleeme käsitlevaid erijuhtumeid. Esialgu puudub lihtne, kompaktne, piisavalt võimas ja formaalselt korrektne algoritmitooriat asendav üldistus, mis sobiks interaktsioonikesksete arvutusmudelite baasiks.

Rakenduste keerukuse kasv ja dünaamiliselt genereeruv (süsteemi osade sisemise mälu tõttu algoritmiliselt mittekirjeldatav) käitumine (inglise keeles *emergent behaviour*) on põhimõtteliselt uuritav interaktsioonikesksel arvutusmudelil. Lisaks öeldule

toob arvuti ning väliskeskkonna vahetu interaktsioon ja/või arvuti ja väliskeskkonna ühtesulamine (inglise keeles *ubiquitous computing*) kaasa vajaduse arvestada väliskeskkonnas esinevaid mittetäielikult teadaolevaid põhjuslikke seoseid, aga ka ajakitsenduste seadmise vajaduse mitmetele arvutisüsteemi funktsioonidele ning interaktsioonidele. Algoritmikeskne arvutiteadus ei ole võimeline käsitlema mittetäieliku informatsiooniga nähtusi ja eitab mitte-triviaalse aja vajadust. Seega on arvutirakenduste mitmekesisuse suurenemine ja nende tööülesannete muutus viinud olukorrani, kus traditsioonilise arvutiteaduse aluste mõningane muutmine on vältimatu.

Viimased kakskümmend aastat on reaalarajasüsteemide grupp üritanud edendada interaktsioonikesksete arvutusmudelite kasutamist – alguses toimus see alateaduslikult, baseerudes peamiselt meie praktiliste kogemuste ja nende allikaks olevate nähtuste olemuse teoreetiliste selgituste mittevastavusele. Viimasel seitsmel aastal on meie liikumine toimunud üsna teadlikult, siin on vaieldamatult abiks olnud interaktsioonikesksete arvutusmudelite pooldajate arvu kasv maailmas ja ka agenttehnoloogia kasutamise levik tarkvaratehnikas eriti, aga ka süsteemide ehitamises üldse. Märkimisväärset mõju avaldasid P. Wegneri uurimisgrupi teoreetilised tööd (näiteks [6, 7]), OMG poolt arendatav praktikale orienteeritud arendustegevus, ja koostöö Merik Meriste grupiga Tartu Ülikooli Tehnoloogia Instituudist.

REAALAJASÜSTEEMIDE GRUPP EELMISEL SAJANDIL

EELLUGU (1984–1991)

Mitteformaalne moodustis tekkis 1984 (DESEG, *Distributed Embedded Software Engineering Group*), Küberneetika instituudi rakendusliku osa (EKTA) juurde. Selle perioodi peamised tulemused olid Q-mudeli matemaatiline formuleerimine, seos matemaatilise loogikaga, Q-mudelis kirjeldatud rakenduse analüüsi meetodid, ajalise korrektsuse uurimise tööriista prototüüp CONRAD.

Grupp korraldas 7 aastat regulaarseid suvekoole Eestis, millest neli olid rahvusvahelised (koos soomlaste ja rootslastega). Lühiajalised loengukursused Calcuttas, Tampere, Swansea's. Eellugu lõppes seoses enamuse DESEG-i liikmete üleminekuga EKTA-st TTÜ-sse (osaliselt tingituna Eestis alanud teaduskorralduse reformist).

KOOSTÖO WALESI ÜLIKOOLIGA (1987–1995)

Koostöö Walesi ülikooli Swansea kolledžiga algas juba 1980ndate aastate teisel poolel ja toimus British Council'i finantstoetusel. CONRAD-i rakenduste baasil kaitses Swansea's 6 doktorit, kellest üks töötab praegu TTÜ-s (Rein Paluoja). Lühiajalised kutsutud loengukursused Singapuri Nanyangi ülikoolis, Hong Kongi ülikoolis, Lawrence Livermore National Laboratory's on selle perioodi märkimisväärne tulemus. Koostöö Wales'i ülikooliga lõppes, kuna Eesti teaduspoliitikud tegid British Council'ile ettepaneku lõpetada tehnikateaduste alase koostöö finantseerimine ja keskenduda Eestile olulisematele asjadele (majandus- ning humanitaarteaduste alasele koostööle).

TEGEVUS TTÜ-s 20-nda SAJANDI LÕPUNI (1995–2000)

CONRAD-is katsetatud ideede edasiarendamine jätkus EL Copernicuse programmi raames projektiga LIMITS. Tõnu Näksi ettepanek laiendada objekt-orienteeritud arenduskeskkonda IDE/OMT ajatundlike objektidega realiseeriti LIMITS-i ja OMT integreerimisega. Kuna reaalarjasüsteemide grupi liikmete arv oli selleks ajaks vähenenud kriitilise tasemeni (õppetoolis oli kaks inimest), langes tegevuse põhi-

raskus sellel perioodil õppetööle. Reaalarjasüsteemide tarkvara-alase õppetöö kaasajastamine ei leidnud TTÜ poolt erilist toetust (aga õnneks ei keelatud ka). TTÜ-sse tarkvaratehnika labori loomisel osteti (UML-il baseeruv) Artisan RT Studio tarkvaratehnika keskkond ETF grandi rahade eest ja kolm aastat maksti samast allikast ka 20 töökoha litsentsitasu.

Et säilitada väheseid allesjäänud grupi liikmeid ja siduda andekamaid tudengeid õppetooli temaatikaga pikemaks ajaks, asutati osaiühing IB Krates OÜ – peamiselt dünaamilise tööjõu liikumise haldamiseks, mis on eeltingimuseks europrojektide täitmisel (LIMITS, BRIDGE, MINICON) ja mis tol ajal käis TTÜ raamatupidamisele üle jõu. IB Krates on seotud ka muude rakendusliku iseloomuga tööde tegevusega ning võimaldab tudengitel kasutada õpitut tegelike probleemide lahendamisel.

Lisaks tavalistele konverentsi ettekannetele väärrib sellel perioodil esiletõstmist kutsutud ettekanne IEE Londoni peakorteris (Savoy Place), kutsutud ettekanne Dagstuhli seminaril High Integrity Programmable Electronic Systems, ja töötamine eksperdina Wrighti materjalitehnika labori (USA) teadusteema evalveerimisel.

REAALAJASÜSTEEMIDE GRUPP 21. SAJANDI ALGUSES

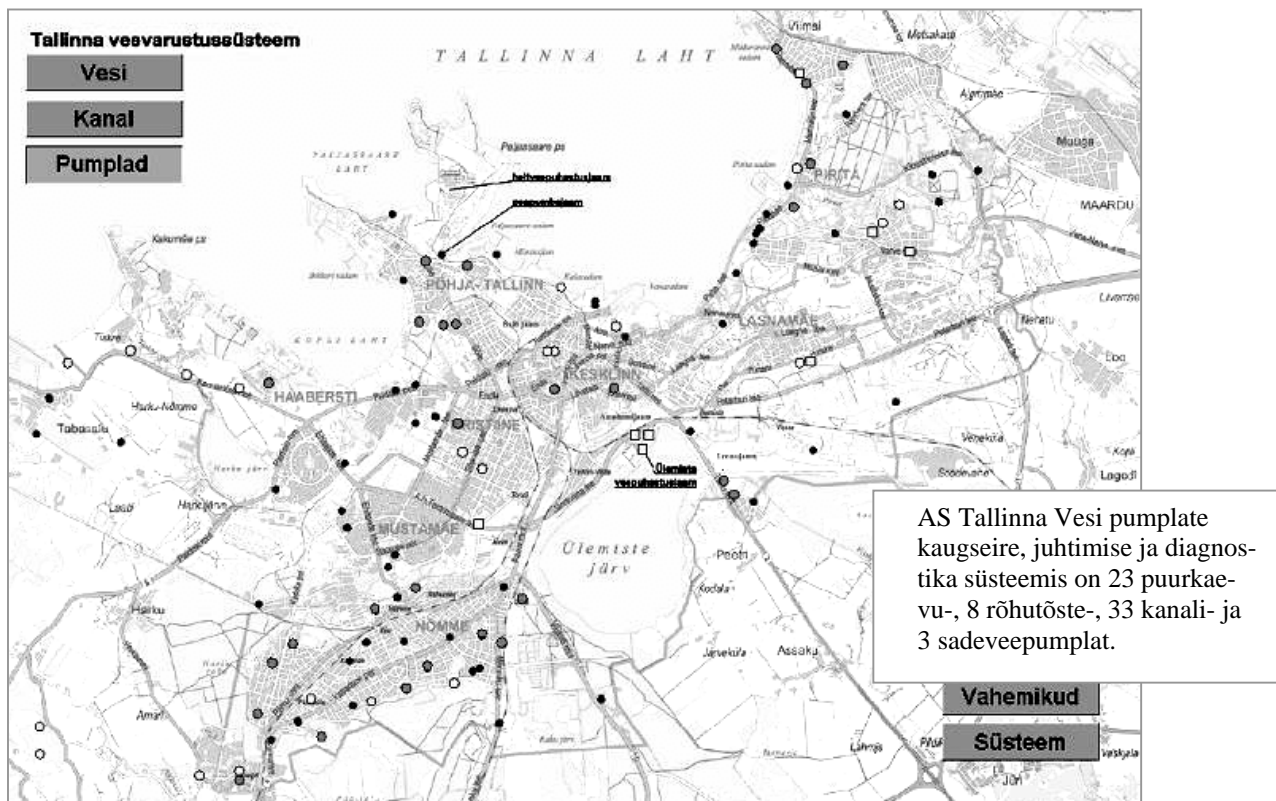
Põhimõtteliselt on jätkunud eelmisel sajandil alustatud tegevussuunad. TTÜ õppetöös kasutatud tasuta tarkvaratehnika keskkond õnnestus asendada tasuta kasutatava *Rational Rose* keskkonnaga – tänu kontaktidele *Rational Software Inc* saime lepingu tarkvaratehnikast huvitatud Eesti ülikoolide liitumiseks programmiga SEED (*Software Engineering Education Development*), mis tagab nimetatud tarkvara tasuta kasutamise õppe- ning uurimistöös. Seni on Eesti poolt huvi avaldanud Tallinna Tehnikaülikooli automaatika instituut ja Infotehnoloogia Kolledž.

Rahvusvaheline koostöö RT UML väljatöötamise alal on laienenud – lisaks OMG-le on seda hakanud toetama ka IFAC (*International Federation of Automatic Control*), mille üks tehniline komitee (*TC on Real-time Computing Systems*) on moodustanud töörühma (*WG on Real-time Software Engineering*). Töörühma esimeheks aastateks 2002–2005 valiti L. Mõtus, kes on endiselt reaalarjasüsteemide grupi

esindaja kolme rahvusvahelise kirjastuse (Elsevier, Kluwer, ja IOS Press) teadusajakirjade toimetustes ning Eesti TA tehnikatoimetiste toimetuskolleegiumi liige. Uurimisprogrammi loomuliku evolutsiooni tulemusena on 21. sajandi märksõnad agenttehnoloogia, keneetiline süsteemi projekteerimine, ontoloogia ja interaktsioon. On tekkinud stabiilne koostöö TÜ tehnoloogia instituudiga ja tekkimas on koostöö TTÜ mehhatroonikainstituudiga.

IB KRATES OÜ TEGEVUSE NÄITEID

Lisaks tarkvaraarenduskeskkonna LIMITS-PC arendusele ja hooldusele (vt ülalpool, mis on senini TTÜ õppetöös kasutusel) on tegeldud otsesest uurimistööst näiliselt kaugemate teemadega, keskendudes peamiselt kahele suunale. Jätkuvalt on uuritud erinevate tarkvaraarenduskeskkondade kasutamise efektiivsust ja arendatud uusi töövahendeid – näiteks *Rational Rose Real-time* keskkonna kasutami-



ne ajastamise uurimisel (AS Tallinna Vesi näitel, Kristjan Sillmann), osalus andmebaaside arendusvahendi AFRA täiendamises (T. Näks, Maria Jürimaa), RJG keskkond võrgurakenduste kasutajaliideste tegemiseks (Viljar Vahter). Viimane nimetatud keskkondadest on katse kasutada agentarhitektuuri võrgupõhise kasutajaliidese realiseerimiseks.

Teine ja oluliselt kandvam suund on PLC-põhiste juhtimis- ja jälgimissüsteemide realiseerimine. Üks suuremaid rakendusi on AS Tallinna Vesi kanalisatsiooni- ja veevõrgu kaugvalvesüsteem, mille realiseerimisel on kasutatud mitmeid unikaalseid komponente ja meetodeid. See süsteem on võimaldanud katsetada ka teooriate toimimist praktikas, näiteks kontrollerite kellade sünkroniseerimine, Rose-RT vahendite kasutamist modemsidega andmehõivesüsteemi modelleerimisel, tööstuslike andmesideprotokollide kasutamist PSTN ja GSM võrgus (Toomas Tommingas).

Mitmeid selle valdkonna praktilisi probleeme kasutatakse näiteülesannetena õppetöös – tööstusliku andmeside ja arvutivõrkude laborites.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Milner, R.A. Processes: A mathematical model of computing agents. Rose, H.E., Sheperdson, J.C. (eds.). Logic Colloquium'73, North-Holland, 1975.
2. Milner R.A. A calculus of communicating systems. LNCS, 1980, 92, Springer Verlag, 171 pp.
3. Quirk, W., Gilbert, R. The formal specification of the requirements of complex real-time systems, AERE, Harwell, 1977, rep. no. 8602.
4. Motus, L., Kaaramees, K. A model-based design of distributed control system software. Distributed Computer Control Systems, Proc. 4th IFAC Workshop, Pergamon, 1983, 93-101.

5. Simon, H. The science of the artificial. MIT Press, 1969, 231 pp. (revised publications, 1981, 1996).
6. Wegner, P. Interaction as the basis for empirical computer science. ACM Computing Surveys, 1995, 27, 5, 80-91.
7. Wegner, P., Goldin, D. Co-inductive models of finite computing agents. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 1999, 19, www.elsevier-bl/locate/entcs.

REAALAJASÜSTEEMIDE GRUPI OSALUSEL
21. SAJANDIL KIRJUTATUD ARTIKLITE
NÄIDISEID:

Meriste, M., Motus, L. On models for time-sensitive interactive computing. International Conference on Computational Science, LNCS, Springer Verlag, 2002, 2329, 156-165.

Motus, L., Meriste, M. Towards time-awareness of self-organising systems. Proc. International Conference in Infrastructure for Electronic Business, Science and Education on the Internet, L'Aquila, 2001, 6 p., CD.

Motus, L., Meriste, M. Towards self-organising time sensitive control system's software. Proc. IFAC Conference on New Technologies in Computer Control, Hong Kong, 2001, 236-241.

Motus, L., Meriste, M., Kelder, T., Helekivi, J. An architecture for multi-agent system test-bed. Proc. IFAC Congress, July 2002 (to be published).

Motus, L., Meriste, M. Some remarks on time modelling in interactive computing systems. International Conference on Advances in Infrastructure for Electronic Business, Science, Education and Medicine on the Internet, July-August 2002, L'Aquila, 7 p., CD.

Motus, L., Naks, T. Time models as used in Q-model and suggested for RT UML. Proc. 5th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics, and Informatics, Orlando, 2001, XI, 467-472.

Naks, T., Motus, L. Real-time behaviour verification, animation and monitoring starting from DCCS specification. Proc. IFAC Symposium on Distributed Computer Control Systems, Elsevier Science Ltd, 2000, 85-92.

Naks, T., Motus, L. Handling timing in a time-critical reasoning system – a case study. Annual Reviews in Control, 2001, 25, 157-168.

Savimaa, R. On modelling emerging behaviour of multifunctional non-profit organisations. 11th International Conference on Information Systems Development, September 2002, 12 p. (to be published).

Selic, B., Motus, L. Modelling of real-time software. 25 p. (to be published).

PÕLEVKIVI PÕLETUSTEHNIKAALASTEST UURINGUTEST

Arvo Ots

Tallinna Tehnikaülikool, soojustehnika instituut

Katlatehnika on üks vanimatest aladest, millesse on koondunud paljude teadustulemuste tehnilised ja tehnoloogilised väljundid. Kütuste põletustehnoloogia ja katlakonstruktsioonid on läbi käinud pika teekonna, et jõuda kaasaja tasemele. Katlatehnika kiire areng toimub ka tänapäeval ja ei ole kahtlust, et see jätkub samuti nii lähiajal kui ka kaugemas tulevikus.

Märgatava tõuke põletusseadmete arengusse, alates möödunud sajandi algaastatest, andis ulatuslik elektri kasutuselevõtt ja sellega seotud fossiilseid kütuseid põletavate elektrijaamade ehitamine. Soojusjõuseadme asukoht ei olnud seotud enam kindla tehase või vabrikuga. See lõi võimalused kontsentreeritud võimsustega soojusjõuseadmete tekkeks ning esines vajadus suurevõimsuseliste aurukatelde järele.

Põlevkivi kuulub sapropeelkütuste kategooriasse, mistõttu tema omadused erinevad järsult kivisöe kui huumusrea kütusest. Põlevkivi iseloomustab eelkõige suur mineraalosa sisaldus ning selle ja orgaanilise aine ülimalt keerukas koostis ja struktuur. See on olnud põhjuseks, miks kivisöe jt kütuste põletustehnoloogiad ei ole põlevkivi puhul otseselt rakendatavad.

Põlevkivi kaevandamise esmaeesmärgiks oli vajadus energeetilise toorme järele. Aastateni 1920–1925 oli Eestis esikohal puit, mis kattis enam kui 90 % kütuse vajadusest. Teisel kohal oli sisseveetav kivisüsi.

Esialgu kasutati põlevkivi veduritel. Üha enam hakkas põlevkivi põletamine levima ka tööstuskateldes. Enamasti oli kasutusel tolle aja standardile vastav 40 mm tükisuurusega põlevkivi.

Esimeseks põlevkivi kui energeetilise kütuse suuri- maks tarbijaks möödunud sajandi 20ndatel aastatel oli Kunda tsemenditehas. Põlevkivi on eriti sobivaks kütuseks tsemendiklinkri põletamiseks pöördahjus, kuna selle mineraalosa koostis on väga lähedane tsemendiklinkri lähtematerjalile. Kunda tsemenditehasest töötavad pöördahjud viidi 1921 täielikult üle põlevkiviküttele.

Tähtsaks etapiks põlevkivienergeetika valdkonnas oli Tallinna Soojuselektrijaama üleviimine 1924 põlevkiviküttele. Seda aastat tuleb lugeda põlevkivienergeetika algaastaks (elektrienergia genereerimise tähenduses). Tallinna Soojuselektrijaama võimsuseks 1933 oli 22 MW.

Lisaks Tallinna elektrijaamale ehitati Põhja-Eestisse veel mitmed põlevkivi põletavad elektrijaamad: Püssi (3,7 MW), Kohtla (3,7 MW), Kunda (2,3 MW) ja Kiviõli (0,8 MW). Sõjajärgne põlevkivi kasutatavate elektrijaamade koguvõimsus oli 32,5 MW.

Tolleaegsetes elektrijaamades põletati nn peent ehk kolmanda sordi põlevkivi tükisuurusega kuni 25 mm. Väljasorteeritud suuretükiline põlevkivi oli kasutusel peamiselt uttetestes. Aurukatelde aurutootlikkus küündis 35 t/h, aururõhuks oli 3–4 MPa ja temperatuur 400–450 °C. Põlevkivi põletamiseks kasutati selleks otstarbeks väljatöötatud ja õnnestunud konstruktsiooniga töökindlaid Krull-Lomšakov ja Franz-Krull tüüpi liikuvlülidega kaldreste.

Põlevkivi kui suure lendosade sisaldusega kütuse restil põletamise põhiprobleemiks kujunes nn tahmavaba põlemine. Küsimus lahendati küllaltki edukalt koldekambri sobiva kuju ja sekundaarõhu koldeesse andmise süsteemiga.

Põlevkivi põletamise märgatav areng restilpõletusele tuginevalt toimus kuni möödunud sajandi 60ndate aastateni. See põletustehnoloogia oli saavutanud oma lae ning sai piiravaks teguriks energiaploki võimsuse suurendamisel. Põlevkivi kasutamisel tuli üle minna uudsele tolmpõletustehnoloogiale.

Esimesed katsed põlevkivi tolmpõletamise rakendamiseks tehti juba möödunud sajandi esimesel veerandil Eesti Raudtee veduritel ning ka Tallinna Soojuselektrijaamas. Need katsetused osutusid edukateks katlatorude tuhasadestistega kiire kattumise ja ummistumise tõttu.

Esimeseks tolmpõlevkivi põletavateks elektrijaamadeks olid 1949 käiku antud Kohtla-Järve elektrijaam ja 1951 käivitatud elektrijaam Ahtmes. Kateldena

kasutati nendes kivi- ja pruunsöe põletamiseks ettenähtud süvikveskitega keskrõhu katlaid.

Tolmpõlevkivi küttel töötavate keskrõhu katelde ekspluatatsioonikogemused näitasid, et nad on kiirgus- ja konvektiivpindade intensiivse tuhasadestistega kattumise ja ökonomaiseripindade kiire korrosioon-abrasiivse kulumise tõttu suutelised töötama projekteeritud vaid osalise koormusega. Kohtuti esimest korda katla küttepindade saastumise, kõrgtemperatuurse korrosiooni, kulumise, tuhasadestistest puhastamise ja soojusülekanne probleemidega. Sai selgeks, et kivi- ja pruunsöe põletamiseks ette nähtud katlad ei ole suutelised rahuldavalt töötama põlevkivil kui keeruka mineraal- ja orgaanilise osaga kütusel. Probleemide lahendamine käis elektrijaamadele ülejõu. Möödapääsmatuks muutus põlevkivi põletamisega seonduvate uurimistööde käivitamine. Selleks loodi TPI soojusenergeetika katedri (praegune TTÜ soojustehnika instituut) juurde uurimisgrupp ning mõni aeg hiljem tööstusliku soojusenergeetika teadusliku uurimise laboratoorium.

Intensiivse uurimistöö tulemuste alusel rekonstrueeriti keskrõhuseadmed, töötati välja põlevkivi omadustele vastavad katlakonstruktsioonid ja selleks vajalikud projekteerimise ning arvutusmeetodid. Koostöös Taganrogi Katlatehasega projekteeriti originaalkonstruktsiooniga põlevkivi tolmküttekatlad nii Balti- kui ka Eesti Elektriijaamade tarvis.

Põlevkivienergeetika uueks arenguetapiks tuleb lugeda aastat 1959, mil anti käiku põlevkivi tolmküttel töötavad kõrgrõhuagregaadid Balti Elektriijaamas. Esimene agregaat käivitati Eesti Elektriijaamas 1969.

Tahkekütuste põletustehnoloogia tehnilise arengu loomulikuks jätkuks on üleminek tolmpõletuselt keevkihtpõletustehnikale. Viimastel aastatel on TTÜ STI osalenud koostöös Eesti Energia ja mitmete välisfirmadega põlevkivi keevkihttehnoloogiaalastes uuringutes. Toetudes keevkihttehnoloogia põhiprintsiipidele, selles valdkonnas läbiviidud uurimustulemustele, tolmpõletuselt omandatud põlevkivi põletustehnikale ja TTÜ STI soovitudele, projekteeriti firma Foster Wheeleri poolt praegu ehitusjärgus olevad atmosfäärirõhul tsirkuleeriva keevkihiga katlad Eesti- ja Balti Soojuselektriijaamade energiaplokkidele. Suur perspektiiv on põlevkivi põletamisel ülerõhul keevkihtkolletes. Selle rakendamine võimaldab tunduvalt suurendada energiamuunduse kasutegurit ning järsult vähendada heitmeid keskkonda (eriti süsihappegaasi).

Katla gaasipoolsed protsessid on üksteisele järgnevad ja omavahel tihedalt seotud nähtused. Metodoloogilisest küljest on otstarbekas need jagada kolmeks järgneva osaks. Esiteks, protsessid ruumis, kuhu kuuluvad sellised küsimused nagu põlevkivi orgaanilise osa põlemine, põlemisgaaside koostis, kütuse mineraalosa käitumine koldes ja tuha moodustumine, põletustehnoloogia mõju põlevkivi põlemisel eralduvale soojusele, keskkonda mõjutavate põlemisgaasi komponentide teke ja nende hulga mõjutamise võimalused jne.

Teiseks, ülekanne nähtused ruumist pinnale (küttepinnale). Sii kuuluvad sellised protsessid nagu lendtuha sadestiste teke kiirgus- ja konvektiivküttepindadele, leelismetallide ühendite aurude kondenseerumine ja desublimatsioon, kiirgus- ja konvektiivne soojusülekanne põlemisgaasilt küttepinnale jt.

Kolmandaks, küttepinnal toimivad protsessid. Sellisteks nähtusteks on lendtuha moodustunud saastakihi sulfatiseerumine vääveloksiidide ja hapniku toimel, tuhasadestiste ja küttepinna metalli vastastikune toime, küttepindade metalli kõrg- ja madalatemperatuurse korrosioon ja kulumine, puhastusjõudude toime sadestiste kihtidele ja metallile jne.

Alljärgnevalt probleemidest, mis avaldavad põlekiivikateldes toimuvatele protsessidele olulisemat mõju ning on põhjalikult uuritud soojustehnika instituudis.

PROTSESSID MINERAALOSAS

Kaasaja käsitluses ei vaadelda põlemist mitte ainult orgaaniliste komponentide hapnikuga ühinemisenä, vaid see haarab endasse ka samaaegselt kütuse mineraalosas toimuvat. Kütuse põlemisel mineraalosas esinevatest protsessidest saavad alguse paljud katla gaasipoolle toimuvad nähtused.

Olulisteks parameetriteks, millest sõltub kütuse mineraalosas toimuvate protsesside kiirus ja ulatus, on põlemistemperatuur ja keskkonna koostis (eriti hapniku kontsentratsioon). Põlevkivi tolmpõletamisel ulatub temperatuur koldes 1 400–1 500 °C-ni, keevkiht-põletustehnoloogia kasutamisel aga ei ületa tavaliselt 850 °C.

Olulisteks parameetriteks temperatuuri kõrval on ka põlemisgaasi koostis ja rõhk (kütuse ülerõhul põletamine). Protsessid mineraalosas on suuresti määratud komponentide termilise lagunemise ja uusmineaalide moodustumisega tuha tekkeprotsessis.

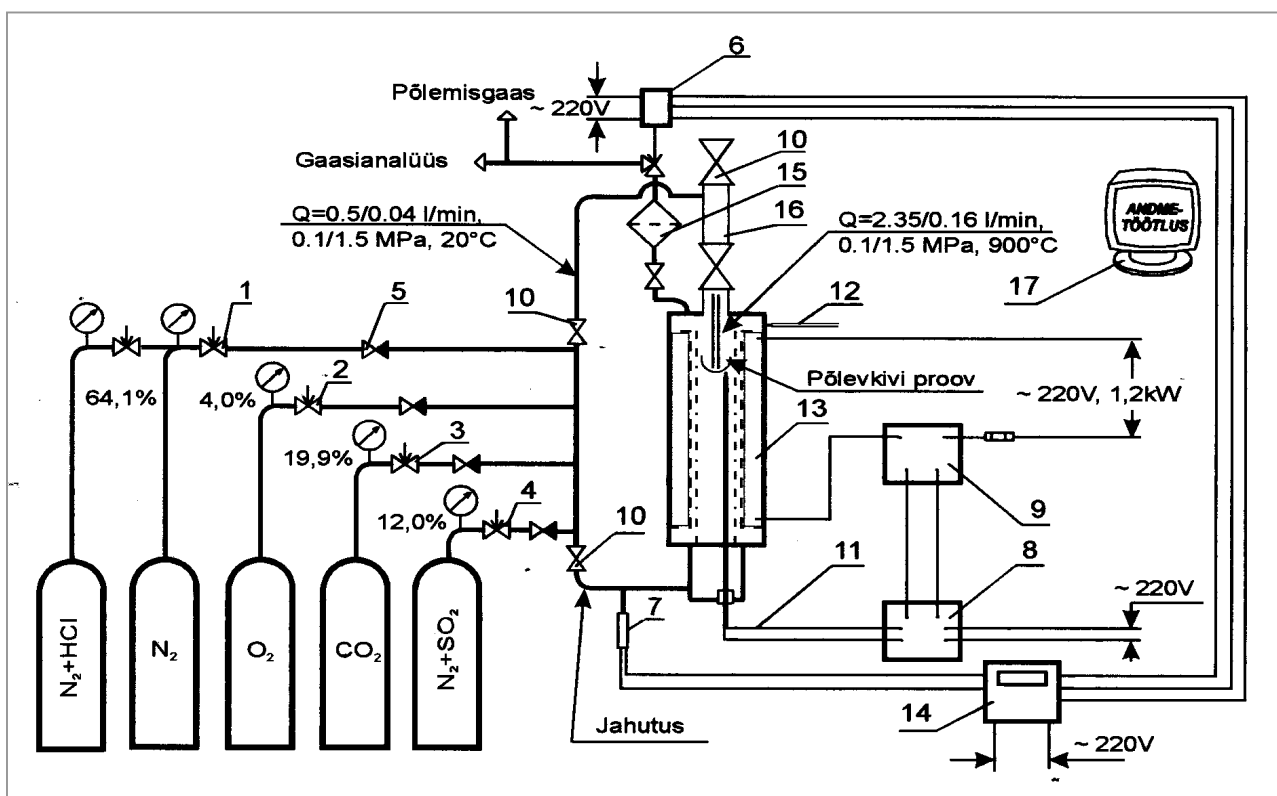
Üheks aktiivseks tuhakomponendiks katla küttepindade saastumise ja vääveldioksiidiga sidumise seisukohalt on põlevkivi põletamisel CaO, kas seotuna teiste mineraalidega või vabal kujul.

Vaba ja seotud CaO suhe sõltub põletustehnoloogiast, ulatudes tolmpõletusel 25–30 %-ni. Atmosfäärirõhul keevkihtpõletusel moodustub tuhas on aga seotud kaltsiumi vähe, tehes selle eriti aktiivseks vääveloksiididega ühinemise suhtes.

Põlevkivi mineraalosas sisalduva kaltsiumoksiidi käitumine koldes on sõltuv temperatuuri kõrval ka põlemisgaasis sisalduva süsinikdioksiidi osarõhust. Kui CO₂ osarõhk ületab kaltsiumkarbonaadi termilise dissotsiatsioonirõhu (esineb põlevkivi ülerõhul põletamisel), siis puudub termodünaamiline võima-

lus vaba kaltsiumoksiidi moodustumiseks üldse ning vääveldioksiid ühineb otseselt karbonaadiga.

Põlevkivi kui suure leelismetallide sisaldusega kütuse põletamisel on oluline nende ühendite käitumine põlemise käigus. Leelismetallide aurud, olles keemiliselt suure aktiivsusega, moodustavad koldes küttepindadele kergesti kondenseeruvaid ühendeid. Leelismetallide lenduvus on määratud temperatuuri ja keskkonna koostisega. Need protsessid on olulisemad põlevkivi kõrgtemperatuurisel tolmpõletusel. Ohku saastavate ühendite teke põlevkivi põletamisel on samuti seotud protsessidega mineraalosas. Olulisemaks nendest on vääveldioksiid. Kaltsiumi ja vääveli moolsuhe põlevkivis on suur – ligikaudu 8, mis peaks olema küllaldane väävliühendite efektiivseks sidumiseks tuhaga.



Seade põlevkivi mineraalosas toimuvate protsesside uurimiseks. Võimaldab modelleerida ülerõhul toimuvaid protsesse. 1–4 – gaasihulga regulaatorid; 5 – tagasilöögiklapp; 6 – rõhuhoideventiil; 7 – rõhuandur; 8 – temperatuuriregulaator; 9 – rele; 10 – kuulkraanid; 11–12 – termopaarid; 13 – reaktori küttekeha; 14 – rõhuregulaator; 15 – gaasifilter; 16 – lüüs; 17 – andmete salvestus.

Uuringud on näidanud, et põlevkivi tolmpõletuse korral jääb tuhaga sidumata 15–25% väävlis ning seetõttu paisatakse suur hulk väävlis vääveldioksiidina koos põlemisgaasiga õhku. Põhjuseks on madal vaba ja seotud lubja hulkade suhe tuhas. Vastandina sellele on põlevkivi atmosfäärirõhul keevkihtpõletusel vaba kaltsiumoksiidi osatähtsus tuhas suur ning SO₂ seotakse peaaegu täielikult. Samal tasemel seotakse väävel tuhaga ka põlevkivi ülerõhul põletamise tingimustes.

Põlevkivi eripäraks on väike lämmastiku hulk orgaanilises aines. Sellest johtuvalt ei ole lämmastikoksiidide emissioon põlevkivi põletamisel määraavaks.

Põlevkivi põletamisel tekkivatest kasvuhoonegaasidest on olulisem süsihappegaas. Tulenevalt põlevkivi koostisest lisandub orgaanilisest süsinikust moodustuvale CO₂-le ka mineraalne süsihappegaas karbonaatsete ühendite lagunemisest. Viimane on sõltuv kütuse põletustehnoloogias. Mainime, et põlevkivi ülerõhul põletamisel kaltsiumkarbonaadi termilist lagunemist ei toimu, viies seega CO₂ kontsentratsiooni vähenemisele põlemisgaasis.

Teiseks tähtsaks kasvuhoonegaasiks on dilämmastikoksiid, olles probleemiks mitmete kütuste põletamisel keevkihis. Mõõtmised on näidanud, et põlevkivi nii tolmpõletamisel kui ka keevkihtpõletamisel N₂O kontsentratsioon põlemisgaasis on väike.

KÜTTEPINDADE SAASTUMINE

Aurukatla küttepindade tuhasadestistega kattumine (saastumine) on küllaltki keerukas füüsikalise-keemiliste nähtuste kompleks. Lähtudes põlevkivikateldes toimuvatest protsessidest osutus esmakordselt võimalikuks omavahel seostada aeromehaanika, keemia ja soojusvahetust ühendavad nähtused ning sellele vastavad küttepindade konstruktsioonid.

Küttepindade saastumise uurimisel on kaks eesmärki: (i) saastumise olemuse (mehhanismi) selgitamine ja (ii) küttepindadele moodustunud sadestiste mõju soojusülekannele.

Tingituna põlemisgaasi ja katla küttepinna vahelisest soojusvahetusest ei ole temperatuur katla gaasikäigu ulatuses püsiv suurus. Sellest tulenevalt ei ole küttepinna saastumistingimused gaasikäigu erinevates kohtades samad. Nii näiteks kattuvad põlevkivi tolmpõletusel koldekraanid kõrge kiirgusintensiivsusega alas rauarikaste sadestistega, kuid katla ma-

dalatemperatuurilises osas võib kohata keemiliselt sidumata puistesadestisi. Üsna olulist mõju küttepindade saastumisele avaldab ka ajategur. Erineva vanusega sadestised omavad erinevat struktuuri, survetugevust, soojusfüüsikalisi omadusi jne.

Ülekaalus on seotud sadestised. Nende moodustumine saab alguse sadestiste algkihi tekkest, mis aja jooksul läheb üle stabiilseks, ajaliselt vähemuutuvaks sadestiseks. Põlevkivi põletamisel vastavate tingimuste olemasolul on algsadestiste tekkemehhanismis oluline leelismetallide sulfaatide ja kloriidide otsene kondenseerumine soojusvahetuspinnale. Põlemisgaasis esinevate leelismetallide sulfaatide ja kloriidide aurude kondenseerumine on paljuski määratud protsesside ulatusega põlevkivi mineraalosas põlemise käigus.

Põlevkivikatla konvektiivküttepindadele moodustuva sadestistekihi kasvukiirusele avaldab otsustavat mõju mitte ainult pinda uhtuva põlemisgaasi kiirus, vaid ka lenduha teraline koostis. Põlevkivi tolmpõletamisel moodustuva suhteliselt jämeda tuha korral on oluline tuhaosakeste sadestistekihti tugevdav ja kulutav toime, pidurdades niimoodi nende kasvu. Põlevkivi tsirkuleerivas keevkihis põletamisel on separaatorist väljuv tuhk, erinevalt tolmpõletusel moodustuvast tuhast, ülipeenike ning võib põhjustada küttepindade kiire saastumise.

SOOJUSÜLEKANNE

Soojusülekanne intensiivsus katla koldes ja konvektiivpindades on oluliselt sõltuv küttepindade katva tuhasadestise omadustest. Saastumise mõju soojusülekannele väljendub sadestistekihi termilises takistuses ja pinna kiirgusomadustes. Viimase mõju on eriti tähtis soojusülekannele koldes.

Tuhasadestise termiline takistus on sõltuv nende struktuurist (peamiselt poorsusest). Kiirgusomadused (peamiselt kiirgusneeldumistegur) on aga enamasti määratud sadestise keemilis-mineraloogilise koostisega.

Kiirgusülekanne koldes oleneb sadestise termilise takistuse ja kiirgusomaduste kõrval ka ekraanide ääres paikneva termilise piirikihi parameetritest. Selline piirikiht moodustab leegilt ekraanpinnasünnalisele soojusvoole täiendava takistuse. Termilise piirikihi takistus soojusvoole ei ole mitte ainult määratud koldekeskkonna kiirgusomadustega, vaid ka koldesisese massiülekannega. Viimane aga sõltub omakorda kolde aerodünaamikast määravatest para-

meetritest (geomeetrilised mõõtmed, põletite paigutus, põlemisgaasi kiiruseväljad, soojuslikud erikoormused jt).

Tingituna nii koldekraanidele kui ka konvektiivpindadele moodustuva seotud sadestiste termilise takistuse ajalisest muutusest on soojusülekanne põlevkivikatla küttepindades oma olemuselt mittestatsionaarne protsess. Soojusülekanne mittestatsionaarsus väljendub küttepinnast või selle osast väljuva põlemisgaasi temperatuuri ajalisest muutusest. Kui küttepindadele tekib kahekihilise struktuuriga sadestis, siis tingituna nende mõlema kihi ajalisest kasvust, esineb kihtide kahekordne mõju mittestatsionaarsele soojusülekannele. Ülisuur mõju soojusülekannele ajalise kulgemise dünaamikale on küttepindade tuhasadestistest puhastamise tsüklilisusel.

KATLATERASTE KÕRGTEMPERATUURNE KORROSION JA KÜTTEPINNA KULUMINE

Katlateraste kõrgtemperatuurse korrosiooni ja kulumise probleem on seotud küttepindade metalli tööea ja lubatud piirtemperatuuriga. Seejuures on oluline tähtsus põlevkivi põlemisel moodustuvate klooriühendite korrosiooni kiirendaval toimel.

Katlateraste kõrgtemperatuurse korrosiooni kiirus sõltub terase koostisest, metalli temperatuurist ja küttepinnale ladestuvate tuhasadestiste omadustest. Oluline on ka ajategur.

Üldreeglina väheneb terase korrosioonikiirus ajaliselt metalli keskkonnast eraldava oksiidikihi paksuse kasvuga. Metall korrosioonikiiruse vähenemine põlevkivi põletamisel ei ole tingitud mitte ainult materjali pinnale moodustuva oksiidikihi difusioonilise takistuse ajalisest kasvust, vaid ka torudele kondenseerunud kloori sisaldavate ühendite üleminekust vääveldioksiidi toimele sulfaatideks. Sulfaatide korrosiooniline toime on aga kloriidide omastunduvalt nõrgem. Kloori väljatõrjumine vääveldioksiidi poolt ning tuhasadestiste korrosioonilise aktiivsuse muutus on ajaliselt toimiv protsess.

Aurukateldes kohtame enamasti mitte küttepinna metalli "puhast" kõrgtemperatuurset korrosiooni,

vaid nn korrosioon-erosiivset kulumist. Viimase olemus seisneb metalli katva oksiidikihi (osalises või täielikus) aeg-ajalises purunemises kui korrosiooni kiirendavas teguris. Küttepinna korrosioon-erosiivne kulumine esineb küttepinna puhastustsükliites metallipinnale toimivate jõudude tagajärjel. See probleem seondub kõige teravamalt põlevkivikatelde aurülekuumendite tööea ja metalli lubatava temperatuuriga. Oksiidikihi purunemise ulatus ja selle toime korrosioonile on määratud küttepinna puhastustsükli oksiidikihi mõju jõuga. Lisame, et korrosioon ning kulumine ei intensiivistu mitte ainult oksiidikihi purunemisest, vaid ka torude pinnale moodustuva "värske" sadestise suuremast korrosioonilisest aktiivsusest, võrrelduna pikka aega pinnal püsinud tuhasadestisega.

KÜTTEPINNA PUHASTAMISE TEHNOLOOGIAD

Enamus põlevkivikatla küttepindu töötab tuhasadestiste piiramatut kasvu piirkonnas. Nende kasvu piiramiseks ja soojusülekanne stabiliseerimiseks seadistatakse katla küttepinnad puhastussüsteemidega. Puhastusseadme tüübist ja selle töötamise sagedusest sõltub oluliselt katla küttepinna saastumise iseloom ja dünaamika, küttepinnatorude tööga ning soojusvastuvõtt. Puhastustsükliites küttepinnale toimivad jõud ei mõju mitte ainult tuhasadestistele, vaid võivad purustada kas osaliselt või täielikult metallipinda kaitsva oksiidikihi. Oksiidikihi purunemise ulatus ja sagedus mõjutavad aga otseselt küttepinnatorude tööga. Puhastussüsteemi valik sõltub küttepinnale tekkivate tuhasadestiste omadustest ja kasvukiirusest. Puhastustsükli küttepinnale mõjuva jõu toime ei ole määratud mitte ainult selle absoluutse suurusega, vaid ka puhastustsükli vahelise perioodiga. Puhastussüsteemi valikul tuleb arvestada tsüklilise mõjuga nii soojusülekannele kui ka metalli tööeale.

Põlevkivikateldel on kasutusel mitmed erinevad küttepindade puhastussüsteemid. Üheks efektiivsemaks süsteemiks on küttepindade puhastamine veejuga abil kas iseseisvalt või kombineeritud variandis. Viimane on sõltuv küttepinnas kasutatava metalli omadustest ja temperatuurist.

EFEKTIIVSED VÄIKEKATLAD

Arvo Ots, Jaan Laid, Dmitri Nešumajev, Toomas Tiikma

Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituut

Soojusvarustuse areng toimub maades, kus on pikk kütteperiood ja märkimisväärsed kulutused küttele, kahes suunas. Ühelt poolt arendatakse termodünaamiliselt efektiivset nn kombitootmist (elektri ja soojuse koostootmine eelkõige kaugküttevõrku) ning teisalt individuaalseks kasutuseks mõeldud väikekatlaid seal, kus kaugküttevõrgu rajamine ei ole otsustav.

Väikekatelde tarbijat huvitab eelkõige katla töökindlus, tema hind ja tihti ka universaalsus tarvitavate kütuste osas ning võimalikult kõrge kasutegur (efektiivsus). Keskkonnateadlik tarbija hakkab huvituma ka katla kahjulikest heitmetest, st "roheline energia" kasutamisest. Kütusekasutuse universaalsus on kaasajal tihti järsult muutuvate kütusehindade puhul vajalik lisatingimus.

TTÜ soojustehnika instituudis on viimase 12 aasta vältel tegeldud väikekatelde uute konstruktsioonide väljatöötamisega ja nende efektiivsuse tõstmise probleemidega, mis varasemal ajal kütuse madalate hindade tõttu ei olnud nii aktuaalsed. Kõrvuti olemasolevate põhiliselt masuudil töötanud vene päritoluga katelde üleviimisega kohalikule puit- ja turbakütusele töötati välja uusi konstruktsioone. Uute lahenduste juures püüti eelkõige parandada katelde konvektiivosa efektiivsust. Nende uurimuste tulemuseks oli mitmesuguste turbulaatorite rakendamine katelde suitsutorudes. Turbulaator on katla suitsutorudesse paigutatud teisaldatav seade, mis intensiivistab konvektiivset soojusülekanne, kuid võib mõjutada ka suitsukäigu aerodünaamilist takistust.

Rakendades varasemat kogemust ning toetudes uusimatele saavutustele soojusülekanne uurimise alal on TTÜ soojustehnika instituudis koostöös AS-ga Viljandi Metall ja Eesti Innovatsioonifondi (praegune Tehnoloogiaagentuur) rahalisel toel välja töötatud ning tootmiseks ette valmistatud väikekatelde seeria, mille eripäraks on suhteliselt madala tehasehinna juures nende kõrge efektiivsus. Selle väljatöötamise eesmärgiks oli luua väikekatlad puit-

pelleti-, õli- ja gaasküttega kasuteguriga üle 90%, kasutades selleks:

- lihtsat ja odavat valmistamistehnoloogiat;
- soojusfüüsikaliste uuringute uusimaid tulemusi soojuslevi intensiivistamise valdkonnas.

Siinkohal tuleb eriliselt rõhutada väikekatla kõrge kasuteguri perspektiivset osatähtsust, kuna uute eramurajoonide arenguga nende osatähtsus tõuseb ning summaarse CO₂ emissiooni vähendamise vajaduse taustal on igasugune efektiivsuse tõus oluline.

Katlad vastavad Euroopa standardile EN 303. Katelde rõhu all töötavad osad on kujundatud ümarvormidena, mis omavad väiksemat metallmassi vajaliku tugevuse saavutamiseks ja mille montaaži töömaht on väiksem.

Katelde eripäraks on võime normaalselt töötada ilma tõmbeventilaatorita. See on saavutatud nende konvektiivosa suhteliselt suure ristlõikega ning selliste suitsugaasi voolust turbuliseerivate elementide kasutamisega, mis oluliselt ei suurenda gaasitrakti aerodünaamilist takistust.

Katel STI200VG on 200 kW nominaalvõimsusega (kasulik võimsus siin ja edaspidi) kolmekäigulise kompositsiooniga leek/suitsutorukatel, milles leegitoru asetseb katla teljel ja kaheastmeline konvektiivosa (kumbki koosneb 20st 51 mm sise-diameetriga torust) on paigutatud ümber leegitoru. Katel on ette nähtud kütteevee soojendamiseks gaasi või kerge kütteeõli kasutamisel korterelamus või elamute grupis. Katla olulised tehnilised parameetrid on järgmised:

- Nominaalvõimsus (kergeõli, gaas) 200 kW;
- Töörõhk 3 baari;
- Maksimaalne väljuva vee temperatuur 95 °C;
- Katla veemaht 0,328 m³;
- Katla tühi mass 525 kg.

Katel on kujutatud fotol joonis 1 a.



(a)



(b)

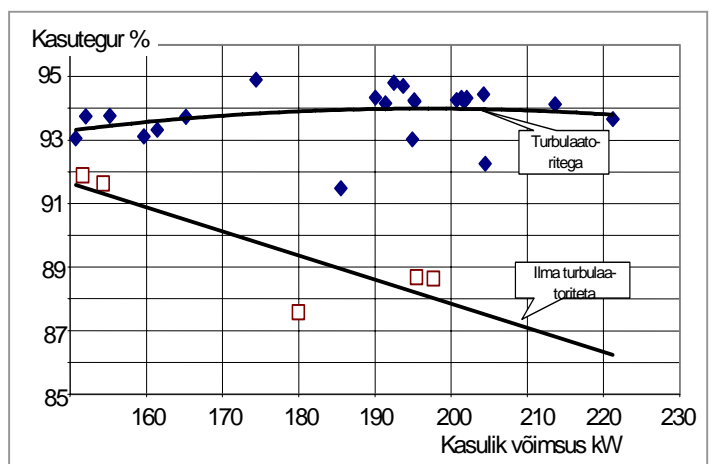
Joonis 1.

TTÜ soojustehnika instituudis välja töötatud keskküttekatlad katsetuste stendil laboratooriumis.

Katsetused TTÜ soojustehnika instituudis näitasid, et 200 kW kergeõli küttele katla kasutegur ulatub 94%-ni ja kohati ka üle selle lahkuvgaasi temperatuuril 125 °C ja liigõhuteguril alla 1,1. Seejuures lahkuvgaasis ei esinenud ülenormatiivset kahjulike heitmete CO, NO_x jt kontsentratsiooni.

Kvaliteetsete kaasaegsete õlipõletite (näiteks *Bentone*, *Oilon*) kasutamisel on põlemisel tahma teke viidud miinimumini. Katsete tulemusena ei leitud erilisi tahmajälgi konvektiivsetelt pindadelt.

Katla reaalse kasuteguri kohta on andmed toodud joonisel 2 sõltuvalt kasulikust võimsusest ja sellest, kas konvektiivosas kasutati soojustehnika instituudis väljatöötatud põlemisgaasi turbuleerivaid elemente või mitte.



Joonis 2.

200 kW õlikatla STI200VG kasuteguri sõltuvus kasulikust võimsusest.

Kolde mahulise soojuskoormuse ($0,8 \text{ MW/m}^3$) järgi oleks võimalik tema nominaalvõimsust suurendada eriliste probleemideta (kõrget kasutegurit säilitades) kuni 250 kW-ni. Vastavad katsed näitasid 220 kW saavutamise võimalust ning edasise võimsuse tõstmist takistasid kasutatava põleti tehnilised võimalused. Seni leiab Eesti siseturul liiga vähest kasutamist kohalik väärstatud kütus – puitpellet, mille toorainet puidujäätmete näol ja tootmisvõimsusi on piisavalt, kuid puuduvad Eesti tarbija jaoks taskukohased pelletite põletusseadmed. Allpool on kirjeldatud ühte võimalikku kohalikku lahendust puitpelletite kasutamiseks.

Katel STI20 *Malle* on konstrueeritud töötamaks nii kerge kütteõli, maagaasi kui ka puitpelletite põletiga. Katel on valmistatud terasest ümarelementidest kokkukeevitatuna ja sobib väiksema ja keskmise suurusega eramu kütteks ning sooja tarbevee saamiseks. Tarbevee ettevalmistamiseks on katla veemahtu paigaldatud vasest spiraalne küttepind. Ette on nähtud ka vajadusel kuni 6 kW elektriküttekehade paigaldamise võimalus. See suurendab vajaduse tekkimisel (talvine väga külm ilm või sive ainult tarbevee vajadus) katla võimsust. Katel on kujutatud fotol joonis 1 b koos puitpelletipõletiga ja ta põhiparameetrid on järgmised:

nominaalvõimsus

(õli, gaas, puidupelletid) 20 kW;

täiendav elektriküttekeha 6 kW;

töörõhk 2 baari;

maksimaalne väljuva vee temperatuur 90 °C;

katla veemaht 0,125 m³;

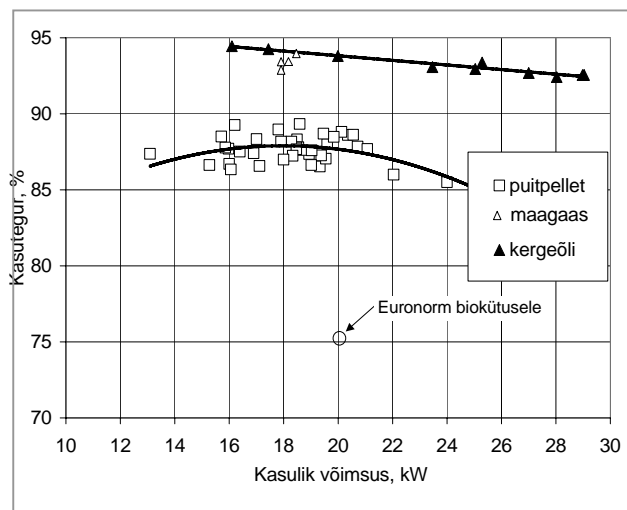
katla tühimass 140 kg.

Katla kolle on kujundatud nn tupikkoldena, mis võimaldab intensiivistada soojusülekannet seoses põlemisgaasi pikema teekonnaga ja suurendada koldekeskkonna turbulentsust.

Katsetused TTÜ soojustehnika instituudis näitasid katla STI20 *Malle* reaalselt kasutegurit õli- ja gaaskütel üle 92 % ning puitpelletite kasutamisel (sõltuvalt nende kvaliteedist, eriti niiskusest) ületab 85 % piiri (joonis 3). Saadud kasutegur ületab tunduvalt vastavate euronormidega kehtestatud väärtusi.

VÄIKEKATLA AERODÜNAAMILISEST TAKISTUSEST

Kuna vaadeldavad katlad on ette nähtud töötama ilma tõmbeventilaatorita, siis on nende võimalik



Joonis 3.

Katla STI20 *Malle* kasuteguri sõltuvus kasulikust võimsusest ja kasutatava kütuse liigist.

aerodünaamiline takistus üsna piiratud ja eriti konvektiivosa kujundamisel tuleb loobuda suurt takistust omavatest elementidest. Teaduskirjandusest tuntud meetmed aerodünaamilise takistuse vähendamiseks ilma konvektiivse soojusülekanne olulise vähendamiseta toimivad enamasti gaasivooluse kiirustel, mis vastavad Reynoldsi arvu järgi vähemalt üleminekurežiimile. Selline olukord on realiseeritav 200 kW katla korral, aga ei ole rakendatav 20 kW võimsusega katla puhul. Viimasel juhul, eriti kui katel töötab puidupelleti põletiga, on maksimaalseks võimalikuks aerodünaamiliseks takistuseks katla koldest kuni väljuva suitsutoruni 40 Pa. Katelde konstrueerimisel on jõutud turbulaatorite variandini, mis garanteerivad aerodünaamilise takistuse mitte üle 40 Pa.

Õli- ja gaasipõletid oma õhuventilaatoriga tekitavad katla koldes ülerõhu, mis leevendab teatud määral takistuse probleeme ning siis on konvektiivosas võimalik rakendada lihtsamat tüüpi turbulaatoreid konvektiivse soojusülekande teguri tõstmiseks, pöörata seejuures suuremat tähelepanu takistusele.

KATLA KONVEKTIIVOSA SOOJUSÜLEKANDEST

Väikekatla rahuldava kasuteguri saavutamiseks ja katlast lahkuva suitsugaasi temperatuuri alandamiseks kuni 160 °C tuleb tähelepanu pöörata konvek-

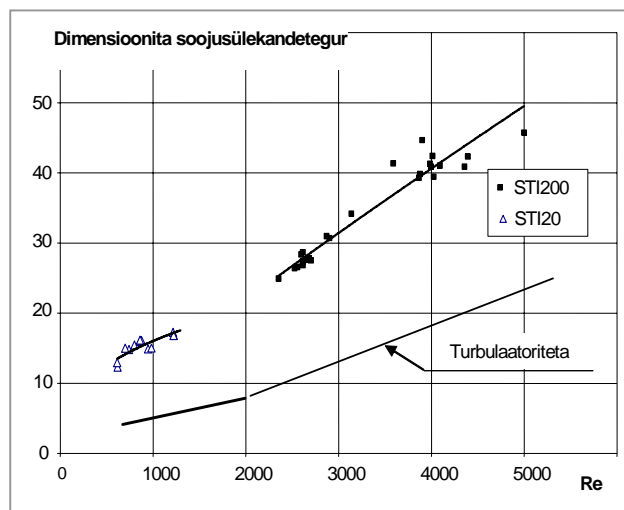
tiivosa kujundusele. Ülalpool oli analüüsitud katla aerodünaamilist takistust mõjutavaid faktoreid, mis piiravad loomuliku tõmbega katla korral eri tüüpi suure takistusega ja samas suurt soojusülekandevõimet andvate elementide kasutamist. Seejuures on metalli (katla massi) kokkuhoiu huvides soovitatav võimalikult vähese küttepinnaga saavutada püstitatud eesmärk.

Katla STI200VG koldest lahkuva suitsugaasi temperatuur ulatub kuni 1200 °C ja see omab küllaldast kiirguspotentsiaali, mida on vaja realiseerida esimeses konvektiivkäigus sinna kiirgava keha paigutamisega. Kuna antud juhul kiirgava gaasikihi efektiivne kiire tee pikus on tühine, siis gaasi kiirguspotentsiaal kasutatakse ära sel teel, et kõrgtemperatuuris gaasivoolu paigutatakse tahke pind, mida gaas konvektiivselt soojendab. Teaduskirjandusest on teada väga palju meetodeid konvektiivse soojusülekannde parandamiseks mitmesugust tüüpi turbuliseerivate elementide abil. Suurimat efekti soojusülekannde vähima aerodünaamilise takistuse kasvu korral on võimalik saavutada turbulaatorite kuju ja asetuse oskusliku valikuga, mis paljuski sõltub voolava keskkonna omadustest (eelkõige Prandtl'i arvust, milline määrab hüdrodünaamilise ja termilise piirikihi paksuste vahekorra). Gaasilise keskkonna korral peavad turbuleerivad või kareduselemendid paiknema kogu piirikihi paksuse ulatusel. See aga omakorda suurendab konvektiivosa aerodünaamilist takistust. Piirikihi paksus on seotud Reynoldsi arvu tasemega.

Toetudes öeldule on 200 kW katla korral võimalik arendada konvektiivtorudes vähemalt üleminekurežiimi Reynoldsi arvu järgi, mis võimaldab lihtsate turbulaatoritega oluliselt suurendada summaarset soojusülekandevõimet, 20 kW katla puhul aga ei õnnestu vastavat põlemisgaasi kiirust saavutada.

Märkigem, et viimasel juhul on tegu küllalt madala kolde soojuskoormusega (tema pinna ja mahu suhte määrab ära puidupelleti põleti koldesse ulatuv konstruktsioon), mis viib kolde lõpus (sisenemisel konvektiivtorudesse) suitsugaasi temperatuuri üsna madalale (600 – 700 °C). Sellisel juhul on suitsugaasi erimaht väike, et saavutada torudes suuremat kiirust kui 2 m/s.

Joonisel 4 on kujutatud eri tüüpi turbulaatorite rakendusel saadud summaarne dimensioonita soojusülekandevõime Reynoldsi arvust katelde konvektiivtorudes.



Joonis 4.

Turbulaatorite rakendusel konvektiivosas saadud dimensioonita soojusülekandevõime.

Märkigem, et mida väiksema võimsusega on katel, seda suurem mõju suitsugaasi temperatuuri kujunemisele on katlavee temperatuuril.

Katla STI200 Malle turbulaatorite dimensioonita soojusülekandevõime on turbulaatorite rakendusel kuni 2,5 korda suurem kui sileda toruga samadel voolamisrežiimidel.

KOKKUVÕTE

TTÜ soojustehnika instituudis väljatöötatud ja projekteeritud ning AS Viljandi Metall valmistatud keskküttekatlad STI20 ja STI200 on kõrge soojusliku efektiivsusega ja keskkonnasõbralikud. Katla STI200 kasutegur töötamisel maagaasi ja kerge küttega on vähemalt 94 % ning katlal STI20 – 92 %. Katla STI20 kasutegur töötamisel puitpelletitega sõltuvana nende kvaliteedist ületab 85 %. CO ja NO_x emissioon maagaasi ja kerge küttega kasutamisel jääb alla 100 ppm ning puitpelletite kasutamisel moodustab 50 – 70 % Euronormides lubatud väärtustest.

Puitpelletite kui biokütuse kasutamisel CO₂ emissioon ei kuulu maksustamisele ning gaasi ja vedelkütuse kasutamisel saavutatud kõrge kasutegurid võimaldavad vähendada CO₂ emissiooni iga genereeritud soojusühiku kohta.

DIGITAALSÜSTEEMIDE DIAGNOSTIKA TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO LIS

Raimund Ubar

Tallinna Tehnikaülikooli arvutitehnika instituut

Digitaalelektronika on tänase ühiskonna arenguvedur. Mida rohkem intellektuaalseid funktsioone läheb inimeselt üle tehissüsteemidele ja arvutitele, seda sõltuvamaks muutub inimene süsteemide kvaliteedist ja veakindlusest. Seetõttu moodustavad nii süsteemide loomise tarkus kui ka testimine ja diagnostika kompleksse valdkonna, mis omandab üha suuremat tähtsust elukvaliteedi tagamisel.

Selles valdkonnas toimub pöörane areng kogu maailmas. See on valdkond, kus suur raha liigub mitte üksnes tootmissfääris (tootmine muutub hoopiski odavamaks), vaid eriti teenindus- ja konsultatsioonifääris. Ekspertide teenused on siin äärmiselt kallid ning arengutendentse silmas pidades läheb eksperte üha rohkem vaja. Osta kasvavaid konsultatsiooniteenuseid selles valdkonnas välismaalt tähendaks väga suurt koormust majandusele, mistõttu rahvuslike süsteemiekspertide väljaõpe konkurentsiõimelise majanduse tagamisel peaks olema riigi tähtsamaid strateegilisi ülesandeid. Niisuguse väljaõppe tagamise eelduseks on heal tasemel toimuv teaduslik uurimis- ja arendustöö.

PILGUHEIT AJALUKKU

TTÜ arvutitehnika instituudi juures on välja kujunenud rahvusvahelise tunnustuse leidnud kompetentsus nii digitaalsüsteemide disaini kui ka diagnostika valdkonnas. Selle eelduseks on olnud üle 10 aasta kestnud aktiivne koostöö rohkem kui 30 teadusasutusega Lääne-Euroopas ja USA-s.

Diagnostikateaduse juured ulatuvad instituudis veelgi kaugemale. 1976. aastal avaldati TTÜ toimetistes publikatsioon, kus esmakordselt maailmas näidati tollal praktiliselt tundmatu otsustusdiagrammide teooria rakendamisvõimalust arvutite diagnostikas. Ameeriklased tulid samale mõttele aasta hiljem, kuid esialgu see teooria laiemat levikut ei leidnud. 1980ndate algul valmis TTÜ ja Küberneetika instituudi teadlaste – Teet Evarson, Martin

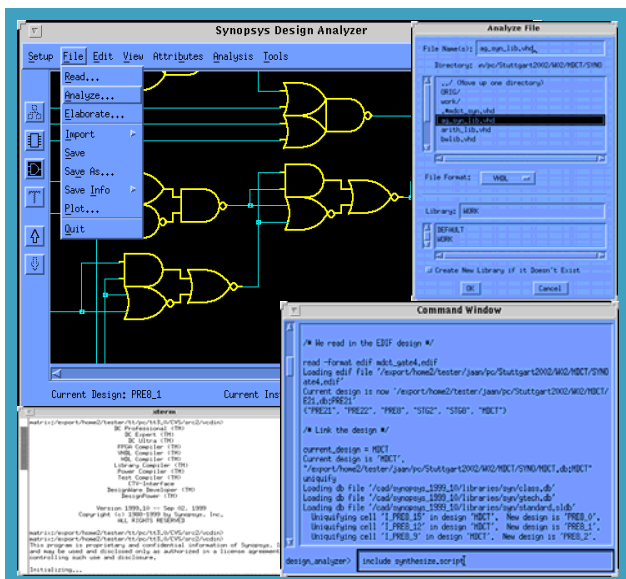
Pall, Mari Plakk, Agu Viilup, Andrus Voolaine ning allakirjutanu – jõupingutuste tulemusena digitaalskeemide testide generaator, mis esmakordselt maailmas töötas otsustusdiagrammide mudelil. Generaatorit kasutati mitmetes NSV Liidu elektroonikatööstuse juhtivates ettevõtetes ning TTÜ arvutite diagnostika koolkond pälvis kõrge tunnustuse, lühikese aja jooksul kaitsti 5 kandidaadiväitekirja ja 1 doktoritöö.

1986. aastal avaldati USA-s põhjanev artikkel nendest samadest binaarsetest otsustusdiagrammidest, mis TTÜ-s olid juba 10 aastat kasutusel. Artikkel sai ootamatult väga populaarseks ja põhjustas tõelise buumi, avades uue lehekülje arvutiteaduses. Üheks põhjuseks oli kindlasti see, et arvutite võimused oli selleks hetkeks tugevasti kasvanud ja veel hiljuti ebapraktilisena tundunud teooria oli muutunud äkki kasulikuks.

Samal ajal aga Eestis 1980ndate lõpu tormilistes sündmustes tööd selles valdkonnas hoopiski soikusid, noorte huvid pöördusid mujale, teadus polnud enam atraktiivne.

UURIMISTÖÖ TAASELAVNEMINE

Eesti Vabariigi alguspäevad, reformid teaduses ja kõrghariduses tõid taas elu ülikooli, aktiveerisid ka uurimistööd. Arvutitehnika instituudis toimus taas sünd kiiresti, sest labori teaduspagasis jätkus mõndagi, mis oli uudne Lääne jaoks ning mis aitas konkurssidel võita ridamisi välisprojekte, eelkõige europrogrammide TEMPUS, COPERNICUS, PECO ja ESPRIT raames. 1993. aastal võeti TTÜ arvutitehnika instituut ühena esimestest endiste sotsialismimaade ülikoolidest assotsiatsiooni EUROCHIP, mis spondeeris väljavalitud uurimiserühmi Euroopa ülikoolides kõrgtehnoloogilise tarkvara soetamisel.

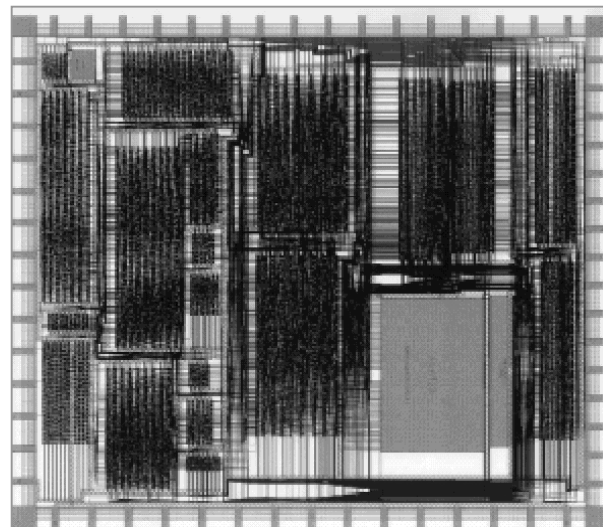


Joonis 1.

Raadioelektronika konstrueerimisbüroo ühes ainsas arvutis.

Toimus paradoksaalne elektroonika reinkarnatsioon Eestis: ühest küljest lagunes koost Eesti elektroonikaalase kompetentsuse legendaarne keskus – Tallinna Raadioelektronika Konstrueerimisbüroo, teisest küljest aga sigines TTÜ diagnostikalabori arvutisse miljon dollarit maksev tarkvara, mis asendas sisuliselt kõik endisaegse konstrueerimisbüroo osakonnad koos kõigi oma funktsioonidega: arvuti-programm asendas konstruktorite osakonna, tegi ära keemialabori ja häälestajate töö, asendas kogu montaažitsehhi. Terve tootmisprotsess toimus virtuaalselt ühesainsas arvutis (joonis 1). Lõpptulemusena tekkiv fail tuli saata üle Interneti ühte tehasesse Lääne-Euroopas, et selle järgi valmistada toode. Üksainus arvutiprogramm asendas terve 300-pealise projekteerimisasutuse.

Eesti teadusele heidetakse ette tulemuste mittenähtavust. Taoline investering maailmatasemel töökeskonna arendusse, milleks Eesti riigil endal vahendeid ei jätkunud, oligi teadlaste panus ja nende töö tulemus. Keskkonnast üksi oli aga vähe ilma oskajate inimesteta. Mitmed instituudi teadusprojektid võimaldasid aastatel 1993–1996 tervel hulgal noortel käia rohkem kui 60-l korral uusimat kõrgtehnoloogia tarkust omandamas Läänes. Instituudi



Joonis 2.

Jüri Põldre projekteeritud esimene ülisuur integraal-skem Eestis.

eesmärgiks oli kasvatada üles uus *õpetajate põlvkond*, uue kõrgtehnoloogia asjatundjad, et inseneritegevust selles valdkonnas taas ausse tõsta. Kahjuks ei läinud kõik nii nagu plaanitud. Kes piisavalt targaks said, ei jäänud mitte Eestisse järeltulijaid õpetama, vaid siirdusid “parematele jahimaadele” Läände. Nii me kandsimegi laboris aastaid sõelaga vett. Eesti oli liiga vaene, et kõrgtehnoloogias motivatsiooni inseneritööks sünnitada. Vaid üksikud fanaatikud mõtlesid niisugusel moel nagu hiljuti doktoritööd kaitsnud Jaan Raik, kellele Silicon Valley’s tööd pakuti: “Kalifornias leiaksin alati tööd, aga praegu oleks tõeliselt kahju sellest laborist Eestis ära minna, kus nii põnevaid asju tehakse”.

ESIMENE EESTI MIKROPROTSESSOR

1990ndate esimesel poolel ei olnud Eestis sellist elektroonikatööstust, kes oleks vajanud niisugust “konstrueerimisbürood”, nagu see oli TTÜ ühe labori arvutis. Ajude äravool ei võimaldanud luua ka kriitilist massi “*spin-off*” tüüpi väikeettevõtluse tekkeks. Kõrgtehnoloogiline turg oli Eestist liiga kaugel, mistõttu luuda ei tekkinud, vitsaraod murti pooleks ükshaaval.

Barjääri ületada aitas vaid tõeline fanatism ja armastus, mida jagub vähestele. Üheks selliseks tahetundluse ja ennastsalgavuse näidiseks oli magist-

roonika disaini saladuste maailma. Oli vaja tõelist kiindumust, et mitte käega lüüa olukorras, kus suurt raha teeniti programmeerimisega pankades ja mikroelektronika disainile vaadati kui Eesti jaoks ime-likule ja mitesobivale nähtusele.

Kuid siis see lõpuks ometi tuli – see esimene tulemus. Jüri Põldrest sai insener, kes projekteeris esimese ülisuure integraalskeemi Eestis – üle 200 tuhandest loogikaelemendist koosneva krüptoprotsessori (joonis 2). Mikroskeem vastas keerukuselt tol ajal personaalarvutites kasutatud Intel 386 mikroprotsessorile. Skeemi prototüüpseeria valmistati Lääne-Euroopas. Projekteerimist ja skeemi valmistamist toetas rahaliselt osaliselt ka Küberneetika Instituut. Seade võimaldas salastatud sidepidamist läbi avalike infokanalite ja oleks pidanud huvi pakkuma nii laiale tarbijaskonnale (politsei, kaitseväge, pangad, mobiiltelefonide kasutajad) kui ka Eesti tööstusele perspektiivse toote näol. Ometigi ei saanud sellest seadmeist veel turumenukat toodet. Jällegi sel lihtsal põhjusel, et Eesti asus kõrgtehnoloogilisest turust liiga kaugel.

Täna, 5–6 aastat hiljem, on olukord pisut muutunud. See, kuidas jõudis USA turule Eesti väikefirma Artec Design Group, väärriks omaette *case story* kokku panemist. Selles firmas on Jüri Põldre praegu võtmetegijaks mikroelektronika disaini valdkonnas. Hiljuti projekteeris ta kiibi, millesse mahutas keskmise personaalarvuti emaplaadi. Kuidas aga jääda iseseisvaks tänases kõrgtehnoloogilises maailmas, kus tugevam firma ostab ära nõrgema, kui see vaid konkurentsi pakkuda julgeb? Ja rahad liiguvad siin suured, mis omakorda näitab oskusteabe kõrget hinda elektroonikas. Ühe teise Eesti elektroonika firma ARSmicro näitel teame nüüd, et vaid mõnekümne asjatundjaga ettevõtte eest paneb USA tööstus koguni veerand miljardit lauale. Nii kallis on see valdkond ja nii kallid on siin oskajad inimesed.

KIIREIM TESTIDE GENERAATOR MAAILMAS

Kõlab pisut ambitsioonikalt ja nii see vast ongi, sest ega ametlikke kiirusvõistlusi selles valdkonnas ei peeta. Ometi just käesolevate ridade kirjutamise aegu viis Jaan Raik Stuttgardi Ülikoolis läbi edukad võrdluseksperimendid TTÜ-s tema poolt programmeeritud testigeneraatori DECIDER ja ülemaailm-

rant Jüri Põldre, kes harvanähtava sihikindlusega tungis üha sügavamale ja sügavamale mikroelekt-

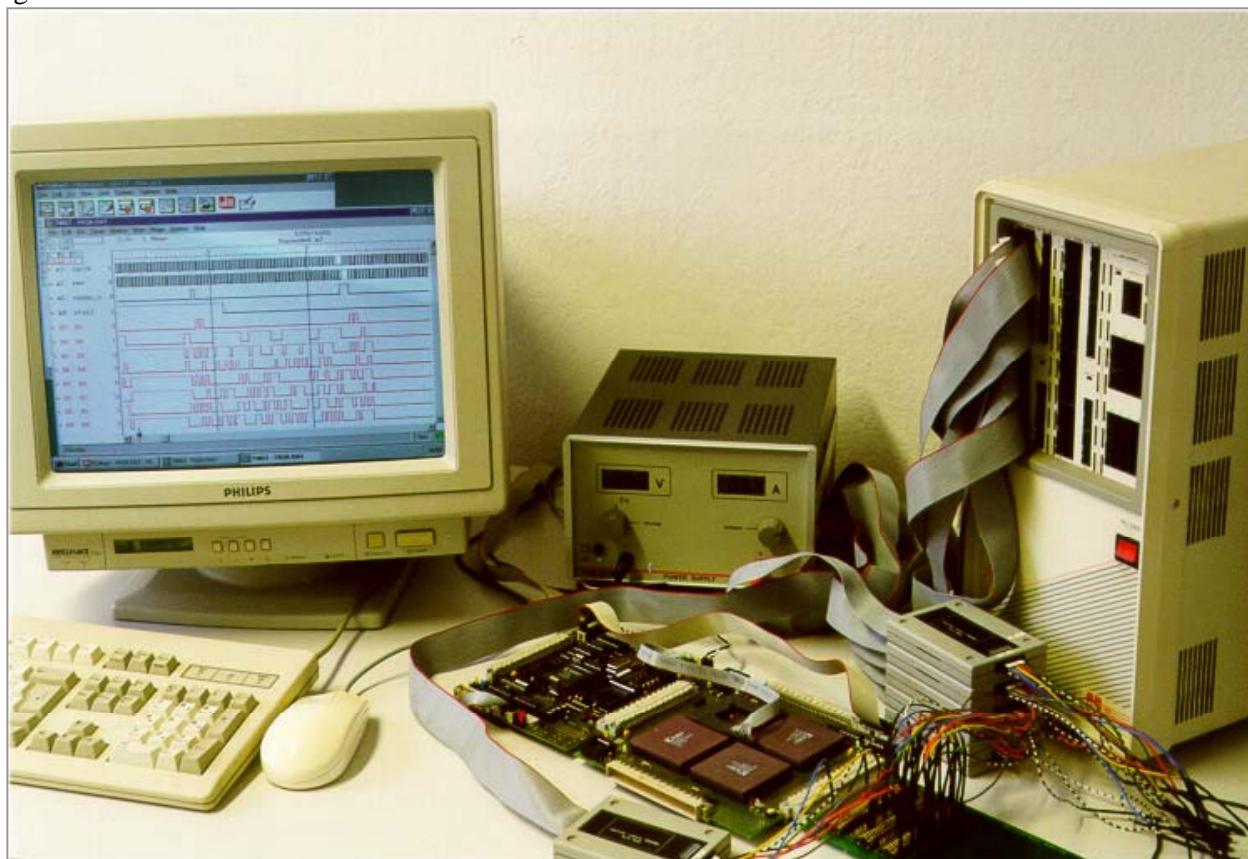
sel komertsturul ühe kõige tunnustatuma testigeneraatori vahel.

Mida tähendab digitaalsüsteemide testigeneraator? See on programm, mis analüüsib sadadest tuhandetest loogikaelementidest koosnevat elektronskeemi, määrab kindlaks kõik selles skeemis esineda võivad rikked – lühised ja katkestused elementide sees ning ühenduste vahel – ja seejärel hakkab iga sellise rikke jaoks otsima niisugust signaalide kogumit (testi), mille rakendamisel skeemi sisenditele avastatakse see rike, juhul kui ta skeemis ette tuleks. Kui skeem koosneks mõnest tuhandest elemendist, siis sünteesiks parimad generaatorid selle testi mõne minutiga. Mõnekümne tuhande elemendi puhul kulub aega juba tunde või isegi päevi, ja edasi kasvava keerukuse puhul suureneks vajalik aeg juba eksponentsiaalselt.

Väga suurte skeemide puhul on väljapääsuks hierarhiliste meetodite kasutamine. Viimasel ajal on uuringud selles valdkonnas intensiivistunud, kuid ikkagi pole probleemil veel lahendust, sest turul hierarhiline testigeneraator puudub. On olemas küll mitmeid USA ülikoolisüsteeme, aga nad on poolautomaatsed ja nõuavad käsitsi sisendinfo ettevalmistamist, mis pole mõeldav kaasaegsetes kiiretes projekteerimistsüklites, kus praktiliselt kõik toimingud peavad olema automatiseeritud.

Arvutitehnika instituudis on välja töötatud hierarhiline testide generaator digitaalsüsteemidele DECIDER, mille väljapaistvaks omaduseks on töökiirus. Suur kiirus saavutati tänu ühele olulisele lihtsustusele testide arvutamisel, mis mõnel juhul võib aga viia testide kvaliteedi langusele. Kuid nagu tabelist 1 on näha, kus 4 katseskeemi peal võrreldakse DECIDER'it kahe USA ülikoolisüsteemiga HITEST ja GATEST ning ühe levinuima kommertsüsteemiga KS, jääb DECIDER'i testide kvaliteet (rikete avastamise protsent) vaid kahel korral komertssüsteemile alla, kiirus aga on kõikide skeemide puhul võrreldes teiste süsteemidega drastiliselt suurem (aeg tabelis – testimise genereerimiseks vajalik aeg sekundites). Arvestades seda, et testigeneraatorid oma komplitseerituse tõttu maksavad maailmaturul sadu tuhandeid dollareid, on TTÜ tulemus märkimisväärne. DECIDER'it on kasutatud Fraunhoferi Instituudis Saksamaal tööstuslike

seadmete testimisel, projekti finantseeris Saksamaa Valitsus ja projekti tulemused avaldati BMBF poolt spondeeritud parimate rahvusvaheliste projektide kogumikus.



Joonis 3.

Diagnostikaeksperiment TTÜ testigeneraatoriga DECIDER Saksamaal Fraunhoferi Integraalskeemide Instituudis.

Tabel 1. TTÜ testide generaatori võrdlus maailmas levinud süsteemidega.

Katse- skeem	Elemente	Rikkeid	DECIDER		HITEC		GATEST		KS	
			%	Aeg	%	Aeg	%	Aeg	%	Aeg
GCD	227	844	92,2	3,4	89,3	196	92,2	90	93,7	92,7
MULT	1058	3915	79,4	13,6	63,5	2487	77,3	3027	80,1	2871

RISC	2830	6572	96,7	27,7	Andmed puuduvad				94,5	1094
DIFFEQ	4195	15386	96,0	32,3	95,1	>4t	96,0	4280	95,6	1359

TEADUSTÖÖ SUUNDADEST TTÜ ARVUTITEHNIKA INSTITUUDIS

Põhilisteks diagnostika-alasteks uurimissuundadeks TTÜ arvutitehnika instituudis on: testide genereerimine digitaalsüsteemidele, rikete modelleerimine ja simuleerimine, rikete ja disainivigade diagnostika, süsteemide isetestimine ja veakindlus. Matemaatilise aparatuurina süsteemide diagnostiliseks modelleerimiseks kasutatakse otsustusdiagramme.

Võrreldes pärast 1986. aastat maailmas väga levinud binaarotsustusdiagrammidega, mida saab kasutada aga ainult loogikatasemel ja kus seetõttu on keerukus väga suureks probleemiks, on instituudis arendatud välja üldistatud otsustusdiagrammide mudel, mis võimaldab süsteeme sama matemaatika abil ka kõrgematel tasemetel käsitleda ja seetõttu keerukuse probleeme mõnevõrra leevendada. Nimeetatud mudel võimaldas välja töötada väga efektiivseid analüüsialgoritme, mis seletabki DECIDER'i suurt töökiirust.

Arvutitehnika instituudi viimase aja tähtsamatest teadustulemustest diagnostika valdkonnas võiks lühidalt nimetada veel järgmisi:

1. On välja töötatud uus lähenemisviis digitaalskeemide ajaliseks simuleerimiseks loogikatasandil ja viitedefektide avastamiseks, mis võimaldab vähendada analüüsi keerukust. Uus meetod aitas tõsta simuleerimise kiirust kuni 3,5 korda.
2. Töötati välja rida uudseid algoritme digitaalsüsteemide simuleerimiseks registersiirete tasandil. Kiireim simulaatoritest ületab jõudlusest vastava klassi kommertstarkvara. Uuringud toimuvad koostöös prantsuse teadlastega Grenoble'i Joseph Fourier' Ülikoolist ja Grenoble'i Tehnikaülikoolist.
3. Traditsiooniline disainivigade diagnostika toimub eelnevalt defineeritud vigade hulgal. Kuna kõiki vigu ja nende kombinatsioone pole võimalik ette määratleda, seavad olemasolevad meetodid ka teatavad kitsendused saavutatava diagnoosi resolutsioonile. TTÜ uurimisgrupp töötas välja uue meetodi, mis ei nõua eelnevat vigade defineerimist.

4. Väga kuum valdkond on tänapäeval süsteemide isetestimine. Arvutitehnika instituut on siingi olnud aktiivne, olles arendanud välja uusi meetodeid hübriidseks isetestimiseks ja teststruktuuride optimeerimiseks. Tihe koostöö toimub siin rootsi teadlastega Linköpingi Ülikoolist.

Mainitud tööde baasil kaitses hiljuti oma doktoritööd Marina Brik ning peatselt on valmimas Eero Ivaski ja Artur Jutmani doktoritööd, tematikaga tegeleb 10 magistranti.

Instituudis välja töötatud multifunktsionaalset diagnostikasüsteemi Turbo-Tester on kasutatud paljudes ülikoolides Soomes, Rootsis, Saksamaal, Poolas, Slovakkias, inseneride õpetamisel Rootsis, USA Michigani ülikooli tudengite õpetamisel, teadustöös Inglismaal, Indias, Costa Ricas ja mujal.

INTERDISTSIPLINAARSEST KOOSTÖÖST

Digitaaltehnikate keerukuse kasv on sundinud teadlasti modelleerima süsteeme üha kõrgematel abstraktsioonitasanditel, eemaldades niiviisi üha rohkem füüsilisest tasandist, kus toimuvad tegelikud protsessid. Lihtsustamise eest aga tuleb lõivu maksta, mis seisneb tulemuste täpsuse ja kvaliteedi vähenemises.

Arvutitehnika instituudis on püstitatud strateegia liikuda ühtaegu mõlemas suunas – nii “üles” käitumusliku tasandi suunas, taotlemaks efektiivsemaid ja kiiremaid algoritme, kui ka “alla” transistorlülituste suunas, taotlemaks täpsust ja kvaliteeti. Kuna kõikjal pole võimalik olla ekspert, siis on “hädast” välja aidanud füüsika ja tehnika piirimaile toimuv interdistsiplinaarne koostöö Varssavi Tehnoloogia-instituudiga. Liikumine “alla” tähendab defektide arvestamise vajadust füüsilisel tasandil. Sellega kaasnev keerukuse probleem neutraliseeriti koostöö tulemusena nii, et defektide analüüs (poolakate kompetentsusvaldkond) viiakse läbi vaid tüüpelementidele ja tulemused fikseeritakse elementide teegis. TTÜ-s välja töötatud originaalne teisendusmeetod võimaldab efektiivselt kasutada teegis olevat infot ning tagada defektide täpset arvestust kõrgtasandi kiirete algoritmide poolt, mis samuti on TTÜ tulemus. Niiviisi töötatigi välja ja realiseeriti

tarkvaras uus täpne ja kiire meetod testide hierarhiliseks genereerimiseks transistortaseme füüsikaliste defektidele keerulistes digitaalsüsteemides.

Eksperimentaalsed katsed uue meetodiga näitasid seniste klassikaliste meetodite suurt ebatäpsust ja tendentsi ülehinnata testide kvaliteeti. Meetod kanti ette maailma ühel prestiižikamal konverentsil Silicon Valley's ja see tekitas suurt huvi tööstuse spetsialistide hulgas. Hiljuti käivitus uus 5. Raamprogrammi europrojekt REASON nimetatud probleemide süvauurimiseks.

Koostöös Fraunhoferi Instituudiga Saksamaal realiseeriti keskkond MOSCITO TTÜ diagnostikatarkvara kaugkasutamiseks üle Interneti. Europrojekti VILAB raames integreeriti MOSCITO'sse lisaks Fraunhoferi Instituudi disainitarkvarale TTÜ DECIDER, Linköpingi Ülikooli disainitarkvara CAMAD ja Slovaki Teaduste Akadeemia testigeneraator DEFGEN ning loodi nelja laboratooriumit haarav ühtne disaini ja testi keskkond – virtuaalne laboratoorium. Eksperimendid demonstreerisid edukalt süsteemi töövõimelisust. Kõige olulisemaks projekti tulemuseks kujunes täisautomatiseeritud disaini ja testi keskkond DECIDER'i ja CAMAD'i baasil Rootsi ühelt poolt ja poolautomatiseeritud disaini ja testi keskkond DECIDER'i ja Fraunhoferi Instituudi tarkvara baasil Saksamaaga teiselt poolt. Analooigid kõrgtasemel ühilduvate disainisüsteemide ja testigeneraatorite näol puuduvad.

KOKKUVÕTTEKS

Arvutitehnika instituudi diagnostikagrupi kõige olulisemaks uurimis- ja arendustöö tulemuseks arenguperspektiive silmas pidades tuleks lugeda rea projektide raames üles ehitatud eksperimentaaluuringute keskkonda, mida iseloomustab:

- digitaalsüsteemide disaini ja testi tarkvaraga toetatud uurimisobjektide mudelite, uurimistandardite ning meetodite mitmekesisus ja varieeruvus, mis võimaldab kergesti formuleerida uusi probleeme ning ideede katsetamiseks operatiivselt kombineerida erinevaid eksperimentaalstsenaariume;
- keskkonna virtuaalsus e tarkvara distantkasutuse võimalus, mis teeb keskkonna atraktiivseks välispartneritele ja mille tõttu on arvutitehnika instituudist kujunenud hästi tuntud rahvusvaheline keskus digitaaldisaini ja -diagnostika valdkonnas.

Nimetatud keskkonna baasil toimub viljakas koostöö paljude välispartneritega, kus ühispublikatsioon on avaldatud teadlastega rohkem kui 10 ülikoolist ja uurimisasutusest Soomes, Rootsis, Saksamaal, Prantsusmaal, Itaalias, Poolas, Slovakkias, Venemaal, Ukrainas ja mujal väga mitmes uurimissuundades. Aastatel 2000–2002 publitseeris instituut diagnostika valdkonnas üle 80 teadusartikli, nendest rohkem kui 30 on ühisartiklid välisteadlastega. EL 5. Raamprogrammi all on teoksil kaks uut europrojekti REASON ja eVikings, osaletakse kolmes Euroopa tippkeskuste koostöövõrgus THEIERE, CABERNET ja AMSD. Uurimisrühmal on 2 bilateraalset projekti Saksamaaga EST-00/1 ja DILDIS ning 2 Eesti Teadusfondi granti.

Instituudi teadustulemusi rakendatakse ka Eesti tööstuses. Tehnoloogiaagentuuri ESTAG toetusel realiseerub arendusprojekt koostöös firmaga Artec Design Group, mille eesmärgiks on välja töötada ja projekteerida ennast isetestiv kommunikatsiooniprotssor (süsteem kiibil). Võimalus niisugust ambitsioonikat ülesannet püstitada ja lahendada tuleb suuresti laboris üles ehitatud diagnostikakeskkonnast.

TÄHTSAMAIK ARTIKLEID TEADUSAJAKIRJADES:

Blyzniuk, M., Kazymyra, I., Kuzmicz, W., Pleskacz, W.A., Raik, J., Ubar, R. Probabilistic analysis of CMOS physical defects in VLSI circuits for test coverage improvements. *J. of Microelectronics Reliability*, 2001, 41/12, Dec., 2023-2040.

Cibáková, T., Fischerová, M., Gramatová, E., Kuzmicz, W., Pleskacz, W., Raik, J., Ubar, R. Hierarchical test generation for combinational circuits with real defects coverage. *J. of Microelectronics Reliability*, 2002, 42, 1141-1149.

Jutman, A., Ubar, R. Design error diagnosis in digital circuits with stuck-at fault model. *J. of Microelectronics Reliability*, 2000, 40, 2, 307-320.

Raik, J., Ubar, R. Fast test pattern generation for sequential circuits using decision diagram representations. *J. of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2000, 16, 3, 213-226.

Ubar, R. Combining functional and structural approaches in test generation for digital systems. *J. of Microelectronics and Reliability*, 1998, 317-329.

- Ubar, R. Dynamic analysis of digital circuits with multi-valued simulation. *Microelectronics Journal*, 1998, 29, 11, 821-826.
- Ubar, R. Multi-valued simulation of digital circuits with structurally synthesized BDDs. *J. of Multiple Valued Logic*, 1998, 1-17.
- Ubar, R. Test synthesis with alternative graphs. *IEEE J. of Design and Test of Computers*, 1996, 48-59.
- MUID TÄHTSAMAID ARTIKLEID:**
- Jervan, G., Kruus, H., Peng, Z., Ubar, R. About cost optimization of hybrid BIST in digital systems. 3rd Int. Symp. on Quality of Electronic Design, San Jose, California, March 18-20, 2002, 273-279.
- Jutman, A., Ubar, R. Application of structurally synthesized binary decision diagrams for timing simulation of digital circuits. *Proc. Eston. Acad. Sci.*, 2001, 7, 4, 269-288.
- Jutman, A., Ubar, R., Peng, Z. Algorithms for speeding-up timing simulation of digital circuits. *DATE*, Munich, March 13-16, 2001, 460-465.
- Kuzmicz, W., Pleskacz, W., Raik, J., Ubar, R. Module level defect simulation in digital circuits. *Proc. Eston. Acad. Sci.*, 2001, 7, 4, 253-268.
- Ubar, R., Jutman, A., Orasson, E., Raik, J., Evarsson, T., Wuttke, H.-D. Internet-based software for teaching test of digital circuits. Marcombo Boixareu (ed.). *Microelectronics Education*, 2002, 317-320.
- Ubar, R., Kuzmicz, W., Pleskacz, W., Raik, J. Defect-oriented fault simulation and test generation in digital circuits. 2nd Int. Symp. on Quality of Electronic Design, San Jose, California, March 26-28, 2001, 365-371.
- Ubar, R., Morawiec, A., Raik, J. Back-tracing and event-driven techniques in high-level simulation with decision diagrams. *Proc. of the IEEE IS CAS'2000 Conference*, Geneva, May 28-31, 2000, 208-211.
- Ubar, R., Morawiec, A., Raik, J. Cycle-based simulation algorithms for digital systems using high-level decision diagrams. *IEEE Proc. of Design Automation and Test in Europe*. Paris, March 27-30, 2000, 743.
- Ubar, R., Morawiec, A., Raik, J. High-level decision diagrams for simulation performance. *Proc. of the World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, SCI- 2000*. Orlando, Florida, USA, July 23-26, 2000, Vol. IX. *Industrial Systems*, 62-67.
- Ubar, R., Raik, J. Efficient hierarchical approach to test generation for digital systems. 1st Int. Symp. on Quality of Electronic Design, San Jose, California, March 20-22, 2000, 189-195.
- Ubar, R., Raik, J., Ivask, E., Brik, M. Multi-level fault simulation of digital systems on decision diagrams. *IEEE Workshop on Electronic Design, Test and Applications – DELTA'02*, Christchurch, New Zealand, 29-31 January, 2002, 86-91.
- Ubar, R., Wuttke, H.-D. Action based learning system for teaching digital electronics and test. *Microelectronics Education*, Kluwer, Dordrecht, Boston, London, 2000, 107-110.

AUTORITEST

Hillar ABEN (1929)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstus- ja tsiviilehituse erialal 1953. Tehnikakandidaat 1957, tehnikadoktor 1968. Eesti TA akadeemik 1977. TTÜ Küberneetika Instituudi fotoelastsuse laboratooriumi juhataja.

Alo ADAMSON (1939)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli mäe-elektromehaanikainsenerina 1966. Tehnikakandidaat 1975. Tallinna Tehnikaülikooli maavarade kaevandamise professor, mäeinstituudi direktor.

Leo AINOLA (1929)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstus- ja tsiviilehituse erialal 1953. Füüsika-matemaatikadoktor 1968. Professor 1971. Tallinna Tehnikaülikooli emeriitprofessor, Küberneetika Instituudi vanemteadur.

Johan ANTON (1973)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tehnilise füüsika erialal 1997. Loodusteaduste magister 1998. TTÜ Küberneetika Instituudi teadur.

Martin EERME (1968)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli masinaehitusinsenerina 1993. Tehnikadoktor 2001. Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse instituudi vanemteadur.

Jüri ENGELBRECHT (1939)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstus- ja tsiviilehituse erialal 1962. Tehnikakandidaat 1968, füüsika-matemaatikadoktor 1982. Professor 1984. Eesti TA akadeemik 1990. Eesti Teaduste Akadeemia president. Tallinna Tehnikaülikooli rakendusmehaanika professor, Küberneetika Instituudi mehaanika ja rakendusmatemaatika osakonna juhataja.

Andrei ERRAPART (1978)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tehnilise füüsika erialal 2002. TTÜ Küberneetika Instituudi insener.

Ain HEINARU (1943)

on lõpetanud Tartu Ülikooli bioloogina geneetika erialal 1967. Bioloogiakandidaat 1971. Tartu Ülikooli geneetika professor, bioloogia-geograafiateaduskonna dekaan.

Hilje HINRIKUS (1934)

on lõpetanud Moskva Riikliku Ülikooli füüsika erialal 1960. Tehnikakandidaat 1966, tehnikadoktor 1989. Tallinna Tehnikaülikooli biomeditsiinitehnika keskuse vanemteadur.

Ülo JAAKSOO (1939)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli automaatika ja telemehaanika erialal 1962. Tehnikakandidaat 1969, tehnikadoktor 1983. Professor 1985. Eesti TA akadeemik 1986. Cybernetica AS juhatuse esimees.

Ilmar KINK (1970)

on lõpetanud Tartu Ülikooli füüsika erialal 1992. Füüsikamagister 1994, PhD füüsikas 1999 (Lundi Ülikool). Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi järel doktor.

Valdek KULBACH (1927)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstus- ja tsiviilehituse erialal 1951. Tehnikakandidaat 1955, tehnikadoktor 1973. Professor 1973. Eesti TA akadeemik 1986. Tallinna Tehnikaülikooli emeriitprofessor.

Priit KULU (1945)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse tehnoloogia erialal 1968. Tehnikakandidaat 1972, tehnikadoktor 1989. Tallinna Tehnikaülikooli materjaliteaduse professor, materjalitehnika instituudi direktor.

Rein KÜTTNER (1940)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse tehnoloogia erialal 1965. Tehnikakandidaat 1971. Eesti TA akadeemik 1997. Eesti TA Informaatika ja Tehnikateaduste osakonna juhataja, Tallinna Tehnikaülikooli raalintegreeritud tootmise ja projekteerimise professor.

Jaanus LASS (1971)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli raadiotehnika erialal 1994. Tehnikamagister 1996, loodusteaduste doktor 2002. Tallinna Tehnikaülikooli biomeditsiinitehnika keskuse teadur.

Jaan LAID (1936)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli laevajõuseadmete erialal 1961. Tehnikakandidaat 1975. Tallinna Tehnikaülikooli soojustehnika instituudi vanemteadur.

Jaan LELLEP (1945)

on lõpetanud Tartu Ülikooli arvutusmatemaatika erialal 1968. Füüsika-matemaatikakandidaat 1972, füüsika-matemaatikadoktor 1990. Tartu Ülikooli teoreetilise mehaanika professor.

Ülo LEPIK (1921)

on lõpetanud Tartu Ülikooli füüsika erialal 1948. Füüsika-matemaatikakandidaat 1952, füüsika-matemaatikadoktor 1958. Professor 1959. Eesti TA akadeemik 1993. Tartu Ülikooli emeriitprofessor.

Tarmo LIPPING (1967)

on lõpetanud Tampere Tehnikaülikooli infotehnoloogia erialal 1993. Tehnikamagister 1993, tehnoloogiadoktor 2001. Tallinna Tehnikaülikooli raadiofüüsika professor, biomeditsiinitehnika keskuse juhataja.

Enn LOIGU (1946)

on lõpetanud Tartu Ülikooli geograaf-hüdroloogina 1970. Geograafiakandidaat (hüdrokeemia) 1982. Tallinna Tehnikaülikooli keskkonnatehnika instituudi keskkonnakaitse aluste professor, õppetooli juhataja.

Ants LÕHMUS (1944)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli elektroonika erimaterjalide erialal 1969. Füüsika-matemaatika-kandidaat 1981. Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi vanemteadur.

Kalju MEIGAS (1951)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli raadiotehnika erialal 1974. Tehnikamagister 1993, tehnikadoktor 1997. Tallinna Tehnikaülikooli biomeditsiinitehnika professor, õppetooli juhataja.

Einar MEISTER (1957)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstuselektronika erialal 1982. Tehnikamagister 1998. Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika instituudi foneetika ja kõnetehnika laboratooriumi juhataja.

Enn MELLIKOV (1945)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli elektroonika ja erimaterjalide tehnoloogia erialal 1968. Keemia-kandidaat 1977, tehnikadoktor anorgaanilise keemia alal 1987. Tallinna Tehnikaülikooli pooljuhtmaterjalide tehnoloogia professor, materjaliteaduse instituudi direktor.

Mart MIN (1943)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstuselektronika erialal 1969. Tehnikakandidaat (Kiievi Polütehniline Instituut) 1984. Tallinna Tehnikaülikooli mõõteelektronika professor.

Leo MÕTUS (1941)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli automaatika ja telemehaanika erialal 1965. Tehnikakandidaat 1973, tehnikadoktor 1990. Eesti TA akadeemik 1993. Tallinna Tehnikaülikooli reaalaja süsteemide professor.

Dmitri NEŠUMAJEV (1974)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 1996. Tehnikamagister 1998. Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika instituudi teadur, doktorant.

Monika OIT (1952)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli automatiseeritud juhtimissüsteemide erialal 1975 ja Tartu Ülikooli psühholoogia erialal 1989. Tehnikakandidaat 1984. Cybernetica AS teadusdirektor, infoturbe osakonna juhataja.

Arvo OTS (1931)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 1955. Tehnikakandidaat 1958, tehnikadoktor 1968. Professor 1969. Eesti TA akadeemik 1983. Tallinna Tehnikaülikooli kütuste põletamise tehnoloogia professor.

Jaan PENJAM (1955)

on lõpetanud Tartu Ülikooli rakendusmatemaatika erialal 1979. Tehnikakandidaat 1984. Tallinna Tehnikaülikooli teoreetilise informaatika professor, Küberneetika Instituudi direktor.

Enno REINSALU (1936)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli mäeinsenerina 1960. Tehnikakandidaat 1968. Tallinna Tehnikaülikooli emeriitprofessor.

Jevgení RIIPULK (1968)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli raadiotehnika erialal 1992. Tehnikamagister 1994, tehnikadoktor 2000. AmStandard UÜ tegevjuht.

Toomas TIIKMA (1945)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli soojusenergeetika erialal 1969. Tehnikakandidaat 1977. Tallinna Tehnikaülikooli tööstusliku soojustehnika professor, õppetooli juhataja.

Enn TÕUGU (1935)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse erialal 1958. Tehnikakandidaat 1965, tehnikadoktor 1974. Professor 1978. Eesti TA akadeemik 1981. Eesti Kõrgema Kommertsikooli informaatikaprofessor, Tallinna Tehnikaülikooli Küberneetika Instituudi vanemteadur.

Raimund UBAR (1941)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli elektriinsenerina 1966. Tehnikakandidaat 1971, tehnikadoktor 1987. Professor 1988. Eesti TA akadeemik 1993. Tallinna Tehnikaülikooli arvutitehnika ja -diagnostika professor, õppetooli juhataja.

Aivar USK (1965)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli tööstuselektroonika erialal 1991. Tehnikamagister 1998. Cubernetica AS navigatsioonisüsteemide osakonna juhataja.

Andres ÖPIK (1947)

on lõpetanud Tallinna Tehnikaülikooli elektroonika ja erimaterjalide tehnoloogia erialal 1970. Keemiakandidaat 1981. Tallinna Tehnikaülikooli füüsikalise keemia professor, keemia- ja materjalitehnoloogia teaduskonna dekaan.