Loeng 1. Füüsika meetod ja keel

1. Sissejuhatus

Füüsika nagu iga teinegi õppeaine koosneb kahest komponendist: teadmised ja oskused. Kui üldfüüsika kursustes piirdub vaid teadmistega, siis insenerifüüsika juurde kuuluvad paratamatult ka **oskused** - võime kasutada füüsikakursuses omandatud teadmisi tehniliste probleemide lahendamisel. Enamus masinaõpetuse ja elektrotehnika valemeid ning tehnoloogilisi normatiive on üle võetud või tuletatud füüsika seadustest; füüsikast on pärit ka mõõtmistehnoloogia ning statistiline andmetöötlus.

Füüsika kui teadus kujutab endast **filosoofilist süsteemi**, kus reaalsetele loodusnähtustele seatakse vastavusse nende matemaatilised mudelid. Igat eset või protsessi püütakse kirjeldada kvantitatiivselt määratavate parameetrite - **füüsikaliste suuruste** abil. Nende parameetrite arvulised väärtused - **mõõdud** - on omavahel seotud matemaatiliste seoste - **valemitega**. See arvude- valemite kompleks kannab nime **matemaatiline mudel**.

Mõõtühikute ning mõõtmisprotsessiga tutvute füüsika laboris. Seal õpitu kuulub loengukursuse juurde, selle omandamist kontrollitakse kontrolltööde käigus.

Matemaatiline modelleerimine võimaldab uurida protsessi teda reaalselt käivitamata, varieerides mudeli parameetreid ja jälgides neist sõltuvate suuruste muutumist, st. protsessi käiku. Mudeli arengut reaalse protsessiga võrreldes saame hinnata mudeli täpsust ja adekvaatsust (vastavust tegelikkusele) ning teda vajaduse korral korrigeerida. Kriitilistel juhtudel viiakse läbi **katse e. eksperiment** - looduses tavaolukorras mitte esinev protsess, mida on vaja ühe või teise valemi kontrolliks.

Füüsikat õppima asudes oleks hea meeles pidada järgnevaid põhimõtteid:

1. Füüsika **ei kasuta** kvalitatiivseid määratlusi, nagu *ilus, halb, punane, hapu, etc.*, vaid asendab need kvantitatiivselt määratavate suurustega nagu *pikkus, aeg, voolutugevus, etc.*
   Iga suurust iseloomustab tema **mõõt** - kujund, mis koosneb mõõtarvust, piirveast ja ühikust. Suuruse ja mõõtühiku tähistamiseks kasutatakse kokku lepitud **tähtsümboleid**, mõõtarv ja viga antakse tavaliselt **ümardatud reaalarvu** abil. Ümardamiseks ning vea leidmiseks on seejuures kindlad reeglid.

Nähtuste ja esemete kirjeldamiseks kasutatakse füüsikas ainult arve. Valemites ja seadustes olevad tähtsümbolid peavad olema alati asendatavad arvudega.

2. **Füüsika seadused** kujutavad endast matemaatilisi seoseid nimetatud suuruste vahel. Seos püütakse

anda **valemi** abil, aga kasutatakse ka graafikuid, tabeleid ja nomogramme. Valem ongi matemaatilise mudeli lihtsaim vorm,

AGA

3. Iga füüsika seaduse juurde kuulub ka **sõnaline kirjeldus**, mis viitab **põhjuslikule seosele**. Matemaatiline valem on indiferentne, teda saab matemaatiliselt teisendada, kusjuures kõik leitud kujud on samaväärsed. Ka on matemaatiline seos kehtiv kogu määramispiirkonna ulatuses, füüsika seadustel on aga reeglina piiratud rakendusala. Kõik see nõuab sõnalist selgitust.

Füüsika valemite algebralised teisendid ei ole alati samaväärsed. Kui üks neist kirjeldab põhjuslikku seost või esineb muid piiranguid, lisatakse sõnaline kirjeldus.

4. Füüsika kursus on **järjepidev**, st. tema järgnevad osad toetuvad eelnevatele. Nii sisaldab optikakursus elektriõpetuse ja mehaanika elemente, kvant-teooria toetub termodünaamikale jne.

Füüsika **valemeid** võib tinglikult jagada kolme tüüpi:

1. Empiirilised valemid saadakse mingi katseseeria üldistusena. Nad on suhteliselt ebatäpsed (seose kuju sõltub tugevalt mõõtmistäpsusest) ja ei oma otsest tunnetuslikku väärtust. Empiirilise seose tunnuseks on numbriliste parameetrite rohkus; need parameetrid on saadud katseseeria matemaatilisel töötlemisel.
2. Teoreetilised valemid - **põhiseadused** - saadakse empiiriliste valemite üldistamise teel. Nad on matemaatiliselt keerukad, mõnd empiirilist parameetrit asendab kindlat väärtust omavate suuruste, nn. **universaalkonstantide** kombinatsioon.
3. Rakenduslikud seosed saadakse eespool toodute konkretiseerimise tulemusena. Nende ülesandeks on kindla suuruse leidmine või jälgimine ette antud protsessis. On rohkem tehnilise füüsika ja tehnoloogia pärusmaa.

Füüsika seadused ja neid esitavad valemid jagunevad:

a. põhiseadused
b. empiirilised sõltuvused
c. rakenduslikud seosed

Ülaltoodut arvestades püüan kursuse üles ehitada mitte kui ajaloolis-filosoofilise ülevaate, vaid peaasjalikult rakenduslikke vajadusi silmas pidades. Viimaste osas üritan konsensusele jõuda ka Teie tulevaste eriala-õppejõududega.

Jaak Jaaniste

2. Matemaatiline baas

Et kõik ülaltoodu kehtib ka matemaatikakursuse kohta, siis, tundes matemaatikute kalduvust teoreetilisuse poole, kordan ma füüsika õppimisel vaja minevaid matemaatilisi alustõdesid. Ma ei hakka siin defineerima-tõestama teil juba õpitud asju - võtke seda kui meeldetuletust. Vajaduse korral võime teha konsultatsioone.

Arvud. Valdavalt on füüsikas suuruste kirjeldajaiks **reaalarvud**. Erijuhtudel kasutatakse ka täis-, naturaal- ja kompleksarve.

Reaalarvude hulk on **pidev**, st kahe ükskõik kui lähedase reaalarvu vahele mahub alati veel mõni reaalarv, aga sinna ei anna toppida ühtki mitte-reaalarvu. Muidugi kuuluvad reaalarvude sekka kõik selle hulga alamhulgad, nagu ratsionaalarvud, täisarvud jne.

Igapäevaelus ja ka tehnilistes dokumentatsioonides esitatakse reaalarvud kümnendsüsteemi positsioonarvude kujul. Lahti seletatuna tähendab see, et iga arvu saab kirja panna astmereana, kus astmealuseks on kümme (10), mille erinevatele astmetele vastavad kordajad reastatakse astmenäitajate kahanevas järjekorras. Puuduva astme kordaja tähistatakse nulliga; kohta, kus astendaja muutub negatiivseks, tähistatakse komaga (lääne õpikutes ja arvutiprogrammides enamasti punktiga). Kümne astmeid ja liitmismärke seejuures ei kirjutata.

Näiteks:

$$3800 \equiv 3 \cdot 10^3 + 8 \cdot 10^2 + 0 + 0;$$

$$14,52 \equiv 14.52 \equiv 1 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0 + 5 \cdot 10^{-1} + 2 \cdot 10^{-2}.$$

Kui arv on väga suur (väike), st. taga (ees) olevate nullide arv üle mõistuse, tavatsetakse sobiv kümne aste sulgudest välja tuua. Nii saadakse **ujukoma-arv**, näit. $6.85 \cdot 10^{-11}$. Mida see tähendab? Kirjutame lahti:

$$(6 \cdot 10^0 + 8 \cdot 10^{-1} + 5 \cdot 10^{-2}) \cdot 10^{-11} \equiv 6 \cdot 10^{-11} + 8 \cdot 10^{-12} + 5 \cdot 10^{-13},$$

mis on palju arusaadavam kui püsikoma-arv **0,0000000000685**.

Kasuks tuleb, kui teada, et positsiooniarvu saab anda ka 10-st erineva astme-aluse abil. Arvutiasjandus ja automaatika kasutavad lisaks kümnendsüsteemile kahend-, kaheksand- ja kuueteistkümnend-süsteeme.

Harjutame:

- positsiooniarvu kirjapanek polünoomina
- püsikoma-arvu teisendamine ujukoma-arvuks ja vastupidi
- aritmeetilised tehted ujukoma-arvudega

NB! Kõik harjutused kuuluvad ka kontrolltöödesse!

Täisarvud on loenduv, mittepidev arvusüsteem; kasutatakse indeksitena mitmekomponendiliste objektide (*maatriksid, vektorid, tensorid etc.*) juures ning arvuridade kirjapanekul (summeerimisindeksid).

> **Täisarve ei saa jagada**, sest siis pole tulemuseks enam täisarv.

Kompleksarvud on algebraline süsteem, mis lubab kirja panna suvalise astme võrrandi lahendeid. Koosneb reaal-osast (tavaline reaalarv) ja imaginaar-osast (reaalarvu korrutis imaginaarühikuga $\boldsymbol{i}$. Imaginaarühik defineeritakse seosega $i^2 = -1$. Matemaatikud kasutavad kompleksarve II järku diferentsiaalvõrrandite teoorias, füüsikud ostsilleeruvate (võnkuvate) süsteemide kirjeldamisel, kus nad annavad tavaliste arvudega võrreldes märksa kompaktsema esituse. Nii on kvantmehaanika esitatav ainult kompleksarvude vahendusel, suurt ruumi ja aja kokkuhoidu annavad nad ka vahelduvvoolu teoorias.

Näide kompleksarvu tekkest:

Olgu tarvis lahendada kuupvõrrand $x^3 = 1$. Tavalahendi $x = 1$ saame kergesti kätte. Aga astmevõrrandil on lahendeid täpselt nii palju, kui suur on x maksimaalne aste. Kuhu kadusid meie võrrandi kaks ülejäänud lahendit?

Teeme teistmoodi. Kirjutame võrrandi polünoomina ja jagame tegureiks:

$$x^3 = 1 \quad \longrightarrow \quad x^3 - 1 = 0 \quad \longrightarrow \quad (x-1)(x^2+x+1) = 0.$$

Esimese teguri nullib meie poolt juba leitud lahend $x = 1$. Teine tegur annab ruutvõrrandi $x^2 + x + 1 = 0$, mille lahendiks on:

$$x = \frac{1}{2} \pm \sqrt{-\frac{3}{4}} \quad \longrightarrow \quad x = \frac{1}{2} \pm \frac{\sqrt{3}}{2} i.$$

Ongi käes veel kaks lahendit, mis erinevad vaid imaginaarosa märgi poolest. Selliseid kompleksarvude paare nim. kaaskompleksarvudeks.

Nii palju siis arvudest. Läheme edasi.

Algebra.

Matemaatikas nimetatakse algebraks hulka, mis on kinnine kahe põhitehte ning nende pöördtehete suhtes. Põhiteheteks on liitmine ja korrutamine, nende pöördteheteks lahutamine ja jagamine. Sõna "kinnine" tähendab, et näiteks kahe reaalarvu liitmisel saadakse jälle reaalarv; sama käib ka ülejäänud tehete kohta.

Koolimatemaatikast mäletame algebrat kui tähtsümbolitega arvutamise kohta käivate reeglite kompleksi. Tõepoolest, kui tähistada reaalarve väikeste ladina tähtedega, võime kirja panna tunduvalt keerukamaid matemaatilisi konstruktsioone, kui seda on liitmine või jagamine.

Algebraliste tehete aluseks on **võrrand**, mis võib esineda võrduse (näiteks $y = ax + b$) või võrratuse ($ax > b$) kujul. Andes neis "matemaatilistes lausetes" olevatele sümbolitele arvväärtused (näiteks $a = 3,54$) saame võrrandist leida teiste arvude (näit. b või x) väärtuseid.

See, et võrduse mõlemal poolel seisavad ühesugused arvud (mis sest, et erinevate sümbolitega kirja pandud), annab võimaluse võrdust teisendada, avaldades temast otsitava suuruse. See, et kaks võrdset arvu jäävad alati võrdseteks ka pärast ükskõik millist matemaatilist tehet, lubab meil võrduse pooltele liita, lahutada jne. ükskõik missugust (reaal)arvu. Osava manipuleerimisega saavutame, et võrdusmärgist vasakule jääb otsitav suurus, paremale kõik ülejäänud. Ettevaatlik tuleb olla vaid jagamisega: võrduse mõlemaid pooli tohib jagada vaid sellise tähega, mille väärtus ei saa kunagi nulliks. Niipea kui tekib nulliga jagamine, kaotab võrdus oma mõtte. Ka arvutiprogramm peatub sellise takistuse korral.

Harjutame:

- otsitava suuruse avaldamist algebralisest avaldisest
- võrrandisüsteemi teisendamist lihtvõrrandiks

Võrratusega on pisut keerulisem: negatiivse arvuga korrutamine/jagamine muudab võrratusmärgi suuna vastupidiseks. Mõelge, mispärast.

Funktsioonid.

Funktsioon on teisendus-eeskiri; ta seab kindla suuruse (argumendi) väärtusele vastavusse samuti kindla suuruse (funktsiooni). Muidugi ei tarvitse argumendiks kõlvata ükskõik milline reaalarv, pole ka mingit garantiid, et argumendi teatud väärtusele ei vasta rohkem kui üks funktsiooni väärtus.

Loomulikult on funktsioonideks kõik algebralised võrrandid. Kuid mitte ainult: inimpraktika vajadused on ellu kutsunud terve rea funktsioone, mis polegi võrrandiga avaldatavad. Koolifüüsikast teame nn. **elementaarfunktsioone**, nagu logaritm, siinus, arkustangens jt. Igaüks neist kirjeldab kindlat matemaatilist seost, aga ükski neist pole esitatav tavalise, vaid nelja põhitehet sisaldava avaldise abil.

Elemntaarfunktsioonide leidmiseks on välja mõeldud teravmeelseid võtteid graafikutest-nomogrammidest kuni ritta-arendusteni. Viimased on eelistatavad, kuna lubavad funktsiooni väärtust arvutada (koonduva rea abil) kuitahes täpselt. Et mahukaid arvutusi vältida, koostati funktsioonide tabeleid (ajalugu tunneb ülimahukaid, 8 - 9 numbrikoha täpsusega logaritmide ning trigonomeetriliste funktsioonide tabeleid). Praegu arvutatakse elementaarfunktsioonid kalkulaatori või personaalarvuti abiga; needki riistad kasutavad ritta-arendusi.

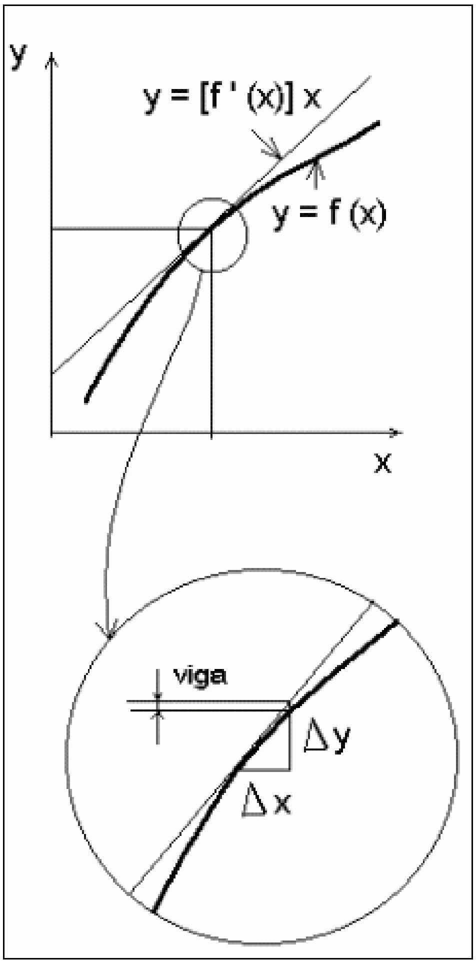
Tuletis ja integraal.

Funktsioonide tabeleid rehkendades märkasid matemaatikud, et paljude funktsioonide naaberväärtusi saab leida, korrutades argumendi muutu mingi teise funktsiooni väärtusega samal argumendil. Asja uurinud W. Leibnitz tuli järeldusele, et funktsiooni muutumise kiirus argumendi suvalisel väärtusel on kogu määramispiirkonna ulatuses avaldatav ühe ja sama funktsiooniga, mida ta nimetas **tuletiseks** (sks. *Ableitung*, ingl. *derivative*). Leibnitz'i tähistus

$$y'(x) \equiv \frac{dy}{dx} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

on klassikaline ja väljendab tuletise põhilist ülesannet - ta avaldab mistahes funktsiooni argumendi mistahes väärtuse jaoks võrdelise sõltuvuse kujul.

Muidugi kehtib see sõltuvus vaid antud punkti lähedal, tema nn. "lõpmata väikeses ümbruses", aga - ta loob eelduse panna kirja **diferentsiaalvõrrand**, st. seos funktsiooni lõpmata väikeste muutuste vahel. Et see seos on lineaarne (nii nimetavad matemaatikud võrdelist sõltuvust), on ka vastav võrrand lihtsama kujuga.



Nii tekib diferentsiaalvõrrand

Juba Newton märkas, et rehkendamine lõpmata väikeste suurustega on märksa edukam kui füüsikaliste suuruste vahelise seose "ennustamine" graafiku kuju järgi. Nii saab ringi pindala leidmisel lugeda väikese sektori pindala võrdseks kolmnurga pindalaga ($dS = \frac{1}{2}R \cdot dl$), vedru lõpmata väikesel venitamisel võime elastsusjõu lugeda konstantseks ($dA = F \cdot dl$) jne. Otsitava seose leidmiseks tuleb nüüd üle minna "normaalsetele" suurustele, liites kokku kõik need "lõpmata väikesed tükid". Sellisel teel leitud summat nimetataksegi **integraaliks** (ld. *integer*, tervik). Matemaatikas näidatakse, et mingist funktsioonist leitud integraali tuletiseks on seesama funktsioon, seetõttu nimetatakse (määramata) integraali ka vaadeldava funktsiooni **algfunktsiooniks**.

Summa sõltub lisaks liidetavate suurusele ka nende arvust, ja niisamuti sõltub ka integraal argumendi väärtuste vahemikust, kus summeerimine-integreerimine aset leiab.

Kui antud on integreerimisvahemiku mõlemad otspunktid, on tegu **määratud integraaliga**, millel on ka kindel arvuline väärtus. Kui leitakse lihtsalt algfunktsioon (määramata integraal), tuleb sellele aga alati liita vabalt valitava väärtusega konstant. Tuletise väärtust see ei mõjuta, kuna diferentseerimisel on konstantse liidetava tuletis ("konstandi muutumise kiirus") null.

Tuletiste ja integraalide leidmist õpetatakse matemaatilise analüüsi (ingl. *calculus*) kursuses. Tuletise leidmine on lihtsam, peaaegu iga valem on esitatav elementaarfunktsioonide kaudu ja nende tuletised on teada. Vajaduse korral võime kasutada ka liitfunktsiooni tuletise leidmise algoritmi. Integraalidega on raskem, etteantud funktsioonidele algfunktsiooni leidmist on alati kasutatud matemaatilise kirjaoskuse kontrolliks. Praktikas on olud kõvasti muutunud - suvalise tuletise või integraali saab leida arvuti abiga. Iseasi, kuidas me saadud tulemust tõlgendada oskame...

Harjutame:

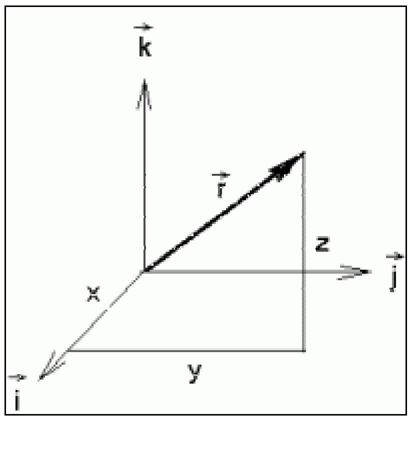
- elementaarfunktsioone sisaldava avaldise tuletise leidmine
- liitfunktsiooni tuletis

Asi, mida iga insener peab aga oskama, on **diferentsiaalvõrrandi koostamine**. Põhiprintsiibid on siin üsna lihtsad, aga iga asi tahab harjutamist. Mida me oma füüsika kursuses kindlasti ka teeme.

Vektorid, tensorid jms.

Matemaatiliste objektide hulk ei piirdu ainult arvudega. Kõikvõimalike probleemidega tegeledes on inimkond leiutanud kõikvõimalikke abivahendeid. Nii ka matemaatikas.

Tuleb kohe öelda, et **arvutatakse** ikkagi ainult **arvudega**. Ülal mainitud "matemaatilised objektid" on oma olemuselt arvude komplektid, mis on kindlal viisil kodeeritud ja mida kasutatakse kindlal otstarbel. Nii laguneb füüsikaõpetajate lemmik-piinariist vektor juba tavalises Cartesiuse ristkoordinaadistikus kolmeks arvuks-komponendiks, liikumisvõrrand kolmeks praktiliselt sõltumatuks lihtvõrrandiks. Kõik need vektorite liitmised-lahutamised rööpküliku- jm meetodil on vaid ümberjutustus lihtsatest tehetest tavaliste arvudega.



Vektor ja tema kolm koordinaati

Kujutlus vektorist kui noolekujulise otsaga sirglõigust on muide täiesti täpne. Kui kolmemõõtmelises ruumis on punkti asukoht määratud kolme lihtarvu - koordinaadiga, siis vektori "pikkuse" ja suuna andmiseks tuleb tarvitusele võtta veel kolm arvu-koordinaati. Näib, nagu oleks tegu kuuekomponendilise suurusega... Tegelikult see nii ei ole, **vektor algab alati koordinaatide alguspunktist**; ülejäänud kolm koordinaati näitavad selle keha asukohta, mille juurde antud vektoriaalne suurus kuulub.

Vektorit kõige üldisemal kujul võimegi kujutada kui üheveerulist maatriksit, mille ridade arv on võrdne sõltumatute ruumikoordinaatide arvuga. Millised arvud neis ridades seisavad, sõltub lisaks vektorile endale meie poolt valitud koordinaatsüsteemist. Tavaliseks ruumteljestikuks on nn. **ortonormeeritud reeper**, mis pannakse kokku kolmest üksteisega risti olevast ühikvektorist.

Kuidas vektor sellises baasis välja näeb ja kuidas sooritatakse tehted vektoritega, seda vaatame juba konkreetse füüsika lõigu juures.

Tensor on vektori üldistus, tema lihtsaimaks analoogiks on ruutmaatriks. Sellise objekti iga komponendi juures on juba kaks indeksit, millest üks näitab rida, teine veergu. See on nn. teist järku tensor (vektorit võiks nimetada esimest järku tensoriks). Vajaduse korral võime moodustada ka kõrgemat järku tensoreid - lihtsamaks asi sellest vaevalt et läheb.

Veel tunneb matemaatika spiinoreid, stringe, operaatoreid ja ei tea kui palju eriotstarbelisi objekte. Meie peame vähemaga toime tulema.

Mitme muutuja funktsioonid ja väljad.

Sõltumatute muutujate arv võrrandis pole millegagi piiratud. Kui need argumendid muutuvad samaaegselt, on tegu mitme muutuja funktsiooniga. Seejuures on oluline, et argumentideks olevad muutujad oleks **sõltumatud**, st ühtegi neist ei saa avaldada teiste kaudu. Niipea, kui selline avaldamine on võimalik, muutub mitme muutuja funktsioon tavaliseks (ühe muutuja) funktsiooniks.

Argumentide sõltumatus loob analoogia sõltumatute ruumikoordinaatidega. Kui vaadelda neid argumente teljevektorite (ühikvektorite!) kordajatena, saame igale argumentide kombinatsioonile vastavusse seada kindla punkti ruumis, mille telgedeks ongi sõltumatud muutujad. Nii on suvaline kolme muutuja funktsioon esitatav hulgaga, kus igale kolmruumi punktile $\{x,y,z\}$ vastab funktsiooni kindel väärtus. Sellist kujundit nim. **väljaks** (ingl. *field*, sks. *Feld*); väljade uurimiseks on loodud isegi spetsiaalne matemaatika (või füüsika?) haru - väljateooria. Väljafunktsiooniks võib olla nii tavaline arv (skalaar) kui vektor või tensor, vastavalt räägitakse skalaar-, vektor- ja tensorväljadest.

Matemaatikas on "väli" mitme muutuja funktsioon, mida kujutatakse ruumikoordinaadistikuna.

Väljafunktsioone saab ka diferentseerida ja integreerida. Veelgi enam: võimalik on lülitada uuritava ruumi koordinaatide hulka ka funktsioon ise. Sel juhul määrab iga väljamuutujate vaheline funktsioon selles ruumis mingi kindlate omadustega alamruumi (näiteks kolmruumi pinna).

Füüsikakursuses tutvume jõuväljadega (on vektorväljad) ja potentsiaaliväljadega (skalaarväljad) ning õpime rehkendama nende vahelisi üleminekuid.

Programmipakett MathCAD.

Kiirete ning odavate personaalarvutite levik on ellu kutsunud terve rea matemaatika-alast tarkvara. Algaastate algoritmkeeltest (ALGOL, FORTRAN, PASCAL, C ja nende arendused) on tänapäevaks jõutud komplekssete aknareziimis töötavate programmipakettideni, kus arvutuste teostamiseks on vaja vaid sisestada valem ning defineerida soovitav arvutus (valemi teisendamine, tuletise või integraali leidmine, graafiku või tabeli ekraanile kuvamine). See muudab oluliselt meie suhtumist matemaatikasse: kui varem oli määravaks arvutuste maht, siis nüüd tuleb peatähelepanu suunata ülesande püstitusele ja tulemuse interpreteerimisele. Viiekümnendate aastate "nipitamisele" eelistab tänapäeva matemaatika lihtsaid ja arusaadavaid, mis sest et töömahukaid algoritme.

Kui teil on võimalus õppida MathCAD'i, kasutage seda.

Muidugi, olgu arvuti kuitahes võimas, alati on võimalik püstitada ülesanne, mille lahendamine on "võimaluste piiril" - kas lahendusaja, vajaliku mälumahu või mõne muu tehnoloogilise piirangu osas. Ja siis läheb vaja ka nipitamist.

Windows-arvutite meelispakett MathCAD on üks sellistest universaalsüsteemidest. Tema oskamine on kui mitte hädavajalik, siis soovitatav. Aga alati tuleb meeles pidada, et ükski arvuti ei asenda matemaatika-alaseid teadmisi. Ajuvaba lähenemine viib paratamatult absurdsete resultaatideni, millede paikapanek pole tulemuste tarbija jaoks tihtipeale võimalik. Mees peab masinast üle olema, muidu on kraavisõit kindel.