

EESTI MAAÜLIKOOL  
TEHNIKAINSTITUUT

**Alo Allik**

**HOORATAS-ENERGIASALVESTI**

Flywheel energy storage

Bakalaureusetöö energia kasutuse erialal

Koostaja:	õ	õ	2008. a .....	Alo Allik
Juhendaja:	õ	õ	2008. a .....	emer. Prof. Matti Liiske

Tartu 2008

## **Abstract**

Alo Allik. Flywheel energy storage. Tartu, 2008. The bachelor paper is 34 pages. It includes 13 figures and 3 tables. Has been used 36 sources of literature. Format A4. In Estonian language.

FLYWHEELS, ENERGY STORAGE, ENERGY APPLICATIONS, MAGNETIC BEARINGS, TRANSPORT, UPS, SPECIFIC ENERGY, FLYWHEEL FACTORS.

In Estonia is made few research about flywheel energy storage. In this bachelor work are found the advantages and disadvantages of the technology and thought about the applications and specific applications in Estonia for this technology. Also compared two generations on flywheel energy storage systems, the older steel flywheel technology and the newer composite material flywheel technology.

Flywheels are one of the oldest and most common mechanical devices in existence. They may still prove to serve us as an important component on tomorrow's vehicles and future energy needs. Energy needs to be stored because of unstable energy sources, especially renewable energy, like wind. The demand for electricity also varies in time, that influences the frequency. Vehicles need clean energy sources, that respond quickly and save the energy of braking. Vehicles and many other applications need strong boosts of energy, flywheels are a good opportunity to solve such problems. Advances in the mechanical properties of composites and magnetic bearings has renewed the interest in using the inertia of a spinning wheel to store energy. A flywheel, in essence is a mechanical battery or a mass rotating about an axis. Flywheels store energy mechanically in the form of kinetic energy. They take an electrical input to accelerate the rotor up to speed by using the built-in motor, and return the electrical energy by using this same motor as a generator.

Flywheels are one of the most promising technologies for replacing conventional lead acid batteries as energy storage systems for many applications like vehicles, renewable energy sources, electrification systems, remote power units and telecommunications industry.

## Sisukord

Sissejuhatus .....	4
1. Probleemi olemus.....	5
1.1. Ajaloost.....	5
1.2. Uued hooratuste tehnoloogiad.....	6
2. Hooratas-energiasalvesti süsteem .....	8
2.1. Hooratta rootor.....	9
2.1.1. Teooria .....	9
2.1.2. Materjal .....	10
2.1.3. Vorm .....	12
2.2. Magnetlaagrid .....	13
2.2.1. Püsimagnetlaagrid.....	14
2.2.2. Aktiivsed magnetlaagrid .....	14
2.3. Mootor-generaator.....	15
2.4. Korpus.....	15
2.5. Sagedusmuundur .....	17
2.6. Erinevad konstruktsioonid .....	17
3. Tehnoloogia eelised ja miinused.....	20
3.1. Loodushoid .....	20
3.2. Ohutus.....	21
4. Rakendused.....	22
4.1. Koostöö taastuenergiaallikatega.....	22
4.2. Hooratas UPS-ina .....	23
4.3. Hooratas transpordis.....	24
4.4. Tööstus.....	25
4.5. Kraanad.....	25
4.6. Sõjandus.....	26
4.7. Teadus.....	26
4.8. Kasutusvõimalused Eestis.....	27
5. Maksumus ja tasuvus .....	28
5.1. Hooratuste tootjad.....	28
Kokkuvõte .....	31
Kasutatud kirjandus.....	32

## Sissejuhatus

Hoorattad on olnud pikka aega asendamatud tööriistad pöörlevate mehaaniliste seadmete energiavoolu tasandamisel [1, lk. 267]. Viimaste aastakümnete materjali-tehnoloogia edusammud on hooratastega energia salvestamise idee le hoogu juurde andnud.

Maailmaturul järsult suurenenud nafta hinna ja energianõudluse ning lähiajal Eestis muutuma hakkava elektrienergiaturu tõttu on teema aktuaalne. Kõige levinumale salvestusviisile, keemilisele akumulaatorile otsitakse uusi alternatiive. Uute tehnoloogiate puhul on üks tähtsamaid omadusi, et need oleks jätkusuutlikud. Nüüd mõeldakse hooratast, kui jätkusuutlikku rohelist tehnoloogiat kasutada palju laiemal kasutusosal ja panna konkureerima elektrokeemilise akuga [2, lk.79].

Taastuvatest energiaallikatest elektri tootmine suureneb pidevalt. Need on enamasti väga ebastabiilsed energiaallikad, nagu tuule- ja päikeseenergia. Nende energiaallikate toodangu kõikumist ajas on vaja siluda ja sobitada tarbimisega. Mitte ainult taastuvate, vaid kõigi energiaallikate puhul saab kvaliteet järjest tähtsamaks, sest järjest suurenev tundliku elektroonika osakaal elektritarbijate seas suurendab märgatavalt nõudmisi stabiilsele pingele ja sagedusele [3]. Selleks, et kvaliteeti parandada, saab kasutada energiasalvesteid ning antud töös ongi käsitletud neist ühte innovatiivseimat.

Printsiibi poolest on hooratas ei midagi muud, kui telje peal pöörlev mass, mis salvestab ja reguleerib energiat. Käesoleva töö eesmärgiks on uurida hooratta, kui energiasalvesti ülesehitust, arengutaset, kasutusvõimalusi, eeliseid ja miinuseid.

Eesmärgi saavutamiseks on lahendatud järgmised ülesanded:

1. Teemakohaste kirjandusallikate leidmine;
2. Tehnoloogiast andmete kogumine ja töötlemine;
3. Võõrkeelsete kirjandusallikate tõlkimine;
4. Erinevate hooratas-energiasalvestite võrdlemine;
5. Tehnoloogia probleemide uurimine;
6. Tehnoloogia kasutusvõimaluste uurimine;
7. Kokkuvõtte tegemine.

Bakalaureusetöö uudsuseks võib lugeda asjaolu, et Eestis on uut hooratas-elektrienergiasalvestite tehnoloogiat vähe uuritud ja rakendatud.

## 1. Probleemi olemus

Probleemideks on vajadus toetada nõrkasid elektrivõrke, et parandada neis pinge ja sageduse kvaliteeti. Samas on vaja säästa loodust ja vähendada sõltuvust fossiilsetest kütustest, üks võtmeküsimusi selle saavutamiseks on efektiivsed energiasalvestid.

Energiatootjad on majanduslikel põhjustel huvitatud sellest, et saaks elektri tootmist, ülekandmist ja jaotamist võimalikult odavalt korraldada ja seadmete uuendamise kulusi võimalikult madalateni hoida. Üks võimalus, et saaks edasi lükata tootmismahude suurendamist, on tippkoormuste vähendamine, see on põhjuseks, miks energiafirmad on kasutanud erinevaid tariife elektri jaoks, et motiveerida tarbijaid oma tarbimist ajas ühtlustama[3]. Eestis tuleb taas suuremaid muutusi, kui energiaturg lähiaastatel täielikult avaneb.

Peale sajandit, mille jooksul on põhimõtete poolest uusi elektrienergiasalvesteid vähe juurde tulnud, otsitakse uusi võimalusi. Transpordis vajatakse uusi kaalu poolest efektiivseid energiasalvesteid, kuna hübriid- ja elektiautode osakaal suureneb [4].

Hooratas-energiasalvestitega on tegeletud USA-s, Saksamaal, Austraalias, Jaapanis ja mitmetes teistes maailma riikides, kuid Eestisse pole uuema põlvkonna hooratate tehnoloogia veel jõudnud. Samuti näitas seda kirjanduse materjali otsing ö eestikeelset kirjandust on väga vähe.

### 1.1. Ajaloost

Pöörleva keha inertsit on kasutatud juba tuhandeid aastaid, et salvestada energiat lühikesteks ajaperioodideks ja siluda muutuva pöörlemiskiirusega masinate tööd. Hoorattaks võib lugeda juba neoliitikumis leiutatud ketramisspindlilt ja potiketra [5, lk. 126].

Esimene, käsitsi ringi aetav, primitiivne potikeder võeti kasutusele Hiinas umbes 4000 aastat eKr. Veidi hiljem, 3800 aastat eKr. Mesopotaamias hakati ratast liikumisvahenditel kasutama. Pedaaliga ringi aetav, keerulisema mehanismiga, potikeder leiutati Egiptuses 2000 aastat eKr. Pedaaliga ringi aetava potikedra massi ülesanne oli sama nagu tänapäeva kolbmootorite hooratta oma, siluda pöördliikumist. Eesti aladele jõudis treiratas alles 11. saj. Ida-Eestisse [6]. Võib öelda, kui ratas on inimkonna vanim leiutus, siis hooratas on inimkonna vanim masin [3].

Üks esimesi, mitte inimjõul töötavaid, hooratta rakendusi olid arvatavasti vesi- ning tuuleveskid, sealgi kasutati liikuvate detailide inertsit. Nüüd tuleb hooratas

taastuvenergeetikasse tagasi veidi teisel täiustatud kujul, kuid ülesanne on sama ó siluda saadavat energiat.

Väga oluliseks said hoorattad 18. sajandist alates, kui võeti kasutusele aurumasinad ning hakkas tööstusrevolutsioon. Samal ajal mindi üle puust hooratastelt terasele. Aurumasinade silindrid andsid energiat impulssidena ning seda oli vaja ühtlustada, samas sai hooratas lisaülesande rihmarattana. Ühtlasem energia võimaldas kasutada palju kompleksemaid mehaanilisi süsteeme [5, lk. 126].

Aurumasinade hoorataste puhul hakati massi pöida koondama, et saaks väiksema materjalikuluga ja aeglasekäigulise hooratta, mis salvestaks võimalikult palju kineetilist energiat.

Järgnev aurumasinade ja sisepõlemismootoritega elektri tootmine tõi hooratta elektroenergeetikasse. Paljude väiksemate generaatorite juures kasutatakse neid praeguseni.

Tööstusrevolutsioonist kuni tänapäevani on hooratas olnud üpris igapäevane asi, mõeldes kasvõi auto hoorattale. Hooratast kasutatakse mehhanismi töö ühtlustamiseks ja töövõime jätkamiseks. Sisepõlemismootoritel ja paljudel mehhanismidel on vahelduvad töötsüklid. Ühel ajahetkel annab masin energiat välja ning teisel aja perioodil vajab ta seda tagasi, et oma tööd jätkata. Neljataktilise sisepõlemismootori puhul annab ainult üks takt energiat. Ülejäänud kolm vajavad energiat. Seega salvestatakse selle ühe töötakti ajal vallanduv energia osaliselt hoorattasse ja antakse see tagasi ülejäänud taktide tarbeks[4].

Traditsioonilises kasutuses on hooratas masinaelement, mille ülesandeks on pöörlemise kineetilise energia salvestamine lühiajaliselt, et seda energiat kasutada masina edasiseks töövõimeks. Nüüd on seda salvestamise tehnoloogiat hakatud rakendama palju laiemal kasutuselal [2, lk.80].

## **1.2. Uued hoorataste tehnoloogiad**

Intensiivsemalt hakati hooratta kasutamist iseseisva elektrienergia salvestina uurima ja kasutama 1970-natel, kui edusammud jõuelektroonikas võimaldasid tõhusat ja hooratta pöörlemiskiirusest sõltumatut väljundpinge ja sageduse kontrolli. Elektroonika võimaldas paremat hooratta momendi kasutamist, mis koos pidevate edusammudega materjalitehnoloogia vallas (süsinikkiust materjalid ja magnetlaagrid) võimaldasid suuremaid energia tihedusi ja laiemaid kasutusvõimalusi. [5, lk.127].

Elektrienergia salvestamiseks mõeldud hoorattaid saab jagada kaheks põlvkonnaks:

1. Vanem põlvkond: Terasest, madalama pöörlemiskiirusega (üldiselt pöörete vahemikuga  $1000 \dots 10000 \text{ min}^{-1}$ ), mehaaniliste laagritega ja atmosfääri keskkonnas pöörlevad hoorattad.

2. Uuem põlvkond: Komposiitmaterjalist, suure pöörlemiskiirusega (pöörete vahemikuga  $10000 \dots 100000 \text{ min}^{-1}$ ), magnetlaagritega ja vaakumis või inertgaasis pöörlevad hoorattad [5, lk125].

Piirid kahe eri põlvkonna vahel näitab ära materjal, laagrite ja pöörlemiskeskonna osas on need veidi hajusamad. Uued hooratas-energiasalvestite tehnoloogiad on võimalikuks saanud põhiliselt kahe edasiarenenud komponendi tõttu. Esiteks paremad laagrid, mille tõttu on vähenenud oluliselt kaod ja hoolduse vajadus. Teiseks uued materjalid, mis on parandanud hooratta energiasalvestusvõime ja massi suhet ning võimsuse ja massi suhet.

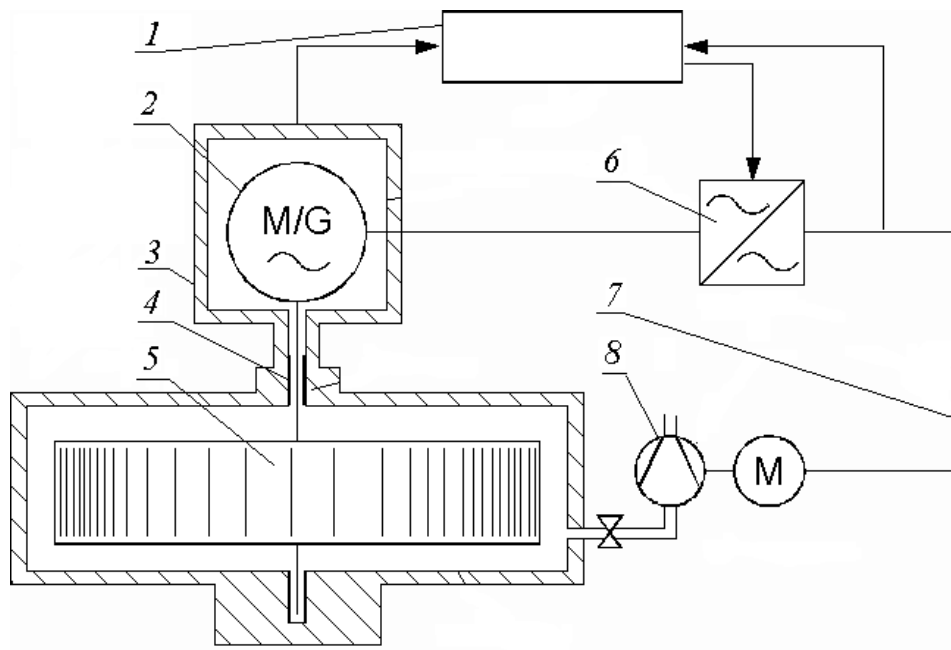
Energia salvestamisel tagavaraks on tähtis võimalikult pikk pöörlemise aeg, seega võimalikult väiksed kaod ning sellepärast on uute hoorataste tehnoloogiate juures olulisel kohal keskkond milles hooratas pöörleb, kas inertgaas või osaline vaakum.

Uuenenud tehnoloogiatega on saavutatud laborites kuni 2 aastaseid hoorataste pöörlemisaegu ilma lisaenergiat andmata [4].

Hooratas-energiasalvestid arenevad järjest edasi. Nende kasutegur on  $80 \dots 97\%$ . Need on tänapäeval juba kasutusel, kuid peaaegu eranditult ainult kõige arenenumate riikide tööstuses, transpordis ja teaduses. Üksikisikute kasutusse pole tehnoloogia jõudnud. Sellepärast pole neist tavainimesed üldjuhul teadlikud.

## 2. Hooratas-energiasalvesti süsteem

Hooratas-energiasalvesti põhikomponendid on hooratas, mootor-generaator, sagedusmuundur, laagrite süsteem, juhtelektroonika, vaakum ümbris ja vaakumpump. Rooror seejuures on kogu süsteemi tähtsaim osa, sest selle parameetrid määravad ära kui palju energiat saab salvestada [5,lk. 127].



**Joonis 2.1.** Hooratas energiasalvestussüsteemi põhimõtteskeem: 1 ó juhtelektroonika; 2 ó mootor-generaator; 3 ó korpus; 4 ó laager; 5 ó hooratas; 6 ó sagedusmuundur; 7 ó elektrivõrk; 8 ó vaakumpump. [3].

Elektrienergia salvestamiseks mõeldud hooratas on oma põhimõttelt inertsiga mootor-generaator koos sagedusmuunduriga. Energia säilitamiseks süsteemis minimeeritakse pöörlevale rooorile mõjuvaid takistusjõude. Põhilised võtted on magnetlaagrite kasutamine ja vaakumkeskkond, kuid kahjuks just need kaks lahendust tekitavad uue probleemi, kuna soojusülekanne on sellega viidud miinimumini. See vähendab seadme eluiga märgatavalt ja võimsused on piiratud. Sellepärast on paljudesse uuema põlvkonna hoorataste süsteemidesse veel ehitatud vedelikjahutus, mis jahutab mootor-generaatorit, sagedusmuundurit ning vajadusel laagreid [5,lk.128].

Hooratas-energiasalvestussüsteemi probleemsemateks kohtadeks on rooori materjal, laagerdus ja energiaülekanne (mootor-generaator koos muunduriga). Hooratas-energiasalvestil on suheliselt palju komponente võrreldes keemilise akuga, kuid siiski on hoorattad töökindlamad ja pikaealisemad energiasalvestid kui akud.



## 2.1. Hooratta rootor

Hooratas ehk pöörlev mass ise on kogu süsteemi tähtsaim komponent ning teised seadmed süsteemi juures võib lugeda abiseadmeteks. Sellepärast on hooratta enda teooria kogu energiasalvesti teooria aluseks. Peamisteks probleemideks hooratate valmistamisel on rootorile piisava tõmbetugevuse tagamine ja täpsus.

### 2.1.1. Teooria

Pöörleva süsteemi energiasisaldus avaldub valemiga [2, lk 79],

$$E_K = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (2.1)$$

kus  $E_K$  ó Kineetiline energia, J;

$J$  ó inertsimoment,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;

$\omega$  ó Nurkkiirus, rad/s.

Inertsimoment avaldub valemiga,

$$J = \int x^2 \cdot dm, \quad (2.2)$$

kus  $x$  ó massi  $dm$  kaugus pöörlemisteljest, m;

$m$  ó mass, kg.

Kui võtta näitena hooratas raadiusega  $r$  milles mass on koondatud pöida. Siis integraali lahendus võtab lihtsa kuju, kuna  $x = r = \text{constant}$ .

$$J = x^2 \int dm = mr^2, \quad (2.3)$$

kus  $r$  ó Pöia inerts raadius, m.

Kui asendada saadud tulemus valemisse (2.1) siis kineetiline energia avaldub valemiga [2, lk 80],

$$E_K = \frac{r^2 m \omega^2}{2}. \quad (2.4)$$

Sellest valemist järeldubki, et salvestatud energia hulk sõltub lineaarselt hooratta massist ja nurkkiiruse ruudust. Sellest tulenevalt on nurkkiirus palju olulisem kui hooratta mass, juhul kui eesmärgiks on salvestada võimalikult suur hulk energiat. Samuti sõltub

energiasaldus raadiuse ruudust. Energia ja massi suhte optimeerimiseks peab hooratas pöörlema talle maksimaalse võimaliku kiirusega ning mass peab olema kontsenreeritud võimalikult suure raadiuse peale .

Materjalide tõmbetugevus on defineeritud, kui maksimaalne tõmbepinge, mis ei põhjusta püsivat deformatsiooni ega purunemist [1, lk 267]. Tõmbetugevus on määrav tekkivate tugevate tsentrifugaaljõudude tõttu ja sellest sõltub nurkkiiruse ülempiir. See on peamiseks põhjuseks, miks kasutatakse süsinikkiust ja kevlarist hoorattaid .

Antud lihtsustatud näites, kus kogu mass on koondatud pöida, on materjalile mõjuv jõud ja samaaegselt materjali vajalik tõmbetugevus, hooratta pöias arvutatav valemiga,

$$\sigma = \delta \omega^2 r^2, \quad (2.5)$$

kus  $\sigma$  ó vajalik tõmbetugevus, N/m ;

$\delta$  ó materjali tihedus, kg/m<sup>3</sup> ;

$\omega$  ó nurkkiirus, rad/s;

$r$  ó Pöia raadius, m.

Eeltoodud valemid kehtivad ideaalsete juhtude puhul, realselt on arvutsed keerulisemad ning tuleb jätta varusid.

Kui hooratta dimensioonid on lõpliku väärtusega siis materjali põhinõue on suur tõmbetugevus [2, lk 80]. Seega vastupidiselt arvamusele, mille võiks võtta tavainimene, ei saavutata maksimaalne energiasalvestamise mahtuvus raske terasest hoorattaga, vaid materjaliga, mis kombineerib väikese tiheduse suure tõmbetugevusega.

### 2.1.2. Materjal

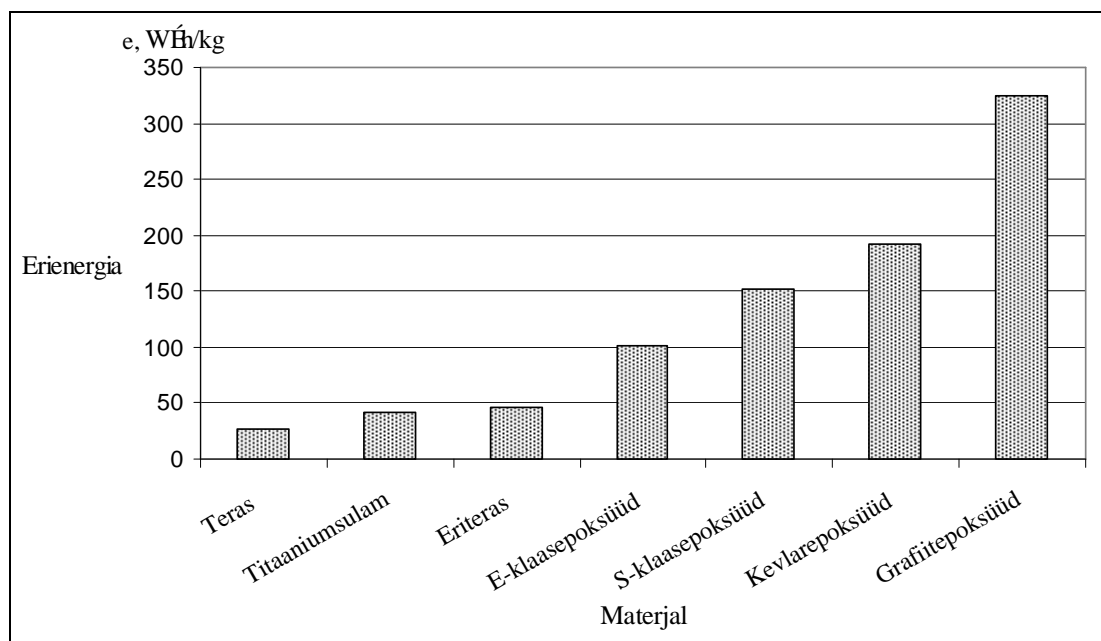
Eeltoodud tingimuste järgi on otsitud sobilike materjalide järgi, viimase paarikümne aasta edusammud materjalitehnoloogias on seda valikut väga palju suurendanud, eriti komposiitmaterjalide osas. Hoorataste tootmisel komposiitmaterjalidest on väga oluline tootmise tehnoloogia. Komposiitmaterjali kiud keritakse radiaalselt ning kiududele antakse algpinge, et hooratas deformeeruks töotalitluses vähem. Kiudude kerimisel ja vaikude või plastmaterjalidega ühendamisel hoorattaks valearvestuste või tootmisvigade tegemisel võib hooratas juba enne tööolukorda puruneda [7, lk7]. Materjali füüsikaliste omaduste kõrval on väga tähtis hind ja töödeldavus, need on komposiitmaterjalide puhul paremad kui terasel [2, lk. 82].

Järgnevas tabelis on toodud levinud materjalide tõmbetugevus ja tihedus ning nendest tulenev erienergia, millest omakorda on tuletatud vajalik hooratta mass, kui eesmärgiks oleks salvestada 10 kW·h energiat.

**Tabel 2.1.** Hoorataste materjalide võrdlus [8, lk. 82]

Materjal	Tõmbetugevus	Tihedus	Erienergia	10 kW·h Hooratta mass
	Mpa	Kg/m <sup>3</sup>	W·h/kg	Kg
Teras	1520	7700	27,4	364,9
Titaaniumsulam	1400	4620	42,1	237,5
Eriteras	2650	8000	46,0	217,4
E-klaasepoksüüd	1380	1900	101	99
S-klaasepoksüüd	2070	1900	151,3	66,1
Kevlarepoksüüd	1930	1400	192	52,1
Grafiitpoksüüd	>3500	1500	324	30,9

Nagu selgus teooriast siis materjali energiasalvestusvõime sõltub tõmbetugevusest ja tihedusest. Selle põhjal on leitud materjali suurim võimalik energiasalvestusvõime ühe kilogrammi kohta. See on ideaalsel juhul ja seejuures pole arvestatud hooratas-energiasalvesti süsteemi teiste osade massi. Kogu süsteemi erienergia on väiksem ja 10 kW·h salvesti mass suurem, kui tabelis toodud.

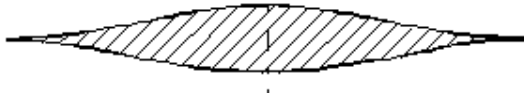
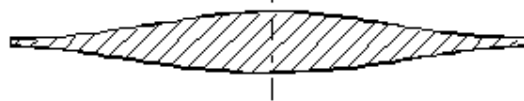
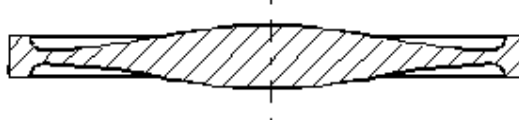
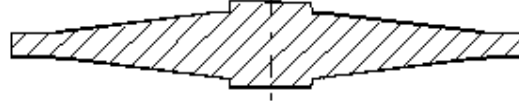
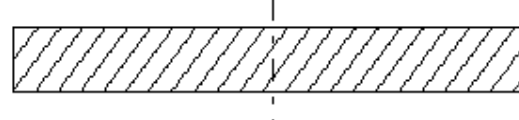
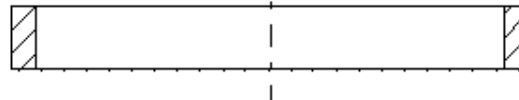
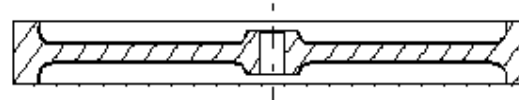


**Joonis 2.2.** Hooratta energiasalvestamisvõime sõltuvalt materjalist.

### 2.1.3. Vorm

Homogeenset materjali (terast) saab kõige paremini kasutada, kui hooratas on ketas, mille materjali paksus igas punktis vastab tõmbetugevusele. Tänu sellele on saavutatav materjalile võimalik maksimaalne nurkkiirus [1, lk. 72]. Homogeense materjali puhul mõjuvad hooratta keskel suuremad tõmbejõud, kui välimisel äärel.

**Tabel 2.2.** Ristlõike vormitegur [3].

Kirjeldus	Ristlõike kujutis	Vormitegur
Ideaalne tõmbetugevusele vastav ristlõige		1,00
Reaalne tõmbetugevusele vastav ristlõige		0,70 ÷ 0,90
Reaalne tõmbetugevusele vastav ristlõige koos pöiaga		0,80 ÷ 0,95
Kooniline ketas		0,70 -0,85
Ühtlane ketas		0,606
Õhuke rõngas (pöid)		0,50
Ühtlane ketas koos pöiaga		0,40- 0,50

Vormi tegur näitab mil määral saab materjali tõmbetugevust antud hooratta kuju puhul kasutada. Väärtus 1 on ideaalne ja väärtustel alla selle on hooratta tegelik

maksimaalne nurkkiirus madalam, kui materjal ideaalsel juhul võimaldaks, sest hoorattas on jõud ebaühtlaselt jaotatud ja tekivad nõrgad kohad.

Need vormitegurid kehtivad homogeensete materjalide puhul. Enamus hetkel toodetavad terasest hoorattad on silindri kujulised. Silindri ehk (kõrge ühtlase ketta) vormitegur on 0,606, nagu tabelist 2.2 näha. Arvatavasti osutub see enamus juhtudel piisavaks. Oluline on seejuures tootmiskulude vähendamine ja tehnoloogia lihtsustamine, kuna terase omahind on võrreldes tootmiskuludega väiksem [2, lk. 82].

Komposiitmaterjalide puhul kehtivad teised reeglid, komposiitmaterjalide kiud paigutatakse hoorattas radiaalselt (keritakse), seetõttu taluvad need kõige rohkem radiaalseid jõude. Mass on hoorattas seda kasulikum, mida kaugemal ta pöörlemisteljest asub. Nende kahe omaduse pärast on komposiitmaterjalist hoorattale kõige ideaalsem vorm õhuke rõngas, kus kogu mass on kontsentreeritud pöida. Rõnga kõrgus sealjuures ei mõjuta vormitegurit [7, lk. 10]. Samuti on uuritud ülesehitusi, kus mitu õhukest rõngast paiknevad üksteise sees, kuid kirjanduses polnud anmeid, et sellist ülesehitust reaalselt kasutatud oleks.

## **2.2. Magnetlaagrid**

Laagrid võtavad vastu radiaal- ja telgkoormusi rootorilt (hooratas ja sellega integreeritud elektrimasina osad) ning kannavad need üle kerele või raamile [9]. Nad fikseerivad võllide ja telgede asendi ülejäänud detailide suhtes, takistades seejuures võimalikult vähe pöördliikumist.

Tavalisi mehaanilisi laagreid küll kasutatakse energia salvestamiseks mõeldud hooratiste juures, kuid uute hooratas-energiasalvestite juures üritatakse neid vältida, kuna need põhjustavad hõõrdekadusid, vajavad mäaret ja kuluvad.

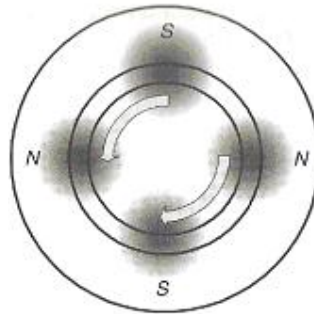
Magnetlaager on laager, mis toetab võlli magnetilise vastastikmõju abil. Magnetlaagrid toetavad liikuvaid masinaosi ilma füüsilise kontaktita, need saavad takistada pöörleva võlli suhtelist nihkumist ilma hõõrdejõuta. Neid kasutatakse näiteks elektrienergia tootmise juures generaatorites ja integreeritud elektrimasinaga suletud pumpades nafta rafineerimistööstuses, gaasijuhtmetes ning üldse seadmetes, kus ei saaks liug või kuullaagreid nende määrdevajaduse tõttu kasutada [10].

Magnetlaagri suurimad plussid on hõõrde ja seega hõõrdekadude, kulumise ja määride vajaduse puudumine. Suurimaks miinuseks on tehnoloogia tootmise hind ning aktiivsete magnetlaagrite puhul lisaenergia vajadus.

### 2.2.1. Püsimagnetlaagrid

Püsimagnetlaagrite eeliseks on lihtsus. Neil pole vajadust välise energiaallika, võlli positsiooni andurite ega elektroonika järele.

Püsimagnetlaagrid toodetakse pulbermetallurgilise tehnoloogia abil. Kristalne magnetpulber pressitakse tugeva magnetvälja juuresolekul vormi, seejuures joonduvad kristallid magnetvälja mõjul eelistatud telje poole välja. Peale pressimist paagutatakse toorikud. Kaasaegsed püsimagnetlaagrid tehakse neodüümi, raua ja boori segust [9].

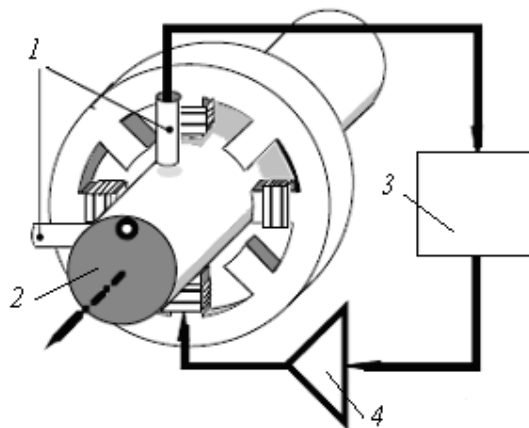


**Joonis 2.3.** Magnetlaagri pooluste skeem [10, lk. 2].

### 2.2.2. Aktiivsed magnetlaagrid

Aktiivse magnetlaagri puhul kontrollivad lõtku andurid võlli paiknemist, info töödeldakse ning elektroonika annab signaali, mis läheb läbi võimendite elektromagnetitesse, need hoiavad ja korrigeerivad võlli asendit.

Aktiivse magnetlaagri eeliseks on suurem koormuse taluvus ja võime reageerida eriolukordadele nagu väliskeskkonnast tulevad pörotused. Elektroonika reguleerib mähiste reaktsioone jooksvalt.



**Joonis 2.4.** Aktiivse magnetlaagri põhimõtteskeem: 1 ó lõtku andurid; 2 ó tsentreeritav võll; 3 ó juhtelektroonika; 4 ó võimendi [11].

### 2.3. Mootor-generaator

Enamus hooratas-energiasalvesteid on varustatud neodüüm-püsimagnetitega kommutaatorivaba mootori-generaatoriga. Mähis on staatori peal ja püsimagnetid pöörleva rootori küljes, kuna kommutaatormootor ei sobi vaakumi keskkonda, tekitaks lisakadusid ja kuluks. Mootorirefliimis vajaliku pulseeriva voolu staatorimähistelega tagab vastavalt pöörlemissagedusele sagedusmuundur. Veel saab eristada, kas rootor on staatori keskel või selle ümber. Püsimagnetmasina kasutegur on 80-98%, kuid hooratas-energiasalvesti kasutegur sõltub veel lisaks abiseadmete energiavajadusest, sagedusmuunduri kasutegurist ning kadudest laagrites ja keskkonnas, pöörlemise kestus on samuti tähtis [3,7].

Oravikmähisega asünkroonmasina puhul on generaatorirefliimi tülrikam kasutada. Asünkroonmasinat ja kontaktharjadega sünkroonmasinat on kasutatud suurtel terasest hooratastega süsteemidel.

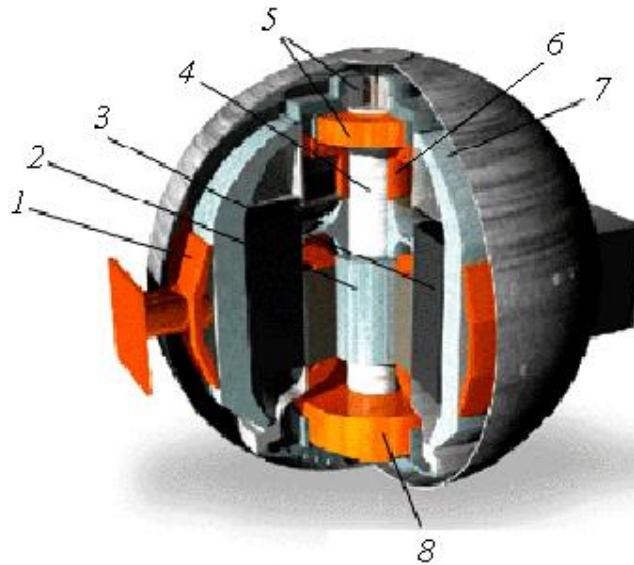
### 2.4. Korpus

Keskkonna hõõrdest tekitatud kadude vähendamiseks pumbatakse kestast võimalikult palju õhku välja, kuid absoluutset vaakumi pole võimalik saavutada ning seega väiksed hõõrdekaod jäävad [12].

Tavaliselt on rõhud kaasaegsetes hooratassalvestite korpustes vahemikus 0,1...100 paskalit, ehk üks tuhandik kuni üks miljondik atmosfääri normaalrõhust. Sellega saab kadu keskkonnas märgatavalt vähendada. Oluline on ratta ja korpuse vaheline vahemaa, sest keskkonda jääb siiski gaasi, kui vahemaa on liiga väike tekivad pöörised, mis suurendavad kadusid [12]. Vaakumi alternatiivina kasutatakse inertgaase, näiteks heeliumi või vesinikku. Teine asi mida tuleb hooratta kuju juures arvestada, kuidas see korpusesse paigutada. Alarõhk omakorda nõuab tugevat korpust, mis atmosfääri rõhule vastu peaks. Kõige paremini taluks rõhku kerakujuline korpus, sel juhul on nõutav materjali paksus minimaalne. Selle tõttu on uuritud kerakujulisi korpuseid, mille üks näide on joonisel 2.3.

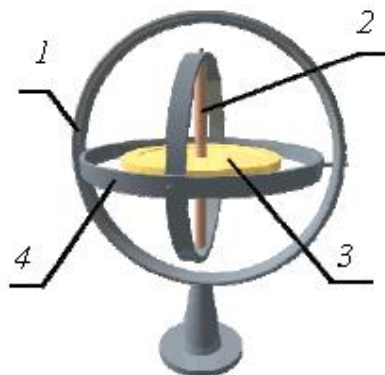
Hooratas töötab güroskoobina ó pöörlev keha püüab säilitada oma pöörlemistelje asendit. Sõidukite puhul võib see segama hakata. Sellepärast on liikuvate rakenduste jaoks projekteeritud hooratas-energiasalvestid kinnitatud ümbritseva seadme külge liigenditega kardaanriputi (*gimbal*) abil. Kardaanriputi on ette nähtud selleks, et pöörleva rootori telg saaks raami suhtes oma asendit muuta, rootori pöörlemistasand saab güroskoobi aluspinna suhtes pöörduda. Niimoodi mõjutavad sõiduk ja hooratas üksteist vähem. Näiteks on Vycon Energy autonoomse energiavarustusega kraanadele toodetavatel hooratas-

energiasalvestitel kardaanriputi [14]. Kardaanriputi alternatiivina kasutatakse mõnel juhul puksidele toetuvaid süsteeme [17].



**Joonis 2.5.** Kerakujuline hooratas-energiasalvesti: 1 ó kardaanriputi ; 2 ó mootor-generaatori rootor; 3 ó süsinik fiibrist hooratas; 4 ó tsentraalne võll; 5 ó ülemine magnetlaager; 6 ó vaakumpumba osa; 7 ó kest; 8 ó alumine magnetlaager [13].

Enamusel reaalselt tootmises olevatel hooratastel on siiski silindri kujuline korpus, millel on mõnel juhul poolkera kujuline kaas, et rõhule paremini vastu pidada. Kardaanriputi kasutamisel (sõidukites), kus hooratta korpus saab raami sees asendit muuta, on kerakujuline korpus parem lahendus.

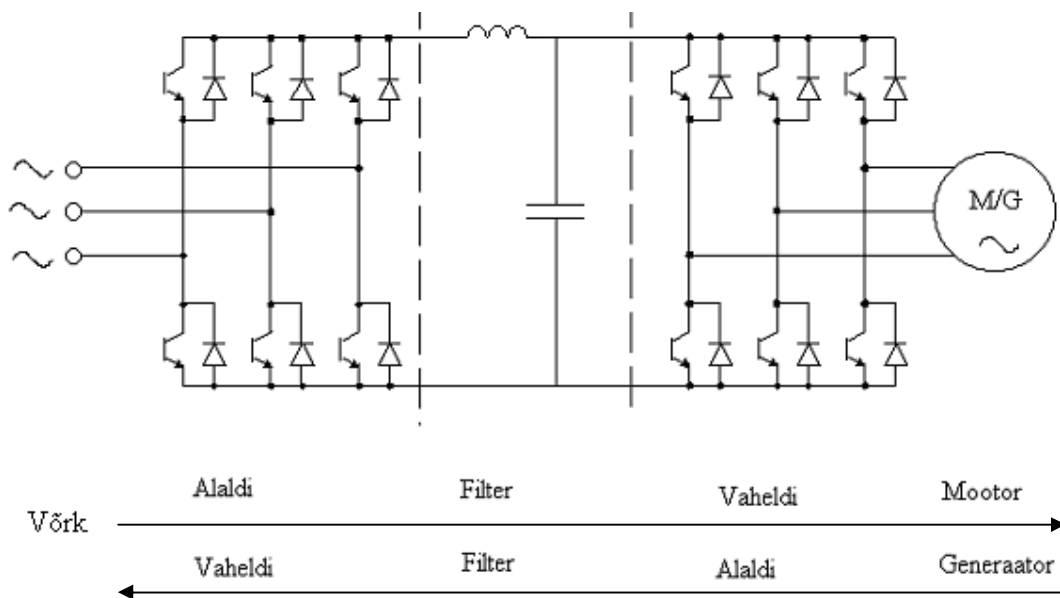


**Joonis 2.6.** Kardaanriputiga güroskoop: 1 ó güroskoobi raam; 2 ó pöörlemistelg ; 3 ó hooratas; 4 ó kardaanriputi [16].



## 2.5. Sagedusmuundur

Sagedusmuundurit saaks antud süsteemis samastada käigukastiga, eriti kui süsteem paikneb liikuva transpordivahendi peal [7]. Hooratas-energiasalvesti sagedusmuundurile kehtib veel erinõue, et see peab olema võimeline töötama mõlemat pidi. Vastavalt sellele, kas energiat salvestatakse hoorattasse või tarbitakse on energia liikumise suund vastupidine, see nõuab skeemi, kus alaldi ja vaheldi järjekord vooluahelas muutub vastavalt generaatori või mootorireflimile. Põhimõtte poolest samasugune seade on kasutusel Eestit ja Soomet ühendava alalisvoolu merekaabli Estlink juures, seal paiknevad skeemi kaks eri otsa teine teisel pool Soome lahte.



**Joonis 2.6.** Sagedusmuunduri skeem ja energia liikumissuund [3].

## 2.6. Erinevad konstruktsioonid

Ülesehitus sõltub väga palju hooratta materjalist, erinevate materjalide puhul on optimaalne vorm teistsugune, samas on maksimaalne pöörlemissagedus erinev, sellest tulenevalt on elektrimasinale, korpusele, sagedusmuundurile ning laagritele esitatavad nõuded on erinevad. Selle tõttu tuleb neid kahte põhimõtteliselt erinevat konstruktsiooni erinevalt vaadelda.

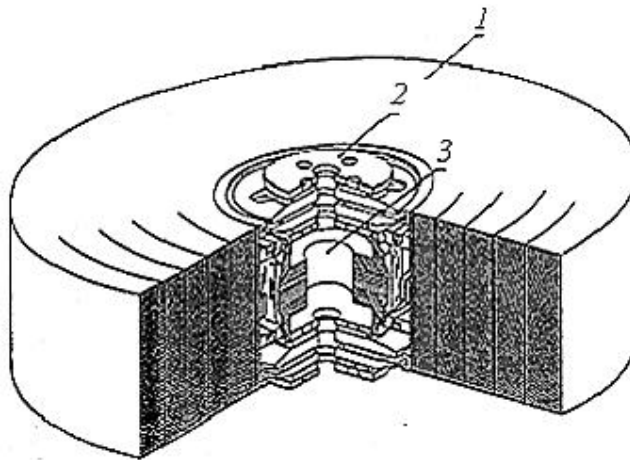
Järgnevalt on võrdluseks toodud kaks hetkel erinevate firmade poolt toodetavat, põhimõtetelt erineva ülesehitusega hooratas-energiasalvestit.



Terasest hoorattal on masin üleval hooratta massi kohal, komposiitmaterjali puhul keskel rõnga sees. Elektrimasinad on selle tõttu vastupidise ehitusega. Terasest hoorattal on rootor sisemisel poolel ning mähisega staator selle ümber nagu tavalistel elektrimasinatel. Komposiitmaterjali puhul vastupidi, püsिमagnetid on hooratta sisemisel küljel. Komposiitmaterjal hoiab suurtel pöörlemiskiirustel tekkiva tsentrifugaaljõu mõju juures magneteid omal kohal. Kui elektrimasina staator oleks ümber hooratta ning magnetid paikneksid hooratta välispinnal siis rebiks komposiithoorataste puhul kasutatavast suurest pöörlemiskiirusest ja raadiusest tulenev tsentrifugaaljõud need sealt ära [7]. Staatorimähis paikneb keskel, mis tagab otstarbeka ja kompaktse lahenduse.

Kahe võrdluses oleva hooratta rakendused on erinevad, terasest hooratast kasutatakse kiirete energiaimpulsside saamiseks ja salvestamiseks, mobiilsetel sadamakraanadel ja rongidel. Komposiitmaterjalist hooratast kasutatakse energia pikemaajaliseks salvestamiseks ning UPS ó ina. Seetõttu on taodeldud esimesel juhul suurt võimsust, teisel juhul maksimaalset energiat, seda näitab samuti tabel 2.3.

Kuna komposiithooratta puhul on tegemist seest tühja silindriga siis pöörlevat võlli pole ja laagri raadius, mis seda rõngast kannab, peab suurem olema, kui võlliga lahenduse puhul. Terasest hoorattal kasutatakse aktiivseid magnetlaagreid, tõenäoliselt sellepärast, et energiat salvestatakse lühemaks ajaks ja lisaenergia, mis kulub laagritele pole nii oluline. Olulisem on sel juhul, et hooratta raske terasest rootor oleks kindlalt tsentreeritud ja toetatud. Komposiitmaterjalist hooratta puhul kasutatakse võimalusel püsिमagnetlaagreid, see on hooratta väiksema massi ja laagrite suurema raadiuse tõttu lihtsamini teostatav, kuid põhiline eesmärk on vabaneda lisaenergia vajadusest laagritele.



**Joonis 2.9.** Lõige komposiitmaterjalist hooratta rootorist ja elektrimasinast: 1 ó hooratas; 2 ó magnetlaager; 3 ó püsिमagnetmootor-generaator [3].

### 3. Tehnoloogia eelised ja miinused

Hooratas-energiasalvestid on sama kaalu puhul võimelised salvestama rohkem energiat, kui keemilised energiasalvestusseadmed. Akude energiasalvestusvõime on üldjuhul 30-40 W·h/kg ning see väheneb ajaga [12]. Tabelist 2.1 võib näha, et hooratastega on võimalik salvestada kuni 10 korda rohkem energiat kilogrammi kohta. Hooratta energiasalvestusvõime kilogrammi kohta jääb kogu eluea jooksul samaks.

Akud tuleb üldjuhul peale 5 aastat välja vahetada ja ümber töödelda. Hoorattad töötavad kuni 20 aastat usaldusväärselt ja vähese hooldamisega [12].

Hooratas suudab energiat sama kiiresti salvestada, kui välja anda [15]. Salvestamisel kasutatav mootor ja väljastamisel kasutatav generaator on sama elektrimasin. Akud vajavad laadimise protsessiks rohkem aega. Samas üldjuhul ei saa hoorattad energiat väga pikaks ajaks säilitada ja kasutegur langeb salvestusaja pikenedes märgatavalt.

Samuti on hooratta eeliseks, et neid mõjutab väga vähe välistemperatuur. Akude ning näiteks vee potentsiaalse energiaga töötavate salvestite tööd mõjutab temperatuur oluliselt.

Kuna energia on salvestatud mehaaniliselt, mitte keemiliselt, on võimalik korduvalt viia salvestatud energia nulli, süsteemi kahjustamata [5, lk.127].

Hooratastehnoloogiat saab kasutada koos teiste energiasalvestusseadmetega. Hooratas oleks süsteemis lühiajaline energiaallikas ja salvesti. Järsud laadimise ja tarbimise impulsid lühendavad akude eluiga [2, lk.134].

#### 3.1. Loodushoid

Energiasalvestid sealhulgas hoorattad kuuluvad keskkonnatehnika ainevalda mitmel põhjusel:

1. Lubavad traditsioonilistes energeetikaseadmetes (katlamajas, elektrijaamas) muutuva koormuse puhul hoida soodsaimat ja seega keskkonnasõbralikumat režiimi, vähendades CO<sub>2</sub> ja NO<sub>x</sub> emissioone.
2. On mitme perioodilise või juhusliku iseloomuga saastevaba primaarenergiakandja (tuul, päikesekiirgus) korral möödapääsmatud [17].
3. Hoorattal põhinevad energiasalvestussüsteemid on jätkusuutlik roheline tehnoloogiline lahendus, mis ei kasuta keskkonnatehniliselt ohtlikke aineid, ega tooda neid oma töötamise käigus.
4. Uued magnetlaagritega hoorattad ei tekita tugevat müra [15].

### 3.2. Ohutus

Ohutus on sellise tehnoloogia puhul olulisel kohal. Lisaks elektriga seotud ohtudele on hooratta juures suur oht, et ülisuure kiirusega pöörlev mass võib lahti pääseda või rebeneda. Avarii korral võivad laastavad tagajärjed olla. Uurimisel ja katsejärgus hoorattad on surmajuhtumeid põhjustanud [4]. Näiteks on 0,5 meetrise diameetriga ja  $30000 \text{ min}^{-1}$  pöörlemiskiirusega komposiithooratta puhul pöia joonkiiruseks  $785 \text{ m/s}$  ehk  $2827 \text{ km/h}$ . Võrdlusena, püstolikuuli algkiirus on keskmiselt  $300 \text{ m/s}$ .

Ohutuse tagamiseks valvatakse hooratast pidevalt anduritega, mis annavad keskele juhtimis arvutile tähtsamaid parameetreid. Mõne parameetri lähenemisel lubatud piirile annab arvuti veateate ja käsu süsteemi hoolduseks. Lubatud piiri ületamisel aeglustatakse arvuti käsul süsteem seisakuni [18].

Ohtutse tagamise teine võte on tugev korpus, mis avarii korral takistab, et rootor või selle fragmendid saaksid laiali lennata ja kahju tekitada. Lahendusena on välimise kesta sisse, hooratta ümber, pandud süsinikkiust rõngas, mis ei ole kontaktis hoorattaga. Purunemise korral püüab see rõngas kinni hoorattast eraldunud fragmendid ning hooratta laagritest lahtipääsemise korral vähendab momendi ülekannet välimise kesta ja hooratta vahel [18]. Ohutuse tagamiseks võib statsionaarset hooratast maa alla paigutada, seda kasutatakse suurimate hooratassalvestite puhul, mille mass võib küündida 100 tonnini [1, lk. 274].

Lisaks pöörlemiskiiruse ülempiiri piiramisele tuleb arvestada resonantsiolukordadega, kuna sellisel pöörleval süsteemil on kindlasti omavõnkesagedusi.

Ülekuumenemise eest kaitsmiseks ja suurema väljundvõimsuse võimaldamiseks on jahutussüsteem, mida valvab juhtelektroonika. Jahutussüsteemidega on avariiolukordasid esinenud, toru lekkimisel elektrimasinasse või sagedusmuundurisse. Jahutusvedeliku pääsemisel korpuse ja kõrgema temperatuuriga masinaosadele on korpuse sisse tekkinud ülesurve. Ülesurve vastu on paigaldatud suletud korpustega hooratastele avariiklappe [18].

## **4. Rakendused**

Hooratas-energiasalvesti tehnilisi näitajaid tuleb valida vastavalt kasutusvaldkonna nõuetele. Põhilised näitajad on energiasalvestusvõime ja süsteemi võimsus. Võimsa elektrimasinaga hoorattad on sobivamad rakendusteks, mis võtavad vastu suuri energia impulsse või peavad neid tagama. Suure energiasalvestusvõimega on sobivamad pikemate laadimis ja tühjakslaadimisaegadega rakendusteks. Samuti on suured erinevused, kas kasutuskohas on statsionaarne või sõiduki peal.

Pinge ja sagedus pole suureks probleemiks, kuna süsteemi juurde kuulub sagedusmuundur on need programmeeritavad [5, lk.113].

### **4.1. Koostöö taastuenergiaallikatega**

#### **Päikeseenergia**

Päikeseenergia kasutamisel tuleb paratamatult ette öö ja päeva vahetusest tingitud kõikumisi. Samuti on ligi 20 kordsed erinevused tingitud aastaegade vaheldumisest. Tõraverse observatooriumi andmetel on meil kõige väiksem ööpäevane summaarne kiirgus detsembris, 1 MJ/m<sup>2</sup> [19]. Seega oleks päikeseenergia kasutamisel salvestamine ülimalt tähtis, kuid hooratas sobib energiasalvestina siiski lühemaajaliseks salvestamiseks, päikeseenergia kasutamisel on liiga pikki pimeduse perioode ning teised energiasalvestid nagu akud oleks antud valdkonnas arvatavasti sobivamad.

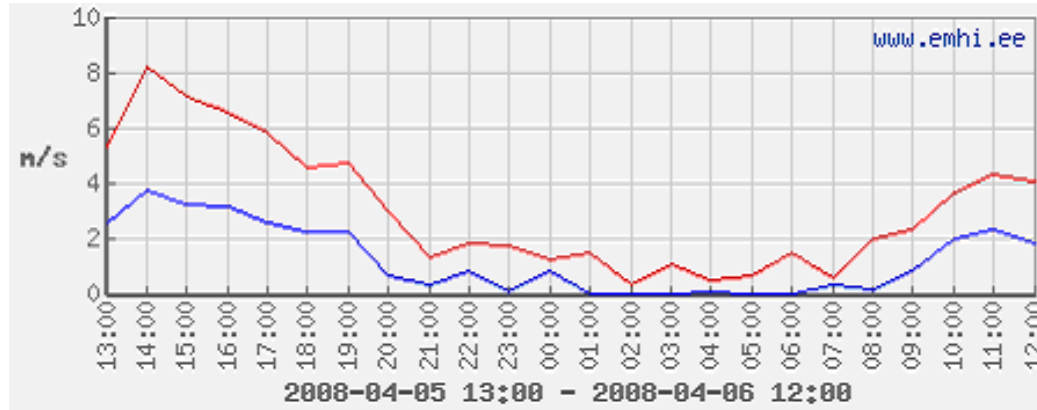
#### **Tuuleenergia**

Kuna tuule kiirus sõltub aastaegadest ja kellaajast vähem kui päike on hoorattad selle energiaallika puhul otstarbekad. Võimalik on rajada tuuleparkide juurde hoorataste parke või eraldi üksikute autonoomsete tuulikute ja hoorataste kombinatsioone.

Austraalia anktarktika-uurimisjaama Mawsoni ehitati 2002. aastal kaks 300 kW võimsusega tuulikut. Senini varustas jaama elektrienergiaga diiselelektrijaam. Lühiajaliste voolukatkestuste ületamiseks kasutatakse energiasalvestina kolme viietonnise massiga hooratast, mille pöörlemiskiirus on 3000 min<sup>-1</sup> [20].

Täpsemaid tehnilisi andmeid antud hooratassalvestite kohta polnud, kuid massi ja pöörlemiskiiruse järgi otsustades on tegemist esimese põlvkonna terasest hooratastega. Hoorattad sobivad antud juhul hästi, sest need on töökindlad ning neid saab seetõttu kasutada ülejäänud tsivilisatsioonist kaugetes kohtades ning karmides kliimatingimustes. Sellised salvestid toimivad ekstreemsetes tingimustes nagu antarktikas seega ei tekiks Eesti tingimusteski probleeme.

Näitena tootsin Tartu Tõravere ilmajaama tuule kiiruse muutumise ajas, millelt on võimalik oletada, kui suuri kõikumisi peaks energiasalvestusseadmetega ühtlusama tuulegeneraatoriga elektri tootmisel siinsetes tingimustes, kui eesmärgiks oleks saada ühtlast elektrienergia kvaliteeti. Samal ajal kõigub tarbimine.



**Joonis 4.1.** Tartu Tõravere ilmajaama tuule kiiruse muutumine ühe ööpäeva jooksul [21].

#### 4.2. Hooratas UPS-ina

UPS-idel (uninterruptible power supply) ehk katkematu toite allikatel on lai kasutusvaldkond kuna paljud seadmed ja protsessid vajavad kvaliteetset elektrienergiat.

Hooratas-UPS-id leiavad kasutust näiteks pooljuhtseadiste tootmise tööstuses. Pooljuhte tootev firma ST Microelectronics Rousset-is Pransusmaal installeeris 2001. aastal oma tehases hooratas-UPS-id, mis on toodetud firma Active Power poolt. Kolm 160 kW hooratast installeeriti, et tagada ühtlast pinget ajamitele. Esimese kasutusaasta jooksul oli nendel hooratastel 200 mahalaadimist, mitmed neist 200-st juhust oleks tähendanud muidu ajamite seiskumist, sest kaitselülitid oleks rakendunud. Veel viis 600 kW kahe hoorattaga UPS-i installeeriti toorkristallide tootmise seadmete juurde [5, lk.131]. Põhjus, miks firma otsustas hoorataste kasukus keemiliste akude ees oli, et hooratastel esineb vähem rikkeid, sama ülesannet täitnuks akudega ahel, kuid selle töökindlus oleks liialt madal olnud.

Telekommunikatsioonis on siiani kasutatud enamasti UPS-ina pliiakusid, kuid pliiakude eluiga on suhteliselt lühike, tavaliselt 5 aastat, hooratassalvestitel on see 20 aastat. Kahjuks tagavad hoorattad energiat lühemaks ajaks kui pliiakud, pikemaajaliseks varustamiseks kombineeritakse hooratas-energiasalvesti diisलगeneraatoriga.

### 4.3. Hooratas transpordis

Hooratas on sisuliselt igas sisepõlemismootoriga transpordivahendis olemas, seal toimib hooratas mootori töö ühtlustina, kuid on üritatud kasutada hooratast, kui transpordivahendi peamist energiaallikat.

Üheks varasemaks näiteks on projekt šGyrobüs mis loodi juba 1950-ndatel <sup>TM</sup>Veitsi firma Örlikoni poolt. Ühistranspordi bussid liikusid elektrimootoritega, mis said energiat 9,15 k·Wh energiasisaldusega ja 1,5 tonniselt hoorattalt. Buss sai sõita ilma elektrivõrgu ühendusega umbes 20km, siis pidi selle jälle 1...3 minutiks elektrivõrku ühendama. Laadimiseks oli bussi katusel kolm varrast ja bussipeatuste kohal kolm vooluvõrku ühendatud kontakti, piisas bussipeatuse juures seismise ajast, et hoorattale uuesti vajalik nurkkiirus anda [22]. Tol ajal ja selle tehnikataseme juures see projekt ennast ei õigustanud ja bussidest loobuti mittetasuvuse tõttu 1960 aastal.

Uuemad uuringud on näidanud, et hooratta kasutamisega saab parandada elektrisõiduki tehnilisi omadusi, vähendada patarei mahtuvust ja suurendada selle ressursi, parandada sõiduki dünaamilisi omadusi (kiirendust). Näiteks on kirjanduses andmeid sõiduki kohta, milles patarei massi vähendamine 40 kg võrra ning sama massiga hooratta kasutamine, mis salvestab 250 W·h energiat, vähendab linna tingimustes patarei energiatarvet 20% võrra ja suurendab vastavalt elektrisõiduki läbisõitu patareid laadimata [8].

Ühistranspordi osas on aktuaalsemaid projekte nagu näiteks Siemensi projekt ULEV TAP [(ultra low emission vehicle ó transport advanced propulsion) - ülimaldala saastega sõiduk ó energia taaskasutus transpordis], mille käigus on ehitatud hoorattaga ajam trammile ja bussile. Selle käigus töötati välja seade, mille pidev võimsus on üle 500 kW ning energiamahutavus 4...5 kWh. Seadme laadimise-tühjendamise efektiivsuseks saadi rohkem kui 90% ning kaaluks 800 kg ja mõõtmeteks (pikkus, laius, kõrgus): 1,600 x 1,850 x 583 mm. Pool rahast saadi Euroopa Liidu poolt, mis näitab poliitiline huvi tehnoloogia vastu on samuti olemas [23].

Rongide puhul on selline süsteem kasulik, kuna vedurid kasutavad üldjuhul diiselmootori ja elektrigeneraatori kombinatsiooni ning rongi liikuma hakkamisel vajatakse suure massi tõttu järsku palju energiat. Samas rongi pidurdamisel eraldub palju energiat, mida saaks salvestada.

Hooratas-elektrimootorit on juba seeriaautodele sisse ehitatud. Honda Insightil on integreeritud sisepõlemismootori hoorattasse elektrimootor-generaator [24], kuid antud



Honda näites ei ole hooratta ja elektrimasina kombinatsiooni põhiülesandeks energia salvestamine hoorattasse enesesse, vaid eraldiasetsevate energiasalvestite (akude) laadimine ja sise põlemismootori töö toetamine. Seega pole tegemist antud töös käsitletava hooratas-energiasalvestiga kitsamas mõttes, vaid lihtsalt hübriidauto elektriajami paigutamise lahendusega.

Hooratas energiasalvestussüsteemiga hübriidauto puhul on eraldi salvesti, veoajam ja sise põlemismootor. Hooratas-salvestit laetakse sise põlemismootoriga ja sellesse salvestatakse energiat, kui auto pidurdab. Salvestist võetakse energiat, kui on suurem koormus, näiteks mäkketõusul ja kiirendusel. Selline süsteem ühlustab sise põlemismootori tööd, mootor saab töötada optimaalsetel pööretel ning seega väheneb kütusekulu ja pikeneb mootori eluiga [24]. Süsteem toimib sarnaselt hübriidautoga millel on keemilised akud. Eeliseks on, et hooratast on palju kiiremini võimalik üles laadida, näiteks pidurdamisel läheb vähem energiat kaduma ja hooratas on sama kaalu puhul võimsam energiaallikas kui aku, seega on auto kiirendusomadused paremad. Negatiivseks küljeks hooratta energiasalvestamise lühiajalisus, et saavutada optimaalne lahendus proovitakse kasutada energiasalvestussüsteemi, milles on hooratas ja keemiline aku.

#### **4.4. Tööstus**

Kuigi enamus hoorattaid on mõõdukate gabariitidega ja suhteliselt väikese mahtuvusega, siis mäetööstuses leidub üpris suuri näiteid. Alaskas, Usibelli söekaevanduses installeeriti juba 1982 aastal hooratassalvesti, mis toetas koppkonveieri tööd. Konveieri energiavajadus kõikus 8 MW piires iga 60 sekundi jooksul (pluss-miinus 4 MW), see põhjustas elektrivõrgule probleeme. Hooratas ise koosnes kolmest 0,3 meetri paksusest ja 2,4 meetrise läbimõõduga teraskettast mis kokku kaalusid 40 tonni, töötades pöörlemissagedusega  $900 \dots 1000 \text{ min}^{-1}$ . Konveieri töötades vahetati hoorattaga pidevalt energiat, kui konveier võttis lasti peale aeglustus hooratas, kui last maha laeti suurenes hooratta nurkkiirus. Konveieri töö toetamiseks sai hooratas välja anda 5,2MW kolme sekundi jooksul (260 kW·h), tänu sellele jäi süsteemi energiavajaduse fluktuatsioon 0,5 MW piiresse [5, lk. 133].

#### **4.5. Kraanad**

Autonoomse energiavarustusega kraanad millel on diiselmootor ja elektrigeneraator, seal hulgas sadama konteineriveokid, saab varustada hooratas-energiasalvestiga. See aitab säästa kütust, vähendada heitgaaside emissioone, parandada

süsteemi jõudlust, vähendada müra ja diiselmootori ning elektrigeneraatori kulumist [14]. Kraanadele ja liftidel on hooratas eriti kasulik, kuna saab salvestada lasti langetamisel kasutatava rekuperatiivpidurduse energiat, et seda uuesti kasutada.

#### **4.6. Sõjandus**

Tuleviku soomukitel ja tankidel vajavad vedrustus, kommunikatsioonid, relvad ja kaitsesüsteemid järjest rohkem elektrienergiat. Eriti suur elektrienergia vajadus on kavandatavatel laserrelvadel ja elektromagnet tankikahuritel, kus mürsule antakse algiirendus elektromagneti abil, mitte lõhkeainega. Tankidele on prototüübina pandud hooratas-energiasalvestit, kuid täpsemaid andmeid pole avaldatud. Lennukikandjate stardikatapuldid on samuti seadmed, millele on tehnoloogiat kavandatud [12].

#### **4.7. Teadus**

Saksamaal Max-Plancki-Plasmafüüsika Instituudis Müncheni lähedal läheb termotuumareaktsiooni katsete juures vaja lühiajalisi kuni 200 MW suurusi elektrilisi võimsusi magnetväljade jaoks. Sellist suurt võimsust ei ole võimalik kohalikust elektrivõrgust saada. Katseteks paigaldati juba 1974 aastal neli terasest hoorattast elektrigeneraatoriga. Suurim neljast hoorattast kaalub 230 tonni, diameeter on ligi 3 meetrit, pöörlemissagedus tööolukorras  $1650 \text{ min}^{-1}$ . Nullist kuni tööolukorrani kiirendamine võtab 20 minutit, sel viisil salvestatakse hoorattasse  $400 \text{ kW}\cdot\text{h}$  energiat. Generaatorirefliimis suudab süsteem kümneks sekundiks anda 150 MW väljundvõimsust [3]. Antud näide on kõige suurim, mis reaalselt paigaldatud ja mida oli võimalik kirjandusest leida.

Uuema põlvkonna komposiitmaterjalist hoorattaid arendati kõige esimesena kasutuseks kosmoses, kuna nende salvestusvõime massiühiku kohta, ehk erienergia, on palju parem, kui keemilistel akudel. Kosmoses on hooratas-energiasalvesti kasutamiseks üpris ideaalsed tingimused, kaalutu olek ja vaakum.

Rahvusvaheline kosmosejaam, ISS, kasutab põhilise energiaallikana päikeseplatareisid, kui jaam satub orbiidil olles päikese suhtes maakera varju, varustab jaama hooratasenergiasalvesti. Satelliitidele on ammu paigaldatud põhilise energiasalvestina hoorattaid [12]. Suureks eeliseks on süsteemi töökindlus ja tööiga.

Kaalutus olekus on vajalik kasutada rohkemat kui ühte hoorattast, sest hooratta laadimine ja energia taastootmine hakkaks ühe hoorattaga süsteemi puhul satelliidi pöörlemist põhjustama. Lisaks headele energiasalvestamisomadustele mõjuvad hoorattad

güroskoobina. Hoorataste abil saab muuta seadme asendit kaalutus olekus. Seega on neil mitu otstarvet.

#### **4.8. Kasutusvõimalused Eestis**

Eestis saaks kasutada hoorattaid samades valdkondades nagu teistes riikideski juba on rakendatud: transport, UPS, kraanad. Paljudele asutustele nagu haiglatele on vaja hädajuhtumiks autonoomset elektrivarustust, selleks ülesandeks sobib hästi hooratta ja diisलगeneraatori kombinatsioon [27].

Eesti eripärana võiks põhilist huvi pakkuda rakendused tuuleenergeetikas. Viimasel aastakümnel on väga aktuaalseks muutunud uute energiatootmise võimaluste kasutuselevõtt Eestis. Eesotsas tuuleenergiaga, mille suurimaks miinuseks on ebastabiilsus. Ebastabiilsuse silumiseks olekski üks parimaid võimalusi hooratas-energiasalvestid.

Eestil on mitmeid väikesaari, mille elektrivõrk pole mandri omaga ühendatud. Selliste väikeste elektrivõrkude puhul on tootmise ja tarbimise mittevastavused tihti suuremadki, kui suurtel elektrivõrkudel. Sellistes kohtades aitaksid tuuliku ja hooratas-energiasalvestiga elektrijaamad energiavarustust parandada.

Eesti elektrivõrk sõltub suuresti Venemaa omast, näiteks võrgusageduse kvaliteeti mõjutab Venemaa. Hooratastega saab sagedust reguleerida. Lisaks on tootmise ning salvestamise detsentraliseerimine julgeoleku seisukohalt parem.

Eesti Energia projekti šNutikas Võrkõ raames hakatakse paigaldama elektrivarvesteid, mis saavad vastavalt tariifile ja generaatori ülekoormuse korral ajutiselt välja lülitada suuremaid tarbijaid projektiga liitunud majapidamistes. Selline projekt läheb maksma üle miljardi krooni [25]. Samas saaksid hoorattad probleemi leevendada, annaksid tippkoormuste ajal välja energiat, et ühtlustada elektrijaama tööd ning võiksid projekti osa olla. Energia kvaliteeti parandamiseks võrgu nõgemates kohtades tuleks salvestid detsentraalselt paigutada. Tarbijatele oleks see lahendus kokkuvõttes parem, kuna nad saaks kvaliteetsemat energiat ning ei toimuks tariifipõhiseid väljalülitamisi nagu šNutika Võrguõ puhul.

Näiteks USA-sse, New York-i osariiki Stephentowni on kommertseesmärgil plaanitud 2009 aastaks valmis ehitada 200 hoorattaga, 20 MW võimsusega jaam, see läheb maksma 50 miljonit USD ehk ligikaudu pool miljardit Eesti krooni. Jaam aitab tulevikus vähendada kohaliku soojuselektrijaama süsinikdioksiidi emissiooni 12000 tonni võrra aastas, see on võrdväärne 20000 barreli nafta kokkuhoiuga [15].

## 5. Maksumus ja tasuvus

Summaarne maksumus hoorattaga süsteemi paigaldamiseks on erinevate allikate väitel 100...450 USD/kW [26, lk.113 , 27]. Kuigi hooratas energiasalvestussüsteemi ost ja paigaldus on üldiselt 50% kallim, kui keemiliste akumulaatoritega süsteemi oma samaks kasutusotstarbeks (UPS), siis nende maksumus terve eluea jooksul võib olla tohutult palju väiksem, seejuures pakkudes paremat töökindlust. Selle tasuvuse tagavad madalamad hooludus- ja käidukulud ning palju pikem eluiga võrreldes keemiliste akumulaatoritega [5,lk.129].

Hooratassalvestid suudavad säilitada töövõimet tingimustes, mis lühendaksid keemiliste akumulaatorite eluiga ja vähendaksid kasutegurit. Äärmuslikud temperatuurid ja sügavad üles- ja mahalaadimistsüklid suurendava dramaatiliselt keemilistele akumulaatoritele tehtavaid kulusi, kuid hoorattaid peaaegu ei mõjutagi [5,lk 130].

Suured esimese põlvkonna hoorattad on tihti soetamiskulude poolest odavamad, kuid vajavad mehaaniliste laagrite tõttu rohkem hooldust. Suuremate mõõtmete pärast on rohkem ruumi vaja ning sellepärast paigutatakse neid mõnel juhul välitingimustesse või maa alla, mis tagab rohkem ohutust [3].

### 5.1. Hoorataste tootjad

Tootmises olevaid hooratas-energiasalvesteid tutvustavaid kirjandusallikaid uurides sai teha järelduse, et tootjafirmad on spetsialiseerunud eri tehnoloogiatele. Üldiselt saab firmad toodangu järgi kaheks jagada [1, lk. 134] :

Esimene grupp ettevõtteid toodavad ja arendavad terasest hoorattaid, mis on massiivsemad ja väiksema pöörlemiskiirusega ehk esimese põlvkonna seadmed.

Teine grupp ettevõtteid on keskendunud kiiretele komposiitmaterjalist hooratastele, ehk teise põlvkonna tehnoloogiale.

Järgnevalt on toodud näiteid mõlemast grupist.

#### **Terasest hooratas-energiasalvestite tootjaid:**

- **Vycon Energy** ,Yorba Linda, California, USA [14] ;
- **Active Power**; Austin, Texas, USA [27];
- **Hitec Power Protection**, Almelo, Madalmaad, [28];
- **SatCon Power Technologies**, Burlington, Kanada [29];
- **Piller inc**, Middleton, New York, USA [30].
- **Powercorp** , Berrimach , Austraalia [31]

### **Komposiitmaterjalist hooratas-energiasalvestite tootjaid ja arendajaid:**

- **Beacon Power Company**, Tyngsboro, Massachusetts, USA.[15];
- **SiemensAG**, München, Saksamaa [32];
- **AFS Trinity**, Medina, Washington, USA [33];
- **Boeing, Chicago**, Illinois, USA [34];
- **Rosseta Technik GmbH**, Rosslau, Saksamaa [17].
- **Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.Ltd.** Yokohama, Jaapan [35].
- **Pentadyne Power**, Chatsworth, California, USA [36];

Riigiti vaadeldes leiab antud tehnoloogiaga tegelevaid ettevõtteid mitmetest maailma riikidest, kuid valdav enamus tootjaid paikneb USA-s.

Samas saab jaotada firmasid selle järgi, kas hooratas-energiasalvestid on firma põhiliseks tootmis ja uurimisobjektiks või kõrvalvaldkonnaks, nagu tuntud firmades Boeing ja Siemens AG.

Üldiselt on moodulid keerukuse tõttu parandatavad tootja tehases. Kuigi mõnede firmade toodangul on kiiremini kuluvad osad kohapeal vahetatavad. Active Poweri toodetavatel hooratastel on näiteks laagrid kohapeal vahetatavad, kuna need on mehaanilised ja firma näeb ette, et neid peab iga 5 aasta tagant hoolduse käigus vahetama[26].

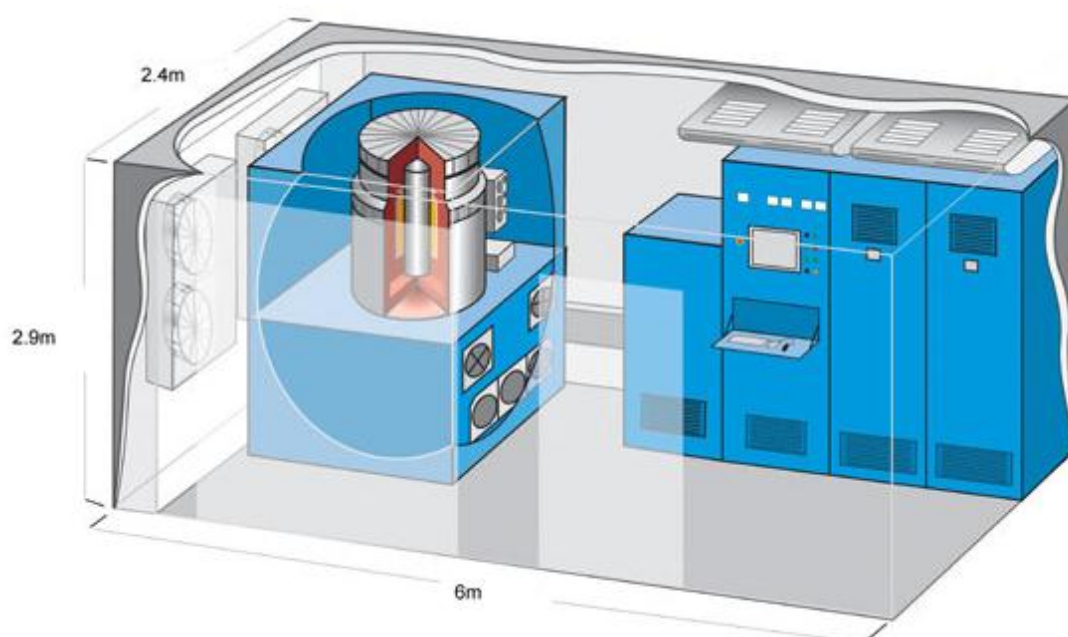
Mõned firmad toodavad ilmastikukindlaid konteineritesse paigutatud hooratas-energiasalvestite komplekte, mida saab transportida ja kasutada igal pool maailmas.

Beacon Power on välja töötanud merekonteinerisse paigutatud komposiitmaterjalist salvestite komplekti, mille prototüübid on paigaldatud USA-s New York-i osariiki. Konteiner sisaldab 7 hooratast ning süsteem on võimeline salvestama 25 kW·h. Maksimaalne võimsus on 250 kW. Seade on mõeldud kasutamiseks taastenergiaallikate juures, rakendusteks tööstuses või UPS-ina [15].Konteineri sisemus on näha joonisel 5.1.

Austraalia firma Powercorp toodab konteinereid, mis sisaldavad ühte terasest hooratas-energiasalvestit. Nimivõimsused on 250-1000 kW ja salvestatav energia hulk 5 kW·h, nimipöörlemissagedus 3600 min<sup>-1</sup>, konteineri mass on 12520 kg [31]. Salvesti sobib kasutamiseks autonoomsete diisel- ja tuulegeneraatoritega. Sama firma tegeleb tuulegeneraatorite, diiselgeneraatorite ja hooratas-energiasalvestite tootmisega korraga, ning pakub võimalust tellida neid komplektina. Austraalias on nimetatud tehnoloogiatele palju rakendusi kuna vahemaad on suured.



**Joonis 5.1.** Beacon poweri poolt toodetud hoorataste konteineri sisemus [15].



**Joonis 5.2.** Austraalia firma powercorp energiasalvestussüsteem. [31]

## Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö alusel võib teha järgmised kokkuvõtted ja järeldused:

1. Pöörleva keha inerts on aastatuhandeid kasutatud, elektrilisi hooratas-energiasalvesteid on maailmas uuritud ja kasutatud juba üle poole sajandi.
2. Komposiitmaterjalide ja magnetlaagrite arengu tõttu on suuremaid edusamme antud valdkonnas just viimasel aastakümnel tehtud.
3. Hooratas-energiasalvestite konstruktsioon sõltub väga palju hooratta materjalist.
4. Energia salvestamiseks sobivad paremini materjalid, mis taluvad suuri pöörlemiskiirusi kuna salvestatud energia suureneb koos nurkkiiruse ruuduga.
5. Kuna pöörlemiskiirus on tähtsam kui mass, on materjali tõmbetugevus tähtsam, kui tihedus.
6. Energiasalvestusmooduli koostekvaliteet peab olema väga täpne, kuna mikroskoopilisedki vead võivad osutada fataalseteks.
7. Eelised: pikk tööiga, hea kasutegur, töökindlus, hea massi ja energia ning massi ja võimsuse suhe.
8. Miinused: kõrge soetamise hind, tootmise keerukus, kaod pikemaajalisel energia salvestamisel, hoorattad on üldiselt lühiajalised energiasalvestid.
9. Suure kineetilise energia sisalduse tõttu on hoorattad rikke korral ohtlikud, ohtude vähendamiseks on elektroonilised ja mehaanilised võtted.
10. Hooratta kasutusvaldkonnad ulatuvad teadusest, kaevandusteni, sealhulgas rongid, telekommunikatsioon, kraanad ja tuuleenergeetika.
11. Eestis leiaks antud tehnoloogiale rakendusi tuuleenergeetikas, elektrienergia kvaliteedi parandamise valdkonnas ning transpordis.
12. Juba nüüd on saanud uuema põlvkonna hooratas-energiasalvestid kasutamiseks küpseks ja pakuvad energiasalvestina mõningates turunishides traditsioonilistele salvestitele konkurentsi.
13. Hooratas-energiasalvesti on maksumuselt kallim, kui keemiline aku, kuid pikem eluiga ja harvem vajadus hoolduse järgi teevad selle tasa.
14. Ettevõtteid, mis antud valdkonda uurivad ja hoorattaid toodavad on kõige rohkem USA-s, kuid neid leidub samuti Euroopa Liidus, Kanadas, Austraalias ja Jaapanis.

## Kasutatud kirjandus

1. Sørensen B. Renewable energy conversion, transmission and storage. Elsevier Inc, Amsterdam 2007. 6 327 lk.
2. Ter-Gazarian A. Energy Storage For Power Systems. Peregrinus Ltd, London 1994. 6 232 lk.
3. Ströbreuther F. Machbarkeitsstudie und Konzept einer stationären Schwungradanlage zur dezentralen, verbraucherorientierten Energiespeicherung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule. Aachen 1996. Kättesaadav: <http://de.geocities.com/infotaxi/schwungdiplom.htm> (01.04.08)
4. Putnam C.S. The mechanical battery. kättesaadav: <http://www.damninteresting.com/?p=909> (03.04.08)
5. Baxter R. Energy storage ,a nontechnical Guide. Tulsa, Oklahoma 2006 6 303 lk.
6. Kriiska A. Tauri A. Eesti muinasaeg. Avita, Tallinn 2002 6 lk 52.
7. Burg P. Schnelldrehendes Schwungrad aus faserverstärktem Kunststoff. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich 1996 6 126lk. Kättesaadav: <http://www.aspes.ch/publications/diss.pdf> (05.05.08).
8. Liiske M. Tehnoloogiaseadmete elektrialamid 1.osa. Eesti Põllumajandusülikool, Põllumajandusenergeetika Instituut, Tartu 1998. 6 98.lk.
9. Fremerey J. K. Permanentmagnetische Lager. Institut für Grenzflächenforschung und Vakuumphysik, Jülich 2000. kättesaadav: <http://www.fz-juelich.de/zat/magnet/0b30.pdf> (01.05.08)
10. Chiba A. , Magnetic Bearings and Bearingless Drives , Oxford 2005. 384 lk.
11. Schweitzer G. Active magnetic bearings - chances and limitations. International Centre for Magnetic Bearings, Zürich 2002. kättesaadav: [http://www.mcgs.ch/web-content/AMB-chances\\_and\\_limit.pdf](http://www.mcgs.ch/web-content/AMB-chances_and_limit.pdf) (11.05.08)
12. Haichang L, Jihai J. Flywheel energy storage 6 An upswing technology for energy sustainability. Heilongjiang Province, China 2006, kättesaadav: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V2V4MG6P8C1&\\_user=2728019&\\_rdoc=1&\\_fmt=&\\_orig=search&\\_sort=d&view=c&\\_acct=C000058628&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=2728019&md5=a93a33cf796f48fa521a2301c1da05ce#secx14](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V2V4MG6P8C1&_user=2728019&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_acct=C000058628&_version=1&_urlVersion=0&_userid=2728019&md5=a93a33cf796f48fa521a2301c1da05ce#secx14) (15.04.08)
13. Flywheels, a look to the future. kättesaadav: [http://images.google.ee/imgres?imgurl=http://www.upei.ca/~physics/p261/projects/flywheel2/1097rosen\\_flywheel.gif&i](http://images.google.ee/imgres?imgurl=http://www.upei.ca/~physics/p261/projects/flywheel2/1097rosen_flywheel.gif&i)



- mgrefurl=[http://www.upei.ca/~physics/p261/projects/flywheel2/flywheel2.htm&h=273&w=400&sz=41&hl=et&start=2&tbnid=B4tayi9uX\\_8s0M:&tbnh=85&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3Dflywheel%26gbv%3D2%26hl%3Det](http://www.upei.ca/~physics/p261/projects/flywheel2/flywheel2.htm&h=273&w=400&sz=41&hl=et&start=2&tbnid=B4tayi9uX_8s0M:&tbnh=85&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3Dflywheel%26gbv%3D2%26hl%3Det) (20.04.08)
14. Vycon Energy, Vycon Flywheel Technology, Kättesaadav: [http://www.vyconenergy.com/pdf/REGEN\\_White\\_Paper\\_4\\_8\\_08.pdf](http://www.vyconenergy.com/pdf/REGEN_White_Paper_4_8_08.pdf) (01.05.08)
  15. Beacon Power. Proucts, About Flywheels. kättesaadav:<http://www.beaconpower.com/products/EnergyStorageSystems/flywheels.htm> (01.05.08)
  16. [http://www.ene.ttu.ee/elektrijamid/oppeinfo/materjal/AAR0040/070.Liikurrobotite\\_navigatsioon.pdf](http://www.ene.ttu.ee/elektrijamid/oppeinfo/materjal/AAR0040/070.Liikurrobotite_navigatsioon.pdf)
  17. Pajumets E. Energiasalvestitest, Eesti Energeetika Instituut. Kättesaadav: [http://www.keskkonnatehnika.ee/arhiiv/1997/1\\_1997/ene197.htm](http://www.keskkonnatehnika.ee/arhiiv/1997/1_1997/ene197.htm) (25.04.08)
  18. Rossetta tehcnik GmbH. Kättesaadav: <http://www.rosseta.de/alledias/auf10y.htm> (08.05.08)
  19. Lepa J., Jürjenson K., Hovi M. Alternatiiv- ja väikeenergeetika. Eesti Põllumajandusülikool, Põllumajandusenergeetika Instituut, Tartu 1997 6 67lk.
  20. Wind Farm at Mawson Station. Kättesaadav: <http://www.polarpower.org/examples/mawson/index.html>
  21. Eesti meteoroloogia ja hüdroloogia instituut. Tuule graafik. Kättesaadav: <http://www.emhi.ee/> (06.04.08)
  22. The Gyrobus, kättesaadav: <http://citytransport.info/Electbus.htm> (11.05.08)
  23. ULEV-TAP, kättesaadav: [www.ulev-tap.org](http://www.ulev-tap.org) (11.05.08)
  24. Honda Insight. Kättesaadav: <http://www.insightcentral.net/> (02.05.08)
  25. Mere T. Jaotusvõrgu roll võiks olla šnutika võrguõ arendaja. Kättesaadav: <http://energiafoorum.blogspot.com/2008/05/tarmo-mere-jaotusvrgu-roll-viks-olla.html> (08.05.08)
  26. EPRI óDOE „Handbook of Energy Storage for Grid Connected 2004- 144lk. kättesaadav:[http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI\\_Journal/2006-Spring/1013289\\_storage.pdf](http://mydocs.epri.com/docs/CorporateDocuments/EPRI_Journal/2006-Spring/1013289_storage.pdf) (08.05.08)
  27. Active Power, Flywheel tehnology. Kättesaadav: <http://www.activepower.com/> (14.05.08)
  28. Hitec power protection. Kättesaadav: <http://www.hitecups.com> (03.05.08)
  29. Satcon technologies. Kättesaadav: <http://www.satcon.com/> (06.05.08)
  30. Piller. Inc. Kättesaadav: [www.piller.com](http://www.piller.com) (20.05.08)

31. Powercorp. Kättesaadav: <http://www.pcorp.com.au/> (21.05.08)
32. Siemens AG. Kättesaadav: <http://w1.siemens.com/entry/cc/en/> (21.05.08)
33. AFS Trinity. Kättesaadav: [www.afstrinity.com](http://www.afstrinity.com) (15.05.08)
34. Boeing. Kättesaadav: <http://www.boeing.com/> (21.05.08)
35. Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co.Ltd. Kättesaadav: <http://www.fitness4service.com/products/ishikawa.htm> (21.05.08 )
36. Pentadyne power. Kättesaadav: <http://www.pentadyne.com> (22.05.08)