

TARTU ÜLIKOOL
MATEMAATIKA-INFORMAATIKATEADUSKOND
Arvutiteaduse instituut

SEGWAY-LAADNE GÜROSKOOPSKUUTER

Kodutöö aines Reaalajasüsteemid

Autorid: Priit Kallas
Martin Rakver
Juhendaja: Aivo Reinart

Tartu
2010

SISUKORD

SISUKORD	2
1. SISSEJUHATUS	3
2. GÜROSKOOP	4
2.1. Mida peaks teadma güroskoobist?	4
2.2. Güroskoop Segway-laadses skautris	5
3. SÜSTEEMI ÜLDINE KIRJELDUS	6
3.1. Tasakaal ja juhtimine	6
3.2. Juhtraua vertikaalasendis hoidmine	6
3.3. Rattad ja keeramine	7
3.4. Akude tühjenemine	7
4. KASUTUSJUHUD (USE-CASES)	8
4.1. Tasakaaluasendis skautril seismine	8
Joonis 2. Tasakaaluasendis skautril seismine.	8
4.2. Skautriga edasi/tagasi suunas sõitmine	9
4.3. Skautriga paremale/vasakule pööramine	10
4.4. Skautriga takistuse ületamine või järsule rambile sõitmine	11
5. OLULISEMAD REAALAJALISED NÕUDED	12
6. SÜSTEEMI OSAD	13
6.1. Mootor ja käigukast	13
6.2. Juhtkontroller	13
6.3. Güroskoop	13
6.4. Kere	13
6.5. Ohutustehnika	13
6.6. Mootori kontroller	13
6.7. PD-kontroller	13
6.8. Patareiplokk	14
7. AJALISTE-SEOSTE ANALÜÜS	16
8. TESTIDE KORRALDAMISE PLAAN	17

1. SISSEJUHATUS

Segway on ameeriklase *Dean Kameni* leiutatud elektrimootoriga kaherattaline sõiduvahend: inimene seisab ratastega alusel, millel on kinnihoidmiseks käepide. Olgugi et kahel rattal, hoiab tasakaalu aparaat ise, mitte sõitja. Selleks on jalgealuses plaadis viis tasakaaluandurit, mis astmelaua asendit sada korda sekundis kontrollivad ja korrigeerivad. Liikumiseks pole vaja anda gaasi, vaid end liigutada: ette kummardudes liigutad masinat edasi, keha tahapoole liigutades tagurpidi – seega ka pidurdad.

Segway hind on aga võrdlemisi suur (sõltuvalt mudelist ning kohast 5000 – 7000 dollarit) ning seetõttu on mitmed tehnikahuvilised inimesed proovinud (ja ka õnnestunult) ehitada ise *Segway*-laadset sõidukit. Antud kodutöös kasutame eeskujuna *Trevor Blackwelli* loodud güroskoop-skuutrit. Antud projekti kodulehe võib leida veebiaadressilt <http://tlb.org/scooter.html>.

2. GÜROSKOOP

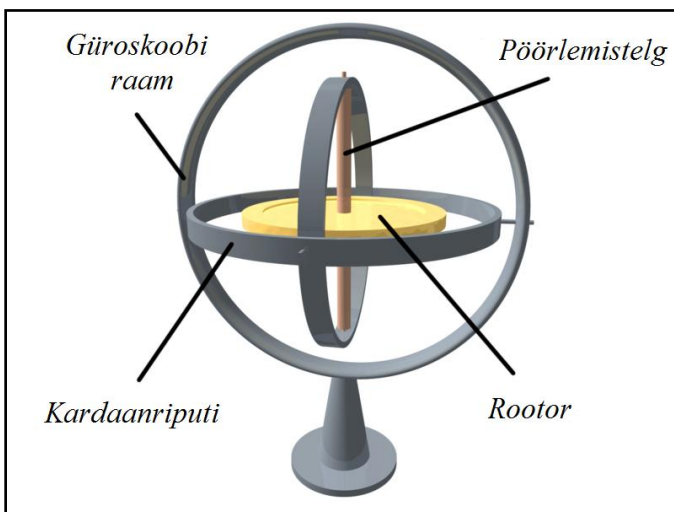
Kuna Segway-laadsete sõidukite kõige iseäralikum joon on selle võime end güroskoobi abil ise stabiliseerida vaid kahel rattal, on antud peatükis täpsemalt seletatud, millega on tegu ning kuidas skootrid seda tehnoloogiat kasutavad.

2.1. Mida peaks teadma güroskoobist?

Güroskoop on telgsümmeetriline jäik keha, mis pöörleb ümber oma telje. Telje siht ruumis võib aja jooksul muutuda. Lihtsaim güroskoop on vurr (mida kiiremini vurr pöörleb, seda stabiilsem ta on aga kui pöördumine aeglustub siis lõpuks kukub vurr ümber). Güroskoop on seadeldis, mis koosneb pöörlevast kettast, mis on asetatud kahest rõngast koosnevasse raami. Raam võimaldab güroskoobi teljel mis tahes suunas pöörduda. Güroskoobid on sama usaldusväärsed, kui kompassid, isegi täpsemad, kuna güroskoop kasutab suuna määramiseks Maa tegelikku põhja suunda.

Güroskoobe rakendatakse mitmel otstarbel, eriti lennunduses ja mereveonduses, kus neid kasutatakse lennukite ja laevade stabiliseerimiseks. Stabiliseerimiseks kasutatakse güroskoopi ka näiteks televisioonis, kaamerate puhul, et kiiremini ja täpsemalt kaamerapilti suunata. Güroskoobe on olulise osana kasutusel veel ka paljudes teistes kontroll-, mõõte-, reguleerimis- ja stabiliseerimis-seadmetes. Mõõteseadmena näiteks gürokompassis.

Lisaks sellele on güroskoobil põhinevad seadmed olemas ka randmete treenimiseks, mis on kasulik näiteks mootor- ja jalgratturitele, Joonis 1. Güroskoop golfimängijatele, võrkpalluritele ja kasvõi arvutiga töötavatele inimestele.



Güroskoobi käitumist kirjeldab järgmine võrrand.

$$\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I\alpha$$

Kus vektorid τ ja L on vastavalt jõumoment ja impulsimoment, skalaar I on inertsimoment, vektor ω on nurkkiirus ja α on nurkkiirendus.

Sellest järeldub, et jõumoment rakendub vertikaalsele pöörlemisteljele ja seetõttu on see vertikaalne impulsimomendiga, selle tulemusena on liikumine vertikaalne nii τ kui L , seda liikumist kutsutakse pretsessioonliikumiseks. Pretsessioonliikumises nurkkiirendus Ω_p antakse vektorite summana.

2.2. Güroskoop Segway-laadses skautis

Kuna kirjeldatud mehhaanilise ja võrdlemisi koguka güroskoobi kasutamine *Segway*-laadses süsteemis, kus on oluline mõõtmed, kaal ja hind, on ebapraktiline, ei kasuata tavaliselt sellist lahendust, vaid nn vibreeriva struktuuri güroskoobe. Selle tööpõhimõte seisneb nähtusel, et vibreerivad süsteemid püüavad aluse orientatsiooni muutmisel oma vibreerimistelge säilitada. Sellist laadi nurgamuutuse andureid nimetatakse ka *coriolis*-vibratsiooni güroskoopideks (ingl.k "coriolis vibratory gyro"), sest need kasutavad orientatsiooni muutuse detekteerimiseks *coriolis*'e jõude.

Segway kasutab viit sedalaadi andurit. Edasi-tagasi ning küljele kallutamise detekteerimiseks piisab kolmest, kaks ülejäänut lisavad süsteemile stabiilsust ja töökindlust. Lisaks kasutatakse kaht elektrolüütvedelikuga täidetud kallutusandurit, mis, sarnasel meie sisekõrvadele, suudavad määrata sõiduki orientatsiooni maapinna suhtes.

3. SÜSTEEMI ÜLDINE KIRJELDUS

Ise tasakaalu hoidvatest skootritest (näiteks *Segway*) mõeldakse tihtipeale kui tõelistest tehnoloogilistest imedest. Reaalsus on aga see, et pisut tehnilist taipu omades ning natukene tehnilist poolt uurides on üsna hõlpsalt võimalik valmistada enda skooter. Vajaminevad osad annab leida tehnikapoodidest või siis saab neid ka internetipoodidest tellida.

Paljud *Segway* tootmisel kasutatavad komponendid on meie mõistes eksootilised, kallid ja raskesti kättesaadavad, kuid neid on võimalik asendada palju odavamate ja lihtsamini leitavate detailidega. Näiteks on võimalik mootorina kasutada ratastoolides kasutatavaid mootoreid, patareidena aga raadio teel juhitavate mänguautode patareisid. Tarvis ei lähe ka ülikeerukat ning kõrgtehnoloogilist tarkvara, mikroprotsessori programmeerimine ei ole midagi väga keerulist ning hakkama saab suhteliselt väikese arvu koodiridadega.

3.1. Tasakaal ja juhtimine

Skuutri tasakaaluasendiks peavad rattad olema gravitatsioonikeskme all. Kuid sõiduk ei tea niisama lihtsalt, kus gravitatsioonikeske asub ning milline suund on täpselt üles. Tehniliselt on masinale teada nurk skuutri raami ja gravitatsioonijõu suuna vahel ning selle asemel, et hoida rattaid gravitatsioonikeskme all, hoitakse juhtrauda vertikaalasendis (nurk skuutri raami ja gravitatsioonijõu vahel on sel juhul 0 kraadi).

Juhtraud vertikaalasendis püsib skooter stabiilsena. Ette nõjatudes nihkub gravitatsioonikeske ratastest eespoole. Kontroller tajub seda ning paneb tasakaaluasendi taastamiseks rattad edasisuunas veerema. Samamoodi taha nõjatudes nihkub gravitatsioonikeske ratastest tahapoole ning tasakaaluasendi taastamiseks pannakse rattad tagasisuunas liikuma. Mida rohkem kallutatakse, seda kiiremini peavad rattad tasakaaluasendi taastamiseks veerema.

Antud juhul võiks potentsiaalselt aga tekkida olukord kus juht nõjatub nii palju ettepoole, kus skuutri kiirus on juba selline, et mootor ei suuda tasakaalu hoidmiseks enam piisaval kiirusel rattaid vedada. Sellisel juhul peab muutma skuutri kaldenurka, niisiis selle asemel, et juhtrauda vertikaalasendis hoida, kallutatakse teda hoopis tagasi. Juhtraud on vöö kõrgusel ning ta surub juhile vastu senini kuni gravitatsioonikeske ei ole enam eespool rattaid ning skooter lakkab kiirendamast.

3.2. Juhtraua vertikaalasendis hoidmine

Juhtraua vertikaalasendis hoidmine on lihtne protsess. Kui juht nõjatub ettepoole, siis rattaid käitatakse kiiremini kuni tasakaaluasend on taastatud.

Kuid võivad tekkida mõned komplikatsioonid. Rattaid tuleb täpselt õigel määral edasi liigutada. Liiga palju korruga edasi liigutades tuleb neid seejärel tagasi liigutada, siis juba uuesti edasi ning sellisel kujul sõitmine oleks võrdlemisi raske (süsteem läheb genereerima). Seetõttu tuleb leida täpselt õiged seaded, tagamaks süsteemi stabiilne töötamine.

Kontrolleril on vaja teada nii juhtraua kaldenurka kui ka seda, kui kiiresti kaldenurk muutub. Rataste pöörlemiseks antav energia peab olema proportsioonis juhtraua kaldenurga veaga.

Nagu eespool juba mainitud, siis juhul kui skuutri kiirus on liiga suur, siis liigub juhtraud tagasi, juhi suunas. Seda on aga raske realiseerida, sest tasakaaluhoidmiseks tuleb rataste liikumist kiirendada, et

saada nad gravitatsioonikeskmest ettepoole. Seetõttu tajub aga skooter anduritest tuleva info põhjal, et ta liigub veel kiiremini ning see omakorda tekitab olukorra, et juhtrauda liigutatakse veel rohkem tagasi. Antud juhul on tegemist positiivse tagasisidega ning antud protsessi stabiliseerimine on skootri üleüldise toimimise seisukohalt väga oluline.

3.3. Rattad ja keeramine

Skoوترi keeramiseks tuleb juhtrauast kinni hoida ning liigutada keha vastavalt soovitud pööramise suunas. Antud protsessi tulemusena pannakse üks ratas liikuma kiiremini kui teine. Kuna kogu masina mass on rataste vahel, siis suudab skooter täispöörde sooritada võrdlemisi kiiresti.

Kohapeal seistes maksimumkeeramise saavutamiseks rakendatakse ühele rattale ~10% maksimumkiirusest edasisuunas ning teisele rattale samal määral tagasisuunas. See tagab üsnagi kiire täispöörde. Skootri kiiruse suurenedes peab aga ka pööramiskiirus vähenema, vastasel juhul kukuks skooter lihtsalt ümber.

Skoوترi rattad peaksid olema väikese kraadi (umbes 0,5) võrra sissepoole suunatud. Sarnaselt on sissepoole suunatud ka valdava osa autode esirattad. See tagab parema stabiilsuse skootri keeramisel.

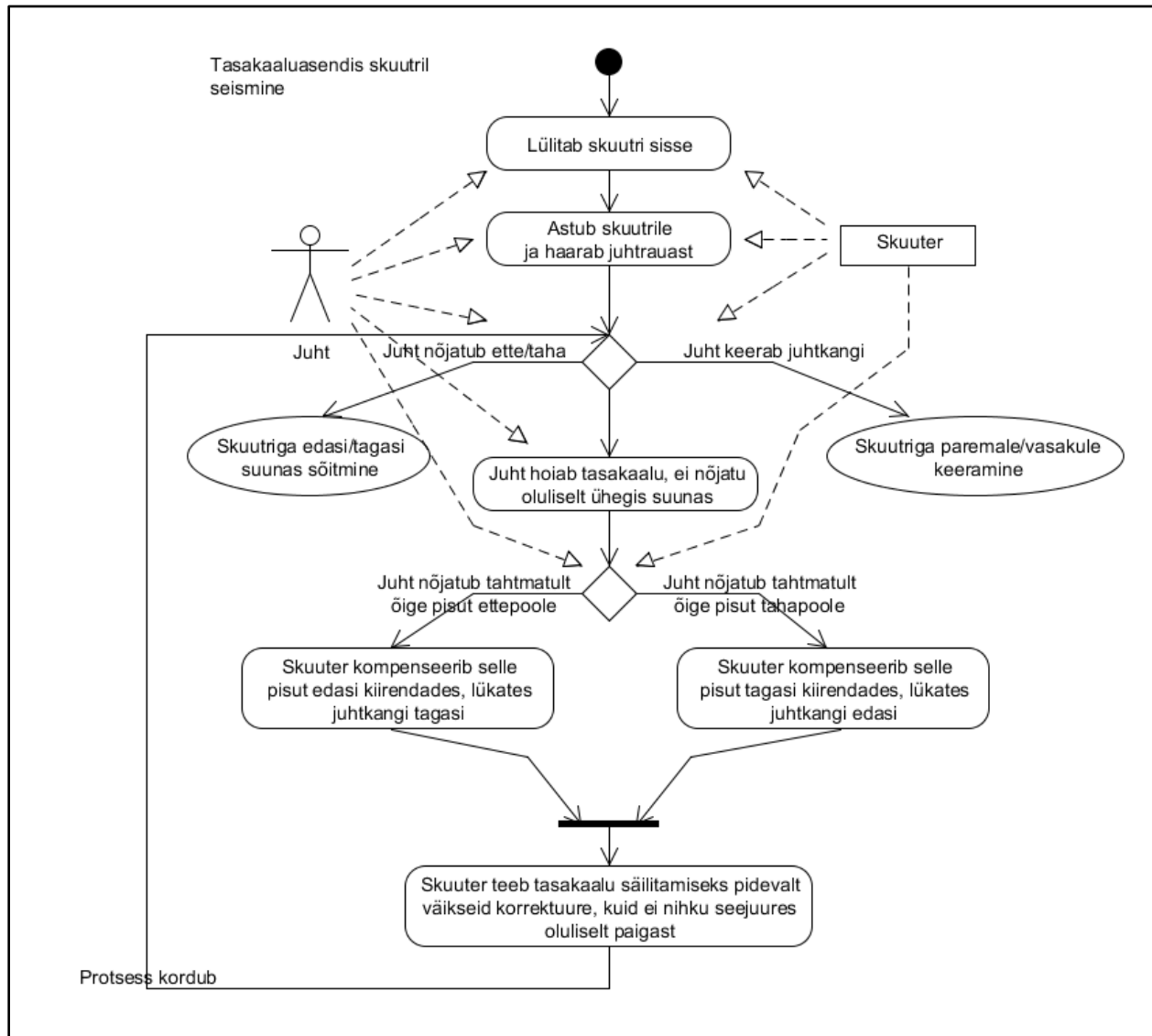
3.4. Akude tühjenemine

Akude tühjenedes peab süsteem sellest kasutajale aegsasti märku andma ning tagama sõitja ohutuse. Kui akud ei suuda tühjenedes enam täisvõimsust välja anda, tuleb vähendada tippkiirust, et alati jääks piisav võimsusvaru takistuste ületamiseks. Kui akud hakkavad päris lõppema, peab süsteem suunama skootri tasakaaluasendisse ning mitte lubama enam teekonda jätkata.

4. KASUTUSJUHUD (USE-CASES)

4.1. Tasakaaluasendis skautril seismine

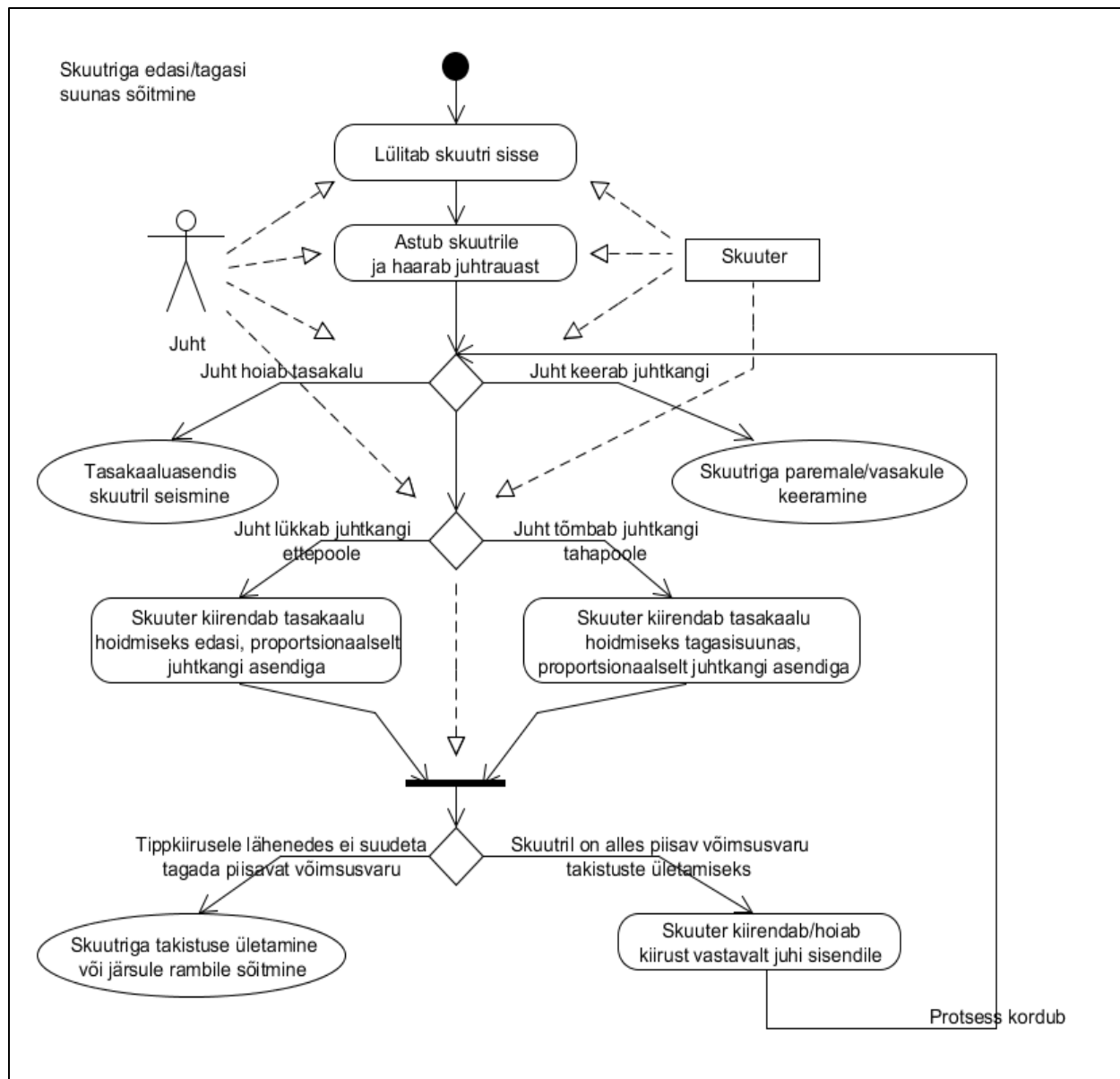
Juht astub skautri peale ning võtab juhtrauast kinni. Sealjuures ei tohi nõjatuda ei ette- ega tahapoole, sest antud juhul tajuks masin tasakaaluasendist väljumist ning selle kompenseerimiseks hakkaks skauter liikuma. Samuti ei tohi keha kallutada paremale ega vasakule, sest siis hakkaks skauter vastavalt kas paremale või vasakule poole koha peal pöörama. Kui juht seisab skautri peal üheski suunas jõudu avaldamata, siis seisab skauter koos juhiga tasakaalustatult koha peal.



Joonis 2. Tasakaaluasendis skautril seismine.

4.2. Skuutriga edasi/tagasi suunas sõitmine

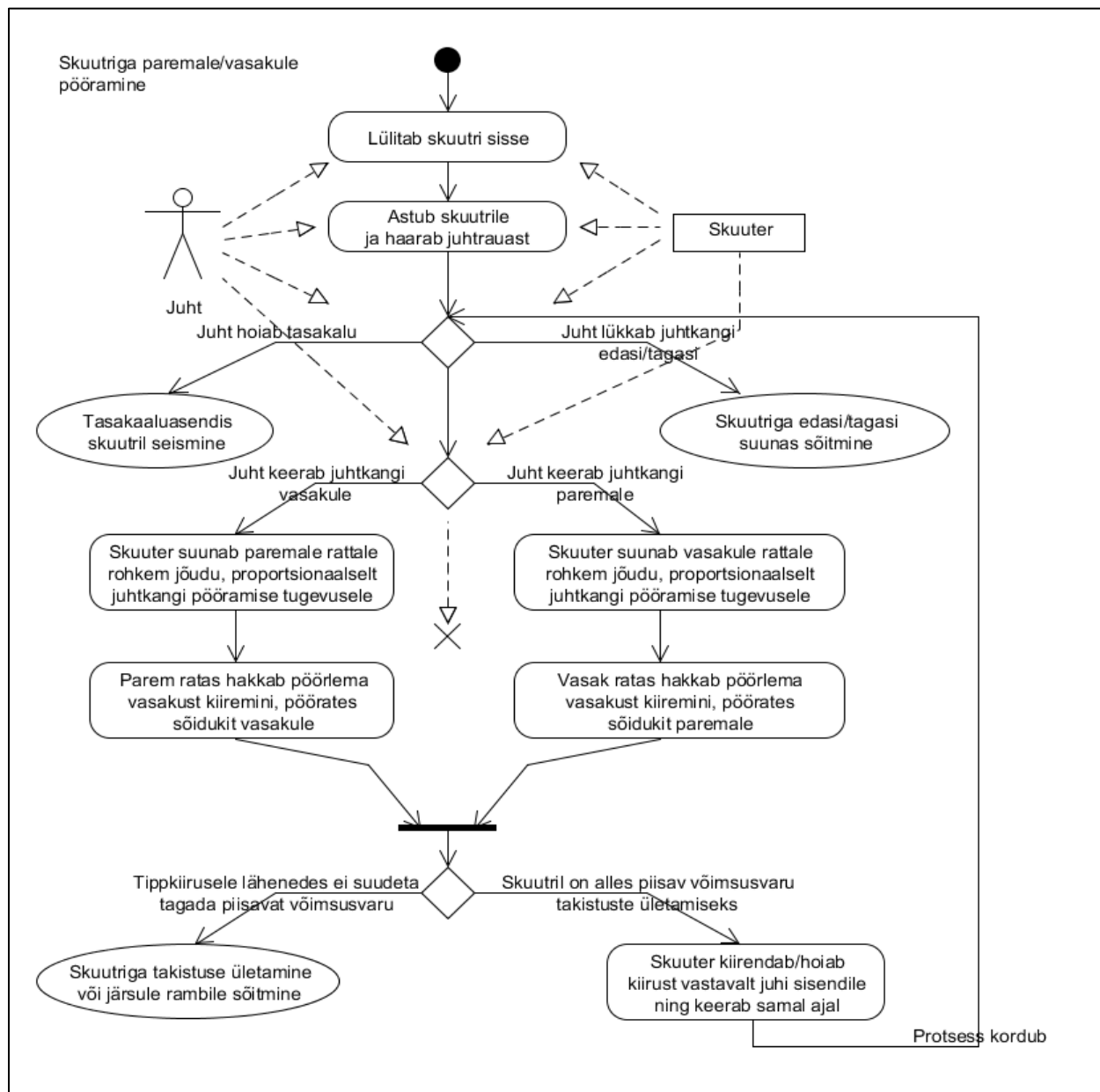
Juht astub skautrile ning võtab juhtrauast kinni. Edasi liikumiseks nõjatub juht juhtrauaga ettepoole, mille peale hakkab skauter edasi liikuma. Mida rohkem ettepoole nõjatada, seda kiiremini hakatakse masina rattad edasisuunas liigutama. Analoogselt toimub tagurpidi sõitmine. Juht nõjatub juhtrauast kinni hoides tahapoole ning masin tajub tasakaaluasendist väljumist ning selle kompenseerimiseks hakatakse skautri rattaid tagasisuunas liigutama. Edasi- või tagasisuunas liikumise peatamiseks tuleb skautri seista viisil, mis on kirjeldatud punktis "Tasakaaluasendis skautril seismine". Antud juhul taastub skautri tasakaaluasend ning liikumine lakkab.



Joonis 3. Skuutriga edasi/tagasi suunas sõitmine

4.3. Skuutriga paremale/vasakule pööramine

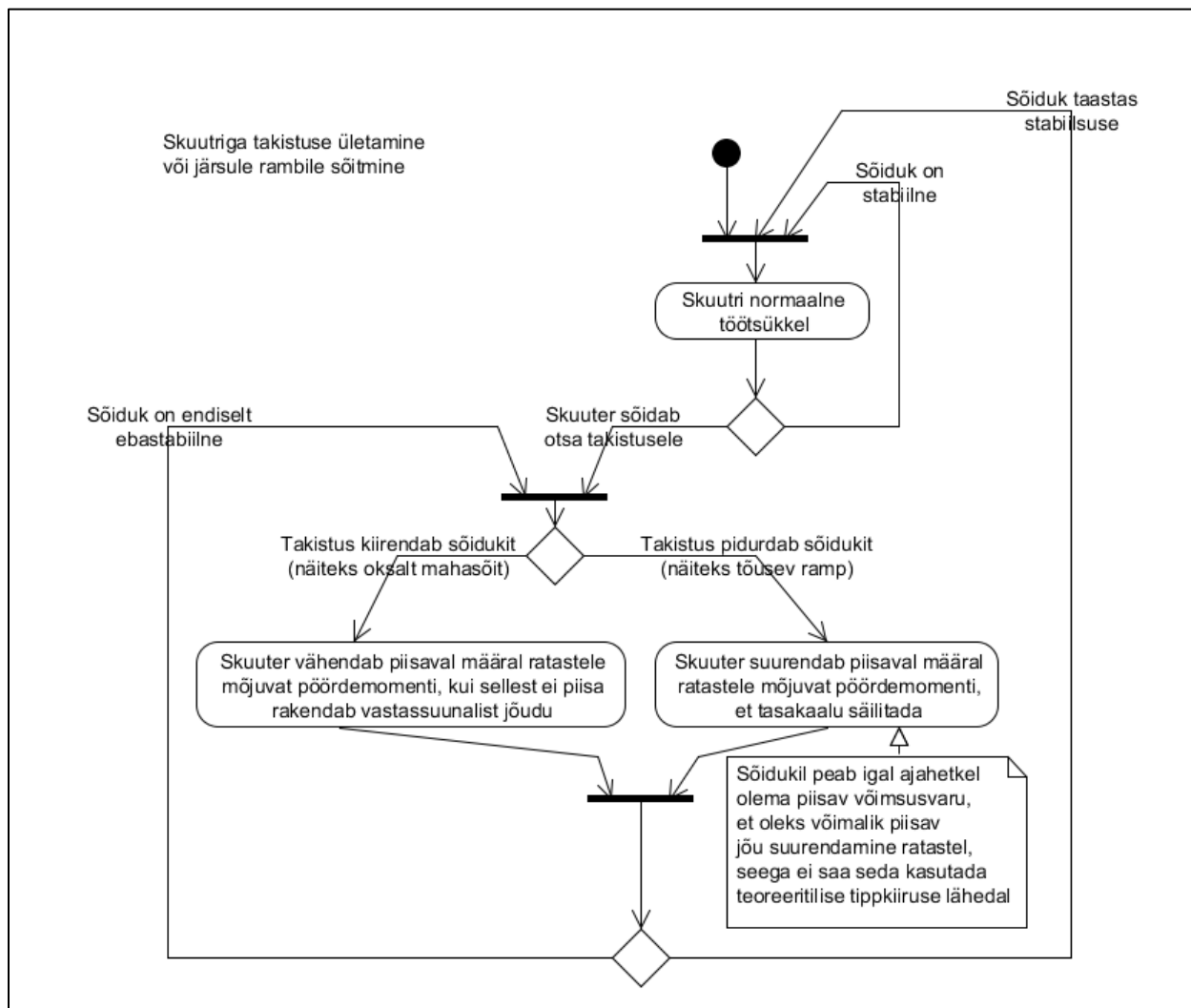
Juht astub skautrile ning võtab juhtrauast kinni. Juht võib alustada liikumist edasi- või tagasisuunas, kuid samuti teostada soovi korral pööramist ka koha peal. Paremale pööramiseks hoiab juht juhtkangist kinni ning pöörab keha paremale. Skuuter aeglustab selle peale parema rattale liikumist ning kiirendab vasaku oma, mille tõttu keerabki skauter paremale. Keha vasakule pöörates aeglustatakse vasaku rattale liikumist ning kiirendatakse parema oma ning skauter pöörab vasakule.



Joonis 4. Skuutriga paremale/vasakule pööramine

4.4. Skuutriga takistuse ületamine või järsule rambile sõitmine

Sõites üle järsema takistuse (näiteks suuremat sorti oksa murul) või sõites järsult tõusvale rambile peab skooter suutma säilitada tasakaalu ning sõidusuuna. Sellisel hetkel peab süsteem kiiresti reageerima ning suunama ratastele järsult suurema või väiksema pöördemomendi. Tuleb arvesse võtta, et süsteemil peab ka kiiresti sõites olema piisav jõuvaru järsuks kiirendamiseks, et oleks võimalik tasakaalu säilitamine.



Joonis 5. Skuutriga takistuse ületamine

5. OLULISEMAD REAALAJALISED NÕUDED

Tegemist on inimese transportimiseks mõeldud sõidukiga ning samamoodi nagu autodelt, eeldame ka antud skootrilt, et ta teeb just seda, mida juht parajasti tahab ning sealjuures teeb seda ilma viivitusega. Kui juht on skootri peal ning annab sisendimpulsiga (juhtrauast kinni hoides ning seejärel ette nõjatudes) süsteemile märku, et tahab edasi suunas liikuma hakata, siis peab süsteem sellele koheselt reageerima. Reageerimisaeg võiks antud juhul jääda kindlasti alla 100ms. Täiesti mitteaktsepteeritav on olukord, kus reageerimisaeg on nii pikk, et see on juhile reaalselt tajutav. Sellisel puhul võiks näiteks tekkida olukord, kus skooter liigub maksimumkiirusele ligilähedase kiirusega ning teele ilmub takistus. Skooter peab antud juhul juhi sisendimpulsile (juhtrauast kinni hoides tagasi nõjatudes) reageerima koheselt, vastasel juhul on oht kokkupõrkeks kahtlemata kordades suurem.

Muutuval maastikul ja muutuvates keskkonnatingimustes tasakaalu säilitamiseks peab sellelaadne süsteem reageerima muutustele väga lühikese aja jooksul (umbes 20 ms), sest liialt hilja reageerides võib süsteem tasakaalu kaotada või genereerida minna ja nõnda kasutaja turvalisuse ohtu panna. Seega on tegu range reaajasüsteemiga.

Kiiruse kasvades jõuab kätte hetk, mil mootorid ei suuda tasakaalu hoidmiseks enam veel kiiremini rattaid pöörata ning sõiduk muutub ebastabiilseks. Süsteem peab olema võimeline piisavalt kiiresti (umbes 20 ms) seda olukorda tuvastama ning reageerima juhtkangi tahapoole lükates. Seda saab see teha vaid veel kiiremini kiirendades, mistõttu on oluline see ülekiiruse vastumeede võtta kasutusele enne maksimaalse võimsuse saavutamist, muidu pole selleks enam piisavalt võimsust.

Akude tühjenedes peab süsteem kasutajale pirni süttimisega aegsasti (akude tühjenemisel umbes 40%-ni täisvõimsusest) tekkinud olukorrast märku andma ning piirama tippkiirust, vältimaks olukorda, kus tühjenevad akud ei suuda enam süsteemi stabiilseks tööks vajalikku voolutugevust genereerida. Kui akud on juba tühjenenud 10 protsendini, siis peab süsteem skootri viima tasakaaluasendisse ning mitte lubama teekonda jätkata.

6. SÜSTEEMI OSAD

6.1. Mootor ja käigukast

Aluseks võetud näiteprojektis kasutatakse kaht võrdlemisi tavalist DC-mootorit, mis on võetud motoriseeritud ratastoolist. Mootorid on loodud kasutamiseks 24-voldisel pingel, ent antud projektis kasutatakse neid suurema võimsuse saavutamiseks 36-voldisel pingel. Mootoritel on sisseehitatud käigukast ülekandega 20:1, andes välja maksimaalselt 230 pööret minutis ning kaaluvad need kumbki 5,9kg. Ühe mootori hinnaks uuena on umbes 3000 krooni.

6.2. Juhtkontroller

Kasutatakse võrdlemisi lihtsat-odavat 8-bitist Atmel'i mikrokontrollerit, mis jooksub C's kirjutatud koodi ujuvkoma aritmeetikaga. See saadab mootori kontrollerile serial-pordi kaudu välja ASCII-kodeeritud käske kiirusega 9600 baudi. Mikrokontrolleri hind on suurusjärgus vaid sada krooni.

6.3. Güroskoop

Kasutatakse samalaadset süsteemi, mida võib leida videokaamerates pildi stabiliseerimiseks, kombineerituna kaheteljelise aktseleromeetriga. Hind orienteeruvalt 1500 krooni.

6.4. Kere

Kere on koostatud kahest alumiiniumplaadist, mis on omavahel poltidega seotud ning millele on lisaks kinnitatud alumiiniumist juhtkang.

6.5. Ohutustehnika

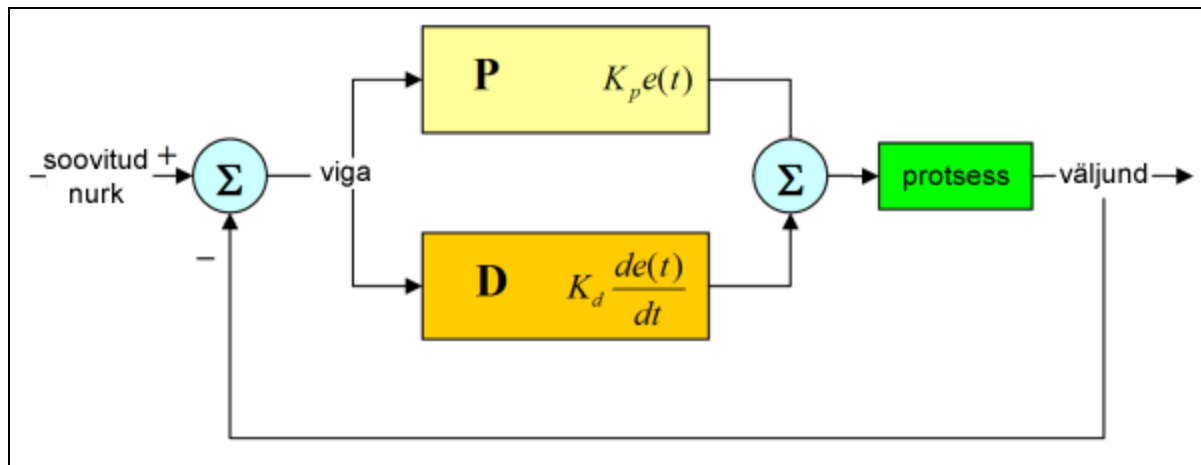
Kui päris Segway puhul on kõik kriitilised detailid dubleeritud, nii et kui üks mootorikontrolleritest või akudest peaks üles ütlema, jätkab sõiduk siiski enese balansseerimist kuni ohutu peatamiseni, siis meie aluseks võetud projektis igasugune ohutustehnika puudub. Kui mõni komponent peaks üles ütlema või akud tühjaks saama, kukub sõiduk lihtsalt ümber, nii et mõningane ettevaatlikkus on vajalik.

6.6. Mootori kontroller

Kasutatakse *RoboteQ'i* valmistatud kuueteist MOSFET-transistoriga kahekanalist kontrollerit, mis on võimeline juhtima mõlemat mootorit korraga, hinnaga umbes 5000 krooni.

6.7. PD-kontroller

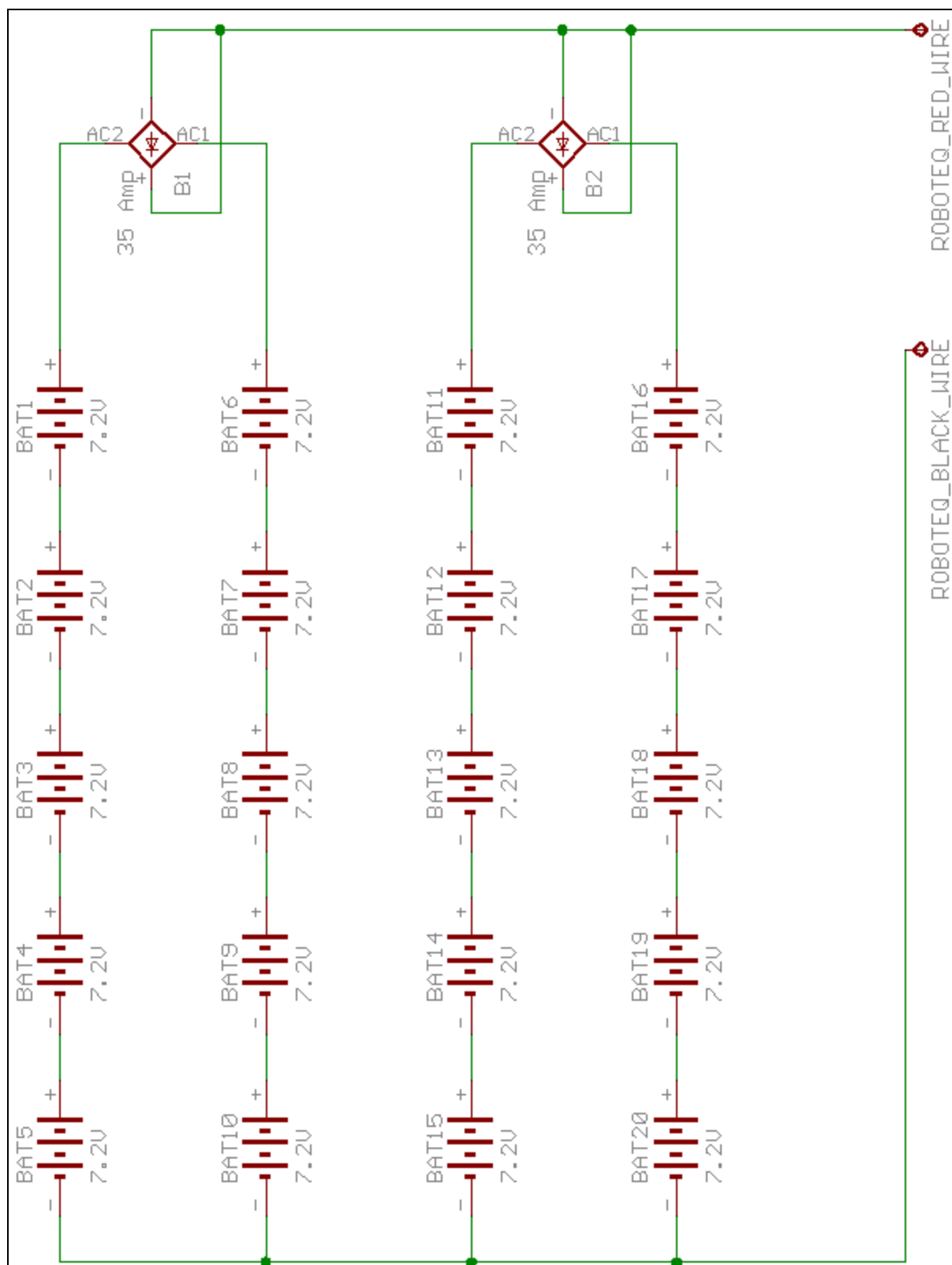
Süsteem kasutab tasakaalu hoidmiseks PD-kontrollerit. Süsteem vajab kasutaja sisendile reageerimiseks juhtkangi nurka maa suhtes ning selle nurga muutumise kiirust, viimast, et mitte üle reageerida. Kasutatav võimsus ratastel on proportsionaalne (P-kontroller) nurga veaga (kui palju on juhtkangi kallutatud) ning selle vea tuletisega (D). Nende kahe summa moodustabki PD-kontrolleri. Proportsionaalne ja diferentsiaalne kordaja on määratavad juhtpuldil keeratavate nuppude abil.



Joonis 6. PD - kontrolleri

6.8. Patareiplokk

Näitena kasutatud skuter kasutab kahtekümmend 7.2-voldist RC-autode akut, mis on 36V saamiseks ühendatud viie kaupa järjestikku. Kasutatud akud on võimelised välja andma korraga 30 amprit voolutugevust, ent kuna piisava võimsusvaru tagamiseks läheb tarvis umbes sadat amprit, ühendati need veel omakorda nelja kaupa paralleelselt. Liikudes allamäge (pidurdades) laetakse mootorites genereeritud vooluga akusid. Järgneb patareiploki skeem:



Joonis 7. Patareiploki skeem

7. AJALISTE-SEOSTE ANALÜÜS

Kuna meil ei ole projekti skeeme ega lähtekoodi, pole võimalik süsteemi ajalisi seoseid adekvaatselt hinnata. Võib eeldada, et süsteem peab tasakaalu säilitamiseks reageerima kasutaja sisendile ja muutuvatele oludele kiiresti, umbes 50 ms jooksul. Vastasel juhul võib süsteem genereerida minna ning olla liialt laisalt juhitav.

8. TESTIDE KORRALDAMISE PLAAN

Antud juhul pole tegemist masstootelega vaid endale kasutamiseks loodud ühekordse projektiga. Testimise toimub suuremas osas katse-eksitus meetodil ning on kuniks tarkvara pole piisavalt hästi seadistatud on üsna suur tõenäosus protsessi käigus paar marrastust saada.

Algseteks testideks madalal kiirusel on oluline, et olemas oleks kergesti kättesaadav "kill"-lüliti, millega masina ohu korral välja saaks lülitada. Samuti on vaja sääre kõrgusele jalakaitsmeid, sest võib tekkida olukord, kus skooter tagurdab juhile sisse ning takistab sel moel vigastusi. Kahtlemata tuleks ka esimeste testide korral tippkiirust piirata, vältimaks veel seadistamata masinaga testimist suurtel kiirustel.

Testimiseks on vaja piisavalt vaba ruumi ning lähedal ei tohi väärtuslikke ning kergesti purunevaid asju, sest on vägagi tõenäoline, et skooter väljub juhi kontrolli alt. Suurtel kiirustel testimiseks on aga iseenesest mõistetavalt vaja veelgi rohkem ruumi ning hea oleks kui pinnas oleks näiteks kummine. See vähendab vigastusi võimalikul kukkumisel.

Testimisprotsess üleüldiselt võiks välja näha umbkaudu järgnev. Kõigepealt viia skooter testimisplatsile, see käivitada ning väga tõenäoline on, et masin käitub ebastabiilselt ning kukutab juhi maha. Seejärel tuleks sellest vajalikud järeldused teha, ühendada skooter arvutiga, muuta konfiguratsioonis vajaminevaid parameetreid uus programm mikroprotsessorisse laadida ning jälle katsetama asuda. Tõenäoliselt tuleb antud protsessi kümneid kordi korrata enne kui sobivad seaded leitakse, seetõttu oleks ilmselt otstarbekas kasutada sülearvutit, et seadistusi saaks koha peal kiiresti vastavalt vajadusele muuta.

Sobivad seaded leitud, saab skootriga realselt sõidule minna. Reaalsetes oludes sõitmise käigus võib kahtlemata tekkida ideid, kuidas seadeid paremaks muuta ning üleüldist sõidumugavust parandada. Nii on võimalik skooter kodus uuesti arvutiga ühendada ning teha seadetes muudatusi kuni tulemusega rahul ollakse.