



Latvijas  
Biozinātņu un  
tehnoloģiju  
universitāte

---


Reģ. Nr. 90000041898 // Lielā iela 2, Jelgava, LV-3001 // Tālr. +371 63 022 584 // [edokuments@lbtu.lv](mailto:edokuments@lbtu.lv) // [www.lbtu.lv](http://www.lbtu.lv)

## ATSKAITE

**Drona jeb bezpilota gaisa kuģa, jeb UAV prototipa izstrāde, kura darbības  
ilgtspēju nodrošina enerģija no ūdeņraža kurināmā elementiem**

Vaučeris Nr. VP-V-2022/45

Jelgava 2023



## ATTĒLU SARAKSTS

1.1. att. Drons ar elektrisko piedziņu - blokshēma.....	6
1.2. att. Drona piedziņa, izmantojot sajūgu mehānismu un iekšdedzes dzinēja piedziņu....	8
1.3. att. Enerģijas blīvuma salīdzinājums enerģijas nesējos .....	9
1.4. att. Vairāku iekšdedzes dzinēju piedziņa.....	9
1.5. att. Hibrīdpiedziņas risinājuma blokshēma – ar iekšdedzes dzinēju.....	10
1.6. att. Hibrīdpiedziņas risinājuma blokshēma – ar kurināmā elementu (degvielas šūnu) .....	10
1.7. att. HES Energy Systems multikopters.....	12
1.8. att. HyDrone 1800 .....	12
1.9. att. Hybrix 2.0 drons .....	12
2.1. att. Li-Po baterijas izlādes grafiks.....	20
2.2. att. Virtuālajā vidē simulētais drona lidojuma ilgums – 1.modelis .....	25
2.3. att. Virtuālajā vidē simulētais drona lidojuma ilgums – 2.modelis .....	26
3.1. att. Nepieciešamās jaudas un svara sakarība eksperimentālajā pētījumā .....	30
3.2. att. Simulācijas modelis lidojuma ilguma aprēķinam .....	31
3.3. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – konceptuālās skices.....	40
3.4. att. Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – konceptuālā skice.....	41
3.5. att. Sešmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – konceptuālā skice .....	41
3.6. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskā 3D skice.....	41
3.7. att. Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis .....	42
3.8. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis (1.variants) .....	42
3.9. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis (2.variants) .....	43
3.10. att. Strukturāls detaļu izvietojums – četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi .....	43
3.11. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - finālversija.....	44
3.12. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - finālversija – virtuālā vide.....	44
3.13. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - tehniskās pārveides skice.....	45
3.14. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - udeņraža piegādes cauruļvadu un pieslēgum skice.....	45
3.15. att. Li-Ion bateriju uzlādes stadijas.....	48
4.1. att. Dronu ražotāju tirgus daļas, 2021.gada 1.ceturksnis.....	49
4.2. att. Firmas Intelligent Energy udeņraža FC drons.....	50
4.3. att. Firmas Doosan Mobility Innovation udeņraža FC drons DS30W.....	50
4.4. att. Firmas Micromulticopter Aero Technology (MMC) udeņraža FC drons .....	51

# SATURS

ATTĒĻU SARAKSTS .....	2
1 Pētījuma aktualitāte .....	5
1.1 Hipotēze: .....	5
1.2 Tehniski ekonomiskā priekšizpēte .....	5
2 Īdejas prototipa izstrādes plāns .....	20
2.1 Pētījuma priekšmets .....	20
2.2 Pētījuma ierobežojumi .....	22
2.2.1 Bezpilota gaisa kuģa jeb UAV drošība .....	27
2.2.2 Pētījuma rezultāti .....	28
3 Tirgus izpēte un drona koncepcija (Tehniski ekonomiskā priekšizpēte) .....	29
3.1 Drona parametru aprēķini .....	29
3.1.1 Sakarība starp drona masu un nepieciešamo jaudu .....	29
3.2 Tehniskais projekts .....	33
3.3 Tehniskā projekta elementi .....	35
3.4 Īdejas drona pārbūves risinājumi .....	37
3.4.1 Īdejas drona prototipa projekts .....	38
3.4.2 Drona dzinēja salāgošana ar hibrīda kurināmā elementu/akumulatoru bateriju sistēmu .....	46
4 Vadošo iekārtu ražotāju izvērtējums .....	49
4.1.1 Iespējas un problēmas .....	51
4.2 Principi Īdejas ekonomiskās dzīvotspējas novērtēšanai. ....	51
5 Ekonomiskā analīze Īdejas droniem .....	54
5.1 Ekonomiskās lietderības aprēķins, lietojot NPV metodi. ....	55
5.1.1 Aprēķina soļi: .....	55
Literatūras avoti .....	57
Secinājumi .....	58
6 Pielikumi .....	59
6.1 Tehniskā projekta skices .....	59

6.1.1	Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – konceptuālā skice.....	59
6.1.2	Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – konceptuālā skice .....	60
6.1.3	Sešmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – konceptuālā skice.....	61
6.1.4	Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskā 3D skice.....	62
6.1.5	Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis .....	63
6.1.6	Sešmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis .....	64
6.1.7	Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis (variants).....	65
6.1.8	Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis (variants).....	66
6.1.9	Strukturāls detaļu izvietojums – četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi	67
6.1.10	Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - finālversija.....	68
6.1.11	Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - tehniskā skice .....	69
6.1.12	Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - udeņraža piegādes cauruļvadu un pieslēgum skice .....	70
6.1.13	Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - 3D simulācija.....	71

# 1 Pētījuma aktualitāte

Kopējā situācija dronu tirgū un saistītās problēmas.

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) jeb bezpilota lidaparātu pielietošana pēdējos gados strauji pieaug. Tie tiek izmantoti gan dažādos novērošanas, gan taktiskās plānošanas procesos. Šī tehnoloģija mūsdienās arvien vairāk tiek pielietota, lai palīdzētu risināt dažādus militārus un tautsaimniecības uzdevumus. UAV veidojies no angļu valodas saīsinājuma Unmanned Aerial Vehicle, kas tulkojumā nozīmē bezpilots gaisa kuģis (drons). Tāpat saīsinājums UAS cēlies no izteiciena Unmanned Aerial System, kas tulkojumā nozīmē bezpilota gaisa sistēma. Šī definīcija uzsver, ka šīm gaisa ierīcēm nav nepieciešams pilots uz klāja. UAV tiek klasificēti, pamatojoties uz augstuma diapazonu, izturību un svaru. Tos var klasificēt pēc pielietojuma veidiem – sacīkšu droni, droni, kas paredzēti filmēšanai/fotografēšanai, militāram pielietojumam paredzētie droni, transportēšanas un pārvadāšanas droni u.c.

## 1.1 Hipotēze:

Ar ūdeņradi darbināms bezpilota gaisa kuģis jeb UAV ir konkurētspējīgs kopējā dronu tirgū. Galvenā tā priekšrocība – spēja veikt 2-4 reizes ilgāku nepārtraukto lidojumu. Šis apstāklis ļauj pētāmās tehnoloģijas bezpilota lidaparātus efektīvāk izmantot gan tautsaimniecības, gan citās nozarēs, kur nepārtrauktā lidojuma ilgumam ir vadoša loma.

## 1.2 Tehniski ekonomiskā priekšizpēte

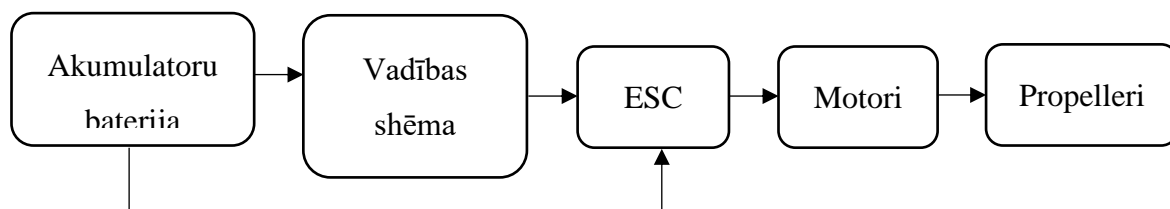
Tika veikta tehniski ekonomiskā priekšizpēte, kuras ietvaros bija jāizvērtē ražošanas potenciāls droniem ar celbspēju – 2kg, un papildus izvērtēt izgatavošanas izmaksas droniem ar celbspēju – 25 kg, 100 kg un 200 kg;

Mūsdienās droni, kas pazīstami arī kā daudzpropelleru lidaparāti, ir kļuvuši par ievērojamu tehnoloģisko sasniegumu, kas atšķiras no citiem lidaparātu veidiem. To popularitāte ir saistīta ar viņu iespaidīgo sniegumu, izcilu stabilitāti un pārsteidzoši kompaktajiem izmēriem. Droni ir ieguvuši plašu atzinību ne tikai kā radiovadāmi hobija lidaparāti, bet arī dažādās profesionālās nozarēs.

Tie ir spējīgi nodrošināt stabilu pacelšanos, nolaišanos un manevrēšanu, kas padara tos ideālus rīkus video un foto materiālu iegūšanai, teritoriju precīzai apsekošanai un citiem līdzīgiem uzdevumiem. Tomēr dronu lidojuma ilgums diemžēl ir ierobežots, parasti nepārsniedzot 25 minūtes. Pēc tam dronam ir jāatgriežas pie zemes, lai nomainītu bateriju vai uzlādētu to, saglabājot tā darbības spēju

Trīs galvenie dronu piedziņas veidi mūsdienās ir elektropiedziņas droni, droni ar iekšdedzes dzinēja piedziņu, un hibrīdpiedziņas droni.

Pašlaik visizplatītākais no tiem ir elektriskais piedziņas risinājums, kas izmanto elektriskos motorus un akumulatorus (skat. 1.1. att.). Šis risinājums ir populārs pateicoties tā priekšrocībām, piemēram, augstai efektivitātei, klusumam un videi draudzīgajām īpašībām. Elektriskās piedziņas droni ir viegli kontrolējami un tiem ir laba manevrēšanas spēja.



1.1. att. **Drons ar elektrisko piedziņu - blokshēma**

Dronos visbiežāk tiek izmantoti divi galvenie akumulatoru tipi - litija-jonu akumulatori un līdžstrāvas polimēru (LiPo) akumulatori. Šie akumulatori ir populāri savas augstās enerģijas blīvuma, zemas svara un labas veiktspējas dēļ.

Litija-jonu akumulatori ir izplatīti elektronikas ierīcēs, tostarp dronos. Tos raksturo lielisks enerģijas blīvums, kas ļauj uzglabāt lielu enerģijas daudzumu salīdzinoši nelielā un vieglā korpusā. Litija-jonu akumulatori ir stabili, ilgstoši lietojami, un tiem ir zema pašizlāde. Šīs īpašības ļauj tiem nodrošināt ilgu lidojuma laiku un uzticamu enerģijas avotu dronu darbībai.

Līdžstrāvas polimēru (LiPo) akumulatori ir vēl viens populārs akumulatoru tips dronu energopagādē. LiPo akumulatori ir ar ļoti augstu enerģijas blīvumu, un tiem ir spēja nodrošināt augstu izlādes strāvu. Tie ir elastīgi un var tikt izgatavoti dažādos izmēros un veidos, pielāgojoties drona konstrukcijai. LiPo akumulatori nodrošina augstu enerģijas padevi, kas ir svarīgi, lai barotu spēcīgus motorus un nodrošinātu labu lidojuma veiktspēju.

Vadības shēmas spēlē būtisku lomu dronu darbības nodrošināšanā, tās ir atbildīgas par signāla saņemšanu no lietotāja un sūtīšanu atpakaļ lidaparātam. Vienvadības shēmas piedāvā tikai signāla saņemšanas funkcionalitāti, jo tām trūkst papildu aprīkojuma, piemēram, video novērošanas kameras vai baterijas uzlādes līmeņa monitorings. Šādi vienkāršākie modeļi tiek izmantoti situācijās, kurās šāda papildu funkcionalitāte nav nepieciešama.

Vadības shēmas veic saņemtās informācijas apstrādi un nodod to jaudas pastiprinošajām iekārtām, kas pazīstamas kā elektroniskie ātruma regulatori (ESC). ESC regulē motoru jaudu, vadot tos, lai panāktu precīzu lidaparāta pacelšanos, nolaišanos un manevrēšanu, atbilstoši saņemtajiem signāliem. Šīs vadības shēmas darbojas kā starpnieki starp lietotāju un pašiem droniem, nodrošinot precīzu kontroli un koordināciju lidaparāta darbībai. ESC galvenā funkcija ir regulēt elektromotoru ātrumu un griezes momentu atbilstoši saņemtajiem vadības signāliem.

Kad no vadības shēmas tiek saņemts signāls, ESC apstrādā to un nosūta atbilstošu signālu motoriem, lai kontrolētu tos.

ESC sastāv no mikrokontroliera, kas ir atbildīgs par vadības signālu interpretāciju un motoru kontroli. Mikrokontrolieris lasa ienākošos signālus no vadības shēmas un, pamatojoties uz to saturu, nosaka motoru ātrumu un griezes momentu.

Lai kontrolētu motorus, ESC izmanto PWM (Pulse Width Modulation) signālu. Tas nozīmē, ka ESC maina impulsu platumu, kas nosaka motoru jaudu un ātrumu. Impulsu platumu kontrolējot, ESC var precīzi vadīt motorus, nodrošinot stabilu un pareizu drona pacelšanos, nolaišanos un manevrēšanu.

Turklāt ESC nodrošina arī citus svarīgus aspektus drona darbībā. Piemēram, tas var ietvert akumulatora uzlādes līmeņa monitoringu, kas sniedz informāciju par akumulatora stāvokli un pārtrauc motoru darbību, ja uzlādes līmenis ir pārāk zems, lai novērstu akumulatora bojāšanos. ESC var arī nodrošināt temperatūras monitoringu un aizsardzību pret pārplūdi, lai novērstu pārkaršanu vai pārslodzi motoros.

Dronos izmanto gan līdzstrāvas motorus ar sukām, gan bezsuku (brushless) elektromotorus.

Elektromotoriem ar sukām parasti ir zemāka enerģijas efektivitāte. Tas ir saistīts ar suku un komutatoru klātbūtni, kas rada berzi un tā rezultātā rodas mehāniski un elektriski zudumi. Suku motori ir īsmūžīgi un prasa papildus apkopes, jo sukas pakāpeniski nolietojas un prasa regulāru apkopi un nomaiņu. Neraugoties uz zemāko efektivitāti, suku motori joprojām ir izplatīti lietojumos, kur izmaksas un vienkāršība ir svarīgāki faktori nekā enerģijas efektivitāte.

Bezsku elektromotoru galvenās priekšrocības:

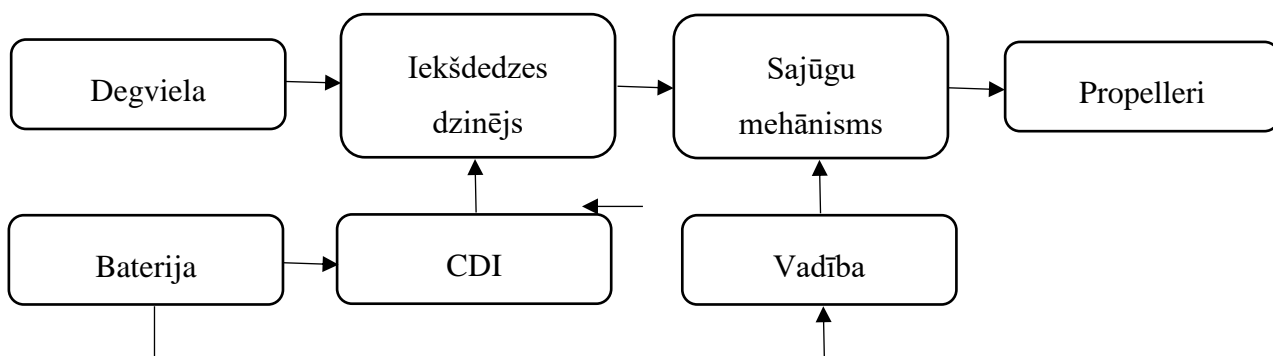
- Augsta efektivitāte – mazi berzes zudumi, augsta rotācijas frekvence.
- Augsta jaudas un masas attiecība: Tie spēj nodrošināt atbilstošu jaudu un propeller vilkmi, kas ir būtiski drona manevrēšanas spējām.
- Zema vibrācija: bezsku motoriem ir maza vibrācija, kas palīdz nodrošināt stabilu lidojumu
- Zems enerģijas patēriņš: Tie patērē maz enerģijas, kas nozīmē ilgāku lidojuma laiku un lielāku darbības laika ilgumu.

Bezsku elektromotoru galvenie trūkumi:

- Augstāka cena, kas var palielināt kopējā drona izmaksas.
- Nepieciešama elektroniskā vadība: Lai vadītu šos motorus, nepieciešama atbilstoša elektroniskā vadība, piemēram, ESC. Tas var prasīt papildu uzstādīšanas un konfigurēšanas laiku un resursus.

Otrs piedziņas risinājums ir iekšdedzes dzinējs, kas ir viens no agrīnajiem dronu piedziņas veidiem, ko ilgstoši izmantoja. Šis risinājums izmanto benzīna vai citu degvielu kā enerģijas avotu un iekšdedzes dzinēju, lai nodrošinātu griezes momentu propelleriem. Iekšdedzes dzinēja piedziņas droni ir spēcīgi un tiem ir lielāks lidojuma ilgums salīdzinājumā ar elektriskās piedziņas droniem. Tomēr tie ir skaļi un rada vairāk emisiju.

Šajā risinājumā kā enerģijas nodrošinātājs propelleriem tiek izmantots iekšdedzes dzinējs, kura radīto griezes momentu pārnes uz propelleriem caur sajūgu mehānismu. Sajūgu mehānisms tiek kontrolēts ar attiecīgu vadības ierīci, kas atbild par sajūgu ieslēgšanu vai izslēgšanu. Šī risinājuma blokshēma ir redzama 1.2. attēlā.



#### 1.2. att. Drona piedziņa, izmantojot sajūgu mehānismu un iekšdedzes dzinēja piedziņu

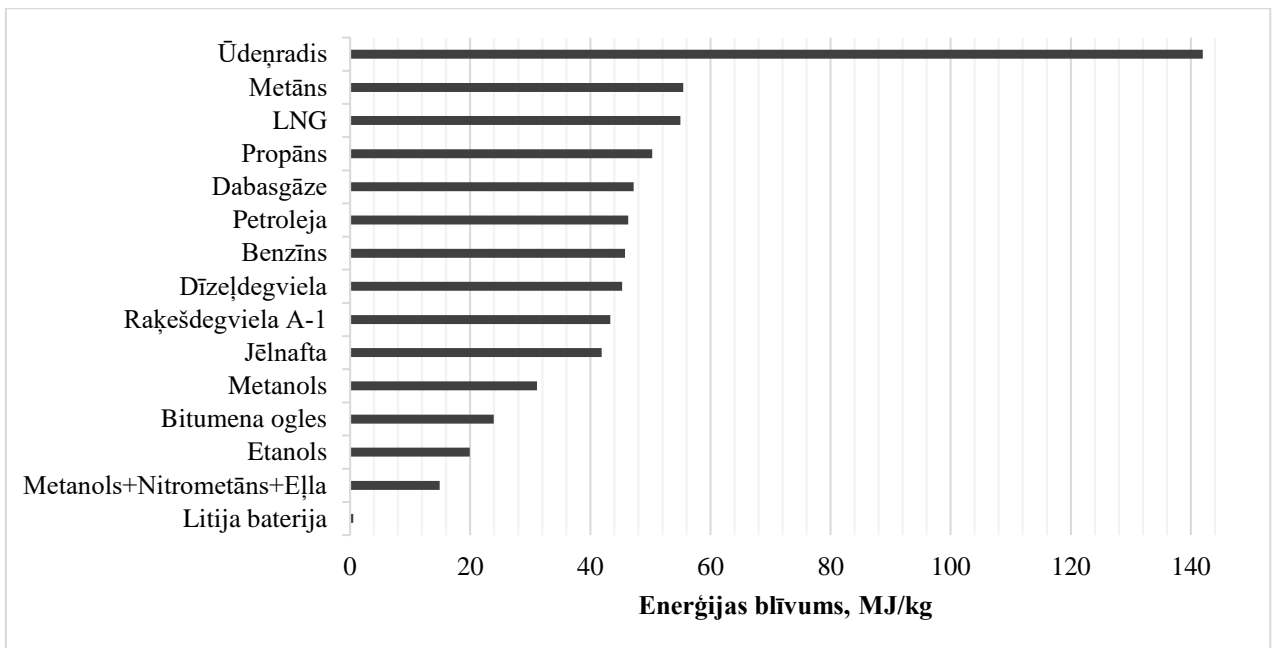
Ātruma regulēšana tiek panākta, izmantojot izslēdzamos sajūgus, kas savieno un atvieno vārpstas darba laikā. Propelleru apgriezienu devēji ļauj nodrošināt atgriezenisko saiti ar vadības sistēmu. Iekšdedzes dzinēja aizdedzi un enerģijas padevi nodrošina aizdedzes sistēma – parasti kapacitatīvā jeb CDI (Capacitor Discharge Ignition). Iekšdedzes dzinējam nepieciešamo degvielu nodrošina degvielas bāka, kurā tiek iepildīta degviela..

Pastāv arī risinājums, kurā izmanto tiešo saslēgumu – atsevišķu iekšdedzes dzinējus uz katru propelleru. Šāda veida konstrukcijās parasti tiek izmantoti kompakti augstas jaudas iekšdedzes dzinēji - mazi divtaktu dzinēji, kuru kloķvārpstas rotācijas ātrumu regulē ar karburatora droseles palīdzību.

Šādas piedziņas sistēmas priekšrocības ir :

- salīdzinoši liels enerģijas blīvums degvielai – iespēja veikt ilgstošus lidojumus (1.3. att.);





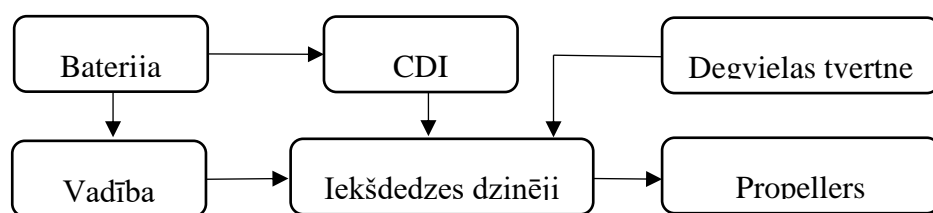
### 1.3. att. Energijas blīvuma salīdzinājums enerģijas nesējos

- ātra degvielas uzpildīšana – nav jāgaida, kad uzlādēsies baterija (gadījumos, kad nav rezerves baterijas);

Šādas piedziņas sistēmas trūkumi ir:

- iekšdedzes dzinējiem ir mehāniskā inerce – sareždīta vadība un mazinās dinamiskā stabilitāte;
- daudz kustīgo daļu – iespējami mehāniskie bojājumi un nodilums;
- mazos lidmodeļos, kuros izmanto viencilindra dzinējus ir paaugstinātas vibrācijas.

Blokhēma ar sastāvdaļu savstarpējo izvietojumu ir redzama 1.4. attēlā.



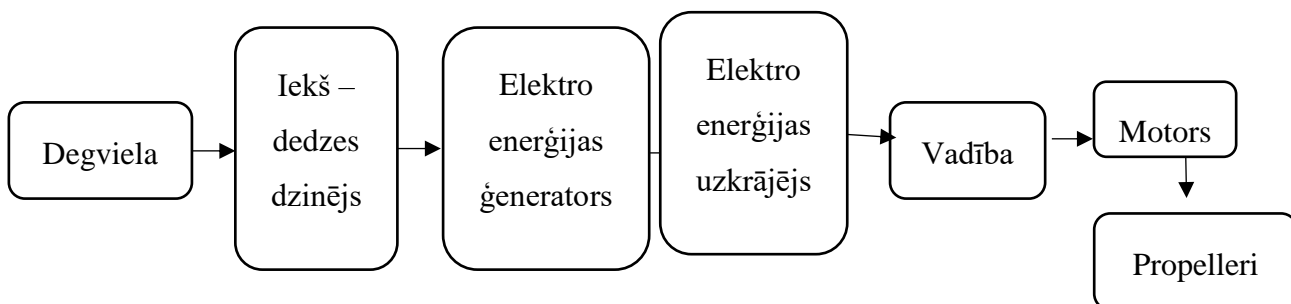
### 1.4. att. Vairāku iekšdedzes dzinēju piedziņa

Trešais piedziņas veids, kas tiek apskatīts šajā darbā, ir hibrīdpiedziņas risinājums. Hibrīdpiedziņas droni kombinē elektrisko un iekšdedzes dzinēju, izmantojot to priekšrocības, turklāt enerģija tiek uzkrāta divos veidos – elektroķīmiskajos amulatoros un degvielas bākā. Šāds risinājums var nodrošināt gan ilgāku lidojuma ilgumu, gan lielāku enerģijas efektivitāti. Hibrīdpiedziņas droni bieži tiek izmantoti, kad nepieciešama lielāka pacelšanās spēja vai ilgāks darbības laiks. Aviācijā atšķirībā no zemes transporta hibrīdpiedziņas ir ievērojami sarežģītāk pielietot divus enerģijas nesējus un divus enerģijas ģeneratorus, jo kopējais sistēmas svars

pieaug, līdz ar to pieaug arī nepieciešamā piedziņas jauda un enerģijas patēriņš. Tādēļ jāveic drona kopsvara un celtspējas izmaiņu aprēķins, ja tiek pielietota hibrīdsistēma.

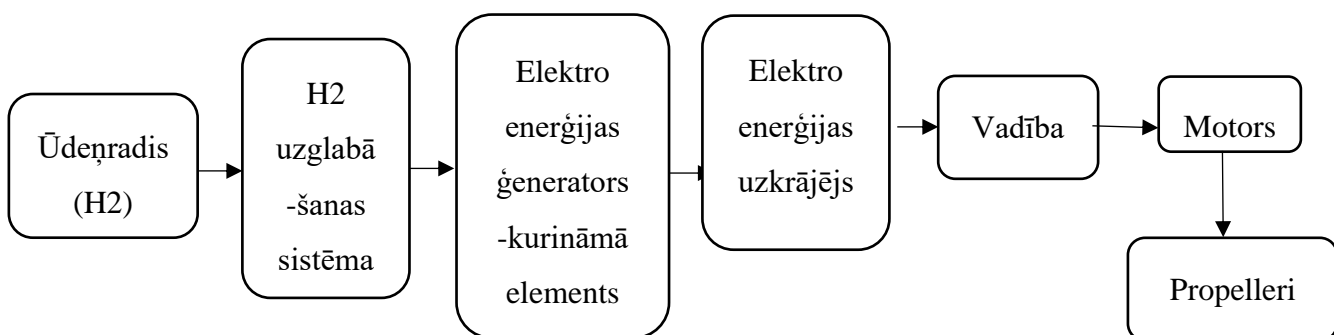
Ņemot vērā katras enerģijas konversijas metodes priekšrocības un trūkumus, ir nepieciešams izveidot sistēmu, kas balstās uz šo enerģijas konversijas metožu kombināciju.

Vispārināts virknes slēguma hibrīdpiedziņas risinājums, kuru visbiežāk izmanto dronos, ir parādīts 1.5. attēlā.



1.5. att. **Hibrīdpiedziņas risinājuma blokshēma – ar iekšdedzes dzinēju**

Vispārināts virknes slēguma hibrīdpiedziņas risinājums, izmantojot ūdeņradi kā degvielu, un kurināmā elementu (degvielas šūnu) kā elektroenerģijas ražošanas ierīci, parādīts 1.6. attēlā.



1.6. att. **Hibrīdpiedziņas risinājuma blokshēma – ar kurināmā elementu (degvielas šūnu)**

Dronu energoapgāde, izmantojot ūdeņradi kā degvielu, ir interesants un perspektīvs virziens.

Ūdeņradis piedāvā vairākas priekšrocības kā dronu enerģijas avots:

- Augsta enerģētiskā blīvums: Ūdeņradim ir augsta enerģētiskā blīvums salīdzinājumā ar konvencionālajām baterijām, kas ļauj veikt ilgākus lidojumus.
- Ātra uzpilde: Ūdeņradis var tikt uzpildīts ātrāk nekā bateriju uzlāde, samazinot laiku starp lidojumiem.
- Nulle emisijas: Ūdeņraža degvielas šūnas rada tikai ūdens tvaiku kā blakusproduktu, padarot tās vides draudzīgas.

Iespējamie izaicinājumi un aspekti:

- Drošība: Ūdeņradis ir ļoti viegli uzlismojošs, tādēļ nepieciešama pareiza apstrāde, uzglabāšana un drošības pasākumi.
- Infrastruktūra: Nepieciešama ūdeņraža infrastruktūras attīstība, tostarp ražošanas, uzglabāšanas un uzpildes iekārtu izveide, lai nodrošinātu plašu lietojumu.
- Izdevumi: Jārisina ūdeņraža ražošanas, uzglabāšanas un izplatīšanas infrastruktūras izmaksu jautājums, lai tas būtu ekonomiski izdevīgi.

Pētniecības un attīstības centieni ir vērsti uz:

- Degvielas šūnu efektivitātes uzlabošanu: Degvielas šūnu veiktspējas un enerģijas zudumu samazināšana, lai palielinātu kopējo efektivitāti.
- Ūdeņraža uzglabāšana un transportēšana: Drošība, viegla un kompakta uzglabāšanas risinājumu izstrāde efektīvai transportēšanai un uzstādīšanai.
- Sistēmas integrācija: Optimizēt ūdeņraža degvielas šūnu iekļaušanu drona platformās, nodrošinot saderību un optimālu veiktspēju.

Potenciālie ūdeņraža degvielas dronu pielietojumi:

- Garie lidojumi: Ūdeņraža degvielas šūnas ļauj veikt ilgstošus lidojumus, tāpēc tās ir piemērotas piemērojumiem, piemēram, gaisa uzraudzībai, inspekcijām un vides monitoringam.
- Attālinātas teritorijas un loģistika: Ūdeņraža degvielas droni var atbalstīt piegādes un loģistikas operācijas teritorijās ar ierobežotu infrastruktūru vai sarežģītu reljefu.

Notiekošie projekti un iniciatīvas:

- Vairāki pētniecības institūti, komercuzņēmumi un jaunuzņēmumi aktīvi izpēta un attīsta ūdeņraža dronu tehnoloģijas.
- Industrijas dalībnieku, valdības aģentūru un akadēmisko iestāžu sadarbība ir būtiska, lai virzītu ūdeņraža dronu tehnoloģijas attīstību.

Kurināmā elementi ir elektroķīmiskas ierīces, kas pārvērš ķīmisko enerģiju no degvielas un oksidētāja elektroenerģijā. Ūdeņradis ir visumā visizplatītākais elements, un gaisa skābeklis ir visizplatītākais oksidētājs uz Zemes. Pastāv vairākas kurināmā elementu tehnoloģijas, tostarp protonu apmaiņas membrāna (PEM), sārmzemju metālu (ALKALINE) un cieta oksīdu / keramikas degvielas elementi (SOFC un MCFC. PEM ir visplašāk izmantotā elektroķīmiskā šūna, ko izmanto dažādu transporta līdzekļu piedziņai, jo tai ir vislielākais jaudas blīvums.

Kurināmā elementi piedāvā vairākas priekšrocības salīdzinājumā ar baterijām dronu darbināšanai, piemēram:

- Lielāks enerģijas blīvums, kas nozīmē garāku lidojuma laiku un attālumu.
- Ātrāka degvielas uzpildīšana, kas samazina dīkstāves laiku un palielina produktivitāti.

- Mazāka ietekme uz vidi, jo vienīgais blakusprodukts ir ūdens.  
Daži ar kurināmā elementiem darbināmu prototipu dronu piemēri:
- Hikoķteris: HES Energy Systems izstrādāts multikoķters, kas var lidot 3,5 stundas, izmantojot saspiestu gāzveida ūdeņradi.



1.7. att. **HES Energy Systems multikoķters**

- HyDrone 1800: MMC izstrādāts drons ar fiksētiem spārniem, kas var lidot 4 stundas, izmantojot šķidro ūdeņradi.



1.8. att. **HyDrone 1800**

- Hybrix 2.0: uzņēmuma Quaternium izstrādāts hibrīds drons, kas var lidot 10 stundas, izmantojot litija bateriju un ūdeņraža degvielas elementu kombināciju.



1.9. att. **Hybrix 2.0 drons**

Degvielas šūnu tehnoloģijas ir daudzsološa alternatīva akumulatoriem dronu enerģijas piegādei, jo tās piedāvā lielāku enerģijas blīvumu, ilgāku lidojuma laiku un ātrāku degvielas uzpildīšanu. Kurināmā elementi ir elektroķīmiskas ierīces, kas pārvērš degvielas un oksidētāja ķīmisko enerģiju elektroenerģijā. Ūdeņradis ir visizplatītākā degviela, un gaisa skābeklis ir visizplatītākais oksidētājs<sup>3</sup>.

PEM ir visplašāk izmantotā elektroķīmiskā šūna, ko izmanto dronos, jo tai ir vislielākais jaudas blīvums<sup>3</sup>. PEM degvielas šūnas darbojas zemā temperatūrā (apmēram 80°C), un tām ir ātrs palaišanas laiks. Tomēr tiem ir arī daži trūkumi, piemēram, augstās izmaksas, zema izturība un jutība pret degvielas piemaisījumiem<sup>2</sup>.

Cietā oksīda kurināmā elementi (SOFC) ir vēl viens kurināmā elementu veids, ko var izmantot dronu enerģijas piegādei. SOFC darbojas augstā temperatūrā (apmēram 800°C) un var izmantot dažādas degvielas, piemēram, dabasgāzi, metanolu vai etanolu. SOFC ir augsta efektivitāte un ilgs kalpošanas laiks, taču tiem ir arī dažas problēmas, piemēram, lēns palaišanas laiks, siltuma pārvaldība un sarežģīta sistēmas integrācija<sup>1</sup>.

Hibrīda sistēma, kas apvieno kurināmā elementu un akumulatoru, var uzlabot drona piedziņas sistēmas veiktspēju un uzticamību. Akumulators var nodrošināt maksimālo jaudu augsta pieprasījuma lidojuma režīmos, piemēram, pacelšanās un kāpšanas laikā, savukārt degvielas šūna var nodrošināt vienmērīgu jaudu kruīza un lidojuma laikā. Akumulators var darboties arī kā rezerves akumulators degvielas elementa atteices vai zema degvielas līmeņa gadījumā<sup>2</sup>. Vairākos pētījumos ir novērtēta un salīdzināta dažādu kurināmā elementu tehnoloģiju un hibrīdsistēmu veiktspēja dronu enerģijas piegādei. Piemēram, Wang et al.<sup>3</sup> analizēja neliela drona veiktspēju, ko darbina PEM vai SOFC atsevišķi vai paralēli akumulatoram. Viņi atklāja, ka SOFC ir augstāka efektivitāte un mazāks nepieciešamais laukums nekā PEM, bet arī lielāks svars un mazāka jauda. Viņi arī atklāja, ka hibrīdsistēmai bija ilgāka lidojuma izturība un mazāks ūdeņraža patēriņš nekā atsevišķām degvielas šūnu sistēmām.

Vēl viens piemērs ir Boukoberine et al.<sup>4</sup>, kuri ierosināja enerģijas pārvaldības stratēģiju hibrīdsistēmai, kuras pamatā ir PEM un akumulators kvadrokopteram. Viņi izmantoja reālus lidojuma testa datus, lai optimizētu ūdeņraža patēriņu un barošanas sistēmas efektivitāti. Viņi atklāja, ka viņu stratēģija varētu ietaupīt līdz pat 18% ūdeņraža, salīdzinot ar parasto stratēģiju.

---

<sup>1</sup> Manufacturers of Fuel Cell Technology | Hydrogen Drone Fuel Cells. <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/fuel-cell-systems/Hybrid-fuel-cell-powered-drones-energy-management-...-ScienceDirect>

<sup>2</sup> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421001631>

<sup>3</sup> Evaluation of a small drone performance using fuel cell and battery .... <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721013755>

<sup>4</sup> The Future Of Fuel Cell-Powered Drones. <https://fuelcellworks.com/news/the-future-of-fuel-cell-powered-drones/>.

Noslēgumā jāsaprot, ka kurināmā elementu tehnoloģijas ir pievilcīgs variants dronu energoapgādei, jo var pagarināt lidojuma laiku un samazināt dronu ietekmi uz vidi. Tomēr joprojām ir dažas tehniskas problēmas un kompromisi, kas jārisina, pirms tos var plaši izmantot. Avots: saruna ar Bing, 29.06.2023.

Degvielas šūnu tehnoloģijām ir potenciāls mainīt bezpilota lidaparātu nozari, nodrošinot ilgāku izturību un darbības rādīšus dažādiem lietojumiem. Tomēr, lai samazinātu izmaksas un uzlabotu šo tehnoloģiju veiktspēju, ir vajadzīgi vairāk pētījumu un izstrādes.

Priekšrocības, izmantojot ūdeņradi kā degvielu droniem:

- lielāks dronam pieejamās enerģijas krātuves apjoms salīdzinājumā ar tradicionālām akumulatoru sistēmām
- ūdeņraža degvielas šūnas ir arī daudz vieglākas salīdzinājumā ar akumulatoriem – saglabāta augsta kravnesība, nodrošinot palielinātu lidojuma laiku;
- lietojot ūdeņradi kā degvielu, droni radīs mazāk emisiju, jo degvielas šūnas radītā emisija ir ūdens - tīra un videi draudzīga viela

Tomēr ir arī izaicinājumi, kas saistās ar ūdeņraža degvielas šūnām dronu energoapgādes sistēmās.

- Ūdeņraža uzglabāšana un transportēšana;
- Augstas ūdeņraža izmaksas un zema pieejamība.
- Kurināmā elementu sistēmas sarežģītība un svars, kas ietver degvielas tvertni, kurināmā elementu un papildus vadības bloku.
- Izturības un darbaspēju problēmas skarbos ekspluatācijas apstākļos (temperatūra, u.c.).

Ūdeņradis ir sprādzienbīstams un prasa speciālus drošības pasākumus, lai novērstu negadījumus. Turklāt ūdeņraža degvielas šūnas pašas ir dārgas un prasa precīzu kontroli, lai optimāli izmantotu enerģiju.

Otrs izaicinājums ir efektivitāte un enerģijas zudumi. Ūdeņraža degvielas šūnu darbības efektivitāte joprojām ir zemāka salīdzinājumā ar tradicionālām akumulatoru sistēmām, kas var ierobežot drona lidošanas laiku un veiktspēju. Turklāt enerģijas zudumi notiek ūdens elektrolīzes, degvielas šūnas un elektromotoru darbības procesos, kas var samazināt kopējo enerģijas pārveides efektivitāti.

Turklāt infrastruktūras attīstība ir būtiska, lai atbalstītu ūdeņraža degvielas šūnu dronu sistēmas. Nepieciešams izveidot uzpildes stacijas, kur droni varētu uzpildīt ūdeņraža degvielas tvertnes, kā arī nodrošināt uzglabāšanas un apstrādes iekārtas ūdeņraža ražošanai un attīrīšanai.

Lai pārvarētu šīs problēmas, daži pētnieki un ražotāji ir ierosinājuši hibrīdsistēmas, kas apvieno kurināmā elementus ar akumulatoriem un superkondensatoriem, lai optimizētu barošanas sistēmas veiktspēju un efektivitāti.

Neskatoties uz šiem izaicinājumiem, ūdeņraža degviela dronu energoapgādē piedāvā daudzas potenciālās priekšrocības, tostarp ilgāku lidošanas laiku, mazākas emisijas un iespēju izmantot vietējus resursus, piemēram, ūdeni. Turpmākā tehnoloģiju attīstība un infrastruktūras uzlabošana varētu palīdzēt pārvarēt šos izaicinājumus un nodrošināt efektīvu un ilgtspējīgu dronu energoapgādes sistēmu, izmantojot ūdeņradi kā degvielu.

Lai pilnveidotu dronu energoapgādi, izmantojot ūdeņradi kā degvielu, ir nepieciešama turpmāka tehnoloģiju attīstība. Viennozīmīgi svarīgs aspekts ir uzlabot ūdeņraža degvielas šūnu efektivitāti, lai palielinātu enerģijas konversijas procesa efektivitāti. Pētniecība tiek vērsta uz jaunu katalizatoru un membrānu izstrādi, kas varētu uzlabot degvielas šūnu sniegumu un palielināt to noturību.

Papildus tam ir nepieciešama tehnoloģiju attīstība, kas ļautu droši un efektīvi uzglabāt un transportēt ūdeņradi. Inovatīvas ūdeņraža tvertnes, kas nodrošina lielāku energoietilpību un drošu uzglabāšanu, ir nepieciešamas, lai nodrošinātu ilgāku lidošanas laiku. Tāpat arī jāattīsta kompakta un viegla infrastruktūra, piemēram, uzpildes stacijas, kas ļauj droniem ātri un efektīvi uzpildīt ūdeņraža degvielas tvertnes.

Turklāt vides faktori ir svarīgi ņemt vērā. Lai maksimāli izmantotu ūdeņraža degvielas potenciālu, nepieciešama videi draudzīga ūdens ieguve un attīrīšana, kā arī ūdens resursu ilgtspējīga pārvaldība. Turpmāka pētniecība jāveic arī attiecībā uz ūdeņraža ražošanas metodēm, kas izmanto atjaunojamo enerģiju, piemēram, saules enerģiju vai vēja enerģiju, lai samazinātu vides ietekmi un veicinātu ilgtspējīgu dronu darbību.

Šīs tehnoloģiju un infrastruktūras attīstības kopā ar vides apsvērumiem ir svarīgas, lai nodrošinātu ūdeņraža degvielas dronu energoapgādes sistēmas ilgtspējību un efektivitāti. Tikai turpinot pētniecību un attīstību šajā jomā, mēs varam gaidīt turpmāku progresu un inovācijas, kas nākotnē ļaus izmantot ūdeņradi kā efektīvu degvielu dronu lidojumiem.

Šeit ir vēl daži aspekti, kas ir svarīgi ņemt vērā, attīstot dronu energoapgādi, izmantojot ūdeņradi kā degvielu:

- Sistēmas efektivitāte: Lai nodrošinātu efektīvu energoapgādi, ir nepieciešams optimizēt visu sistēmu, ieskaitot ūdeņraža degvielas šūnas, enerģijas pārveidošanas un uzglabāšanas iekārtas, kā arī elektromotorus. Nepieciešama detalizēta izpēte, lai atrastu labāko veidu, kā sasniegt maksimālu enerģijas pārveidošanas efektivitāti un samazināt enerģijas zudumus.

- Dizains un izmērs: Lai droni būtu praktiski izmantojami un viegli pārnēsājami, ņemot vērā ūdeņraža degvielas šūnu un tvertnes, ir nepieciešams attīstīt kompakts un vieglus dizainus. Miniaturu un vieglu degvielas šūnu un enerģijas uzglabāšanas iekārtu izstrāde ir svarīga, lai palielinātu drona izturību un efektivitāti.
- Drošība: Ūdeņraža degvielas izmantošana prasa rūpīgu drošības novērtējumu un pasākumu īstenošanu. Jāņem vērā iespējamie risks un drošības aspekti, lai novērstu ūdeņraža noplūdes, sprādzienus vai citus avārijas gadījumus. Attiecīgās drošības standartu un regulējumu ievērošana ir būtiska, lai nodrošinātu drošu darbību.
- Ekonomiskā izmaksu efektivitāte: Lai dronu energoapgāde ar ūdeņradi būtu plaši izmantojama, tā jābūt ekonomiski izdevīgai. Nepieciešama turpmāka izpēte un tehnoloģiju attīstība, kas samazina sistēmas izmaksas, palielina tās darbības ilgspēju un padara to pieejamu plašākam lietotāju spektram.
- Regulējums un pieņemšana: Lai šāda veida dronu energoapgādes sistēmas kļūtu par realitāti, būs nepieciešama atbilstoša regulējuma izveide un valsts vai starptautiska līmeņa



1. tabula Degvielas šūnu tehnoloģiju salīdzinājums

Degv. šūnas veids	Darbības temperatūra	Izejas jauda	Efektivitāte	Pielietojums
Sārmu (AFC)	90 - 100°C	10 – 1000Kw	60 – 70% elektriskā	Militārā joma, Kosmosa izpēte
Fosfora skābes (PAFC)	150 - 200°C	50 kW – 1MW (250kW tipiskā)	80 – 85% kopējā (36 – 42% elektriskā)	Ražošana izplatīšanai
Polimēra Elektrolīta Membrānas (PEM)	50 - 100°C	<250kW	50 – 60% elektriskā	Rezerves enerģija, pārnēsājamā enerģija, enerģija nelielam patēriņam, transports
Lietā karbonāta (MCFC)	600 - 700°C	<1MW (250kW tipiskā)	85 % kopējā (60% elektriskā)	Elektroenerģijas pakalpojumi, liela apjoma patēriņiem
Cietā oksīda (SOFC)	650 - 1000°C	5kW – 3MW	85 % kopējā (60% elektriskā)	Papildus enerģija, Elektroenerģijas pakalpojumi, liela apjoma enerģijas ģenerēšana

Vislabākos rezultātus degvielas šūnu tipoloģijā dronu enerģijas nodrošināšanai ir protonu apmaiņas membrānas degvielas šūnas (PEMFC) un cietā oksīda degvielas šūnas (SOFC).

Protonu apmaiņas membrānas degvielas šūnas (PEMFC):

- ❖ Priekšrocības:
  - ❖ Ātra sākšanas un reakcijas laiks, piemērotas dinamiskai drona darbībai.
  - ❖ Augsts jaudas blīvums un efektivitāte, nodrošina pietiekamu enerģiju drona piedziņai.
  - ❖ Darbojas pie salīdzinoši zemām temperatūrām, ļaujot izveidot kompakts un viegls dizainus.
  - ❖ Piemērotas dažādiem pielietojumiem, tostarp transportam.
- ❖ Trūkumi:

- Nepieciešama tīra ūdeņraža degviela, kas ierobežo degvielas avotu iespējas.
- Jūtīgas pret piesārņojumu un prasa rūpīgu attīrīšanu.
- Salīdzinoši īss kalpošanas laiks salīdzinājumā ar citiem degvielas šūnu veidiem.

Cietā oksīda degvielas šūnas (SOFC):

❖ Priekšrocības:

- Augsta efektivitāte un degvielas pielāgojamība.
- Spēj izmantot dažādas degvielas, ieskaitot ūdeņradi, dabasgāzi un biogāzi.
- Piemērotas stacionārās enerģijas ražošanas lietojumiem.
- Ilgs kalpošanas laiks un izturība.

❖ Trūkumi:

- Nepieciešamas augstas darba temperatūras (parasti virs 800°C).
- Lēna startēšana un reaģēšanas laiks.
- Dārgi materiāli un ražošanas procesi.

Sārmzemju metālu degvielas šūnas (AFC):

❖ Priekšrocības:

- Augsta efektivitāte un jaudas blīvums.
- Izmanto nemetālisko katalizatoru, samazinot izmaksas.
- Darbojas ar ūdeņradi un citām degvielām, piemēram, amonjaku.

❖ Trūkumi:

- Nepieciešama tīra ūdeņraža degviela un kāliju hidroksīda elektrolīts.
- Jūtīgas pret CO<sub>2</sub> un citiem piesārņojumiem.
- Salīdzinot ar citiem degvielas šūnu veidiem, kalpošanas laiks ir īsāks.
- Ierobežots pielietojumu spektrs.

Tiešā metanola degvielas šūnas (DMFC):

❖ Priekšrocības:

- Vienkāršāka degvielas uzglabāšana

❖ Trūkumi

- Zemāka efektivitāte salīdzinājumā ar ūdeņraža degvielas šūnām.
- Metanola migrācija var samazināt veiktspēju.
- Katalizatora piesārņošana ar metanola nešķīstībām.
- Darbības izmaksas, saistītas ar metanola piegādi.

Izkausētu karbonātu degvielas šūnas (MCFC):

❖ Priekšrocības:

- Augsta efektivitāte, īpaši lielapjoma enerģijas ražošanai.

- Spēj izmantot dažādas degvielas, ieskaitot ūdeņrazi, dabasgāzi un biogāzi.
- Oglekļa dioksīdu var noņemt un izmantot procesā.
- ❖ Trūkumi:
  - Nepieciešamas augstas darba temperatūras (parasti ap 600-700°C).
  - Lēns startēšanas laiks un problēmas ar termisko vadību.
  - Pakļautas oglekļa noklājumiem un korozijai.
  - Ļoti svarīgi izvēlēties atbilstošu degvielu

Gan PEMFC, gan SOFC ir savas priekšrocības un trūkumi attiecībā uz dronu enerģijas nodrošināšanu. Kamēr PEMFC piedāvā ātru reakcijas laiku un augstu jaudas blīvumu, SOFC nodrošina degvielas elastību un ilgu kalpošanas laiku. Izvēle starp abiem tipiem ir atkarīga no konkrētām drona prasībām, piemēram, enerģijas pieprasījuma, darbības apstākļu un degvielas pieejamības faktoriem.

Iepriekšējā analīze rāda, ka propelleru piedziņu ir nepieciešams veidot ar bezsuku elektromotoriem. Lai elektromotorus nodrošinātu ar nepieciešamo elektroenerģiju, ir jāizmanto elektroenerģijas ģenerators, kurš izmanto kādu degvielu.

## 2 Īdenraža prototipa izstrādes plāns

### 2.1 Pētījuma priekšmets

Bezpilota lidaparāti pašreizējā laika posmā plaši tiek pielietoti dažādās nozarēs pateicoties to salīdzinoši zemajām ekspluatācijas izmaksām un ekspluatācijas vienkāršumam. Iegādājoties, bezpilota lidaparātu, cena ir daudz reiz zemāka par lidaparāta cenu, ko vada pilots atrodoties pašā lidaparātā.

Vadošā loma šeit ir tieši elektriskās piedziņas droniem, kam enerģijas avots ir daudzreiz uzlādējams akumulators. Taču dronu izstrādātāji piedāvā izmantot arī ar degvielu, dabasgāzi un ūdenradi darbināmus lidaparātus.

Visbiežāk pieminētais kritērijs, kuru ekspluatanti piemin kā faktoru, kas ierobežo drona veiktspēju, ir lidojuma ilgums, ko lielā mērā nosaka konkrētā litija-polimēru akumulatora kapacitāte. Jo lielāka akumulatora kapacitāte, jeb ietilpība, jo retāk konkrētajam lidaparātam būs jāatgriežas pie pilota, lai nomainītu izlādēto akumulatoru pret citu un efektīvāk lidošanas laiku varēs izmantot tiešai konkrēto uzdevumu izpildei.

Jāpiemin arī fakts, ka litija-jonu (Li-Po) akumulatoriem izlādes procesā spriegums samazinās gandrīz lineāri līdz brīdim, kad tajā atlikuši 20% no kopējās kapacitātes. Tam seko straujš sprieguma kritums. Kaut arī lielei daļai bezpilota gaisa kuģu ir iestrādātas drošības sistēmas, kas neļauj akumulatorus izlādēt līdz kritiski zēmam līmenim, ar šādu situāciju var nākties saskarties tuvojoties akumulatora mūža cikla beigām, kā arī pie zemām gaisa temperatūrām, kad, akumulatoram atdziestot, var notikt negaidīts sprieguma kritums (sk. Att. 2.1.).



2.1. att. Li-Po baterijas izlādes grafiks

Šo iemeslu rezultātā arvien lielāku uzmanību piesaista tehnoloģijas, kas ļautu izmantot ar ūdeņradi darbināmus dronus. Ja drona darbināšanai kā enerģijas avotu izmanto ūdeņradi, kas ir ļoti viegls, efektīvo lidošanas laiku izdotos palielināt 2-4 reizes. Piemēram, ja elektriskās piedziņas drons, veicot satiksmes kustības novērošanu no gaisa, spēj šo uzdevumu bez pārtraukuma pildīt 30 minūtes, tad ar ūdeņradi darbināms drons šo pat uzdevumu bez pārtraukuma spēs pildīt 60-120 minūtes.

Ja bezpilota lidaparātus klasificē pēc pielietojuma, tad visizplatītākie un pieejamākie ir starteru, jeb iesācēju droni. Kā jau vēsta nosaukums, šāda veida droni pilda apmācības funkcijas. Tos pārsvarā izmanto nepieredzējuši piloti, lai gūtu praktisku lidaparāta vadīšanas pieredzi.

*Starteru* droni parasti ir lētākie droni, un tiem ir augsta triecienizturība. Turklāt, lai samazinātu izmaksas, ir ierasts atrast iesācēju dronus ar suku motoriem. Tāpat šāda veida motori tiek izmantoti iesācēju dronos, jo tie nodrošina lielāku drošību un kontroli pār dronu, kad tas atrodas noteiktā attālumā un/vai augstumā. Tas padara šāda veida dronus par ideāliem modeļiem, lai sāktu darbu, kad pilots iegūst lidojumu pieredzi.

Kā nākamie jāpiemin *sacīkšu* droni. Parasti šie droni ir izgatavoti no izturīga, taču viegla materiāla, piemēram, oglekļa šķiedras. Tas ir atkarīgs arī no lieljaudas dzinējiem, kas ļauj tiem sasniegt līdz 200 kilometriem stundā. Lielo pārvietošanās ātrumu dēļ ir svarīgi, lai pilots, kas tos vada, būtu augsti kvalificēts. Lai manipulētu ar šiem droniem, ir vajadzīgas kameras, kas reāllaikā pārraida informāciju pilotam. Šāda veida kameru var saukt arī par FPV, kas pārraida uzņemtos attēlus un nosūta tos savam pilotam uz īpašām brillēm, kurās ir integrēti ekrāni. Šīs brilles ir diezgan līdzīgas tām, kuras tiek izmantotas virtuālajai realitātei. Patiesībā šīs brilles var radīt sajūtu, ka jūs lidojat drona iekšpusē.

Bez šaubām, viena no izplatītākajiem ir droni ar aerofotografēšanas un video ierakstīšanas funkciju, piemēram, lai attēlotu īpašu mirkli un augšupielādētu to sociālajos tīklos. Šī dažādība ļauj mums nokļūt no lētiem droniem, kuriem ir kameras ar WiFi savienojumu, kas pārraida uzņemtos attēlus uz mūsu mobilajām ierīcēm, līdz profesionālai lietošanai paredzētiem droniem, kuros ir iekļautas augstas izšķirtspējas kameras un stabilizatori filmēšanai. Pat kā sacīkšu droni, kuriem nepieciešamas FPV tipa kameras.

Svarīgu lomu bezpilota lidaparātu vidū ieņem arī *profesionālie* droni. Šiem droniem noteikti ir augstas kvalitātes kameras, lai uzņemtu attēlus un video ar labu izšķirtspēju. Tuāču tās var būt arī kameras ar siltuma spektru vai infrasarkanās gaismas uztveršanas iekārtas. Kad ir zināms drona pielietojums, pat tā struktūra vai karkass tiek izgatavots, ņemot vērā lietojumu un līdzekļus, kuriem ierīce ir jāsagatavo. Profesionālajiem bezpilota lidaparātiem ļoti reti pielieto suku jeb oglekļa motorus. Tiem ir bezsuku motori, lai varētu nodrošināt lielāku jaudu un

stabilitāti, kas ļauj pārvadāt piemēram kravas. Šādu lidaparātu izmēri var sasniegt pat divus metrus diametrā.

Visbeidzot jāpiemin *militārai* izmantošanai paredzētie droni. Tie ir zināmi ar saīsinājumu UCAV, kas cēlies no izteiciena Unmanned Combat Air Vehicle, kas burtiski tulkojams kā bezpilota kaujas gaisa transportlīdzeklis. Šāda veida droni ir tiek izmantoti kaujas laukā, lai sniegtu gaisa atbalstu vai izpildītu augsta riska misijas, kurās nav jāriskē ar cilvēku dzīvībām. Šos dronus pilotē no attāluma, jo militārpersonām ir jāievēro scenārijs, kurā drons atrodas, lai pieņemtu lēmumus un liktu dronam tos izpildīt. Ir gadījumi, kad bezpilota lidaparāta vadīšanai ir nepieciešami vairāk nekā divi operatori.

## 2.2 Pētījuma ierobežojumi

Pie pētījuma ierobežojumiem pirmkārt jāpiemin tas, ka aprēķini tika veikti pie nosacījuma, ka UAV darbību neietekmē dažādi ārējie apstākļi. Piemēram, vēja brāzmas, gaisa temperatūra, kas būtiski var ietekmēt drona veiktspēju. Lai praktiski pārbaudītu aprēķinus, būtu nepieciešama prototipa izgatavošana un testēšana dažādos ekspluatācijas režīmos un vides apstākļos.

Aprēķinot pašizmaksu, komponentu cena tika noteikta pēc šī brīža aktuālā piedāvājuma.

Pašlaik ražotāji dažādu uzdevumu veikšanai pārsvarā piedāvā pilnībā nokomplektētus bezpilota lidaparātus. Bezpilota lidaparātiem, kas darbināmi ar litija-polimēru (LiPo) akumulatoriem, tehniskie parametri atkarīgi no prasībām, kas ir svarīgas konkrētajā pielietojuma sfērā. Šādu lidaparātu cenu nosaka elektrodzinēju veids, jauda un skaits, iespēja pievienot tam dažādas papildiekārtas, attālums, kādā iespējams kontrolēt konkrēto bezpilota lidaparātu, efektīvais lidojuma ilgums, navigācijas sistēma utt. Šo apstākļu rezultātā dažādu modeļu cenu piedāvājuma amplitūda atrodas robežās 100 – 20 000 Eur.

Vadošie ražotāji piedāvā arī atsevišķas bezpilota lidaparātu komponentes, kas ļauj lietotājam pašam nokomplektēt konkrēto lidaparātu. Tas nepieciešams specifiskās situācijās, kad ražotāju piedāvātie bāzes modeļi nespēj veikt specifiskās prasības pietiekoši efektīvi. Piemēram, nespēj pacelt video kameru, kuras svars ir 12 kg, lai veiktu aerofilmēšanu. Tabulā 1 redzams kā atkarībā no lidaparāta jaudas palielinās lidojuma laiks un kā lidojuma ilgumu ietekmē lidaparātam pievienotās kravas svars.

Jāpiemin, ka šajā pētījumā tika apsvērta iespēja kā bezpilota lidaparātu izmantot kvadro, hekso un oktakoļus.

Kvadrakoļus droni ir viskomerciālākais dronu veids, kas ir kļuvis plaši izplatīts. Kvadrakoļus droniem, kā norāda to nosaukums, ir četri identiski dzinēji un četri dzenskrūves. Kvadrakoļus droniem un heksokoļus droniem var būt suku (ogļišu) motori, piemēram, rotaļlietu un

izklaides droniem, vai bezsuku motori, kas galvenokārt domāti profesionālai lietošanai paredzētos dronos.

Viena no izcilajām heksakopteru īpašībām ir stabilitāte, kas tiem piemīt lidojot, jo, ja kādā no dzinējiem rodas kļūme, joprojām būs iespējams stabilizēt ierīci ar pārējiem pieciem dzinējiem, lai tā nolaistos bez avarēšanas. Tas pats notiek, ja salīdzina oktokooptera dronu ar heksakopteru, jo vairāk motoru, jo stabilāk un drošāk drons vadāms. Heksakopteri tiek komplektēti tikai ar bezsuku tipa motoriem.

2.tabula Dronu Celtspējas salīdzinājums

Pašmasa	Lidaparātam pievienotās kravas svars	Lidojuma ilgums	Jauda
7kg	0,5 kg	100min	800W
	1 kg	60min	
25kg	1 kg	150min	2400W
	4 kg	120min	
	7 kg	90min	

7kg prototipa uzbūvei nepieciešamās komponentes (3.tabula)

3.tabula Dronu tehnoloģiju salīdzinājums

			Svars (g)	Svars kopā (g)	Eur	Eur
barošana	IE-SoarTM 800W			1700	15000.00	15000.00
	cilindrs 3.8L 1586Wh			2600	3000.00	3000.00
Baterija x 6	Litija Polimera 100 kwh		10	60	480.00	2880.00
kontrolieris	Pixhawk/Here 2 GPS OR DJI A3 controller			100	600.00	600.00
motori x 4	T-Motor MN501-S		170	680	99.00	396.00
motoru kontrolieri	T-Motor AIR 40A ESC		26	104	40.00	160.00
propeleri	T-Motor 18 x 6.1 propeller		37	148	100.00	200.00
rāmis	Tarot X4 (or similar) frame		1600 / 2200	1600	235.00	235.00
		Kopā		6992		22471.00

25kg prototipa uzbūvei nepieciešamās komponentes (4.tabula)

4.tabula Dronu komponentu salīdzinājums

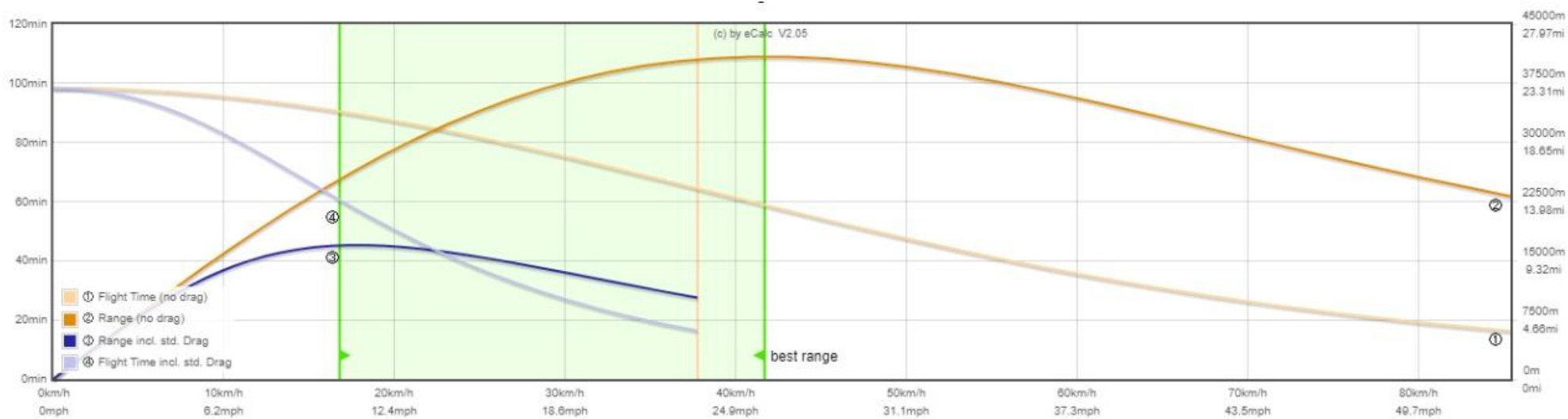
Pozīcija	Komponente		Svars (g)	Svars kopā (g)	Eur	Eur
barošana	IE-SoarTM 2.4kW			6185	25000.00	25000.00
	cilindrs 2 gab 9.0IL			8970	5000.00	5000.00

	3091Wh					
Baterija x 20	Litija Polimera 100 kwh		10	200	480.00	9600.00
kontrolieris	Pixhawk/Here 2 GPS OR DJI A3 controller			200	600.00	600.00
Motori	T-Motor U8 Lite KV100		243	1458	300.00	1800.00
motoru kontrolieri	T-Motor Flame 60A ESC		63	378	110.00	660.00
propeleri	T-Motor G28 × 9.2 propellers			600	398.00	1194.00
Rāmis	Gryphon HX-1600- VX, Gryphon LG- 3039HX landing gear		2200	2200	3300.00	3300.00
		Kopā		12191		47154.00

Bezpilota lidaparāta komponentu parametri tika noteikti izmantojot internetvietnē [www.ecalc.ch](http://www.ecalc.ch) sniegto aprēķinu metodiku.

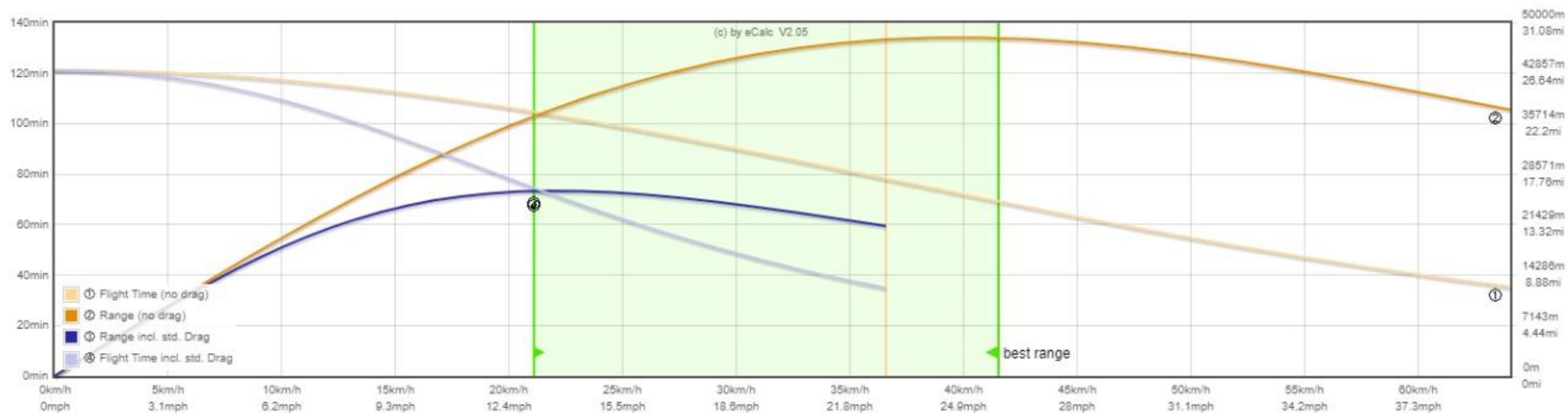
Rezultātā tika iegūts, ka 7kg dronam ar 0,5kg kravu, lidošanas laiks ir 100min, bet ar 1kg kravu – 40min. (2.2.att).





2.2. att. Virtuālajā vidē simulētais drona lidojuma ilgums – 1.modelis

Savukārt 19kg ar 6kg kravu, lidojuma laiks ir 75min, ja krava ir 4kg - 120min, ja 1kg - 130min (2.3. att.).



2.3. att. Virtuālajā vidē simulētais drona lidojuma ilgums – 2.modelis

### 2.2.1 Bezpilota gaisa kuģa jeb UAV drošība.

Lai atvieglotu ar ūdeņradi darbināma bezpilota gaisa kuģa vadību, līdzīgi kā bezpilota lidaparātiem, kas darbināmi ar LiPo akumulatoriem, tiks izmantoti dažādi sensori. Pateicoties tieši sensoriem, bezpilota gaisa kuģus ir tik vienkārši pilotēt. Lidojuma laikā lielāko daļu darbību veic lidaparāta kontrolieris, kas balstās uz sensoru sniegto informāciju.

Lai noteiktu kustību un palīdzētu stabilizēt lidojumu, bezpilota gaisa kuģī tiks izmantota inerciālā mērierīce (IMU). Tā apvieno divus sensorus – *žiroskopu*, kas mēra leņķiskās izmaiņas, nosakot bezpilota gaisa kuģa savēršanos jebkurā virzienā, un *akselerometru*, kas mēra lineāro paātrinājumu, nosakot ar kādu paātrinājumu pārvietojas bezpilota gaisa kuģis.

Drons tiks nokomplektēts arī ar *barometru*, kas nosaka gaisa spiedienu. Ar tāpalīdzību iespējams noteikt drona lidojuma augstumu attiecībā pret pacelšanās punktu. Apvienojot barometru ar IMU, drons spēs veikt horizontālu lidojumu, nemainot augstumu.

Magnetometrs, kas darbojas kā kompass, spēs noteikt drona vērsumu. Savukārt globālās navigācijas satelītu sistēmas (GNSS) uztvērēji mēra signālus no satelītiem (GPS, GLONASS, Galileo u.c.), lai noteiktu ģeogrāfisko lokāciju gan horizontālā, gan vertikālā plaknē.

Arvien biežāk tiek izmantoti arī citi sensori, kas sniedz papildus funkcijas un iespējas. Piemēram, optiskie sensori un distanci nosakošie sensori, kas ļauj izvairīties no šķēršļiem. Nepieciešamības gadījumā ir paredzēta iespēja pievienot arī tos.

RTH – Return to home funkcija, kad drons situācijā, ja pazaudē vadības signālu, pacelsies līdz noteiktajam augstumam un dosies uz iestatīto starta vietu.

7 kg ar LiPo akumulatoriem darbināma drona prototipa komponentu cena ir attēlota 5. tabulā.

5.tabula 7 kg drona komponentu cenas apskats

Pozīcija	komponente	Eur	Eur
kontrolleris	Pixhawk/Here 2 GPS OR DJI A3 controller	600.00	600.00
motori x 4	T-Motor MN501-S	99.00	396.00
motoru kontrolleri	T-Motor AIR 40A ESC	40.00	160.00
propeleri	T-Motor 18 × 6.1 propeller	100.00	200.00
rāmis	Tarot X4 (or similar) frame	235.00	235.00
		<b>Kopā</b>	<b>1591.00</b>

25kg ar LiPo akumulatoriem darbināma drona prototipa komponentu cena ir attēlota 6.tabulā.

6.tabula 25 kg drona komponentu cenu apskats

Pozīcija	komponente	Eur	Eur
kontrolleris	Pixhawk/Here 2 GPS OR DJI A3 controller	600.00	600.00
Motori	T-Motor U8 Lite KV100	300.00	1800.00
motoru kontrolleri	T-Motor Flame 60A ESC	110.00	660.00
propeleri	T-Motor G28 × 9.2 propellers	398.00	1194.00
Rāmis	Gryphon HX-1600-VX, Gryphon LG-3039HX landing gear	3300.00	3300.00
		Kopā	7554.00

Kopējās ražošanas izmaksas var noteikt pēc prototipa uzbūvēšanas un komplektēšanas tehnoloģiskā procesa izstrādes.

### 2.2.2 Pētījuma rezultāti

- No pētījuma laikā veiktajiem aprēķiniem var secināt, ka ar ūdeņraža degvielas šūnu darbināmu dronu priekšrocības salīdzinājumā ar litija-jonu akumulatoru droniem izpaužas pie nosacījuma, ka drona masa pārsniedz 7kg.
- Izmantojot ūdeņraža degvielas šūnas, dronam ar masu 25kg, lidojuma ilgums var pārsniegt 2 stundas.
- Lidojuma ilgums ir atkarīgs no derīgās kravas svara.
- Samazinot derīgās kravas svaru ir iespējams palielināt H<sub>2</sub> degvielas tvertni un paildināt lidojuma ilgumu.

### 3 Tirgus izpēte un drona koncepcija (Tehniski ekonomiskā priekšizpēte)

No pētījuma laikā veiktajiem aprēķiniem var secināt, ka ar ūdeņraža degvielas šūnu darbināmu dronu priekšrocības salīdzinājumā ar litija-jonu akumulatoru droniem izpaužas pie nosacījuma, ka drona masa pārsniedz 7kg. Izmantojot ūdeņraža degvielas šūnas, dronam ar masu 25kg, lidojuma ilgums var pārsniegt 2 stundas. Lidojuma ilgums ir atkarīgs no derīgās kravas svara. Samazinot derīgās kravas svaru ir iespējams palielināt H<sub>2</sub> degvielas tvertni un paildzināt lidojuma ilgumu.

#### 3.1 Drona parametru aprēķini

Šajā nodaļā tiks veikts aprēķins, lai noskaidrotu drona lidojuma ilgumu ar standarta – bateriju piedziņas sistēmu, kombinēto piedziņas sistēmu (baterija un iekšdedzes dzinējs ar elektroenerģijas generatoru), kā arī tiks apskatīts variants, kurā netiek izmantota baterija.

##### 3.1.1 Sakarība starp drona masu un nepieciešamo jaudu

Lai noskaidrotu šo sakarību, ir jāveic sarežģīts drona dinamisko īpašību aprēķins vai arī jāveic eksperimentālais mērījums, kurā tiek veikta jaudas mērīšana pakāpeniski palielinot lidaparāta svaru.. Eksperimentā tika izmantots DJI firmas Phantom3 Professional modelis ar maksimālo celbspēju 3700g, no kuriem 1280g ir pašmasa. Eksperimenta gaitā tika iegūti 7.tabulā redzami dati.

7. tabula **Lidojuma laikā uzņemtie dati**

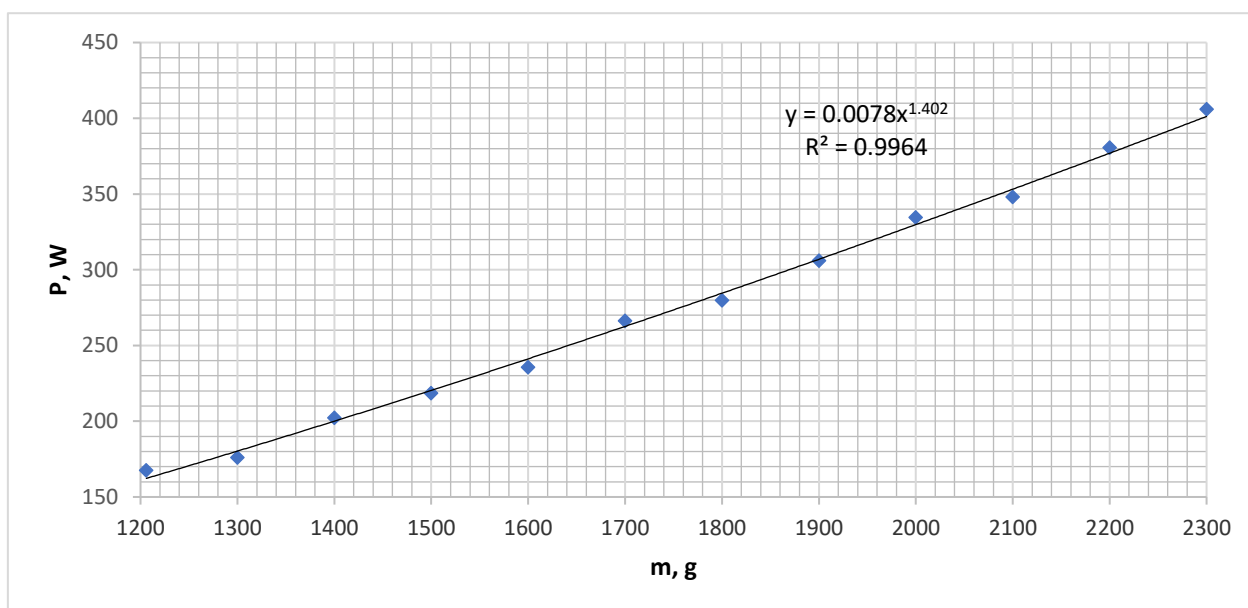
<b>Nr.p.k</b>	<b>m, g</b>	<b>U, V</b>	<b>I, A</b>	<b>P, W</b>	<b>t, min</b>
1	1206	16.1	10.4	167.4	24.4
2	1300	16.0	11.0	176.0	23.2
3	1400	15.8	12.8	202.2	20.2
4	1500	15.6	14.0	218.4	18.7
5	1600	15.5	15.2	235.6	17.3
6	1700	15.3	17.4	266.2	15.3
7	1800	15.2	18.4	279.7	14.4
8	1900	15.0	20.4	306.0	13.3
9	2000	14.8	22.6	334.5	12.2

10	2100	14.5	24.0	348.0	11.7
11	2200	14.2	26.8	380.6	10.7
12	2300	14.0	29.0	406.0	10.0

Pēc uzņemtajiem mērījumiem tika izveidots grafiks, kurā ir redzams kā izmainās patērētā jauda attiecībā pret pievienoto svaru (skatīt attēlu 3.1.). Eksperimentālajos mērījumos iegūtos datus teorētiski vislabāk apraksta jaudas raksturliktne ar determinācijas koeficientu  $R^2=0.9964$ .

Pēc grafika sastādīšanas tika iegūts vienādojums  $y = 0.0078x^{1.402}$ , kas tiek izteikts, kā:

$$P = 0.0078 * m^{1.402},$$



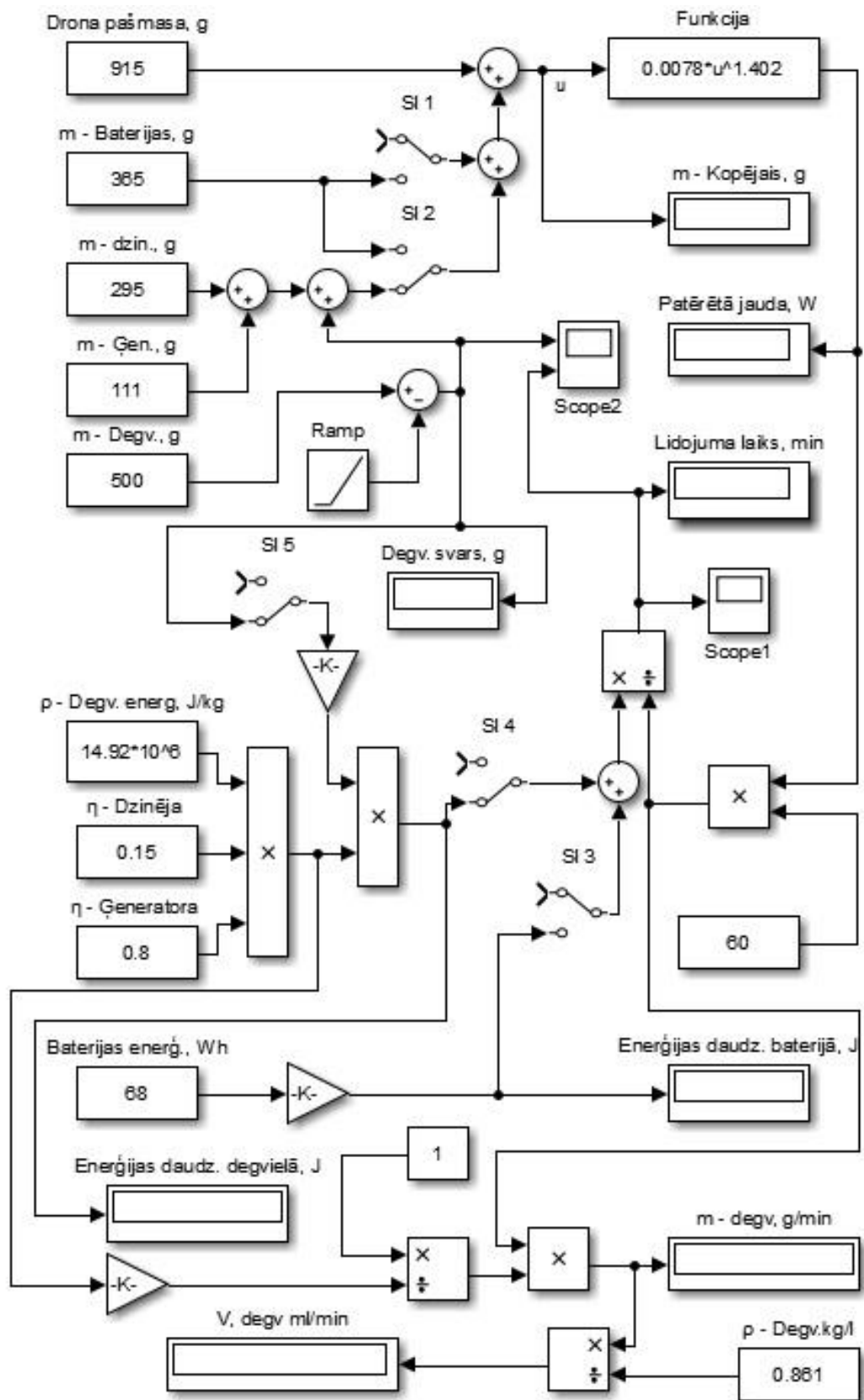
### 3.1. att. Nepieciešamās jaudas un svara sakarība eksperimentālajā pētījumā

Ar iegūtā vienādojuma palīdzību ir iespējams aprēķināt drona patērētās elektroenerģijas daudzumu pie konkrēta svara. Ievietojot šo vienādojumu simulācijas modelī pie attiecīga kopējā drona svara, ņemot vērā hibrīda piedziņai izmantoto enerģijas nesēju enerģijas blīvumu un enerģijas pārveides efektivitāti tiks aprēķināts drona lidojuma ilgums.

Lidojuma laika noteikšanai tika izmantota baterija ar sekojošiem parametriem:

- ietilpība – 4480mAh;
- nominālais spriegums – 15.2V;
- baterijas tips – Li-Po 4S;
- enerģija 68Wh;
- baterijas svars – 365g.

Pēc šādiem dotajiem lielumiem tika izveidots matemātiskais modelis, kurā ir iekļauts arī hibrīd risinājums. (skat 3.2. att.)



3.2. att. Simulācijas modelis lidojuma ilguma aprēķinam

Simulācijas modeļa pirmajā daļā tiek ievadīts svars katrai drona sastāvdaļai, t.i. drons un tā baterija tiek atdalīti atsevišķi.

Otrajā daļā tiek aprēķināta patērētā jauda un vienādojums tiek izteikts minūtēs, izmantojot konstanti “60”.

Trešajā daļā tiek aprēķināta enerģijas ietilpība degvielā un baterijā.

Apvienojot otro un trešo simulācijas daļu, tiek aprēķināts lidojuma laiks. Piektajā modeļa daļā tiek aprēķināts degvielas patēriņš ml/min un g/min. Pievienojot vai atvienojot baterijas svaru pirmajā modeļa daļā ar slēdzi 1, ir jāpievieno vai jāatvieno arī baterijas enerģija ar slēdzi 3. Visu iespējamo simulācijas variantu izejas dati ir apkopoti 3.2 tabulā.

3.2. tabula Simulācijas modeļa izejas lielumi

Režīms	Kopējais svars, g	Lidojuma laiks, min
Izmantojot baterijas enerģiju, bez degvielas enerģijas, bet ar hibrīda sistēmas svaru	2386	9.6
Izmantojot baterijas enerģiju bez hibrīda sistēmas degvielas svara	1886	13.4
Izmantojot baterijas enerģiju, bez hibrīda sistēmas un degvielas	1280	23
Izmantojot tikai degvielas enerģiju, līdz nesot bateriju, bet neizmantojot tās enerģiju	2386	35
Izmantojot degvielas enerģiju un baterijas enerģiju	2386	44
Izmantojot hibrīda sistēmu, bez baterijas	2021	44.4

Lidojuma ilguma izmaiņu var nolasīt no Osciloskopa (Scope1). Lidojuma ilguma izmaiņu attiecībā pret degvielas daudzumu var nolasīt no Osciloskopa (Scope2)

Lai aprēķinātu drona lidojuma ilgumu tiek izmantots vienādojums, kurš apraksta jaudu kā laika vienībā paveiktu darbu:

$$P = \frac{A}{t},$$

kur,  $P$  – jauda, W;

$A$  – paveiktais darbs, J;

$t$  – laiks, s.



Attiecīgi laiks tiek izteikts kā darba un jaudas attiecība:

$$t = \frac{A}{P}$$

Nepieciešamo jaudu nosaka pēc attēlā izveidotā funkcijas vienādojuma. Lai to izdarītu ir nepieciešams noskaidrot visu sastāvdaļu svaru. Izveidotajā modelī to veic ar šādu vienādojumu:

$$m_{\Sigma} = m_{FC} + m_b + m_{dz} + m_{ds} + m_{degv},$$

kur  $m_{\Sigma}$  – kopējais aprēķinā izmantotais svars, g;

$m_d$  – paša drona svars, g;

$m_b$  – baterijas svars, g;

$m_{FC}$  – degvielas elementa svars, g

$m_{ds}$  – degvielas tvertnes svars, g;

$m_{degv}$  – degvielas svars, g.

Šajā gadījumā, lai varētu veikt aprēķinus pie mainīgas lidaparāta konstrukcijas, tiek izveidots pievienojams un noņemams baterijas un ģenerācijas iekārtas svars. Ieslēdzot un izslēdzot slēdžus ir iespējams aprēķināt izmantot gan vienu gan abus enerģijas nesējus. Lidojuma ilguma aprēķināšanai tiek izmantota sekojoša formula:

$$t_{lid} = \frac{\rho_{e.n} * m_{e.n} * \eta_{es} * \eta_{FC}}{P_{pat}},$$

kur  $t_{lid}$  – lidojuma laiks, min;

$\rho_{e.n}$  – enerģijas blīvums nesējā, J/kg;

$m_{e.n}$  – enerģijas nesēja masa, g;

$\eta_{es}$  – elektroniskās sistēmas lietderības koeficients;

$\eta_{FC}$  – FC lietderības koeficients.

## 3.2 Tehniskais projekts

Drona pārbūve, lai tas darbotos ar ūdeņraža kurināmā elementiem, ir sarežģīts process, kas prasa rūpīgu plānošanu, inženierzinātnes un rūpīgu izpratni par darbības un drošības

apsvērumiem, kas saistīti ar ūdeņraža tehnoloģiju. Ir svarīgi sadarboties ar šīs jomas ekspertiem un visā procesā ievērot drošības standartus un noteikumus.

Šeit ir sniegts piemērs secīgai tehniskā projekta pasūtījuma izveidei.

#### 1. darbība. Priekšizpētes novērtējums

Mērķis: Novērtēt iespēju pārveidot kvadrokopteru par ūdeņraža kurināmā elementu jaudu. Uzdevumi:

- Novērtēt kvadrokoptera enerģijas vajadzības.
- Nosakiet ūdeņraža kurināmā elementu piemērotību konkrētajam pielietojumam.
- Analizējiet esošo kvadrokoptera komponentu saderību ar ūdeņraža pārveidi.

#### 2. darbība. Dizains un komponentu izvēle

Mērķis: Izstrādājat ūdeņraža degvielas šūnu sistēmu un atlasiet komponentus.

Uzdevumi:

- Dizaina modifikācijas, lai pielāgotos ūdeņraža kurināmā elementu skurstei.
- Izvēlieties atbilstošu kurināmā elementu sistēmu, ūdeņraža uzglabāšanas sistēmu un palīgkomponentus.
- Optimizējiet kvadrokoptera rāmi un piedziņas sistēmu svara sadalījumam.

#### 3. darbība: integrācija un prototipēšana

Mērķis: integrēt ūdeņraža degvielas šūnu sistēmu kvadrokopterā un izveidot prototipu.

Uzdevumi:

- Izveidojiet modificētā kvadrokoptera prototipu ar degvielas šūnu sistēmu.
- Kurināmā elementa vadības un vadības sistēmas izstrāde.
- Veiciet saderības pārbaudi, lai nodrošinātu pareizu integrāciju.

#### 4. darbība. Drošība un atbilstība normatīvajiem aktiem

Mērķis: Nodrošināt drošu darbību un atbilstību noteikumiem. Uzdevumi:

- Ieviest drošības pasākumus darbam ar ūdeņradi un noplūžu konstatēšanai.
- Pārbaudiet atbilstību aviācijas un drošības noteikumiem (FAA, EASA).

#### 5. darbība: testēšana un apstiprināšana

Mērķis: veikt plašu testēšanu, lai apstiprinātu ar ūdeņradi darbināma kvadrokoptera veikspēju un drošību. Uzdevumi:

- Veiciet zemes testus, lai novērtētu kurināmā elementa efektivitāti un stabilitāti.
- Veiciet lidojumu testus kontrolētā vidē.
- Pārbaudiet un vāciet datus par sistēmas veikspēju, tostarp energoefektivitāti un lidojuma parametriem.

#### 6. darbība: infrastruktūra un degvielas uzpilde

Mērķis: izveidot ūdeņraža uzpildes infrastruktūru. Uzdevumi:

- Iestatiet vai piekļūstiet uzticamam ūdeņraža piegādes avotam.
- Izstrādāt kvadrokoptera degvielas uzpildes protokolus un aprīkojumu.

7. darbība: datu vākšana un analīze

Mērķis: analizēt reālās pasaules veiktspējas datus. Uzdevumi:

- Apkopojiet datus par lidojuma diapazonu, izturību un efektivitāti.
- Analizējiet datus, lai noteiktu optimizācijas un uzlabojumu jomas.

8. darbība: mērogošana un lietojuma multiplicēšana

Mērķis: apsveriet jaunizveidotā drona izmantošanu īpašām misijām papildus plānotajam. Uzdevumi:

- Novērtējiet izveidotās tehnoloģijas mērogojamību citām dronu lietojumprogrammām.
- Izpētiet iespējas palielināt ražošanu, ja tas tiek uzskatīts par rentablu.

9. darbība: nepārtraukta uzlabošana

Mērķis: nepārtraukti pilnveidot tehnoloģiju. Uzdevumi:

- Iekļaujiet operatoru atsauksmes, lai uzlabotu dizainu un veiktspēju.
- Esiet informēts par sasniegumiem ūdeņraža kurināmā elementu tehnoloģijā.

### 3.3 Tehniskā projekta elementi

Elektriskā drona pārbūve un pilnveide, lai tas darbotos ar ūdeņraža kurināmā elementu barošanas bloku, ir sarežģīts tehnisks projekts, kas ietver vairākas galvenās sastāvdaļas un apsvērumus. Tā sastāvā jābūt sekojošiem elementiem un sastāvdaļām.

- Ūdeņraža degvielas šūnu sistēmas integrācija
  - Ūdeņraža kurināmā elementu sistēmas projektēšana un integrēšana drona energosistēmā.
  - Nodrošināt degvielas šūnas savietojamību un efektivitāti ar drona elektriskajām sastāvdaļām.<sup>5</sup>
- Ūdeņraža uzglabāšana
  - Piemērotas ūdeņraža uzglabāšanas tehnoloģijas izvēle, piemēram, augstspiediena tvertnes vai cietvielu uzglabāšana.
  - Izvēlētās uzglabāšanas metodes integrācija drona rāmī, vienlaikus nodrošinot drošību.<sup>6</sup>
- Kurināmā elementu jaudas elektronika

---

<sup>5</sup> "Hydrogen Fuel Cells for Small Unmanned Aerial Vehicles: A Review" by F.H. Alqahtani and M.F. Rahman (2021).

<sup>6</sup> "Hydrogen Storage Technologies for Mobile and Stationary Applications: Current State of the Art" by M. El-kharouf et al. (2020).

- Jaudas elektronikas izstrāde sprieguma un strāvas regulēšanai no kurināmā elementa atbilstoši drona prasībām.
- Jaudas pārvaldības sistēmas ieviešana netraucētai enerģijas pārejai.<sup>7</sup>
- Ūdeņraža degvielas uzpildes infrastruktūra
  - Dronas un efektīvas ūdeņraža uzpildes sistēmas izveide dronam.
  - Pārnēsājamas vai uz vietas esošās degvielas uzpildes iespēju apsvēršana.<sup>8</sup>
- Drošības un noteikumu ievērošana
  - Drošības standartu un noteikumu ievērošana ar ūdeņraža kurināmā elementiem darbināmiem bezpilota lidaparātiem, tostarp apstrādi, uzglabāšanu un transportēšanu.
  - Sadarbība ar attiecīgajām regulatīvajām iestādēm sertifikācijas jomā.<sup>9</sup>
- Svāra un līdzsvāra optimizācija
  - Rūpīgi apsveriet svāra sadalījumu un līdzsvāru, lai saglabātu stabilitāti un lidojuma veiktspēju.
  - Strukturālas modifikācijas, lai pielāgotos jaunajiem komponentiem.<sup>10</sup>
- Veiktspējas pārbaude un optimizācija
  - Stingra ar ūdeņraža kurināmā elementu darbināma drona pārbaude lidojuma veiktspējai, izturībai un efektivitātei.
  - Komponentu un sistēmu iteratīva optimizācija maksimālai veiktspējai.<sup>11</sup>
- Ietekmes uz vidi novērtējums
  - Novērtējiet un kvantificējiet ar ūdeņraža kurināmā elementiem darbināma drona izmantošanas ieguvumus videi salīdzinājumā ar tradicionālajiem akumulatoriem.
  - Apsveriet dzīves cikla analīzi un oglekļa pēdas samazināšanu.<sup>12</sup>
- Izmaksu analīze
  - Novērtējiet kopējās ūdeņraža kurināmā elementa drona atjaunošanas, darbības un apkopes izmaksas.
  - Salīdziniet izmaksu efektivitāti ar citiem enerģijas avotiem.<sup>13</sup>
- Dokumentācija un atskaites

---

<sup>7</sup> "Fuel Cell Fundamentals" by Ryan P. O'Hayre, Suk-Won Cha, et al. (2016).

<sup>8</sup> "Hydrogen Infrastructure" by Paul D. Rimmer (2018)

<sup>9</sup> "Safety of Hydrogen Systems: Accident Prevention, Emergency Response, and Special Programs" by T. H. Quintiere (2009).

<sup>10</sup> "Aircraft Design: A Conceptual Approach" by Daniel P. Raymer (2018).

<sup>11</sup> "Modeling and Control of Fuel Cells: Distributed Generation Applications" by M. H. Nehrir and C. Wang (2009).

<sup>12</sup> "Environmental Life Cycle Assessment of Hydrogen Fuel Cell and Diesel Trucks" by S. Park et al. (2016)

<sup>13</sup> "Cost Analysis and Policy Implications in Fuel Cell Vehicles" by C. Yang et al. (2019).

- Saglabājiet rūpīgu dokumentāciju par visu atjaunošanas procesu, tostarp projekta specifikācijas, testu rezultātus un drošības protokolus.
- Sagatavojiet visaptverošu ziņojumu, kurā apkopoti projekta rezultāti.<sup>14</sup>

### 3.4 Ūdeņraža drona pārbūves risinājumi

Drona pāreja no akumulatora enerģijas uz ūdeņraža kurināmā elementu jaudu ietver vairākus soļus, tostarp konstrukcijas modifikācijas, sistēmas integrāciju un drošības apsvērumus. Tālāk ir sniegts pārskats par galvenajiem soļiem, kas saistīti ar drona atjaunošanu ūdeņraža kurināmā elementu jaudai:

- Iespējamības novērtējums:

Novērtējiet iespēju pārveidot dronu par ūdeņraža kurināmā elementu jaudu. Apsveriet tādus faktorus kā misijas prasības, kravnesība un pieejamā infrastruktūra ūdeņraža piegādei.

- Dizaina modifikācijas:

Pārveidojiet drona enerģijas sistēmu, lai pielāgotos ūdeņraža kurināmā elementam, kas ietver rāmja, piedziņas sistēmas un jaudas sadales modifikācijas.

- Ūdeņraža degvielas šūnu sistēmas izvēle:

Izvēlieties piemērotu ūdeņraža degvielas šūnu sistēmu, pamatojoties uz drona jaudas vajadzībām, izmēru un svara ierobežojumiem. Apsveriet tādus faktorus kā kurināmā elementu efektivitāte un ūdeņraža uzglabāšana.

- Ūdeņraža uzglabāšana un izplatīšana:

Izstrādājiet un integrējiet ūdeņraža uzglabāšanas sistēmu, kas ir savietojama ar drona izmēra un svara ierobežojumiem. Tas var ietvert augstspiediena vai cietvielu ūdeņraža uzglabāšanas metodes.

- Sistēmas integrācija:

Integrējiet ūdeņraža kurināmā elementu sistēmu dronā, tostarp degvielas elementu skursteni, ūdeņraža krātuvi un nepieciešamos vadības un uzraudzības komponentus.

- Kontroles un vadības sistēmas:

Izstrādāt vai pārveidot kontroles un vadības sistēmas, lai nodrošinātu drošu un efektīvu degvielas šūnas darbību, tostarp jaudas regulēšanas, palaišanas un izslēgšanas procedūras.

- Drošības pasākumi:

Ieviesiet drošības protokolus ūdeņraža degvielas lietošanai un uzglabāšanai, jo ūdeņradis ir uzliesmojošs. Tas ietver noplūdes noteikšanas un avārijas izslēgšanas procedūras.

- Testēšana un apstiprināšana:

---

<sup>14</sup> "Engineering Documentation Control Handbook" by Frank B. Watts (2019).

Veiciet plašu testēšanu, lai apstiprinātu ar ūdeņradi darbināma drona veiktspēju, efektivitāti un drošību. Pārlicinieties, vai pārveidotais drons atbilst ekspluatācijas prasībām.

- Lidojuma pārbaude:

Veiciet lidojuma testus kontrolētos apstākļos, lai novērtētu drona veiktspēju, lidojuma laiku un izturību ar ūdeņraža degvielas šūnu sistēmu.

- Efektivitātes optimizācija:

Nepārtraukti uzlabojiet sistēmu optimālai efektivitātei, ņemot vērā tādus faktorus kā ūdeņraža patēriņa līmenis, enerģijas reģenerācija nolaišanās laikā un kopējais lidojuma diapazons.

- Infrastruktūras apsvērumi:

Nodrošināt piekļuvi uzticamam ūdeņraža avotam, kas var ietvert piegādes ķēdes izveidi vai nodrošināšanu ūdeņraža uzpildīšanai.

- Atbilstība normatīvajiem aktiem:

Ievērojiet vietējos un valsts noteikumus, kas attiecas uz ūdeņraža uzglabāšanu, transportēšanu un dronu darbībām. Iegūstiet visas nepieciešamās atļaujas vai sertifikātus.

- Apkope un apmācība:

Izstrādāt ūdeņraža degvielas šūnu sistēmas apkopes procedūras un nodrošināt apmācību dronu operatoriem un apkopes personālam.

- Uzraudzība un datu vākšana:

Ieviesiet sistēmas, lai uzraudzītu drona veiktspēju un apkopotu datus par degvielas elementu efektivitāti, apkopes vajadzībām un vispārējo lidojumu statistiku.

- Izmaksu un ieguvumu analīze:

Veiciet izmaksu un ieguvumu analīzi, lai novērtētu ar ūdeņradi darbināma drona ekonomisko dzīvotspēju, ņemot vērā tādus faktorus kā sākotnējais ieguldījums, ekspluatācijas izmaksas un iespējamie ieguvumi (piemēram, paplašināts lidojuma diapazons).

- Izvietošana un mērogošana:

Kad ar ūdeņradi darbināmā drona prototips ir veiksmīgi izstrādāts, apsveriet izvietošanu konkrētām misijām vai lietojumprogrammām un izpētiet iespējas palielināt ražošanu, ja tas tiek uzskatīts par rentablu.

Nepārtraukti meklējiet iespējas uzlabot drona dizainu, efektivitāti un drošību, pamatojoties uz reāliem veiktspējas datiem un operatoru atsauksmēm.

#### 3.4.1 Ūdeņraža drona prototipa projekts

Lai izstrādātu ar ūdeņraža degvielas šūnu darbināmu kvadrokopteru, nepieciešamas konstruktora un dizainera zināšanas, lai izveidotu sākotnējo dizainu un skices. Šis novatoriskais kvadrokopters kā primāro enerģijas avotu izmantos ūdeņraža kurināmā

elementus, piedāvājot paplašinātu lidojuma diapazonu un uzlabotu ilgtspējību. Lūdzu, skatiet tālāk norādīto uzdevumu un ierobežojumu sarakstu šajā projektēšanas fāzē. Uzdevumi:

1. Konceptuālais dizains:

Izstrādāt ar ūdeņraža kurināmā elementu darbināma kvadrokoptera konceptuālu dizainu, ilustrējot tā vispārējo struktūru, galvenās sastāvdaļas un ūdeņraža kurināmā elementu kaudzes, uzglabāšanas un piedziņas sistēmas izvietojumu.

2. Konfigurācijas izkārtojums:

Izveidot kvadrokoptera sastāvdaļu izkārtojumu, skaidri parādot ūdeņraža degvielas elementu skursteņa, ūdeņraža uzglabāšanas, elektromotora, dzenskrūvju un vadības sistēmu izvietojumu.

3. Energosistēmas integrācija:

Sniegt skices, kurās sīki aprakstīts, kā ūdeņraža kurināmā elementu sistēma integrējas ar kvadrokoptera jaudas sadali, tostarp strāvas kabeļi un savienojumi.

4. Aerodinamiskie apsvērumi:

Iekļaut konstrukcijā aerodinamiskos pamatprincipus, koncentrējoties uz kvadrokoptera formu, rotoru izvietojumu un visām nepieciešamajām aerodinamiskajām īpašībām.

5. Drošības līdzekļi:

Dizainā iezīmēt drošības elementus un avārijas izslēgšanas mehānismus, uzsverot drošu apiešanos ar ūdeņradi un noplūžu vai ugunsgrēku novēršanu.

6. Svara sadalījums:

Izveidot skices, kas parāda, kā svara sadalījums ir līdzsvarots kvadrokopterā, nodrošinot stabilitāti lidojuma laikā.

7. Ārējais izskats:

Iesniegt uzmetuma skices, kas attēlo kvadrokoptera ārējo izskatu, uzsverot estētiku un zīmola apsvērumus.

Ierobežojumi:

• Svara ierobežojums:

Lai nodrošinātu optimālu lidojuma veiktspēju, kvadrokoptera kopējais svars, ieskaitot ūdeņraža degvielas šūnu sistēmu, nedrīkst pārsniegt [norādīt svara ierobežojumu] kg.

• Izmēra ierobežojumi:

Kvadrokoptera kopējiem izmēriem ir jāatbilst maksimālajam garumam, platumam un augstumam [norādīt izmērus] cm, lai nodrošinātu pārnesamību un ērtu lietošanu.

• Ūdeņraža drošība:

Ūdeņraža uzglabāšanas un kurināmā elementu sastāvdaļām jāatbilst stingriem drošības standartiem, un konstrukcijā jāiekļauj līdzekļi, kas novērš ūdeņraža noplūdi vai sadegšanu.

- Lidojuma diapazona prasība:

Ņemot vērā ekspluatācijas prasības, projektā būtu jātiecas uz minimālo lidojuma diapazonu [norādīt diapazonu] kilometrus ar vienu ūdeņraža kurināmā elementa uzlādi.

- Atbilstība normatīvajiem aktiem:

Nodrošināt, lai dizains atbilstu attiecīgajiem aviācijas noteikumiem un drošības standartiem, tostarp tiem, kas saistīti ar ar ūdeņradi darbināmiem gaisa kuģiem (piemēram, FAA, EASA).

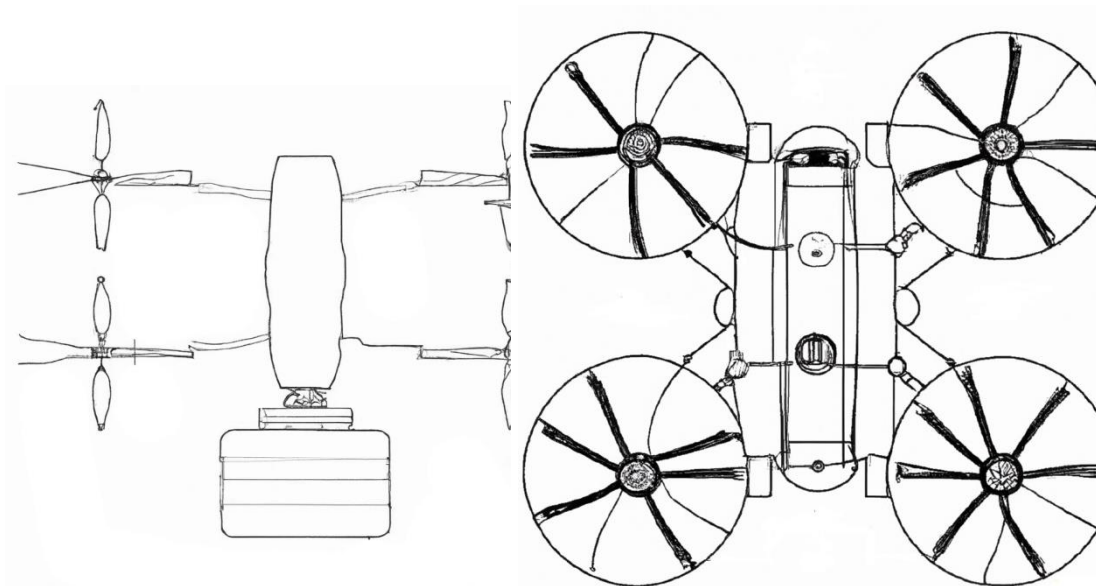
- Izmaksu ierobežojumi:

Projektēšana noteiktā budžeta ietvaros prototipa izstrādei, ņemot vērā rentablus materiālus un sastāvdaļas.

Konceptuālais pilnveidotā drona tehniskā projekta dizains parādīts .att un Pielikumā.

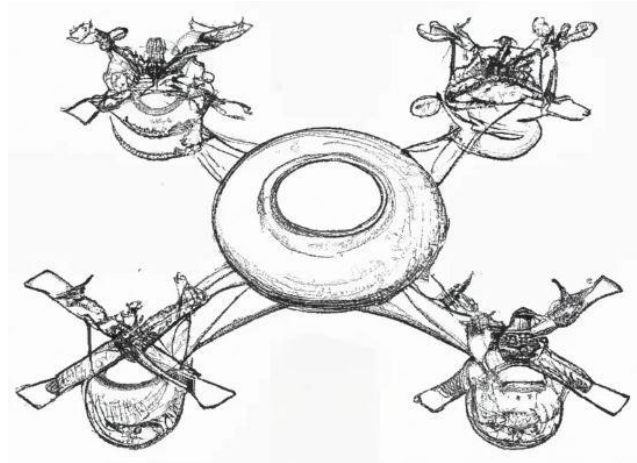
Dizaineriem tika dots uzdevums izveidot konceptuālu dizainu. Tika izveidotas konceptuālās skices divu veidu droniem – ar cilindrisku H2 uzkrāšanas tvertni, un ar toroidālu H2 uzkrāšanas tvertni (toroidālā tvertne ir konstruktīvi labāk balansējama drona koncepcijā).

Dizaina pilnveides procesā tika izveidoti konceptuālie modeļi cilindriskajai H2 tvertnei, lai varētu tikt novērtēti konstrukcijas risinājumi.

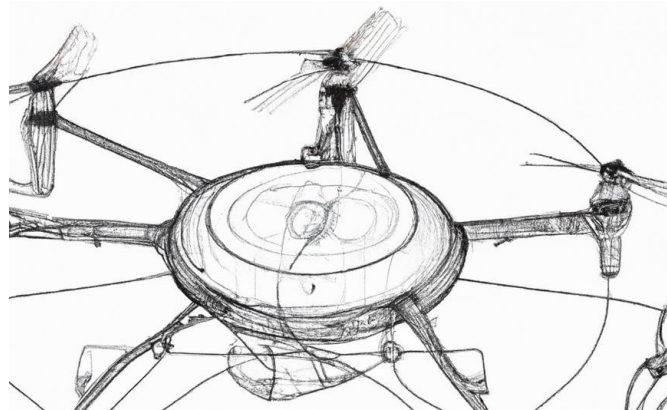


3.3. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – konceptuālās skices





3.4. att. Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – konceptuālā skice



3.5. att. Sešmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – konceptuālā skice



3.6. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskā 3D skice



3.7. att. Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis



3.8. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis (1.variants)



3.9. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis (2.variants)

Pēc dizainisko koncepciju izvērtēšanas tika lemts veikt četrmotoru drona ar cilindrisku H2 uzkrāšanas tverni detalizētas konstrukcijas izstrādi. Tika izveidota virtuālā detalizācija šai drona versijai (skat. 3.3. – 3.9. att.).



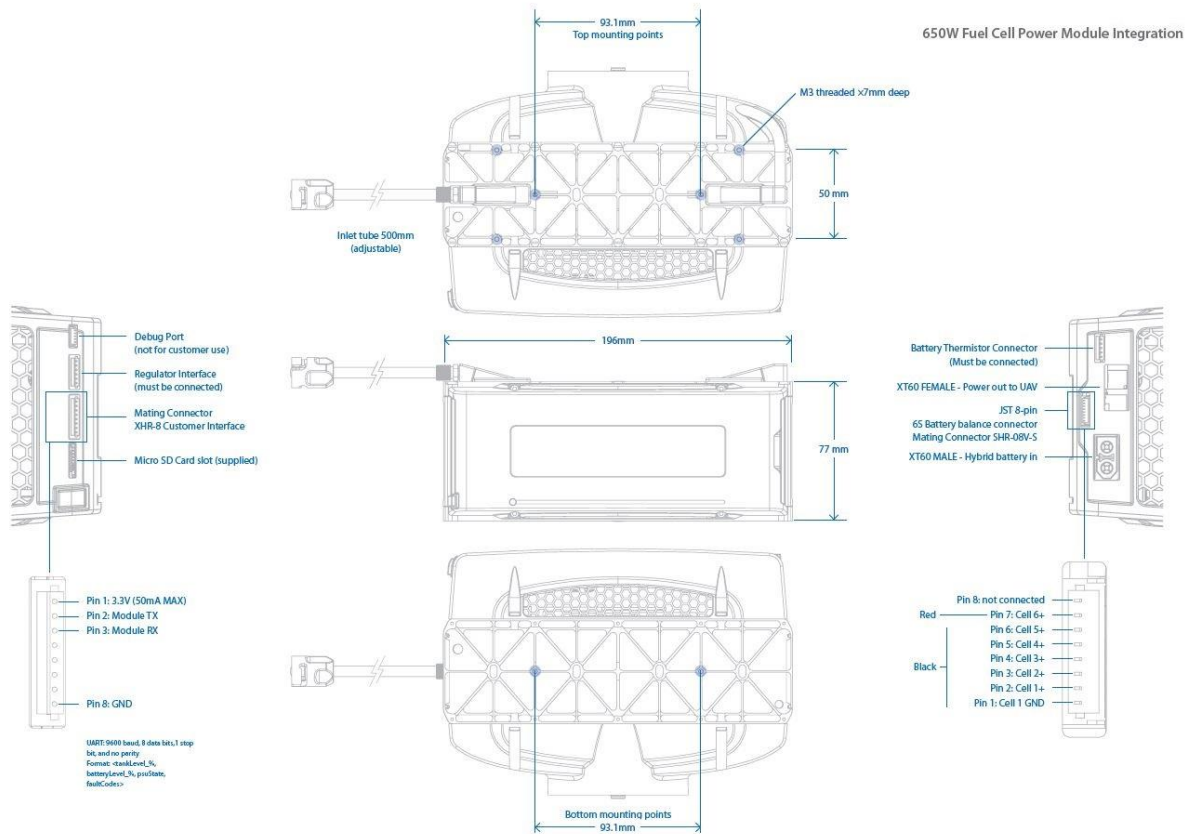
3.10. att. Strukturāls detaļu izvietoījums – četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi



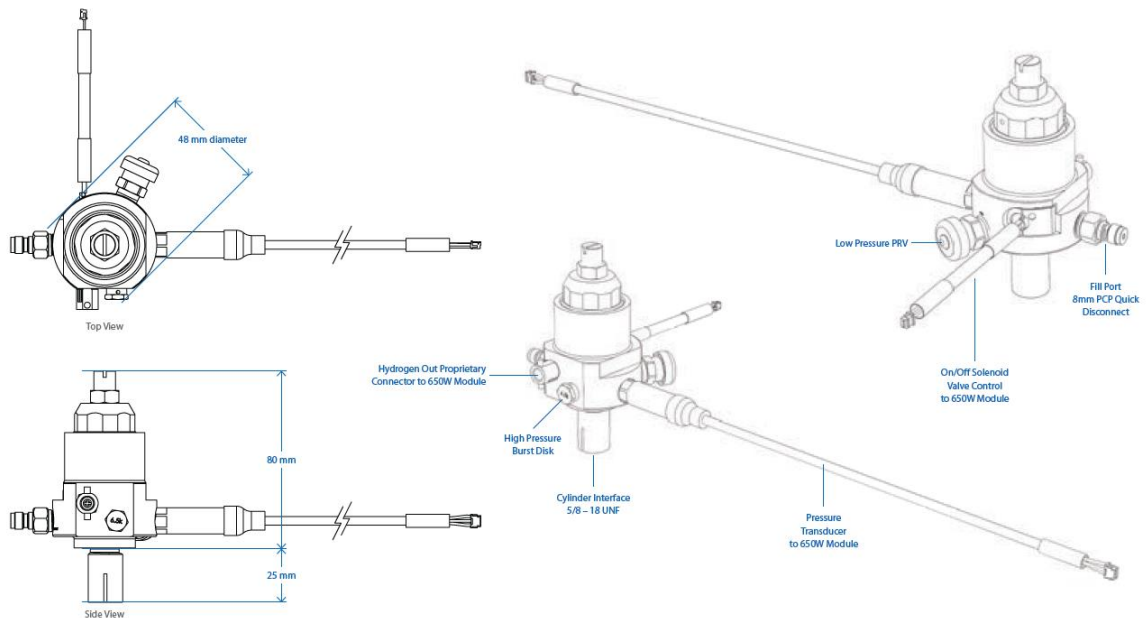
3.11. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - finālversija



3.12. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - finālversija – virtuālā vide



3.13. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - tehniskās pārveides skice



3.14. att. Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - ūdeņraža piegādes cauruļvadu un pieslēgum skice

### 3.4.2 Drona dzinēja salāgošana ar hibrīda kurināmā elementu/akumulatoru bateriju sistēmu

Kurināmā elementu sistēmas un akumulatori var darboties kopā, lai transporta un enerģijas jomā sniegtu vairāk iespēju. Degvielas šūnu sistēmas ir izstrādātas, lai uzlabotu akumulatoru un elektriskās piedziņas platformu mijiedarbību. Lai gan katrai sistēmai ir savas priekšrocības, jauno bateriju un kurināmā elementu tehnoloģiju apvienošana var palīdzēt samazināt kopējo oglekļa emisiju un palielināt ilgtspējīgas enerģijas izmantošanu, nemazinot veiktspēju.

Kurināmā elementa savienojuma ar mobilo elektrisko sistēmu akumulatoru baterijām priekšrocības:

- Augsta energoefektivitāte: kurināmā elementi piedāvā augstu enerģijas pārveidošanas efektivitāti salīdzinājumā ar parastajiem iekšdedzes dzinējiem, tādējādi samazinot enerģijas izšķērdēšanu un palielinot kopējo sistēmas efektivitāti.<sup>15</sup>
- Vides ieguvumi: kurināmā elementi ražo elektroenerģiju, izmantojot elektroķīmiskas reakcijas, kā rezultātā samazinās siltumnīcefekta gāzu emisijas un gaisa piesārņojums, salīdzinot ar enerģijas avotiem, kuru pamatā ir fosilais kurināmais.<sup>16</sup>
- Diapazona paplašināšana: kurināmā elementu integrēšana ar akumulatoru baterijām var paplašināt mobilo elektrisko sistēmu klāstu, jo kurināmā elementi nodrošina nepārtrauktu jaudu, ģenerējot elektroenerģiju no degvielas avota (piemēram, ūdeņraža), bez nepieciešamības bieži uzlādēt.<sup>17</sup>
- Ātra degvielas uzpilde: degvielas šūnu sistēmas uzpildīšana var būt ātrāka nekā akumulatora uzlāde, jo tā ir saistīta ar degvielas padeves papildināšanu, nevis gaidīšanu, līdz akumulators uzlādējas. Tas var būt izdevīgi lietojumiem, kas ir jutīgi pret laiku, piemēram, elektriskajiem transportlīdzekļiem.<sup>18</sup>

Mīnusi kurināmā elementu savienošanai ar mobilo elektrisko sistēmu akumulatoru baterijām:

- Izmaksas: kurināmā elementu sistēmas pašlaik ir dārgākas salīdzinājumā ar tradicionālajām sistēmām, kuru pamatā ir akumulatori, galvenokārt kurināmā elementu skursteņu un ūdeņraža infrastruktūras augsto izmaksu dēļ.

---

<sup>15</sup> U.S. Department of Energy. (2019). Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/fuel-cell-technologies-office-multi-year-research-development-and>

<sup>16</sup> U.S. Department of Energy. (2019). Fuel Cell Technologies Office: Benefits. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office-benefits>

<sup>17</sup> U.S. Department of Energy. (2020). Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan: Section 4.5.5 – Fuel Cell Systems Integration. Retrieved from <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/04/f73/fuel-cell-technologies-office-myrdp-section-4-5-5-fuel-cell-systems-integration.pdf>

<sup>18</sup> Energy.gov. (2021). Hydrogen Fueling Stations. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fueling-stations>

- Ūdeņraža infrastruktūra: plaši izplatītas ūdeņraža infrastruktūras izveide degvielas uzpildei var būt nopietns izaicinājums, jo tas prasa ievērojamus ieguldījumus ūdeņraža ražošanā, uzglabāšanā, transportēšanā un sadalē.<sup>19</sup>
- Degvielas pieejamība un uzglabāšana: ūdeņraža pieejamība un uzglabāšana var radīt problēmas, jo ūdeņradim ir nepieciešama īpaša infrastruktūra un apstrādes procedūras tā zemā enerģijas blīvuma un augstās uzliesmojamības dēļ.<sup>20</sup>
- Izturība un kalpošanas laiks: degvielas šūnu sistēmām var būt ierobežojumi attiecībā uz izturību un kalpošanas laiku, jo īpaši mobilajās lietojumprogrammās ar dažādiem darbības apstākļiem un biežu iedarbināšanu un izslēgšanu. Ilgtermiņa uzticamības nodrošināšana var radīt bažas.<sup>21</sup>

Tehniski kurināmā elementu sistēmas salāgošanai/pieslēgšanai jebkura elektro transporta līdzekļa, arī drona, akumulatoru baterijai, jāveic, ietverot sekojošus elementus:

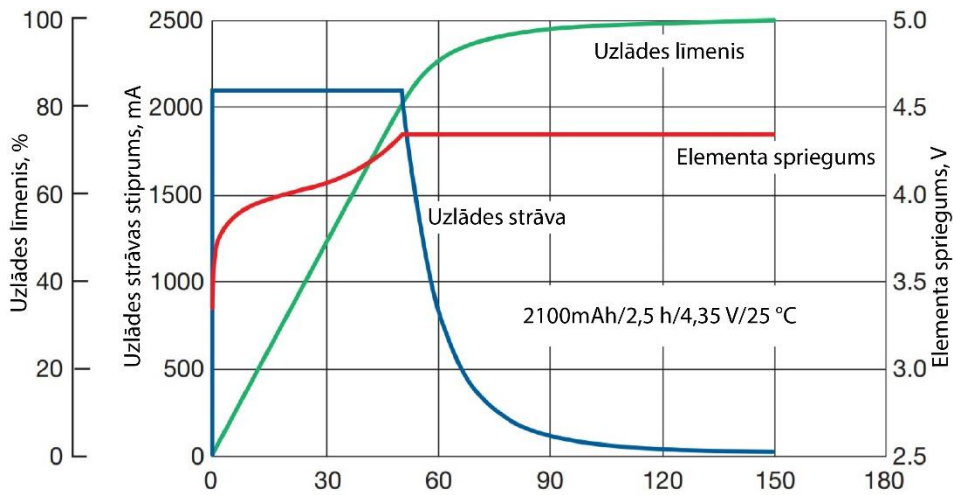
- Jaudas elektronikas interfeiss: lai pārvaldītu jaudas plūsmu starp kurināmā elementu sistēmu un akumulatoru, ir nepieciešama jaudas elektronikas saskarne. Tā kalpo kā starpnieks, pārveidojot un sagatavojot elektriskos signālus, lai tie atbilstu abu sistēmu prasībām.
- DC-DC pārveidotājs: DC-DC pārveidotāju bieži izmanto, lai saskaņotu sprieguma līmeņus starp kurināmā elementu sistēmu un akumulatoru. Tas nodrošina efektīvu un precīzu jaudas pārvadi, un nodrošina saderību starp dažādu divu sistēmu sprieguma līmeņiem.
- Kontroles un vadības sistēma: kontroles un vadības sistēma ir būtiska, lai regulētu un optimizētu jaudas plūsmu starp kurināmā elementu sistēmu un akumulatoru. Tā uzrauga tādus parametrus kā spriegums, strāva un temperatūra, un attiecīgi pielāgo sistēmas darbību, lai nodrošinātu drošu un efektīvu darbību.
- Drošības sistēmai: Drošība ir būtisks apsvērums, savienojot degvielas elementu sistēmas ar akumulatoru baterijām. Jāīsteno atbilstoši drošības pasākumi, lai novērstu pārmērīgu uzlādi, pārmērīgu izlādi un termisku pārslodzi (3.15. att). Šie pasākumi var ietvert aizsargķēdes, temperatūras sensorus un sprieguma uzraudzības sistēmas.

---

<sup>19</sup> U.S. Department of Energy. (2019). Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/fuel-cell-technologies-office-multi-year-research-development-and>

<sup>20</sup> Energy.gov. (2021). Hydrogen Fueling Stations. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fueling-stations>

<sup>21</sup> Pasaoglu, G., & Samuelsen, G. S. (2015). Cost analysis of PEM fuel cell systems for transportation applications. *Journal of Power Sources*, 280, 442-453.



3.15. att. Li-Ion bateriju uzlādes stadijas

- Enerģijas pārvaldības stratēģija: tiek izmantota, lai noteiktu optimālo jaudas izmantošanu gan no kurināmā elementu sistēmas, gan no akumulatora baterijas. Šajā stratēģijā tiek ņemti vērā tādi faktori kā slodzes pieprasījums, degvielas elementa efektivitātes raksturlielumi, akumulatora uzlādes stāvoklis un darbības apstākļi, lai sasniegtu vislabāko kopējo sistēmas veiktspēju.
- Sakari un datu apmaiņa: Komunikācijas protokoli un datu apmaiņas mehānismi ir nepieciešami vienmērīgai koordinācijai starp kurināmā elementu sistēmu un akumulatoru. Tas atvieglo informācijas apmaiņu, vadības komandas un uzraudzības funkcijas starp abām sistēmām.
- Integrācija un dizains: kurināmā elementu sistēmas un akumulatora baterijas fiziskai integrācijai ir rūpīgi jāapsver dizainiskais risinājums. Tas ietver kompaktu un efektīvu izkārtojumu izstrādi, lai optimizētu telpas izmantošanu, nodrošinātu dzesēšanas prasības un komponentu pieejamību.

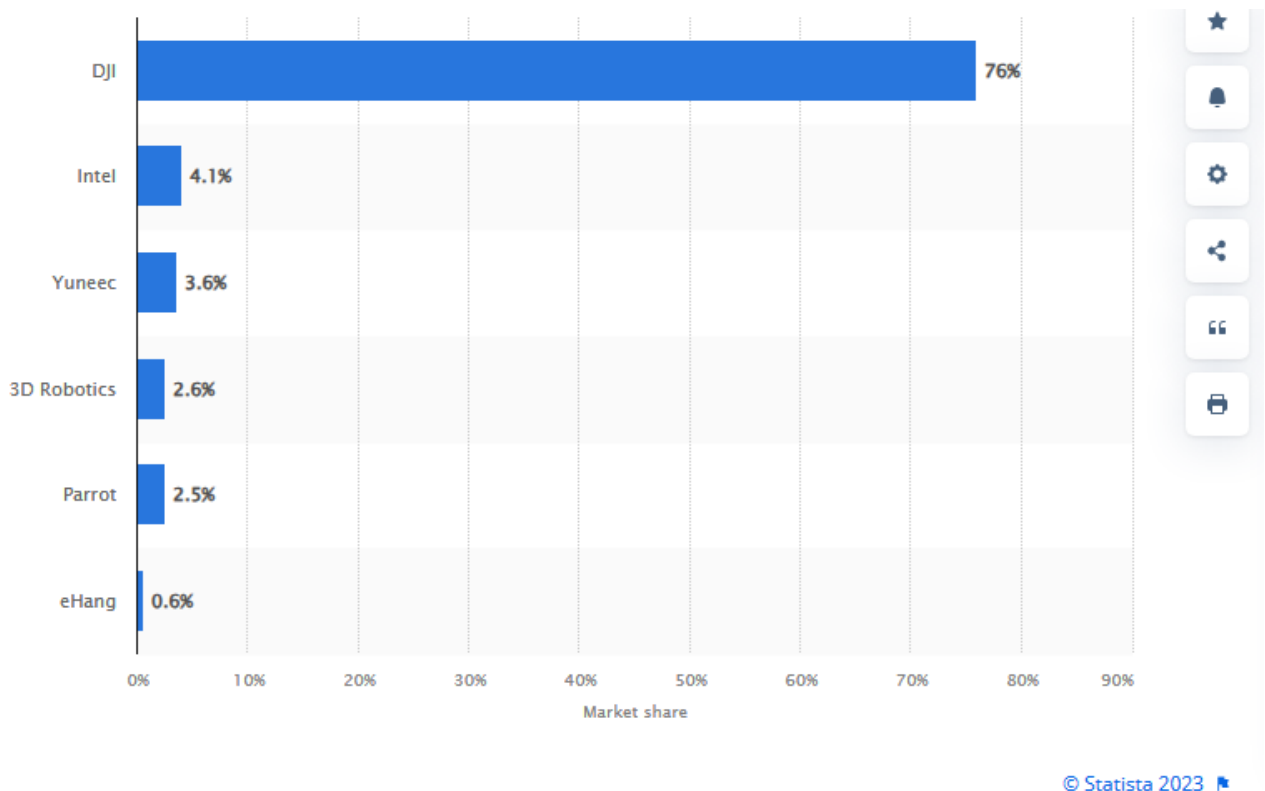


## 4 Vadošo iekārtu ražotāju izvērtējums

Kvadrikopteru un dronu ražošana pasaulē kļūst ļoti populāra. Šajā nozarē strādā ļoti liels skaits ražotāju visās pasaules valstīs. Kā vadošos var atzīmēt ekojošos ražotājus:

- DJI (Dajiang) Innovations
- Skydio
- XAG
- JOUAV
- Ambarella
- Boeing
- GoPro
- Lockheed Martin LMT
- 3D Robotics
- Parrot SA
- Yuneec

Ķīnas kompānija DJI 2021.gada sākumā apkalpojua 76% dronu tirgus (skat. 4.1. att.)



### 4.1. att. Dronu ražotāju tirgus daļas, 2021.gada 1.ceturksnis

Visas augstākminētās firmas ražo dronus, kuru energoapgādei izmanto elektroķīmiskos akumulatorus. Tajā pašā laikā hibrīdlietošanas dronus ar hibrīdbarošanu ražo tikai sekojošas

firmas – Doosan Mobility Innovation (<https://www.doosanmobility.com/en/>), Intelligent Energy (<https://www.intelligent-energy.com/>), Micromulticopter Aero Technology (MMC) (<https://www.mmcuav.com/>), Skyfront (<https://skyfront.com/>) un AeroVironment (<https://www.avinc.com/>).

Firmas Intelligent Energy ūdeņraža FC drona lidojuma laiks ir līdz 70 minūtēm, turklāt ar 5 kg transportējamo kravu (skat. 4.2.att.)



4.2. att. Firmas Intelligent Energy ūdeņraža FC drons

Firmas Doosan Mobility Innovation ūdeņraža FC dronā ir uzlabota PEMFC (protonu apmaiņas membrānas degvielas elementa) tehnoloģija. Drona lidojuma laiks ir līdz 5,5 stundām, un tas var veikt līdz 500 km vienā lidojumā. Masveida ražošanā palaistais drons DS30W (skat. 4.3.att) var lidot līdz 2 h bez papilduzlādes līdz pat 80 km tālu. .



4.3. att. Firmas Doosan Mobility Innovation ūdeņraža FC drons DS30W

Firmas Micromulticopter Aero Technology (MMC) ūdeņraža FC drons ar lidojuma laiku, kas pārsniedz 3 stundas, attālumiem, kas pārsniedz 100 km, un operācijām laika apstākļos līdz pat mīnus 20°C



#### 4.4. att. Firmas Micromulticopter Aero Technology (MMC) ūdeņraža FC drons

##### 4.1.1 Iespējas un problēmas

Pie pētījuma ierobežojumiem pirmkārt jāpiemin tas, ka aprēķini tika veikti pie nosacījuma, ka UAV darbību neietekmē dažādi ārējie apstākļi. Piemēram, vēja brāzmas, gaisa temperatūra, kas būtiski var ietekmēt drona veiktspēju. Lai praktiski pārbaudītu aprēķinus, būtu nepieciešama prototipa izgatavošana un testēšana dažādos ekspluatācijas režīmos un vides apstākļos.

Aprēķinot pašizmaksu, komponentu cena tika noteikta pēc šī brīža aktuālā piedāvājuma.

##### 4.2 Principi ūdeņraža ekonomiskās dzīvotspējas novērtēšanai.

Elektriskā bezpilota lidaparāta darbības rādiusa paplašinātāja ekonomiskās dzīvotspējas novērtēšana, izmantojot ūdeņradi un kurināmā elementus, ietver dažādus faktoros un aprēķinus. Šeit ir sniegta pakāpeniska pieeja tās ekonomiskās iespējamības novērtēšanai:

###### 1. Nosakiet projekta darbības jomu:

- Nosakiet īpašos mērķus un prasības elektriskajam bezpilota lidaparāta diapazona paplašinātājam, izmantojot ūdeņradi un kurināmā elementus. Tas ietver paredzamo diapazona paplašināšanu, kravnesību un darbības apstākļus.

###### 2. Izmaksu aprēķins:

- Aprēķiniet sākotnējo ieguldījumu izmaksas:

- Paša drona izmaksas (bez diapazona paplašinātāja).
- Ūdeņraža degvielas šūnu sistēmas izmaksas.
- Ūdeņraža uzglabāšanas un sadales sistēmas izmaksas.
- Uzstādīšanas un integrācijas izmaksas.

- Novērtējiet pastāvīgās darbības izmaksas:

- Ūdeņraža degvielas izmaksas (izmaksa par kilogramu ūdeņraža).

- Kurināmā elementu sistēmas un drona uzturēšanas izmaksas.
- Elektrības izmaksas par uzlādi.
- Darbaspēka izmaksas ekspluatācijai un uzturēšanai.

### 3. Ieņēmumi un ietaupījumi:

- Nosakiet iespējamus ieņēmumu vai izmaksu ietaupījumus, kas saistīti ar paplašināto dronu diapazonu. Tas var ietvert:

- Palielināts misijas pārklājums.
- Samazināts dīkstāves laiks uzlādēšanai.
- Iespējas slēgt jaunus līgumus vai pakalpojumus.

### 4. Dzīves cikla analīze:

- Apsveriet drona un ūdeņraža degvielas šūnu sistēmas kalpošanas laiku. Aprēķiniet kopējās īpašuma izmaksas paredzamajā kalpošanas laikā.

### 5. Ūdeņraža ražošanas un infrastruktūras izmaksas:

- Novērtēt ūdeņraža ražošanas un sadales infrastruktūras izveides vai piekļuves izmaksas. Tas var ietvert elektrolīzes iekārtu, ūdeņraža uzglabāšanas tvertņu un transporta infrastruktūras izmaksas.

### 6. Energoefektivitāte:

- Aprēķināt ūdeņraža ražošanas procesa, kurināmā elementa un visas sistēmas energoefektivitāti. Tas ietekmēs kopējās drona ekspluatācijas izmaksas.

### 7. Emisiju samazināšanas priekšrocības:

- Novērtēt visus iespējamus ieguvumus videi, piemēram, samazinātas oglekļa emisijas, un novērtēt to ekonomisko vērtību.

### 8. Ieguldījumu atdeve (IA):

- Aprēķiniet ROI, salīdzinot kopējos ieguvumus (ieņēmumus, izmaksu ietaupījumus, vides ieguvumus) sistēmas darbības laikā ar kopējām izmaksām (sākotnējās investīcijas, pastāvīgās darbības izmaksas).

### 9. Jūtības analīze:

- Veiciet jutīguma analīzi, lai saprastu, kā galveno mainīgo lielumu izmaiņas (piemēram, ūdeņraža izmaksas, dronu izmantošanas līmenis, elektroenerģijas cenas) ietekmē ekonomisko dzīvotspēju.

### 10. Reglamentējošie un politikas apsvērumi:

- Izpētiet visus valdības stimulus, subsīdijas vai noteikumus, kas var ietekmēt ar ūdeņradi darbināmu dronu izmantošanas ekonomiku.

### 11. Riska novērtējums:

- Identificējiet un novērtējiet iespējamus riskus un neskaidrības, piemēram, izmaiņas tehnoloģijā, tirgus apstākļos vai normatīvajās prasībās, un savā analīzē iekļaujiet riska mazināšanas stratēģijas.

#### 12. Lēmumu pieņemšana:

- Pamatojoties uz analīzi, pieņemiet lēmumu par to, vai elektriskā bezpilota lidaparāta darbības rādiusa paplašinātāja ekonomiskā dzīvotspēja, izmantojot ūdeņradi un kurināmā elementus, atbilst jūsu iepriekš definētajiem panākumu kritērijiem.

Atcerieties, ka šādas sistēmas ekonomiskā dzīvotspēja var atšķirties atkarībā no konkrētiem faktoriem, piemēram, atrašanās vietas, darbības konteksta un tehnoloģiju sasniegumiem. Regulāri atjauniniet savu analīzi, mainoties apstākļiem, lai nodrošinātu, ka projekts joprojām ir ekonomiski dzīvotspējīgs.

## 5 Ekonomiskā analīze ūdeņraža droniem.

Ūdeņraža un degvielas elementu diapazona pagarināšanas sistēmu iespējamība kvadrokopteriem:

- Enerģijas blīvums:

Ūdeņraža kurināmā elementi piedāvā augstu enerģijas blīvumu salīdzinājumā ar parastajiem litija jonu akumulatoriem, kas potenciāli nodrošina ilgāku lidojuma laiku kvadrokopteriem.

- Svara apsvērumi:

Ūdeņraža degvielas šūnu sistēmas mēdz būt smagākas par akumulatoriem, kas var ietekmēt kopējo kvadrokopteru svaru un līdzsvaru.

- Diapazona paplašinājums:

Ūdeņraža degvielas šūnu diapazona paplašinātājiem ir potenciāls ievērojami paplašināt kvadrokopteru darbības diapazonu, padarot tos piemērotus dažādiem lietojumiem, piemēram, novērošanai un uzraudzībai.

- Degvielas uzpildes infrastruktūra:

Ar ūdeņradi darbināmu kvadrokopteru iespējamība ir atkarīga no ūdeņraža degvielas uzpildes infrastruktūras pieejamības, kas dažos reģionos var būt ierobežota.

- Vides ietekme:

Ūdeņraža degvielas šūnas lietošanas vietā nerada izmešus, padarot tās videi draudzīgas salīdzinājumā ar iekšdedzes dzinējiem.

- Izmaksu apsvērumi:

Ūdeņraža kurināmā elementu un uzglabāšanas sistēmu izmaksas var būt šķērslis dažu lietojumu ieviešanai. Ekonomiskā iespējamība atšķiras atkarībā no tādiem faktoriem kā ūdeņraža ražošanas izmaksas un sistēmas efektivitāte.

- Efektivitāte:

Ūdeņraža kurināmā elementiem var būt augsta enerģijas pārveidošanas efektivitāte, kas, iespējams, padara tās efektīvākas nekā iekšdedzes dzinēji.

- Drošība:

Ir ļoti svarīgi nodrošināt drošu apiešanos ar ūdeņradi un to uzglabāšanu, jo tas ir viegli uzliesmojošs. Ir nepieciešami atbilstoši drošības pasākumi un protokoli.

- Pētniecība un attīstība:

Pastāvīga izpēte un izstrāde ir būtiska, lai risinātu tādas problēmas kā sistēmas svara samazināšana, infrastruktūras attīstība un izmaksu samazināšana.

## 5.1 Ekonomiskās lietderības aprēķins, lietojot NPV metodi.

Aprēķināsim neto pašreizējo vērtību (NPV) dronam ar pievienotu 5000 EUR ūdeņraža-degvielas šūnu diapazona paplašinātāju 8 gadu periodā, ņemot vērā 5% diskonta likmi. NPV modelis palīdz noteikt projekta ekonomisko iespējamību, ņemot vērā naudas laika vērtību.

- Pieņēmumi:
  - Sākotnējais ieguldījums (I): 10 000 EUR par dronu un 5 000 EUR par ūdeņraža-degvielas šūnu diapazona paplašinātāju.
  - Eksploatācijas izmaksas (OC): tiek lēstas 1000 EUR gadā, ieskaitot apkopi, ūdeņraža degvielu un elektrību.
  - Ieņēmumi (R): Paredzamie ieņēmumi no paplašinātām bezpilota lidaparātu operācijām, 3000 EUR gadā.
  - Lietderīgais kalpošanas laiks (N): paredzamais drona un ūdeņraža-degvielas šūnu sistēmas kalpošanas laiks ir 8 gadi.
  - Diskonta likme (r): diskonta likme ir 5%, kas atspoguļo kapitāla alternatīvās izmaksas.

### 5.1.1 Aprēķina soļi:

- Aprēķināt gada naudas plūsmas (CF):

Neto naudas plūsma (NCF) = ieņēmumi (R) — darbības izmaksas (OC)

NCF = 3000 EUR - 1000 EUR = 2000 EUR gadā

- Diskontējam naudas plūsmas līdz pašreizējai vērtībai (PV):

Aprēķināt katra gada naudas plūsmas pašreizējo vērtību, izmantojot formulu:  $PV = CF / (1 + r)^n$

1. gads:  $PV1 = 2000 \text{ EUR} / (1 + 0,05)^1 \approx 1904,76 \text{ EUR}$

2. gads:  $PV2 = 2000 \text{ EUR} / (1 + 0,05)^2 \approx 1814,06 \text{ EUR}$

Turpināt šo aprēķinu visiem 8 gadiem.

- Aprēķināt NPV:

NPV ir visu naudas plūsmu pašreizējo vērtību summa, ieskaitot sākotnējo ieguldījumu:

$NPV = PV1 + PV2 + PV3 + PV4 + PV5 + PV6 + PV7 + PV8$  — sākotnējais ieguldījums (I)

$NPV = 1\,904,76 \text{ EUR} + 1\,814,06 \text{ EUR} + \dots + PV8$  — (10 000 EUR + 5000 EUR)

- Summējiet PV vērtības:

Summējot visas pašreizējās vērtības par 8 gadiem, pēc tam atņemot sākotnējo ieguldījumu:

$NPV \approx 16\,134,04 \text{ EUR} - 15\,000 \text{ EUR} = 1\,134,04 \text{ EUR}$

- Interpretācija:

Aprēķinātais NPV aptuveni 1134,04 EUR ir pozitīvs, norādot, ka projekts par ūdeņraža-degvielas šūnu diapazona paplašinātāja pievienošanu dronam ir ekonomiski izdevīgs. Pozitīvs NPV liecina, ka projekta ieguvumi (paredzami ieņēmumi un naudas plūsmas, ko rada paplašinātas dronu darbības) atsver izmaksas (sākotnējās investīcijas un ekspluatācijas izmaksas), ja tiek ņemta vērā naudas laika vērtība 8 gadu periodā ar 5% diskonta likmi.

- Lēmums: pamatojoties uz šo NPV analīzi, var būt ieteicams turpināt projektu, jo ir sagaidāms, ka tā 8 gadu darbības laikā tas radīs neto pozitīvu vērtību aptuveni EUR 1134,04 apmērā.

Šis piemērs ir vienkāršots un tajā nav ņemti vērā dažādi faktori, piemēram, inflācija, nodokļi un iespējamās naudas plūsmas izmaiņas laika gaitā. Reālās pasaules finanšu analīzei var būt nepieciešami sarežģītāki modeļi un apsvērumi, tomēr kā atbalsta informācija lēmumu pieņemšanai tā ir lietojams.



## Literatūras avoti

1. Alipour, S. et al. (2018). Hydrogen fuel cells for drone applications: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9054-9074.
2. Arroyo-Caballero, V. et al. (2017). A review of UAVs technologies for civil applications: The Spanish experience. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 5(1), 73-86.
3. Papageorgiou, G. et al. (2016). Hydrogen as an energy carrier for unmanned aerial systems: A case study on multirotor drones. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 21004-21016.
4. Pfrang, A. et al. (2018). Hydrogen-fuelled unmanned aerial systems: The challenge to transform innovation into commercial reality. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(17), 8318-8329.
5. Roussanaly, S. et al. (2021). Feasibility analysis of hydrogen fuel cell-based multirotor drones for precision agriculture. *Sustainability*, 13(10), 5417.
6. Schneider, L. et al. (2017). Design and development of a hydrogen fuel cell powered multirotor UAV. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(24), 16317-16329.
7. Thakur, P. et al. (2020). Hydrogen fuel cell-based unmanned aerial vehicles: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(21), 11987-12006.
8. Bauer, F., et al. (2019). Hydrogen fuel cell-powered drones for precision agriculture. *Renewable Energy*, 139, 563-571.
9. Zhang, Y., et al. (2019). Fuel cell-powered UAV for extended surveillance missions. *Energy Procedia*, 158, 1621-1626.
10. Manfrida, G., et al. (2020). Hydrogen fuel cell-based multirotor UAV: Design, modeling, and experimental characterization. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(12), 10899-10908.
11. Mazumder, M. K., et al. (2021). A review of hydrogen fuel cells and their application in UAVs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110528.
12. Zhou, L., et al. (2017). A review on hydrogen fuel cell systems for unmanned aerial vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 876-890.
13. Dushkova, D., et al. (2019). Hydrogen leak detection for fuel cell-powered drones: A review. *IEEE Sensors Journal*, 19(21), 9759-9771.
14. Federal Aviation Administration (FAA). (2021). Unmanned Aircraft Systems (UAS) Regulations and Policies.
15. European Union Aviation Safety Agency (EASA). (2021). Drone Rules, Regulation (EU) 2019/947.
16. Tao, Y., et al. (2021). Onsite hydrogen generation and refueling system for drone applications. *Energy*, 217, 119392.
17. Xu, J., et al. (2018). Research on hydrogen fuel cell powered unmanned aerial vehicle. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108(4), 042003.
18. Zhang, W., et al. (2020). Design and flight test of a hydrogen fuel cell powered UAV. *Energy*, 196, 117098.
19. Jian, D., et al. (2021). Hydrogen fuel cells for UAVs: A review, progress and prospects. *Applied Energy*, 280, 115987.

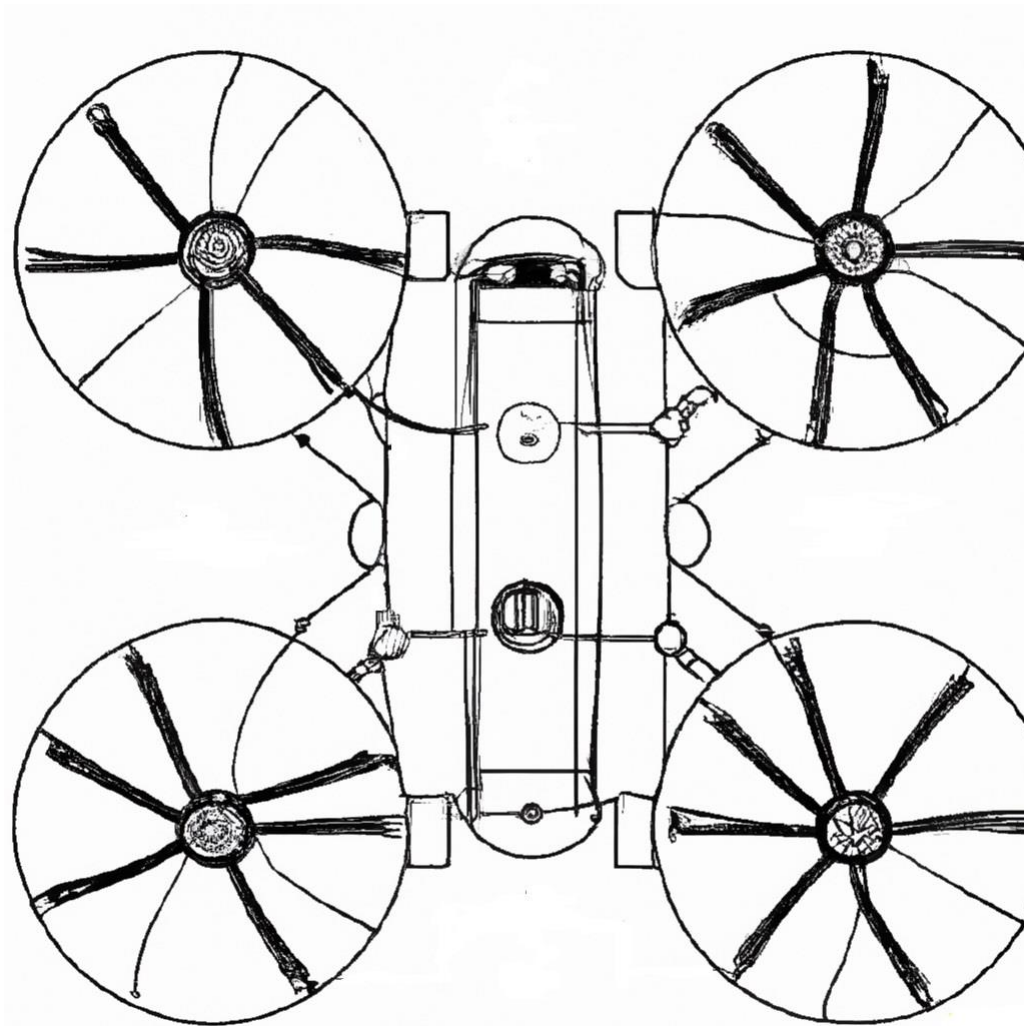
## Secinājumi

Pētījums apstiprina, ka ar ūdeņradi darbināmu dronu ražošana ir perspektīva. Tiem ir potenciāls rast plašu pielietojumu gan tautsaimniecībā, gan militārā nozarē. Tā kā šādas tehnoloģijas dronu lidojuma laiks salīdzinājumā ar elektriski darbināmajiem droniem palielinās 3 – 4 reizes, tie ir perspektīvi dažādu novērošanas un transportēšanas funkciju veikšanai. Ar ūdeņradi darbināmu dronu potenciālie klienti: Aizsardzības ministrija, Iekšlietu ministrija, Satiksmes ministrija, industriālās nozares klienti ne tikai Latvijā, bet arī citās valstīs.

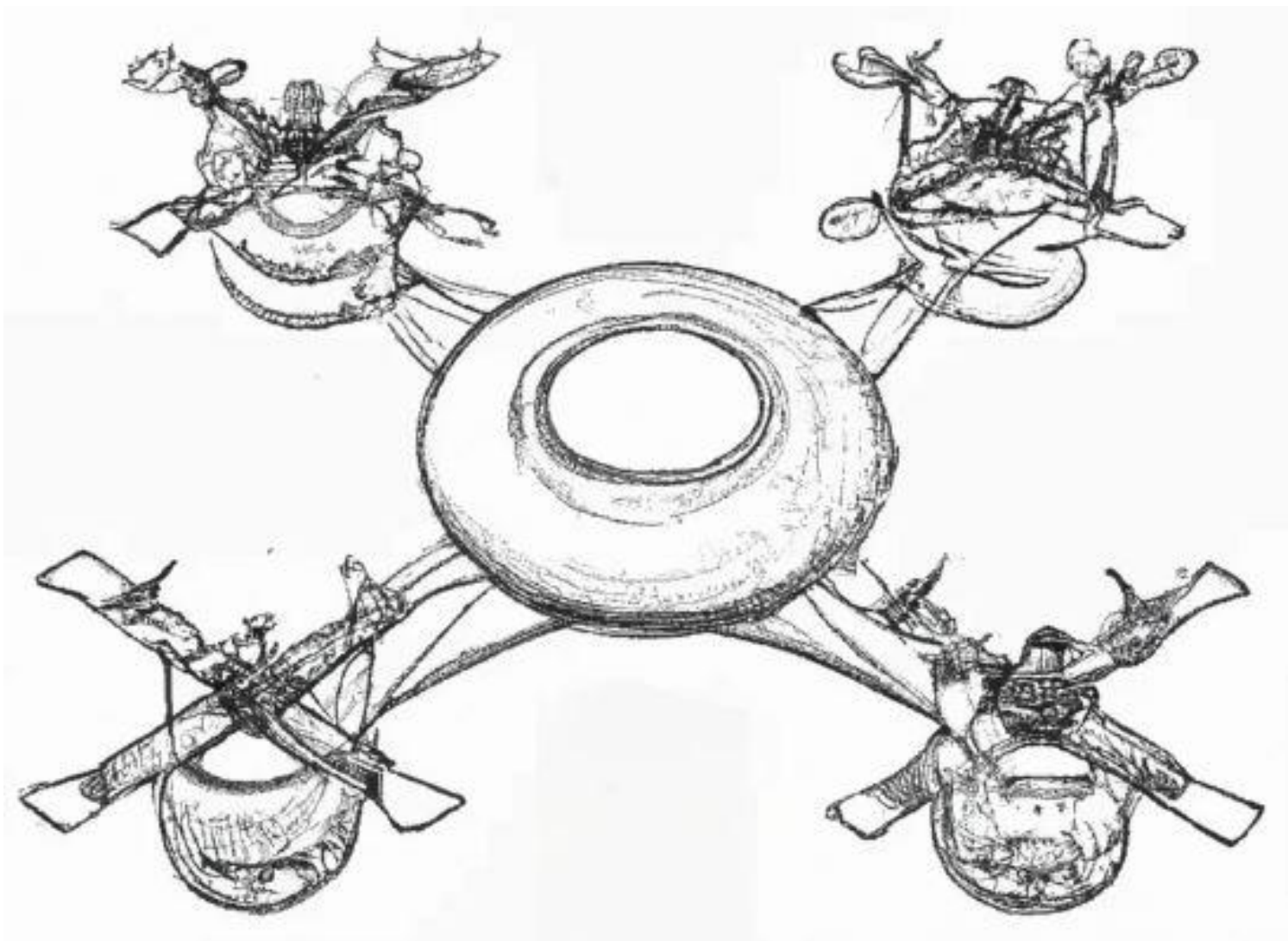
## 6 Pielikumi

### 6.1 Tehniskā projekta skices

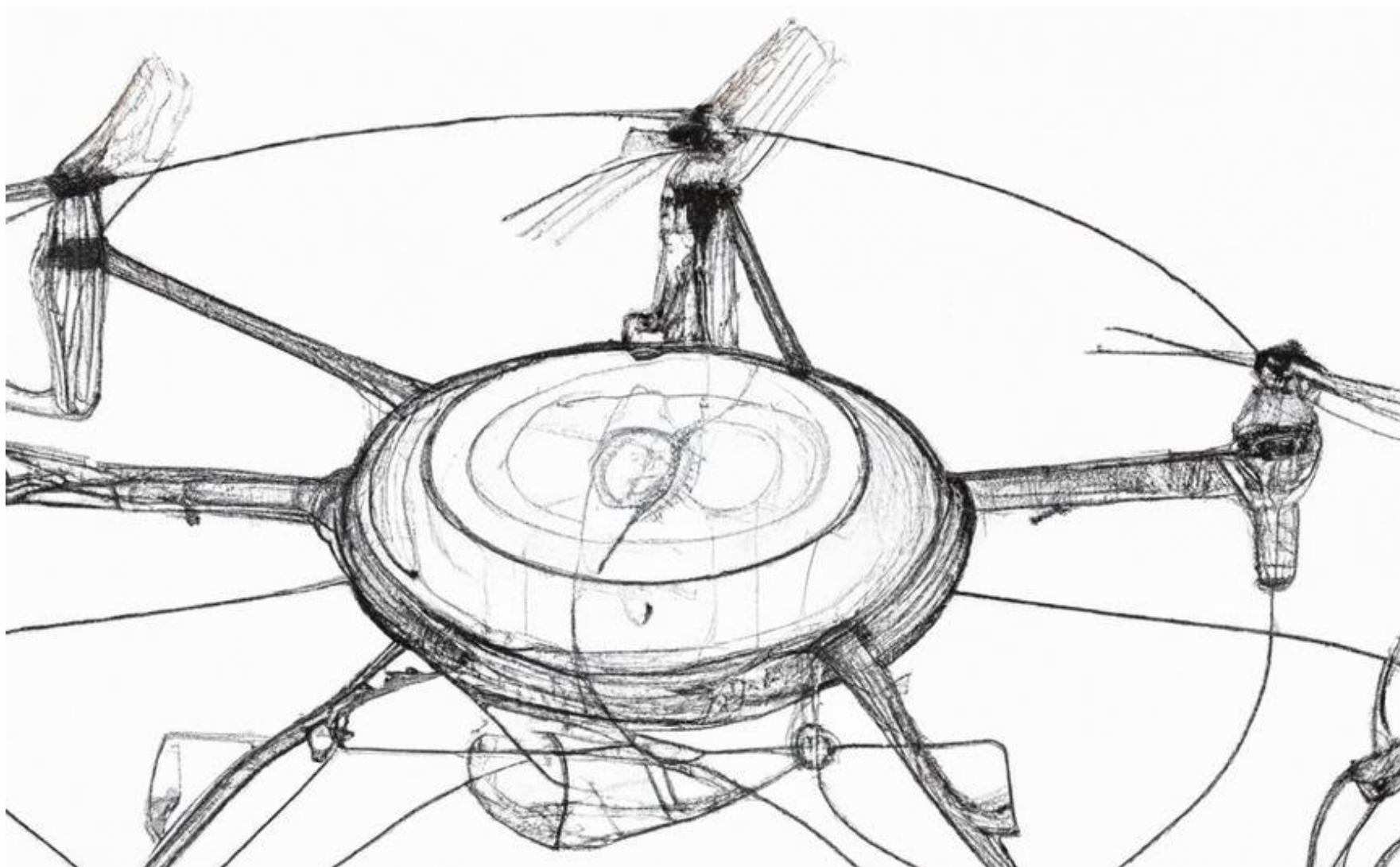
#### 6.1.1 Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – konceptuālā skice



6.1.2 Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – konceptuālā skice



6.1.3 Sešmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – konceptuālā skice



6.1.4 Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskā 3D skice



6.1.5 Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis



6.1.6 Sešmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis





6.1.7 Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis (variants)



6.1.8 Četrmotoru drons ar integrētu toroidālu H2 krātuvi – telpiskais 3D modelis (variants)



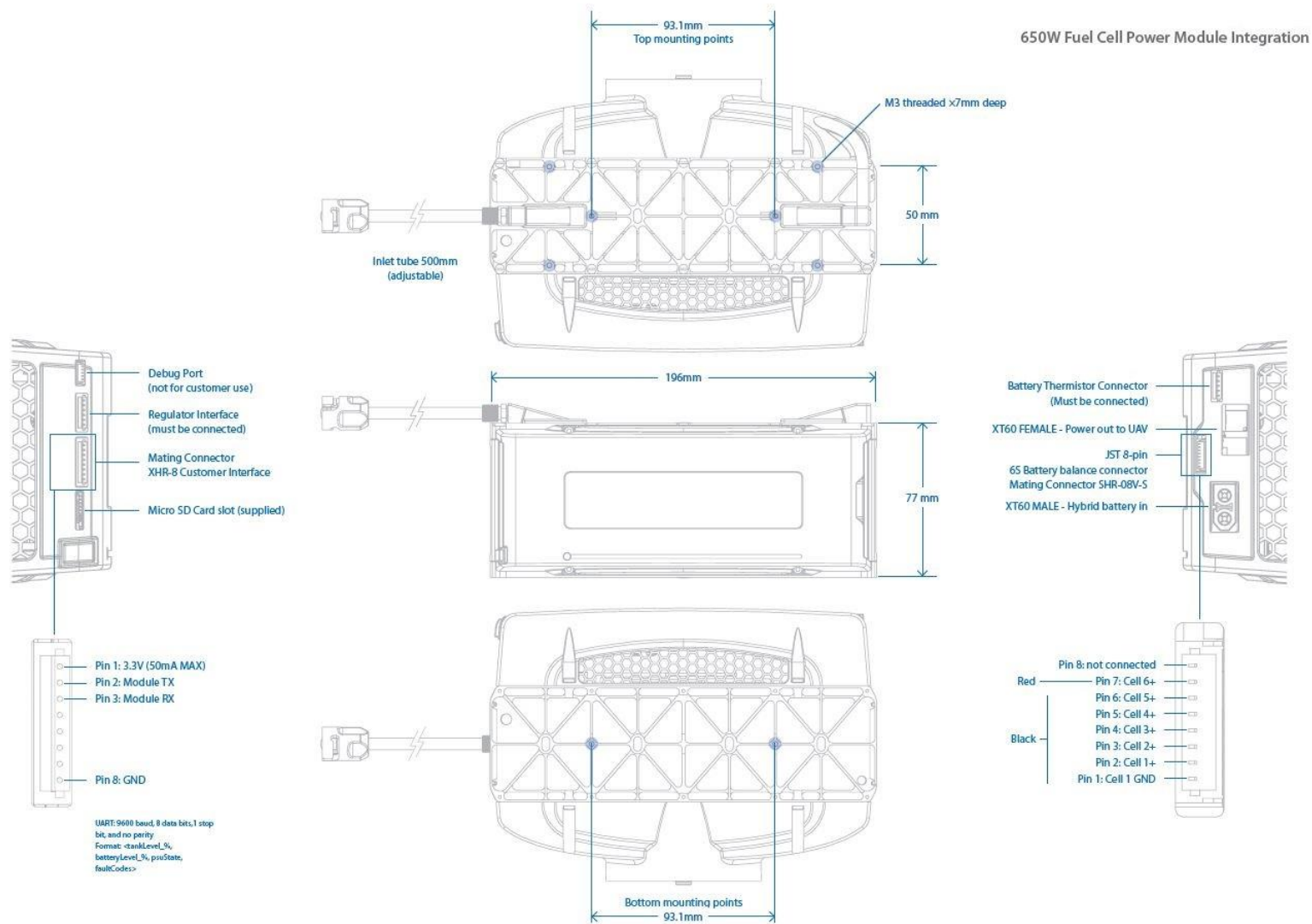
6.1.9 Strukturāls detaļu izvietojums – četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi



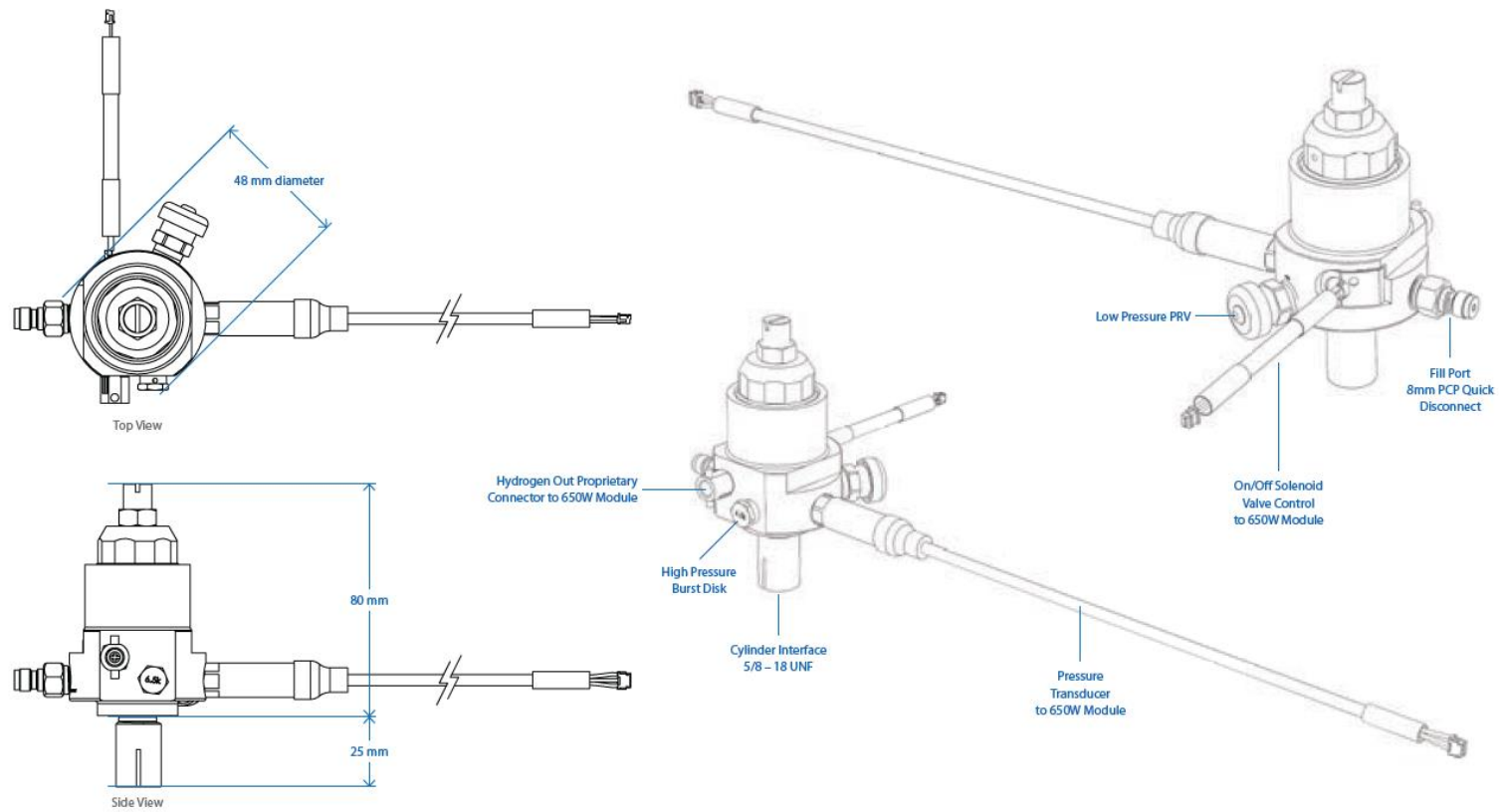
6.1.10 Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - finālversija



## 6.1.11 Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - tehniskā skice



### 6.1.12 Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - ūdeņraža piegādes cauruļvadu un pieslēgum skice



### 6.1.13 Četrmotoru drons ar integrētu cilindrisku H2 krātuvi - 3D simulācija

