



UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" din BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ



TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**Cercetări privind extinderea regimurilor de zbor
la vehiculele electrice fără pilot**

**Research on the extension of flight regimes to
unmanned electric vehicles**

Conducător științific:

Prof. Dr. Ing. Constantin GHITĂ

Doctorand:

Ing. Vasile PLEȘCA

CUPRINS

CUPRINS.....	3
1. INTRODUCERE	4
1.1 SCOPUL TEZEI DE DOCTORAT	4
1.2 CLASIFICAREA DRONELOR – CRITERII.....	4
1.3 STADIUL ACTUAL AL DEZVOLTĂRII DRONELOR.....	5
1.4 MULTUMIRI.....	6
2. UTILIZAREA DRONELOR IN DIVERSE DOMENII DE ACTIVITATE	6
3. ELEMENTELE COMPONENTE ALE UNEI DRONE ALIMENTATE ELECTRIC	10
4. PREZENTAREA DRONEI SUPT PROIECTATĂ ȘI REALIZATĂ ÎN CADRUL LUCRĂRII, CA BAZĂ PENTRU TESTE.	15
5. EXPERIMENTĂRI PRIVIND EXTINDEREA REGIMURILOR DE ZBOR ÎN CAZUL DRONELOR MULTIMOTOR ALIMENTATE ELECTRIC	17
5.1 EXTINDEREA AUTONOMIEI DE ZBOR PRIN OPTIMIZAREA CONSUMURILOR INSTANTANEE DE LA NIVELUL DRONELOR MULTIMOTOR ALIMENTATE ELECTRIC.	17
5.2 MODELE EXPERIMENTALE PRIVIND AUTOMATIZAREA PROCESULUI DE ÎNCĂRCARE A BATERIILOR DRONELOR ALIMENTATE ELECTRIC, FĂRĂ DECUPLAREA ACESTORA.....	22
5.3 STAND EXPERIMENTAL PENTRU TESTARE - ÎNCĂRCARE/DESCĂRCARE BATERIE LA SCARĂ REALĂ.....	33
6. CERCETĂRI PRIVIND TRANSFERUL WIRELESS AL ENERGIEI NECESARE PROCESULUI DE ÎNCĂRCARE.....	34
6.1 CERCETĂRI PRIVIND TRANSFERUL WIRELESS AL ENERGIEI PENTRU CREȘTEREA AUTONOMIEI DRONELOR ALIMENTATE ELECTRIC	35
6.2 TESTARE SISTEM ÎNCĂRCARE/DESCĂRCARE BATERIE LI-PO, FOLOSIND TRANSMISIA WIRELESS A ENERGIEI ELECTRICE.....	36
7. CONCLUZII SI REZULTATE ORIGINALE.....	37
BIBLIOGRAFIE SELECTIVA.....	39

1. INTRODUCERE

1.1 SCOPUL TEZEI DE DOCTORAT

Drona prin definiție este un dispozitiv de tip UAV (Unmanned Aerial Vehicle) capabil să zboare, fără să fie pilotat de o persoană aflată la bordul acesteia, autonomă sau condusă de la distanță de către un operator specializat, prin intermediul unei telecomenzi.

Datorită răspândirii rapide a dronelor din ultima perioadă, mai ales în domeniul civil, începând cu anul 2014 guvernele mai multor țări încearcă să pună la punct o legislație care printr-o încadrare precisă a dronelor pe categorii să limiteze accesul necontrolat al acestora în zone interzise sau în care prezența lor ar putea provoca un accident prin coliziunea cu alte aparate de zbor, astfel ducând la pierderi de vieți omenești. Dar cum, în general prezența dronelor în industrie a adus schimbări semnificative în multe domenii, ușurând foarte mult abordarea greoaie utilizată până la apariția acestora, oricâte limitări se vor impune pe viitor, dronele vor continua să se dezvolte, eliminând, una câte una, limitările legislative sau tehnologice [1].

Cea mai mare problemă a dronelor este autonomia de zbor limitată, datorită bateriilor, care nu au putut ține pasul cu dezvoltarea celorlalte tehnologii mobile. Astfel, unul din scopurile principale ale acestei lucrări este acela de a automatiza procesul de încărcare al dronelor tip multicopter, fără a fi nevoie de intervenția unui operator. Practic, acest lucru înseamnă creșterea autonomiei de zbor prin identificarea soluției optime pentru încărcarea bateriilor fără să necesite schimbarea bateriilor cu un set încărcat, realizând și testând diverse sisteme de încărcare, automate cu transmiterea energiei electrice, prin contact direct sau wireless.

1.2 CLASIFICAREA DRONELOR – CRITERII

Clasificarea dronelor este o etapă foarte importantă care pe lângă faptul că scoate în evidență caracteristicile diverselor modele, diferențiază dronele și din punct de vedere al reglementărilor legislative.

➤ *Clasificarea dronelor în funcție de arealul în care vor evolua*

Datorită avantajelor pe care aeronavele fără pilot la bord le aduc în tot mai multe domenii, au fost dezvoltate drone specifice fiecărui mediu, astfel:

- UAV - vehicul aerian fără personal uman la bord;
- USV - vehicul de suprafață fără personal uman la bord;
- UUV - vehicul subacvatic fără personal uman la bord;
- UGV - vehicul terestru fără personal uman la bord;
- HAPS - sateliți de înaltă altitudine fără personal uman la bord.

Pentru diverse misiuni au fost dezvoltate și drone hibrid care pentru atingerea obiectivelor sunt capabile să funcționeze în mai multe medii de lucru.

➤ *Clasificarea dronelor din punct de vedere al aerodinamicii*

Din punct de vedere al aerodinamicii de zbor dar mai ales al autonomiei de care sunt capabile, dronele electrice sunt împărțite în patru mari categorii:

- *drona tip aripă fixă* (tip avion), poate zbura ușor în misiuni de recunoaștere pe distanțe foarte mari (sute de kilometri) și la altitudini mari.

- *drona tip multicopter*. Acestea sunt drone care operează pe distanțe scurte cu o stabilitate mărită putând menține o poziție fixă chiar și la vânt de 50 km/h.

- *drona tip elicopter*. Acest tip de dronă îmbină oarecum caracteristicile principale ale celor două tipuri de drone enumerate anterior.

- *drona tip aerostat*, poate transporta un număr suficient de mare de senzori pentru monitorizarea unor obiective și are avantajul unei raze de acțiune aproape nelimitată având o autonomie de zbor extrem de mare datorită faptului că pe fuzelajul ei pot fi montate celule solare pentru reîncărcare.

➤ ***Clasificarea dronelor din punct de vedere al domeniului principal de utilizare***

Din punct de vedere al domeniului de utilizare, dronele pot fi împărțite în 6 mari categorii principale: drone pentru observație și recunoaștere, drone pentru transport, drone specializate pentru cercetare-dezvoltare, drone militare cu scop secundar, drone civile – comerciale.

➤ ***Clasificarea dronelor din punct de vedere al masei la decolare (MTOW) asociat cu riscul de impact la sol***

Clasificarea dronelor din punct de vedere al masei la decolare este foarte importantă mai ales din punct de vedere al legislației deoarece diferențiază dronele după energia cinetică așteptată în cazul unui impact [2]. Această energie afectează și operabilitatea din timpul zborului, inclusiv siguranța tuturor manevrelor. Astfel, acestea pot fi: micro/mini (<1kg), mici (<13,5kg), normale (<4,3 tone), mari (peste 4,3 tone)

➤ ***Clasificare din punct de vedere al altitudinii operaționale asociată cu riscul de coliziune în aer***

Această clasificare a dronelor pe paliere de altitudine poate să scadă riscul de coliziune al acestora cu alte aeronave în timpul zborului, fiind împărțite astfel:

- a) altitudine foarte joasă, dar drona evoluează în câmpul vizual al operatorului;
- b) altitudine foarte joasă, dar drona poate să evolueze ocazional în afara câmpului vizual al operatorului;
- c) altitudine medie;
- d) altitudine foarte mare.

➤ ***Clasificarea din punct de vedere al autonomiei aeronavei***

Și această clasificare are impact în aplicarea normelor legislative, nivelul de certificare fiind funcție de autonomia aeronavei, deci de nivelul de automatizare al navigației. Practic, aceste nivele reflectă autonomia dronei în luarea deciziilor, complexitatea misiunii și a mediului în care aceasta va evolua.

➤ ***Clasificarea dronelor din punct de vedere al proprietarului care o deține***

Din punct de vedere al proprietății acestea pot fi publice sau de stat atunci când sunt în proprietatea agențiilor guvernamentale, sau pot fi civile atunci când acestea sunt exploatate de către industria privată sau de către civili.

1.3 STADIUL ACTUAL AL DEZVOLTĂRII DRONELOR

Domeniul vast al aeronavelor fără pilot uman la bord - UAV sau al aeronavelor tip drone, așa cum mai sunt ele cunoscute, are o dezvoltare spectaculoasă, cu impact în tot mai multe activități din domeniul civil și industrial. La fel ca și în cazul dispozitivelor de tip SMART mobile, acestea înglobează tot mai multe inovații tehnologice, cu cele mai mari perspective de utilizare, atât în domeniul militar, cât și în domeniul civil. Dacă la început au fost dezvoltate aeronavele fără pilot la bord de tip aripă fixă în ultimii ani s-au dezvoltat rapid aeronavele UAV tip multimotor care ofera o serie de avantaje pentru entertainment dar mai ales pentru mediul industrial. Aplicațiile lor au o gamă largă de utilizări, cum ar fi supravegherea audio-video, recunoașterea comparativă cu elemente din baze de date, GIS, monitorizarea și mentenanța obiectivelor strategice, patrularea frontierelor, monitorizarea mulțimiilor, releu de retransmisie

radio, monitorizarea agriculturii de tip civil și industrial, cercetarea meteorologică, monitorizarea și supravegherea mediului, controlul traficului aerian etc. Există o limitare din punct de vedere al autonomiei electrice dar se caută soluții de extindere a acestei autonomii. De asemenea, sunt limitări și din punct de vedere legislativ care le reduc posibilitățile de utilizare dar prin certificări și autorizării specifice și aceste limite pot fi eliminate sau cel puțin micșorate. Dar cu toate aceste limitări dronele se dezvoltă rapid, acest lucru fiind posibil atât datorită dezvoltării tehnologice care a condus la miniaturizarea dispozitivelor audio-video cât și a senzorilor specifici serviciilor oferite de acestea, care a avut ca rezultat benefic și scăderea prețului de achiziție. Astfel, drona ca și sistem de monitorizare a devenit ceva ușor de achiziționat și utilizat pentru multe servicii care, în trecut, se făceau punând în pericol vieți omenești. Principalele funcții implementate pe o dronă folosesc senzori din spectrul electromagnetic, senzori de raze gamma, senzori biologici și senzori chimici etc.

1.4 MULTUMIRI

În semn de recunoștință doresc să mulțumesc tuturor celor care mi-au acordat sprijinul în realizarea acestei lucrări.

Realizarea lucrării de față a fost elaborată cu ajutorul Departamentului de Masini Materiale si Acționări Electrice al Facultății de Inginerie Electrică din cadrul Universității Politehnica Bucuresti.

Am plăcerea de a aduce mulțumiri deosebite și o profundă recunoștință domnului profesor doctor inginer Constantin GHIȚĂ, conducătorul științific al lucrării, pentru îndrumarea competentă și ajutorul adus pe tot parcursul realizării acestei teze de doctorat. În același timp, mulțumesc și Comitetului de îndrumare a activității mele doctorale din care au făcut parte domnul prof.dr.ing. Tiberiu TUDORACHE, domnul conf.dr.ing. Ion Daniel ILINA și domnul conf.dr.ing. Vasile PETRE, pentru ajutorul acordat pe perioada de realizare a rapoartelor științifice aferente tezei de doctorat și a redactării finale a acesteia.

Mulțumesc și Societății Comerciale Wing Computer Group SRL pentru susținerea activității mele științifice în prima parte a stagiului de pregătire doctorală precum și Societății Comerciale Energy and EcoConcept, pentru a doua parte a stagiului de pregătire doctorală, cărora le sunt profund recunoscător pentru sprijinul acordat.

De asemenea, mulțumesc firmelor SC Solar Power și INCDE ICEMENERG pentru spațiul pus la dispoziție, atât de necesar pentru realizarea testelor intermediare și finale.

O parte din rezultatele prezentate în lucrarea de doctorat au fost obținute cu sprijinul Programul Operațional Capital Uman, Axa prioritară 6 - Educație și competențe din cadrul proiectului “Dezvoltarea competențelor de antreprenoriat ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – cheie a succesului în carieră” (A-Succes) Cod MySMIS: 125125

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei mele pentru susținerea și încurajarea permanentă în vederea realizării prezentei teze de doctorat.

2. UTILIZAREA DRONELOR ÎN DIVERSE DOMENII DE ACTIVITATE

Dronele ca și concept devin din ce în ce mai populare, iar acest lucru se datorează și scăderii prețului final de achiziție, dar mai ales avansului accelerat al tehnologiilor de la nivelul unei drone. Inovațiile din acest domeniu apar și se implementează într-un timp record, iar dimensiunile senzorilor specifici pentru misiunile ce pot fi executate cu ajutorul unei drone scad

odată cu creșterea rezoluției acestora. Misiunile care folosesc dronele ca și suport pentru senzori au devenit ceva obișnuit iar serviciile care au la baza această tehnologie se dezvoltă exponențial.

Prezența dronelor în industrie a adus schimbări semnificative în multe domenii, eliminând abordarea greoaie utilizată până la apariția acestora. În continuare se vor prezenta unele dintre domeniile cele mai importante în care dronele au schimbat deja lucrurile în bine și modul în care aceste tendințe vor avea un impact pozitiv în viitor.

➤ ***Domeniul militar***

Inițial dronele au fost folosite doar în scopuri militare pentru recunoașterea unor obiective și bombardarea unor ținte strategice, fiind cea mai importantă inovație din domeniul militar realizată în ultimii ani. În general, armata a fost, este și va fi cel mai bun sponsor pentru multe domenii în care inovația este prezentă. În cazul dronelor avantajele erau evidente mai ales pentru că utilizarea acestora salva viețile soldaților și oferea rapid informații importante în misiunile de observații și spionaj.

Un alt avantaj al dronelor militare îl reprezintă duranța, acestea putând zbura peste 2.000 de ore pe an, în comparație cu un avion de vânătoare cu echipaj uman la bord care poate acumula aproximativ 400 de ore de funcționare într-un an. În plus, din punct de vedere al dotărilor și al caracteristicilor de luptă, drona poate fi net superioară avioanelor de luptă clasice, deoarece oferă spațiu suplimentar deoarece nu mai este necesar spațiul ocupat de cabina piloților, drona ne având piloți. Astfel acest spațiu poate fi folosit pentru senzori suplimentari sau pentru încărcatura utilă suplimentară. De asemenea, prin lipsa personalului la bordul acestora, dronele nu mai au limitări legate de cele impuse de limitările fizice ale unui pilot uman și evident de eliminarea riscului generat de pierderi de vieți în rândul piloților.

➤ ***Domeniul asigurării mentenanței pentru instalațiile fotovoltaice.***

Prin modul de interconectare a celulelor la nivelul panourilor, a panourilor în stringuri și a stringurilor la sistemele de invertoare, în timpul exploatarea acestor echipamente pot să apară o serie de defecte, unele ușor de văzut cu ochiul liber dar altele fiind greu de identificat, practic doar atunci când deja defectul a generat pierderi majore prin propagarea la alte echipamente sau generarea de incendii cu un impact negativ asupra întregii centrale sau vecinătăților acesteia [3], [4].

În general într-o instalație fotovoltaică, defectele au ca efect secundar, în primă fază, o supraîncălzire locală. Astfel, o scanare cu camere cu termoviziune, la unghiul și distanța optimă, în general detectează 99 % din defecte. Datorită dimensiunilor mari ale centralelor fotovoltaice și a numărului mare de elemente de scanat, inspecția manuală nu este eficientă astfel se impune scanarea aeriană captând în același timp imagini în spectrul IR și vizibil. Identificarea defectelor se face folosind algoritmi specializați care țin cont de referințele înregistrate în prealabil în bazele de date cum ar fi referințe dimensionale, de locație și referințe spectrale [5].

În mod uzual, pentru scanarea aeriană a unei astfel de instalații se folosesc utilaje greoaie echipate cu nacelă sau aparate de zbor cu echipaj uman. Este clar că utilizarea unui utilaj printre rândurile cu panouri fragile nu este o soluție practică, în plus unghiurile optime de scanare sunt greu de atins și mai ales greu de menținut. Varianta de utilizare a aparatelor de zbor cu echipaj uman este o opțiune, dar are câteva dezavantaje: sunt scumpe iar imaginile captate sunt realizate de la o distanță destul de mare, cuprinsă în intervalul (30...50) m, distanța care introduce erori în analiză finală prin faptul că nu sunt evidențiate toate defectele. Dronelor au capacitatea de a scana în mod automat sau controlat de la distanță, pe trasee prestabilite sau la unghiuri predefinite, la costuri mult mai mici decât celelalte variante [6], [7].

➤ ***Domeniul asigurării mentenanței pentru turbinele eoliene***

La fel ca în cazul sistemelor fotovoltaice dronele folosite sunt dotate cu senzori de analiză în infraroșu și analiză termografică și camere foto-video cu rezoluție înaltă, atât pentru analiza

vizuală și fotografiere, cât și pentru analiza termică și în infraroșu. Detectarea fisurilor și a eventualelor depuneri de sedimente pe pale pot dezechilibra sistemul și pot duce inevitabil la avarierea întregii unități de producție. Defectele frecvente ce pot să apară sunt: fisuri structurale, delaminare, degradarea stratului de gel util pentru păstrarea unei turbulențe minime, decojirea vopselei de pe suprafața nacelei, turnului dar mai ales de pe pale, deteriorări datorate loviturilor generate de fulgere, deteriorarea sistemului de paratrăsnet, anomalii generate de defecte din fabricație sau generate de un montaj eronat etc. De asemenea și în cazul centralelor eoliene ca și în cazul altor instalații industriale se recomandă planificarea de inspecții aeriene care au ca rezultat prevenirea de astfel de evenimente, dar și prelungirea duratei de funcționare a întregului sistem [8].

În mod normal, pentru identificarea depunerilor pe suprafețele turbinei eoliene sau a defectelor structurale se detectează cu binoclul de la sol sau se folosesc platforme, macarale, alpiniști utilitari etc., toate acestea reprezentând riscuri pentru personalul uman folosit pentru asigurarea mentenanței [9]. Folosirea aeronavelor fără personal la bord elimină aceste riscuri și în plus distanța de scanare, unghiul și rezoluția de achiziție imagini/video pot fi schimbate de la sol în funcție de poziția soarelui sau de alți factori din locație. Drona efectuează capturi foto-video UltraHD/4K în spectrul vizibil, infraroșu și imagistică termografică pentru a detecta anomaliile din structura turbinei, pe care le stochează local și/sau le trimite la sol pentru stocare și analiză ulterioară. Cu ajutorul acestor date sistemul de la sol efectuează o hartă georeferențială indicând în mod interactiv, echipelor de intervenție, natura evenimentului, pentru o intervenție optimă. Dronele, fiind sisteme destul de stabile pot opera în condiții extreme, de temperaturi în intervalul (-40 ... +60)°C și vânt de până la 50 km/h.

➤ **Monitorizarea obiectivelor energetice de transport energie electrică**

Inspecția liniilor electrice aeriene (LEA) se face de regulă cu ajutorul elicopterelor sau patrulelor folosind personal calificat, dar aceste metode s-au dovedit de-a lungul timpului a fi ineficiente și costisitoare. Monitorizarea rețelelor de înaltă tensiune, utilizând echipament de zbor fără pilot, reprezintă un avantaj major față de metodele clasice utilizate până în prezent. Principalele caracteristici care recomandă dronele sunt: manevrabilitatea ridicată, capacitatea de a urma un plan de zbor, dimensiunile reduse ale droniei, scanare la rezoluție ridicată, costurile de zbor reduse, operatorul uman aflat în afara zonei de risc, aria mare de acoperire, timpul alocat mentenanței care scade exponențial etc. Pentru o scanare optimă, în general aceste inspecții se fac folosind două tipuri de drone, una cu aripă fixă care să zboare în lungul liniei, captând date brute despre limitele culoarului de vegetație și al eventualelor probleme structurale, iar cel de-al doilea tip de dronă fiind drona de tip multimotor care pe baza datelor brute primite de la prima dronă va efectua o scanare punctuală acolo unde aceasta a semnalat evenimente deosebite. Tot cu acest tip de dronă se pot face și scanări preventive a stâlpilor din punct de vedere structural sau al stării contactelor electrice [10], [11].

Datorită eficienței mari a dronelor în inspecția liniilor electrice aeriene, acestea sunt din ce în ce mai căutate, pentru aceste inspecții aeriene reușind să înlocuiască cu succes vechile metode costisitoare.

➤ **Măsurători 3D**

Dronele încep să înlocuiască rapid metodele tradiționale de a face cadastrul și topografia terenului. Ele au devenit atât de populare, încât mulți oameni din domeniu au renunțat la metoda clasică de măsurare a terenului. Dronele reduc timpul de lucru foarte mult, iar informațiile capturate de ele sunt de o acuratețe excelentă. De asemenea, dronele elimină erorile umane implicate în proces. Folosind sistemul LIDAR de scanare laser se pot realiza hărți de înaltă rezoluție prin teledetecție, detectare atmosferică și alte aplicabilități precum analize geografice,

geomorfologice, arheologice, topografice și multe altele. Utilizarea dronelor echipate cu sisteme de scanare laser reprezintă soluția ideală în segmentul de dezvoltare ce necesită capturi 3D ale anumitor perimetre cu o acuratețe mare și măsurători exacte ale distanțelor și unghiurilor terestre. Pot fi efectuate modele 3D ale structurilor industriale, clădirilor, barajelor și zonelor de vegetație. Prin sistemul de zbor autonom cu puncte de interes, dronele pot efectua zborurile în mod autonom, urmând coordonatele și declanșând automat captura foto.

➤ ***Agricultura***

Agricultura este un domeniu în care dronele deja au demonstrat un impact pozitiv, datorită multitudinii de avantaje pe care dronele deja le-au demonstrat. Problemele cu care se confruntă agricultura sunt destul de multe și dificil de anticipat sau controlat într-un timp util. Folosind un sistem echipat corespunzător cu dronă se pot obține informații rapid cu ajutorul echipamentelor multispectrale, ce identifică ușor zonele cu probleme. În general, în agricultură fermierii au probleme generate de secetă, de irigare neuniformă, de dăunători sau de boli specifice. Toate aceste probleme pot fi rezolvate simplu cu ajutorul dronelor și a senzorilor specifici amplasați la bordul acestora, care pot fi camere multispectrale sau aparate foto de înaltă rezoluție. Datele colectate de acești senzori sunt analizate cu ajutorul unor aplicații softare specializate care pot genera hărți cu zonele afectate dar și soluții pentru rezolvarea acestor anomalii. În plus, aceste date pot fi folosite direct în sistemele de poziționare de pe utilajele agricole și astfel se poate ajusta cantitatea de semințe, îngrășăminte, pesticide etc, ce trebuie utilizată pentru a fi remediate problemele identificate. De asemenea, dronele pot fi utile și pentru operațiunile de pulverizare a fertilizanților sau a produselor pentru protecția culturilor, cu o precizie ridicată, putând ajusta în timp real înălțimea și viteza de pulverizare în funcție de direcția și viteza vântului [12].

➤ ***Termografierea infrastructurilor.***

Încă un domeniu în care dronele sunt utilizate din ce în ce mai mult este cel de scanare a infrastructurilor în vederea determinării pierderilor energetice la nivelul anvelopei în special. În urma unei astfel de scanări cu senzori specifici se pot identifica multe probleme indiferent de faza în care acestea au apărut. Astfel pot fi identificate problemele de performanță datorate tuturor fazelor de construcție: de proiectare, de construcție sau apărute în decursul activităților de mentenanță. Identificarea și remedierea acestor probleme are în general un efect imediat în scăderea valorii facturilor cu utilitățile, eliminarea riscurilor asupra sănătății umane, dar mai ales poate să prevină apariția unor accidente nedorite [13], [14].

➤ ***Monitorizarea domeniului silvic.***

Un alt domeniu în care dronele pot fi utile este domeniul silvic unde sunt utilizate pentru studierea zonelor afectate de defrișări legale sau ilegale sau de incendii dar și pentru planificarea de plantări copaci. Dronele pot scana cu ușurință zonele greu accesibile, fiind echipate cu software și senzori specializați necesari pentru a crea hărți 3D ale acestor zone.

➤ ***Inspecție poduri și structuri diverse***

Introducerea dronelor în domeniul inspecțiilor infrastructurilor diverse are o evoluție din ce în ce mai favorabilă deoarece utilizarea acestora elimină riscurile pentru operatorii acestora sau pentru specialistii care efectuează inspecțiile, în mod clasic. În plus, acestea pot face inspecția chiar de la distanță și într-un timp semnificativ mai mic în cazul unei inspecții clasice unde în majoritatea cazurilor e nevoie de autospeciale, alpinisti utilitari, scari, schele etc. [15].

Astfel, utilizând aeronavele fără pilot la bord de tip multimotor, inspecția podurilor, coșurilor de fum, structurilor speciale poate fi făcută rapid și simplu, având o serie de avantaje deloc de neglijat unele fiind date de posibilitatea de scanare comparativă față de scanările

anterioare, astfel putându-se detecta ușor eventualele modificări structurale ce au apărut între cele doua misiuni.

➤ ***Domeniul medical - medicina de urgență.***

Integrarea dronelor în acest domeniu este de dată recentă, dronele fiind utilizate pentru început doar pe distanțe scurte pentru transportul coletelor speciale ce pot conține materiale sanitare. Frecvent, dronele pot acorda asistență primară până la sosirea unui echipaj uman la locul unui eveniment, transportând truse de prim ajutor și / sau un mini defibrilator. Dar această misiune are succes doar dacă la locul accidentului este prezentă o persoană viabilă care să poată să preia aceste echipamente și pe baza unor indicații primite de la serviciul de urgență, aflat la distanță să finalizeze acordarea primului ajutor până la sosirea unui echipaj specializat.

În plus, utilitatea dronelor va fi maximă în cazul unor calamități sau dezastre naturale când dronele pot să transporte medicamente, alimente etc spre zonele izolate, crescând șansele persoanelor asistate de către un astfel de serviciu de urgență [16], [17].

➤ ***Domeniul transportului de marfă - livrare de comenzi/ colete.***

În acest domeniu există deja o competiție între mai mulți competitori pentru dezvoltarea de astfel de activități folosind dronele. Până acum au fost testate mai multe variante de soluții, în mai multe domenii, inclusiv cel medical, un exemplu fiind compania WALMART care experimentează livrarea de produse alimentare și de teste COVID-19 pe perioada pandemiei folosind dronele din dotare. Alte companii care au testat acest domeniu sunt AMAZON care a și primit aviz favorabil pentru activități de livrare de colete folosind dronele, dezvoltând serviciul Amazon Prime pentru livrarea de colete cu masa de până la 5 kg. Altă companie din acest domeniu este Alphabet - Google Labs X care a dezvoltat serviciul de livrare "WING" ce poate transporta colete de până la 1,5 kg pe o distanță de până la 10 km, serviciu valabil și pentru Europa.

➤ ***Domeniul divertismentului***

Dronele au avut și au un impact masiv în viața cotidiană datorită faptului că toate dronele comercializate pentru zona civilă au în componență camere de înaltă rezoluție. Aceste camere pot înregistra ușor imagini sau audio-video de calitate superioară din unghiuri greu de atins de către un fotograf clasic. Astfel, dronele încep să devină un gadget obligatoriu la oricare eveniment important din viața unei familii și datorită compactării dimensiunilor totale ușor, ușor încep să devină ceva obișnuit și în vacanțe.

3. ELEMENTELE COMPONENTE ALE UNEI DRONE ALIMENTATE ELECTRIC

Din punct de vedere aerodinamic dronele multimotor sunt instabile, dar cu ajutorul autopilotului dar și a unor senzori specifici navigației aeronavelor, acestea pot atinge o stabilitate perfectă, chiar și în condiții de zbor improprii: viteza vânt până la 25 m/s, precipitații, temperaturi extreme etc. Practic în aceste condiții variațiile parametrilor sunt extrem de rapide, depășind viteza de reacție a unui operator uman, astfel controlul trebuie să se efectueze cu ajutorul unui microcontroler, care pe baza informațiilor sosite de la senzori să asigure stabilitatea dronei în regim automat. O schiță a acestui sistem este redată în Fig. 3.1, [18], [19].

Întreg ansamblul este un compromis între prețul total de fabricație și asigurarea unor parametrii minimali care să permită îndeplinirea misiunilor de zbor în condiții de siguranță, atât pentru marfa transportată dar mai ales pentru evitarea de accidente umane.

În continuare sunt exemplificate câteva componente principale ale dronei, fără a intra prea mult în detalii.

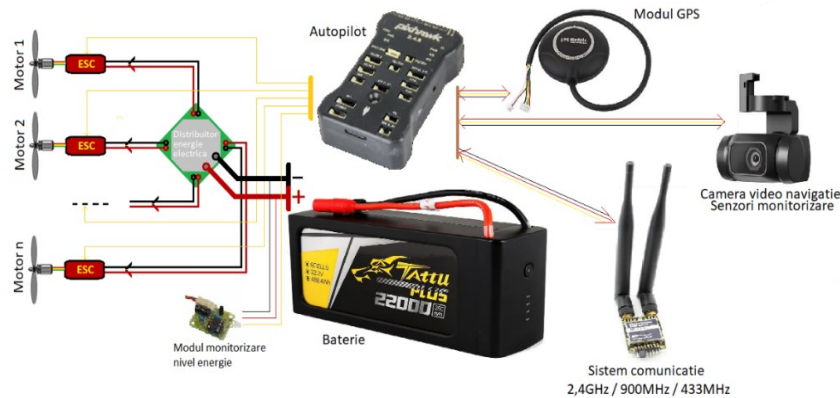


Fig. 3.1. Schema minimală de comandă a unei drone de tip quadcopter

➤ Șasiul și trenul de aterizare specific dronelor multimotor

În general șasiul dronelor este piesa principală care va servi ca suport pentru toate celelalte componente ce compun drona. Acesta este fabricat din materiale cât mai ușoare dar care totuși pot să absoarbă șocurile generate mai ales de aterizări sau decolări și care să nu fie prea rigide, existând pericolul să introducă tensiuni suplimentare în structura dronei. Cele mai folosite materiale sunt aluminiul și fibra de carbon sau combinații dintre acestea. Se folosește și plasticul dar doar pentru elemente sau zone limitate sau pentru drone mici, ieftine folosite ocazional pentru hobby, nu pentru drone ce operează în mediul industrial, semiprofesional sau profesional.

Trenul de aterizare optim se selectează în funcție de șasiul folosit dar mai ales de masa totală a dronei complet echipată, inclusiv masa utilă transportată de aceasta.

➤ Sistemul de navigație - autopilotul

Autopilotul este sistemul de comandă al dronei care ia deciziile optime pentru asigurarea condițiilor de zbor și a stabilității instantanee, conform unui algoritm implementat în microcontrolerul acestuia. Ca date de intrare, acesta primește informații în timp real de la senzorii de navigație amplasați la bordul dronei și de la operatorul aflat la distanță prin intermediul telecomenzii. Acești senzori care formează sistemul de navigație sunt:

- *IMU - Inertial Measurement Unit* - este o componenta esențială a sistemului de navigație al oricărei drone. Acesta este un dispozitiv electronic, un senzor inerțial care de obicei înglobează mai multe componente cu aceeași structură, astfel: giroscop, accelerometru, magnetometru sau busolă. senzor de presiune – returnează valoarea altitudinii prin măsurarea cu precizie a presiunii aerului la intervale stricte de timp.

- *GPS – Global Positioning System* - acesta este un senzor indispensabil sistemului de navigație al dronei, deoarece returnează poziția în spațiu a dronei la un moment dat. În plus acest senzor ajută la recuperarea dronei atunci când aceasta pierde comunicația cu operatorul, ghidând drona către un punct de întâlnire prestabilit inițial

Un alt senzor important pentru misiune este cel care oferă autopilotului informații despre rezerva de energie pe care se mai poate baza.

Telecomenzile folosite pentru controlul dronelor utilizează în general protocoale proprietar specifice producătorului acestuia, fiecare oferind o serie de avantaje dar și dezavantaje, oferind timpi de reacție mai mari sau mai lenți.

➤ Ansamblu motor-elice-driver electric folosit la construcția dronelor

După selecția piesei principale – șasiul, în raport cu greutatea totală a dronei este foarte importantă selecția unui tandem motor-ESC-elice optim, care să ofere tracțiunea și mobilitatea dronei în toate condițiile posibile de zbor. De-a lungul timpului, pentru propulsia dronelor, din

punct de vedere constructiv, au fost folosite două tipuri de motoare cu principii asemănătoare: cu perii – brushed și fără perii – brushless, evidențiate schematic în Fig. 3.2.

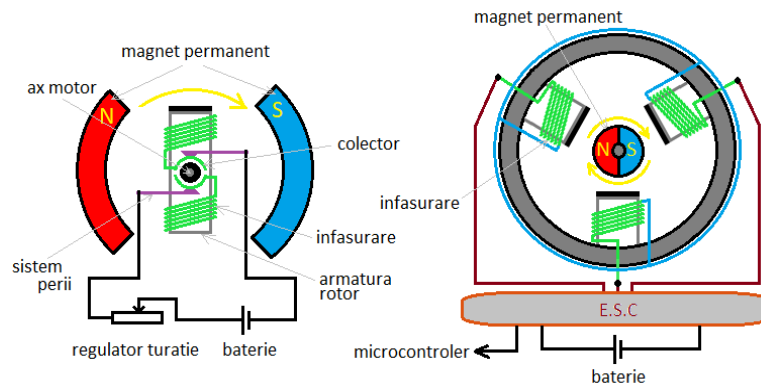


Fig. 3.2. Motoare de curent continuu tipice pentru industria dronelor alimentate electric: cu perii - brushed și fără perii – brushless [20]

Din punct de vedere al randamentului, motorul cu perii variază în intervalul (75...80)%, iar motorul fără perii variază în intervalul (85...90)% [21]. În cazul motoarelor clasice de curent continuu, cu perii – brushed, succesiunea înfășurărilor se face prin intermediul unui mecanism simplu care include un colector inelar montat solidar pe axul rotorului și un număr de perii grafitate ce transfera direct energia necesară către electromagneți. Dar, deși motorul cu perii este unul simplu din punct de vedere constructiv, ce în general nu ridică multe probleme, în cazul electronicii foarte sensibile de la nivelul unei drone, contactul electric format între colector și perii generează frecare, zgomot, scânteiere și disipă foarte multă căldură datorită arcului electric ce se creează la comutarea între succesiunile respective. Astfel, în circuitele electrice sunt generate zgomote electrice, impulsuri parazite de sens invers, distorsionând sistemul de alimentare. Alte limitări apar și datorită încălzirii înfășurărilor, care limitează turația maximă a motorului, mai ales că acestea sunt concentrate spre miezul motorului, ceea ce face ca răcirea să fie greoaie.

Astfel, pentru eliminarea acestor limitari generate de contactul imperfect de la nivelul colectorului, s-a dezvoltat un alt tip constructiv de motor la care succesiunea fazelor se face electronic. Pentru asta sunt folosiți tranzistorii de putere, poziționați în afara motorului și comandați prin intermediul unui microcontroler. În funcție de destinația finală a dronei se pot alege o multitudine de variante constructive. Astfel, un diametru mic și un stator mai înalt înseamnă turație mare a ansamblului motor-elice, cu manevrabilitate excelentă la viteze mici de deplasare, dar un cuplu mic. Acest lucru limitează masa totală ce o poate transporta drona.

Pentru controlul acestor motoare se folosește câte un controler specializat tip ESC pentru fiecare motor, sau unul compact. La proiectarea unei drone, ansamblul ESC-motor-elice, ce asigură tracțiunea unei drone, trebuie să poată asigura o rezervă de putere de minim 25% în orice moment al misiunii, pentru a putea compensa orice acțiune generată asupra sa de vânt sau de alte situații neprevăzute [22].

➤ **Alegerea și dimensionarea bateriilor utilizate pentru alimentarea dronelor electrice**

De-a lungul timpului pentru alimentarea dronelor au fost folosite mai multe tipuri de baterii, cel mai mare impact avându-l cele care au la bază tehnologia cu Litiu.

În funcție de masa utilă și de autonomia necesară îndeplinirii misiunii se dimensionează capacitatea minimă a bateriei [23]. Astfel, pentru dimensionarea și selecția bateriei se ține cont inițial de autonomia impusă de parametrii misiunii respective, pentru condiții ideale. Astfel se iau în calcul principalii parametri electrici ai dronei, precum:

- P_{dec} – puterea electrică necesară pentru ca drona să se desprindă de la sol [W];

- T – forța ascensională necesară pentru decolarea dronei [N];
- U_{bat} – tensiunea nominală a bateriei [V];
- Q_{bat} – capacitatea bateriei [mAh];
- w_{drona} – greutatea totală a dronei fără baterie [N];
- w_{bat} – greutatea bateriei [N];
- t_{zbor} – timpul de zbor, autonomia minimă impusă/necesară [s];
- k_p – constanta de reciprocitate între puterea consumată și forța ascensională;
- k_b – constanta densității de energie a bateriei, dată de producător.

Cunoscând relațiile matematice dintre acești parametri se poate estima timpul de zbor pentru condițiile ideale:

- puterea electrică necesară pentru ca drona să se desprindă de la sol:

$$P_{dec} = k_p \cdot T^{3/2} \quad (3.1)$$

- energia electrică din baterie E_{bat} :

$$E_{bat} = Q_{bat} \cdot U_{bat} \quad (3.2)$$

- greutatea totală a bateriei w_{bat} :

$$w_{bat} = E_{bat} \cdot k_b \quad (3.3)$$

Prima condiție ca drona să se ridice de la sol este ca forța de greutatea totală a sistemului să fie egală sau mai mică decât forța ascensională necesară pentru decolare:

$$T = w_{bat} + w_{drona} \quad (3.4)$$

A doua condiție pentru ca drona să poată să se deplaseze, să zboare un timp dat este ca energia electrică din baterie E_{bat} să fie cel puțin egală cu produsul dintre puterea electrică necesară pentru ca drona să se desprindă de la sol și timpul necesar îndeplinirii misiunii dorite:

$$E_{bat} = P_{dec} \cdot t_{zbor} \quad (3.5)$$

În acest fel rezultă timpul estimat de zbor al dronei:

$$t_{zbor} = \frac{E_{bat}}{k_p \cdot (w_{drona} + (E_{bat} \cdot k_b))^{3/2}} \quad (3.6)$$

➤ Tehnologii care stau la baza celor mai cunoscute tipuri de baterii

Fie ca este vorba despre o mini baterie cu o capacitate de max 100 mAh care alimentează o nano dronă, fie că ne referim la pachete de mai multe celule ce pot să ajungă până la 22.000 mAh sau chiar mai mult, folosite cu precădere pe dronele profesionale de dimensiuni mari, în general bateria reprezintă 20-30 %, din prețul dronei fără a include și senzorii transportați. Acest procent nu pare a fi important dar problema apare atunci când din diverse considerente pe perioada unei misiuni, intervine o eroare la circuitul de alimentare și astfel întreg angrenajul pică liber rezultând de cele mai multe ori daune materiale și uneori chiar umane. Astfel, deși bateria nu pare importantă, după un astfel de incident învățăm să punem mare preț pe aceasta.

În Fig. 3.3, se prezintă metoda de încărcare cea mai răspândită pentru acest tip de baterie, unde se observă ca profilul de încărcare al acestei metode prezintă o alătură cu paliere de curent constant și tensiune constantă, împărțită în 3 faze distincte [24].

Faza I: Preîncărcare. În această fază sistemul de încărcare testează starea bateriei prin monitorizarea tensiunii și reface stratul pasiv al acesteia care poate fi deteriorat în urma unei depozitări eronate. Astfel, bateria se încarcă la un curent minim până când tensiunea crește peste valoarea minimă impusă de producător pe fiecare celulă. Dacă timpul alocat acestei etape depășește 30 minute, bateria se consideră defectă și se renunță la procesul de încărcare. În plus, dacă temperatura mediului ambiant nu este în intervalul (0...45) °C, pornirea acestei etape se amână până când condițiile sunt îndeplinite. Temperaturile negative favorizează apariția

Litiului metalic, având ca efect degradarea accelerată a electrozilor. Încărcarea la temperaturi mai mari de 50 de grade Celsius poate să ducă în prima fază, la umflarea bateriei, după care dacă procesul de încărcare continuă, bateria poate să ardă cu flacără violentă sau chiar va exploda violent. Dacă totul este în parametrii normali, în momentul când tensiunea depășește tensiunea minimă impusă pe fiecare celulă se trece la faza următoare.

Faza a II-a: Încărcare la curent constant. Practic în această fază sistemul de încărcare va impune un curent constant în intervalul (0,5...1) C în funcție de starea și vechimea bateriei. Acest curent este considerat cel mai sigur pentru procesul de încărcare al acestor tipuri de baterii, asigurând un nivel optim de temperatură. Se poate crește acest curent de încărcare dar cu monitorizarea strictă a temperaturii. În cazul în care temperatura depășește 50 de grade, procesul de încărcare se suspendă pentru o perioadă prestabilită de timp. Această fază se consideră finalizată atunci când tensiunea pe fiecare celulă atinge tensiunea maximă impusă de fabricantul bateriei. Această etapă durează cam 70% din timpul total necesar procesului de încărcare.

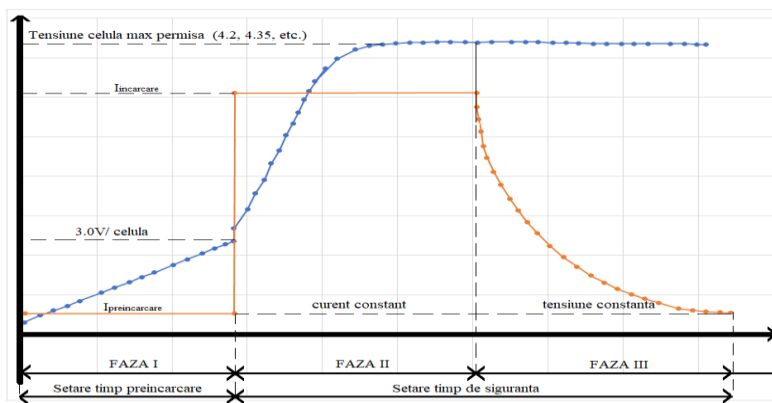


Fig. 3.3. Profil de încărcare al acumulatorilor Litiu-Polimer [25]

Faza a III-a: Tensiune constantă. În această fază sistemul de încărcare va menține tensiunea constantă la valoarea maximă impusă, iar curentul va începe să scada exponențial până la o valoare prestabilită, de (5...10) % din capacitatea bateriei, datorită rezistenței interne a bateriei, care variază foarte mult în această etapă. În funcție de calitatea și mai ales de vârsta bateriei, cu cât rezistența internă este mai mică cu atât timpul de încărcare este mai mic. Dacă se impune un curent de încărcare mai mare și timpul de încărcare este mai mic, dar viața bateriei se reduce semnificativ, deoarece litiul suplimentar se depune pe anodul acesteia transformându-se în litiu metalic. Acesta este foarte agresiv și extrem de rapid, reacționând cu electrolitul, având ca efect direct scăderea duratei de viață a bateriei.

➤ Tipuri de sisteme de echilibrare pentru bateria Li-Po

Încărcarea bateriilor Litiu-Polimer este un proces complex care necesită monitorizarea unor parametri critici precum tensiunea pe fiecare celulă, curentul de încărcare dar mai ales temperatura bateriei pe perioada întregului proces. Astfel, sistemul de încărcare trebuie să fie prevăzut cu un modul special pentru monitorizarea și echilibrarea celulelor [26].

Într-o primă clasificare modulele de echilibrare sunt de două feluri: pasive și active. În general, echilibrarea pasivă constă în echilibrarea tensiunilor pentru cele două stări: încărcat/descărcat, astfel toate celulele ajung la finalul încărcării/ descărcării la același nivel de încărcare – SOC. Acest lucru se realizează prin conectarea în paralel, pe fiecare celulă a unui rezistor de putere activat selectiv pe celulele cu tensiune mai mare disipând practic energia respectivă în căldură. Echilibrarea activă redistribuie energia de la celulele cu nivel de încărcare mai mare

folosind condensatoare sau convertoare DC-DC. O clasificare primară a sistemelor de echilibrare activă poate fi:

- *Echilibrare tensiune celule prin redistribuire încărcare* Acest sistem are prevăzute circuite speciale care sunt capabile să comute surplusul de energie de pe o celulă pe o altă celulă care are o tensiune mai mică. Astfel energia acumulată în baterie nu se pierde, doar se redistribuie. Diferența dintre metoda precedentă și aceasta apare atunci când se face echilibrarea în lipsa unei surse de curent, această metodă acceptând echilibrarea celulelor și atunci când lipsește încărcătorul.

- *Transport energie între celule* Pentru redistribuirea energiei între celule această metodă folosește condensatoare. Sistemul are un dezavantaj mare prin faptul că pentru a testa fiecare celulă, are nevoie de un timp mare, pierzând o parte din energia înmagazinată în condensatoare. De asemenea, există riscul ca datorită timpului mare pentru monitorizare și transfer energie, unele celule să depășească tensiunea maximă până sunt scanate, existând riscul de autodistrugere a acestora. Există totuși și sisteme mai avansate care pot să grupeze mai multe celule astfel că problema timpului se poate rezolva parțial, dar pierderea de energie tot există.

- *Convertor inductiv* Pentru transferul energiei între celule, acest sistem folosește un convertor de putere. Un astfel de sistem are la bază un algoritm care optimizează întreg procesul de echilibrare conferindu-i viteză și eficiență maximă, în comparație cu celelalte sisteme, transferul de energie făcându-se direct.

În concluzie, încărcătorul ideal al unei baterii cu mai multe celule, include clar un tip de echilibrare activă cu monitorizarea temperaturii la nivel de celula, monitorizare curent de încărcare și posibilitatea de ajustare a tensiunii și curentului de încărcare în funcție de temperatura celulelor. Dar în general, datorită costurilor mari, varianta cea mai răspândită este reprezentată de un sistem cu o echilibrare pasivă, simplă și ieftină.

4. PREZENTAREA DRONEI SUPT PROIECTATĂ ȘI REALIZATĂ ÎN CADRUL LUCRĂRII, CA BAZĂ PENTRU TESTE.

În cadrul testelor efectuate în această lucrare, s-a folosit o drona suport quadcopter, special proiectată și construită pentru testarea sistemului de încărcare dezvoltat [27]. Parametrii inițiali care au stat la baza proiectării acesteia sunt impuși de masa utilă ce trebuie să o transporte aceasta în condiții stabile de zbor dar și structura șasiului care să permită amplasarea de senzori și module în punctele cheie ale sistemelor ce o compun. Astfel s-a ajuns la configurația dronei exemplificată în Fig. 4.1, drona tip QuadCopter, cu următoarele caracteristici:

- șasiu fibră de carbon S500, cu ampatament de $\phi 520$ mm;
- tren de aterizare fix cu o înălțime de 250mm și o deschidere de 250x250mm;
- motoare brushless cu FPV 980rpm/volt;
- electronic sistem control – ESC, nominal 30A, BEC 5V/2A;
- autopilot Pixhawk de 32 biti;
- modul GPS - NEO-M8N;
- sistem de telemetrie 500mW/ 433MHz;
- telecomanda 10 canale;
- modul OSD si camera FPV;
- radio comanda 10 canale;
- baterie Li-Po în configurație 2S1P/ 3S1P.

Șasiul dronei suport este un model destul de răspândit, fiind unul de înaltă performanță pentru această clasă. Corpul principal este realizat din fibra de carbon, iar brațele sunt realizate din poliamidă-nylon ultra-durabil ramforsat cu fibră de carbon, combinație care îi conferă o rezistență și o elasticitate ideală pentru astfel de aplicații. Acesta a fost selectat pentru că este un tip de șasiu modular, permitând o mentenanță rapidă, putând schimba elementele avariate, ce au suferit deformări, fisuri etc, într-un timp scurt și cu o intervenție minimală, chiar pe timpul misiunilor, datorită îmbinărilor filetate. În plus, acesta are integrată în structura de rezistență și placa de distribuție energie folosită pentru energizarea celor mai mari consumatori de la nivelul dronei: ESC - motoare, sistem baterii etc.

Principalele elemente și dimensiunile de gabarit ale șasiului sunt următoarele:

- ampatament: ϕ 520 mm;
- interval acceptat pentru lungimea unei elici: 9 - 12 inch;
- masa: 420 g;



Fig. 4.1. Drona suport proiectată special pentru testare module experimentale

Trenul de aterizare este unul fix realizat din fibră de carbon cu o duritate și elasticitate optimă pentru a prelua șocurile generate la aterizare și decolare a întregului ansamblu. Constructiv, este format tot din module, care au avantajul că pot fi interschimbate extrem de rapid, fiind compus din două elemente care au forma literei T. Cele două tălpi orizontale, ce formează zona de contact cu solul, sunt construite din teavă de fibră de carbon, cu diametru de 10 mm, lungime de 250 mm și sunt prevăzute cu manșoane antiderapante pentru a elimina eventualele alunecări ce pot să apară la decolare/aterizare. De asemenea, pentru stabilitate, elementele verticale ale acestuia, formează un unghi de 70 de grade cu orizontala și sunt construite din teavă de fibra de carbon cu diametru de 16 mm, cu o lungime de 250 mm, îmbinate printr-un sistem tip flanșă filetată.

Pentru tracțiunea dronei s-a folosit un ansamblu ESC de 30A, cu motoare fără perii ce pot atinge o turație de 980 de rpm/volt. Modelul folosit pentru controlul turației motoarelor - Electronic Speed Control – ESC – este HP Simonik 30A.

Motoarele folosite, pot asigura o tracțiune excelentă, pentru o masă totală de minim 2kg, deci 500 grame pe fiecare unitate, în condiții de stabilitate optimă. Exceptional drona se poate încărca și peste această limită dar manavrabilitatea și stabilitatea acesteia scade treptat.

Elicele folosite se încadrează în dimensiunile impuse de șasiul dronei, având o lungime de 10 inch și o masă de 11 g. În plus, sunt conforme cu intervalul generat de software-ul de proiectare. Acestea sunt fabricate din fibră de carbon, acoperite cu un strat protector de rășină epoxidică și sunt extrem de rezistente la impact, echilibrate și elastice.

Autopilotul folosit pentru controlul zborului, este PIXHAWK PX4 PIX, versiunea 2.4.8, care are la bază două microcontrolere pe 32 biți, unul principal și unul în rezervă “calda”.

În plus, acest autopilot controlează toate elementele aditionale ale sistemului de navigație, precum: buzzer, buton de siguranță, LED RGB, GPS + compas etc.

GPS-ul folosit este model NEO-M8N, compatibil cu acest tip de autopilot. Acesta este foarte precis, cu o rată de detecție rapidă, având inclus și compasul necesar orientării dronei.

Din punct de vedere al telemetriei, s-au folosit două sisteme specializate, independente, care să asigure un volum de informații și un control optim al dronei pentru orice misiune civilă impusă. Astfel, pentru ghidarea din telecomandă a dronei, s-a mers pe frecvența de 433MHz, cu o putere de 500 mW ce oferă o comunicație sigură de până la 5 km, în câmp deschis. Astfel, drona poate fi controlată din telecomandă în mod sigur pe o rază suficient de mare. Un alt sistem de telemetrie cu care a fost echipată drona este cel folosit pentru navigarea video în timp real. Pentru siguranța zborului, dar și a dronei, s-a folosit o altă frecvență pentru transmiterea imaginilor captate, de 5,8GHz.

5. EXPERIMENTĂRI PRIVIND EXTINDEREA REGIMURILOR DE ZBOR ÎN CAZUL DRONELOR MULTIMOTOR ALIMENTATE ELECTRIC

Extinderea regimurilor de zbor, în cazul dronelor multimotor, înseamnă practic creșterea autonomiei de zbor, care se poate face prin mai multe metode, dar numai două au un impact major asupra timpului de zbor. O soluție poate fi optimizarea consumurilor instantanee la nivelul dronei prin studierea și compararea regimurilor de zbor pe perioada misiunilor. O altă soluție ar fi creșterea autonomiei dronelor pe perioada misiunilor prin dezvoltarea unor sisteme de încărcare fixe amplasate pe traseul acesteia. Pentru acest lucru se folosesc PAD-uri polarizate pentru încărcare și un software de monitorizare și/sau comandă a procesului de încărcare automată, metoda dezvoltată în cadrul acestei teze.

5.1 EXTINDEREA AUTONOMIEI DE ZBOR PRIN OPTIMIZAREA CONSUMURILOR INSTANTANEE DE LA NIVELUL DRONELOR MULTIMOTOR ALIMENTATE ELECTRIC.

Nu putem să discutăm despre optimizarea procesului de încărcare și mai ales despre eficientizarea acestuia atâta timp cât nu cunoaștem fenomenele electrice ce pot să apară în timpul unei misiunii efectuate cu drone multimotor și evident ordinele de mărime ale curenților și tensiunilor de la nivelul consumatorilor importanți ai unei drone alimentată electric [28].

Pentru monitorizarea și determinarea consumurilor de energie de la nivelul dronei suport, detaliată la capitolul 4, a fost conceput și plasat pe șasiul acesteia un sistem de monitorizare, în punctele principale de energizare reprezentate de circuitele de alimentare al celor mai mari consumatori din timpul unei misiuni.

Componentele sistemului de achiziție date sunt alese pe criteriile specifice aparatelor de zbor: consum minimal de energie și o masă cât mai mică. Ținând cont de acestea au fost selectate următoarele:

- platforma de dezvoltare Atmel Arduino MEGA 2560;
- traductor de curent LEM LA 55-P/SP1, $0 \div 100A$, cu precizie ridicată;
- modul SD Card, pentru salvare date local;
- modul RTC DS3231, modul de ceas, utilizat pentru sincronizarea datelor stocate;

- divizoare de tensiune, folosit pentru citirea tensiunilor în microcontroler;
- modul de comunicație serială: nRF24L01 (2,4GHz, PA+LNA) plus antenă externă;
- sursa în comutație simetrică de $\pm 12V_{cc}$ pentru alimentarea traductoarelor de curent;
- sursa în comutație, coborâtoare, pentru alimentarea generală a sistemului;
- sistem comunicație dronă - Arduino pentru sincronizarea măsurătorilor.

În cadrul acestui experiment la nivelul sistemului de energizare dronă, au fost definite câteva module principale, care combină părți hardware și software, pentru a putea să se determine ușor, consumul general. Astfel, în Fig. 5.1. sunt identificate următoarele module:

- *modul stabilitate dronă* – este compus din controlere tip ESC - Electronic Speed Controller, variază turația pe cele n motoare ce compun sistemul de propulsie/tracțiune al dronei, funcție de comenzile venite de la controlerul de stabilitate și de la modulul de navigație. Controlerul de stabilitate are grijă ca încărcarea fiecărui motor să fie optimă, pentru ca drona să fie stabilă și să nu zboare haotic, în lipsa unor comenzi specifice.

- *modul navigație dronă* - comunică cu operatorul prin canale de radiofrecvență codate, implementând comenzile generate de acesta prin consola de control a dronei aflată la sol. Împreună cu modulul precedent și senzorul GPS amplasat pe dronă la nivelul cel mai de sus, are grijă ca zborul să se realizeze lin și la punct fix.

- *modul achiziție date* - este compus dintr-o serie de senzori necesari pentru determinarile propuse în obiectivul proiectului, un modul de stocare date brute pe suport SDCard a datelor achiziționate și un modul de transmitere date brute, către un punct central de stocare aflat la distanță, la sol.

- *modul alimentare sisteme dronă*. Pentru alimentarea acestor sisteme se folosesc acumulatori tip Litiu Polimer care au capacitatea de a asigura un curent foarte mare pentru o perioadă de timp scurtă, fără a fi afectați structural.

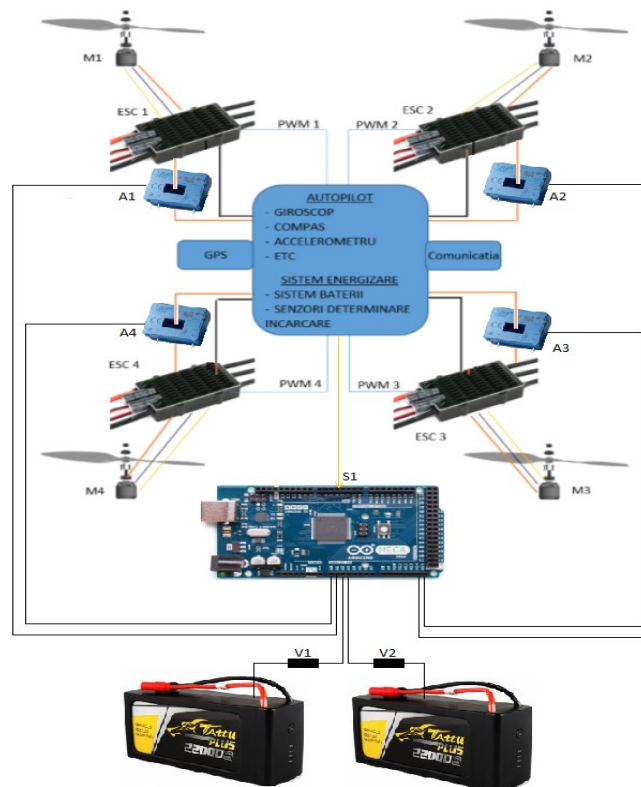


Fig. 5.1. Schema de conexiuni a sistemului de achiziție pe consumatori ai bateriei

Parametrii cei mai dinamici sunt cei de la nivelul tandemului *Elice – Motor – ESC*, astfel că pe fiecare motor s-a măsurat curentul consumat, folosind traductorii de curent LEM LA 55-P/SP1 montați pe circuitul ESC – baterie, mai precis la ieșirea din placa de distribuție putere electrică. Pentru determinarea puterii consumate în timp real, inevitabil avem nevoie și de măsurarea de tensiune pe bornele bateriilor. Astfel au fost montați 2 traductoare de tensiune de tip divizor de tensiune rezistiv pe bornele acestora.

Ceilalți consumatori de pe dronă: autopilot, GPS, sistem comunicație etc. au fost neglijați, estimându-se un consum constant al acestora la o medie de 6W adică 5V / 1,2A.

Toate aceste valori au fost achiziționate și prelucrate cu placa de dezvoltare utilizând intrările analogice care au o rezoluție de 10 biți, suficient pentru astfel de variații cât de cât lente. Toate datele achiziționate au fost sincronizate cu valorile înregistrate local, pe autopilot, care dă un semnal sistemului de achiziție la punerea sub tensiune a dronei.

➤ **Rezultatele și concluziile testelor realizate pe teren**

Măsurătorile au fost realizate în zona orașului Brașov, unde a fost simulată o misiune clasică de cartografiere. Altitudinea medie a dronei pe timpul misiunii a fost în jurul valorii de 50 m față de sol și aproximativ 550 m față de nivelul Mării Negre. Durata unei misiuni a fost de aproximativ 10 minute, cu un timp util de observație de 6 minute, realizându-se mai multe treceri pentru a alterna mai multe regimuri de zbor.

Pe timpul zborului drona a fost controlată în mai multe regimuri de zbor: viraje scurte, agresive, viraje lungi, accelerații rapide, accelerații lente etc., la o altitudine constantă în niște limite acceptabile. Traseul urmat este evidențiat în Fig. 5.4, iar pe perioada zborului condițiile meteorologice au fost bune, vântul fiind domol fără variații majore de viteză și direcție.

Mărimile principale achiziționate de către autopilot pe perioada zborului sunt afișate în figurile următoare și reprezintă nivelul tensiunii de la bornele bateriei Fig. 5.2 și nivelul curentului total consumat din baterie Fig. 5.3.

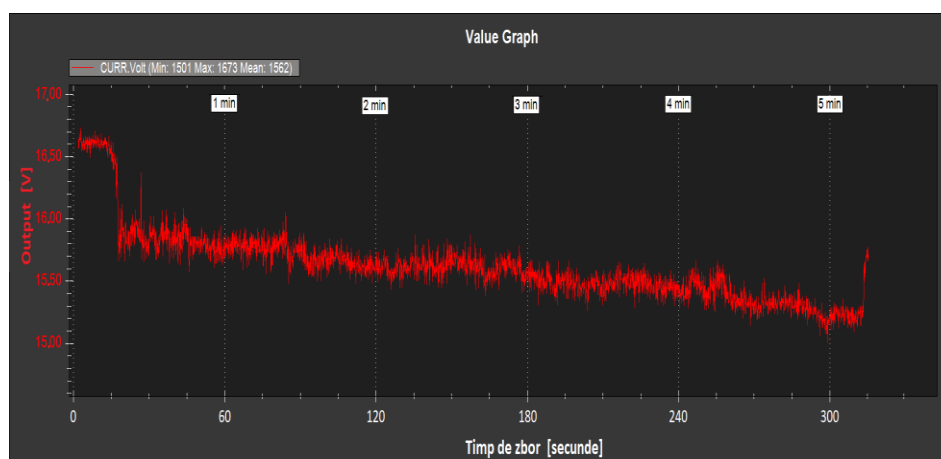


Fig. 5.2. Tensiunea la bornele bateriei – valori AUTOPILOT

Așa cum se observă tensiunea scade ușor pe timpul executării misiunii dar trebuie ținut cont că pe dronă nu există nici un consumator suplimentar în afară de componentele electrice ale acesteia care îi asigură funcționalitatea și sistemul de achiziție și monitorizare date funcționare care poate fi neglijat fără nici o problemă, având un consum extrem de mic în comparație cu consumul general.

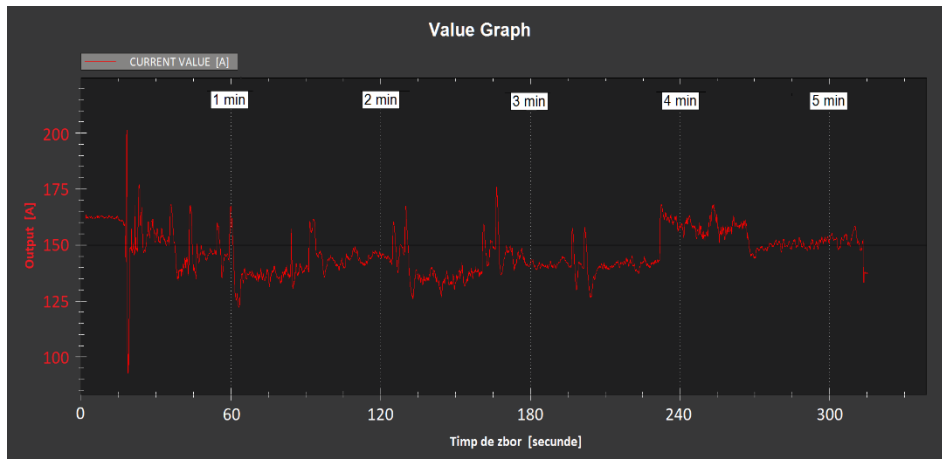


Fig. 5.3. Curentul total extras din baterie – valori AUTOPILOT

Evoluția cea mai spectaculoasă este cea a curentului electric, care așa cum se observă în graficul următor, coincide oarecum schimbărilor de altitudine și de direcție ale dronei (Fig. 5.4), lucru firesc atâta timp cât cei mai mari și mai importanți consumatori ai unei drone multicopter sunt motoarele care îi asigură stabilitatea atât de necesară unei misiuni clasice de observare sau cartografiere suprafețe teren unde orice deviere de la traseu poate să compromită măsurătorile efectuate prin introducerea de erori suplimentare.

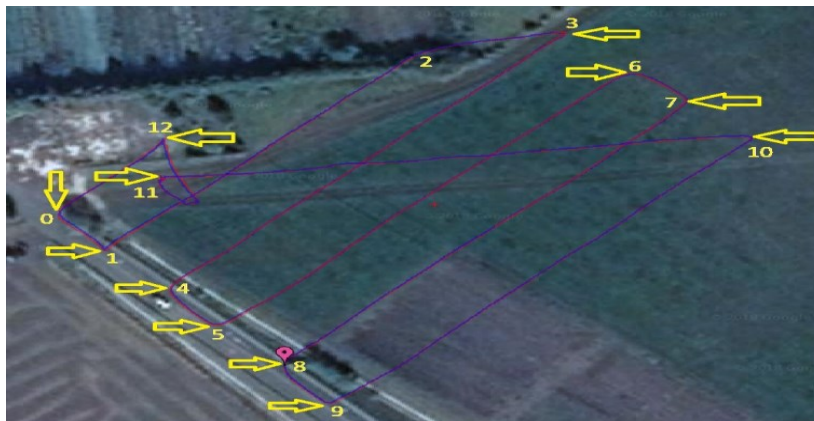


Fig. 5.4. Definire puncte de observație consum curent sisteme principale drona

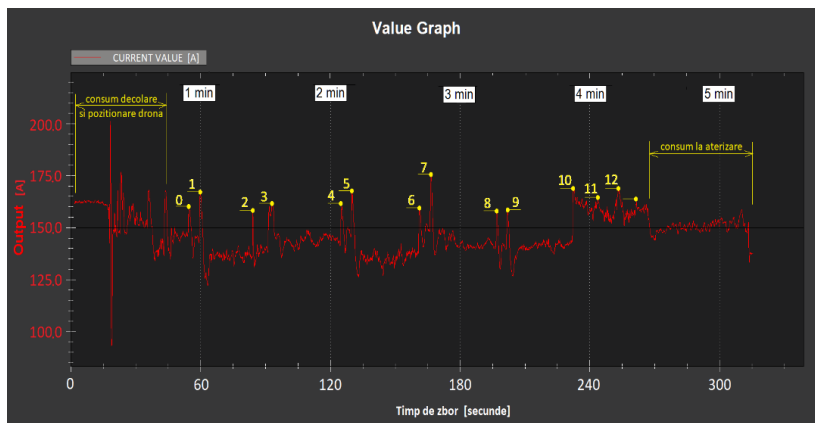


Fig. 5.5. Maximele curentului consumat în raport cu schimbarea direcției de deplasare

Sistemul implementat încearcă să mărească autonomia de zbor a dronelor multicopter analizând mai multe regimuri de zbor și prin comparație să se determine conduita de zbor cea mai favorabilă din punct de vedere al eficienței energetice fără a afecta acuratețea misiunii de

îndeplinit. Valorile achiziționate cu acest sistem sunt expuse parțial în graficele următoare în care s-au extras regiuni corelate cu diversele regimuri simulate pe drona folosită.

Având toți parametrii pe același grafic se pot trage concluzii mult mai ușor, astfel că în graficul din Fig. 5.6 s-au afișat: curentul total consumat de sistemul dronei, măsurat pe bornele bateriilor, curentul consumat pe fiecare motor M1 ÷ M4 măsurat pe bornele de intrare în ESC-ul aferent fiecărui motor și prin diferență s-a afișat și curentul total consumat de Autopilot inclusiv consumul senzorilor conectați la acesta, consumul sistemului de achiziție și consumul sistemului de monitorizare amplasat pe dronă.

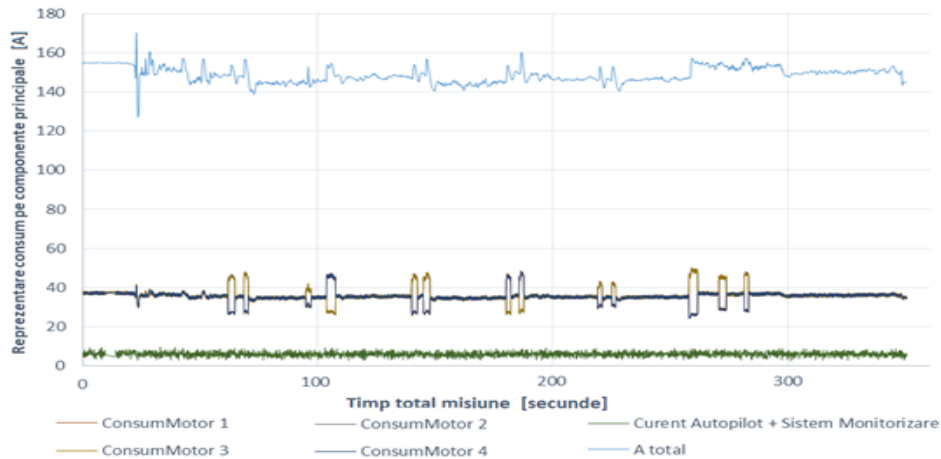


Fig. 5.6. Consumul real al principalilor consumatori amplasați pe drona suport multimotor

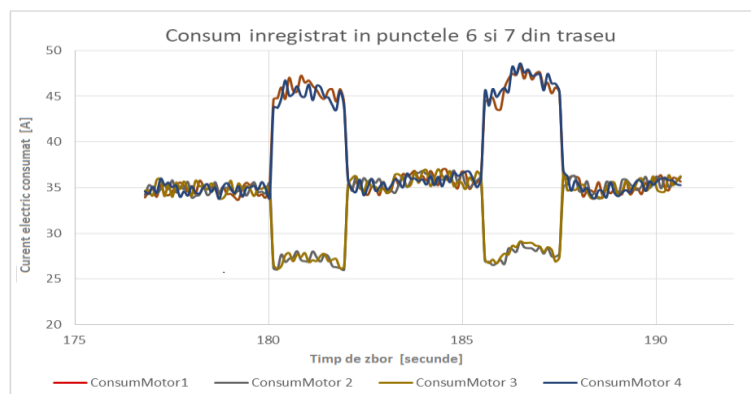


Fig. 5.7. Consumul real înregistrat în punctele 6 și 7 din traseu caracterizate prin zbor precis cu viraje la unghi cât mai drept

Astfel pe grafic se poate vedea evoluția consumului pe motoarele dronei la schimbarea altitudinii și la schimbarea direcției, dar mai important se poate vedea diferența dintre regimurile de zbor testate în timpul misiunii. Astfel, în graficele precedente, virajele de la punctele 8 și 9 au fost făcute pe un contur mai larg fără pretenție de unghiuri drepte, astfel din Fig. 5.6 se observă că pe aceste viraje consumul a fost cu cel puțin 10 % mai mic decât în cele cu unghi drept. Pentru exemplificare grafică prin comparație principalele vârfuri reprezentate de schimbări de viraje au fost reprezentate în doua figuri distincte: în Fig. 5.7, două viraje cu unghi drept, reprezentate de punctele 6 și 7 și în Fig. 5.8, alte doua viraje reprezentate de punctele 8, respectiv 9.

Evident că această economie se aplică doar acolo unde planul de zbor nu implică viraje la punct fix. Astfel pentru misiunile care nu au o astfel de restricție se poate preprograma în planul de zbor astfel de viraje care per total aduc economii de curent destul de însemnate și care pot să prelungească timpul misiunii cu cel puțin 10 %. Astfel în cazul unei misiuni care implica multe viraje de acest fel, timpul suplimentar poate să crească chiar și cu 30 %, lucru foarte important în această industrie în plină dezvoltare.

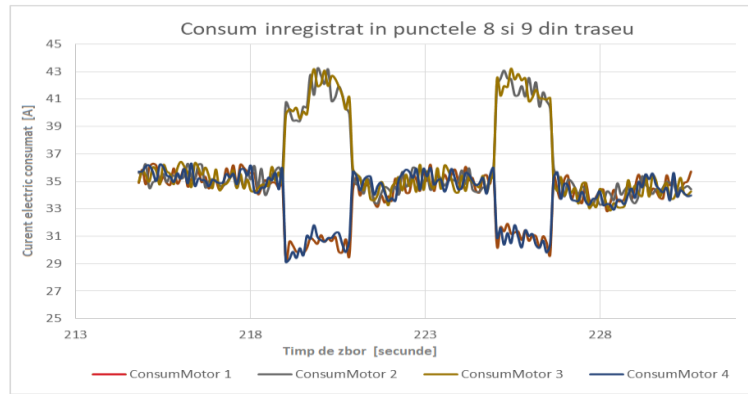


Fig. 5.8. Consumul real înregistrat în punctele 8 și 9 din traseu caracterizate prin zbor precis dar viraje luate cât mai pe larg în jurul punctului de referință

Alte economii de energie se pot face dacă se evită schimbarea altitudinii foarte des deoarece în aceste condiții motoarele își măresc turația și implicit consumul cu 10 până la 40%.

5.2 MODELE EXPERIMENTALE PRIVIND AUTOMATIZAREA PROCESULUI DE ÎNCĂRCARE A BATERIILOR DRONELOR ALIMENTATE ELECTRIC, FĂRĂ DECUPLAREA ACESTORA.

În cadrul acestei lucrări s-au studiat mai multe metode de automatizare a procesului de încărcare a bateriilor Li-Po, fără a le deconecta de pe drona suport, având ca obiectiv principal mărirea autonomiei pentru fiecare misiune realizată. Astfel, s-au studiat și proiectat mai multe variante de PAD-uri de încărcare, pentru automatizarea procesului, utilizând încărcarea directă cu contact fizic, dar și încărcarea wireless folosind bobine de inducție.

Aceste PAD-uri de încărcare pot fi montate în zona de interes, iar drona urmând a fi “învățată” sa se auto gestioneze din punct de vedere al consumului de energie prin structurarea timpului de zbor cu posibilitatea de a se autoîncărca cu energie electrica prin poziționarea independentă pe aceste PAD-uri de încărcare. Ca exemplu de zone preferate pentru așezarea acestor PAD-uri sunt acoperișul invertoarelor în cazul parcurilor fotovoltaice, acoperișul clădirilor monitorizate din perimetrul securizat, stâlpii liniilor electrice sau acoperișul stațiilor electrice monitorizate etc [29].

Schema generală de principiu este evidențiată în Fig. 5.9 și este grupată în doua module principale distincte cu funcții bine precizate:

- modul A - conține elementele montate la sol pe padul fix de încărcare;
- modul B - conține elementele montate pe dronă.

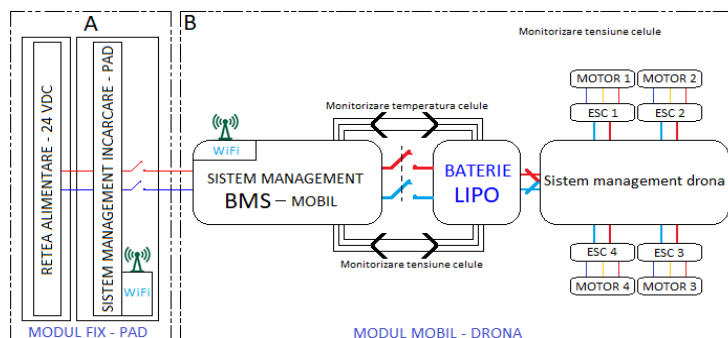


Fig. 5.9. Schema generală de principiu sistem încărcare dronă

➤ **Descriere stand experimental cu contact direct - testare în laborator.**

Fiind un stand experimental, pentru laborator, au fost introduse limite de gabarit, totul fiind limitat la drone cu deschidere maximă a trenului de aterizare de 600 mm. Alte limitări sunt

cele referitoare la nivelul de tensiune maxim, 3S1P, adică o tensiune nominală de 11,1 Vcc și un maxim de 12,6 Vcc. Întreg sistemul se bazează pe un contact direct între sistemul electric al dronei și zona de încărcare prin intermediul unor palpatoare instalate pe trenul de aterizare al dronei. Zonele fixe de contact ale standului sunt realizate din tabla de cupru de 2 mm grosime pentru a asigura un contact perfect între polii sistemului. Toate sistemele de monitorizare, inclusiv protecțiile au fost dublate conform recomandărilor din standardul IEEE 1625-2008, eliminându-se practic apariția unei erori sau probleme create de defectarea unor senzori [30].

În linii mari, standul dezvoltat în această secțiune, testează parametrii electrici ai dronei, setează nivelul și curentul de încărcare după care pornește procesul de încărcare, monitorizând constant întreg procesul [31].

Pentru selectarea celei mai bune soluții dar și a celei mai sigure metode de încărcare a acestor tipuri de baterii, s-a studiat procesul de încărcare gestionat de mai multe încărcătoare specializate pe două baterii cu caracteristici și capacități diferite: una cu două celule înseriate - 2S1P, 7,4Vcc, 5300mAh, 30C și una cu trei celule înseriate - 3S1P, 11,1Vcc, 10.000 mAh, 15C, ambele fiind formate dintr-un singur string în paralel.

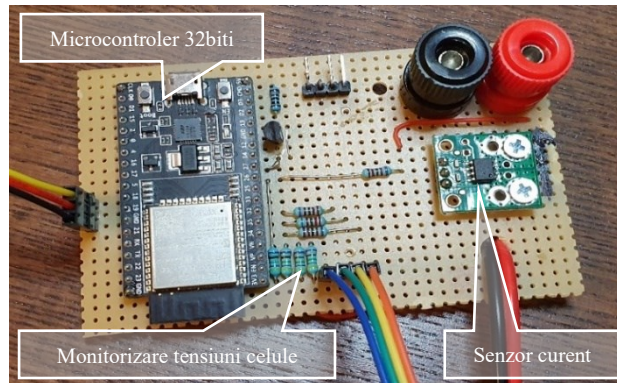


Fig. 5.10. Modul experimental pentru monitorizarea parametrilor de la nivelul bateriei/încărcătorului în timpul procesului de încărcare/descărcare.

De asemenea, pentru teste au fost selectate trei încărcătoare de puteri diferite: 50 W, 200 W și respectiv 300 W, dintre cele mai utilizate din domeniu, pentru cele două tipuri de baterii selectate. Aceste încărcătoare au implementate și circuite specializate pentru managementul automat al bateriei axat pe echilibrarea pasivă controlată a nivelului de încărcare pe fiecare celulă. Pentru acest lucru a fost dezvoltat un modul experimental - Fig. 5.10, care monitorizează toți parametri de la nivelul bateriei dar și de la bornele încărcătorului, pe întreaga perioadă a procesului de încărcare/ descărcare. Pentru achiziția și monitorizarea datelor se folosește un microcontroler pe 32 biti [32], iar pentru achiziția semnalelor analogice cu precizie cât mai bună s-a montat o sursă de tensiune de referință externă - TL1431IZ produs de STMicroelectronics.

Parametrii monitorizați sunt: tensiunea electrică pe fiecare celulă a bateriei, tensiunea electrică la bornele bateriei, curentul de încărcare/ descărcare și temperatura bateriei.

- *Tensiunea celulelor ce formează bateria.* Pentru citirea tensiunilor aferente celulelor care formează bateria s-au folosit divizoare de tensiune cu rezistențe de precizie.

Citirea acestor tensiuni utilizând un microcontroler care folosește pentru intrările analogice un ADC cu rezoluție de 12 biți prezintă un avantaj față de alte soluții clasice pentru ca intervalul de măsură este împărțit în 2^{12} valori discrete, adică în 4096 de eșantioane, iar măsurătoarea este mult mai precisă în acest caz.

- *Tensiunea electrică la bornele bateriei.* Această tensiune coincide cu tensiunea măsurată anterior, U_{cell2} în cazul bateriei cu 2 celule în serie - 2S sau coincide cu tensiunea

Ucell₃ în cazul unei baterii cu 3 celule - 3S. Când încărcătorul este conectat la baterie, aceasta va coincide cu valoarea tensiunii de la bornele încărcătorului, care în general este mai mare cu aproximativ 10% decât tensiunea maximă a bateriei – 13,5 Vcc pentru o baterie 3S și 9,0 Vcc pentru o baterie cu o configurație 2S.

- *Măsura curent încărcare.* Pentru măsurarea curentului de încărcare s-a optat pentru utilizarea unui senzor liniar de curent cu efect Hall, care poate măsura izolat electric, ceea ce permite inserarea senzorului oriunde de-a lungul căii de curent. Senzorul ACHS-7121 folosit, este un senzor bidirecțional cu un interval de măsură ce acoperă întreg necesarul $\pm 10A$ cu o precizie și o fiabilitate ridicate: eroare totală tipică de ieșire de $\pm 1,5\%$ la temperatura camerei cu calibrare din fabrică, o tensiune de ieșire extrem de stabilă și histerezis magnetic aproape zero.

- *Temperatura la nivelul bateriei.* Unul dintre cei mai importanți parametri în procesul de încărcare a unei baterii, este temperatura acesteia pe perioada procesului de încărcare/descărcare. În cazul BMS-ului (Battery Management System) implementat pe dronă, citirea temperaturii se face cu senzorul digital de temperatura DS1820, care are un domeniu de măsură cuprins între $(-55...+125)$ °C, suficient pentru monitorizarea bateriilor cu tehnologie litiu și o rezoluție de până la 12 biți. În Fig. 5.11 sunt prezentate câteva imagini din timpul testelor cu evidențierea celor 2 baterii utilizate pentru energizarea dronei:

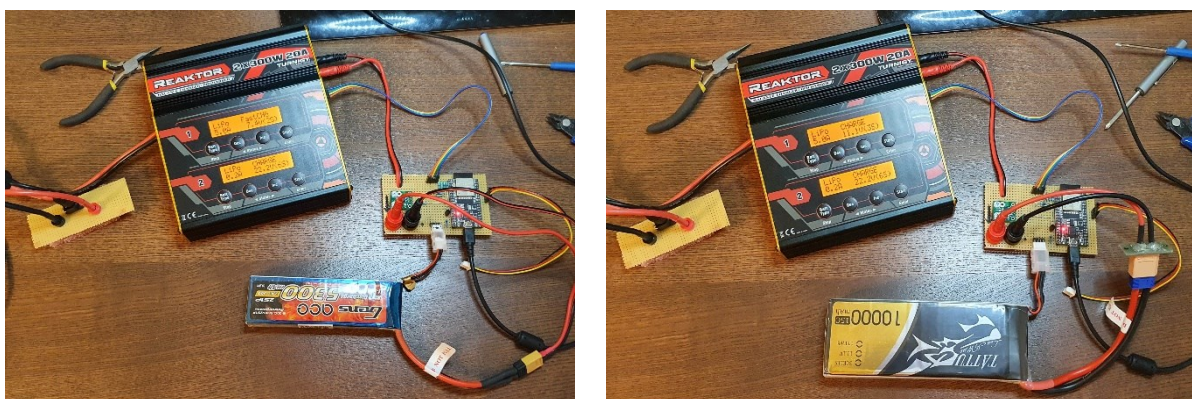


Fig. 5.11. Imagini din timpul testelor cu evidențierea sistemului de monitorizare și a celor 2 baterii folosite.

Din analiza datelor preliminare, rezultate la finalul testelor efectuate, s-a proiectat arhitectura și algoritmul ce se implementează pe standul experimental. În Fig. 5.14 se prezintă imaginea modului mobil amplasat pe dronă care include un BMS specializat. Algoritmul dezvoltat folosind rezultatele acestui test, are la bază cea mai răspândită metodă de încărcare a bateriei Li-Po, folosind metoda curent constant / tensiune constantă și care urmărește practic alina curbei de încărcare din Fig. 3.3, exemplificată anterior în capitolul 3. Această metodă are trei faze principale: preîncărcarea, încărcarea cu curent constant și încărcarea cu tensiune constantă.

Faza I. În faza de preîncărcare, în primul rând s-a testat temperatura mediului ambiant și a pachetului de celule care formează bateria. Dacă temperatura nu este în intervalul optim de temperatură $(0...45)$ °C, procesul de încărcare este amânat. Începerea procesului de încărcare la temperaturi joase favorizează apariția Litiului metalic ceea ce înseamnă degradarea accentuată a electrozilor ce formează o celulă, iar în cazul unei temperaturi peste limita superioară are ca rezultat degradarea accelerată a celulei și implicit a bateriei. Dacă temperatura celulelor este în limitele acceptate atunci se începe procesul de încărcare, încărcând bateria la o rată de 10 % din capacitatea nominală de încărcare, până când tensiunea atinge pragul de 3.0 V pe fiecare celulă. Practic, în această fază se testează integritatea celulelor, astfel se regenerează stratul pasiv, care

este afectat dacă bateria a fost stocată o perioadă mai mare de timp. Dacă tensiunea celulelor nu atinge primul prag de tensiune într-un timp maxim de 30 de minute, atunci procesul de încărcare se încheie cu o eroare, deoarece structural sau chimic celulele sunt compromise. Dacă tensiunea pe fiecare celulă depășește pragul de 3.0 Vcc atunci procesul de încărcare intră în faza a 2-a.

Faza a II-a. În această fază, în testele efectuate s-a setat rata de încărcare la 1C, temperatura rămânând în limite acceptabile pentru acumulatorul de test. Procesul de încărcare rămâne setat pe acești parametri până când tensiunea pe fiecare celulă atinge maximumul prescris de producătorul bateriei, care în acest caz este de 4,2 V. Și în această fază se urmărește evoluția temperaturii. Dacă temperatura depășește pragul maxim, procesul de încărcare se suspendă până când temperatura scade sub 45° Celsius. Când tensiunea atinge valoarea prescrisă se intră în faza a III-a. Pe perioada acestei faze sistemul de echilibrare monitorizează tensiunea fiecărei celule având grijă ca aceasta să nu depășească maximumul impus.

Faza a III-a. În această fază a procesului de încărcare curentul începe să scadă exponențial la un curent minim prestabilit iar tensiunea este reglată pentru a rămâne la valorile maxime de referință menționate la faza a II-a. Scăderea curentului se face natural datorită rezistenței interne a bateriei până la o valoare de (5...10) % din curentul de încărcare specificat pe baterie, moment când algoritmul implementat, întrerupe procesul de încărcare, considerând bateria încărcată complet. Pentru siguranța bateriei, această condiție poate fi dublată prin măsurarea tensiunii pe fiecare celulă a bateriei. Dacă toate celulele ajung la 4,2V, atunci procesul de încărcare s-a finalizat.

Pentru testarea acestui algoritm teoretic, inițial s-a construit o platformă prototip exemplificată în Fig. 5.12. Ulterior, pe baza rezultatelor obținute pe acesta s-a construit un stand de încărcare optimizat din mai multe puncte de vedere. Astfel, toate facilitățile dezvoltate și testate pe această platformă pilot sunt detaliate în paragraful următor, unde se prezintă direct pe versiunea îmbunătățită a acestuia. Deosebirea majoră dintre cele două versiuni fiind că pentru acest prototip s-a folosit microcontrolerul Arduino Mega 2560, ce are o frecvență de lucru de 16 MHz, iar în varianta optimizată s-a folosit un microcontroler miniatural de 32 biti, cu caracteristici net superioare.

O altă diferență între cele două variante realizate este că pentru protecția bateriei aflată în procesul de încărcare, la varianta inițială a fost folosit un sistem BMS extras de pe un încărcător de putere mică, la care nu exista posibilitatea de a fi monitorizat sau controlat de la distanță, iar la varianta optimizată a fost creat unul special, la nivelul dronei, la care au fost implementate diverse funcții pentru monitorizarea și controlul acestuia.

Astfel, pentru simplificarea întregului proces de încărcare/descărcare realizat cu acest stand experimental optimizat, întreg procesul a fost împărțit pe două module distincte, unul montat pe bateria dronei, deci mobil, iar altul fix lângă cele două zone de aterizare polarizate, cu care se controlează întreg procesul. În final totul are ca scop reducerea greutății finale a modulului instalat pe dronă și creșterea autonomiei misiunilor încărcând bateriile dronei în regim semi-automat, fără a fi nevoie de un operator uman care să le deconecteze de pe aceasta.

Componentele sistemului sunt simple dar lucrează în tandem după un algoritm bine pus la punct care răspunde eficient la evenimentele ce apar pe perioada procesului de încărcare/descărcare [33]. După locul unde sunt amplasate în sistem, acestea sunt împărțite clar în două module distincte, unul montat la nivelul standului, iar celălalt fiind amplasat pe dronă, pe suportul de baterie. Pentru exemplificare, aceste componente și așezarea lor în cadrul sistemului sunt evidențiate în Fig. 5.18 și Fig. 5.19. Pentru achiziția și monitorizarea datelor și controlul procesului de încărcare, în mod autonom, pentru fiecare modul a fost utilizat tot un

microcontroler cu 32 biți, folosit și la modulul experimental, prezentat anterior. Acesta are o greutate de 10 grame, dimensiuni extrem de mici și mai multe interfețe de comunicație: GPIO, 2xI2C, WiFi, Bluetooth, Bluetooth Low Energy, 2xI2S, 3xUART, USB micro, SDIO, 3xSPIO, dintre care cea mai importantă este interfața Wi-Fi, deoarece prin aceasta se realizează schimbul de date între cele două module, în regim transparent, pe o distanță de cel puțin 150 m. Pe aceste microcontrolere au fost implementate două software-uri, având ca bază protocolul ESP_NOW ce permite un schimb de date între cele două module în mod automat, stabil și la viteze de transmitere, extrem de bune. În plus, pe microcontrolerul amplasat pe baza fixă, a fost implementat și un WebServer cu ajutorul căruia utilizatorul poate prelua controlul întregului proces printr-o interfață WEB.

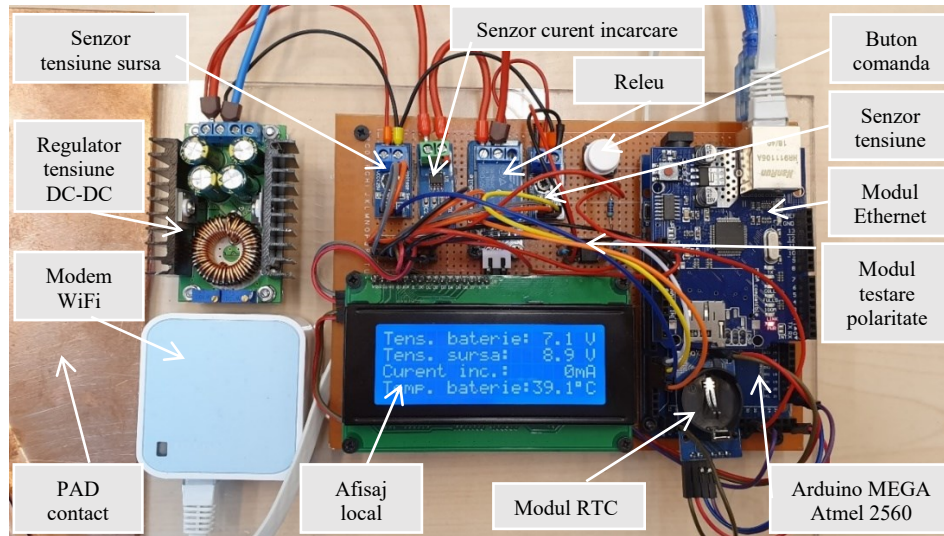


Fig. 5.12. Modulul de monitorizare și comanda de la nivelul PAD-ului – prototip

Prin interfața html dezvoltată în cadrul acestui model experimental, utilizatorul poate să vizualizeze și să analizeze în timp real sau off-line valorile fiecărui senzor, afișate cu ajutorul unor slidere, care au avantajul că oferă o informație importantă asupra limitelor impuse inițial de către utilizator. Interfața returnează în timp real, printr-o grafică intuitivă, starea fiecărei valori achiziționate: stare normală - slider verde, stare prevarie – slider de culoare portocaliu și avarie – culoare roșie, iar toate erorile apărute sunt stocate în baza de date și transmise către operator. În cazul în care limitele presetate de utilizator sunt depășite, microcontrolerul oprește temporar procesul de încărcare/ descărcare până când valorile reintră în normal sau până la validarea/resetarea erorii de către operator, în funcție de clasificarea avariei în algoritmul implementat.

A. Modulul amplasat la nivelul dronei – MODUL MOBIL

Modulul amplasat pe dronă se ocupă efectiv cu protecția și managementul încărcării/ descărcării bateriei dar are și rol de protecție a dronei deservite. La proiectarea acestui BMS s-a avut în vedere ca acesta să fie compact și cât mai ușor, deoarece prin sistemul introdus nu se dorește să se scadă caracteristicile principale ale dronei de test: capacitatea de transport dar mai ales manevrabilitatea dronei. Forma finală a acestui modul este prezentată în Fig. 5.14.

Utilizatorul are posibilitatea să pornească sau să oprească procesul de încărcare oricând dorește, local sau de la distanță, indiferent de starea de încărcare a bateriilor. Alt avantaj este acela că poate să decidă dacă pune bateria în modul “stand-by” – depozitare, în cazul neutilizării unei perioade mai mari a dronei.

Astfel, parametrii monitorizați la nivelul dronei sunt:

- tensiunea electrică pe fiecare celulă din structura bateriei.

- tensiunea electrică la bornele bateriei;
- tensiunea electrică a sursei de încărcare, conectată la modul, prin intermediul palpatoarelor;
- curentul electric de încărcare/ descărcare pe circuitul principal;
- temperatura la nivelul bateriei;
- *Tensiune electrică la bornele celulelor bateriei.* Pentru citirea tensiunilor aferente celulelor ce formează bateria dronei s-au folosit divizoare de tensiune cu rezistențe de precizie. Toate tensiunile sunt citite față de GND-ul (-) al bateriei, astfel că:

- tensiunea pe celula 1 este:

$$U_{cell_1} = V_{cell_1} \cdot \frac{3,3 + \text{calibrare}}{4096} \quad [V_{cc}] \quad (5.1)$$

- tensiunea pe celula 2 este:

$$U_{cell_2} = \left(V_{cell_2} \cdot \frac{3,3 + \text{calibrare}}{4096} \right) - U_{cell_1} \quad [V_{cc}] \quad (5.2)$$

- tensiunea pe celula 3, în cazul bateriei 2 testate 3S1P, cu 3 celule este:

$$U_{cell_3} = \left(V_{cell_3} \cdot \frac{3,3 + \text{calibrare}}{4096} \right) - U_{cell_2} \quad [V_{cc}] \quad (5.3)$$

unde:

- U_{cell} este tensiunea celulei măsurată în volți;
- V_{cell} este tensiunea achiziționată în valori discrete;
- calibrare – calibrarea intrării analogice folosită pt achiziția respectivă ținând cont de tensiunea etalon furnizată de sursa de tensiune de referință și de calibrarea brută realizată prin comparație cu tensiunea citită pe un multimetru de precizie.
- $4096 = 2^{12}$ reprezintă rezoluția ADC-ului, adică numărul de valori discrete în intervalul de măsură aferent tensiunii maxime acceptate pe intrarea respectivă, care în cazul acesta este de $3,3V_{cc}$.
- *Tensiunea electrică la bornele bateriei.* Această tensiune coincide cu tensiunea măsurată anterior U_{cell2} în cazul bateriei cu 2 celule în serie - 2S din care nu se mai scade tensiunea U_{cell1} sau coincide cu tensiunea U_{cell3} din care nu se mai scade U_{cell2} în cazul utilizării unei baterii cu 3 celule - 3S. Când încărcătorul este conectat la baterie, aceasta va coincide cu valoarea tensiunii de la bornele încărcătorului care în general este mai mare cu aproximativ 10% decât tensiunea maximă a bateriei – $13.5 V_{cc}$ pentru o baterie 3S și $9 V_{cc}$ pentru o baterie cu o configurație 2S.

• *Tensiunea electrică la bornele sursei de încărcare.* Această tensiune reprezintă tensiunea colectată de pe PAD-ul de încărcare folosind cele două palpatoare polarizate, instalate pe trenul de aterizare al dronei, evidențiate în Fig. 5.13. Pentru achiziția ei se utilizează tot un divizor de tensiune format din rezistențe de precizie la fel ca la măsurarea tensiunilor pe celule. Aceasta este utilă pentru stabilirea unui nivel sigur al tensiunii de încărcare și este comparată cu tensiunea la bornele bateriei înainte de a starta procesul de încărcare.

- *Măsură curent de încărcare.*

Pentru măsura acestui parametru s-a folosit senzorul ACHS-7121, iar descrierea acestuia și schema de măsură folosită pentru achiziția curentului de încărcare/ descărcare este cea descrisă anterior la modulul experimental.

• *Temperatura la nivelul bateriei.* De asemenea, pentru măsura temperaturii se folosește senzorul descris la modulul experimental montat într-o tijă metalică cu protecție la UV și la umiditate excesivă.

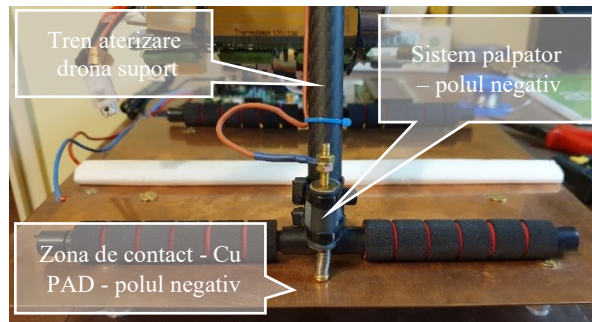


Fig. 5.13. Evidențiere sistem de contact direct între PAD și drona – palpator experimental

Tot cu acest senzor se verifică și temperatura inițială a pachetului de baterii, înainte de startul oricărei sesiuni de încărcare. Conform producătorilor de baterii Litiu-Polimer, dacă temperatura acestora este sub zero grade Celsius, procesul de încărcare prezintă riscuri pentru baterie și pentru mediul ambiant al acesteia, existând riscul de distrugere a bateriei/bateriilor. Astfel, se amâna pornirea procesului de încărcare și se comandă alimentarea cu energie a unei rezistențe electrice de încălzire, care este montată inițial solidar pe baterie.

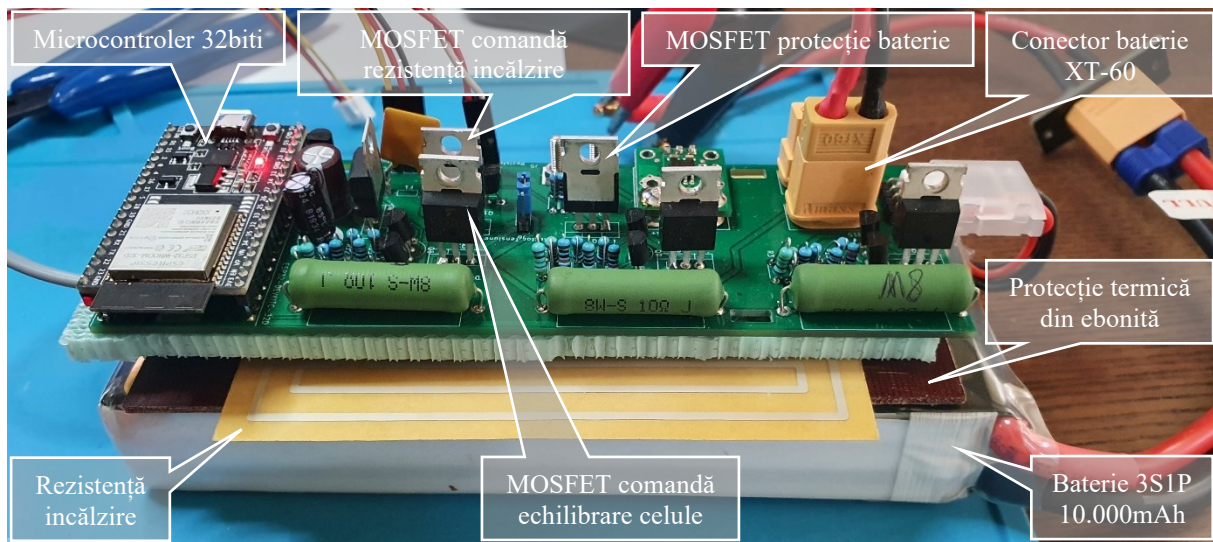


Fig. 5.14. Modul compact format din baterie, modul BMS și rezistență încălzire

Toate comenzile implementate la nivelul acestui modul sunt date prin intermediul microcontrolerului conform unui algoritm prezentat în continuare și executat cu ajutorul unor MOSFET-uri de putere ce au avantajul unei mase minime comparativ cu alte tipuri de elemente de comandă cu aceleași caracteristici: tensiune și curent comutat.

De asemenea, BMS-ul implementat la nivelul dronei este unul simplu și se bazează pe o monitorizare foarte precisă a tensiunilor pe celulele care formează bateria [33]. Când diferența dintre aceste tensiuni este mai mare de 50mV, pe celulă/celulele cu tensiune mai mare se cuplează în paralel câte o rezistență de putere, astfel curentul de încărcare pe celula respectivă scade frânând procesul de încărcare strict pentru acestea, dând posibilitatea celorlalte să ajungă la același nivel de încărcare. Dacă pe perioada monitorizării tensiunea oricărei celule crește peste pragul maxim acceptat de 4,20 Vcc/celulă, întreg procesul este oprit, urmând ca echilibrarea celulelor să se finalizeze pe ciclul următor de încărcare. În Fig. 5.15 se exemplifică schema de comandă pentru BMS-ul amplasat pe modulul de pe dronă, la nivel de celulă, folosind o interfață minimală între ieșirile microcontrolerului și MOSFET-urile utilizate.

În schema precedentă, simbolul +Vbat reprezintă nivelul maxim de tensiune aferent configurației de baterie utilizate și este corelat printr-un selector hardware tip jumper astfel:

baterie 2S \rightarrow 7,4 Vcc, baterie 3S \rightarrow 11,1 Vcc, putând atinge valoarea maximă de 8,4 Vcc, respectiv 12,6 Vcc, atunci când bateria este 100% încărcată.

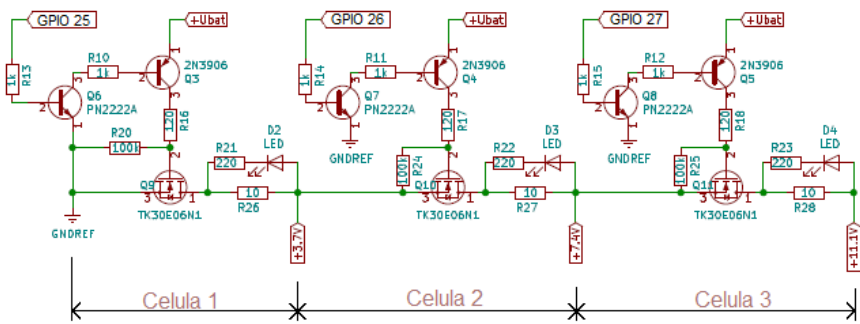


Fig. 5.15. Modul de comandă echilibrare pasiv al celulelor bateriei - BMS

Toți acești parametrii sunt transmiși spre microcontrolerul de pe PAD-ul fix, care împreună cu informațiile colectate de la senzorii acestuia, ia rapid decizii pentru protecția bateriei dar și a dronei implicit, oprind încărcarea atunci când situația o cere.

B. Modulul amplasat la nivelul bazei fixe – MODUL FIX

Acesta este amplasat la sol, pe baza de încărcare și are sarcina de a asigura tensiunea și curentul electric, necesare pentru întreg procesul de încărcare, dublând în același timp monitorizarea și protecțiile aferente procesului de încărcare. De asemenea, în configurația acestuia intră și PAD-urile folosite ca și bază pentru aterizarea dronei dar și ca zonă activă polarizată electric pentru transfer energie electrică către BMS-ul instalat pe drona. PAD-urile sunt realizate din tablă de cupru de 2 mm grosime cu puritate înaltă de peste 99,9% pentru a putea asigura un contact cât mai ferm între palpatoarele montate pe trenul de aterizare și baza fixă. De asemenea și palpatoarele sunt realizate tot din cupru iar legătura dintre acestea și modulul aplatat pe baterie este făcut cu conductor multifilar cu izolație siliconică. Forma finală a acestui modul este prezentată în Fig. 5.16.

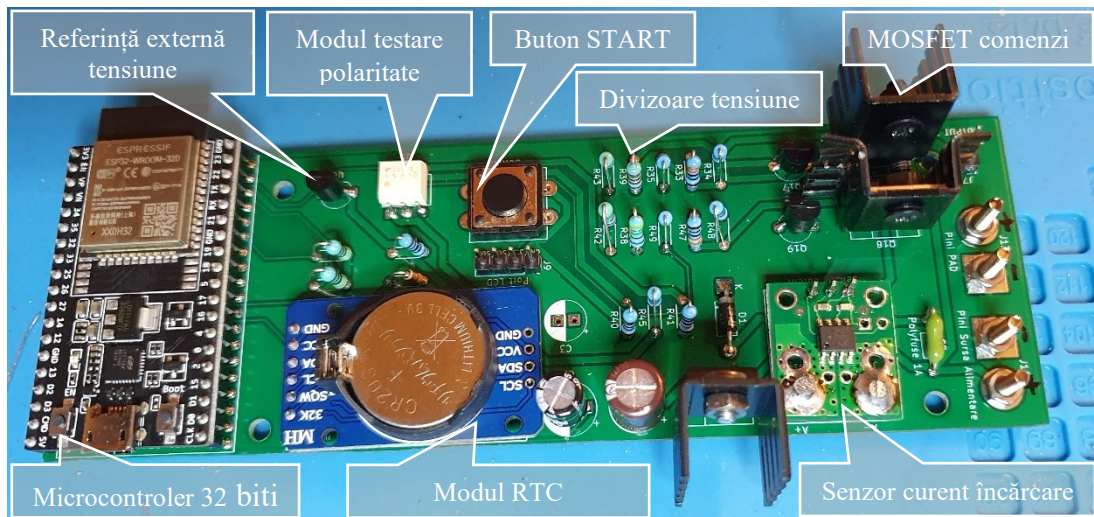


Fig. 5.16. Modulul de monitorizare și comandă de la nivelul PAD-ului

Parametrii monitorizați la nivelul PAD-lui sunt:

- tensiunea electrică la bornele bateriei colectată prin intermediul contactelor formate din cele două palpatoare și PAD-urile polarizate;
- tensiunea electrică a sursei folosită pentru procesul de încărcare;
- curentul electric de încărcare/ descărcare pe circuitul principal.

- *Tensiunea electrică la bornele bateriei.* Această tensiune este preluată prin intermediul contactelor formate din cele două palpatoare montate solidar cu trenul de aterizare și PAD-urile fixe polarizate, utilizând aceeași schemă cu divizor de tensiune, folosită și în cazul modulului experimental și intrarea analogică GPIO35.

- *Măsurarea curentului de încărcare.* Și acest parametru se măsoară conform cu descrierea făcută la modulul de test descris la subpunctul anterior, folosindu-se același tip de senzor și intrarea analogică GPIO27.

Alte echipamente din schema de testare de la nivelul PAD-ului mai sunt:

- *circuit pentru sesizarea sensului de curent* între sistemul PAD și bateria dronei Fig. 5.17. Acest modul este foarte important deoarece inversarea curentului la bornele unei baterii Li-Po face ca aceasta să se autodistrugă. Acest circuit simplu oferă microcontrolerului informații despre poziția dronei pe padul de încărcare identificând sensul curentului care trece prin optocuplor.

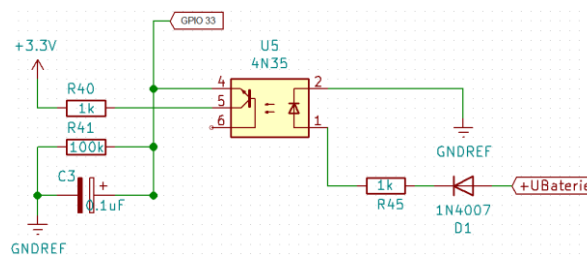


Fig. 5.17. Circuit testare polaritate baterie conectată la PAD-ul de încărcare

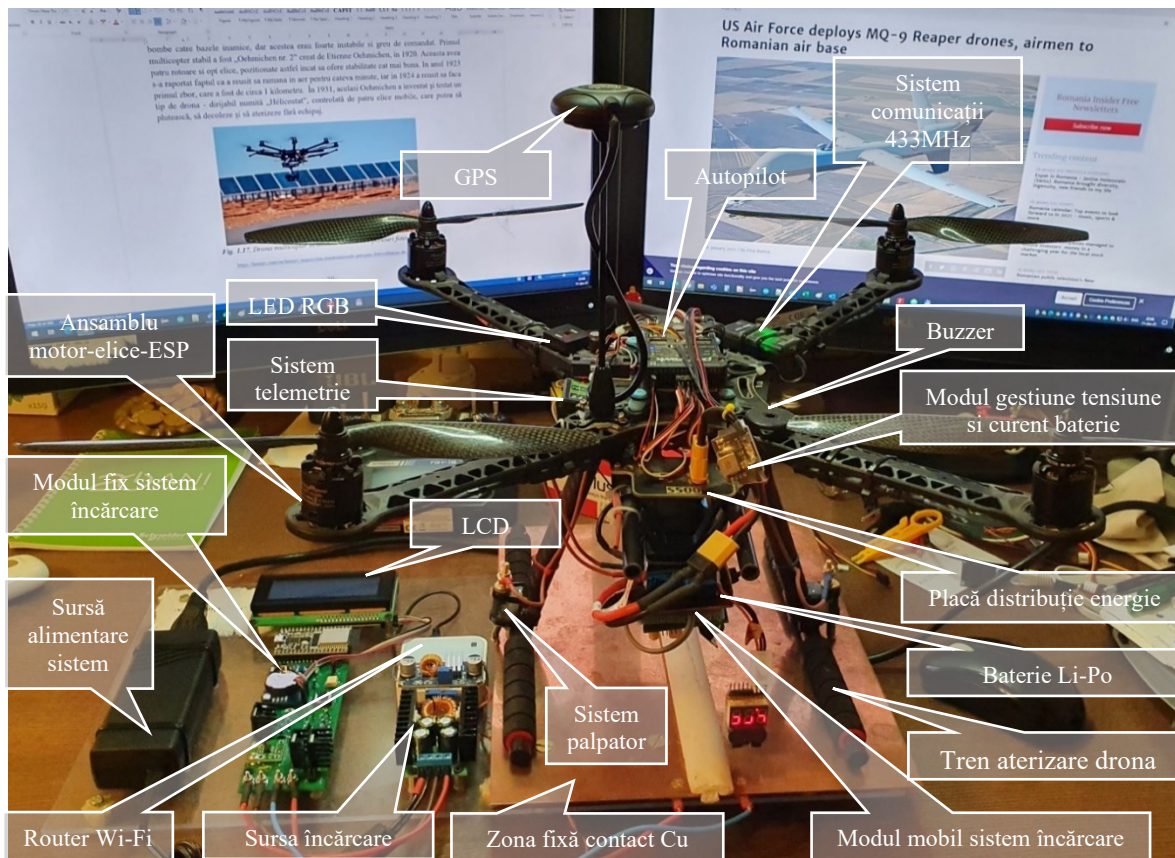


Fig. 5.18. Ansamblu dronă + sistem de încărcare în timpul testelor – I

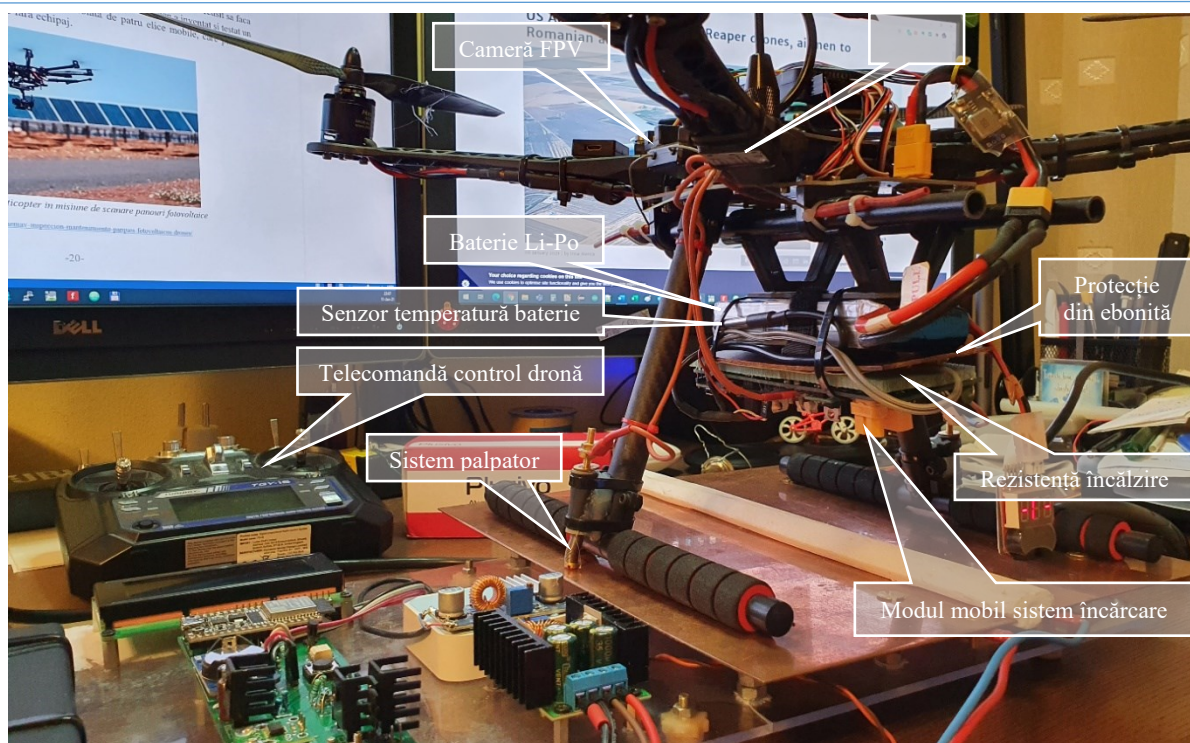


Fig. 5.19. Ansamblu dronă + sistem de încărcare în timpul testelor – II

➤ **Descriere interfață utilizator, dezvoltată pentru monitorizarea și controlul sistemului de încărcare, local sau de la distanță.**

Interfața utilizator rulează pe microcontrolerul modului fix amplasat la sol, unde a fost implementat un web server, la care se pot conecta simultan un maxim de 7 utilizatori distincți.

Interfața este formată din două ecrane principale, primul ecran în care și pornește interfața este exemplificat în Fig. 5.20 și reprezintă zona unde utilizatorul poate vedea starea sistemului și toți parametrii acestuia, grupați după funcțiile de bază pe care le au în cadrul sistemului.

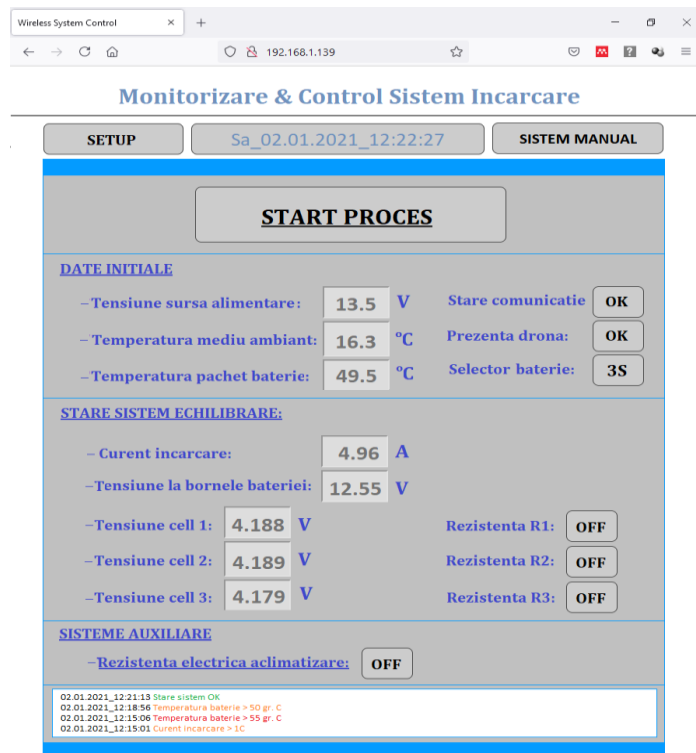


Fig. 5.20. Interfața utilizator proces încărcare – ecran principal

Astfel aici se pot monitoriza: tensiunea sursei de alimentare, temperatura mediului ambiant, temperatura pachetului de baterii, curentul de încărcare, tensiunea la bornele bateriei, tensiunea la bornele celulelor, starea comunicației dintre cele două module, starea rezistenței electrice utilizată pentru preîncălzire baterie, starea sistemului de echilibrare celule, stare polaritate baterie, prezență dronă la nivelul PAD-ului de încărcare, tipul și configurația bateriei.



Fig. 5.21. Stare sistem echilibrare – semnalizare stare rezistență echilibrare celula 2

Fiecare valoare este ușor vizibilă într-un contur bine delimitat, al cărui fundal se colorează în funcție de starea acesteia: gri deschis dacă valoarea este într-un interval acceptabil, portocaliu, dacă valoarea se apropie de un prag de avarie – Fig. 5.22 și roșu dacă valoarea depășește acest prag prestabilit – Fig. 5.23. În acest caz procesul de încărcare este întrerupt iar butonul de “START PROCES” este inactivat pentru evitarea inițierii oricărei comenzi. De asemenea, starea și culoarea acestui buton este schimbată în funcție de starea parametrilor sistemului. Dacă sistemul este pornit culoarea butonului este verde, iar pe buton apare mesajul “SISTEM ON - 120”, unde valoarea numerică reprezintă timpul scurs de la începutul procesului de încărcare, în secunde. Dacă unul dintre parametrii intră în zona de preavarie acest buton va fi colorat în portocaliu, iar mesajul de pe buton se menține în funcție de starea sistemului: “SISTEM ON – 1980” sau “START PROCES”. În cazul în care oricare dintre condițiile inițiale nu este îndeplinită procesul de încărcare se resetează, iar butonul se colorează în roșu cu mesajul “EROARE PROCES”.

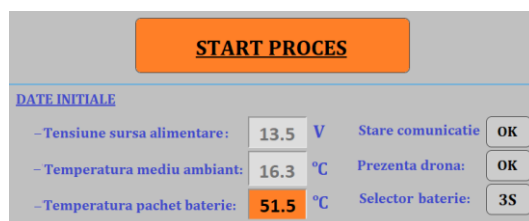


Fig. 5.22. Interfața utilizator proces încărcare – semnalizare preavarie

Tot în acest ecran, în partea inferioară a acestuia, sunt afișate ultimele patru evenimente apărute în timpul procesului, restul fiind stocate în baza de date din rețea sau local, în format text, pe cardul SD.

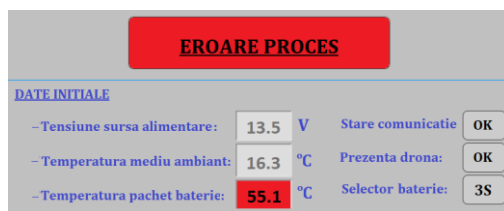


Fig. 5.23. Interfața utilizator proces încărcare – semnalizare avarie

Dând clic pe butonul “SETUP” se intră în ecranul al doilea al interfeței, Fig. 5.24, unde utilizatorul poate seta patru timpi de pornire automată a sistemului de încărcare prin selecția zilelor dorite și a orei și minutului la care acesta să testeze starea bateriei și să o mențină pregătită pentru începerea misiunilor în orice moment.

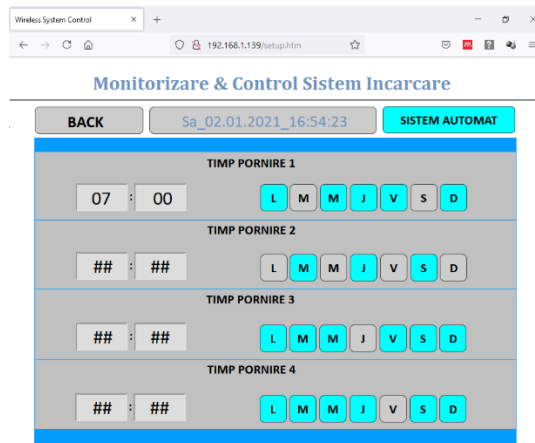


Fig. 5.24. Interfața utilizator proces încărcare – ecran secundar

Prin asigurarea unei conexiuni la internet, utilizatorul poate să monitorizeze sistemul și să comande întreg procesul, de oriunde poate să acceseze o conexiune la internet, datorită protecțiilor integrate în acesta.

5.3 STAND EXPERIMENTAL PENTRU TESTARE - ÎNCĂRCARE/DESCĂRCARE BATERIE LA SCARĂ REALĂ.

Pentru testarea standului experimental în condiții reale s-au realizat câteva modificări asupra PAD-ului fix – Fig. 5.25, deoarece în condiții reale de teren, suportul trebuie să reziste la un impact cu drona echipată, care poate să aibă o masă totală de până la 25 kilograme, masă deloc de neglijat. Astfel, întreg montajul a fost transferat pe o structură realizată dintr-un material plastic dur numit poliamidă, care se remarcă prin caracteristicile sale speciale: structură dură cu o rezistență bună la utilizarea îndelungată în medii agresive, un bun izolator termic și mai ales electric, calitate esențială în acest caz [34].

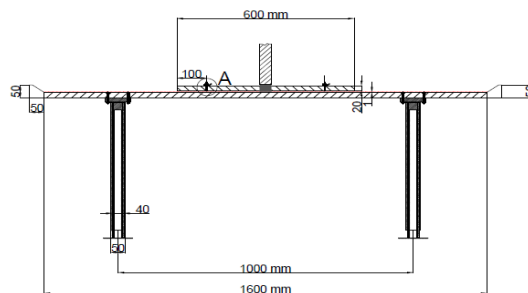


Fig. 5.25. Schița constructivă PAD încărcare cu contact direct - vedere din lateral.

Peste placa suport din poliamidă s-a montat solidar o placă de cupru cu o grosime de 2 mm care reprezintă suprafața de aterizare dar și polii polarizați ai sistemului, necesari în procesul de încărcare – Fig. 5.26.

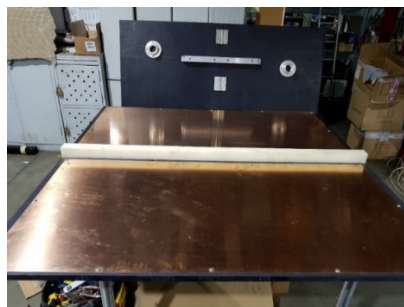


Fig. 5.26. PAD suport încărcare cu contact direct, cu evidențierea suprafeței active.

6. CERCETĂRI PRIVIND TRANSFERUL WIRELESS AL ENERGIEI NECESARE PROCESULUI DE ÎNCĂRCARE.

Pentru reducerea erorilor ce pot fi cauzate de către sistemul de contact direct între PAD-ul fix și trenul de aterizare folosind palpatoare cu arc, în cadrul lucrării au fost realizate și teste pentru transferul wireless al energiei folosind kituri specializate.

S-au identificat patru metode de transmitere wireless a puterii electrice între două puncte bine delimitate aflate în imediata apropiere, descrise în cele ce urmează.

➤ *Cuplare capacitivă.* Transmiterea wireless a puterii electrice se face prin cuplarea capacitivă a doi electrozi, poziționați în două planuri relativ paralele, ca în Fig. 6.1.

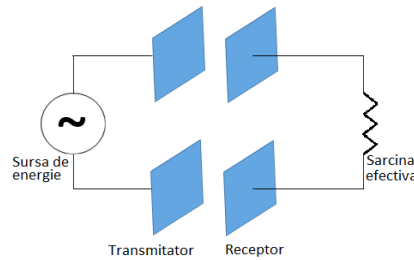


Fig. 6.1. Principiul transmisiei wireless a energiei electrice - Metoda capacitivă

Așa cum se vede în Fig. 6.1, transmiterea wireless a energiei electrice folosind metoda cu cuplaj capacitiv are loc prin intermediul câmpului electric (curentul de deplasare) folosind două secțiuni identice având fiecare capacitatea C . Unul din principalele avantaje ale utilizării metodei de transfer electrostatic față de metoda inductivă este faptul că plasarea dispozitivului ce trebuie perceput pe baza de încărcare este mai avantajoasă.

➤ *Inducția electromagnetică.* Transmiterea wireless a puterii electrice se face prin curentul indus de un câmp magnetic între două bobine aflate la o distanță suficientă pentru ca pierderile să fie acceptabile (Fig. 6.2).

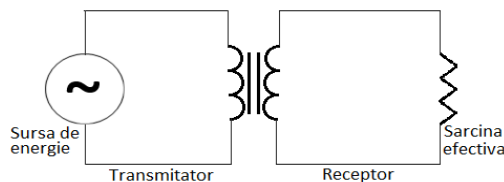


Fig. 6.2. Transmisie wireless a energiei electrice prin metoda inductiva.

Așa cum se vede și în Fig. 6.2 transmiterea wireless a energiei electrice folosind metoda cu cuplaj inductivă are loc prin intermediul câmpului magnetic, exemplul cel mai concludent fiind similitudinea cu transformatoarele electrice de curent sau tensiune, cu deosebirea că aici sunt preferate aplicațiile de transfer al energiei fără contact cu miez magnetic deschis sau lipsa integrală a miezului. În locul unui miez dintr-un material feromagnetic, cum ar fi cazul utilizării într-un transformator, dispozitivul nostru folosește „miezul de aer”. Similar cu un transformator, aceste dispozitive folosesc o bobină pentru emisie și o alta pentru recepție și funcționează doar în curent alternativ. Pe scurt, variația câmpului magnetic de la o bobină induce un curent într-o altă bobina aflată în apropierea acesteia.

➤ *Rezonanța magnetică.* Transmiterea wireless a puterii electrice se face folosind fenomenul de rezonanță magnetică care are la bază tot principiul inducției electromagnetice. Condiția pentru care se realizează rezonanța magnetică este că cele două bobine și câmpul generat în vecinătatea lor să oscileze la aceeași frecvență. Dacă cele două bobine nu sunt în rezonanță transferul de energie nu se realizează. Avantajul acestei metode este că în combinație

cu metoda cuplajului inductiv poate să reducă pierderile de energie electrică prin poziționarea eronată a celor două bobine.

➤ *Unde radio.* Transmiterea wireless a puterii electrice se face prin unde radio care sunt emise și recepționate cu ajutorul unor antene speciale. În general se folosesc microunde generate de emițătoarele terestre și recepționate de către antene tip redresor care convertesc acest semnal în curent electric. Această metodă se pretează pentru transmisia wireless a energiei electrice, punctual, la distanțe mari, mergându-se chiar și până la a alimenta wireless navele spațiale direct de pe Pamânt.

6.1 CERCETĂRI PRIVIND TRANSFERUL WIRELESS AL ENERGIEI PENTRU CREȘTEREA AUTONOMIEI DRONELOR ALIMENTATE ELECTRIC

Pentru reducerea erorilor cauzate de sistemul de contact direct între PAD-ul fix și trenul de aterizare, în cadrul lucrării au fost testate chituri specializate, pentru transferul wireless al energiei electrice. Kitul folosit este compus din două bobine distincte, transmițător și respectiv receptor, fiecare având un modul de condiționare și sincronizare transmisie (Fig. 6.3).

Pentru testarea acestor module s-a conectat bobina transmițătoare la o sursă de tensiune stabilizată de 12 Vcc, iar curentul a fost menținut constant la 1A. Bobina receptoare s-a conectat la un consumator cu tensiunea de alimentare de 5 Vcc și o putere electrică de maxim 10W.

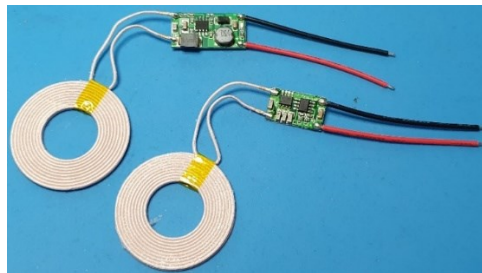


Fig. 6.3. Kit modul de transmitere energie electrică wireless - 5 V, 2 A maxim

În circuitul astfel format, s-a modificat controlat poziția relativă a celor două bobine, începându-se cu așezarea bobinelor perfect paralele și măbind distanța dintre ele, **în plan vertical**, din mm în mm, păstrând paralelismul celor două bobine constant. S-a urmarit evoluția parametrilor electrici din sistem cu accent pe puterea electrică transmisă, iar măsurătorile obținute sunt reprezentate în Fig 6.4.

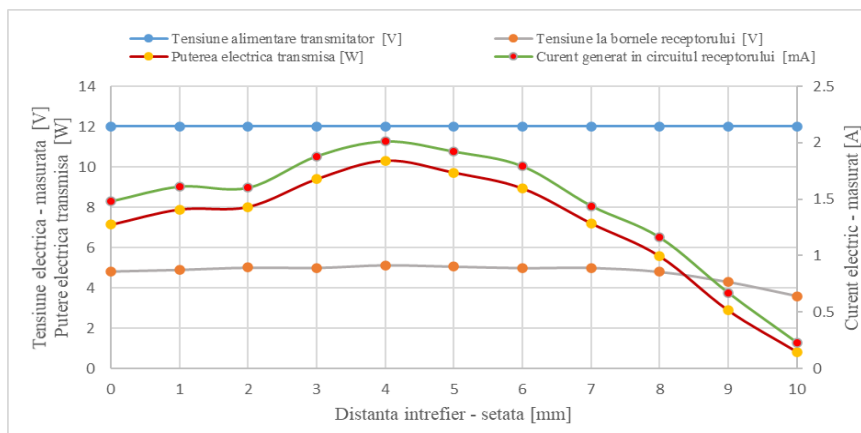


Fig. 6.4. Evoluția grafică a testelor realizate pe kitul de transmitere wireless a energiei electrice prin variația întrefierului dintre cele două bobine în plan vertical

A doua etapă din cadrul testelor a fost mișcarea relativă a bobinelor **în plan orizontal** pornind de la suprapunerea perfectă a bobinelor și așezarea acestora la o distanță fixă de 4 mm. La fel ca și în cazul precedent s-a păstrat pasul de 1 mm, iar rezultatele se pot vedea în Fig. 6.5.

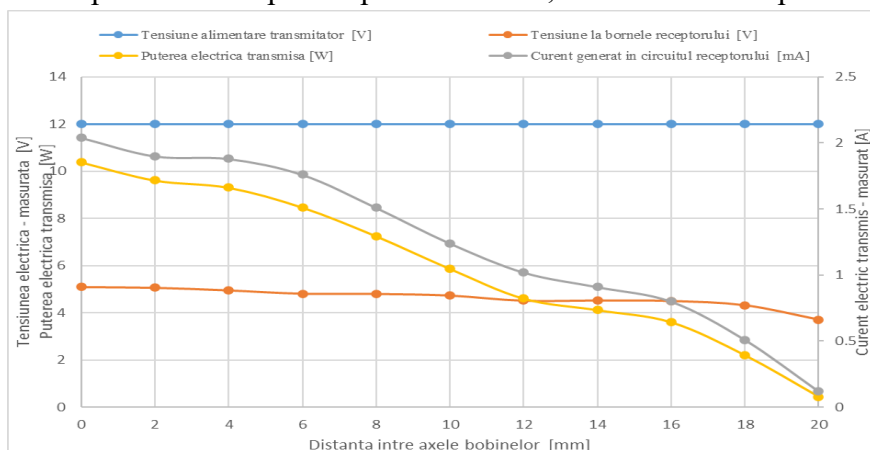


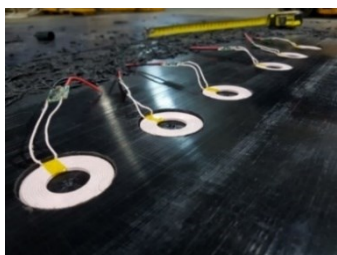
Fig. 6.5. Evoluția grafică a testelor realizate pe chitul de transmitere wireless a energiei electrice prin deplasarea bobinelor în plan orizontal

Asa cum se observă și din cele două grafice, Fig. 6.4 și Fig. 6.5, poziția relativă a celor două bobine care formează chitul, transmițător respectiv receptor, este una vitală pentru randamentul transferului de energie. O abatere de câțiva mm pe verticală și una de mai mult de 1 cm pe orizontală face ca procesul de transmitere a energiei electrice să fie limitat sau chiar întrerupt.

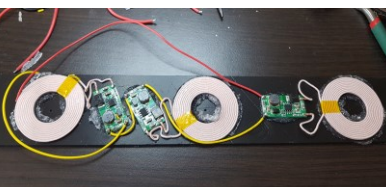
6.2 TESTARE SISTEM ÎNCĂRCARE/DESCĂRCARE BATERIE LI-PO, FOLOSIND TRANSMISIA WIRELESS A ENERGIEI ELECTRICE.

Pentru eliminarea palpatoarelor din schema standului experimental, pentru transmiterea wireless a energiei electrice s-au folosit chiturile prezentate la paragraful precedent. Acestea au la bază transmiterea wireless a energiei electrice, prin efectul inducției electromagnetice, folosind bobine gata acordate cu un randament foarte bun. La acest kit, distanța optimă de transmitere este cuprinsă în intervalul (3...6) mm, în plan vertical, iar pentru a avea un randament optim bobinele trebuie să fie aliniate foarte precis.

Energia electromagnetică emisă de aceste chituri poate pătrunde ușor prin materiale neferomagnetice, astfel că s-a optat pentru păstrarea suportului de la standul dezvoltat la capitolul precedent, pentru care s-a folosit ca și material de bază poliamida. Bobinele transmițătoare au fost înglobate în aceste plăci, așa cum se poate vedea în Fig. 6.6, dispuse la distanțe egale și în număr identic pentru fiecare picior al trenului de aterizare al dronei.



a) Bobine transmițătoare ampasate pe PAD-ul fix



b) Bobine receptoare ampasate pe trenul de aterizare al dronei

Fig. 6.6. Dispunerea bobinelor transmițătoare pe sistemul de încărcare.

Folosind aceste chituri alinierea dronei pe suportul fix nu mai este critică, iar prin dispunerea bobinelor transmițător pe placa suport s-a asigurat că bobinele receptor sunt aliniate

în permanență cu cel puțin 6 bobine transmițător astfel asigurându-se puterea necesară pentru procesul de încărcare. Bobinele receptoare au fost amplasate pe tălpile celor două picioare ale trenului de aterizare ale dronei, respectând cu strictețe amplasarea și distanțele de la bobinele transmițătoare [34].

7. CONCLUZII SI REZULTATE ORIGINALE

➤ Concluzii generale

În lucrarea de față au fost analizate dronele în general, cu accent pe analiza mai multor posibilități de a crește autonomia misiunilor realizate de acestea. Au fost prezentate principalele evoluții în acest domeniu și mai multe posibilități de creștere a autonomiei misiunilor realizate de dronele multimotor, fără a modifica prea mult din punct de vedere structural platformele pe care sunt construite aceste drone. Verificările experimentale realizate pe drona suport, au validat o bună parte a rezultatelor teoretice care au stat la baza ideii inițiale și care au fost probate în această lucrare.

Lucrarea abordează un domeniu modern, al UAV-urilor civile, industriale și optimizarea procesului de reîncărcare al bateriei Litiu-Polimer. În ultimul timp, dronele se impun din ce în ce în mai multe domenii, care până de curând erau accesibile doar specialiștilor, la niște costuri extrem de mari. Există limitări în dezvoltarea acestora, autonomia lor depinzând de masa totală la decolare dar mai ales de sistemul de energizare, de calitatea bateriilor, care nu au reușit să țină pasul cu dezvoltarea accelerată a echipamentelor mobile, în general. Un sistem de reîncărcare autonom, a bateriilor dronelor multimotor, automat sau semiautomat, poate să extindă foarte mult domeniile în care acestea pot să activeze. De asemenea, eliminarea operatorului uman care trebuia să fie prezent în locație, cu scopul de a schimba bateriile cu unele preîncărcate, poate să îmbunătățească și să automatizeze majoritatea misiunilor care au ca scenariu monitorizări de obiective sau servicii de mentenanță predictivă, supervizate de la distanță de un operator uman.

Ideea de a realiza un sistem de încărcare automat format din două module sincronizate, unul mobil ce conține un BMS specializat, montat pe dronă și un altul fix amplasat la nivelul PAD-ului de încărcare, amplasat într-un punct fix la sol, ajută la creșterea autonomiei misiunilor asigurând autonomia energetică a dronei prin automatizarea procesului de încărcare, amplasat pe traseul dronei.

Capitolul 1 al lucrării prezintă o introducere în problematica tezei de doctorat. Se prezintă succint istoricul dronelor, stadiului actual al dezvoltării acestora, o clasificare completă a dronelor din mai multe puncte de vedere: al domeniului de utilizare, al masei efective a dronei, al autonomiei de funcționare, din punct de vedere militar și altele. De asemenea, se evidențiază principalele texte legislative care guvernează acest domeniu. Se aduc mulțumiri celor care au ajutat autorul lucrării în studiile teoretice și experimentale întreprinse.

În capitolul 2 se prezintă o analiză amplă a domeniilor în care aceste drone excelează și s-au evidențiat avantajele dar și dezavantajele folosirii lor în aceste domenii. O atenție deosebită se acordă domeniului asigurării mentenanței pentru diferite echipamente industriale cum ar fi instalațiile fotovoltaice, turbinele eoliene, liniile electrice de transport al energiei și al stâlpilor de telecomunicații. Alte obiective atinse în acest capitol se referă la monitorizarea obiectivelor militare și civile, la aplicațiile dronelor în domeniul medical, al transportului și al divertismentului.

Capitolul 3 prezintă principalele componente ale unui sistem de dronă multimotor și a principalilor senzori utilizați frecvent în misiunile realizate de acestea. Aici s-a pus accent pe

principalii consumatori ai unei drone care pot influența direct nivelul de autonomie al acestora: ansamblul elice-motor-ESC și sistemul de navigație. De asemenea, s-a făcut o trecere în revistă a principalelor caracteristici ale bateriilor care alimentează dronele și ale senzorilor și traductoarelor care ajută la înțelegerea procesului de încărcare/ descărcare în deplină siguranță.

În capitolul 4 se prezintă principalii parametri ai dronei suport, proiectată și realizată special pentru testarea modulelor dezvoltate în cadrul acestei lucrări. Practic, toate sistemele acesteia sunt monitorizate și comunică cu baza fixă de încărcare pentru optimizarea procesului de încărcare, iar bateriile ce energizează această dronă sunt elementele țintă ale acestei cercetări.

Capitolul 5 conține cea mai mare parte a contribuțiilor originale aduse în prezenta lucrare. Se prezintă măsurătorile realizate în zona orașului Brașov, unde a fost simulată o operație de cortografiere. Se înregistrează valorile instantanee ale tensiunii și ale curentului absorbit, atât pentru cazul deplasării normale a dronei cât și pentru cazurile în care se schimbă brusc direcția de deplasare a acesteia. Se analizează două metode distincte prin care se poate crește autonomia de zbor, dar se demonstrează și cum anume pot fi crescuți timpii de zbor fără a fi nevoiți să deconectăm bateriile de pe drona suport. Astfel, este prezentat un sistem experimental de încărcare format din două module electronice care supraveghează și controlează întreg procesul de încărcare fără a afecta cu nimic misiunea realizată de către drona suport. Transmitia energiei către bateriile amplasate pe dronă se face, prin contact direct, prin intermediul unor palpatoare montate pe trenul de aterizare al dronei.

În capitolul 6 se analizează câteva elemente de transmisie wireless a energiei electrice folosite pentru încărcarea bateriilor amplasate pe dronă, dar și a unui stand experimental pentru testarea acestor procedee.

In capitolul 7 se prezintă principalele concluzii referitoare la capitolele prezentate în cadrul tezei, apoi sunt enumerate câteva dintre cele mai importante contribuții originale aduse de cercetările realizate în cadrul lucrării, iar în finalul acestui capitol sunt prezentate principalele direcții de dezvoltare ulterioară ale cercetărilor expuse în lucrare.

➤ Contribuții originale

Lucrarea tratează o temă de interes în continuă expansiune, dronele fiind într-o dezvoltare accelerată, datorită multiplelor avantaje pe care acestea le aduc în multe domenii, utilizatorului final, la costuri și riscuri din ce în ce mai mici. Creșterea autonomiei misiunilor specifice dronelor multimotor mărește mult orizontul de dezvoltare al acestora, beneficiile directe fiind imediate. În general, s-a demonstrat deja că prin utilizarea dronelor pentru domenii și zone periculoase, se elimină riscurile ce pot să apară, în cazul utilizării unei soluții clasice.

Principalele contribuții originale ale tezei de doctorat sunt următoarele:

- Prezentarea într-un mod compact al istoricului dronelor cu accent pe stadiul actual al dezvoltării aeronavelor fără pilot la bord și sistematizarea principalelor caracteristici în funcție de legislația actuală din domeniu;
- Prezentarea domeniilor principale în care dronele excelează deja, în funcție de impactul pe care acestea le aduce în viața de zi cu zi;
- Prezentarea ipotezelor de proiectare pentru drone multimotor și sistematizarea principalelor informații utile pentru proiectare, realizare și utilizare drone multimotor.
- Proiectarea și realizarea practică a unei drone multimotor folosită ca bază de testare pentru cercetările privind extinderea regimurilor de zbor.
- Realizarea de module experimentale pentru evaluarea consumurilor de la nivelul unei drone multimotor și optimizarea sistemului de management energie, ce are ca rezultat imediat mărirea autonomiei de zbor.

- Proiectarea și realizarea unui stand de încărcare autonom, a dronelor multimotor, pentru creșterea autonomiei misiunilor. Astfel au fost create două module miniaturale ce preiau informații din timpul procesului de încărcare și generează comenzi clare, în funcție de un algoritm implementat în microcontrolerele acestora. Practic, transmiterea energiei spre modulul de baterie se face în două moduri distincte: unul cu contact direct, foarte ferm folosind palpatoare și altul bazat pe o soluție wireless, folosind chituri specializate.

- Creșterea siguranței zborului prin mărirea regimului de zbor.

- Realizarea de software specializat pentru utilizarea dronei în diferite situații, pentru optimizarea consumului de energie al dronei, pentru asigurarea unei funcționări sigure ale diferitelor elemente ale acesteia, pentru realizarea unui regim optim de lucru atât în ceea ce privește traseele de deplasare cât și al protecțiilor minimale care trebuie asigurate în funcționarea normală a dronei.

➤ **Perspective de dezvoltare ulterioară**

- Completarea soluției tehnice a sistemului de încărcare autonom dezvoltat, cu soluții inovative de poziționare cu precizie sporite și extinderea razei de acțiune pentru protecția bateriei și implicit a aeronavei pe întreaga misiune;

- Creșterea distanței de transmitere wireless a energiei electrice testând mai multe soluții de transmisie wireless a energiei, folosind cunoștințele acumulate în urma realizării practice a dronei folosită pentru experimentări în cadrul lucrării.

- Extinderea soluției dezvoltată în această lucrare către alt domeniu aflat în plină dezvoltare: cel al mașinilor electrice. Încărcarea bateriilor autoturismului electric în mod autonom, transparent, fără intervenția umană, este dorită de către orice utilizator.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

- [1] PLEȘCA, V., Liliana DELCEA, and C. GHIȚĂ, “Vehicule electrice aeriene fără pilot – drone”, in SIMPOZIONUL DE MAȘINI ELECTRICE SME’17, vol. 2017, Link acces: <https://portal.issn.org/resource/ISSN/1843-5912>.
- [2] VALAVANIS, K. P., G. J. VACHTSEVANOS, D. FELIX, and J. EVANS, “*Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*”, Dordrecht: Springer Netherlands, 2015, ISBN 978-90-481-9706-4, ISBN 978-90-481-9707-1 (eBook) ISBN 978-90-481-9708-8, DOI 10.1007/978-90-481-9707-1.
- [3] PLEȘCA, V. and Mihaela PLEȘCA, “*Cadrul legislativ românesc privind utilizarea SRE, comparativ cu cel din țările cu realizări majore privind promovarea SRE*”, in TEHNOLOGIILE ENERGIEI-producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Ed. ICEMENERG Bucuresti, Oct. 2008.
- [4] MIREA, A., V. PLEȘCA, Alina DUMITRESCU, Victoria Ardelean, and Mihaela PLEȘCA, “*Estimation of the necessary electricity and sizing of an autonomous photovoltaic system*”, EEA - Electrotehnică, Electronică Automatică, vol. 60, no. 2, 2012.
- [5] OLTEANU, G., V. PLEȘCA și alții, “*Energia în era post-petrol*”, Bucuresti: Editura ICEMENERG, 2010.
- [6] PLEȘCA, V., “*Automation of the predictive maintenance process of photovoltaic installations using multimotor drones*”, EMERG - Energy, Environment, Efficiency, Resources, Globalization, vol. 6, no. 2, pp. 51–61, 2020, DOI: 10.37410/EMERG.2020.2.04.
- [7] PLEȘCA, V. and C. Purece, “*Predictive maintenance of photovoltaic plants using multirotor drones with automatic recharging system of Li-Po batteries*”, E3S Web Conf., vol. 180, p. 02007, Jul. 2020, DOI: 10.1051/e3sconf/202018002007.
- [8] DUMITRESCU, Alina., V. PLEȘCA, A. MIREA, Mihaela PLEȘCA, and Victoria ARDELEAN, “*Development and integration of off-shore wind turbines into power systems*”, ISSN: 2392-828X, EEA - Electrotehnică, Electronică, Automatică, vol. 60, no. 2, pp. 56-64.5, 2012, [Online]. Available: http://www.eea-journal.ro/ro/d/5/p/EEA60_2_9.

- [9] PLEȘCA, Mihaela, V. PLEȘCA, Alina Dumitrescu, Victoria Ardelean, and A. Mirea, “*Wind energy - great potential, modest achievements*”, EEA - Electrotehnică, Electronică, Automatică, vol. 60, no. 2, 2012.
- [10] LUQUE-VEGA, L. F., B. CASTILLO-TOLEDO, A. LOUKIANOV, and L. E. GONZALEZ-JIMENEZ, “*Power line inspection via an unmanned aerial system based on the quadrotor helicopter*”, in MELECON 2014 - 2014 17th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Apr. 2014, pp. 393–397, DOI: 10.1109/MELCON.2014.6820566.
- [11] DĂESCU, I., F. CRĂCIUN, V. PLEȘCA, and F. SIMEN, “*ENERGOFIX - metodă și echipament pentru determinarea calității energiei electrice*”, Revista tehnologiile energiei - producerea, transportul și distribuția energiei electrice și termice, Ed. ICEMENERG, Bucuresti, Mai 2005.
- [12] G. GHISE, “*Dronele care „tratează” bolile plantelor*”, in Revista Ferma, web page accesat la 02.06.2020, link accesare: <https://www.revista-ferma.ro/articole/agricultura-viitorului/dronele-care-trateaza-bolile-plantelor>.
- [13] TERMOVIZIUNE/TERMOGRAFIE, “*Termoviziune cladiri*”, web page accesat la 20.08.2019, link accesare: <http://vvp.ro/ro/servicii/termografie-cladiri>.
- [14] ZECAPH.COM, “*Identificare a punctelor termice și a pierderilor de caldura prin termografie in constructii – ZECAPH*”, web page accesat la 20.12.2019, link accesare: <https://zecaph.com/termografie-in-constructii/identificare-a-punctelor-termice-si-a-pierderilor-de-caldura-prin-termografie-in-constructii/>.
- [15] HALLERMANN, N. and G. MORGENTHAL, “*Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*”, in Bridge Maintenance, Safety, Management and Life Extension - Proceedings of the 7th International Conference of Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2014, pp. 661–667, DOI: 10.1201/b17063-96.
- [16] M. GEORGESCU, “*Premieră medicală: rinichi pentru transplant, transportat cu drona*”, web page accesat la 20.06.2019, link accesare: <https://mindcraftstories.ro/tehnologie/premiera-medicala-rinichi-pentru-transplant-transportat-cu-drona/>.
- [17] BIZIDAY, “*SUA. Organe umane pentru transplant, livrate cu drone, în două zboruri de testare efectuate în deșertul Nevada.*”, www.biziday.ro, 2020.
- [18] BERSHADSKY, D., S. HAVILAND, and E. N. JOHNSON, “*Electric Multirotor UAV Propulsion System Sizing for Performance Prediction and Design Optimization*”, Jan. 2016, AIAA 2016-0581, Session: Design Processes and Tools, DOI: 10.2514/6.2016-0581.
- [19] MOHAMED, M. K., S. PATRA, and A. LANZON, “*Designing Electric Propulsion Systems for UAVs*”, in Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), vol. 6856 LNAI, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 388–389.
- [20] Q. DEVICES, “*Commutating Encoder*”, web page accesat la 20.07.2018, link accesare: <https://www.quantumdev.com/brushless-motors-vs-brush-motors-whats-the-difference/>.
- [21] Dirjish, M., “*What’s The Difference Between Brush DC And Brushless DC Motors?*”, web page accesat la 27.05.2017, link accesare: <https://www.electronicdesign.com/technologies/electromechanical/article/21796048/whats-the-difference-between-brush-dc-and-brushless-dc-motors>.
- [22] ALEX TECH, “*How to choose the right motor for your multicopter drone - Guides*”, web page - accesat la 20.05.2018, link accesare: <https://www.dronetrest.com/t/how-to-choose-the-right-motor-for-your-multicopter-drone/568>.
- [23] dr. ing. M. RUBA, “*Sisteme de stocare a energiei în VE și VEH*”, Curs 7, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, accesat la 01.11.2020, link accesare: <https://ems.utcluj.ro/mircea-ruba/teaching/is/Curs%207.pdf>
- [24] AMANOR-BOADU, J. M. and A. GUISEPPI-ELIE, “*Improved Performance of Li-ion Polymer Batteries Through Improved Pulse Charging Algorithm*”, Applied Sciences, vol. 10, no. 3, p. 895, Jan. 2020, DOI: 10.3390/app10030895.
- [25] BARSUKOV, Y. and J. QIAN, “*Battery Power Management for Portable Devices*”, Publisher: Artech House, 2013, ISBN-10: 9781608074914, ISBN-13: 978-1608074914;
- [26] A. FLORESCU, “*Despre baterii*”, web page accesat la 20.01.2019, link accesare: <https://www.radioamator.ro/articole/view.php?id=178>.

- [27] DAMIEN, “*The basics of drones - A Definitive Guide For Newbies*”, web page accesat la 15.05.2018, link accesare: <http://beginnerflyer.com/>. <http://beginnerflyer.com/how-to-fly-a-drone-like-a-pro/>.
- [28] BALS, J., Y. JI, M. R. KUHN and C. SCHALLER, “*Model Based Design and Integration of More Electric Aircraft Systems Using Modelica*”, More Electric Aircraft Forum, Barcelona, no. June 2016, pp. 1–12, 2009, accesat la 20.11.2018, link accesare: https://www.researchgate.net/profile/Christian-Schallert/publication/225004732_Model_Based_Design_and_Integration_of_More_Electric_Aircraft_Systems_Using_Modelica/links/5625ea7408aeabddac91d6cf/Model-Based-Design-and-Integration-of-More-Electric-Aircraft-Systems-Using-Modelica.pdf
- [29] AYRES, “*Jacksonville Bridge Inspections - Structural Inspection - Ayres*”, web page accesat la 20.04.2019, link accesare: <https://www.ayresassociates.com/project/jacksonville-bridge-inspections/>.
- [30] WEIEEE, “*IEEE Standard 1394*”, IEEE STD. 1394-2008, Oct. 2008, DOI: 10.1109/IEEESTD.2008.4659233.
- [31] PLEȘCA, V. and C. GHIȚĂ, “*Research on improving the autonomy of missions executed by unmanned aerial vehicles – UAV*”, in SIMPOZIONUL DE MAȘINI ELECTRICE SME’20, 2020, vol. 2020.
- [32] PLEȘCA, V. and Sanda-Victorine PAȚURCĂ, “*Experimental System for Charging and Testing Batteries Specific to Multicopter Drones*”, Ann. “Dunarea Jos” Univiversitatea Galați. Fascicle IX, Metall. Mater. Sci., vol. 43, no. 4, pp. 5–12, Dec. 2020, DOI: 10.35219/mms.2020.4.01.
- [33] PLEȘCA, V., GHIȚĂ, O. M. and others, “*Experiments on Extending the Flight Regimes of Electrically Powered Multi-engine Drones Using Automatic Loading Systems*”, published in: IEEE - 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2021, DOI: 10.1109/ATEE52255.2021.9425251.
- [34] COSTEA, Ilona Moise and V. PLEȘCA, “*Automatic battery charging system for electric powered drones*”, in 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Oct. 2018, pp. 377–381, DOI: 10.1109/SIITME.2018.8599208.