

ŠOLSKI CENTER VELENJE  
GIMNAZIJA VELENJE  
Trg mladosti 3, 3320 Velenje

MLADI RAZISKOVALCI ZA RAZVOJ ŠALEŠKE DOLINE

RAZISKOVALNA NALOGA

**LETETI Z ELEKTRIKO**

Tematsko področje: FIZIKA

Avtorja:

Filip Plešnik, 3. letnik  
Jernej Lenovšek, 3. letnik

Mentor:

Peter Jevšenak, univ. dipl. inž.

Velenje, 2015

Plešnik, F., Lenovšek, J., Leteti z elektriko, raziskovalna naloga  
Gimnazija Velenje, 2015

Raziskovalna naloga je bila opravljena na Splošni gimnaziji Velenje.

Mentor : Peter Jevšenak, univ. dipl. inž.

Datum predstavitve:

## **KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

ŠD Splošna in strokovna gimnazija Velenje, šolsko leto 2014/2015

KG fizika / električna letala / akumulatorji / poraba energije

AV PLEŠNIK, Filip / LENOVŠEK, Jernej

SA JEVŠENAK, Peter

KZ 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3

ZA Splošna in strokovna gimnazija Velenje

LI 2015

IN **LETETI Z ELEKTRIKO**

TD Raziskovalna naloga

OP VI, 29 str., 2 pregl., 2 graf., 17 sl., 13 vir.

IJ SL

JI sl/en

AI Poleg električnih vozil postajajo vse zanimivejša in dostopnejša tudi električna zračna plovila. Za sedaj gre predvsem za manjše modele letal in kvadrokopterje na daljinsko upravljanje, pojavljajo pa se že prvi prototipi letal za prevoz ljudi. Zanimalo nas je, ali današnja tehnika že dopušča izdelavo električnih letal za prevoz potnikov in kje so meje. Kot izkušeni modelarji smo že imeli svoj model Graupner Rookie S, jadralno letalo, ki se z električnim pogonom dvigne in nato jadra. Model je po obliki in načinu pogona zelo podoben Pipistrellovemu Taurusu G2, prvemu električnemu jadralnemu letalu za dve osebi. Tako smo prišli na idejo, da bi poskuse in meritve izvajali na modelu in potem fizikalne količine ekstrapolirali na večji Taurus G2. Ob dovolj dobrem ujemanju bi morda v nadaljevanju lahko odgovorili na katero od zastavljenih vprašanj. Ker glavno oviro pri preboju električnih vozil predstavljajo akumulatorji za shranjevanje električne energije, smo se posebej posvetili temu področju. Spraševali smo se, ali bi letala na električni pogon z dvakrat učinkovitejšimi akumulatorji že pomenila grožnjo bencinsko gnanim. Tako smo izvedli vrsto meritev z modelom in določili porabo energije na kilometer prevožene poti. Ko smo preko sile upora izvedli ekstrapolacijo na večji Taurus G2, smo dobili 1000-krat večjo energijo. Dejanski podatki pa kažejo, da Taurus G2 porabi samo 134-krat več energije na kilometer. Razlog za neujemanje je v aerodinamiki, ki zahteva tako geometrijsko kot dinamično podobnost letal v primerjavi, česar pa nismo mogli zagotoviti. Ugotovili smo tudi, da vsi Taurusovi akumulatorji shranijo toliko energije, kot jo premore pol litra bencina. Če upoštevamo še izkoristek motorjev, se številka popravi na slaba dva litra. Torej tudi dvakrat učinkovitejši akumulatorji še ne bi prinesli konkurenčnosti glede na bencin. Poleg tega so energijsko najbolj učinkoviti akumulatorji zaenkrat še tako zelo dragi, da se njihova uporaba cenovno gledano nikakor ne izplača. Ima pa električni pogon vrsto prednosti pred motorji na notranje izgorevanje in vsaka izboljšava na tem področju bo pomenila večjo razširjenost tako kopenskih kot zračnih električnih vozil.

## KEY WORDS DOCUMENTATION

ND Splošna in strokovna gimnazija Velenje, 2014/2015  
CX physic / electric planes / accumulator / energy consumption  
AU PLEŠNIK, Filip / LENOVŠEK, Jernej  
AA JEVŠENAK, Peter  
PP 3320 Velenje, SLO, Trg mladosti 3  
PB Splošna in strokovna gimnazija Velenje  
PY 2015  
TI **FLYING WITH ELETRICITY**  
DT RESEARCH WORK  
NO VI, 29 p., 2 tab., 2 graf, 17 fig., 13 ref.  
LA SL  
AL sl/en

AB In addition to electric vehicles, electric aircrafts are becoming more interesting and accessible. At the moment the main focus is on smaller model aircrafts and remotely controlled quadcopters, however the very first prototypes of aircrafts for public transportation are starting to appear. We wanted to know whether today's technology already allows for the manufacture of electric airplanes to transport passengers and where the limits stand. As experienced modellers we have already had our model Graupner Rookie S, a glider, which is lifted by electrical drive and is able to sail. The model is, comparing shape and drive mode, very similar to Pipistrel Taurus G2, the first two seated electric glider. This is how we came up with the idea to carry out experiments and measurements on the model and then extrapolate physical quantities to a larger Taurus G2. At a sufficiently good match we might hereafter be able to answer the questions we are seeking the answers for. Since the main obstacle to the penetration of the electric vehicles pose batteries for electricity storage, we devoted particular attention to this area. We wondered whether the electrically driven aircrafts with twice as efficient batteries would become a threat to petrol driven aircrafts. Thus, we performed a series of measurements with the model and determined the energy consumption per kilometer. When we carried out extrapolation over the force of resistance to a larger Taurus G2, we got 1000 times more energy. Actual data however shows that the Taurus G2 uses only 134 times more energy per kilometer. The reason for this inconsistency lies in aerodynamics, which requires both geometric and dynamic similarity of aircrafts in comparison - this is an accuracy we are not able to provide. We have also found that all Taurus batteries store as much energy as half a liter of petrol. Taking into consideration the efficiency of the engine, the number is corrected to two liters. So twice as efficient batteries do not bring yet the competitiveness in relation to gasoline. In addition, most energy-efficient batteries are so expensive; their usage almost never pays off. The electric motor has its advantages over the internal combustion engine though and any improvement in this area will result in a higher prevalence of both land and air electric vehicles.

## **KAZALO VSEBINE**

---

1 UVOD .....	1
2 PREGLED OBJAV .....	2
2.1 Fizikalne osnove letenja in aerodinamika .....	2
2.2 Predstavitev Li-po akumulatorjev .....	5
3 MATERIAL IN METODE .....	6
3.1 Predstavitev letal v raziskovalni nalogi .....	6
3.1.1 Model: Graupner Elektro Rookie S .....	6
3.1.2 Taurus Electro G2 .....	7
3.2 Merjenje .....	9
3.2.1 Hitrost in nosilnost modela .....	9
3.2.2 Potisna sila motorja .....	11
3.2.3 Poraba energije .....	11
4 REZULTATI .....	13
4.1 Primerjava modela in G2 .....	13
4.1.1 Ocena napake .....	15
4.2 Električni bencin .....	16
5 DISKUSIJA .....	17
6 ZAKLJUČEK .....	19
7 POVZETEK .....	21
8 ZAHVALA .....	22
9 LITERATURA IN VIRI .....	23

## KAZALO SLIK

<i>Slika 1: sile na letalo, [4]</i> .....	2
<i>Slika 2: tokovnice ob letalskem krilu, [5]</i> .....	3
<i>Slika 3: sile na letalsko krilo. Y-sila vzgona, X-sila upora, R-skupna aerodinamična sila na krilo, [2]</i> .....	3
<i>Slika 4: vrtinčenje zraka in sila upora [2]</i> .....	3
<i>Slika 5: razmerje med shranjeno energijo in maso različnih tipov akumulatorjev [3]</i> .....	5
<i>Slika 6: Graupner electro Rookie S</i> .....	6
<i>Slika 7 : Taurus electro G2 [7]</i> .....	7
<i>Slika 8: Taurus G4 [8]</i> .....	8
<i>Slika 9: način meritve hitrosti (video analiza)</i> .....	10
<i>Slika 10: merjenje potisne sile z merilnim sistemom Vernier</i> .....	11
<i>Slika 11 : polnjenje Li-po akumulatorja</i> .....	11
<i>Slika 12 : Model Graupner s Slika 13 : Taurus G2 [9]</i> .....	13
<i>Slika 14: solarna prikolica, [10]</i> .....	16
<i>Slika 15: Volokopter z razvijalcema [11]</i> .....	19
<i>Slika 16: E-thrust, [12]</i> .....	20
<i>Slika 17: Airbus E-Fan, [13]</i> .....	20

## KAZALO TABEL

<i>Tabela 1 : osnovni podatki: (Elektro Rookie S)</i> .....	6
<i>Tabela 2: osnovni podatki : ( Taurus Elektro G2) [6]</i> .....	7

## KAZALO GRAFOV

<i>Graf 1: hitrost modela</i> .....	10
<i>Graf 2: Moč pri polnjenju akumulatorja v odvisnosti od časa</i> .....	12

# 1 UVOD

Po cestah že vozijo avtomobili in motorna kolesa na električni pogon. Elektromotorji so v primerjavi z bencinskimi ali dizelskimi motorji veliko manjši, lažji, tišji, cenejši in lahko se namestijo direktno na kolesa vozila. Pri zaviranju pa lahko kinetično energijo pretvarjajo nazaj v električno in tako zmanjšujejo porabo. Ne smemo tudi pozabiti, da je proizvodnja električne energije prijaznejša do okolja v primerjavi z motorji na notranje izgorevanje fosilnih goriv. Razcvet električnih vozil zaenkrat preprečuje način shranjevanja električne energije v akumulatorje. Ti so še pretežki, predragi, shranijo premalo energije, predolgo se polnijo in s časom se njihove karakteristike slabšajo. Vendar pa smo priča vsakoletnemu napredku na tem področju in stvari so prišle že tako daleč, da se resno razmišlja tudi o zračnem prometu na električni pogon. Slovenski proizvajalec športnih letal Pipistrel je leta 2014 prejel odmevno nagrado ameriške agencije NASA za sicer prototipno letalo G4, ki je zahvaljujoč električnemu pogonu edino uspelo zadostiti ekstremnim pogojem. Podjetje Pipistrel pa ni edino, ki se usmerja v električno letalstvo. Pomemben delež v razvoju električnih letal prispeva tudi družba Airbus s svojim letalom E-Fan.

“Ali današnja tehnologija že omogoča letala na elektriko? Koliko potnikov lahko prepeljejo? Kako daleč lahko letijo? Koliko energije in koliko akumulatorjev je potrebno za en let? Kje so meje? “ Vprašanja so se kar vrstila, odgovorov pa je malo. Ker imamo že nekaj izkušenj z modelarstvom in seveda veliko zanimanje za letalstvo, smo se odločili za izdelavo raziskovalne naloge. Z njo bi poskusili odgovoriti vsaj na katero od zastavljenih vprašanj s pomočjo poskusov in meritev na pomanjšanem modelu električnega letala. Za testni model smo izbrali modelarsko letalo Graupner Elektro Rooke S, ki je po obliki zelo podobno prvemu električno gnanemu letalu na tržišču, to je Pipistrelovo jadralno letalo Taurus G2. Posebej pa nas je pri nalogi motiviralo tudi to, da je prav slovensko podjetje v samem vrhu svetovnega razvoja električnih letal. V aerodinamiki si inženirji pogosto pomagajo z meritvami na pomanjšanih modelih, zato smo se tudi mi odločili ubrati to pot. Ker pa so najbolj problematičen del električnega pogona akumulatorji, smo proučevali predvsem porabo energije med letom in z njo povezane fizikalne količine.

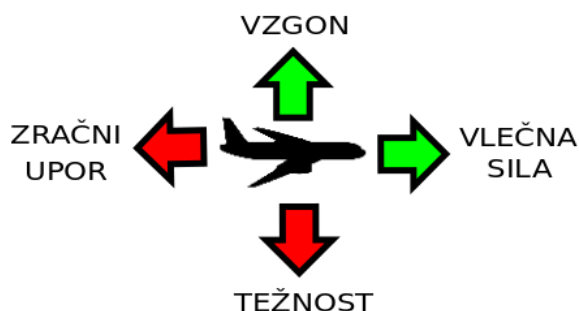
Postavili smo dve hipotezi:

1. Iz meritev porabljene energije pomanjšanega modela električnega letala lahko dobimo realno oceno porabe večjega letala za prevoz potnikov.
2. Ko bodo akumulatorji pri isti masi in volumnu lahko shranili dvakrat več energije, bodo zračna plovila na električni pogon postala konkurenčna bencinskim.

## 2 PREGLED OBJAV

### 2.1 Fizikalne osnove letenja in aerodinamika

Letalo v vodoravnem letu s stalno hitrostjo je v ravnovesju. V navpični smeri težo  $F_g$  uravnoveša sila vzgona  $F_{vzg}$ , v vodoravni smeri pa potisno silo motorja  $F_m$  uravnoveša sila upora  $F_{up}$ .



SLIKA 1: SILE NA LETALO, [4]

Motor na poti  $s$  opravi delo  $A$ :  $A = F_m \cdot s = F_{up} \cdot s$   $[N \cdot m = J]$  (1)

Motor letala deluje z močjo  $P$  in v času  $t$  porabi energijo  $W$ , ki je enaka opravljenemu delu  $A$ . Med temi količinami velja zveza:  $P \frac{A}{t} = \frac{J}{s} = W$  (2).

Če upoštevamo še zvezo, da je hitrost  $v = \frac{s}{t}$ , potem iz enačb 1 in 2 sledi [1]:

$$P = F_{up} \cdot v \quad (3).$$

Zrak lahko do hitrosti 100 m/s štejejo za nestisljivo tekočino. To pomeni, da se gostota zraka ne spreminja, ko ta obliva letalo med letom. Pri predstavi gibanja zraka okoli teles si pomagamo s tokovnicami. To so krivulje, za katere velja, da je hitrost v vsaki točki na tokovnici usmerjena v smeri tangente na tokovnico. To pomeni, da ni pretoka zraka skozi tokovnice, ampak samo vzporedno z njimi. Površina letal je za zrak neprepustna, zato lahko na primer konturo krila nadomestimo s tokovnico. vzdolž tokovnice velja zakon o ohranitvi energije, bolj znan pod imenom Bernoullijeva enačba:

$$\frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + p_2 \quad (4).$$

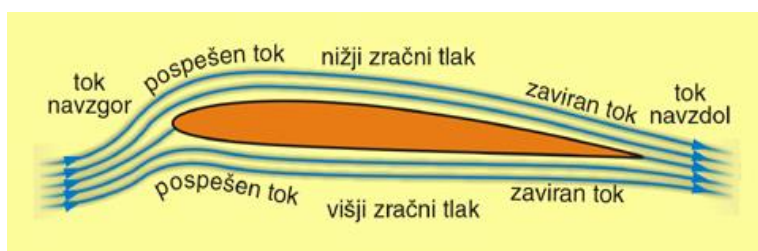
$\rho$  – gostota zraka ( $kg/m^3$ )

$v$  – hitrost v izbrani točki tokovnice ( $m/s$ )

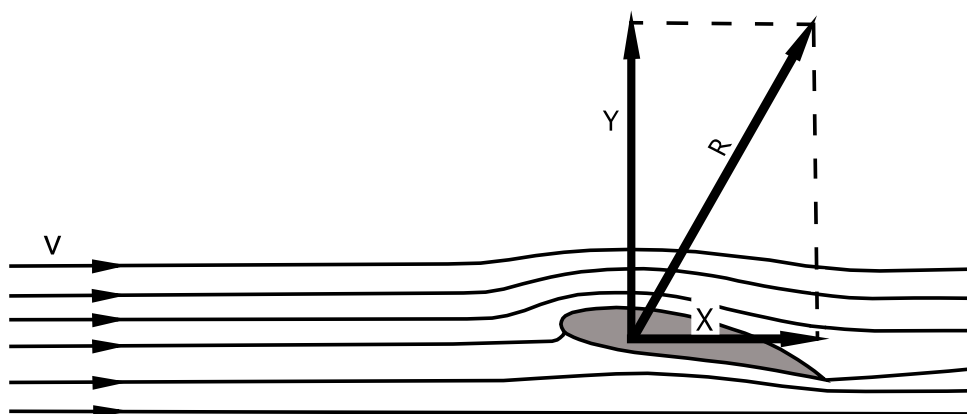
$p$  – tlak v izbrani točki tokovnice ( $Pa$ )

Iz enačbe vidimo, da se pri premiku iz ene v drugo točko vzdolž tokovnice tlak zmanjša, če se hitrost poveča. Vzgon letalu zagotavlja oblika krila. To je oblikovano tako, da je zrak nad krilom hitrejši kot pod njim, ko med letom obliva krilo (slika 2). Med spodnjo in zgornjo stranjo krila se torej pojavi tlačna razlika, ki povzroči aerodinamično silo poševno na tokovnice (slika 3). Pri vodoravnem letu je navpična komponenta sila vzgona, vodoravna komponenta pa sila upora.





SLIKA 2: TOKOVNICE OB LETALSKEM KRILU, [5]



SLIKA 3: SILE NA LETALSKO KRILO. Y-SILA VZGONA, X-SILA UPORA, R-SKUPNA AERODINAMIČNA SILA NA KRILO, [2]

Za letala velja kvadratni zakon upora:

$$F_{up} = \frac{1}{2} \rho \cdot C \cdot S \cdot v^2 \quad (5).$$

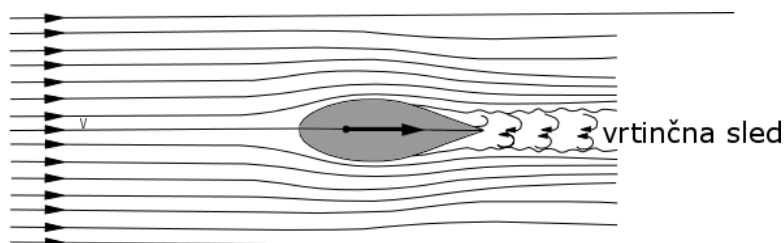
$\rho$  – gostota zraka ( $kg/m^3$ )

$C$  – količnik zračnega upora (brezdimenzijski)

$S$  – največja površina, ki jo dobimo, če letalo prerežemo z ravnino, pravokotno na smer leta ( $m^2$ )

$v$  – hitrost letala ( $m/s$ )

Tudi za najbolj aerodinamično oblikovanimi telesi se zrak nekoliko vrtinči. Na mestu vrtinčenja pa je tlak manjši, zato se pojavi sila v nasprotni smeri gibanja. Telo v obliki kapljice ima najmanjši količnik zračnega upora:  $C = 0,045$ , zato trupi letal posnemajo to obliko.



SLIKA 4: VRTINČENJE ZRAKA IN SILA UPORA [2]

V aerodinamiki je zelo težko samo matematično opisati pojave, zato se teoretična obravnavanja dopolnjujejo z izsledki, ki jih dobimo z meritvami na pomanjšanih modelih letal. V zadnjem času so v veliko pomoč vetrni kanali, kjer se s pomočjo ventilatorja ustvari

zračni tok. Če hočemo rezultate meritev na pomanjšanem modelu prenesti na resnično letalo, moramo med modelom in letalom zagotoviti aerodinamično podobnost. Električna letala danes letijo s hitrostmi pod 100 m/s. Za to območje hitrosti je model aerodinamično podoben letalu, če zagotovimo geometrijsko in dinamično podobnost. Model je geometrijsko podoben letalu, če je narejen točno v izbranem merilu. Sem spada tudi gladkost površine modela. To pomeni, da mora biti model tolikokrat bolj gladek, kolikokrat je model manjši od letala. Dinamično podobnost pa zagotovimo z enakostjo Reynoldsovih števil za model in letalo. Reynoldsovo število je definirano takole:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} \quad (6).$$

$v$  – hitrost letala ali zračnega toka v vetrovniku (m/s)

$l$  – karakteristična dolžina (npr. dolžina trupa, globina krila ...) (m)

$\frac{\eta}{\rho}$  - kinematična viskoznost zraka, ki znaša 0,0000145 m<sup>2</sup>/s pri pogojih mednarodne standardne atmosfere ( $T=288$  K,  $p=101,3$  kPa,  $\rho=1,225$  kg/m<sup>3</sup>)

Pri meritvah na modelu je potrebno najprej zagotoviti, da je zrak pri istih pogojih, kot bi jih imel zrak v okolici pravega letala (enaka kinematična viskoznost). Če je karakteristična dolžina modela petkrat manjša od letala (merilo 1 : 5), potem mora biti hitrost zračnega toka v vetrovniku petkrat večja od hitrosti letala, da bo  $Re_{modela} = Re_{letala}$  [2].

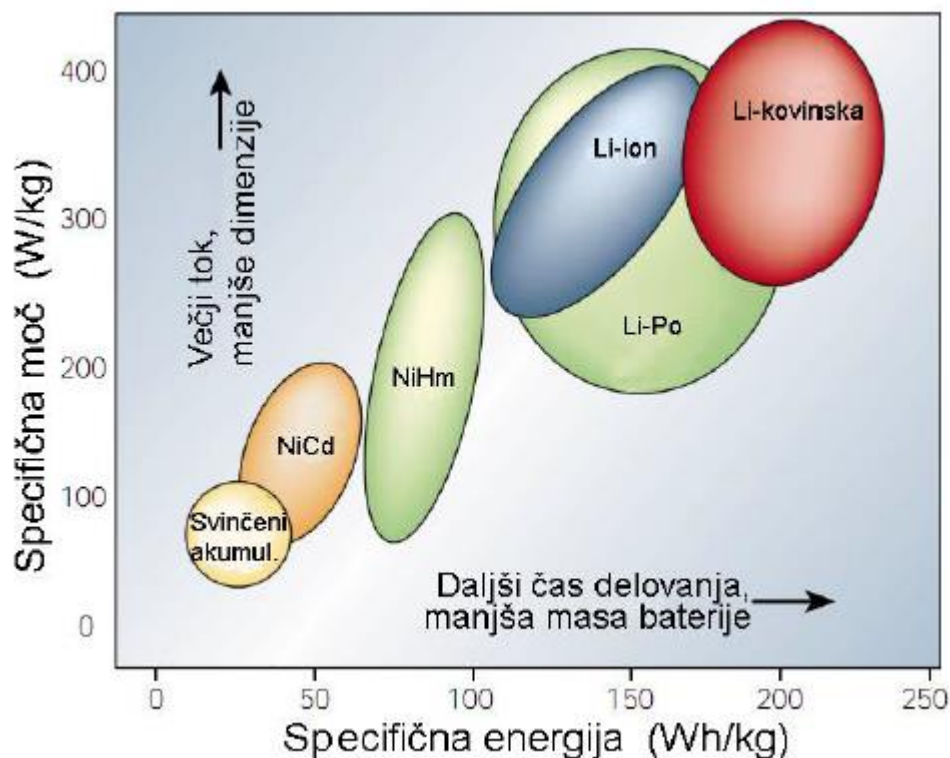
## 2.2 Predstavitev Li-po akumulatorjev

Li-po oz. lithium- polymer akumulatorji so poimenovani kar po substanci, iz katere so zgrajeni. Navadno so sestavljeni iz več celic. Priporočljivo napetostno območje ene celice je med 3,7 V in 4,0 V, v katerem se celica napolni z 80 % nazivne energije. Zaradi številnih dobrih lastnosti se njihova uporaba danes širi na številna področja.

Prenesejo velike impulzne praznilne tokove (tudi 30 do 40 C: poln akumulator se sprazni v času  $\frac{1}{C} \sim 2 \text{ min}$ ) in imajo nizko samospraznilno vrednost (če napolnjen akumulator pustimo dlje časa neuporabljen, napetost v primerjavi z drugimi akumulatorji pade le za neznatno vrednost cca. 5 – 10 % na mesec). Najbolj pomembno pa je, da imajo veliko energijsko gostoto, kar pomeni, da je količina shranjene energije velika glede na enoto volumna in mase (slika 5).

Kljub številnim prednostim pa moramo biti pozorni tudi na nekaj slabosti. Akumulatorske celice so zelo občutljive glede napetosti. Če celico napolnimo na več kot 4,2 V, jo lahko poškodujemo. Prav tako minimalna vrednost napetosti na celico ne sme pasti pod 2,7 V. Če pride pod to mejo, se celica uniči in izgubi sposobnost za ponovno polnjenje. Akumulatorji so tudi mehansko slabo odporni, občutljivi so na temperaturo in lahko ob nepravilni uporabi eksplodirajo.

Pri razvoju električnih letal sta pomembni predvsem masa in energija akumulatorjev. Kljub prizadevanju znanstvenikov so danes najboljši akumulatorji teoretično sposobni nekje do 200 Wh/kg, kar je še vedno približno 65-krat manj od energije, ki jo oddajo fosilna goriva [3].



SLIKA 5: RAZMERJE MED SHRANJENO ENERGIJO IN MASO RAZLIČNIH TIPOV AKUMULATORJEV [3]

### 3 MATERIAL IN METODE

#### 3.1 Predstavitev letal v raziskovalni nalogi

Za potrebno raziskavo smo pod drobnogled vzeli nekaj električnih letal in poiskali njihove osnovne lastnosti. V nadaljevanju smo nekatere podatke potrebovali za podrobno primerjavo.

##### 3.1.1 Model: Graupner Elektro Rookie S

Modelarsko letalo Graupner Elektro Rooke S (v raziskovalni nalogi omenjeno kot model) je lahko jadralno letalo s pomožnim električnim motorjem. Potisni pogonski sklop, ki je pritrjen za kabino, je namenjen dvigu letala na določeno višino, od tam naprej pa lahko jadra kot druga jadralna letala.

Model je v celoti sestavljen iz solidporja (lahka pena, na pogled podobna stiroporju). Ta material je za manjše modele primeren, saj je odporen na udarce v primeru manjših napak pri pristajanju. Za večje modele in prava letala pa se večinoma uporabljajo lahki kompoziti, ojačani s kevlar, ogljikovimi ali steklenimi vlakni, ker so ti lažji in zagotavljajo primerno trdnost.

Ta model smo kot primerjavo za Taurusa Elektro G2 izbrali zato, ker mu je podoben po obliki in legi motorja in nam je bil na voljo za testne poskuse.

Masa praznega letala (pogon, brez obtežitve)	580 g
Masa pogonskega sklopa	50 g
Masa akumulatorja	140 g
Nosilnost	313 g (akumulator + uteži)
Maksimalna vzletna teža	893 g
Čelni presek letala	cca. 465 cm <sup>2</sup>
Dolžina	960 mm
Razpon kril	1450 mm
Površina kril	23,4 dm <sup>2</sup>

TABELA 1 : OSNOVNI PODATKI: (ELEKTRO ROOKIE S)



SLIKA 6: GRAUPNER ELECTRO ROOKIE S

### 3.1.2 Taurus Electro G2

Taurus Electro G2 (v raziskovalni nalogi omenjen kot G2) je prvo dvosedežno električno jadralno letalo za serijsko proizvodnjo. Narejeno je bilo pri slovenskem proizvajalcu letal Pipistrelu, prvi polet pa je bil opravljen leta 2007. Vzleti lahko z lastnim električnim motorjem brez pomoči vlečnega letala ali vitla in doseže višino od 1200 m do 2000 m, odvisno od tipa akumulatorjev\*. Uvlačljiv potisni pogonski sklop je pritrjen za kabino, napajajo pa ga štirje Li-po akumulatorji, ki se nahajajo v trupu letala. Zaradi velike teže letih je letalo izdelano iz zelo lahkih in trdnih visoko tehnoloških kompozitov. Trenutno ga je mogoče kupiti v treh različnih verzijah (z električnim, bencinskim motorjem ali brez dodatnega pogona), krila tega letala pa so večnamenska, saj so uporabljena tudi pri letalu Sinus.

\*Na trgu sta dosegljivi 42- in 60-kilogramska verzija.

Masa praznega letala (pogon, brez obtežitve)	264 kg
Masa pogonskega sklopa	11 kg
Masa akumulatorjev	42 kg
Nosilnost	262 kg (akumulatorji + potniki)
Maksimalna vzletna teža	cca.550 kg
Čelni presek letala	2,7 m <sup>2</sup>
Dolžina	7,27 m
Razpon kril	14,97 m
Površina kril	12,33 m <sup>2</sup>

TABELA 2: OSNOVNI PODATKI : ( TAURUS ELEKTRO G2) [6]



S

SLIKA 7 : TAURUS ELECTRO G2 [7]

## **Taurus G4**

Je prvo 4-sedežno električno letalo, ki je bilo narejeno izključno za Nasino tekmovanje, na katerem je tudi zmagalo. Letalo odlikuje odlična aerodinamičnost in izredno majhna poraba energije. Zasnova letala je nastala tako, da so dva že obstoječa trupa letala G2 povezali s centralnim krilom dolžine 5 metrov, na katero so pritrdili 145 kW-elektromotor.

Letalo je moralo na Nasinem tekmovanju Green flight challenge izpolnjevati več pogojev: največji izziv je bila poraba energije glede na potnika, ki naj bi znašala 1,17 litra bencina na 100 km ali manj. Pri tem so bili zelo uspešni, saj jim to ni le uspelo, ampak so izboljšali rezultate in tako za štiri potnike uporabili energijo, ki je ekvivalentna dvema litroma bencina na 100 km. Dolžina leta je morala presežati 322 km, hitrost pa 160 km/h. Vzletna razdalja ni smela preseči 600 m.



*SLIKA 8: TAURUS G4 [8]*



## 3.2 Merjenje

V raziskovalni nalogi smo hoteli čim boljše raziskati, ali lahko model letala primerjamo s pravim. Zato smo naredili nekaj praktičnih poskusov v zvezi s hitrostjo letala, nosilnostjo, močjo motorja in porabo energije. Da bi bili podatki čim natančnejši in s tem tudi primerljivi, smo uporabili vse razpoložljive vire in metode.

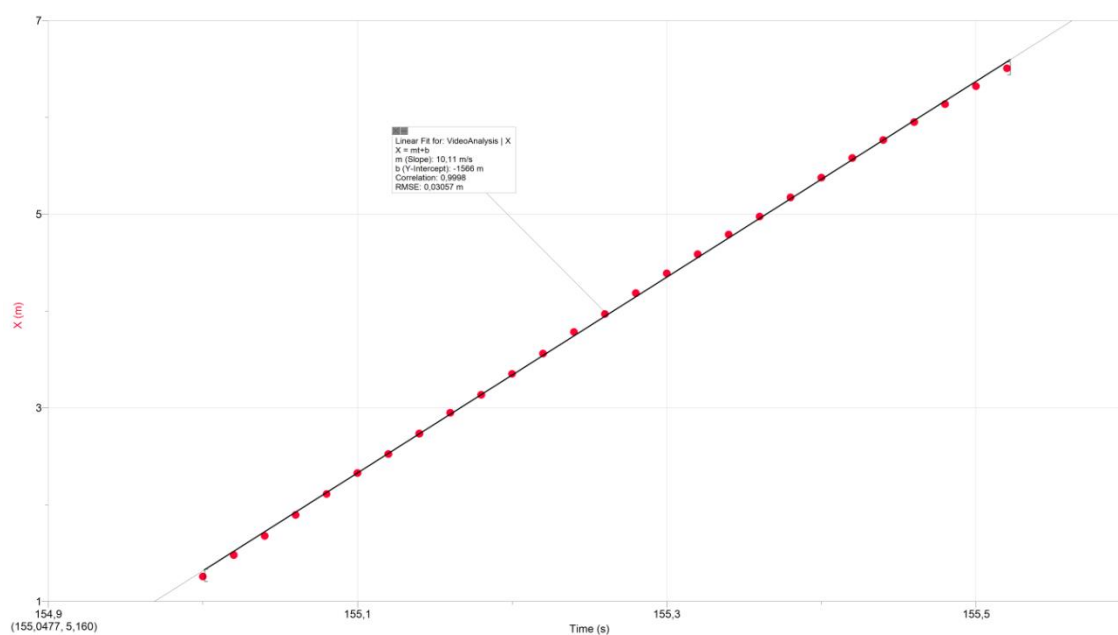
### 3.2.1 Hitrost in nosilnost modela

Pri merjenju hitrosti modela nismo imeli na voljo radarja ali GPS-naprav, ki bi nam omogočile takojšnjo določitev hitrosti, zato smo izbrali nam dosegljivo metodo: snemanje modela med letom in obdelava posnetka v računalniškem programu Logger Pro.

Poskus je potekal takole: na razdalji 5 metrov smo postavili dve merilni palici in na primerno oddaljenost od palic kamero s 50 posnetki na sekundo, ki je snemala prelete letala nad palicama. Letalo smo poskusili voditi vodoravno v liniji palic pri največji moči motorja. Zabeležene posnetke smo prenesli v Logger Pro ter izvedli video analizo, s pomočjo katere smo določili hitrost modela.

Na sliki 9 vidimo merilni palici, zelena črta med njima služi programu za merilo (koliko pikselov na sliki je 1 m v naravi). Vsaka modra pika pa predstavlja lego letala pred eno, dvema, tremi ... petdesetinkami sekunde. Vzporedno z določanjem lege letala na posameznih posnetkih program izrisuje graf lego (x) v odvisnosti od časa (t). Na grafu 1 vidimo, da pot enakomerno narašča, strmina premice pa je hitrost letala. Program je ameriški (Vernier), zato so parametri v angleškem jeziku. Strmino premice podaja koeficient m (slope) in za izbrano meritev znaša 10,11 m/s. Opravili smo veliko preletov merilnih palic, na žalost pa je bilo veliko posnetkov neuporabnih zaradi nenatančnih preletov izven snemalnega območja ali spremembe smeri letala. Izbrali smo dva najnatančnejša preleta, pri katerih smo dobili sledeči hitrosti:  $v_1=10,11$  m/s in  $v_2=11,3$  m/s ter povprečno vrednost 10,7 m/s.

Pogoji pri merjenju: Temperatura: 3°C      Tlak: 97,8 kPa      Veter: 0 km/h



*GRAF 1: HITROST MODELA*



*SLIKA 9: NAČIN MERITVE HITROSTI (VIDEO ANALIZA)*

Pri komercialnem letalstvu je najpomembnejša uporabna teža oz. teža tovora, s katerim lahko letalo še varno leti. Edini način, kako preveriti nosilnost modela, je, da ga postopoma obtežujemo in tako ugotovimo, kje ima meje. Sami smo postopoma dodajali uteži in preverjali letalne sposobnosti. Pri tem smo morali zelo paziti, da smo uteži dodajali tako, da nismo spreminjali težišča ali pokvarili aerodinamične lastnosti modela (kovinske ploščice smo nalepili približno pod prvo tretjino glavnega krila). Pri masi uteži 173 g smo prišli do meje, ko smo ocenili, da je stabilnost letala ogrožena.



### 3.2.2 Potisna sila motorja

Maksimalno potisno silo motorja smo lahko najboljše izmerili kar v učilnici. Letalo smo obesili na silomer, ki je pokazal težo modela (slika 10). Medtem ko je letalo viselo in kazalo težo, smo motor pognali z največjo močjo. Pri tem smo dobili skupno silo teže in potisne sile. Ko smo od skupne sile odšteli težo, smo dobili potisno silo  $F = 2,76 \text{ N}$ .



SLIKA 10: MERJENJE POTISNE SILE Z MERILNIM SISTEMOM VERNIER

### 3.2.3 Poraba energije

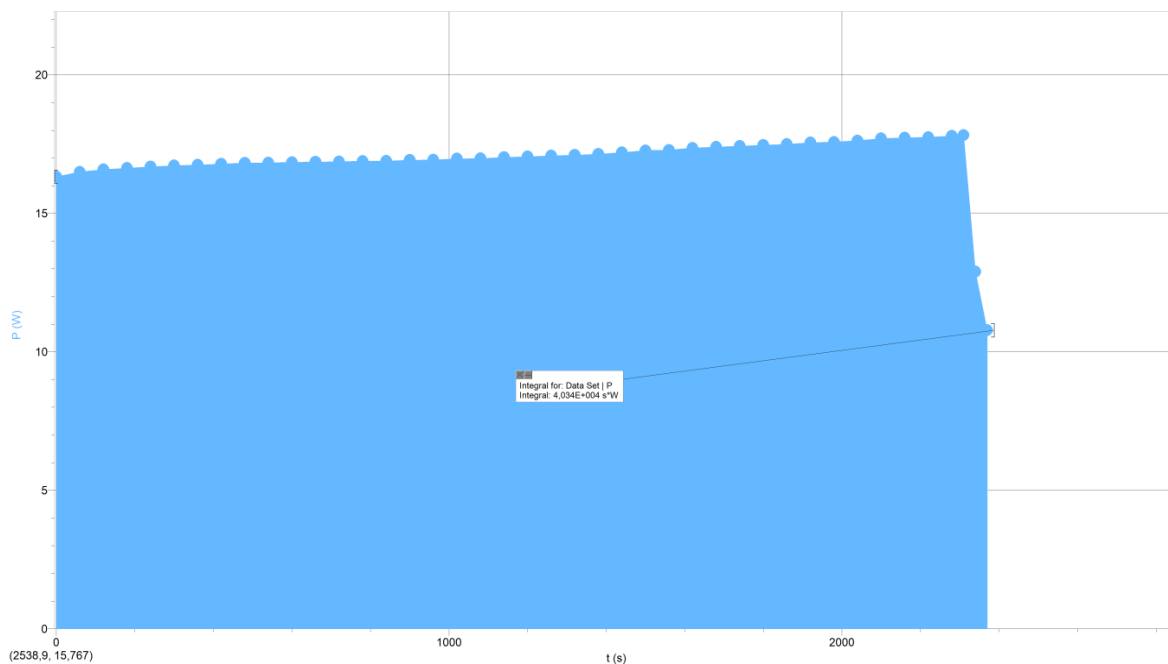
Da bi lahko izračunali, kolikšno pot je letalo sposobno preleteti z enim akumulatorjem, smo potrebovali še podatek o porabljeni energiji. Poskus, koliko časa lahko motor deluje, smo izvedli kar v učilnici. Letalo smo pustili delovati pri polni moči in merili čas delovanja ter hkrati tudi padeč napetosti na akumulatorju. Ker je v modelu uporabljen dvocelični Li-po akumulator, je napetost polnega  $8,0 \text{ V}$  in lahko pade za  $0,6 \text{ V}$ .

Čas delovanja motorja za padeč napetosti do  $7,4 \text{ V}$  je bil  $12,5$  minut oz.  $750$  sekund.

Po izvedenem poskusu smo akumulator priključili na polnilnik (slika 11) in spremljali parametre: napetost ( $U$ ), tok ( $I$ ) in čas ( $t$ ). Podatke smo zapisovali vsakih  $30$  sekund, dokler napetost na akumulatorju ni dosegla ponovno  $8,0 \text{ V}$  in je tok začel skokovito padati. Podatke smo nato vnesli v Logger Pro. Os  $y$  na grafu 2 predstavlja moč ( $P$ ), ki je zmnožek napetosti in polnilnega toka, os  $x$  pa čas. Ploščina grafa pod krivuljo, ki znaša  $40\,300 \text{ J}$ , je enaka shranjeni energiji.



SLIKA 11 : POLNENJE LI-PO AKUMULATORJA



*GRAF 2: MOČ PRI POLNJENJU AKUMULATORJA V ODVISNOSTI OD ČASA*

Uporabljen akumulator ima nazivno vrednost energije 16,3 kWh, ko pa smo ga izpraznili in napolnili v priporočenih napetostnih mejah, pa smo dobili energijo 40300 J ali 11,2 kWh. Izkoristek je 69 % nazivne vrednosti energije, ki je zapisana na akumulatorju.

## 4 REZULTATI

### 4.1 Primerjava modela in G2



SLIKA 12 : MODEL GRAUPNER S



SLIKA 13 : TAURUS G2 [9]

Rezultate o porabi energije in poti, ki jo opravi model z enim polnjenjem akumulatorja, smo ekstrapolirali na G2. Pri modelu je koristna energija, ki jo dobimo iz akumulatorja, enaka 40300 J, čas, pri katerem lahko letalo leti s polno močjo, je 750 s. Iz teh dveh podatkov smo izračunali moč motorja po enačbi 2:

$$P = 53,7 \text{ W}$$

Pot, ki jo pri taki moči letalo opravi, je:

$$s = v \cdot t = 10,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 750 \text{ s} = 8025 \text{ m}$$

Za primerjavo med letaloma smo vpeljali koeficient  $q_1$ , ki nam pove razmerje med porabljeno energijo na kilometer prepotovane poti. Za model znaša:

$$q_1 = \frac{\text{porabljena energija}}{1 \text{ km}} = 5022 \frac{\text{J}}{\text{km}}$$

Letalo G2 lahko shrani v svojih akumulatorjih 3,8 kWh, (če upoštevamo 80 % od 4,75 kWh nazivne energije), kar je  $1,37 \cdot 10^7 \text{ J}$  ali 13,7 MJ. S to energijo lahko pri polni moči 30 kW leti 457 s s hitrostjo 160 km/h oz.  $44,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (vir podatkov je spletna stran Pipistrel). Pot, ki naj bi jo prevozilo letalo, je:

$$s = 457 \text{ s} \cdot 44,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 20,3 \text{ km}$$

Pri letalu G2 je izračun za koeficient  $q_2$  sledeč:

$$q_2 = \frac{\text{porabljena energija}}{1 \text{ km}} = \frac{1,37 \cdot 10^7 \text{ J}}{20,3 \text{ km}} = 675000 \frac{\text{J}}{\text{km}}$$

Razmerje koeficientov nam da vrednost:

$$k = \frac{q_2}{q_1} = 134$$

G2 porabi 134-krat več energije na kilometer prevožene poti kot model.

Da lahko preverimo pravilnost prve hipoteze, moramo dejansko razmerje porabljene energije na kilometer (1 : 134) primerjati s teoretičnim razmerjem med silo upora na eno in drugo letalo (enačba 5). Sila upora je namreč pri stalni hitrosti v vodoravni smeri premo sorazmerna s porabljeno energijo (enačba 1).

Predpostavili smo, da je količnik zračnega upora ( $C$ ) za obe letali v primerjavi enak. To zagotavlja oblikovna podobnost. V razmerju se pokrajša tako gostota zraka ( $\rho$ ) kot količnik upora ( $C$ ), ostane pa produkt čelnega preseka ( $S$ ) in kvadrata hitrosti ( $v^2$ ).

Model smo lahko natančno premerili (razpon in debelina kril, premer trupa ...) in izračunali čelni presek, ki znaša  $0,0465 \text{ m}^2$ . Za G2 pa smo presek le ocenili, saj smo imeli na voljo le slike letala in nekaj osnovnih podatkov (razpon kril in širina trupa), manjka pa debelina kril, ki smo jo ocenili v povprečju od trupa do konic na 12 cm. Čelni presek za G2 znaša po naših ocenah  $2,7 \text{ m}^2$ .

Z obema silama upora smo izračunali razmerje med njima ( $k'$ ):

$$k' = \frac{F_{\text{up}(G2)}}{F_{\text{up}(\text{model})}} = \frac{2,7 \text{ m}^2 \cdot \left(44,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,0465 \text{ m}^2 \cdot \left(10,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}$$

Po tem izračunu bi moralo letalo G2 porabiti 1004-krat več energije kot naš model. V primeru, da bi bila naša prva hipoteza pravilna in da bi bila ekstrapolacija porabe energije mogoča, bi moralo biti dejansko in teoretično razmerje porabe energije vsaj približno enako. Tako pa se razmerji 1 : 134 in 1 : 1004 preveč razlikujeta in moramo prvo hipotezo spoznati za napačno.

### 4.1.1 Ocena napake

V izračunih količnikov  $k$  in  $k'$  nastopajo izmerjene vrednosti, ki so obremenjene z napako.

Graf 2, Energija, polnjenje akumulatorjev kaže, da smo to meritev izvedli na optimalen način (dovolj velika gostota točk, graf ima pričakovano obliko, program je natančno izračunal integral – ploščino pod krivuljo). Tako lahko tej meritvi pripišemo napako polnilne postaje pri merjenju toka in napetosti. Ta znaša za vsako količino 2 %, kar da skupaj 40,3 kJ ( $1 \pm 4$  %). Za akumulatorje letala G2 ni podatkov o napaki oziroma možnih odstopanjih, verjetno pa ne presegajo napake naše meritve.

Hitrost: Čeprav smo navedli samo dve meritvi, so delni rezultati neuporabljenih meritev kazali na isti hitrostni interval med 10 m/s in 11 m/s. Zato smo za oceno napake hitrosti vzeli kar absolutno napako uporabljenih dveh meritev:  $10,7 \frac{m}{s} \pm 0,6 \frac{m}{s} = 10,7 \frac{m}{s} (1 \pm 6$  %). Z oceno napake hitrosti letala G2 je večja težava. Po dostopnih podatkih je največja dovoljena hitrost z iztegnjenim pogonskim sklopom (ta se med jadranjem zloži nazaj v trup) 160 km/h. Vendar ni jasno, ali to hitrost zagotavlja motor samo s potiskom ali se letalo zraven spušča. Mi bi za primerjavo potrebovali hitrost v vodoravnem letu pri maksimalni moči motorja, točno tega podatka pa ni. Smo pa našli podatek, da G2 v vodoravnem letu pri hitrosti 107 km/h porablja 7 kW moči. To je precej manj kot maksimalnih 30 kW, zato smo predpostavili, da se hitrost pri polni moči dejansko približa dovoljeni hitrosti 160 km/h. Relativno napako lahko zgolj ocenimo na 10 %.

Čelni presek: K napaki največ prispevajo krila, ki v prerezu ne tvorijo simetričnih likov (proti koncu se ožijo, naklon zgoraj in spodaj je različen). Zato čelnemu preseku modela pripišemo 4 % napake (natančnost meritev posameznih dimenzij je 2 %). Pri G2 smo debelino kril ocenili z video analizo posnetkov s spleta, zato ima ta podatek največjo napako  $\pm 2$  cm oziroma 8,5 %. K napaki dodatno prispeva še oblika trupa, ki v prerezu ni krog. Skupna relativna napaka za čelni presek G2 je 10 %.

Z upoštevanjem zgoraj naštetih relativnih napak dobimo naslednji oceni natančnosti količnikov (relativne napake se pri množenju in deljenju seštevajo):  $k = 134(1 \pm 8$  %) in  $k' = 1004(1 \pm 46$  %).

## 4.2 Električna : bencin

Letalo Taurus G2 obstaja tako v bencinski kot električni izvedbi. Električni G2 ima maso akumulatorjev 42 kg, ki lahko shranijo 13,7 MJ energije. Bencinski G2 ima 27-litrski rezervoar, iz litra bencina pa dobimo približno 33 MJ energije [1]. V akumulatorjih električnega G2 je torej manj energije, kot jo premore pol litra bencina (natančno 0,41 litra). Če upoštevamo, da ima bencinski motor 25 % izkoristek, električni pa skoraj 100 %, je energija v akumulatorjih ekvivalentna približno 1,6 litra bencina. Tudi če bi imeli akumulatorje z dvakrat večjo energijsko gostoto, bi iz polnega bencinskega rezervoarja G2 dobili približno desetkrat več energije. Ob upoštevanju teh argumentov smo drugo hipotezo ovrgli, saj tudi akumulatorji z dvakrat večjo energijsko gostoto še ne bodo konkurenčni letalom z bencinskim pogonom. Omeniti je potrebno, da smo imeli na začetku raziskovanja kar nekaj težav z določanjem konkretnega števila, kolikokrat bi se morali akumulatorji izboljšati, da bi jih lahko primerjali z bencinom. Odločili smo se za faktor dva, ker danes znanstvenikom kljub številnim novim idejam uspeva le postopno izboljševanje energijske gostote celic. Napredek se meri v nekaj procentih na leto, tako da je 100 % izboljšava še precej oddaljena in negotova. Očitno tudi dvakrat zmogljivejši akumulatorji v svetu zračnih plovil še ne bodo prinesli revolucije in bo zato potreben večji preboj pri razvoju le-teh. Ko bodo izdelali vsaj pet ali šestkrat zmogljivejše akumulatorje, pa bi ti že utegnili ogroziti (zanimanje za) bencinska plovila.

Kljub številnim, ne najbolj spodbudnim lastnostim ima električno letalo G2 tudi nekaj dobrih in za kupce privlačnih lastnosti. Pri istem podjetju so razvili tudi solarno prikolico (slika 14) za prevoz letala po cesti, s pomočjo katere lahko letimo povsem neodvisno od vira električne napetosti. Solarne celice, ki so pritrjene na zgornjo površino prikolice, so akumulatorje za letalo sposobne napolniti v cca. 5 urah, vendar je pogoj za to sončno vreme. V oblačnem vremenu lahko polnjenje traja precej dlje, zato jih je možno napolniti tudi prek 110/220 V-vtičnice. Dobra lastnost polnjenja preko prikolice je tudi ta, da je ekološko prijazno (brez emisij).



SLIKA 14: SOLARNA PRIKOLICA, [10]

## 5 DISKUSIJA

Pogoj za potrditev prve hipoteze je, da se teoretično izračunano razmerje porabe energije med G2 in modelom ujema z razmerjem, dobljenim iz praktičnih meritev in poskusov. Iz izračunov v poglavju 4.1 in 4.1.1 je neujemanje tudi z upoštevanjem merskih napak preveliko, zato smo prvo hipotezo ovrgli. Analizirali smo glavne vzroke za nastalo razliko.

Za poskuse smo imeli na voljo model, ki ni kopija nobenega pravega letala. Na tržišču je nabor električnih letal zelo majhen in njihovih pomanjšanih modelarskih različic ni. Aerodinamika zahteva, da sta letali v primerjavi geometrijsko in dinamično podobni.

H geometrijski podobnosti spada tudi gladkost površine na letalu, ki mora biti prav tako kot velikost v merilu. Glede na razpon kril sta model in G2 v razmerju 1 : 10. To v našem primeru pomeni, da mora imeti model 10-krat bolj gladko površino. Te zahteve ni mogoče zadovoljiti, saj je gladkost zunanje površine na G2 skoraj največja možna glede na trenutno razpoložljive materiale. Torej je bila zunanja površina na modelu (solidpor) glede gladkosti neustrezna.

Dinamična podobnost zahteva ujemanje Reynoldsovih števil. Če bi imeli pri meritvah na modelu možnost, da bi jih opravljali v vetrovniku, bi morali skozenj spustiti tok zraka s približno 10-krat večjo hitrostjo kot leti G2, saj je model približno 10-krat manjši. V našem primeru je model namesto 10-krat hitreje letel celo približno 4-krat počasneje, kar zagotovo pojasni veliko razliko v neujemanju rezultatov.

Naslednji razlog za neujemanje je lahko uporaba različnih materialov. G2 je sestavljen iz kompozitnih materialov, katerih uporaba je v letalski industriji zelo razširjena. Model pa je sestavljen iz solidporja, ki je sicer za manjše modele primeren (odporen na udarce in upogljiv), za uporabo v pravem letalstvu pa praktično neuporaben, saj je preveč mehak in krhek. Poleg tega material da modelu trdnost šele, če je ta z njim napolnjen, kar pa bi bilo pri pravem letalu nemogoče, saj v kabini potrebujemo prostor za pilota in potnike, v trupu in krilih pa prostor za gorivo in prtljago. Slaba lastnost solidporja je tudi neodpornost na visoke temperature, ki so pri bencinskih motorjih in turbinah stalnica.

Z uporabo materialov je neposredno povezana tudi nosilnost letala. Več ko porabimo predvidene maksimalne teže letala za njegovo izgradnjo, manj nam ostane uporabne teže oz. teže, ki jo lahko izkoristimo za gorivo in ne nazadnje tudi za potnike. Naš model ima sledeče razmerje:  $\frac{\text{teža praznega letala}}{\text{največja vzletna teža}} = \frac{2}{3}$ , G2 pa  $\frac{1}{2}$ . Boljše razmerje pri G2 pokaže očitno prednost kompozitnih materialov pred solidporjem. Če bi imel naš model lažjo konstrukcijo, bi mu s tem povečali uporabno težo, ki bi jo lahko izkoristili za akumulatorje, s tem pa preleteli večjo razdaljo, ki je pri električnih letalih trenutno ključnega pomena. Prav tako se G2 ponaša z zmogljivejšim akumulatorjem. Pri testih smo ugotovili, da ima akumulator v modelu energijsko gostoto  $80 \frac{Wh}{kg}$ , akumulatorji v G2 pa  $90 \frac{Wh}{kg}$  (upoštevana je energija, ki jo akumulator shrani v priporočenih napetostnih mejah). Razlog za to nam ni povsem znan, najverjetneje pa ima na to vpliv starost akumulatorja (približno 3 leta) in kvaliteta Li-po celic.

Izmerili smo potisno silo motorja na modelu, vendar nam je tudi ta meritev namesto odgovorov postregla z novimi vprašanji. Moč, ki smo jo dobili z merjenjem energije in časa

po enačbi 2, je 53 W. Moč z izmerjeno silo in hitrostjo po enačbi 1 pa je 28 W. Relativna napaka prve meritve je ocenjena na 4 %, druge pa na 6 %. Razlike ne znamo pojasniti, sklepamo pa, da je vzrokov za nastalo razliko več. Eden glavnih je zagotovo poraba energije ostalih instrumentov v modelu (servo motorji, sprejemnik, regulator motorja ...) in upor žic. Kljub temu da ima motor domnevno visok izkoristek, pride pri mehanskih delih (ležajih) do delne izgube energije. Vsi ti razlogi naj bi prispevali k razliki v izračunu moči.

V nalogi smo obravnavali samo fazo leta, čeprav je s stališča porabe energije pomemben tudi vzlet. Pri G2 se predpostavlja, da pri vzletu motor deluje eno minuto pri vzletni moči 40 kW, pri čemer porabi petino vse razpoložljive energije. Model poleti kar z metom iz roke in kakšna podrobnejša primerjava tu ni bila mogoča.

V drugi hipotezi nas je zanimala primerjava elektrika : bencin. Bencin je proti elektriki trenutno v mnogih pogledih še vedno boljše odločitev. Pomembna je tudi cena in vzdrževanje letala. Pri tem pride do velikih razlik med bencinskim in električnim G2.

Kupci morajo za nakup električnega Taurusa G2 odšteti 105.500 €, za bencinskega pa 89.500 €, kar je 15 % manj. Če električno verzijo uporabljamo skupaj s solarno prikolico, pa so stroški uporabe bencinskega letala precej večji. Za 27-litrski rezervoar moramo odšteti približno 35 €, akumulatorje pa lahko ob sončnem vremenu preko solarne prikolice polnimo zastonj.

V primerjavi z bencinskimi letali so električna glede vzdrževanja veliko manj zapletena (enostavnejši servis, brez motornih olj, manj rezervnih delov ...), vendar pa se akumulatorji po določenem času iztrošijo in jih je treba zamenjati. Ker Li-po akumulatorji na trgu še ne obstajajo dolgo, njihova življenjska doba ni točno določena, vendar pa se ne iztrošijo le po določenem času, ampak tudi po določenem številu ciklov polnjenja in praznjenja. To število lahko s pravilno uporabo akumulatorjev nekoliko povečamo (glej 2.2: Predstavitev Li-po akumulatorjev), gibalo pa naj bi se okrog 2000 ciklov oziroma je odvisno tudi od kvalitete Li-po celic. Ko so te iztrošene, je potrebno kupiti nove. Vsaj zaenkrat pa so te tako drage (cca. 15000 €), da se finančno njihov nakup nikoli ne povrne ( $2000 \times 13,7 \text{ MJ} = 27,4 \text{ GJ}$ , kar je toliko energije, kot jo dobi letalo iz 2500 litrov bencina, ki stane 3300 €).

S tem računom smo pokazali, da je bencinski pogon mnogo prijaznejši z ekonomske plati. Pojavi pa se vprašanje, ali bo kdaj električni pogon stroškovno ugodnejši od bencinskega. Tukaj je pomembno upoštevati, da se v industriji ne razvijajo le električni pogoni, ampak da nastajajo tudi boljši bencinski sklopi z boljšim izkoristkom. Zato menimo, da se do (morebitnega) velikega preboja shranjevanja električne energije na tem področju ne bo veliko spremenilo.

Zmotno je tudi razmišljanje, da je shranjevanje električne energije v akumulatorje povsem ekološko. Ob tem se je potrebno vprašati, kje dobimo večino električne energije. Seveda obstajajo okolju prijazne elektrarne (hidro, vetrne, sončne), vendar večino električne energije še vedno proizvedemo s pomočjo fosilnih goriv. Izkoristek termoelektrarn pa je vseeno bistveno večji kot pri motorjih na notranje izgorevanje. Okvirno lahko rečemo, da pri proizvodnji električne energije porabimo tretjino manj fosilnih goriv.



## 6 ZAKLJUČEK

Kljub razočaranju zaradi neuspele ekstrapolacije je dobro to, da smo ugotovili, da je G2 v vseh ozirih glede na model precej učinkovitejši. Če bi se morali ravnati po izsledkih modela, električnih letal danes še ne bi bilo.

Naša motivacija pri poskusih in zbiranju podatkov je bila velika, saj nas je izbrana tema res zanimala. V raziskovalni nalogi smo tudi dobro spoznali vse težave, ki pestijo današnje razvijalce električnih letal. Videli smo, da je letalstvo glede na to, koliko dejavnikov ima nanj pomemben vpliv, prava znanost. Veseli smo novega znanja in izkušenj, ki smo si jih z izdelavo raziskovalne naloge nabrali.

Kljub temu da smo se v raziskovalni nalogi osredotočili bolj na letala, je nadaljnji razvoj električnih vozil še zelo negotov. Ni nujno, da bo razvoj šel v smeri letal, saj gredo prvi prototipi električnih plovil v smeri helikopterjev. Njihova prednost pred letali je v tem, da za vzlet potrebujejo izredno majhno površino, v zraku so sposobni lebdeti, vendar pa so veliko počasnejši in ne morejo preleteti tako velikih razdalj. Njihov razvoj so pionirsko uspešno začeli v Nemčiji, kjer so pričeli sestavljati modele kvadrokopterjev in iz njih sestavili prvi dvosedežni multikopter. Poimenovali so ga Volokopter (slika 15). Tudi pri njih je zaenkrat največji problem v akumulatorjih, ki omogočajo le 20-minutni polet. V prihodnosti si bodo prizadevali za izboljšanje dolžine poleta do 1 ure, s čimer bi bilo vozilo veliko bolj uporabno. To pa ni edini primer razvijanja plovil. Pri spletnem gigantu Amazonu imajo vizijo o manjših helikopterjih, ki bi manjše poštno pošiljke pripeljali kar kupcu na dom.



*SLIKA 15: VOLOKOPTER Z RAZVIJALCEMA [11]*

Kljub hitremu razvoju električnih helikopterjev imajo zanimive ideje pri največjem proizvajalcu potniških letal družbi Airbus. E-fan je dvosedežno letalo, ki je prvič poletelo leta 2014. Za letalo so uporabili Li-po akumulatorje, ki poganjajo dva elektromotorja s skupno močjo 60 kW. Pri vzletu mu pomagajo tudi kolesa, na katerih so pritrjeni elektromotorji z močjo 6 kW. V prihodnje naj bi razvili še en tip tega letala, ki bi imel 4 sedeže, dodali pa bi mu tudi hibridni motor, ki bi podaljšal čas delovanja motorja. Čas letenja bi se podaljšal na 2 uri in pol, zahvaljujoč hibridnemu pogonu, ki bi med letenjem sam pridobival energijo. E-Fan naj bi se uporabljal za usposabljanje pilotov, proizvodnja pa naj bi se začela leta 2017.

Poleg že letečega E-fana je v fazi razvoja večje potniško letalo E-thrust (slika16). To bi bilo namenjeno za večje število potnikov (približno 90), poganjalo pa naj bi ga 6 električnih in en večji bencinski motor. Njegova prednost bi bila tudi v tem, da bi elektromotorji del porabljene energije za vzlet pri spuščanju pridobili nazaj in akumulator spet delno napolnili.



*SLIKA 16: E-THRUST, [12]*



*SLIKA 17: AIRBUS E-FAN, [13]*

Aerodinamika je pri primerjavi letal zelo neizprosna, še posebej težko je zagotoviti ustrezno gladkost površine na pomanjšanem modelu. Zato si inženirji danes namesto z vetrovniki v veliki meri že pomagajo z računalniškimi simulacijami. Z izdelavo naloge smo vseeno prišli do odgovorov, ki so nas napeljali v raziskovanje. Po vseh podatkih, ki smo jih zbrali, kaže, da predstavlja Taurus G4 ta trenutek mejo za električna letala. Torej, letenje z elektriko je mogoče, vendar za omejeno število potnikov, čas leta je omejen na približno 2 uri, maksimalen dolet pa je okrog 300 km. Kljub vsem tem specifikacijam je Taurus G4 le prototip, ki zaradi težavnosti upravljanja ni primeren za prodajo na tržišču. Zadovoljivega finančnega izračuna zaradi dragih akumulatorjev ni, čeprav je cena električne energije in vzdrževanja nižja. Električni pogon pri jadralnih letalih je bolj smiseln, saj se čas leta ob ugodnih pogojih za jadranje zelo podaljša.

## 7 POVZETEK

Poleg električnih vozil postajajo vse zanimivejša in dostopnejša tudi električna zračna plovila. Za sedaj gre predvsem za manjše modele letal in kvadrokopterje na daljinsko upravljanje, pojavljajo pa se že prvi prototipi letal za prevoz ljudi. Zanimalo nas je, ali današnja tehnika že dopušča izdelavo električnih letal za prevoz potnikov in kje so meje. Kot izkušeni modelarji smo že imeli svoj model Graupner Rookie S, jadralno letalo, ki se z električnim pogonom dvigne in nato jadra. Model je po obliki in načinu pogona zelo podoben Pipistrellovemu Taurusu G2, prvemu električnemu jadralnemu letalu za dve osebi. Tako smo prišli na idejo, da bi poskuse in meritve izvajali na modelu in potem fizikalne količine ekstrapolirali na večji Taurus G2. Ob dovolj dobrem ujemanju bi morda v nadaljevanju lahko odgovorili na katero od zastavljenih vprašanj. Ker glavno oviro pri preboju električnih vozil predstavljajo akumulatorji za shranjevanje električne energije, smo se posebej posvetili temu področju. Spraševali smo se, ali bi letala na električni pogon z dvakrat učinkovitejšimi akumulatorji že pomenila grožnjo bencinsko gnanim. Tako smo izvedli vrsto meritev z modelom in določili porabo energije na kilometer prevožene poti. Ko smo preko sile upora izvedli ekstrapolacijo na večji Taurus G2, smo dobili 1000-krat večjo energijo. Dejanski podatki pa kažejo, da Taurus G2 porabi samo 134-krat več energije na kilometer. Razlog za neujemanje je v aerodinamiki, ki zahteva tako geometrijsko kot dinamično podobnost letal, česar pa nismo mogli zagotoviti. Ugotovili smo tudi, da vsi Taurusovi akumulatorji shranijo toliko energije, kot jo premore pol litra bencina. Če upoštevamo še izkoristek motorjev, se številka popravi na slaba dva litra. Torej tudi dvakrat učinkovitejši akumulatorji še ne bi prinesli konkurenčnosti glede na bencin. Poleg tega so energijsko najbolj učinkoviti akumulatorji zaenkrat še tako zelo dragi, da se njihova uporaba glede na ceno nikoli ne izplača. Ima pa električni pogon vrsto prednosti pred motorji na notranje izgorevanje in vsaka izboljšava na tem področju bo pomenila večjo razširjenost tako kopenskih kot zračnih električnih vozil.

## **8 ZAHVALA**

Na koncu se morava zahvaliti vsem, ki so nama pri raziskovalni nalogi pomagali. Posebna zahvala gre seveda najinemu mentorju Petru Jevšenaku, univ. dipl. inž. fizike, ki je imel takoj posluh za najino izbrano temo, potem pa nama je pri delu zelo pomagal in naju ves čas spodbujal. Hvaležna sva tudi najinima družinama za vso podporo.

## 9 LITERATURA IN VIRI

- [1] Mohorič, A., Babič, V. 2013. Fizika 2. Učbenik za fiziko v 2. letniku gimnazij in štiriletnih strokovnih šol. Mladinska knjiga Založba, d.d., Ljubljana
- [2] Karner, P. 2006. Teorija letenja. Učbenik za pilote.  
<http://peterkarner.webs.com/Teorija%20letenja.pdf>, 18. 2. 2015
- [3] Kapun, A., 2011. Diplomsko delo. Litij-polimerna akumulatorska baterija za električno vozilo. Univerza v Mariboru. Fakulteta za strojništvo.
- [4] [http://sl.wikipedia.org/wiki/Slika:Sile\\_letala.svg](http://sl.wikipedia.org/wiki/Slika:Sile_letala.svg), 15. 2. 2015
- [5] <http://www.modelarstvo.si/aerodinamika/5.bernoullijeva.teorija.in.vzgon.html>, 14. 2. 2015
- [6] <http://www.pipistrel.si/plane/taurus-electro/technical-data>, 22. 2. 2015
- [7] <http://www.evhangar.com/aircraft/production-aircraft/pipistrel-taurus-electro-g2/>, 13. 2. 2015
- [8] [http://www.technologicvehicles.com/en/green-transportation-news/815/pipistrel-met-au-point-un-ovni-electrique-22#.VMY4H\\_7F8YM](http://www.technologicvehicles.com/en/green-transportation-news/815/pipistrel-met-au-point-un-ovni-electrique-22#.VMY4H_7F8YM), 14. 2. 2015
- [9] <http://www.pipistrel.si/plane/taurus-electro/gallery>, 12. 1. 2015
- [10] <http://www.pipistrel.si/plane/taurus-electro/overview>, 12. 1. 2015
- [11] <http://presse.karlsruhe.de/db/meldungen/wirtschaft/volocopter.html>, 13. 2. 2015
- [12] <http://www.dieselaer.com/news/2014/05/03/will-airbus-e-thrust-and-voltair-concepts-lead-civil-aviation-towards-hybrid-and-all-electric-airliners/>, 14.2.2015
- [13] <http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/elektro-flugzeuge-von-airbus-spannung-in-der-luft-1.1943813>, 14. 2. 2015