

## საჰაერო ხრახნი გაზრდილი ენერგოეფექტურობით და შემცირებული ხმაურით

ნ. ტაბატაძე, ბ. მაზანიშვილი, ა. მაისურაძე

საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი, ქეთევან დედოფლის გამზირი, 16,  
0103, თბილისი, საქართველო

### აბსტრაქტი

თანამედროვე ელექტრულ ვერტიკალური აფრენის და დაფრენის (eVTOL) მრავალროტორიან საფრენ აპარატებში ფრენისათვის საჭირო ძირითად აგრეგატს საჰაერო ხრახნი წარმოადგენს და შესაბამისად აპარატის ბორტზე არსებული ელექტროენერჯის ძირითადი ნაწილი მათ მოქმედებაში მოყვანას ხმარდება. ასეთი სახის აპარატებში ერთ-ერთ მთავარ პრობლემას წარმოადგენს ფრენის დროის ხანგრძლივობის სიმცირე, რომელიც დაახლოებით 20-30 წუთს შეადგენს და ასევე ამ აპარატების მიერ წარმოქმნილი ხმაური. აღნიშნული ორივე პრობლემა პირდაპირ კავშირშია საჰაერო ხრახნების ეფექტურ ფუნქციონირებასთან.

სტატიაში წარმოდგენილია თანამედროვე საჰაერო ხრახნების კონსტრუქციის გეომეტრიული ცვლილებებით მიღწეული დადებითი ეფექტები და მათი გავლენა საფრენი აპარატების ტექნიკურ მონაცემებზე.

პრაქტიკაში ფართოდ გავრცელებული საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციის **ბაზაზე** შემუშავდა მრავალი სხვადასხვა სახის საჰაერო ხრახნის კონცეპტუალური კონსტრუქცია, რომლებზეც განხორციელდა როგორც სიმულაციური ასევე ექსპერიმენტული გამოცდები. სამეცნიერო კვლევებისა და ანალიზის შედეგად გამოვლენილი ყველაზე პერსპექტიული კონცეფციის საჰაერო ხრახნით მიიღწევა 15%-მდე გაუმჯობესებული ენერგოეფექტურობა და 5-7 dB შემცირებული ხმაური.

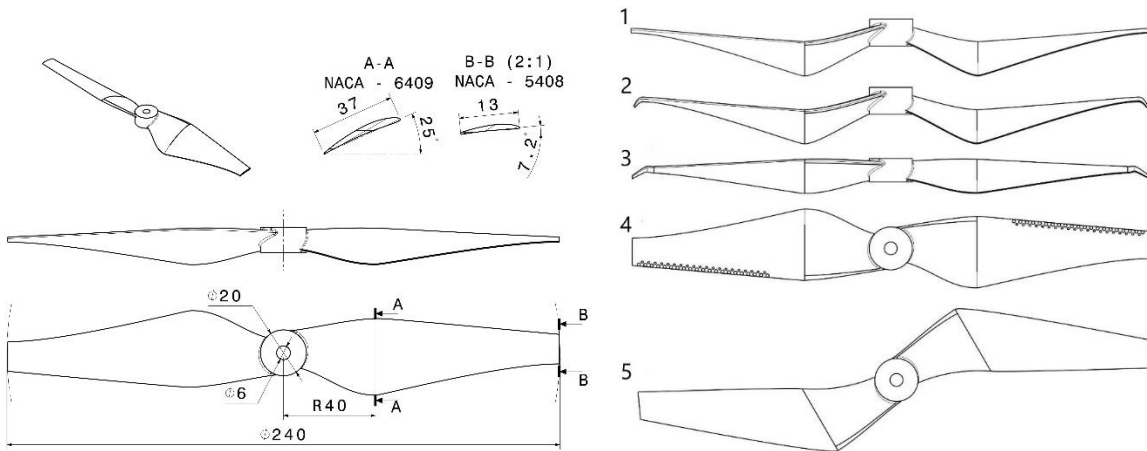
*საკვანძო სიტყვები: საჰაერო ხრახნი; დრონი; ენერგოეფექტურობა; ხმაური.*

### ძირითადი ნაწილი

საჰაერო ხრახნზე ისევე როგორც თვითმფრინავის ფრთაზე მიმდინარეობს მთელი რიგი აეროდინამიკური მოვლენებისა, რომელთაგან ერთ-ერთ მნიშვნელოვანს ჰაერის ნაკადის დაგრიგალება წარმოადგენს. ძირითადად გრიგალები წარმოიქმნება ფრთოვანას ბოლოებში და მის უკანა კიდეზე, ამას კი უარყოფითი გავლენა აქვს საჰაერო ხრახნის ეფექტურ მახასიათებლებზე. კერძოდ, ჰაერის ნაკადების გრიგალური მოძრაობის გამო მცირდება საჰაერო ხრახნის წევის ძალა, იზრდება მისი აეროდინამიკური წინაღობა და შესაბამისად იზრდება წარმოქმნილი ხმაურის დონეც. აქედან გამომდინარე ნათლად ჩანს, რომ საჰაერო ხრახნის ენერგოეფექტურობის გასაზრდელად და ხმაურის შესამცირებლად ერთ-ერთ მნიშვნელოვანი მიმართულება საჰაერო ხრახნის ძირითად უბნებზე აგრიგალელებული ჰაერის ნაკადების შემცირება და კონტროლი წარმოადგენს.

ამ მიზნის მისაღწევად ავარჯიეთ დღესდღეობით ფართოდ გავრცელებული საჰაერო ხრახნის მოდელის გეომეტრია და მოვახდინეთ მისი 3 განზომილებიანი მოდელის დაპროექტება.

საჰაერო ხრახნის მოდელი წარმოადგენს 24 სმ დიამეტრის მქონე ფიქსირებულ ფრთოვანებიან კონსტრუქციას რომელის გეომეტრიული პარამეტრები ნახ.1-ზე.



ნახ.1: კვლევისთვის შერჩეული პრაქტიკაში ფართოდ გავრცელებული საჰაერო ხრახნის მოდელი და მისი სახეცვლილი კონცეფციები 1) რევერსული თოლიისებრი; 2) რევერსული თოლიისებრი პროპლეტებით; 3) ფრთოვანა ოპტიმიზებული პროპლეტებით; 4) ტურბულიზატორებიანი ფრთოვანას წინა კიდეით; 5) ფრთოვანების ისრისებურობით (swept).

აღნიშნულ საჰაერო ხრახნის მოდელებზე განხორციელდა აღნიშნული კონსტრუქციული ცვლილებები, მაგრამ შენარჩუნებულ იქნა საჰაერო ხრახნის ყველა ძირითადი და გეომეტრიული პარამეტრი (ფრთოვანას გეომეტრიული ფორმა, ხრახნის დიამეტრი, ფრთოვანას შეტევის კუთხეები). შედეგად მივიღეთ 15-ზე მეტი სახის საჰაერო ხრახნთა კონცეპტუალური კონსტრუქციები, რომელთაგანაც შემდგომ ეტაპზე კომპიუტერული სიმულაციების გზით გამოვლინდა მათგან ყველაზე პერსპექტიული 5 საუკეთესო მახასიათებლის მქონე კონსტრუქცია (ნახ.1).

აღნიშნულ პერსპექტიულ საჰაერო ხრახნებზე განხორციელდა მაღალი სიზუსტის როგორც კომპიუტერული სიმულაციები, ასევე ექსპერიმენტულ-კვლევითი გამოცდები.

კომპიუტერული სიმულაციები ჩატარდა ციფრულ გამოთვლით პროგრამა Ansys-ის Fluent მოდულში. გამოთვლები ტარდებოდა გარემოს შემდეგი პარამეტრებით: აირის სიმკვრივე 1.225 კგ/მ<sup>3</sup>, ტემპერატურა 288 კელვინი, სიბლანტე 1.789e-5 კგ/მ-წ. ხრახნის ბრუნვის სიჩქარე 6000 ბრ/წთ. სიმულაციისას ძირითად გასაზომ პარამეტრებს წარმოადგენდა: წევის ძალა [N] - ნიუტონი, მაბრუნე მომენტი [Nm]-ნიუტონ მეტრი და ხმაურის დონე [dB].

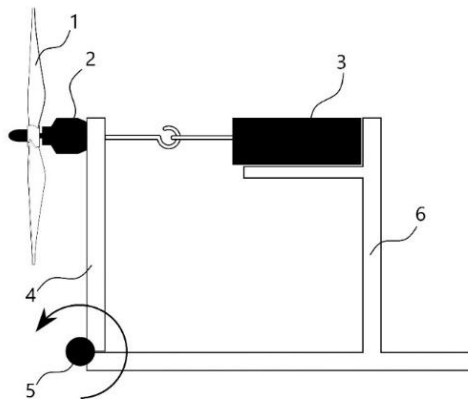
**სიმულაციური გამოცდები** დაიგეგმა შემდეგნაირად: გარემო, რომელის ცენტრშიც ხრახნია მოთავსებული წარმოადგენს კუბს  $x=2$  მ,  $y=2$  მ,  $z=3$  მ გაზარიტებით. ხრახნის გარშემო შეიქმნა 40 სმ დიამეტრის 5 სმ სისქის ცილინდრული ფორმის ჰაერის ბრუნვის ზონა, სადაც საჰაერო ხრახნი გაჩერებულია და მის გარშემო ბრუნავს ამ ზონაში არსებული აირი.

საჰაერო ხრახნების კომპიუტერული სიმულაციების შედეგები ნაჩვენებია ცხრილი N1.

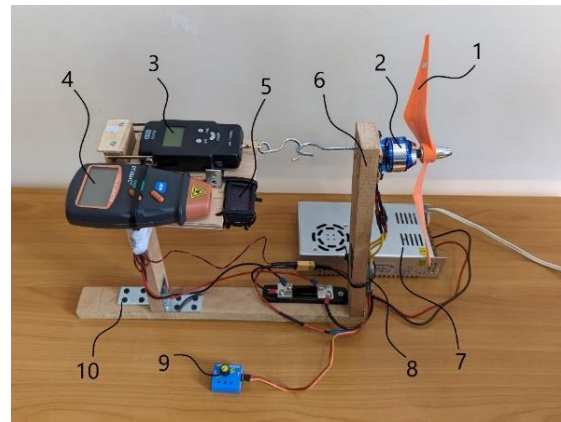
ცხრ. N1 საჰაერო ხრახნების კომპიუტერული სიმულაციები

ბრ/წთ	ტრადიციული			რევერსული თოლიისებრი			ფრთოვანების ისრისებურობით		
	Nm	N	dB	Nm	N	dB	Nm	N	dB
6000	0.095	5.2	100	0.068	4.3	98	0.148	6.7	98
	რევერსული თოლიისებრი პროპლეტებით			ოპტიმიზებული ბოლოებით			ტურბულიზატორებით		
	Nm	N	dB	Nm	N	dB	Nm	N	dB
6000	0.061	3.9	96	0.09	5	105	0.091	5.1	92

**ექსპერიმენტული კვლევების** ჩასატარებლად დაპროექტდა და დამზადდა სპეციალური დანადგარი, რომელიც აღიჭურვა მაღალი სიზუსტის ციფრული გამზომი ხელსაწყოებით: ტაქომეტრი DT-2234C, გაზომვის სიზუსტე 2.5 ბრ/წთ; დინამომეტრი, გაზომვის სიზუსტე 0.05 N; ვოლტ-ამპერ მეტრი, გაზომვის სიზუსტე 0.1 V და 0.01 A; კვების ბლოკი 12V და 30A; სერვო ტესტერი (ბრუნვის რეგულატორი); მუდმივი დენის ელექტრული ძრავი Exceed RC Rocket 3010-1190kv; ელექტრონული სიჩქარის კონტროლერი YEP ESC 40A (2~6S).



A



B

ნახ.2. A - საჰაერო ხრახნების პარამეტრების გამოსაცდელი სტენდის პრინციპული სქემა. 1-საჰაერო ხრახნი; 2-ელექტრო ძრავა; 3-დინამომეტრი; 4-მბრუნავი ძელი; 5-სახსარი; 6-სტენდის კარკასი. B - საჰაერო ხრახნების გამოსაცდელი სტენდი. 1-საჰაერო ხრახნი; 2-ელექტრო ძრავა; 3-დინამომეტრი; 4-ტაქომეტრი; 5-ვოლტ-ამპერმეტრი; 6-მბრუნავი ძელი; 7-კვების ბლოკი; 8-ძრავის სიჩქარის კონტროლერი; 9-ძრავის ბრუნთა რიცხვის რეგულატორი (სერვო კონტროლერი); 10-სტენდის კარკასი.

სტენდი მოქმედებს შემდეგნაირი პრინციპით: საჰაერო ხრახნი ძრავთან ერთად დამაგრებულია ძელზე, რომელიც სახსრულად არის შეერთებული სტენდის დანარჩენ კარკასთან. თავად ძელი კავით დაკავშირებულია დინამომეტრთან. საჰაერო ხრახნის მოქმედებაში მოსვლის შემდგომ მიღებული წევის ძალა ცდილობს ძელის გადაადგილებას ნახაზზე ნაჩვენები ბრუნვის მიმართულებით (ნახ.2), რის შედეგად იჭიმება დინამომეტრის კავი

და გვიჩვენებს წვევის ძალას. ხრახნის ბრუნთა რიცხვის გასაზომად სტენდს გააჩნია თარო სადაც დამაგრებულია ტაქომეტრი და იგი საჰაერო ხრახნზე დამაგრებული ამრეკლი ლენტის დახმარებით გვამღევს ბრუნთა რიცხვის მნიშვნელობას. მოხმარებული ელექტრული სიმძლავრის გასაზომად სტენდის ელექტრულ წრედში ჩართულია ვოლტ-ამპერ მეტრი.

ექსპერიმენტული გამოცდებისთვის გამოსაცდელი ხრახნების დამზადება განხორციელდა 3დ პრინტერზე.

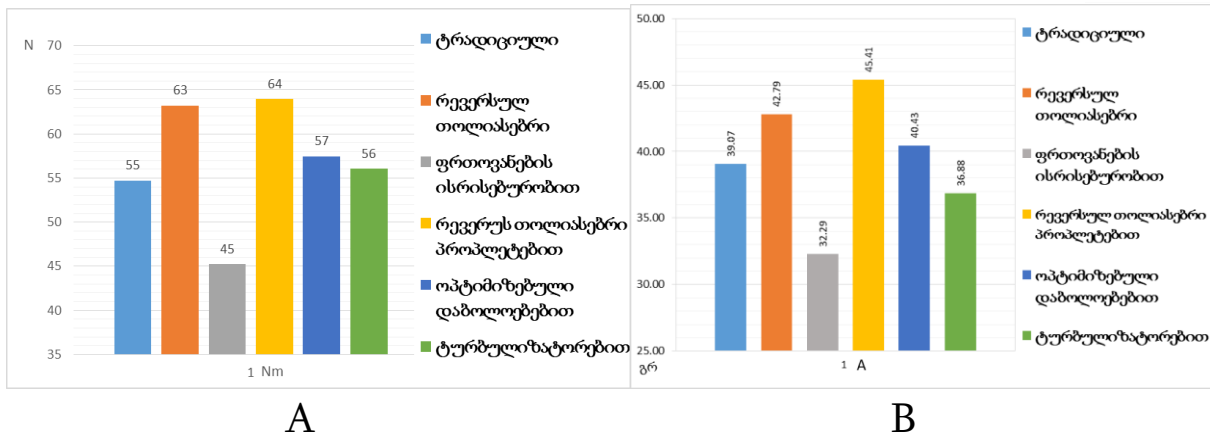
სასტენდო გამოცდები ტარდებოდა 4 განსხვავებულ ბრუნვის სიჩქარეზე: 2000; 4000; 6000; და 8000 ბრ/წთ. იზომებოდა და ფიქსირდებოდა შემდეგი პარამეტრები: წვევის ძალა F; მოხმარებული დენის ძალა A და ძაბვა V; ხმაურის დონე დეციბელებში (dB). ექსპერიმენტების ჩატარებისას ელექტრული ძაბვა V იყო მუდმივი 12 V. სასტენდო ექსპერიმენტების შედეგები მოყვანილია ცხრილში N2.

ცხრ. N2 სასტენდო ექსპერიმენტების შედეგები

ბრწთ/RPM	ტრადიციული			ოპტიმიზებული პროპლეტებით			ტურბულიზატორებით		
	A	F	dB	A	F	dB	A	F	dB
2000	0.3	20	46	0.2	35	45	0.3	50	43
4000	1.9	145	54	1.8	135	50	2	150	50
6000	6.3	335	57	5.8	305	57	6.4	330	57
8000	15.1	590	69	14.1	570	68	16	590	68

ბრწთ/RPM	ფრთოვანების ისრისებურობით			რევერსულ თოლისებრი პროპლეტებით			რევერსულ თოლისებრი		
	A	F	dB	A	F	dB	A	F	dB
2000	0.3	60	40	0.2	40	42	0.2	20	44
4000	2.8	205	53	1.5	120	50	1.5	110	50
6000	8.9	400	59	4.4	230	55	4.5	255	53
8000	22.3	720	68	9.8	445	64	10.4	445	67

ზემოთ აღნიშნული სიმულაციური და ექსპერიმენტული კვლევებიდან გამოყვავით საჰაერო ხრახნების ენერგოეფექტურობის მახასიათებელი (ნახ.5). სიმულაციების შემთხვევაში ეს იყო ერთ Nm მამბრუნ მომენტზე მოსული წვევის ძალა N, ხოლო ექსპერიმენტებისას 1 ამპერი მოხმარებული დენით მიღებული წვევის ძალა F. უნდა აღინიშნოს რომ სიმულაციების და ექსპერიმენტების შედეგები პროპორციულად თითქმის იდენტურად გადანაწილდა კონსტრუქციის ტიპებზე, რაც ფაქტიურად ნათლად გამოჩნდა ნახ.3 ზე მოყვანილ გრაფიკებზე.

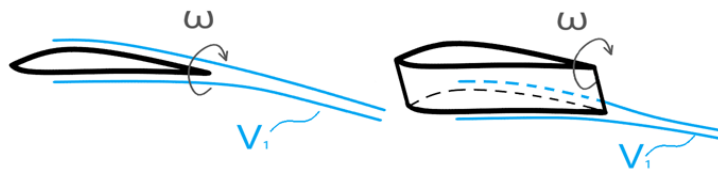


ნახ.3: საჰაერო ხრახნების ენერგოეფექტურობის მახასიათებლების გრაფიკები. A - კომპიუტერული სიმულაციების შედეგები, 1 Nm (ნიუტონ მეტრი) მომენტის შედეგად მიღებული ამწევი ძალა N ნიუტონი; B - სასტენდო ექსპერიმენტების შედეგები, 1A (ამპერი) ელექტრული დენის შედეგად მიღებული წევის ძალა F.

როგორც ვხედავთ კვლევების შედეგად გამოვლინდა რევერსულ თოლიისებრი საჰაერო ხრახნის კონსტრუქცია, რომელსაც ფართოდ გავრცელებულ ხრახნთან შედარებით 15%-მდე გაუმჯობესებული ენერგოეფექტურობის მახასიათებელი აქვს. ეს კი ნიშნავს იმას, რომ ასეთი ხრახნებით აღჭურვილი საფრენი აპარატი შეძლებს 15% გაზარდოს ფრენის ხანგრძლივობა.

გამოკვლეული იქნა 2 სახის რევერსულ თოლიასებრი კონსტრუქცია, პროპლეტებით და პროპლეტების გარეშე. ორივე მათგანმა გაუმჯობესებული კუთრი მახასიათებლები გვიჩვენეს დანარჩენ ხრახნებთან შედარებით, თუმცა პროპლეტების მქონე ხრახნმა შედარებით კიდევ უფრო მაღალი ენერგოეფექტურობა და შემცირებული ხმაური აჩვენა.

აღნიშნული ხრახნის მაღალ ენერგოეფექტურობას განაპირობებს რამდენიმე ფაქტორი: ფრთოვანას ბრუნვის ღერძისადმი დახრილი დიჰიდრალური ორიენტაციის წყალობით მცირდება ბოლოებში წარმოქმნილი ჰაერის ნაკადის გრიგალური ზონების გავლენა დანარჩენ ფრთოვანას ზონებზე. ეს შეგვიძლია ვივარაუდოთ იქიდან რომ ფრთოვანას ბოლო და შესაბამისად გრიგალის წარმოქმნის კერა მდებარეობს ფრთოვანას ძირითადი ნაწილიდან მოშორებით ზედა სიბრტყეში (ნახ.4), ამიტომ აგრიგალეზული ჰაერის ნაკადის გავლენა ფრთოვანას მიერ დაცვრებულ ნაკადზე შედარებით მცირეა. ეს კი ამცირებს საჰაერო ხრახნის საერთო ინდუქციურ წინააღობას.



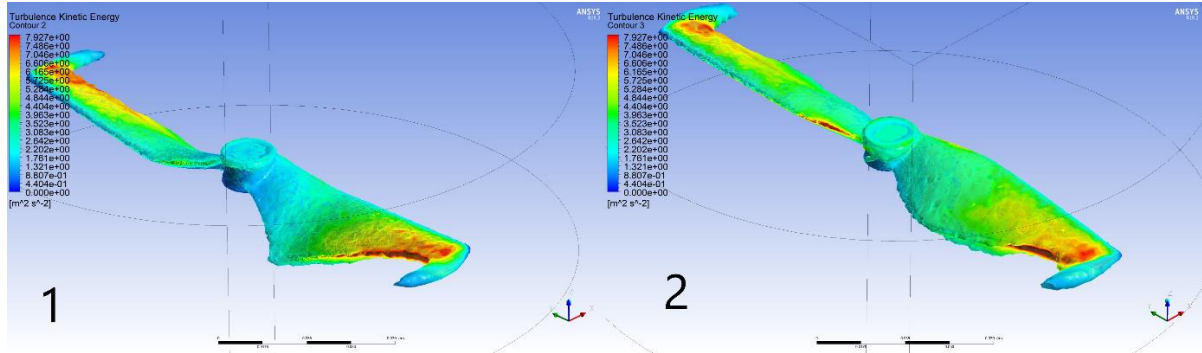
ნახ.4: ფრთოვანას ბოლოში წარმოქმნილი გრიგალის გავლენა ფრთოვანას უკან დაცვრებულ ჰაერის ნაკადზე.  $\omega$ -გრიგალური ნაკადის ტრანექტორია;  $V_1$  - დაცვრებული ჰაერის ტრანექტორია.

ნახ.5-ზე ნაჩვენებია ტურბულენტური ჰაერის მოცულობებიდან შეგვიძლია ვივარაუდოთ რომ პროპლეტებიან რევერსულ თოლიისებრი საჰაერო ხრახნის შემთხვევაში:

- ტურბულენტური ზონა გაგრძელებულია ფრთოვანას გარდატეხის ნაწილში და მიისწრაფვის ცენტრისკენ.



- აქედან გამომდინარე შეგვიძლია ვთქვათ რომ ფრთოვანას სპეციფიური ფორმა ახდენს ტურბულენტური ზონის ლოკალიზებას და
- უზიძგებს მას ბრუნვის სიბრტყის ნაკლებად საპასუხისმგებლო, შედარებით ნელი ჰაერის სიჩქარის მქონე ზონაში
- ეს კი თავის მხრივ ამცირებს საერთო აეროდინამიკურ წინაღობას და შესაბამისად ხმაურს.



ნახ. 5: სიმულაციის შედეგად მიღებული ტურბულენტური ჰაერის მასები ხრახნის გარშემო, ფერთა გრადიენტით დატანილია ტურბულენტობის კინეტიკური ენერჯის სიდიდე ამ ზონებში. 1) რევერსულ თოლიისებრი ხრახნი პროპლეტებით; 2) ტრადიციული საჰაერო ხრახნი.

### დასკვნა:

საჰაერო ხრახნების ენერგო ეფექტურობის გაუმჯობესებისა და ხმაურის შემცირებისთვის გამოიკადა არაერთი ცნობილი და ახალი კონცეპტუალური კონსტრუქცია, რომელთაგან საუკეთესო შედეგები რევერსულ-თოლიასებრი საჰაერო ხრახნის კონსტრუქციამ მოგვცა. აღნიშნულმა ხრახნმა მიუხედავად იმისა რომ ნორმალურ ხრახნთან შედარებით ოდნავ შემცირებული წევის ძალა აჩვენა, სამაგიეროდ შემცირებული აეროდინამიკური წინაღობის გამო საგრძნობლად, თითქმის 15%-მდე გაუმჯობესდა კუთრი წევის ძალა და შესაბამისად ენერგოეფექტურობაც. აღნიშნულმა კონცეპტუალური კონსტრუქციის საჰაერო ხრახნმა პრაქტიკულად გამოიწვია ასევე აკუსტიკური მახასიათებლის გაუმჯობესებაც და ხმაურის დონემ 5 დეციბელით დაიკლო.

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე შეიძლება დავასკვნათ, რომ eVTOL ტიპის საფრენი აპარატებში საჰაერო ხრახნების გეომეტრიული ფორმების და ზომების ოპტიმიზაციის შედეგად შესაძლებელია მათი ენერგო ეფექტურობის მნიშვნელოვანი გაზრდა და ხმაურის საგრძნობი შემცირება.

მომავალში შესაძლებელია დამატებითი კვლევები ჩატარდეს დიჰიდრალური და შეტევის კუთხეების მიმართაც და მათი სათანადო ოპტიმიზაციის შედეგად მოხდეს საჰაერო ხრახნის ენერგოეფექტურობის შემდგომი გაზრდა.

### მადლიერება:

კვლევა ხორციელდება შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ფინანსური მხარდაჭერით [PHDF-19-4077, საჰაერო ხრახნების ეფექტურობის ამაღლება მათი გეომეტრიული ფორმების ოპტიმიზაციის გზით].

**გამოყენებული ლიტერატურა:**

- 1) J. P. Sullivan, L. K. Chang, C. J. Miller. (1981) SAE Transactions. The Effect of Proplets and Bi-Blades on the Performance and Noise of Propellers
- 2) J. H. Xu; W. P. Song; X. D. Yang. (2011) ResearchGate article. Effects of Proplet on Propeller Efficiency
- 3) Richard T. Whitcomb. (1980) NACA research memorandum. A description of the design of highly swept propeller blades
- 4) E.L. Houghton; P.W. Carpenter; Steven H. Collicott; Daniel T. Valentine. (2015) Aerodynamics for Engineering Students
- 5) N. SLOSAR. (2021) AVIANS TO AIRPLANES: BIOMIMICRY IN FLIGHT AND WING DESIGN
- 6) ოთარ კემულარია, თამაზ ოზგაძე. (2022) უპილოტო საფრენი აპარატების ავტომატიზებული პროექტირების საფუძვლები (მონოგრაფია)
- 7) Завалов О.А. Башаров Е.А. (2019) Конструкция лопастей несущих и рулевых винтов

## Propeller with High Efficiency and Reduced Noise Emission

N. Tabatadze<sup>1</sup>, B. Mazanishvili<sup>1</sup>, A. Maisuradze<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Georgian Aviation University, 16 Ketevan Dedofli Avenue, 0103, Tbilisi, Georgia

### Abstract

In modern electronic vertical take-off and landing (eVTOL) multi-rotor aircraft, the air propeller is the main unit required for flight, and therefore the main part of the electricity available on board the machine is used for their operation. One of the main problems with such machines is the short duration of the flight, which is about 20-30 minutes, and the high noise generated by them. These two important problems of these machines, short flight duration, and environmental noise pollution, are directly related to the efficient operation of propellers.

The article presents the positive effects achieved by geometrical changes in the design of modern propellers and their impact on the technical characteristics of aircraft. Based on the widely used propeller design in practice, we have developed 5 different conceptual propeller designs and both simulation and experimental studies were carried out on them. Research shows that a promising propeller design can achieve up to 15% improved energy efficiency and 5-7 dB reduced noise.

**Keywords:** *propeller; drone; energy efficiency; noise pollution.*