XÁC ĐỊNH MỘT SỐ ĐẶC TÍNH HOẠT ĐỘNG CỦA ĐỘNG CƠ PHẢN LỰC ĐIỆN THEO PHƯƠNG PHÁP BÁN THỰC NGHIỆM

Mai Duy Phương*

Tóm tắt: *Đối với các loại động cơ cánh quạt nói chung, những đặc tính lực đẩy – tốc độ bay theo công suất hoặc đặc tính hiệu suất theo tốc độ thay đổi nhiều trong quá trình làm việc và có vai trò quan trọng trong quá trình tính toán thiết kế khí cụ bay. Bài báo trình bày phương pháp xây dựng và tính toán một số đặc trưng làm việc cơ bản của động cơ phản lực điện bằng phương pháp lý thuyết động lượng và một số thông số thử nghiệm được nhà sản xuất cung cấp. Kết quả của bài toán này hỗ trợ công tác thiết kế hệ thống trong giai đoạn đầu, tiếp cận kết quả gần thực tế hơn trước khi đưa ra quyết định chế thử mẫu hoặc mua theo sản phẩm bán sẵn.*

Từ khóa: Đặc tính hoạt động; Động cơ phản lực điện; Khí cụ bay.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong khoảng thời gian 10 năm trở lại đây, sự phát minh loại nguồn pin Lithium Polymer (Li-Po) với tính năng khác biệt với các loại nguồn pin trước đó làm cho xu hướng công nghệ ứng dụng thay đổi nhiều và phổ biến nhanh chóng, rộng rãi. Từ đó xuất hiện nhiều sản phẩm, thiết bị, phương tiện sử dụng pin Li-Po trong đó có cả các loại khí cụ bay (KCB) cỡ nhỏ trang bị hệ thống động lực điện, chúng ưu việt hơn so với động cơ đốt trong hoặc động cơ turbine phản lực về nhiều tiêu chí: công nghệ chế tạo, vận hành, bảo quản, tin cậy, ổn định, an toàn, chi phí.

Việc sử dụng khí KCB không người lái mang vũ khí tự sát (SUAV) ngày càng phổ biến do khả năng tấn công chính xác nhờ ứng dụng các công nghệ hiện đại, chi phí thấp, ít gây tổn thất về nhân mạng so với việc dùng máy bay có người điều khiển. Đa số các loại SUAV có cấu tạo kiểu máy bay cánh bằng, điều khiển từ xa, sử dụng 1 động cơ cánh quạt điện phía đuôi (hình 1a). Tuy nhiên, do sử dụng động cơ công suất nhỏ nên hệ số lực đẩy/trọng lượng (TW) của KCB khá thấp (khoảng từ 0.25 đến 0.5) nên tốc độ bay chậm và để tạo được sơ tốc ban đầu đảm bảo cho KCB đủ lực nâng cần phải có thiết bị phóng – đây là nhược điểm của loại KCB này.

Động cơ phản lực điện (PLĐ – electric ducted fan) có tính năng khác so với động cơ cánh quạt. Do công suất lớn, kích thước nhỏ nên hệ số TW khá cao (2 đến 2.5) nên động cơ PLĐ cũng phù hợp trang bị cho một số loại KCB tốc độ trung bình, cự ly bay ngắn và khắc phục nhược điểm so với loại KCB sử dụng 1 động cơ cánh quạt điện, đó là yêu cầu sử dụng thiết bị phóng.



a. *b.*

Hình 1. *Một số loại động cơ điện được sử dụng cho KCB.*

Đa số nhà sản xuất động cơ PLĐ chỉ đưa ra những thông số sau: điện áp làm việc, công suất cực đại, lực đẩy cực đại, kích thước hình học. Tuy nhiên, động cơ PLĐ có nhiều đặc tính phụ thuộc vào tốc độ chuyển động nên cần phải xác định các đặc tính này mới có thể thiết kế, tính toán bài toán động lực học chuyển động của KCB. Nhiều công trình đã xây dựng và giải bài toán này theo các phương pháp khác nhau: lý thuyết động lượng, phần tử lá cánh, lý thuyết xoáy,... [3, 5-7] và các phần mềm ứng dụng CFD [2, 4], EDF fan online. Tuỳ thuộc độ phức tạp của từng phương pháp và các giả thiết để xây dựng bài toán mà độ chính xác của kết quả nhận được cũng khác nhau.

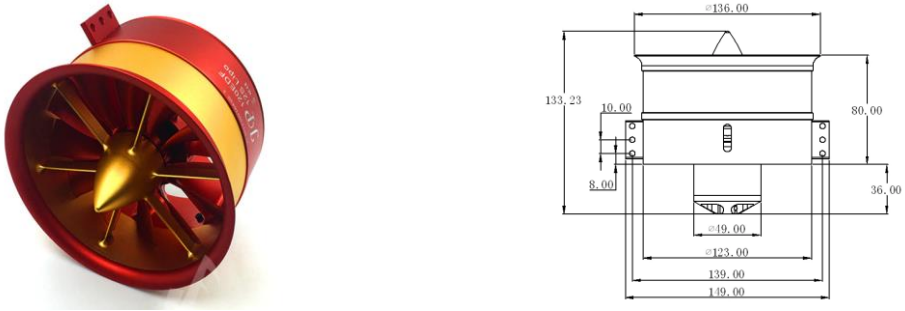
Nội dung bài báo này là xây dựng mô hình tính toán để xác định một số đặc tính đối với một loại động cơ PLĐ trong thực tế theo phương pháp động lượng, kết hợp sử dụng các tham số của nhà sản xuất làm điều kiện biên cho bài toán. Đồng thời có tính đến những hệ số tổn thất thực tế để chính xác hoá kết quả so với việc loại bỏ tổn thất của một số phương pháp khác đã thực hiện. Phương pháp này làm cơ sở tham khảo, lựa chọn động cơ và tính toán trong quá trình thiết kế hệ thống ở giai đoạn sơ bộ đối với một mô hình KCB sử dụng động cơ PLĐ.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH BÀI TOÁN

2.1. Các tham số của bài toán

2.1.1. Các tham số thực tế

Đây là những tham số do nhà sản xuất cung cấp, chúng được đo đạc với động cơ JP120 (hình 2) trên giá đo tĩnh, làm việc trong điều kiện công suất cực đại.



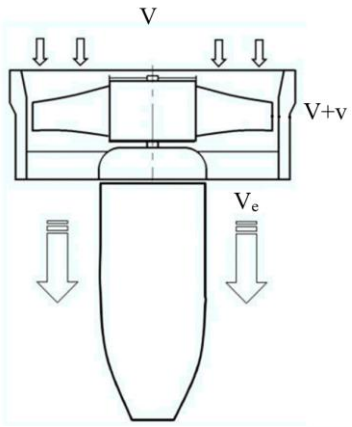
a) Động cơ JP120 *b) Kích thước hình học*

Hình 2. *Động cơ PLĐ JP120.*

- Ký hiệu động cơ: JP120 5060-750KV; Khối lượng: 0.695 kg; Số lá cánh: $n_L = 12$;
- Lực đẩy T (N), điện áp U (V), dòng điện I (A), công suất P (W):
  (72.0 N, 44.4 V, 110 A, 4884 W);
  (83.0 N, 48 V, 125 A, 6000 W);
  (93.0 N, 50 V, 142 A, 7100 W).

Thông số kích thước hình học như hình 2.2
- Diện tích quét cánh quạt: $S_{SA} = 9.424*10^{-3}$ m^2;
- Diện tích mặt cắt cửa hút: $S_{inp} = 14.15*10^{-3}$ m^2;
- Diện tích mắt cắt cửa xả: $S_{out} = 10.0*10^{-3}$ m^2.

Ký hiệu các giá trị tốc độ dòng khí như hình 3:
- Tốc độ KCB so với không khí: V (m/s);
- Tốc độ cảm ứng: v (m/s);
- Tốc độ tại cửa thoát động cơ V_e (m/s);
- Lưu lượng dòng khí: $\dot{m}$ (kg/s).



Hình 3. *Sơ đồ động lực học của dòng khí so với động cơ tại các mặt cắt.*

2.1.2. Các giả thiết và hằng số

- Không khí đi qua động cơ trong điều kiện không chịu nén, không trao đổi nhiệt;
- Mật độ không khí ρ = 1.2 (kg/m^3).

2.2. Bài toán lý thuyết động lượng

Lý thuyết động lượng được xây dựng từ các định luật bảo toàn động lượng, năng lượng, lưu lượng trên cơ sở mô tả sơ đồ động lực học trên hình 3 như sau:

- Phương trình bảo toàn động lượng:

$$T = \dot{m}(V_e - V) \tag{1}$$

- Phương trình bảo toàn năng lượng:

$$P = P_{đc} = T.(V + v) = \frac{1}{2}.\dot{m}V_e^2 - \frac{1}{2}.\dot{m}V^2 \tag{2}$$

- Phương trình bảo toàn năng lượng thực tế:

$$P_{đc} = U.I = P_R + P_{loss} \tag{3}$$

$$P_R = T.(V + v) \tag{4}$$

$$P_{loss} = P_{els} + P_{fan} = \eta_{els}.P_{đc} + \eta_{fan}.v^2 \tag{5}$$

- Phương trình lưu lượng:

$$\dot{m} = \rho.S_{inp}.(V + v) = \rho.S_{out}.V_e \tag{6}$$

Thông thường các công trình nghiên cứu khác[5, 6] sử dụng phương trình bảo toàn năng lượng theo phương trình (2). Tuy nhiên, trên thực tế tổn thất năng lượng của loại động cơ PLĐ khá lớn, do bỏ qua tổn thất năng lượng của thiết bị điện và của dòng khí qua động cơ phương trình (2) sẽ mắc phải nhiều sai số, mặt khác nếu sử dụng phương trình bảo toàn năng lượng thì không sử dụng được định luật bảo toàn lưu lượng. Do vậy, bài báo này thay thế phương trình (2) bằng phương trình bảo toàn năng lượng xác định bởi thực nghiệm thể hiện như phương trình (3) và sử dụng phương trình lưu lượng. Trong đó:

P, $P_{đc}$: Công suất do nguồn điện sinh ra (tổng công suất toàn hệ thống);

P_R: Công suất thực tế của động cơ;

P_{els}: Tổn hao công suất trên hệ thống điện (công suất pin so với công suất trục motor); được xem tỉ lệ bậc nhất với công suất nguồn điện;

P_{fan}: Tổn hao công suất trên cánh quạt (công suất trục motor so với công suất thực tế); được xem tỉ lệ bậc hai với tốc độ dòng khí tại cánh quạt;

η_{els}, η_{fan}: Các hệ số tổn thất công suất trên hệ thống điện và cánh quạt.

Viết lại các phương trình trên được hệ phương trình (HPT) lý thuyết động lượng sau:

$$\begin{cases} T = \dot{m}(V_e - V) \\ P_{đc} = T.(V+v) + P_{loss} = T.(V+v) + \eta_{els}.P + \eta_{fan}.v^2 \\ \dot{m} = \rho.S_{inp}.(V+v) \\ S_{inp}.V_{inp} = S_{out}.V_e \end{cases} \quad (7)$$

HPT trên gồm 4 phương trình, các ẩn số: $\dot{m}$,V_e, v, η_{els}, η_{fan}.

Trong thực tế, giá trị tổn thất của hệ thống điện thường là 0.1 ÷ 0.12 [8, 9], lấy giá trị η_{els} = 0.11, khi đó, giải lại HPT (7) xác định được η_{fan} = 0.135. Đây được xem là các đặc trưng tổn thất của hệ thống trong quá trình tính toán tiếp theo.

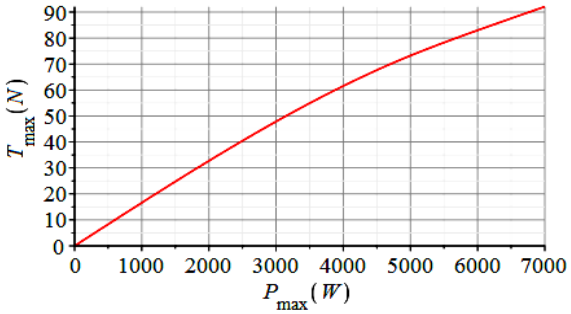
3. PHƯƠNG PHÁP BÁN THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH MỘT SỐ ĐẶC TÍNH HOẠT ĐỘNG CỦA ĐỘNG CƠ PHẢN LỰC ĐIỆN

3.1. Điều kiện biên và sai số của bài toán

3.1.1. Xây dựng phương trình biên

Mục đích xây dựng phương trình biên là xác định đặc tính công suất cực đại, lực đẩy cực đại từ các thông số của nhà sản xuất với tốc độ bay V = 0, làm điều kiện biên của bài toán tiếp theo.

Trong điều kiện P = 0 thì T = 0. Như vậy, ta thiết lập được đặc tính lực đẩy theo công suất theo phương pháp nội suy từ các tham số thực nghiệm.



Hình 4. *Phương trình biên khi V = 0.*

Để thuận tiện trong tính toán, sử dụng đa thức nội suy bậc 2:

$$T_{max} = -0.00000073.P_{max}^2 + 0.01827642.P_{max} \quad (8)$$

Như vậy, từ phương trình biên, có thể xác định công suất và lực đẩy trong điều kiện V = 0 trong mọi giá trị P_{max} (tức là dải công suất cực đại tại các giá trị điện áp khác nhau).

3.1.2. Sai số của bài toán

Đa thức mô tả điều kiện biên (1) chính xác trong những trường hợp lân cận mốc các điểm được lấy từ thực nghiệm, tuy nhiên, nếu ngoài phạm vi thì nghiệm đa thức này

chắc chắn có sai số dẫn đến kết quả HPT (8) không chính xác nữa. Do đó, cần phải có phương pháp hiệu chỉnh lại đa thức nội suy (1) sao cho mọi nghiệm của HPT (8) đều phải thoả mãn trên toàn bộ miền giá trị biên với sai số cho phép. Phương pháp xác định sai số sẽ được giới thiệu trong công trình nghiên cứu sau này của tác giả.

3.2. Phương trình bán thực nghiệm và phương pháp giải

Kết hợp HPT (7) và phương trình (8) nhận được hệ phương trình bán thực nghiệm:

$$\begin{cases} T_{\max} = f(P_{\max}) \\ T = \dot{m}(V_e - V) \\ P_{đc} = T.(V+v) + \eta_{els}.P_{đc} + \eta_{fan}.v^2 \\ \dot{m} = \rho.S_{inp}.(V+v) \\ S_{inp}.V_{inp} = S_{out}.V_e \end{cases} \quad (9)$$

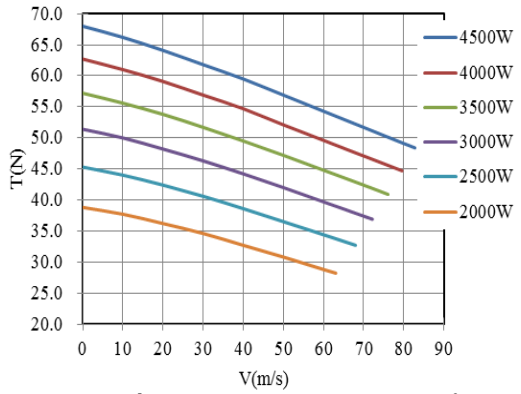
Các biến trong HPT (9): V hoặc T, v, $\dot{m}$, Ve. Tuy nhiên, so với hệ phương trình (7) thì điều kiện đầu vào và biến số khác nhau, mục đích quan trọng nhất đó là cần xác định các hàm T-V(P) tại các giá trị công suất khác nhau, T-P(V) tại các giá trị tốc độ khác nhau.

Phương pháp giải: Trong nhiều bài toán, có thể đưa về dạng hệ phương trình vi phân (giải bằng phương pháp Runge-Kutta) hoặc hệ phương trình vi phân đa biến (giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn). Mỗi phương pháp có ưu nhược điểm riêng nhưng phương pháp sai phân hữu hạn cho sai số đáng kể. Tuy nhiên, do bài toán không quá phức tạp nên tác giả sử dụng phương pháp tính toán đơn giản hơn.

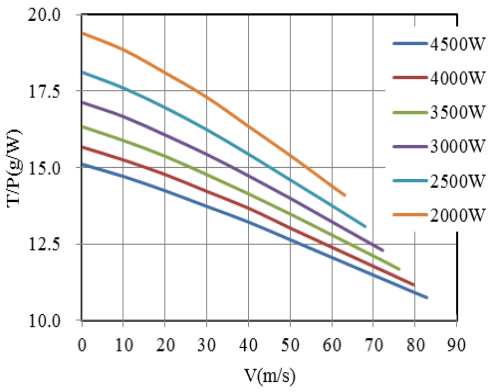
Sử dụng phương pháp biến thiên hằng số đối với giá trị công suất P_{max} từ đa thức nội suy (8), từ đó, xác định được T_{max}. Với mỗi đại lượng lượng (T_{maxi}, P_{maxi}) là đầu vào cho một hệ nghiệm cần xác định. Tiếp tục biến thiên hằng số đối với T hoặc V, hai giá trị T và V có thể hoán vị giữa biến số hoặc số gia tuỳ thuộc mục đích xác định những hàm nào cần xác định.

Điều kiện biên của T và V: Nói chung, sử dụng phương pháp số có thể giải nhanh được HPT (9), tuy nhiên, sẽ xuất hiện các nghiệm vô nghĩa khi giá trị số gia vượt quá giá trị nhất định. Trong thực tế, đó là khi động cơ không còn lực đẩy – đây cũng là biên cuối của bài toán. Vậy, cần phải hạn chế bởi các điều kiện sau: {(T ≥ 0 hoặc P ≥ 0) và (v ≥ 0)}.

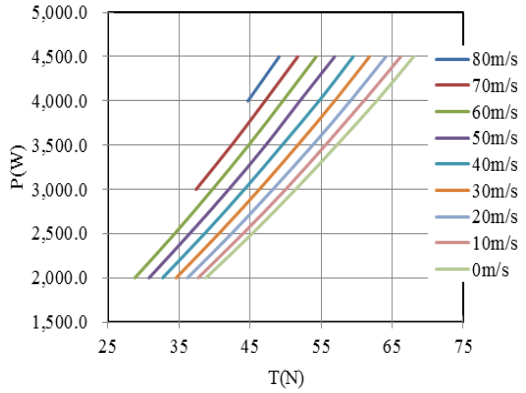
3.3. Kết quả



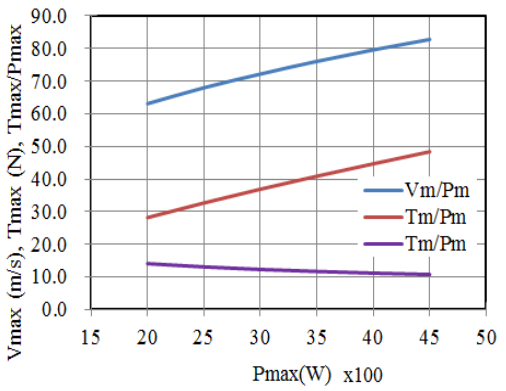
Hình 5. *Đồ thị phụ thuộc của lực đẩy vào tốc độ bay ở các chế độ công suất khác nhau.*



Hình 6. *Đồ thị phụ thuộc của hiệu suất vào tốc độ bay ở các chế độ công suất khác nhau.*



Hình 7. *Đồ thị phụ thuộc công suất động cơ vào lực đẩy ở các tốc độ khác nhau.*



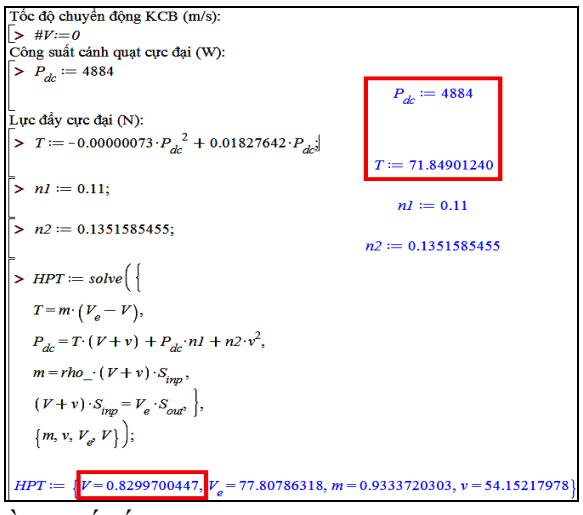
Hình 8. *Đồ thị phụ thuộc các giá trị cực đại vào công suất (các nghiệm biên).*

3.4. Nhận xét về kết quả

Bài báo không sử dụng lý thuyết lá cánh để tính toán lực kéo vì thông qua các hệ số và giả thiết sẽ mắc sai số, dẫn đến kết quả sẽ sai khác nhiều và việc tính toán cũng khá phức tạp. Tuy kết quả của bài báo chưa được kiểm chứng bởi thực nghiệm, nhưng những kết quả nhận được (hình 5, 6, 7, 8) gần đúng với các thông số do nhà sản xuất đưa ra (tại các biên), đồng thời hoàn toàn thoả mãn lý thuyết động lượng và giả thiết được thể hiện qua HPT (9).

Nếu sử dụng động cơ JP120 có thể đáp ứng cho KCB đạt tốc độ lớn nhất khoảng 83 (m/s) với lực đẩy cực đại 48.5 (N) tại mức công suất nguồn điện 4500 (W). Tốc độ bay càng cao thì hiệu suất và lực đẩy càng giảm, đồng thời làm cho công suất động cơ giảm theo (do đặc tính phụ thuộc tuyến tính giữa điện áp và tốc độ vòng quay cánh quạt nên động cơ không thể tăng tốc độ quay để đạt được công suất mong muốn khi điện áp nguồn điện có giới hạn). Vậy, muốn đạt tốc độ cực đại lớn cần phải tăng điện áp của nguồn điện.

Số liệu đầu vào cần thiết để giải bài toán rất ít, không cần đo đạc quá chi tiết các tham số kích thước hình học. Chương trình tính toán đơn giản, giải nhanh chóng (hình 9), đáp ứng tốt yêu cầu về thời gian so với những phương pháp tính toán khác.



Hình 9. *Một ví dụ về sai số tốc độ V khi giải HPT (8) khi sử dụng phương trình biên.*

Từ kết quả này cũng cho phép tính toán được năng lượng nguồn điện cần đáp ứng đủ cho nhiệm vụ của KCB – phương pháp tính toán năng lượng nguồn điện sẽ được trình bày trong công trình nghiên cứu sau này của tác giả.

4. KẾT LUẬN

Trong giai đoạn thiết kế sơ bộ hoặc lựa chọn động cơ thì chưa thể có ngay những bản vẽ chi tiết về biên dạng lá cánh, kích thước chi tiết. Như vậy, các phương pháp phần tử lá cánh, lý thuyết xoáy,... và các phần mềm ứng dụng CFD, EDF fan online đều không thể áp dụng được.

Dựa trên lý thuyết động lượng kết hợp với một số tham số thực nghiệm, bài báo đã đưa ra phương pháp tính toán các đặc tính hoạt động của một loại động cơ PLĐ. Tác giả đã tối giản hóa những giả thiết và phương trình toán học để bài toán đơn giản nhất. Đầu vào của bài toán là một số tham số thực nghiệm và thông số hình học của động cơ, chính những kết quả thực nghiệm đã bộc lộ, phản ánh đầy đủ bản chất, đặc tính hoạt động của động cơ PLĐ và được sử dụng, khai thác triệt để. Phương pháp này làm cơ sở tham khảo trong việc nghiên cứu thiết kế chế tạo KCB sử dụng động cơ PLĐ.

Kết quả nhận được là các đặc tính hoạt động của động cơ PLĐ tại các chế độ tốc độ, lực đẩy, công suất khác nhau. Được thể hiện dưới dạng bảng số, đồ thị phù hợp và đầy đủ khi sử dụng cho bài toán thiết kế hệ thống KCB về mặt động lực học (bài toán động lực học chuyển động của KCB) [1]. Đồng thời, cho phép lựa chọn những đặc tính làm việc để tối ưu theo từng tiêu chí: hiệu suất, lực đẩy, tốc độ cần ưu tiên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Nguyễn Đức Cương, *"Mô hình hóa và mô phỏng chuyển động của khí cụ bay tự động"*, NXB. Quân đội nhân dân, 2002.

[2]. Ali Akturk and Cengiz Camci,*"Experimental and Computational Assessment of a Ducted-Fan Rotor Flow Model*", Pennsylvania State University - Jounal of aircraft Vol. 49, No. 3, May – June 2012.

[3]. Daniel J. Inman, Kevin B. Kochersberger, Andrew J. Kurdila, William H. Mason, Sam B. Wilson, "*Ducted fan aerodynamics and modeling, with applications of steady and synthetic jet flow control*", Virginia Polytechnic Institute, May 4th, 2011.

[4]. Hongming Cai, Guoliang Ma, Zhongxin Li, "*Aerodynamic Characteristics of a Ducted Fan System Based on Momentum Source Method*", 3rd International Conference on Fluid Mechanics and Industrial Application, 2019.

[5]. Julian Stephens, "*Further experimentation and theoretical analysis of thrust characteristics using ducted fan theory for the UWE UAV Development Group Project*". University of the West of England, Bristol, April 2018.

[6]. Prisacariu Vasile, Mircea Boşcoianu, Ionică Cîrciu, "*Flying wing with Electric Ducted Fan (EDF) propulsion*", Academia Forţelor Aeriene Henri Coandă Braşov Romania, January 2013.

[7]. Yacoubi Moaad, Jlassi Alaaeddine, Karoun Jawad, Ben Kirane Tarik, Bekkali Lekman, Jhabli Hamza and Hendrick Patrick, "*Design and optimization of a ducted fan VTOL MAV controlled by Electric Ducted Fans*", Aero Thermo Mechanics department - Université Libre de Bruxelles (ULB) Belgium.

[8]. Yousuf Faroukh, Amro Hany, Mohammad Al-Shabi, "*Studying the effect of temperature on an electric-powered ducted fan using artificial neural networks*", Volume 10979, Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications IX - Baltimore, Maryland, United States, 2019.

[9]. Yuzhi Jin, Yuping Qian, Yangjun Zhang, and Weilin Zhuge, "*Modeling of Ducted-Fan and Motor in an Electric Aircraft and a Preliminary Integrated Design*", Tsinghua University, China, SAE Int. J. Aerosp. 2018.

ABSTRACT

DETERMINATION OF SOME BASIC OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ELECTRIC DUCTED FAN BY COMBINING EXPERIMENTAL AND THEORY METHOD

In general, electric ducted fan (EDF), the thrust-speed characteristics depend on to provided power or efficiency characteristics depend on moving speed, there are quite a lot changes of the characteristics during operation and play an important role in flying system design. This paper presents a method to build and dertermine some basic working characteristics of an electric ducted fan by combining momentum theory and some test parameters provided by the manufacturer. The results of this paper are intended to support the system design in the early stages, approach to practice results closer before making a decision to create prototype or buy ready-made products.

Keywords: Thrust-speed characteristic; Efficiency characteristics; Ducted fan; Flying object.

Nhận bài ngày 10 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 10 tháng 8 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 24 tháng 9 năm 2021

Địa chỉ: Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.
*Email: phuongmd1975@gmail.com.