

NGHIÊN CỨU CÁC LỰC TÁC DỤNG LÊN CÁNH GẠT CỦA BƠM THỦY LỰC CÁNH GẠT

STUDYING THE FORCES ACTING ON THE VANES OF A VANE HYDRAULIC PUMP

Nguyễn Văn Lại*, Nguyễn Thành Đức, Chu Mạnh Cường

Bộ môn Kỹ thuật Cơ khí, Trường Đại học Mỏ - Địa chất

*Email: nguyenvanlai@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nội dung nghiên cứu các lực tác dụng lên cánh gạt của bơm thủy lực cánh gạt, phân tích đặc tính gia tốc của đầu cánh gạt trên biên dạng stato của bơm cánh gạt tác dụng kép. Các kết luận được rút ra dựa trên phân tích này. Một sơ đồ về các lực tác dụng lên cánh gạt được trình bày. Một công thức tính khối lượng tới hạn của cánh quạt được thiết lập. Hai đồ thị biểu diễn gia tốc của đầu cánh gạt theo góc quay của rotor được vẽ cho hai biên dạng stato khác nhau.

Từ khóa: Cánh gạt; Bơm thủy lực cánh gạt; Lực ma sát; Biên dạng stato.

ABSTRACT

This paper presents a study of the forces acting on the vanes of a vane hydraulic pump, analyzing the acceleration characteristics of the vane tip on the stator profile of a double-acting vane pump. Conclusions are drawn based on this analysis. A diagram of the forces acting on the vanes is presented. A formula for calculating the critical mass of the vane is established. Two graphs representing the acceleration of the vane tip as a function of the rotor rotation angle are plotted for two different stator profiles.

Keywords: Vane; Vane hydraulic pump; Friction force; Stator profile; Rotor.

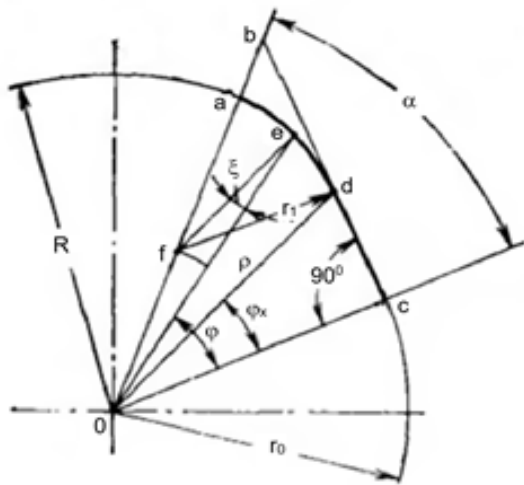
1. GIỚI THIỆU

Bơm thủy lực thể tích nói chung, bơm thủy lực cánh gạt nói riêng là thiết bị chính trong bộ nguồn thủy lực của hệ truyền động thủy lực thể tích. Bơm thủy lực cánh gạt được sử dụng rộng rãi trong các hệ truyền động thủy lực thể tích, vì kết cấu tương đối đơn giản, dải làm việc rộng, đặc biệt là trong các hệ truyền động thủy lực trên máy công cụ, máy CNC, trên tàu biển...

Trong quá trình hoạt động, cánh gạt di chuyển trong các rãnh rotor và ép vào stato của bơm do lực hướng tâm. Đồng thời, cần phải khắc phục lực ma sát trong rãnh rotor. Biên dạng stato là yếu tố quyết định đặc tính động học và động lực học của cánh gạt, rất quan trọng. Biên dạng stato được chọn sao cho không có sự thay đổi hữu hạn tức thời về vận tốc của cánh gạt so với rotor, trong khi lực quán tính về mặt lý thuyết tăng đến vô cùng. Do đó, cánh gạt có thể tách rời khỏi bề mặt stato, dẫn đến sự mài mòn nhanh chóng của cánh gạt và stato [1].

2. CÁC PHƯƠNG TRÌNH TOÁN HỌC

Giả thiết các cánh gạt được bố trí hướng tâm trong các rãnh rotor. Tọa độ của điểm tiếp xúc α với stato được cho trong hệ tọa độ cực $(\rho - \varphi)$. Rotor quay theo hướng mũi tên với vận tốc góc ω . Vận tốc của cánh gạt so với rotor sẽ là $\frac{d\rho}{dt}$ [2] (Hình 1). Giả thiết biên dạng stato có dạng xoắn ốc Archimedes thì phương trình của biên dạng này trong tọa độ cực được viết như sau:



Hình 1. Biên dạng stato của bơm cánh gạt tác động kép và các thông số tính toán [2].

$$\rho = \frac{r_0}{\cos\varphi} = (R - r_1)\cos(\alpha - \varphi) + \sqrt{r_1^2 + (R - r_1)^2\sin^2(\alpha - \varphi)} \quad (1)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\omega r_0 \sin\varphi}{\cos^2\varphi} = (R - r_1)\sin(\alpha - \varphi)\omega + \frac{\omega(R - r_1)^2\sin^2(\alpha - \varphi)}{2\sqrt{r_1^2 + (R - r_1)^2\sin^2(\alpha - \varphi)}} \quad (2)$$

Trong đó: r_0 – Bán kính cung tròn ban đầu; r_1 – Bán kính cung tròn liên hợp với r_0 ; R – Bán kính cung tròn liên hợp với tiếp tuyến của cung tròn bán kính r_1 ; ω – Vận tốc góc của rotor; φ – góc quay của rotor; ρ – Bán kính của stato; α – Góc giới hạn khu vực liên hợp giữa cung tròn bán kính r_1 và r_0 .

Đặc tính vận tốc $\frac{d\rho}{dt}$ theo góc quay rotor φ , được xây dựng bằng cách sử dụng

các phương trình (2) và (3) cho trường hợp $\alpha = \frac{\pi}{4}$ và $\arctg\varphi_x = \frac{\pi}{8}$ (Hình 4), cho thấy vận tốc tăng từ 0 đến giá trị cực đại, sau đó giảm xuống 0. Ngoài vận tốc tương đối $\frac{d\rho}{dt}$, cánh gạt còn có vận tốc tịnh tiến u_n .

Tiếp theo, phân tích gia tốc trong quá trình chuyển động của điểm tiếp xúc giữa cánh gạt và stato. Các gia tốc sau tác động lên cánh gạt dọc theo đường tiếp tuyến (Hình 2). Trong trường hợp này, biên dạng stato của bơm cánh gạt tác động kép có dạng đường thẳng [4].

Gia tốc $\frac{d^2\rho}{dt^2}$ được xác định bằng cách vi phân phương trình (2):

$$\frac{d^2\rho}{dt^2} = \omega^2 r_0 \frac{\cos^2\varphi + 2\sin^2\varphi}{\cos^2\varphi} \quad (3)$$

Gia tốc góc ω_n , trong quá trình quay đều của rotor, là gia tốc hướng tâm và được xác định bởi phương trình:

$$\omega_n = \omega^2 \left(\rho - \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

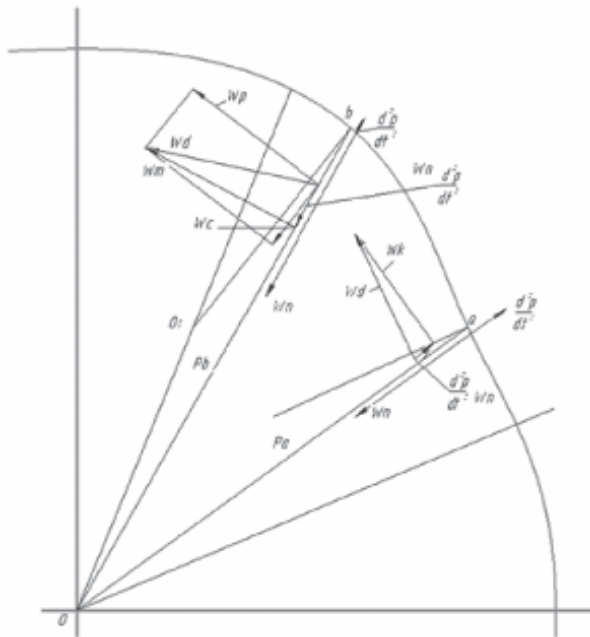
Gia tốc Caryolis:

$$\omega_k = \omega \frac{d\rho}{dt} \quad (5)$$

Nếu cộng các gia tốc này lại, ta sẽ thu được gia tốc tuyệt đối của trọng tâm cánh gạt ω_a . Khi cộng các gia tốc, ta có thể thấy rằng:

$$\frac{d^2\rho}{dt^2} > \omega_n; \quad \frac{d^2\rho}{dt^2} - \omega_n = \omega^2 \left(\frac{2r_0\sin^2\varphi}{\cos^2\varphi} + \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$





Hình 2. Đồ thị cộng các gia tốc tương đối, tịnh tiến và Coriolis.

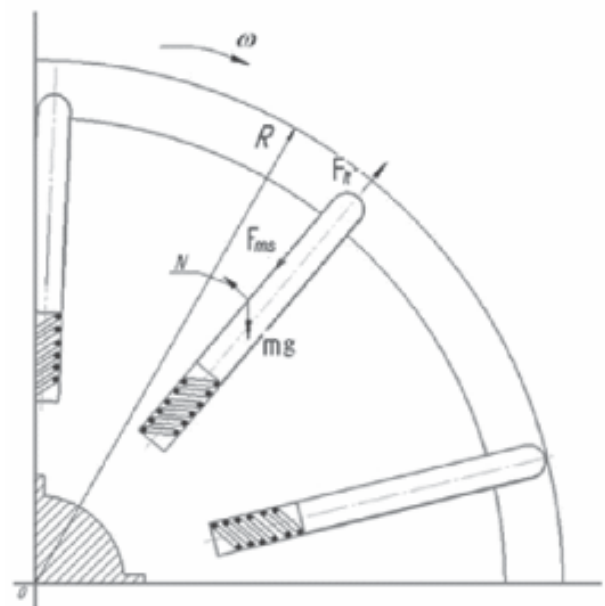
Sự khác biệt giữa các gia tốc này hướng từ tâm O ra ngoại vi, và lực quán tính tương ứng hướng về tâm O; do đó, việc ép cánh gạt vào stato không được đảm bảo bởi lực ly tâm.

Kết quả cộng các gia tốc này tại điểm b, nằm trên một cung tròn bán kính r_1 , cho phép chúng ta xác định rằng $\omega_n > \frac{d^2p}{dt^2}$. Do đó, với một số phép gần đúng, chúng ta có thể xem xét chuyển động của cánh gạt so với tâm O, có tính đến gia tốc hướng tâm. Cộng gia tốc hướng tâm với gia tốc tiếp tuyến sẽ cho ra gia tốc tuyệt đối, hình chiếu của nó lên hướng chuyển động tương đối của cánh gạt là $\omega_n - \frac{d^2p}{dt^2} > 0$. Vì vậy, khi điểm tiếp xúc di chuyển dọc theo cung tròn bán kính r_1 , lực quán tính hướng về phía ngoại vi, và cánh gạt bị ép vào stato bởi lực ly tâm [5].

Dựa trên kết quả phân tích, có thể kết luận rằng cần đáp ứng hai yêu cầu khi lựa chọn biên dạng stato:

Vận tốc của cánh gạt so với rotor phải thay đổi một cách trơn tru từ 0 đến giá trị cực đại, sau đó giảm dần một cách trơn tru về 0.

Gia tốc hướng tâm phải lớn hơn gia tốc tương đối một lượng sao cho tích của gia tốc này và khối lượng của cánh gạt đủ để khắc phục lực ma sát của cánh gạt trong rãnh rotor.



Hình 3. Sơ đồ các lực tác dụng lên cánh gạt.

Lực ly tâm:

$$F_{lt} = m\omega^2 R \quad (6)$$

Trong đó: m là khối lượng của cánh gạt; ω là vận tốc góc của rotor.

Lực ma sát của cánh gạt trong rãnh rotor:

$$F_{ms} = \mu N \quad (7)$$

Trong đó: μ là hệ số ma sát; N là lực pháp tuyến.

Lực pháp tuyến có thể được tính bằng lực tác dụng lên một mặt phẳng:

$$N = p_c \cdot S = \rho g h_c \cdot S \quad (8)$$

Trong đó: p_c là áp suất dư tại trọng tâm của mặt có diện tích S .

Dựa trên các phương trình trên, ta có thể xác định lực ly tâm tới hạn, tức là lực tối thiểu mà ở đó cánh gạt sẽ bị ép vào stato.

$$\begin{cases} F_{lt} = F_{ms} \\ m\omega^2 R = \rho g h_c \cdot S \end{cases} \quad (9)$$

Từ đó, ta có thể suy ra khối lượng tới hạn của cánh gạt:

$$m = \frac{\rho g h_c \cdot S}{\omega^2 R} \quad (10)$$

Lực ly tâm sẽ thay đổi tùy thuộc vào góc quay của rotor, và quy luật biến đổi lực ly tâm sẽ khác nhau tùy thuộc vào loại biên dạng stato. Do đó, cần xây dựng đặc tính về sự thay đổi lực ly tâm theo góc quay của rotor cho hai loại biên dạng stato khác nhau.

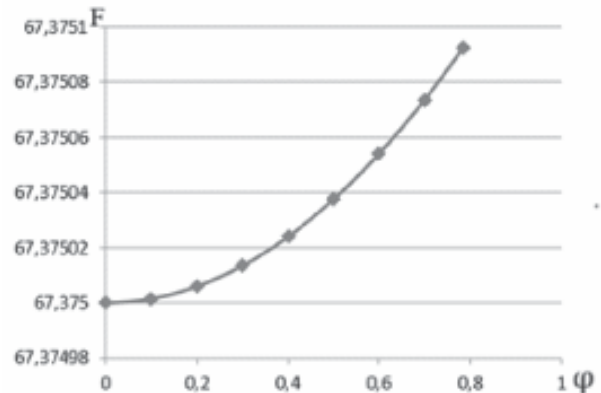
Trường hợp thứ nhất, chúng ta sẽ sử dụng biên dạng stato phổ biến nhất, đảm bảo điều kiện gia tốc của cánh gạt không đổi so với rotor và được xác định bởi phương trình sau:

$$F_{lt} = m\omega^2 \left(r_0 + \frac{2(R-r_0)}{a^2} \right) \varphi^2 \quad (11)$$

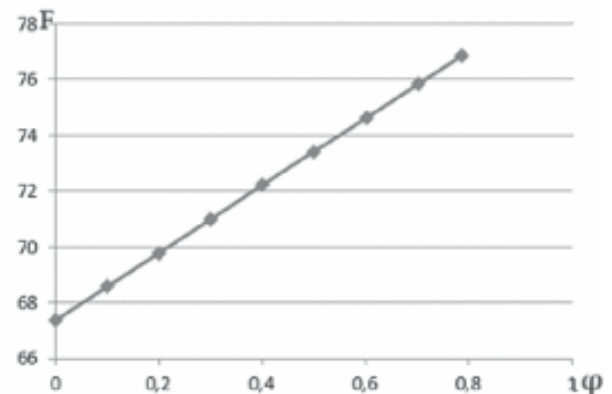
Trong đó: r_0 là bán kính nhỏ của stato; R là bán kính lớn của stato; φ là góc quay của rotor và $a = \frac{R-r_0}{\alpha}$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Đặc tính lực ly tâm phụ thuộc góc quay của cánh gạt được thể hiện trong Hình 4. Trong đặc tính này, góc quay của cánh gạt bị giới hạn bởi vùng làm việc của biên dạng stato, tức là $\pi/4$ đối với 8 cánh gạt.



Hình 4. Lực ly tâm của cánh gạt theo góc quay rotor trong bơm cánh gạt tác động kép với biên dạng stato đảm bảo gia tốc cánh gạt không đổi so với rotor.



Hình 5. Sự thay đổi hình sin của gia tốc cánh gạt theo góc quay của rotor

Trường hợp thứ hai của biên dạng stato được áp dụng dựa trên sự thay đổi vận tốc và gia tốc cánh gạt theo tính chất hình sin (Hình 5). Bán kính lớn của stato được xác định:

$$R = r_0 + a\varphi - \frac{a\alpha}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{\alpha} \varphi \quad (12)$$

Và lực ly tâm tác dụng lên cánh gạt:

$$R = m\omega^2 \left(r_0 + a\varphi - \frac{a\alpha}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{\alpha} \varphi \right) \quad (13)$$

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này cho thấy về mặt lý thuyết, biên dạng stato tạo ra sự thay đổi gia tốc cánh gạt hình sin là ưu việt hơn, vì nó loại bỏ các tác động bậc hai. Lực quán tính trong biên dạng stato với sự thay đổi gia tốc cánh gạt hình sin tăng nhanh hơn và giá trị cực đại của nó lớn hơn so với biên dạng có gia tốc cánh gạt không đổi. Do đó, có thể xem xét việc sử dụng cánh gạt nhẹ hơn, điều này tạo tiền đề để tăng hiệu suất và tuổi thọ của bơm. ❖

Ngày nhận bài: **18/3/2026**

Ngày phản biện: **30/3/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Hydraulics, Hydraulic Machines, and Hydraulic Drives: A Textbook for Mechanical Engineering Universities / T.M. Bashta, S.S. Rudnev, B.B. Nekrasov, et al. – Moscow: Mashinostroenie, 1982. – 423 p.
- [2]. Sveshnikov, V.K. Machine Tool Hydraulic Drives: A Handbook / V.K. Sveshnikov. – Moscow: Mashinostroenie, 2008. – 640 p.
- [3]. Grinchar, N.G. Fundamentals of Machine Hydraulic Drives: A Textbook. Part 1 / N.G. Grinchar, N.A. Zaitseva. – Moscow: Federal State Budgetary Educational Institution "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2016. – 444 p.
- [4]. Zaychenko, I.Z. Vane Pumps and Hydraulic Motors / I.Z. Zaychenko, L.M. Myshlevsky. - Moscow: Mashinostroenie, 1970. – 229 p.
- [5]. Bashta, T.M. Positive-Displacement Hydraulic Drives / T.M. Bashta [et al.]. - Moscow: Mashinostroenie, 1979. – 628 p.