

XÁC ĐỊNH ĐIỀU KIỆN HÌNH THÀNH BIÊN DẠNG RÔTO TRONG CỦA BƠM BÔI TRƠN HYPÔGERÔTO

DETERMINING CONDITIONS FOR THE INNER ROTOR PROFILE OF A HYPOGEROTOR LUBRICATION PUMP

Trương Công Giang^{1,2*}, Nguyễn Hồng Thái^{1,*}

¹Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Việt Nam

²Trường Cao đẳng Kinh tế - Kỹ thuật Vĩnh Phúc, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 15/11/2019, ngày phản biện đánh giá 12/12/2019, ngày chấp nhận đăng 10/7/2020.

TÓM TẮT

Bơm bôi trơn động cơ đốt trong kiểu bánh răng xyclôit nói chung và hypôgerôto nói riêng đang được nhiều nhà nghiên cứu trong và ngoài nước quan tâm nghiên cứu nhằm cải thiện chất lượng làm việc và hoàn thiện lý thuyết thiết kế. Tuy nhiên, một vấn đề mà các nghiên cứu trước đây chưa quan tâm đến đó là sự chồng lấn biên dạng từ vùng chân răng không ăn khớp lên phần đỉnh răng tham gia ăn khớp của rôto trong và hiện tượng va chạm giữa rôto trong với rôto ngoài trong quá trình làm việc. Dẫn đến, sau khi thiết kế người thiết kế phải kiểm tra một cách thủ công không thể tự động hóa thiết kế được và mất rất nhiều thời gian. Đây chính là vấn đề mà nhóm tác giả giải quyết trong bài báo này.

Từ khóa: Bơm hypôgerô; biên dạng rôto trong; bơm bôi trơn; biên dạng xyclôit; va chạm.

ABSTRACT

Lubrication pumps for internal combustion engines of cycloid gear in general and hypogenerator in particular are being researched by many domestic and foreign researchers to improve working quality and perfect the design theory. However, the previous studies have not paid attention to the overlap of the profile from dedendum to addendum of the inner rotor and the collision between inner rotor and outer rotor during the working process. As a result, the designer must check manually and cannot automate the design and take a lot of time. This is the problem that the authors solve in this article.

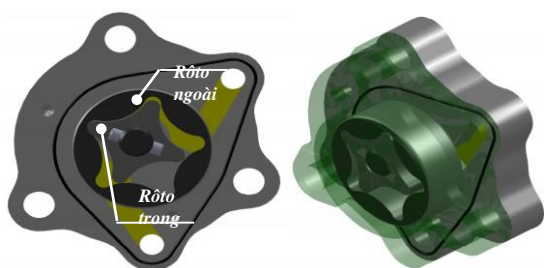
Keywords: hypogenerator pumps; inner rotor profile; lubrication pumps; cycloid profile; collision.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bơm hypôgerôto là một loại bơm thủy lực thể tích kiểu bánh răng ăn khớp trong có biên dạng là đường hypôcyclôit và cung tròn, loại bơm này có ưu điểm: kích thước nhỏ gọn, làm việc êm và ổn định trong thời gian dài. Với ưu điểm trên mà loại bơm này đang được sử dụng phổ biến trong các hệ thống bôi trơn của động cơ ô tô, xe máy [1]. Thành phần chính của bơm là cặp bánh răng hypôcyclôit ăn khớp trong. Trong đó, bánh răng có biên dạng cung tròn được gọi là rôto trong còn bánh răng có biên dạng là đường hypôcyclôit được gọi là rôto ngoài như mô tả trên hình 1. Về thiết lập phương trình biên dạng rôto và

nghiên cứu đặc điểm ăn khớp của cặp bánh răng ăn khớp trong biên dạng xyclôit (epixyclôit và hypôxyclôit) đã được nhiều nhà nghiên cứu trong và ngoài nước quan tâm [2 - 7], có thể thống kê thành ba phương pháp phổ biến: (i) tâm vận tốc tức thời [4]; (ii) phương pháp bao hình [6]; (iii) phương pháp hình học giải tích [7]. Nhưng chủ yếu là nghiên cứu về đặc điểm hình thành biên dạng răng phục vụ thiết kế các loại hộp giảm tốc bánh răng chốt con lăn epixyclôit [8, 9] hoặc bơm Gerôto (có biên dạng là đường epixyclôit) [10] còn đối với loại bơm hypôgerôto mới bắt đầu được nghiên cứu trong những năm gần đây bởi Kwon và đồng nghiệp (2009) [11] bằng phương pháp tâm vận tốc tức thời. Trong

nghiên cứu của Kwon cũng mới chỉ xác định được giới hạn của các thông số R_{1min} , r_{clmax} , R_{min} để tránh hiện tượng giao thoa đỉnh răng của rôto ngoài, còn những vấn đề như: (1) va chạm giữa rôto trong và rôto ngoài gây kẹt răng, (2) giới hạn cung ăn khớp của đỉnh răng rôto trong gây ra sự chồng lấn giữa phần biên dạng chân rôto lên phần biên dạng đỉnh rôto là những vấn đề mà các nghiên cứu trước đây chưa được đề cập đến mà giải quyết bằng cách kiểm tra thủ công và chưa đưa ra được các biểu thức giải tích xác định giới hạn. Để giải quyết những vấn đề trên chúng tôi vận dụng lý thuyết ăn khớp phẳng của Litvin [3] và lý thuyết hình học vi phân [12].



Hình 1. Bơm bôi trơn hypôgêrôto của động cơ Diesel D20

2. THIẾT LẬP BIỂU THỨC XÁC ĐỊNH MIỀN GIỚI HẠN CUNG TRÒN ĐỈNH RĂNG ROTO TRONG

Theo tài liệu [13, 14] đã chỉ ra cặp rôto trong bơm hypôgêrôto có đặc điểm ăn khớp:

i) Rôto ngoài ăn khớp trên toàn bộ chu vi biên dạng răng và theo [14] phương trình biên dạng được viết trong hệ quy chiếu của rôto ngoài:

$$\begin{cases} x_K(\gamma) = A + B + C \\ y_K(\gamma) = D + E + F \end{cases} \quad (1)$$

Với: $A = R_1 \cos\left(\frac{\gamma}{z_1 + 1}\right)$ $B = r_{cl} \cos\left(\alpha(\gamma) + \frac{\gamma}{z_1 + 1}\right)$,

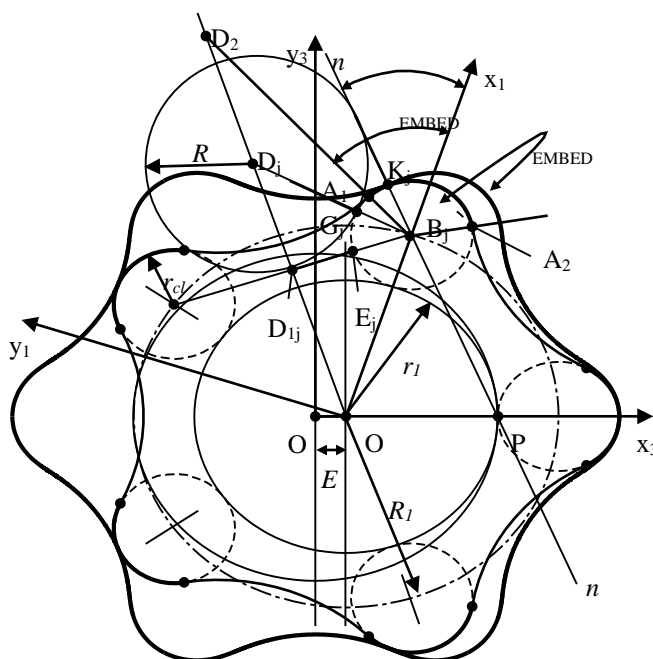
$C = E \cos\left(\frac{z_1 \gamma}{z_1 + 1}\right)$, $D = -R_1 \sin\left(\frac{\gamma}{z_1 + 1}\right)$

$E = -r_{cl} \sin\left(\alpha(\gamma) + \frac{\gamma}{z_1 + 1}\right)$, $F = E \sin\left(\frac{z_1 \gamma}{z_1 + 1}\right)$

Trong đó: E là độ lệch tâm giữa hai trục quay; z_1 là số răng của rôto trong; R_1 là bán

kinh đường tròn đi qua tâm các cung tròn đỉnh răng của rôto trong; r_{cl} là bán kính cung tròn đỉnh răng của của rôto trong; $\alpha(\gamma) = \tan^{-1}\left(\frac{Ez_1 \sin \gamma}{R_1 - Ez_1 \cos \gamma}\right)$ là góc hợp bởi phương pháp tuyến nn' với trục Ox_1 (xem hình 2); γ là góc quay của rôto trong so với giá cố định (góc quay của trục dẫn động).

ii) Rôto trong chỉ ăn khớp ở phần cung tròn đỉnh răng có bán kính r_{cl} với cung biên dạng tham gia ăn khớp $\widehat{A_{1j}A_{2j}}$ (xem trên hình 2), còn cung tròn chân răng bán kính R không tham gia vào quá trình ăn khớp.



Hình 2. Giới hạn làm việc của đỉnh răng rôto trong

Từ hình 2, ta có chiều dài cung tròn làm việc bán răng trong được cho bởi:

$$\widehat{A_{1j}A_{2j}} = 2r_{cl} \alpha_{max} \quad (2)$$

Trong đó: α_{max} là góc giới hạn miền làm việc của cung tròn đỉnh răng rôto trong.

Để xác định α_{max} ta đạo hàm $\alpha(\gamma)$ theo γ :

$$\alpha'(\gamma) = \frac{2Ez_1 \sin \frac{3\gamma}{2} \sin \frac{\gamma}{2}}{R_1^2 - 2R_1 E z_1 \cos(\gamma) + E z_1} \quad (3)$$

Từ (3) ta có: $\alpha'(\gamma) = 0$ khi $\gamma = 2k\pi/3$ hoặc $\gamma = 2k\pi$.

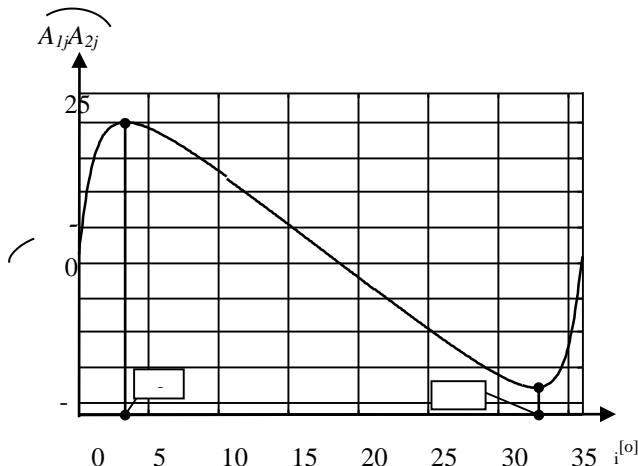
+ Với $\gamma=2k\pi$ thì $\alpha=0$ nên $A_{1j}A_{2j} = 0$ không thỏa mãn.

+ Với $\gamma=2k\pi/3$ góc $\alpha(\gamma)$ đạt giá trị cực trị và cho bởi:

$$\alpha_{\max} = \arctg\left(\frac{\sqrt{3}Ez_1}{2R_1 + Ez_1}\right) \quad (4)$$

Như vậy, để quá trình ăn khớp được diễn ra đúng thì phần biên dạng chân răng (*cung tròn bán kính chân răng R*) phải tiếp xúc với cung tròn đỉnh răng ở dưới hai điểm A_{1j} , A_{2j} (xem hình 2).

Hình 3 dưới đây mô tả vết tiếp xúc theo góc quay của trục dẫn động của bơm bôi trơn hypôgêrôto có các thông số thiết kế $E=5mm$, $z_1=5mm$, $R_1=30mm$, $r_{cl}=10mm$.



Hình 3. Sự thay đổi vết tiếp xúc theo góc quay của trục dẫn động
 ($E = 5mm$, $z_1 = 5mm$, $R_1 = 30mm$, $r_{cl} = 10mm$)

3. THIẾT LẬP BIỂU THỨC XÁC ĐỊNH GIỚI HẠN CỦA BÁN KÍNH CHÂN RĂNG RÔTO TRONG

Nếu gọi G_j là điểm tiếp xúc giữa cung tròn đỉnh răng có bán kính r_{cl} với cung tròn chân răng có bán kính R (xem hình 2), theo đặc điểm ăn khớp của rôto trong thì điểm tiếp xúc G_j không nằm trên $\widehat{A_{1j}A_{2j}}$ mà thuộc cung $\widehat{A_{1j}E_{1j}}$. Do đó, khi điểm tiếp xúc $G_j \equiv E_j$ thì cung tròn chân răng rôto trong sẽ có bán kính nhỏ nhất $R = R_{\min}$, còn khi $G_j \equiv A_{1j}$ cung tròn chân răng có bán kính lớn nhất $R = R_{\max}$. Các giá trị R_{\min} , R_{\max} được xác định như sau:

Xác định giới hạn nhỏ nhất của R

Từ những lập luận ở trên và từ hình 2, cung tròn chân răng của rôto trong có bán kính nhỏ nhất R_{\min} khi điểm xúc G_j trùng với E_j khi đó:

$$R_{\min} = R_1 \sin \frac{\pi}{z_1} - r_{cl} \quad (6)$$

Xác định giới hạn lớn nhất của R

Tương tự như trên ta cũng có bán kính cung tròn chân răng của rôto trong đạt giá trị R_{\max} khi điểm tiếp xúc $G_j \equiv A_{1j}$. Như vậy, ta có:

$$R = R_{A_{1j}} = R_{\max} \quad (7)$$

Nếu gọi ε là góc hợp bởi phương B_jA_{1j} với phương B_jE_{1j} (xem hình 2) thì ε được cho bởi:

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} + \beta - \alpha_{gh} \quad (8)$$

Trong đó, β là góc hợp bởi giữa phương O_1B_j với phương O_1D_j và được cho bởi:

$$\beta = \frac{\pi}{z_1} \quad (9)$$

Khi đó, ta có:

$$D_{1j}D_{2j} = B_jD_{1j} \operatorname{tg} \varepsilon \quad (10)$$

Với B_jD_{1j} được cho bởi:

$$B_jD_{1j} = R_1 \sin \frac{\pi}{z_1} \quad (11)$$

Thay (11) vào (10):

$$D_{1j}D_{2j} = R_1 \sin \frac{\pi}{z_1} \operatorname{tg} \varepsilon \quad (12)$$

Mặt khác, cũng từ hình 2 ta có:

$$R_{A_{1j}} = \sqrt{(D_{1j}D_{2j})^2 + (B_jD_{1j})^2} - r_{cl} \quad (13)$$

Thay (11) và (12) vào (13):

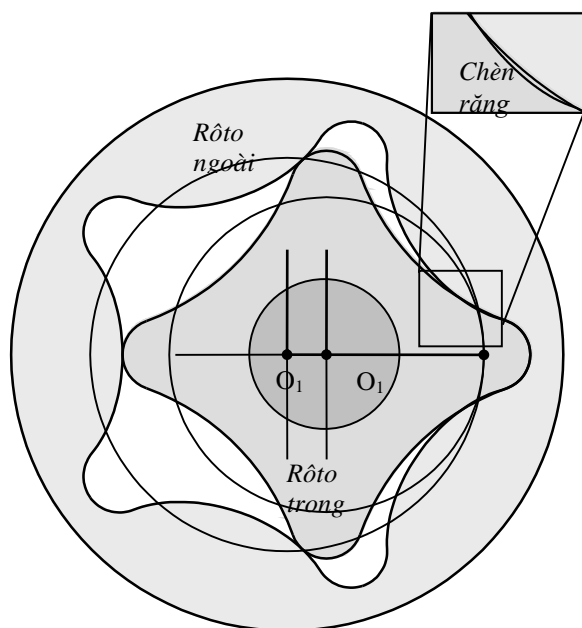
$$R_{A_{1j}} = R_1 \sin \frac{\pi}{z_1} \sqrt{(\operatorname{tg} \varepsilon)^2 + 1} - r_{cl} \quad (14)$$

Từ (6) và (14) miền giới hạn kích thước R bán kính chân răng rôto trong để

không xảy ra hiện tượng chòng lún được cho bởi:

$$R_1 \sin \frac{\pi}{z_1} - r_{cl} \leq R \leq R_1 \sin \frac{\pi}{z_1} \sqrt{(tg \varepsilon)^2 + 1} - r_{cl} \quad (15)$$

Áp dụng bất phương trình (15) vào thiết kế bơm hypôgerôto có thông số: $E = 5.5\text{mm}$, $z_1 = 4$, $R_1 = 23.5\text{mm}$, $r_{cl} = 4\text{mm}$ thay vào (15) ta có miền giới hạn của R : $11.66 \text{ mm} \leq R \leq 35.23 \text{ mm}$. Trên cơ sở đó chọn $R = 34 \text{ mm}$ ta có bản thiết kế cặp rôto hình thành bơm được mô tả như hình 4 dưới đây.



Hình 4. Rôto trong và rôto ngoài của bơm hypôgerôto

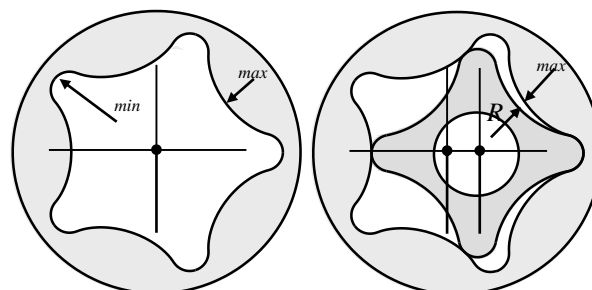
Từ hình 4 ta thấy mặc dù R bán kính cung tròn chân răng của rôto trong thỏa mãn bất phương trình (15) nhưng vẫn xảy ra hiện tượng va chạm giữa chân răng rôto trong với phần đỉnh răng rôto ngoài, gây ra hiện tượng kẹt răng. Vì vậy, cần xác định thêm điều kiện của R để không xảy ra hiện tượng này.

4. ĐIỀU KIỆN TRÁCH VÀ CHẠM GIỮA ĐỈNH RĂNG CỦA RÔ TO NGOÀI VỚI CHÂN RĂNG RÔ TO TRONG

Nếu gọi ρ_{min} , ρ_{max} lần lượt là bán kính cong tại đỉnh răng và chân răng của rôto ngoài (xem hình 5a), còn $\rho(\gamma)$ là bán kính cong biên dạng rôto ngoài (xem hình 5a). Như vậy, ρ_{min} và ρ_{max} sẽ là các giá trị cực của hàm $\rho(\gamma)$.

Khi đó, để không xảy ra hiện tượng chèn răng (xem hình 4) thì bán kính chân răng rôto trong R (xem hình 5b) thỏa mãn bất phương trình sau:

$$R \leq \rho_1 \quad (16)$$



a) Bán kính chân răng và đỉnh răng của rôto ngoài

b) Bán kính chân răng rôto trong

Hình 5. Bán kính chân răng và đỉnh răng của rôto trong và rôto ngoài

Mặt khác, theo tài liệu [14] biên dạng rôto ngoài (bán răng hypôxycloit) là bao hình của đường tròn $\Sigma^{cl}(B_1, r_{cl})$ có tâm chạy trên đường hypôxycloit kéo dài có phương trình:

$$\begin{cases} x_K(\gamma) = R_1 \cos\left(\frac{\gamma}{z_1 + 1}\right) + E \cos\left(\frac{z_1 \gamma}{z_1 + 1}\right) \\ y_K(\gamma) = -R_1 \sin\left(\frac{\gamma}{z_1 + 1}\right) + E \sin\left(\frac{z_1 \gamma}{z_1 + 1}\right) \end{cases} \quad (17)$$

Khi đó, nếu gọi $\rho_o(\gamma_i)$ là bán kính cong của đường hypôxycloit kéo dài thì ta có:

$$\rho(\gamma) = \rho_o(\gamma) - r_{cl} \quad (18)$$

Theo hình học vi phân [12] $\rho_o(\gamma_i)$ được cho bởi:

$$\rho_o(\gamma) = \frac{\left((x'_{K_2})^2 + (y'_{K_2})^2\right)^{3/2}}{y''_{K_2} x'_{K_2} - x''_{K_2} y'_{K_2}} \quad (19)$$

Thay phương trình (17) vào (19) sau khi biến đổi và rút gọn:

$$\rho_o(\gamma) = \frac{r_1 \left(\frac{R_1^2}{r_1^2} + 1 - 2 \frac{R_1}{r_1} \cos \gamma \right)^{3/2}}{z_1 - \frac{R_1^2}{r_1^2} - \frac{R_1}{r_1} (z_1 - 1) \cos \gamma} \quad (20)$$

Thay (19) vào (18) sau khi biến đổi ta được:

$$\rho(\gamma) = \frac{r_1 \left(\frac{R_1^2}{r_1^2} + 1 - 2 \frac{R_1}{r_1} \cos \gamma \right)^{3/2}}{z_1 - \frac{R_1^2}{r_1^2} - \frac{R_1}{r_1} (z_1 - 1) \cos \gamma} - r_{cl} \quad (21)$$

Đạo hàm (21) và xác định cực trị của hàm $\rho(\gamma_i)$ ta có:

$$\rho_{\max} = \frac{(R_1 + Ez_1)^2}{Ez_1^2 - R_1} - r_{cl} \quad (22)$$

$$\rho_{\min} = -\frac{(R_1 - Ez_1)^2}{Ez_1^2 + R_1} - r_{cl} \quad (23)$$

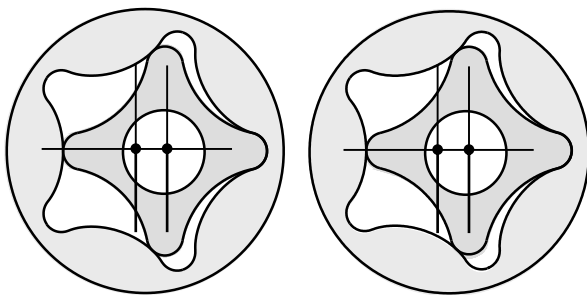
Thay (22) vào (16) ta có

$$R \leq \frac{(R_1 + Ez_1)^2}{Ez_1^2 - R_1} - r_{cl} \quad (24)$$

Từ bất phương trình (15) và (24) ta thấy để không xảy ra va chạm giữa rôto trong và rôto ngoài kết hợp giữa bất phương trình (15) và (24) ta có:

$$R_1 \sin \frac{\pi}{z_1} - r_{cl} \leq R \leq \frac{(R_1 + Ez_1)^2}{Ez_1^2 - R_1} - r_{cl} \quad (25)$$

Áp dụng bất phương trình (25) cho bơm bôi trơn có bộ thông số thiết kế ở hình 4. Khi đó chọn $R = 25\text{mm} \in [11.66\text{mm} - 27.09\text{mm}]$ và $R = R_{\max} = 27.09\text{mm}$ có bản thiết kế cho trên hình 6 dưới đây.



a) $R = 25\text{mm}$

b) $R = 27.09\text{mm}$

Hình 6. Biên dạng cặp rôto theo R

Từ hình 6 và bất phương trình (25) ta thấy mặc dù tại vị trí $R = R_{\max} = (R_1 + Ez_1)^2 (Ez_1^2 - R_1)^{-1} - r_{cl}$ (hình 6) nhưng không xảy ra hiện tượng va chạm giữa rôto trong và rôto ngoài. Do đó, đây sẽ là điều kiện để kiểm tra các thông số thiết kế khi ứng dụng cặp bánh răng hypôxylôit trong thiết kế bơm bôi trơn. Dựa trên kết quả nghiên cứu này chúng tôi tiến hành viết mô đun phần mềm thiết kế thuận khi cho trước các tham số thiết kế đặc trưng E, z_1, R_1, r_{cl}, R có giao diện như hình 7 dưới đây bao gồm các chức năng: thiết kế biên dạng; kiểm tra thông số thiết kế; phân tích: quá trình ăn khớp, lưu lượng, áp suất, lực; Hiện thị kết quả tính toán: thông số chế tạo, thông số kỹ thuật của bơm theo hướng mũi tên chỉ dẫn thực hiện các môđun.

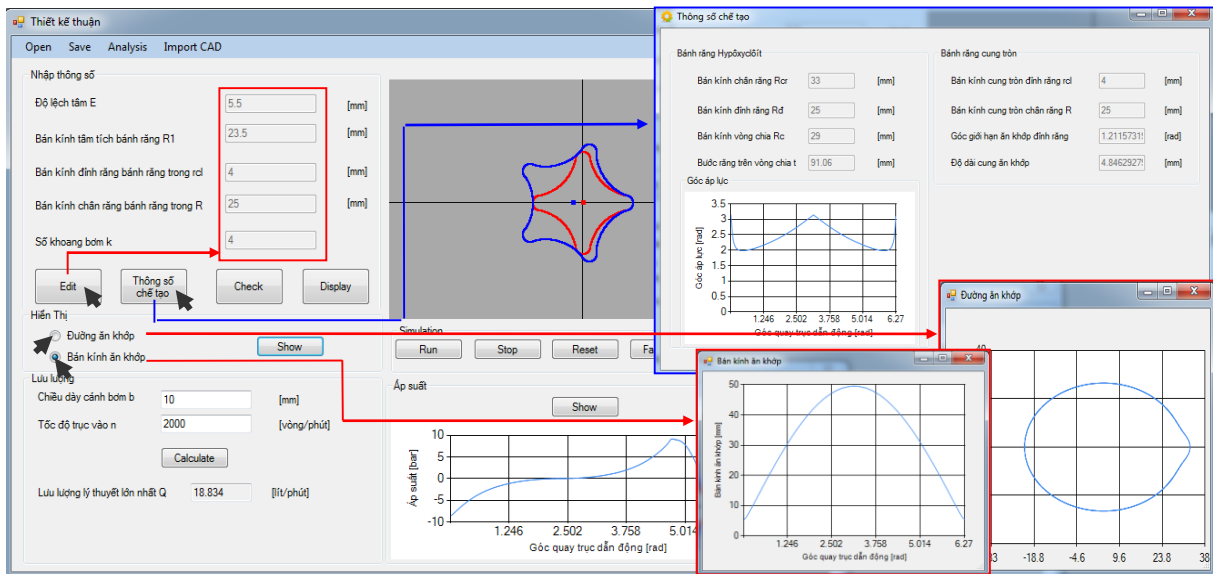
5. KẾT LUẬN

Điểm mới của nghiên cứu này so với các nghiên cứu cùng lĩnh vực trước đây là tìm được miền giới hạn của R bán kính chân của rôto trong phải thỏa mãn:

$$R_1 \sin \frac{\pi}{z_1} - r_{cl} \leq R \leq (R_1 + Ez_1)^2 (Ez_1^2 - R_1)^{-1} - r_{cl}$$

đề: (i) Khắc phục hiện tượng chùng lún vùng biên dạng chân rôto lên phần biên dạng đỉnh rôto trong quá trình ăn khớp tránh hiện tượng trượt biên dạng tại vùng chùng lún gây mòn thực chất vùng này không tham gia ăn khớp; (ii) Khắc phục được va chạm giữa rôto trong và rôto ngoài gây kẹt rôto trong quá trình làm việc.

Trên cơ sở những kết quả nghiên cứu lý thuyết của nghiên cứu này cùng với các nghiên cứu khác đã được công bố bởi nhóm tác giả, nghiên cứu này đã viết được phần mềm thiết kế bơm Hypôgerôto với mục đích: tính toán, thiết kế, phân tích thiết kế.



Hình 7. Giao diện phần mềm và các môđun tính toán thiết kế thuận bơm hypôgêrô

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Đức Hùng, *Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số hình học đến động học của máy thủy lực bánh răng ăn khớp trong kiểu cycloid*, Luận án phó Tiến sĩ, trường Đại học Bách khoa Hà Nội (1996).
- [2] Prakash H R, Manjula S, *Design and analysis of Gerotors of main gear box lubricating oil pump*, International journal of engineering and Technical Research, Volume 2, Issue-5 (2014) 79-81
- [3] Daniele Vecchiato, Alberto Demenego, John Argyris, Faydor L. Litvin, *Geometry of a cycloidal pump*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 190 (2001), 2309-2330.
- [4] Joong Ho Shin, Soon Man Kwon, *On the lobe profile design in a cycloid reducer using instant velocity center*, Mechanism and Machine Theory 41 (2006), 596–616.
- [5] J. E. Beard, D. W. Yannitell, G. R. Pennock, *The Effects of The Generating Pin Size and Placement on The Curvature and Displacement of Epitrochoidal Gerôtos*, Match, Mach Theory, Vol 27, No. 4 (1992), 373-389, Doi: 0094-114X/92
- [6] Nguyễn Hồng Thái, *Tính toán mô phỏng động học bộ truyền bánh răng hành tinh con lăn xyclôit ứng dụng trong robot công nghiệp và các thiết bị điều khiển số*; Hội nghị cơ học toàn quốc lần thứ IX, Hà Nội (2012) 184 - 192
- [7] Zhonghe Ye, Wei Zhang, Qinghai Huang, Chuanming Chen, *Simple explicit formulae for calculating limit dimensions to avoid undercutting in the rotor of a Cycloid rotor pump*, Mechanism and Machine Theory 41 (2006) 405–414.
- [8] Nguyen Thien Phuc, *Planetary Cycloid roller gear reducer*, Viet Nam journal of Mechanics, Volume 24, National Center for Natural Science and Technology of Vietnam, Ha Noi (2001) 147-154.
- [9] Nguyễn Thiện Phúc, Tạ Khánh Lâm, Phạm Hồng Phúc, Nguyễn Anh Tuấn, *Xây dựng và mô phỏng biên dạng bánh răng Cycloid trong bộ truyền kiểu hành tinh-con lăn*, Tuyển tập các công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ VII (2002).
- [10] G. Mimmi, G. Bonandrini, C. Rottenbacher, *Theoretical Analysis of Internal Lobe Pumps*, IFToMM World Congress, Besancon (France) (2007), 18-21.

- [11] Soon Man Kwon, Han Sung Kang, Joong Ho Shin, *Rotor profile design in a hypoglycemia pump*, Journal of Mechanical Science and Technology 23 (2009), 3459-3470, Doi: 10.1007/s12206-009-1007-y.
- [12] Chris J Isham, *Modern Differential Geometry for Physicists*, Published by World Scientific (2001).
- [13] Trương Công Giang, Nguyễn Hồng Thái, *Tổng hợp biên dạng bánh răng hypôxylôit khi biết trước hai tâm tích và một biên dạng cung tròn*, Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc, Đà Nẵng (2015), 296 – 302.
- [14] Trương Công Giang, Nguyễn Hồng Thái, *Ảnh hưởng của các thông số kích thước hình học đến đường ăn khớp và lưu lượng của bơm thủy lực thể tích bánh răng ăn khớp trong hypôxylôit*; Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc, Đà Nẵng (2015), 280-289.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Nguyễn Hồng Thái

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Email: thai.nguyenhong@hust.edu.vn/nguyenhongthai.vn@gmail.com