

THIẾT KẾ, GIA CÔNG VÀ ĐÁNH GIÁ GIÁ ĐỘ CHÍNH XÁC BIÊN DẠNG CIC CỦA ROTOR BƠM KIỂU ROOTS

DESIGN, PROCESSING AND EVALUATION OF PROFILE ACCURACY OF CIC ROTOR FOR ROOTS PUMP

Nguyễn Thanh Tùng^{1,2*}, Trần Thế Văn², Vũ Đức Phúc², Đặng Quang Mến³

¹Khoa Cơ – Điện, Trường Đại học Mỏ – Địa chất

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

³Khoa Cơ khí, Trường Cao đẳng Kinh tế – Kỹ thuật Tô Hiệu

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm mục đích đưa ra một thiết kế mới cho rotor bơm kiểu roots dựa trên kết hợp ba đường cong là đường tròn, đường thân khai và đường tròn gọi là rotor kiểu roots dạng CIC. Dữ liệu điểm của quá trình thiết kế được sử dụng để gia công rotor trên máy cắt dây. Độ chính xác biên dạng của rotor CIC khi gia công bằng máy cắt dây được đo bằng máy CMM và được đánh giá thông qua các so sánh về sự trùng khớp giữa biên dạng rotor tính theo lý thuyết và biên dạng rotor theo dữ liệu đo. Kết quả so sánh dữ liệu điểm giữa biên dạng rotor CIC theo lý thuyết và biên dạng rotor theo kết quả đo đã chỉ ra rằng sai số giữa chúng rất nhỏ, lớn nhất cũng chỉ là 0,007 (mm). Kết quả này cho thấy sử dụng máy cắt dây để gia công rotor CIC là một phương án khả thi và cho độ chính xác biên dạng cao.

Từ khóa: Rotor CIC; Độ chính xác biên dạng rotor; Gia công rotor CIC.

ABSTRACT

This research aims to present a new design for a roots-type pump rotor based on a combination of three curves: circle, body, and circle called a CIC roots-type rotor. Points data of the design process is used to machine the rotor on the wire discharge machine. Profile accuracy of the CIC rotor after machining was measured by the CMM machine and evaluated through comparisons of the agreement between the theoretically calculated rotor profile and the rotor profile according to measurement data. The results of comparing point data between the theoretical CIC rotor profile and the measured rotor profile have shown that the error between them is tiny, the largest is only 0.007 (mm). This result indicates that using a wire discharge machine to produce CIC rotors is a feasible option and provides high profile accuracy.

Keywords: CIC rotor; Rotor profile accuracy; CIC rotor machining.



1. GIỚI THIỆU

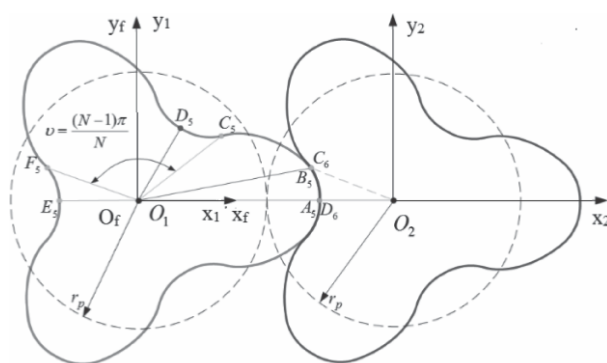
Bơm chân không kiểu roots dùng để vận chuyển dòng chất khí và chất lỏng trong các thiết bị công nghiệp. Nó được sử dụng trong nhiều ngành kỹ thuật như: Cơ khí, xây dựng và y tế.... Bộ phận quan trọng nhất tạo ra ưu điểm về đặc tính kỹ thuật và khả năng làm việc của bơm là rotor bơm vì bộ phận này ảnh hưởng trực tiếp đến lưu lượng, cột áp, tốc độ dòng chảy và đặc tính rung động của bơm. Một số cách hình thành biên dạng rotor bơm kiểu roots đã được một số tác giả đề xuất như hình thành biên dạng rotor từ họ đường cong đơn dạng Cycloid, dạng cung tròn hoặc dạng thân khai [1-3]. Một số nghiên cứu hình thành biên dạng rotor bằng cách tổ hợp nhiều đường cong lại với nhau [4-7]. Do đặc tính phức tạp của rotor nên hướng nghiên cứu về công nghệ tạo hình cho rotor bơm kiểu roots cũng được các nhà nghiên cứu quan tâm [8-11]. Có hai phương pháp chính để gia công rotor dạng roots là phương pháp gia công bằng dao phay định hình [12] và gia công bằng máy cắt dây [13]. Trong đó, phương pháp gia công bằng máy cắt dây có ưu điểm là dễ sử dụng, chi phí thấp và phù hợp với các biên dạng không xoắn. Một trong những chỉ tiêu quan trọng khi gia công rotor là đánh giá độ chính xác biên dạng của nó, bởi vì độ chính xác biên dạng của rotor ảnh hưởng lớn đến đặc tính tiếp xúc và khả năng làm việc của bơm.

Nghiên cứu này tập trung vào việc đề xuất một sự hình thành biên dạng rotor bơm kiểu roots dựa trên sự kết hợp của ba đường cong là đường cung tròn, đường thân khai và đường cung tròn (CIC). Dựa trên biên dạng đề xuất, dữ liệu điểm được sử dụng cho việc gia công rotor bằng máy cắt dây. Sự phù hợp giữa biên dạng thiết kế lý thuyết và thực nghiệm của rotor CIC được đánh giá bằng cách so sánh dữ

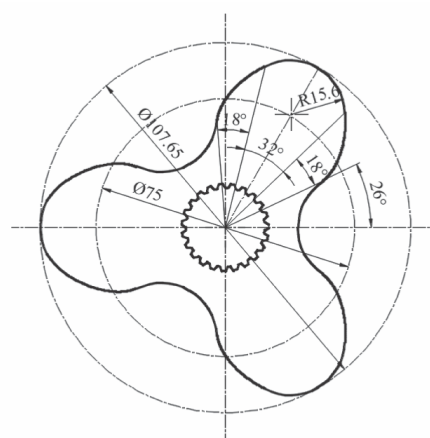
liệu điểm của chúng theo thiết kế và theo kết quả đo thực nghiệm trên máy CMM.

2. THIẾT KẾ BIÊN DẠNG ROTOR KIỂU ROOTS DẠNG CIC

Biên dạng CIC là biên dạng được tổng hợp bởi một cung tròn (phần đỉnh răng – cung A_5B_5), và một cung thân khai (đoạn nằm trên đường chia – cung B_5C_5) và một đường tròn liên hợp (phần chân răng – cung C_5D_5), như biểu diễn trên Hình 1. Trong quá trình làm việc, phần đỉnh của rotor 1 sẽ đối tiếp với phần lõm của rotor 2 và ngược lại. Vì vậy mà bán kính lồi của cung tròn của đỉnh rotor 1 và bán kính lõm của cung tròn chân rotor 2 phải bằng nhau.



Hình 1. Sơ đồ hệ trục tọa độ xác định biên dạng rotor CIC



Hình 2. Biên dạng rotor CIC

- Chọn hệ trục tọa độ $O_1x_1y_1z_1$ gắn trên rotor 1 và chuyển động cùng rotor;

- Hệ trục tọa độ $O_2x_2y_2z_2$ gắn trên và rotor 2 và chuyển động cùng rotor;

- Chọn hệ trục tọa độ cố định $O_fx_fz_f$ có tâm O_f trùng O_1 . Trục z vuông góc với mặt phẳng hình vẽ. Quỹ tích biên dạng rotor của bơm được biểu diễn trong hệ trục tọa độ $O_1x_1y_1z_1$ như sau:

+ Một là biên dạng phần cung tròn A_5B_5 :

$$\mathbf{r}_{III_1}^{(A_5B_5)}(\ell) = \begin{cases} x_{III_1}^{(A_5B_5)}(\ell) = r_a \cos \ell \\ y_{III_1}^{(A_5B_5)}(\ell) = r_a \sin \ell \end{cases} \quad 0 \leq \ell \leq l_1 \quad (1)$$

+ Hai là biên dạng phần đường cong thân khai B_5C_5 :

$$\mathbf{r}_{II_1}^{(B_5C_5)} = \begin{cases} x_{II_1}^{(B_5C_5)}(\ell) = (r_p + \ell \cos \alpha_p) \cos \left(\frac{\pi}{2N} - \frac{\ell}{r_p \sin \alpha_p} \right) - \ell \cos \alpha_p \cot \alpha_p \sin \left(\frac{\pi}{2N} - \frac{\ell}{r_p \sin \alpha_p} \right) \\ y_{II_1}^{(B_5C_5)}(\ell) = \ell \cos \left(\frac{\pi}{2N} - \frac{\ell}{r_p \sin \alpha_p} - \alpha_p \right) \cot \alpha_p + r_p \sin \left(\frac{\pi}{2N} - \frac{\ell}{r_p \sin \alpha_p} \right) \end{cases} \quad (-u \leq \ell \leq u) \quad (2)$$

+ Ba là biên dạng cung tròn C_5D_5 . Phần chân răng biên dạng C_6D_6 là đường cong liên hợp ăn khớp với đường chân răng A_5B_5 (hình 1). Cung tròn chân răng C_6D_6 là giống hệt đường chân răng E_5F_5 và nó được xác định bởi chuyển trục tọa độ O_1 sang hệ tọa độ O_2 . Do đó, đường cong chân răng C_5D_5 có thể thu được bằng cách quay đoạn E_5F_5 đi một góc $\vartheta = (N - 1)\pi/N$ ngược chiều kim đồng hồ quanh trục z :

$$\mathbf{r}_{II_1}^{(C_5D_5)}(\ell) = \begin{cases} x_{II_1}^{(C_5D_5)}(\ell) = 2r_p \cos(\vartheta - \ell) + r_a \cos(\vartheta + 3\ell) \\ y_{II_1}^{(C_5D_5)}(\ell) = 2r_p \sin(\vartheta - \ell) + r_a \sin(\vartheta + 3\ell) \end{cases} \quad (3)$$

Sử dụng phương trình ma trận chuyển trục tọa độ đồng nhất từ hệ tọa độ $O_1x_1y_1z_1$

sang $O_2x_2y_2z_2$. Quỹ tích biên dạng CIC của rotor trong hệ trục tọa độ $O_2x_2y_2z_2$ được cho như ở phương trình (4) và phương trình (5). Phương trình ăn khớp giữa rotor chủ động và rotor bị động được biểu diễn như trong phương trình (6) dưới đây:

$$\mathbf{r}_{I_2}(\tau, \phi) = \mathbf{M}_{21}(\phi) \mathbf{r}_{I_1}(\tau) = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi - \sin^2 \phi & -2 \cos \phi \sin \phi & -E_c \cos \phi \\ 2 \cos \phi \sin \phi & \cos^2 \phi - \sin^2 \phi & -E_c \sin \phi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{I_1}(\tau) \\ y_{I_1}(\tau) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{n}_{I_2}(\tau, \phi) = \mathbf{L}_{21}(\phi) \mathbf{n}_{I_1}(\tau) \quad (5)$$

$$(r_p \cos \phi - x_{I_1}(\tau, \phi))x'_{I_1}(\tau, \phi) + (r_p \sin \phi - y_{I_1}(\tau, \phi))y'_{I_1}(\tau, \phi) = 0 \quad (6)$$

Trong đó: $\mathbf{L}_{21}(\phi)$ là ma trận con trên bên trái cỡ (2×2) của ma trận chuyển trục đồng nhất $\mathbf{M}_{21}(\phi)$ cỡ (3×3) .

Sử dụng các phương trình (4), (5) và (6), người ta có thể thiết kế được các biên dạng rotor bơm roots dạng CIC như hình 2.

3. GIA CÔNG ROTOR BẰNG MÁY CẮT DÂY

Do biên dạng rotor bơm kiểu roots không thay đổi trên suốt chiều dài của nó và cánh của rotor CIC không có dạng xoắn nên phương pháp gia công phù hợp là sử dụng máy cắt dây. Nghiên cứu sử dụng máy gia công rotor là máy cắt dây DK7730 với các thông số: Kích thước bàn máy: 360x540 (mm); Hành trình gia công: 300x360 (mm); Chiều cao cắt tối đa: 400 (mm); Tải trọng mặt bàn máy: 200 (kg); Tốc độ gia công tối đa: 120 (mm²/phút); Độ bóng bề mặt tốt nhất: Ra 2,5 (μm); Trọng lượng: 1250 (kg).

Đối với gia công trên máy cắt dây, một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng: các thông số công nghệ chính ảnh hưởng tới năng suất và chất lượng gia công gồm: điện áp đánh tia lửa điện

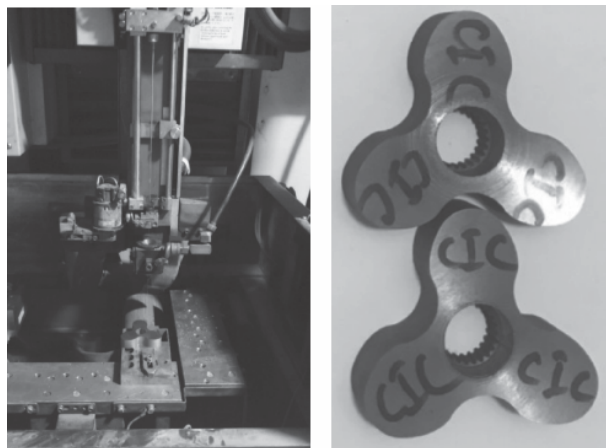
$U_i = 90$ Vôn, độ kéo dài xung $t_i = 0,5s$, khoảng cách xung $t_o = 10s$, tốc độ cắt $v = 110$ mm²/phút và cường độ dòng điện (I) [9-11]. Vật liệu chế tạo rotor là thép không gỉ SUS304. Một số

thành phần hóa học và đặc tính cơ học chính của Inox-SUS304 được cho ở bảng 1:

Bảng 1. Thành phần hóa học của vật liệu SUS 304

Nguyên tố	C	Mn	P	S	Cr	Ni	Si
Tỷ lệ %	0.08	2	0.045	0.03	18	10	1

Hình 3 là hình ảnh cụ thể của máy gia công và mẫu rotor dạng CIC 3 cánh đã gia công.



a) Máy gia công

b) Mẫu rotor

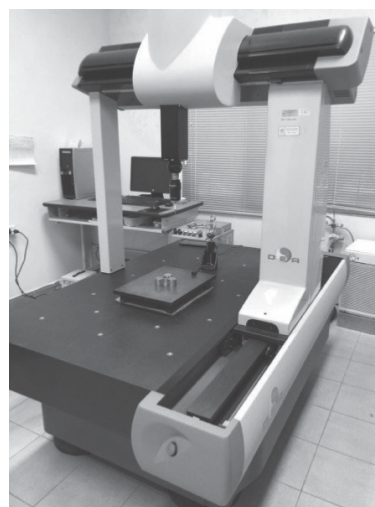
Hình 3. Máy và mẫu sau gia công

4. ĐÁNH GIÁ ĐỘ CHÍNH XÁC BIÊN DẠNG ROTOR CIC BẰNG MÁY ĐO CMM

Kết quả đo biên dạng của rotor sẽ được thực hiện trên máy đo tọa độ CMM loại Global 07.10.07 Image clima Technical data. Kết quả đo biên dạng thực nghiệm sẽ được so sánh với kết quả biên dạng thiết kế theo lý thuyết để đánh giá độ chính xác biên dạng của rotor dạng CIC của bơm roots. Mẫu rotor và thiết bị đo CMM được cho trong hình 4.

Quá trình đo được thực hiện như sau:

- Bước 1: Xác lập hệ trục tọa độ cho rotor cần đo;
- Bước 2: Tiến hành đo;
- Bước 3: Xử lý dữ liệu đo và đánh giá sai số.



Hình 4. Mẫu rotor và máy đo CMM

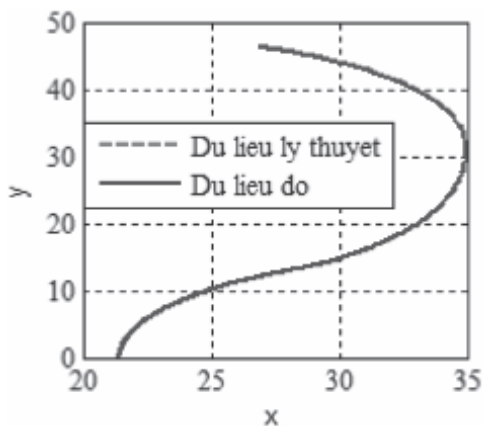
Số liệu sau khi đo được cho dưới dạng tọa độ (véc-tơ định vị r của các điểm đo). Khi đo, tọa độ trong hệ đo của máy không trùng với tọa độ gia công rotor, nên để xử lý số liệu đo, chúng ta cần đưa tọa độ điểm đo về tọa độ gia công. Tọa độ này cũng trùng với tọa độ lý thuyết khi xây dựng phương trình bề mặt. Khi đó, việc xác định sai số sẽ đơn giản hơn.

Theo [13], sau khi xác định được tọa độ điểm M_j của phép đo (các véc-tơ vị trí r_j), ta tiến hành tìm phương trình khoảng cách của các điểm M_j so với đường cong nội suy từ dữ liệu điểm tính từ các phương trình (4), (5) và (6), nó có dạng như sau:

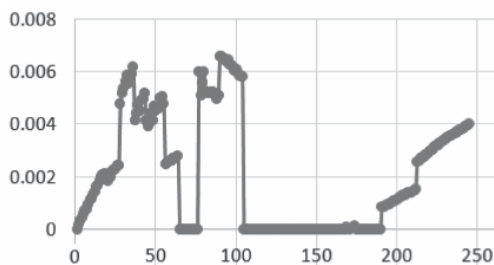
$$\delta_j(u) = |r_j - r_i(u)| \quad (7)$$

Trong đó, $r_j(u)$ véc-tơ vị trí của điểm tương ứng với điểm M_j trên đường nội suy lý thuyết. Giá trị cực tiểu của phương trình (7) chính là sai số giữa biên dạng đo và biên dạng lý thuyết của điểm M_j , nó được xác định từ điều kiện cực trị:

$$\frac{\partial}{\partial u} \delta_j(u) = 0 \quad (8)$$



Hình 5. So sánh biên dạng lý thuyết và biên dạng đo của rotor



Hình 6. Sai số biên dạng lý thuyết và biên dạng đo của rotor

Hình 5 có thể thấy biên dạng rotor lý thuyết và biên dạng rotor đo thực nghiệm sau gia công bằng máy cắt dây ở các điểm khá trùng khớp. Điều này cho thấy gia công rotor dạng CIC bằng máy cắt dây là một phương án phù hợp và cho độ chính xác khá cao. Sai số cụ thể giữa biên dạng lý thuyết và biên dạng ở các điểm được cho trên hình 6. Có thể thấy rằng sai số lớn nhất giữa biên dạng lý thuyết và biên dạng đo của rotor CIC khi gia công bằng máy cắt dây chỉ là 0.007 (mm). Sai số này rất nhỏ, hoàn toàn có thể chấp nhận trong thực tế. Nó còn cho thấy gia công rotor CIC bằng máy cắt dây cho độ chính xác biên dạng cao.

5. KẾT LUẬN

Thiết kế, gia công và đánh giá độ chính xác biên dạng của rotor là những nhiệm vụ cần thiết, mang tính tuần tự và tính phản hồi của quá trình thiết kế và gia công rotor nhằm thỏa mãn mục đích nâng cao khả năng làm việc và hiệu suất của bơm kiểu roots. Nghiên cứu này đã đề xuất một biên dạng mới của rotor bơm kiểu roots trên cơ sở kết hợp các đường cong cung tròn, đường thân khai và cung tròn gọi là rotor dạng CIC. Ngoài ra, nghiên cứu cũng đề xuất và thử nghiệm gia công rotor CIC bằng máy cắt dây và đánh giá độ chính xác biên dạng của rotor sau khi gia công. Trên cơ sở các kết quả của nghiên cứu, một số kết luận được rút ra như sau:

- Kết hợp các đường cong cung tròn, đường thân khai và cung tròn là một phương án khả thi để thiết kế biên dạng rotor mới cho bơm kiểu roots. Biểu thức cho việc xác định dữ liệu điểm của biên dạng rotor được đưa ra rõ ràng ở các biểu thức (4), (5) và (6);

- Sử dụng máy cắt dây là một phương án đơn giản, dễ sử dụng để gia công biên dạng rotor CIC;

- Độ chính xác biên dạng của rotor có thể được đánh giá thông qua so sánh dữ liệu điểm theo lý thuyết và theo kết quả đo thực nghiệm trên máy CMM. Kết quả so sánh cho thấy sự trùng khớp khá cao giữa biên dạng rotor lý thuyết và biên dạng rotor sau gia công (trên 99%). Kết quả này khẳng định gia công rotor CIC trên máy cắt dây là một lựa chọn phù hợp, đảm bảo độ chính xác biên dạng rotor và hoàn toàn khả thi trong sản xuất. ♦

Ngày nhận bài: **12/4/2024**

Ngày phản biện: **28/5/2024**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Faydor L. Litvin and Alfonso Fuentes, 2004. "Gear Geometry and Applied Theory", the second edition, Cambridge University Press.
- [2]. Hwang Y-W, Hsieh C-F, 2006. "Study on high volumetric efficiency of the Roots rotor profile with variable trochoid ratio". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 220(9): 1375-1384. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES176>.
- [3]. Chiu-Fan Hsieh, Yii-Wen Hwang, 2008. "Tooth profile of a Roots rotor with a variable trochoid ratio", Mathematical and Computer Modelling, 48 (1,2), 19-33, <https://doi.org/10.1243/09544062JMES176>.
- [4]. Chiu-Fan Hsieh, 2015. "A new curve for application to the rotor profile of rotary profile of rotary lobe pumps", Mechanism and Machine Theory, (87), 70-81, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.12.018>.
- [5]. Kang, YH., Vu, HH, 2014. "A newly developed rotor profile for lobe pumps: Generation and numerical performance assessment". J Mech Sci Technol, 28, 915-926. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-1159-7>.
- [6]. Ligang Yao, Zhonghe Ye, Jian S. Dai, Haiyi Cai, 2005. "Geometric analysis and tooth profiling of a three-lobe helical rotor of the Roots blower", Journal of Materials Processing Technology, (170)(1-2): 259-267, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.020>.
- [7]. Mimmi G, Pennacchi P, 1999. "Analytical model of a particular type of positive displacement blower". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science.;213(5):517-526. <https://doi.org/10.1243/0954406991522743>.
- [8]. Lê Đức Tùng, 2022; "Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ tới năng suất và độ nhám bề mặt khi gia công bánh răng không tròn trên máy cắt dây", Luận văn Thạc sĩ kỹ thuật Cơ khí, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên.
- [9]. Phan Ngọc Tuấn, Dương Quốc Hiếu, Trần Thế Văn, Vũ Đức Phúc, 2023; "Tối ưu hóa độ nhám bề mặt khi gia công rotor của bơm chân không trên máy cắt dây bằng phương pháp Taguchi", Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên.; 37; 117-122.
- [10]. Vũ Quang Hà, 2012; "Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ công nghệ đến năng suất và chất lượng bề mặt khi gia công bằng phương pháp cắt dây tia lửa điện", Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật ngành Công nghệ Chế tạo máy, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội.
- [11]. Gadakh, V. S, 2012. "Parametric optimization of wire electrical discharge machining using topsis method", Advances in Production Engineering & Management 7, 3, 157-164. <https://doi.org/10.14743/APEM2012.3.138>.
- [12]. Minh-Thuan Hoang, Yu-Ren Wu, 2021. "Error compensation method for milling single-threaded screw rotors with end mill tool", Mechanism and Machine Theory, 157, 104170, <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2020.104170>.
- [13]. Hoàng M-T, Wu Y-R, 2021. "Inter-lobe clearance estimation for twin-screw rotor pairs with point-meshing features". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering.;235(2):560-570. <https://doi.org/10.1177/0954408920971399>.