

Hiện tượng trượt biên dạng răng trong bộ truyền bánh răng cycloid không tròn ăn khớp ngoài

Profile Sliding Phenomenon in the External Non-Circular Gear-Train with Cycloidal Profile

Nguyễn Hồng Thái^{1*}, Nguyễn Thành Trung^{1,2}, Lưu Xuân Nghĩa¹, Nguyễn Thùy Dương¹

¹Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Nghiên cứu Cơ khí, Hà Nội, Việt Nam

*Email: thai.nguyenhong@hust.edu.vn

Tóm tắt

Trong quá trình ăn khớp của cặp bánh răng không tròn ăn khớp ngoài có biên dạng răng là đường cong epicycloid và hypocycloid, biên dạng răng của bánh răng chủ động và bánh răng bị động ăn khớp ngoài với nhau theo nguyên lý ăn khớp của bộ truyền bánh răng không tròn. Do đó, hai biên dạng này là bao hình của nhau dẫn đến trong quá trình ăn khớp cặp biên dạng đối tiếp vừa lăn vừa trượt trên nhau sinh ra vận tốc trượt tương đối giữa hai biên dạng tại điểm ăn khớp. Đây là một trong những nguyên nhân gây ra hiện tượng mòn không đều ở cặp biên dạng đối tiếp, để đánh giá hiện tượng này ngay từ khi thiết kế người ta dùng hệ số trượt. Vì vậy, việc thiết lập biểu thức giải tích nhằm phân tích, đánh giá hiện tượng này là cần thiết, đây chính là mục đích của nghiên cứu này. Ngoài ra, kết quả nghiên cứu của bài báo cũng chỉ ra khi ứng dụng tổ hợp đường cong epicycloid – hypocycloid ít làm biên dạng của cặp bánh răng không tròn có ưu điểm hơn so với biên dạng thân khai là đường cong trượt luôn đối xứng, do đó luôn mòn đều và không cần phải hiệu chỉnh biên dạng thông qua cân bằng hệ số trượt.

Từ khóa: Bánh răng không tròn, biên dạng răng cycloid, epicycloid, hypocycloid, vận tốc trượt.

Abstract

During the matching process of the non-circular gear pair with cycloidal profile (epicycloid – hypocycloid), the profiles of the driving and driven gears are mating following the gearing principle of the non-circular gear train. These profiles are generated by each other, and they will be rolling and sliding when working, producing a relative sliding velocity at the contact point. It is one of the factors causing the irregular wear of the mating gear-profiles. The sliding coefficient has been used to access this phenomenon when designing a gear-train. Therefore, it is vitally necessary to set up analytical formulas to analyze, evaluate the profile sliding process, and it is the goal of this research. Moreover, the achieved results also show that the combination of the epicycloid and hypocycloid profiles has an advantage over the involute profiles, because the sliding curve of the firstly mentioned profiles stays consistently symmetrical, which means both mating profiles are equally worn, and no adjusting of the sliding coefficient is required.

Keywords: Non-circular gear, cycloidal gear profile, epicycloid, hypocycloid, sliding velocity.

1. Đặt vấn đề

Trong quá trình ăn khớp của cặp bánh răng không tròn (BRKT) ăn khớp ngoài có biên dạng răng là tổ hợp của hai đường cong epicycloid và hypocycloid, cặp biên dạng đối tiếp (Γ^1, Γ^2) của hai bánh răng vừa lăn vừa trượt trên nhau tại điểm tiếp xúc K (điểm ăn khớp). Như vậy, tại điểm ăn khớp vận tốc trượt tương đối giữa hai biên dạng đối tiếp theo phương tiếp tuyến chung tt' sẽ gây ra hiện tượng trượt biên dạng, hiện tượng này là một trong những nguyên nhân gây ra mòn không đều của cặp biên dạng đối tiếp [1-3]. Vì vậy, trong quá trình thiết kế, người thiết kế phải hiệu chỉnh các tham số thiết kế biên dạng để cân bằng hệ số trượt (μ_1, μ_2) nhằm đảm bảo cặp biên dạng đối tiếp (Γ^1, Γ) mòn đều [4]. Tuy nhiên, theo tìm hiểu của nhóm tác giả bài viết này khi

nghiên cứu về BRKT cho thấy đến thời điểm hiện tại chưa có một nghiên cứu nào đề cập đến hiện tượng trượt biên dạng. Vấn đề này chỉ được nghiên cứu trong các bộ truyền bánh răng có tỷ số truyền cố định dạng trụ tròn như các nghiên cứu của Wang [5] về hiện tượng trượt biên dạng của cặp bánh răng epicycloid [6, 7] và hypocycloid [8] hay xuất phát từ điều kiện mòn đều để điều chỉnh tham số thiết kế biên dạng răng [9]. Vì vậy, khi ứng dụng tổ hợp hai đường cong epicycloid và hypocycloid làm biên dạng răng của BRKT thì hiện tượng trượt biên dạng gây ra mòn biên dạng răng không đều của cặp biên dạng đối tiếp như thế nào, có cần phải hiệu chỉnh các tham số hình thành biên dạng răng hay không. Đây chính là nội dung nghiên cứu của bài viết này, để giải quyết vấn đề này nội dung bài báo trình bày:

i) Thiết lập phương trình đường ăn khớp thực của cặp BRKT có biên dạng là tổ hợp hai đường cong cycloid với biên dạng phân chân răng là đường cong

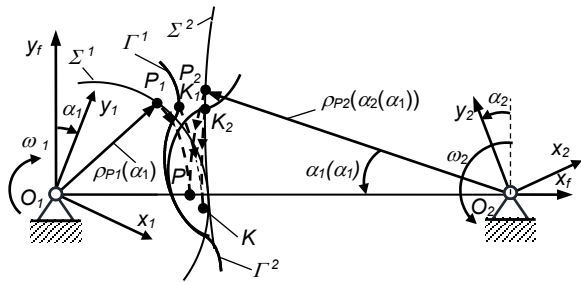
hypocycloid, còn phần biên dạng đỉnh răng là đường cong epicycloid.

ii) Thiết lập phương trình giải tích xác định vận tốc trượt tương đối giữa hai biên dạng đối tiếp tại điểm ăn khớp K, trên cơ sở đó đưa ra các kết luận đánh giá về hiện tượng trượt biên dạng răng khi ứng dụng đường cong cycloid làm biên dạng răng của BRKT.

2. Phân tích động học BRKT

2.1. Thiết lập phương trình đường ăn khớp

Đường ăn khớp ζ_K là quỹ tích các điểm tiếp xúc K của cặp biên dạng đối tiếp (Γ^1, Γ^2) khi cặp bánh răng ăn khớp với nhau.



Hình 1. Sơ đồ thiết lập đường ăn khớp

Nếu gọi $\mathcal{G}_i(O_i, x_i, y_i, z_i)$, $\mathcal{G}_1(O_1, x_1, y_1, z_1)$, $\mathcal{G}_2(O_2, x_2, y_2, z_2)$ lần lượt là hệ quy chiếu cố định gắn liền với giá, hệ quy chiếu động gắn trên bánh răng 1, hệ quy chiếu động gắn trên bánh răng 2. Theo [10] phương trình đường ăn khớp được cho bởi:

$${}^0\mathbf{r}_K(\alpha_1(\theta)) = \mathbf{R}(z, \alpha_1) {}^1\mathbf{r}_K(\theta) \quad (1)$$

trong đó: $\mathbf{R}(z, \alpha_1)$ là ma trận quay quanh trục z_f của hệ quy chiếu \mathcal{G}_f ; còn α_1 là góc quay của bánh răng chủ động, quay quanh tâm O_1 ; ${}^1\mathbf{r}_K(\theta)$ là véc tơ xác định điểm K trong hệ quy chiếu \mathcal{G}_1 với θ là tham số của Γ^1 và được cho bởi phương trình [11]:

$${}^1\mathbf{r}_K(\theta) = \begin{bmatrix} (-1)^g r \cos\left[\left(2z_1 - (-1)^g\right)\theta\right] + r\left[2z_1 - (-1)^g\right] \cos\theta - e \\ -r \sin\left[\left(2z_1 - (-1)^g\right)\theta\right] + r\left[2z_1 - (-1)^g\right] \sin\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

trong công thức (2) :

+ $g = 1$ khi Γ^1 đỉnh răng có biên dạng là đường epicycloid và $g = 0$ khi Γ^1 chân răng có biên dạng là đường hypocycloid.

$$+ \theta \in \left[i \frac{\pi}{z_1}, (i+1) \frac{\pi}{z_1} \right] \text{ với } i = 0 \div (2z_1 - 1)$$

trong trường hợp cung epicycloid thì i chẵn, còn cung hypocycloid thì i lẻ.

+ z_1 là số răng của bánh răng 1.

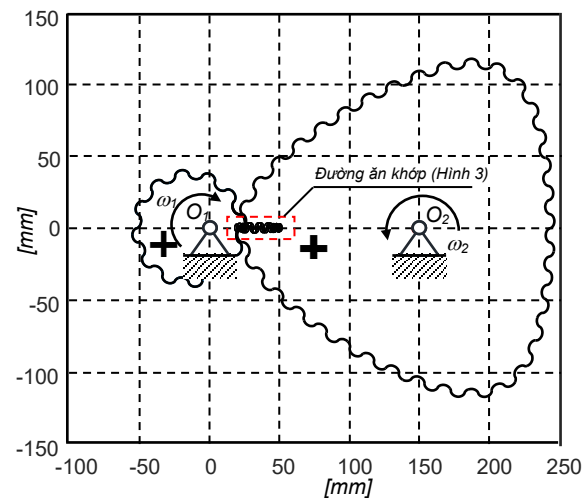
+ e là tâm sai của bánh răng 1 (độ lệch tâm của bánh răng 1).

Ví dụ áp dụng: với bộ thông số thiết kế cặp BRKT cho trong Bảng 1, Hình 2 là cặp BRKT được thiết kế, còn Hình 3 là đường ăn khớp của cặp BRKT được trích dẫn từ Hình 2.

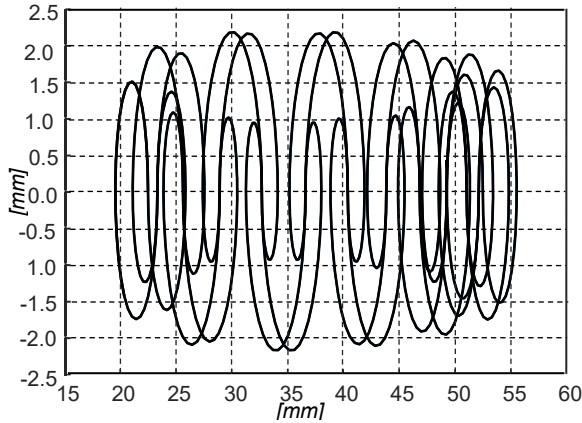
Từ Hình 2 và Hình 3 ta dễ dàng nhận thấy đường ăn khớp của cặp BRKT biên dạng cycloid (epicycloid – hypocycloid) là đường cong kín phức tạp tuần hoàn và đối xứng qua đường nối tâm O_1, O_2 của cặp bánh răng, chứ không phải là đường thẳng như cặp biên dạng thân khai.

Bảng 1. Bảng thông số thiết kế cặp BRKT biên dạng cycloid [11]

Tên gọi	Ký hiệu	Đơn vị	Cặp BRKT	
			BR ₁	BR ₂
Bán kính đường lăn 1 $\Sigma^1(O, R)$	R	mm	37,50
Bán kính đường tròn sinh $\Sigma^S(O_S, r)$	r	mm	1,25
Độ lệch tâm	e	mm	15,00
Modul	m	mm	5,00	5,00
Số răng	z		12,00	36,00
Bước răng trên đường lăn		mm	15,71	15,71
Độ dày răng trên đường lăn		mm	7,85	7,85
Rãnh răng trên đường lăn		mm	7,85	7,85
Khoảng cách trục	a_{12}	mm	148,00	
Số chu kỳ quay của bánh răng 1	n		3,00	1,00



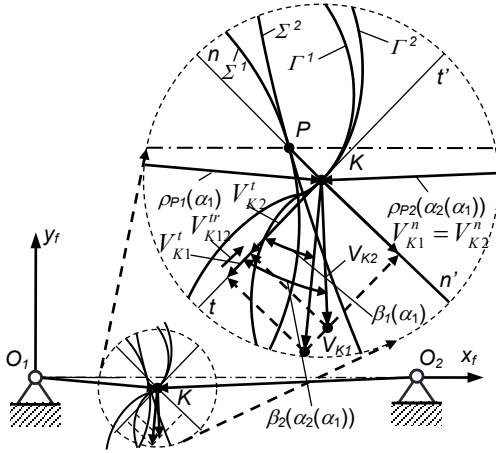
Hình 2. Quá trình ăn khớp của cặp BRKT



Hình 3. Đường ăn khớp z_K của cặp BRKT

2.2. Vận tốc tuyệt đối tại điểm ăn khớp

Xét chuyển động tương đối của cặp BRKT trong hệ quy chiếu gắn liền với giá $\mathcal{G}_f(O_f, x_f, z_f)$.



Hình 4. Vận tốc trượt biên dạng tương đối tại điểm ăn khớp K của cặp BRKT

Tại thời điểm ăn khớp K hai biên dạng đối tiếp Γ^1, Γ^2 sẽ có $K_1 \in \Gamma^1$ và $K_2 \in \Gamma^2 (K_1 \equiv K_2 \equiv K)$ và có vận tốc được cho bởi:

$$\begin{cases} V_{K_1}(\alpha_1) = \omega_1 \rho_{K_1}(\alpha_1) \\ V_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)) = \omega_1 (i_{12}(\alpha_1))^{-1} \rho_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)) \end{cases} \quad (3)$$

trong đó: $\rho_{K_1}(\alpha_1), \rho_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)), i_{12}(\alpha_1)$ lần lượt là bán kính ăn khớp (khoảng cách từ O_1, O_2 đến điểm K), $\omega_2 = -\omega_1 (i_{12}(\alpha_1))^{-1}$ (do cặp bánh răng ăn khớp ngoài), hàm tỷ số truyền của cặp BRKT và được cho bởi:

$$\begin{cases} \rho_{K_1}(\alpha_1) = \left(\left[\mathbf{r}_{K_1}(\alpha_1(\theta)) \right]^T \left[\mathbf{r}_{K_1}(\alpha_1(\theta)) \right] \right)^{0.5} \\ \rho_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)) = \left(\left[\mathbf{r}_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)) - \mathbf{r}_{O_2} \right]^T \left[\mathbf{r}_{K_1}(\alpha_1(\alpha_1)) - \mathbf{r}_{O_2} \right] \right)^{0.5} \\ i_{12}(\alpha_1) = \frac{a_{12}}{\rho_{P_1}(\alpha_1)} - 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Với: } \begin{cases} \mathbf{r}_{O_2} = [a_{12} \quad 0]^T \\ \rho_{P_1}(\alpha_1) = (R^2 - e^2 \sin^2 \alpha_1)^{0.5} - e \cos \alpha_1 \end{cases} \quad (5)$$

Trong công thức (5) R là bán kính đường tròn tâm tích sinh của bánh răng 1 (bánh răng cycloid lệch tâm).

Nếu gọi: nn', tt' lần lượt là pháp tuyến và tiếp tuyến chung của Γ^1, Γ^2 tại điểm ăn khớp K (xem Hình 4). Khi đó tại điểm ăn khớp K hai biên dạng Γ^1, Γ^2 vừa lăn vừa trượt trên nhau và gây ra vận tốc trượt tương đối $V_{K_{12}}^r(\alpha_1), V_{K_{21}}^r(\alpha_2(\alpha_1))$ theo phương tiếp tuyến tt' :

$$\begin{cases} V_{K_{12}}^r(\alpha_1) = V_{K_1}^t(\alpha_1) - V_{K_2}^t(\alpha_2(\alpha_1)) \\ V_{K_{21}}^r(\alpha_2(\alpha_1)) = V_{K_2}^t(\alpha_2(\alpha_1)) - V_{K_1}^t(\alpha_1) \end{cases} \quad (6)$$

Với: $V_{K_{12}}^r(\alpha_1), V_{K_{21}}^r(\alpha_2(\alpha_1))$ lần lượt là vận tốc trượt của Γ^1 so với Γ^2 và của Γ^2 so với Γ^1 tại điểm ăn khớp K ; $V_{K_1}^t(\alpha_1), V_{K_2}^t(\alpha_2(\alpha_1))$ lần lượt là hình chiếu của V_{K_1}, V_{K_2} lên phương tiếp tuyến chung tt' và được cho bởi:

$$\begin{cases} V_{K_1}^t(\alpha_1) = V_{K_1}(\alpha_1) \cos \beta_1(\alpha_1) \\ V_{K_2}^t(\alpha_2(\alpha_1)) = V_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)) \cos \beta_2(\alpha_2(\alpha_1)) \end{cases} \quad (7)$$

Với $\beta_1(\alpha_1), \beta_2(\alpha_2(\alpha_1))$ là góc hợp bởi $V_{K_1}(\alpha_1), V_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1))$ với tiếp tuyến tt' và được cho bởi:

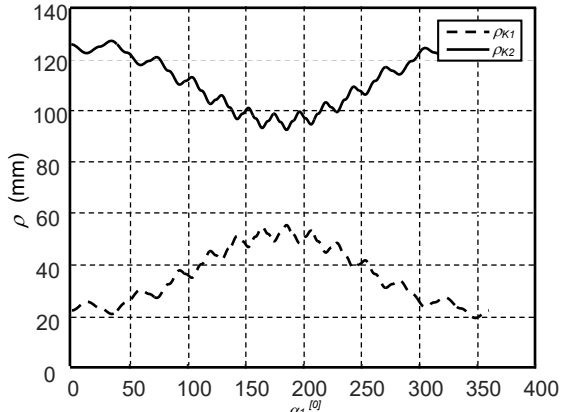
$$\begin{cases} \beta_1(\alpha_1) = \frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{\bar{n}_K(\alpha_1) \bar{V}_{K_1}(\alpha_1)}{|\bar{n}_K(\alpha_1)| |\bar{V}_{K_1}(\alpha_1)|} \right) \\ \beta_2(\alpha_2(\alpha_1)) = \frac{\pi}{2} - \arccos \left(\frac{\bar{n}_K(\alpha_1) \bar{V}_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1))}{|\bar{n}_K(\alpha_1)| |\bar{V}_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1))|} \right) \end{cases} \quad (8)$$

trong công thức (8):

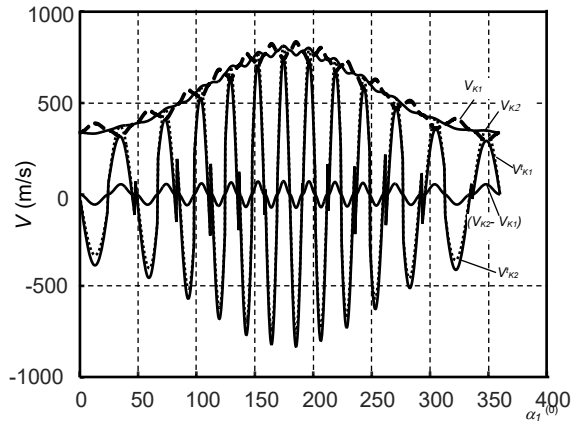
$$\mathbf{n}_K(\alpha_1) = [(x_K(\alpha_1) - \rho_P) \quad y_K(\alpha_1)]^T$$

Ví dụ áp dụng: với bộ thông số thiết kế ở Bảng 1, Hình 5 là đồ thị mô tả bán kính $\rho_{K_1}(\alpha_1), \rho_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1))$ theo góc quay α_1 của bánh răng 1, còn Hình 6 là đồ thị vận tốc $V_{K_1}(\alpha_1), V_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)), (V_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)) - V_{K_1}(\alpha_1)), V_{K_1}^t(\alpha_1), V_{K_2}^t(\alpha_2(\alpha_1))$ khi bánh răng 1 quay với vận tốc góc $\omega_1 = 15$ (rad/s).

Từ Hình 5, Hình 6 dễ dàng nhận thấy mặc dù $\rho_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)) > \rho_{K_1}(\alpha_1)$, nhưng do bánh răng 2 quay chậm hơn bánh răng 1 theo hàm truyền $i_{12}(\alpha_1)$. Do đó, $V_{K_2}(\alpha_2(\alpha_1)) \neq V_{K_1}(\alpha_1)$ không nhiều dẫn đến $V_{K_1}^t(\alpha_1), V_{K_2}^t(\alpha_2(\alpha_1))$ xấp xỉ nhau, đây chính là ưu điểm của loại biên dạng này.



Hình 5. Bán kính cực $\rho_{K1}(\alpha_1)$ $\rho_{K2}(\alpha_2(\alpha_1))$ theo góc quay α_1



Hình 6. Vận tốc V_{K1} , V_{K2} , $(V_{K2} - V_{K1})$, V_{K1}^t , V_{K2}^t theo góc quay α_1

2.3. Hệ số trượt biên dạng

Khi $K \neq P$ (điểm ăn khớp không trùng với tâm ăn khớp) trong quá trình ăn khớp cặp biên dạng đối tiếp Γ^1 và Γ^2 luôn có hiện tượng trượt biên dạng. Chính hiện tượng này gây ra mòn không đều ở biên dạng của hai bánh răng. Để đánh giá hiện tượng này người ta sử dụng hệ số trượt biên dạng μ trong quá trình ăn khớp. Như vậy, nếu gọi $\mu_1(\alpha_1)$, $\mu_2(\alpha_2(\alpha_1))$ lần lượt là hệ số trượt biên dạng của bánh răng 1 so với bánh răng 2 và của bánh răng 2 so với bánh răng 1 theo góc quay của trục dẫn động, khi đó:

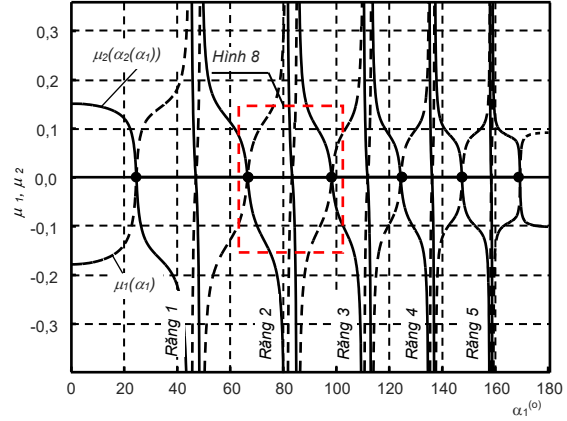
$$\begin{cases} \mu_1(\alpha_1) = V_{K12}^{tr}(\alpha_1)(V_{K1}^t(\alpha_1))^{-1} \\ \mu_2(\alpha_2(\alpha_1)) = V_{K21}^{tr}(\alpha_1)(V_{K2}^t(\alpha_2(\alpha_1)))^{-1} \end{cases} \quad (9)$$

Thay (3, 4, 8) vào hệ (9) ta có:

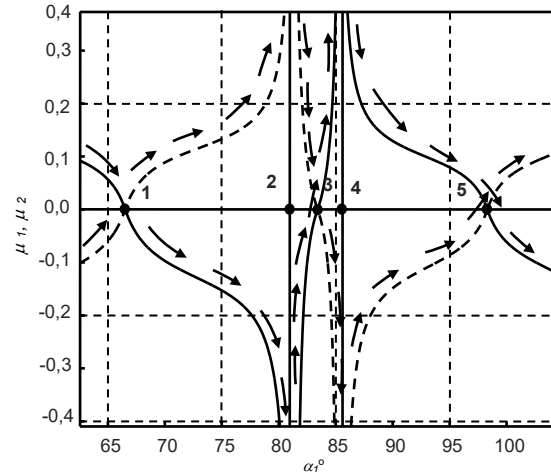
$$\begin{cases} \mu_1(\alpha_1) = 1 - (i_{12}(\alpha_1))^{-1} \frac{\rho_{K2}(\alpha_2(\alpha_1)) \cos \beta_2(\alpha_2(\alpha_1))}{\rho_{K1}(\alpha_1) \cos \beta_1(\alpha_1)} \\ \mu_2(\alpha_2(\alpha_1)) = 1 - (i_{12}(\alpha_1)) \frac{\rho_{K1}(\alpha_1) \cos \beta_1(\alpha_1)}{\rho_{K2}(\alpha_2(\alpha_1)) \cos \beta_2(\alpha_2(\alpha_1))} \end{cases} \quad (10)$$

Hệ phương trình (10) xác định hệ số trượt biên dạng của bánh răng 1 so với bánh răng 2 trong quá trình ăn khớp. Áp dụng với bộ thông số thiết kế cho ở Bảng 1 và khi dẫn động bánh răng 1 với vận tốc góc

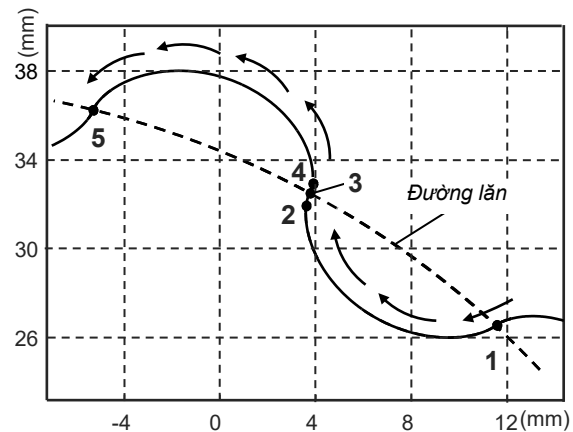
$\omega_1 = 15 \text{ rad/s}$, khi đó đồ thị Hình 7 là đường cong trượt $\mu_1(\alpha_1)$, $\mu_2(\alpha_2(\alpha_1))$ tương ứng với góc quay của bánh răng 1 từ 0° đến 180° , còn đồ thị Hình 8 (phóng to) được trích dẫn từ Hình 7 khi toàn bộ biên dạng răng số 2 của bánh răng 1 tham gia ăn khớp (xem Hình 9).



Hình 7. Hệ số trượt $\mu_1(\alpha_1)$, $\mu_2(\alpha_2(\alpha_1))$ theo góc quay α_1 của bánh răng chủ động



Hình 8. Hệ số trượt $\mu_1(\alpha_1)$, $\mu_2(\alpha_2(\alpha_1))$ theo góc quay α_1 tại răng số 2 của bánh răng 1



Hình 9. Quá trình ăn khớp trên biên dạng răng số 2 của bánh răng 1

Từ Hình 8 nhận thấy với chiều quay cho trên Hình 2, đường cong trượt $\mu_1(\alpha_1)$ đi từ $+\infty$ đến $-\infty$ còn đường cong trượt $\mu_2(\alpha_1)$ thì ngược lại đi từ $-\infty$ đến $+\infty$ khi quá trình ăn khớp diễn ra bắt đầu từ vị trí '1' đến '5' trọn một bước răng của bánh răng 1 (răng số 2) (xem Hình 9).

3. Phân tích và thảo luận

Từ Hình 7 và Hình 8 ta thấy đường cong trượt càng ngày càng sát nhau là do vị trí các răng của bánh răng 1 tham gia quá trình ăn khớp dần dần cách xa tâm quay. Do đó, những răng ở phía xa tâm quay sẽ nhanh mòn hơn ở phía gần tâm quay, đây chính là nhược điểm của loại biên dạng này.

Từ Hình 9 ta nhận thấy:

- Tại vị trí số '1', '3', '5' điểm ăn khớp K của Γ' trùng với điểm P (tâm ăn khớp) của đường lăn điều đó có nghĩa $K_1 \equiv K_2 \equiv P$ khi đó $V_{K12}^{tr}(\alpha_1) = 0, V_{K12}^{nr}(\alpha_1) = 0$ (cặp biên dạng đối tiếp của bánh răng 1 và bánh răng 2 chỉ có lăn mà không có trượt) tiếp tuyến chung tt' vuông góc với đường nối tâm O_1O_2 (xem vị trí '1', '3', '5' trên Hình 8).

- Tại vị trí '2' và '4' trên phần biên dạng cạnh răng của răng số 2 bánh răng 1, ta nhận thấy tiếp tuyến chung tt' trùng với đường nối tâm O_1O_2 dẫn đến góc

$$\cos \beta_2(\alpha_2(\alpha_1)) = \cos \beta_1(\alpha_1) = \frac{\pi}{2} \text{ làm cho } \mu_1(\alpha_1) \rightarrow \infty, \mu_2(\alpha_1) \rightarrow \infty \text{ (xem Hình 8).}$$

Như vậy, ta có:

$$\begin{cases} \cos \beta_2(\alpha_2(\alpha_1)) \neq 0 \\ \cos \beta_1(\alpha_1) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Biến đổi (11) ta có:

$$\begin{cases} y_{K2}(\alpha_2(\theta))y'_{K1}(\alpha_1(\theta)) + (x_{K2}(\alpha_2(\theta)) - a_{12})x_{K1}(\alpha_1(\theta)) \neq 0 \\ y_{K1}(\alpha_1(\theta))y'_{K1}(\alpha_1(\theta)) + x_{K1}(\alpha_1(\theta))x'_{K1}(\alpha_1(\theta)) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Giải hệ phương trình (12) xác định được vị trí của điểm '2' và '4' trên từng răng. Từ đó, có thể hiệu chỉnh tham số thiết kế để tại hai điểm '2' và '4' sao cho $\cos \beta_2(\alpha_2(\alpha_1)) \neq \frac{\pi}{2}, \cos \beta_1(\alpha_1) \neq \frac{\pi}{2}$ là các vấn đề nêu trên được giải quyết.

4. Kết luận

Từ những phân tích và thảo luận ở mục 3 của nghiên cứu này, cho thấy khi ứng dụng đường cong cycloid (epicycloid – hypocycloid) làm biên dạng răng của BRKT thì hệ số trượt $\mu_1(\alpha_1), \mu_2(\alpha_1)$ luôn đối xứng qua trục hoành trong quá trình ăn khớp (Hình 7, Hình 8). Do đó, cặp biên dạng đối tiếp luôn mòn đều dẫn đến không cần phải cân bằng hệ số trượt như đối với biên dạng thân khai [4] khi thiết kế hình học biên dạng răng sau khi hiệu chỉnh pháp tuyến tại 2 điểm

'2' và '4', đây cũng chính là điểm mới được chỉ ra bởi nghiên cứu này. Ngoài ra, từ kết quả nghiên cứu ở bài báo này sẽ là cơ sở để tiếp tục các nghiên cứu sâu hơn đối với loại biên dạng này khi ứng dụng làm biên dạng răng của BRKT như: tập trung ứng suất, biến dạng, tróc rỗ bề mặt răng, hiện tượng mỏi, ma sát giữa cặp biên dạng đối tiếp và chế độ bôi trơn v.v..

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài cấp Bộ, Mã số B2019-BKA-09.

Tài liệu tham khảo

- [1] Faydor L. Litvin, Alfonso Fuentes, Gear Geometry and Applied Theory, Cambridge University Press (2004).
- [2] Nguyễn Xuân Lạc, Nguyên lý máy chuyên nghiệp, Nhà xuất bản Đại học Bách Khoa Hà Nội, 1969.
- [3] David H. Myszka, Machines and mechanisms: applied kinematic analysis, Prentice Hall (2012).
- [4] Đinh Gia Tường, Trần Doãn Tiến, Nguyễn Xuân Lạc, Nguyễn Lý Máy, Nhà xuất bản Đại học và Trung học chuyên nghiệp (1970).
- [5] Jian Wang, Shanming Luo, Yue Wu, A Method for the Preliminary Geometric Design of Gear Tooth Profiles With Small Sliding Coefficients, Journal of Mechanical Design, 132 (5) (2010), 054501 (1-8). <http://doi.org/10.1115/1.4001410>
- [6] Lozica Ivanović, Danica Josifović, Specific Sliding of Trochoidal Gearing Profile in the Gerotor Pumps, FME Transactions, Vol 34. No 3 (2006) 121-127.
- [7] Lozica Ivanović, Danica Josifović, A. ILIć, B. Stojanovic, Tribological aspect of the kinematical analysis at trochondal gearing in contact, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 17, No 1, (2011) 37-47.
- [8] Nguyen Hong Thai, Truong Cong Giang, The Influence of the Design parameters on the Profile sliding in an internal hypocycloid, Vietnam Journal of Science and Technology 56 (4) (2018) 482-491.
- [9] Nguyen Hong Thai, Truong Cong Giang, The correction of the addenda of the internal gear in an oil hypocycloid pump to achieve equal wear rates, Journal of Science and Technology, No.133, (2019) 021-027.
- [10] F.L. Litvin, Jan Lu, New Methods for Improved Double Circular-Arc Helical Gears, Report Army Research Laboratory, NASA (1997).
- [11] Nguyễn Hồng Thái, Nguyễn Thành Trung, Lưu Xuân Nghĩa, Nguyễn Thùy Dương, Tổng hợp bộ truyền bánh răng không tròn ăn khớp ngoài biên dạng xyclôit, Tạp chí Khoa học và Công nghệ các trường Đại học kỹ thuật, số 145, (2020) 33-39.