

A SIMPLE APPROACH IN BALANCING SLIDER-CRANK MECHANISM APPLIED TO MACHINE DESIGN

Pham Van Hiep^{1,2*}, Nguyen Cong Hong Phong^{1,2}

¹PHENIKAA School of Engineering - PHENIKAA University

²PHENIKAA Research and Technology Institute (PRATI), A&A Green Phoenix Group JSC

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 09/7/2025 Revised: 21/11/2025 Published: 25/11/2025 KEYWORDS Four-bar linkage Slider-crank mechanism Mechanism balancing Machine design Counterweight design	This study presents a simple approach for balancing the slider-crank mechanism that is transformed by four-bar linkage mechanism, applied to design the piston-cylinder mechanism. Due to the shaking force acting on the mechanism frame, the slider-crank mechanism is vibrated during its operation which results in reducing the machine performance. To balance mechanism, the shaking force is minimized by using a counterweight. The counterweight is designed and located at the opposite side of the crank part to balance the shaking force during the mechanism operation. The shaking force equations are established to investigate the influence of counterweight parameters on the shaking force. The shape and size of suitable counterweight are determined based on the simulation results. The single piston-cylinder mechanism with suitable counterweight is designed following the simulation result to validate the calculation process. Finally, the counterweight design flow chart is expressed, which can be used to balance any slider-crank mechanism applied to machine design.

CÂN BẰNG CƠ CẤU TAY QUAY - CON TRƯỢT ỨNG DỤNG TRONG THIẾT KẾ MÁY

Phạm Văn Hiệp^{1,2,*}, Nguyễn Công Hồng Phong^{1,2}

¹Trường Kỹ thuật Phenikaa - Đại học Phenikaa

²Viện Nghiên cứu và Công nghệ Phenikaa - Tập đoàn Phượng Hoàng Xanh A&A

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 09/7/2025 Ngày hoàn thiện: 21/11/2025 Ngày đăng: 25/11/2025 TỪ KHÓA Cơ cấu bốn khâu bản lề Tay quay con trượt Cân bằng cơ cấu máy Thiết kế máy Thiết kế đối trọng	Nội dung bài báo trình bày phương pháp đơn giản trong việc cân bằng cơ cấu tay quay - con trượt là một dạng biến thể của cơ cấu bốn khâu bản lề, ứng dụng trong thiết kế cơ cấu piston - xy lanh. Do ảnh hưởng của lực rung động tác dụng lên khung cơ cấu, cơ cấu tay quay - con trượt bị rung ảnh hưởng đến khả năng hoạt động của máy. Để cân bằng cơ cấu, các lực rung động gây mất cân bằng được khử bởi đối trọng. Đối trọng được thiết kế cố định ở phía đối diện trên tay quay nhằm cân bằng các lực rung động trong quá trình hoạt động. Công thức của lực rung động được thiết lập để xác định được hình dạng và kích thước phù hợp của đối trọng. Cơ cấu piston - xy lanh với đối trọng được thiết kế dựa trên kết quả mô phỏng đã chứng minh cho quy trình tính toán. Dựa trên kết quả tính toán và mô phỏng để xây dựng sơ đồ thiết kế đối trọng phù hợp với từng ứng dụng của cơ cấu tay quay - con trượt trong thiết kế máy.

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13201>

* Corresponding author. Email: hiep.phamvan@phenikaa-uni.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong thiết kế máy, cân bằng máy đóng vai trò quan trọng trong việc ổn định và tối ưu hiệu suất làm việc của cơ cấu máy, đặc biệt đối với các cơ cấu máy làm việc ở tốc độ cao. Cơ cấu bốn khâu bản lề là một trong những cơ cấu được ứng dụng phổ biến trong thiết kế máy. Trong đó, cơ cấu tay quay - con trượt là dạng biến thể của cơ cấu bốn khâu bản lề được sử dụng rộng rãi trong các thiết kế máy như động cơ đốt trong, tay truyền các máy đập, máy cưa,... Gần đây, cơ cấu tay quay - con trượt được phát triển mở rộng ứng dụng sang các lĩnh vực phát triển các cơ cấu quét ảnh ứng dụng trong y sinh [1], [2] và công nghiệp [3], [4]. Ngoài ra, cơ cấu tay quay - con trượt còn được ứng dụng thiết kế cơ cấu của robot di chuyển [5].

Đặc thù của cơ cấu tay quay - con trượt là có các lực mất cân bằng xảy ra trong quá trình hoạt động, điều này gây ra rung động của cơ cấu hay của toàn máy. Để nâng cao hiệu quả làm việc và mở rộng ứng dụng của cơ cấu tay quay - con trượt, có rất nhiều nghiên cứu đưa ra giải pháp giảm rung động trong quá trình hoạt động của cơ cấu và được chia thành ba nhóm chính. Nhóm một là sử dụng các đối trọng gắn vào các khâu chuyển động của cơ cấu [6] - [8]. Dựa trên việc phân bố khối lượng, sử dụng đối trọng nhằm giảm rung động là phương pháp giúp tạo ra các thiết kế đơn giản. Nhóm thứ hai là tự cân bằng thông qua việc sử dụng các cơ cấu giống hệt nhau được sắp xếp hoạt động ở các phương khác nhau để triệt tiêu các lực gây mất cân bằng [9], [10]. Hướng thứ ba là sử dụng thêm cơ cấu cam để điều khiển quá trình chuyển động của cơ cấu tay quay - con trượt [11], [12]. Biên dạng của cơ cấu cam được thiết kế đảm bảo cơ cấu hoạt động ổn định trong các điều kiện làm việc cụ thể.

Nội dung của bài báo trình bày về ứng dụng của cơ cấu tay quay - con trượt trong thiết kế piston - xy lanh. Cơ cấu mất cân bằng do lực rung động tác dụng lên khâu cố định. Dựa theo nguyên lý d'Alembert tổng lực tác dụng lên khâu cố định được xác định, đây chính là lực gây ra rung động. Để giảm thiểu rung động, đối trọng được thiết kế đặt cố định phía đối diện với khớp quay của tay quay. Hình dáng và kích thước của đối trọng được xác định để đảm bảo tổng lực rung động tác dụng lên khâu cố định là nhỏ nhất. Các kết quả tính toán được mô phỏng, qua đó thiết kế được đối trọng phù hợp cho cơ cấu piston - xy lanh. Dựa trên kết quả mô phỏng, sơ đồ thiết kế đối trọng được trình bày. Theo đó, có thể thiết kế đối trọng cho cơ cấu tay quay - con trượt bất kỳ để mở rộng ứng dụng của cơ cấu trong thiết kế máy.

Nội dung còn lại của bài báo được trình bày như sau: phần 2 phương pháp nghiên cứu đưa ra sơ đồ của cơ cấu tay quay - con trượt từ đó làm cơ sở để xây dựng các công thức tính toán lực gây ra rung động. Phần 3 kết quả và bàn luận đưa ra các kết quả so sánh lực rung động tác dụng lên cơ cấu tay quay - con trượt khi có đối trọng và không có đối trọng, qua đó thiết lập được sơ đồ thiết kế đối trọng cho từng trường hợp cơ cấu cụ thể. Cuối cùng, kết luận về tác dụng của đối trọng trong thiết kế cơ cấu tay quay - con trượt được trình bày ở phần 4.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Sơ đồ cơ cấu tay quay - con trượt

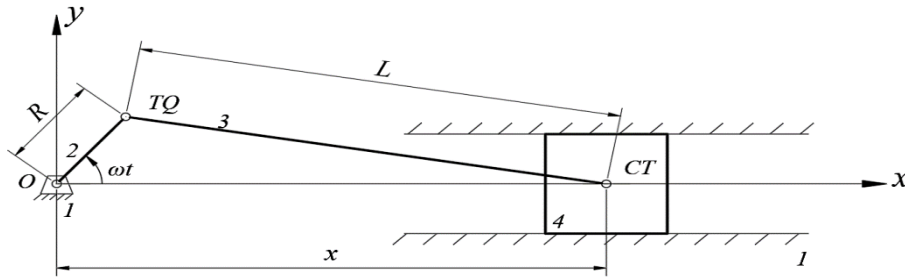
Hình 1 chỉ ra sơ đồ của cơ cấu tay quay - con trượt. Tay quay 2 thực hiện chuyển động quay tròn trong khi đó con trượt 4 thực hiện chuyển động tịnh tiến qua lại. Tay biên 3 được sử dụng để truyền chuyển động giữa tay quay 2 và con trượt 4. Gọi R , L , x lần lượt là giá trị của bán kính tay quay, chiều dài tay biên và vị trí tức thời của con trượt như trên Hình 1. Khi tay quay chuyển động với vận tốc góc không đổi ω thì vị trí tức thời của con trượt được xác định theo công thức (1).

$$x = R \cos \omega t + L \sqrt{1 - \left(\frac{R}{L} \sin \omega t\right)^2} \cong L - \frac{R^2}{4L} + R \left(\cos \omega t + \frac{R}{4L} \cos 2\omega t \right) \quad (1)$$

Vận tốc (v_{ct}) và gia tốc (a_{ct}) của con trượt được tính bằng đạo hàm bậc nhất và bậc hai của x và được xác định lần lượt theo công thức (2) và (3).

$$v_{ct} = \dot{x} \cong -R\omega \left(\sin \omega t + \frac{R}{2L} \sin 2\omega t \right) \quad (2)$$

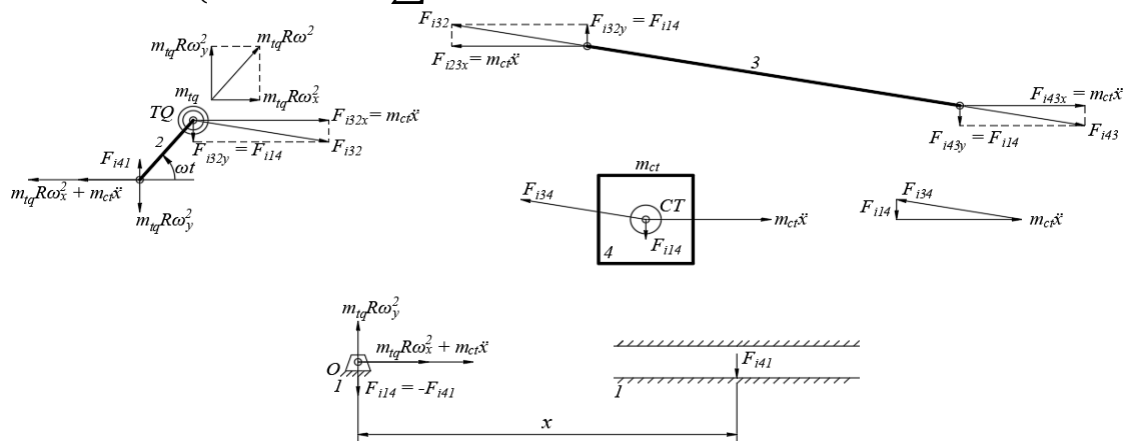
$$a_{ct} = \ddot{x} \cong -R\omega^2 \left(\cos \omega t + \frac{R}{L} \cos 2\omega t \right) \quad (3)$$



Hình 1. Sơ đồ cơ cấu tay quay con trượt. 1 - khâu cố định, 2 - tay quay (TQ), 3 - tay biên, 4 - con trượt (CT)

Lực tác dụng lên cơ cấu tay quay - con trượt trong quá trình hoạt động được xác định dựa theo nguyên lý d'Alembert. Hình 2 chỉ ra mô hình phân tách các khâu tự do của cơ cấu tay quay - con trượt. Lực gây ra rung động là lực mất cân bằng tác dụng lên khâu cố định 1. Khi đó, lực mất cân bằng là tổng hợp các lực tác dụng lên khâu cố định 1 và được xác định theo công thức (4).

$$\begin{cases} \sum F_x = -m_{tq}R\omega^2 \cos \omega t - m_{ct}R\omega^2 \left(\cos \omega t + \frac{R}{L} \cos 2\omega t \right) \\ \sum F_y = -m_{tq}R\omega^2 \sin \omega t \end{cases} \quad (4)$$



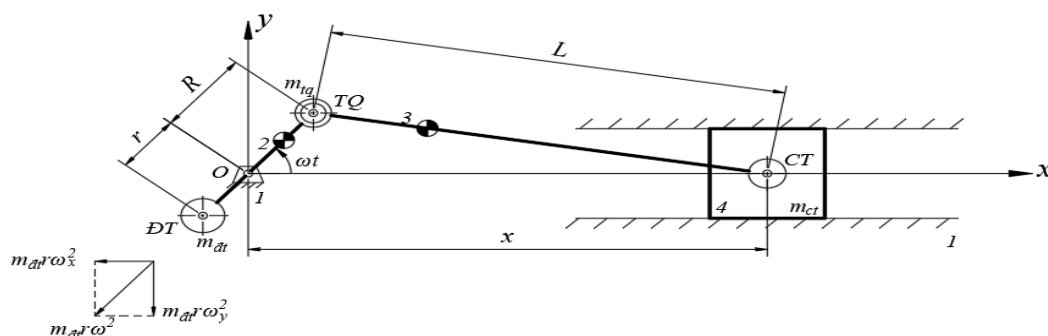
Hình 2. Mô hình phân tách các khâu tự do của cơ cấu tay quay con trượt theo nguyên lý d'Alembert (m_{tq} - khối lượng tập trung của tay quay, m_{ct} - khối lượng tập trung của con trượt)

2.2. Sơ đồ tay quay con trượt có đối trọng

Để giảm ảnh hưởng của lực mất cân bằng tác dụng lên cơ cấu trong quá trình làm việc, trên tay quay của cơ cấu được gắn thêm đối trọng như Hình 3. Hình dáng và kích thước của đối trọng được tính toán sao cho tổng lực gây ra rung động sẽ là nhỏ nhất. Đối trọng được đặt ở phía đối diện với khớp quay của tay quay và được thiết kế sao cho khoảng cách từ điểm quay (O) tới trọng tâm của đối trọng (r) là nhỏ nhất để đảm bảo khả năng hoạt động và giảm kích thước tổng thể của toàn cơ cấu máy. Khi đó, tổng lực gây ra rung động được tính theo công thức (5).

$$\begin{cases} \sum F_x = -m_{tq}R\omega^2 \cos \omega t + m_{dt}r\omega^2 \cos \omega t - m_{ct}R\omega^2 \left(\cos \omega t + \frac{R}{L} \cos 2\omega t \right) \\ \sum F_y = -m_{tq}R\omega^2 \sin \omega t + m_{dt}r\omega^2 \sin \omega t \end{cases} \quad (5)$$

Đối trọng khi đó được thiết kế với các thông số để cho tổng lực mất cân bằng theo công thức (5) là nhỏ nhất.



Hình 3. Sơ đồ tay quay con trượt với đối trọng (ĐT): m_{dt} - khối lượng tập trung của đối trọng

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Đối trọng cho cơ cấu piston - xy lanh

Đối trọng được thiết kế cho cơ cấu piston - xy lanh có thông số được trình bày trong Bảng 1. Để thấy được sự thay đổi của tổng lực gây ra rung động lên cơ cấu, tổng lực gây mất cân bằng được tính toán theo công thức (4) ứng với tốc độ quay không đổi tại 1000 và 2000 vòng/phút tương ứng với vận tốc góc ω bằng $\frac{100}{3}\pi$ và $\frac{200}{3}\pi$ rad/s.

Bảng 1. Thông số cơ cấu pít tông - xy lanh

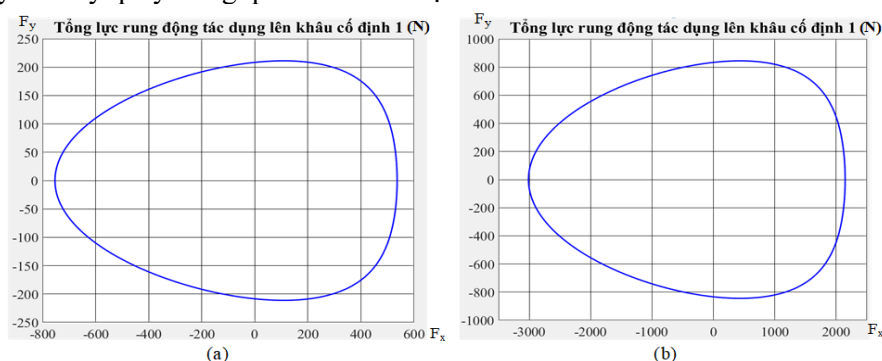
TT	Mô tả	Thông số
1	Bán kính tay quay (R)	35 mm
2	Khối lượng tay quay (m_2)	0,35 kg
3	Chiều dài tay biên (L)	140 mm
4	Khối lượng tay biên (m_3)	0,3 kg
5	Khối lượng pít tông (m_4)	1,03 kg

Dựa trên sự phân bố trọng tâm của tay biên thì khối lượng tập trung tại tay quay (m_{tq}) và con trượt (m_{ct}) lần lượt là:

$$m_{tq} = m_2 + \frac{2}{3}m_3 = 0,55 \text{ kg} \quad (6)$$

$$m_{ct} = m_3 + \frac{1}{3}m_3 = 1,13 \text{ kg} \quad (7)$$

Hình 4 a và b lần lượt chỉ ra tổng lực rung động tác dụng lên khâu cố định 1 ứng với tốc độ quay 1000 và 2000 vòng/phút. Dễ dàng nhận thấy khi tốc độ quay của tay quay tăng lên 2 lần thì tổng lực gây ra rung động tăng lên gần 4 lần. Qua đó có thể kết luận rằng cần phải tối ưu giá trị tốc độ quay của tay quay trong quá trình làm việc của cơ cấu.

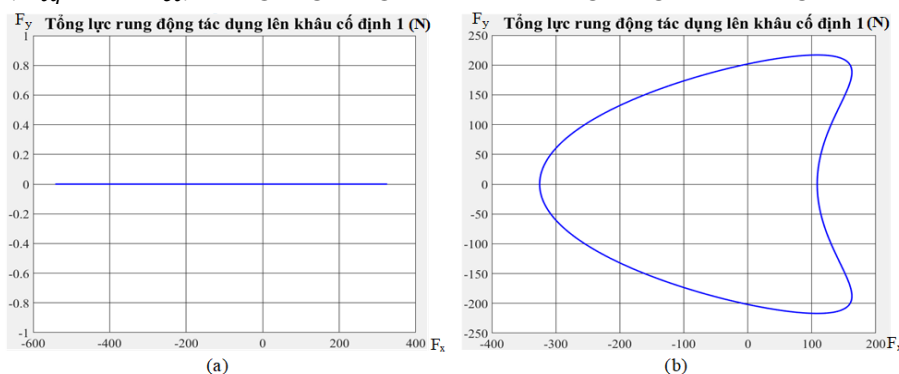


Hình 4. Tổng lực rung động tác dụng lên khâu cố định 1 tại tốc độ quay của tay quay:

(a) 1000 vòng/phút, (b) 2000 vòng/phút

Đối trọng được thiết kế với hình dạng và kích thước phù hợp để giảm tổng lực rung động tác dụng lên khâu cố định 1. Hình 5 chỉ ra tổng lực rung động tác dụng lên khâu cố định 1 với tốc độ

của tay quay tại 1000 vòng/phút. Với đối trọng có thông số $m_{dt}r = m_{tq}R$ thì tổng lực rung động theo phương y bị triệt tiêu. Tuy nhiên khi đó tổng lực rung động theo phương x còn lớn khoảng 900 N, như Hình 5a. Để cơ cấu hoạt động được hiệu quả thì lực rung động theo phương x và y cần được tối ưu để tương đồng giá trị. Hình 5b chỉ ra lực rung động khi thông số của đối trọng là $m_{dt}r = R(m_{tq} + 0,5m_{ct})$ tương ứng với giá trị của lực rung động vào khoảng 460 N.



Hình 5. Tổng lực rung động tác dụng lên khâu cố định 1 tại tốc độ quay của tay quay 1000 vòng/phút với thông số của đối trọng: (a) $m_{dt}r = m_{tq}R$, (b) $m_{dt}r = R(m_{tq} + 0,5m_{ct})$

Khi đó, hình dạng và kích thước của đối trọng được thiết kế với thông số theo công thức (8) để đảm bảo tổng lực rung động tác dụng lên khâu cố định 1 là nhỏ nhất.

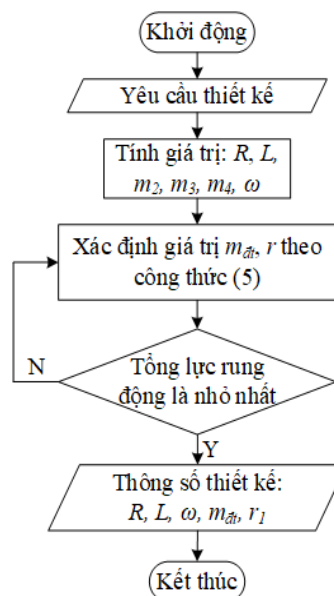
$$m_{dt}r = R(m_{tq} + 0,5m_{ct}) \quad (8)$$

Cơ cấu piston - xy lanh với thông số theo Bảng 1 được thiết kế với đối trọng phù hợp được thể hiện trên Hình 6. Hình dáng của đối trọng và tay biên được tính toán và lựa chọn dựa trên các yêu cầu làm việc, không gian hoạt động, khả năng chịu tải trọng và khả năng gia công cũng như công nghệ lắp ráp cơ cấu.

3.2. Sơ đồ thiết kế đối trọng cho cơ cấu tay quay - con trượt



Hình 6. Cơ cấu piston - xy lanh



Hình 7. Sơ đồ thiết kế đối trọng cho cơ cấu tay quay - con trượt

Hình 7 trình bày sơ đồ các bước thiết kế đối trọng cho cơ cấu tay quay - con trượt. Từ yêu cầu thiết kế sẽ xác định được các giá trị bán kính tay quay (R), khối lượng tay quay (m_2), chiều dài tay biên (L), khối lượng tay biên (m_3), khối lượng con trượt (m_4), và tốc độ quay của tay quay (ω). Sau đó, khối lượng (m_{dt}) và khoảng cách từ tâm quay tay quay tới trọng tâm của đối trọng (r) được xác định theo công thức (5) từ đó sẽ thiết kế được đối trọng. Các giá trị trên được xác định thông qua việc sử dụng phần mềm Matlab để vẽ ra biểu đồ của lực rung động. Thông số m_{dt} và r được kiểm tra lại xem tổng lực rung động là nhỏ nhất sẽ thỏa mãn yêu cầu. Từ đó sẽ thiết kế được cơ cấu tay quay - con trượt với đối trọng phù hợp với các ứng dụng trong thiết kế máy cụ thể.

4. Kết luận

Cân bằng cơ cấu máy chuyển động chiếm một vị trí quan trọng trong thiết kế chế tạo máy. Giảm rung động của cơ cấu máy không những nâng cao khả năng làm việc của cơ cấu mà còn nâng cao tuổi thọ của các cơ cấu máy đó, đặc biệt đối với các cơ cấu máy làm việc ở tốc độ cao hoặc các cơ cấu máy làm việc với độ chính xác cao. Đối với cơ cấu tay quay - con trượt thì thiết kế thêm đối trọng cho tay quay là phương án đơn giản và hiệu quả nhất. Ứng dụng phổ biến nhất của cơ cấu tay quay - con trượt trong thiết kế máy là cơ cấu piston - xy lanh. Từ việc tính toán và mô phỏng đã xây dựng được sơ đồ thiết kế đối trọng cho cơ cấu tay quay - con trượt mở rộng sang ứng dụng trong phát triển cơ cấu quét ảnh tốc độ cao áp dụng trong lĩnh vực y sinh và công nghiệp [1]-[4].

Lời cảm ơn

Tác giả xin gửi lời cảm ơn tới Khoa Cơ khí - Cơ điện tử, Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa và Viện Nghiên cứu và Công nghệ Phenikaa đã hỗ trợ tác giả thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] C. D. Ly, J. Choi, S. Park, S. Mondal, T. H. Vo, H. G. Lim, and J. Oh, "Development of fast photoacoustic and ultrasound imaging system based on slider-crank scanner for small animals and humans study," *Expert Systems with Applications*, vol. 206, 2022, Art. no. 117939.
- [2] N. T. P. Truong, J. Choi, S. Park, C. D. Ly, S.-W. Cho, S. Mondal, H. G. Lim, C.-S. Kim, and J. Oh, "Ultra-widefield photoacoustic microscopy with a dual-channel slider-crank laser-scanning apparatus for in vivo biomedical study," *Photoacoustics*, vol. 23, 2021, Art. no. 100274.
- [3] V. H. Pham, J. Choi, T. H. Vo, D. D. Vu, S. Park, B.-I. Lee, and J. Oh, "An innovative application of double slider-crank mechanism in efficient of the scanning acoustic microscopy system," *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, vol. 52, no. 7, pp. 4066-4076, 2024.
- [4] T. H. Vo, D. D. Vu, J. Choi, S. Park, S. Mondal, B.-I. Lee, and J. Oh, "Development of fast scanning module with a novel bubble solution applied to scanning acoustic microscopy system for industrial nondestructive inspection," *Expert Systems with Applications*, vol. 228, 2023, Art. no. 120273.
- [5] Q. Zhang, Y. Li, J. Wu, and Y.-A. Yao, "Design and analysis of a hexagon rolling mechanism with a center-arranged actuator," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 174, 2022, Art. no. 104910.
- [6] D. Kim, H. Oh, J. Choi, T. H. Vo, D. D. Vu, S. Mondal, V. H. Pham, B.-I. Lee, and J. Oh, "Development of high-speed scanning acoustic microscopy system: Simplified design and stabilization," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 61, 2025, Art. no. 101911.
- [7] D. Campbell, "Balanced slider-crank mechanism," Patent FR 2421301, 1979.
- [8] Y. L. Gheronimus, "An approximate method of calculating a counterweight for the balancing of vertical inertia forces," *Journal of Mechanisms*, vol. 3, no. 4, pp. 283-288, 1968.
- [9] V. Arakelian, "Shaking moment cancellation of self-balanced slider-crank mechanical systems by means of optimum mass redistribution," *Mechanics Research Communications*, vol. 33, no. 6, pp. 846-850, 2006.
- [10] I. Filonov and I. Petrikovetz, "Balancing device of lever mechanisms," Patent SU1296762, pp. 03-15, 1987.
- [11] H. Kato, "Mechanical pressing machine with dynamic balancing device," Google Patents, 1997.
- [12] P. Schrick and B. Hanula, "Free inertia forces balancing piston engine," Patent WO9526474, 1995.