



THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÔ HÌNH MÁY PHAY CNC 4 TRỤC VỚI TRỤC Z ĐỘC LẬP

Cao Văn Thi*, Ngô Hoài Nhiệm, Trương Công Nam

Trường Đại học Cửu Long

*Email: caovanthi@mku.edu.vn

Ngày nhận bài: 18/08/2025; Ngày phản biện: 26/08/2025; Ngày duyệt bài: 15/12/2025

TÓM TẮT

Máy phay CNC 4 trục được chế tạo nhằm nâng cao chất lượng gia công và tối ưu hóa không gian làm việc với kích thước tối đa 300 x 300 x 80 mm. Máy phay CNC 4 trục được phát triển để phục vụ nhu cầu gia công chi tiết có độ phức tạp cao, yêu cầu độ chính xác lớn, phù hợp với các ngành công nghiệp chế tạo khuôn mẫu, sản xuất linh kiện cơ khí chính xác. Nghiên cứu bao gồm các giai đoạn chính: thiết kế cấu hình cơ khí, hệ thống truyền động, hệ thống điều khiển và phần mềm điều khiển CNC. Hệ thống truyền động sử dụng các động cơ servo kết hợp với vít me đai ốc bi nhằm đạt được độ chính xác cao. Bộ điều khiển hệ thống phần mềm cài đặt G-code, cho phép vận hành hoạt động và dễ dàng hiệu chỉnh các tham số gia công. Sau khi chế tạo và thử nghiệm, kết quả cho thấy máy hoạt động ổn định, đảm bảo độ chính xác trong giới hạn cho phép, đáp ứng yêu cầu về bề mặt phẳng, sai số kích thước và hiệu suất hoạt động. Đây là tài liệu không chỉ góp phần nâng cao hiệu quả ứng dụng CNC trong sản xuất cơ khí nhưng còn là nền tảng cho việc phát triển các dòng máy CNC nhỏ gọn, tối ưu chi phí và phù hợp với các doanh nghiệp vừa và nhỏ.

Từ khóa: Máy phay CNC 4 trục, Vít me đai ốc bi, Động cơ servo, Phần mềm điều khiển CNC, G-code

ABSTRACT

4-axis CNC milling machine aims to improve machining quality and optimize working space with maximum size of 300 x 300 x 80 mm. 4-axis CNC milling machine is developed to serve the needs of machining highly complex parts, requiring high precision, suitable for mold manufacturing industries, manufacturing precision mechanical components. The research includes the main stages: mechanical configuration design, transmission system, control system and CNC control software. The transmission system uses servo motors combined with ball screws to achieve high precision. The software system controller installs G-code, allowing operation and easy calibration of machining parameters. After manufacturing and testing, the results showed that the machine operated stably, ensuring accuracy within the allowable limits, meeting the requirements for flat surface, dimensional error and operating performance. This document not only contributes to improving the efficiency of CNC application in mechanical production but also serves as a foundation for the development of compact, cost-optimized CNC machines suitable for small and medium-sized businesses.

Keywords: 4 axis CNC milling machine, Ball screw, Servo motor, CNC control software, G-code.

1. Đặt vấn đề

Công nghệ CNC 4 trục mang lại nhiều lợi thế so với hệ 3 trục truyền thống, đặc biệt trong gia công chi tiết phức tạp, yêu cầu độ chính xác cao. Tuy nhiên, máy CNC công nghiệp có giá thành lớn, khó phù hợp cho mục đích đào tạo. Do đó, việc chế tạo mô hình máy phay CNC 4 trục với giá thành hợp lý, dễ sử dụng, dễ lắp ráp và bảo trì là cấp thiết.

Tại Trường Đại học Cửu Long, nghiên cứu này nhằm chế tạo mô hình CNC 4 trục để:

- Phục vụ giảng dạy CAD/CAM-CNC.
- Thực hành lập trình G-code trực tiếp.
- Trưng bày, quảng bá công nghệ trong các sự kiện, triển lãm.

2. Phương án thiết kế máy phay CNC 4 trục

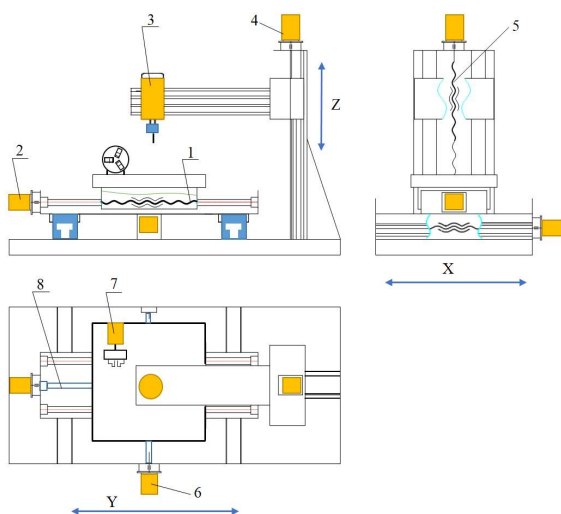
Trên cơ sở phân tích nguyên lý hoạt động máy phay CNC 4 trục, tham khảo các loại máy phay CNC hiện có trên thị trường, chúng tôi đã đưa ra hai phương án thiết kế máy phay CNC 4 trục.

Bảng 1: So sánh ưu và nhược điểm giữa các phương án thiết kế

Phương án	Động cơ dẫn động	Bộ truyền	Ưu và nhược điểm
Phương án 1	Động cơ servo	Trục vít me đai ốc bi	Ưu điểm của kết cấu này: Kết cấu tương đối đơn giản, độ cứng vững cao, cộng đồng mã nguồn mở lớn. Trong kết cấu này thì trọng lượng của trục chính chỉ tác động lên trục Z, không tác động lên các trục còn lại nên độ chính xác gia công theo phương Z để đảm bảo. Nhược điểm: Việc cố định và tạo sự cứng vững của trục Z cần được tính toán kỹ vì vị trí đặt động cơ chính so với khung trục Z tương tự như kết cấu dầm console (công xôn). Nếu khung lắp trục chính bị biến dạng thì dễ dẫn đến sai số gia công cho chi tiết.
Phương án 2	Động cơ bước	Trục vít me đai ốc thường	Ưu điểm: kết cấu máy không quá phức tạp, các hệ thống điều khiển khá phổ biến trên thị trường. Nhược điểm của phương án này: Vì cơ cấu của trục Z được bắt cứng trên cơ cấu của trục X nên sẽ gặp khó khăn trong việc tăng không gian gia công theo phương Z, tức chiều cao của vật thể gia công sẽ bị giới hạn so với phương án 1. Trọng lượng của cụm trục Z có thể gây ra độ võng của trục X nếu kết cấu của trục X không cứng vững.

Từ những phương án thiết kế trên chúng tôi quyết định chọn phương án

thiết kế thứ nhất vì phù hợp với điều kiện hiện có.

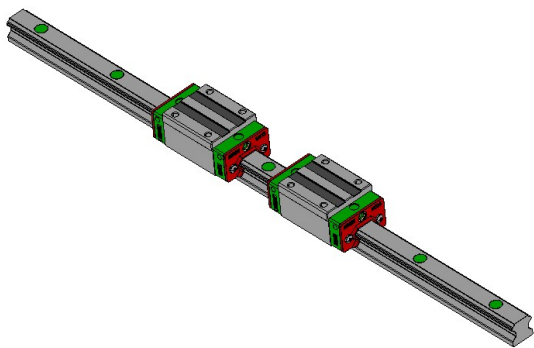


Hình 1. Sơ đồ kết cấu của phương án thiết kế

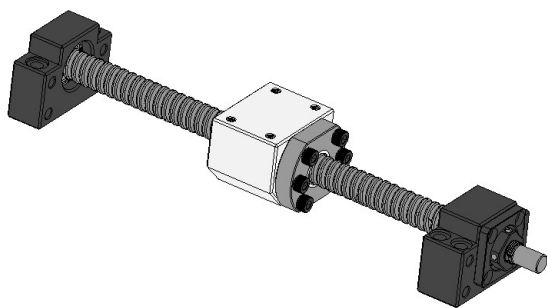
3. Mô hình hóa các chi tiết của máy phay CNC 4 trục và Hệ thống điều khiển máy phay CNC 4 trục

3.1. Mô hình hóa các chi tiết của máy phay CNC 4 trục

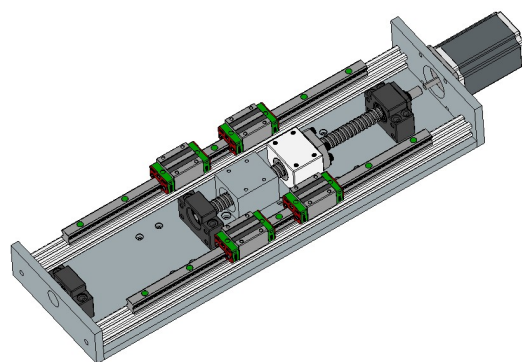
Mô hình hoá các chi tiết 3D bằng phần mềm Autodesk Inventor Professional 2025



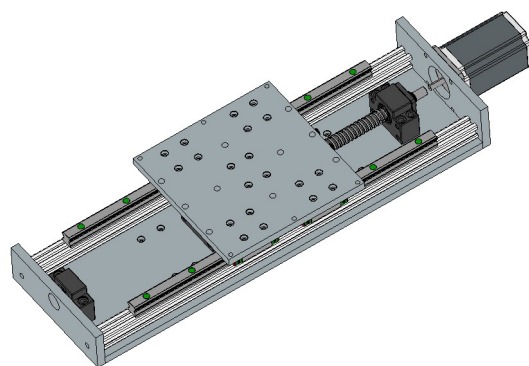
Hình 2. Thanh và con trượt dẫn hướng trên các trục



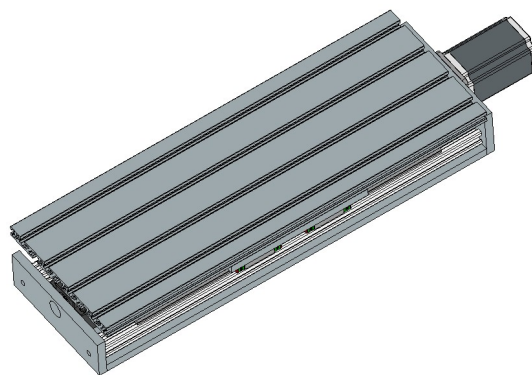
Hình 3. Bộ truyền trục vít me – đai ốc bi



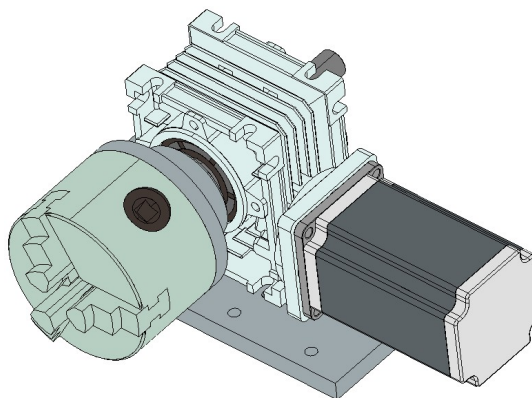
Hình 4. Lắp ráp cụm chi tiết trục X



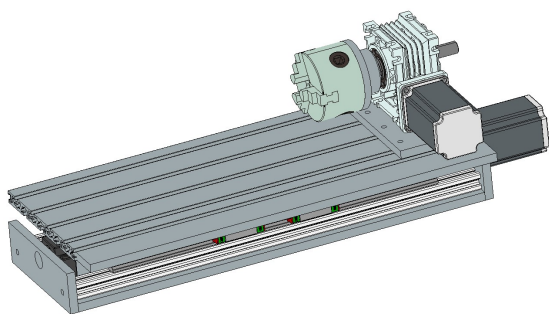
Hình 5. Lắp tấm ghép nối với cụm trục X



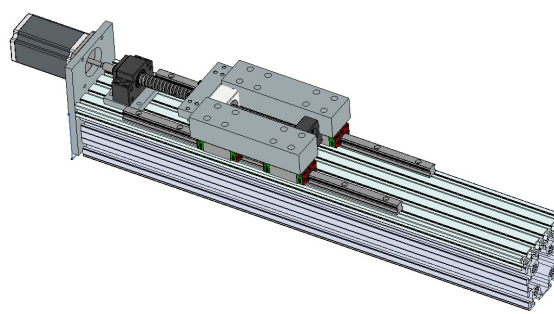
Hình 6. Lắp bàn máy ghép nối với cụm trục X



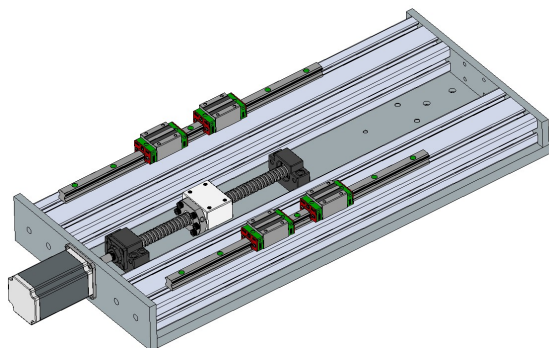
Hình 7. Lắp ghép trục A



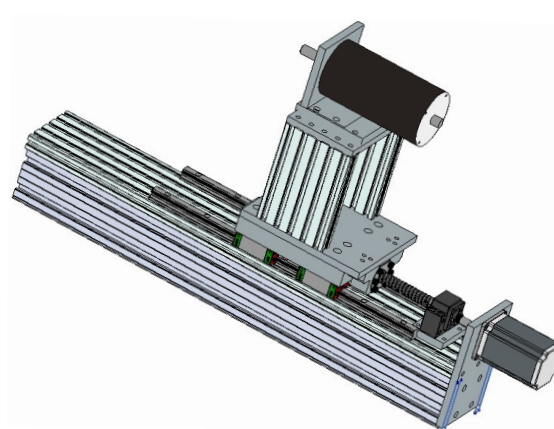
Hình 8. Lắp ghép trục A và trục X



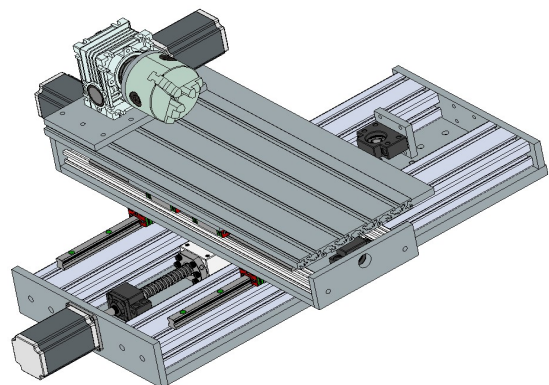
Hình 12. Lắp ráp bộ truyền động trục Z



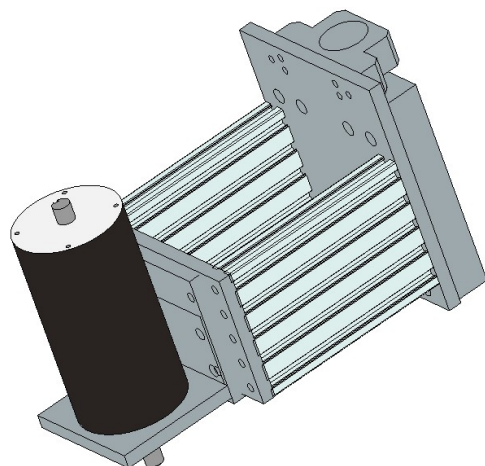
Hình 9. Lắp ráp cụm trục Y



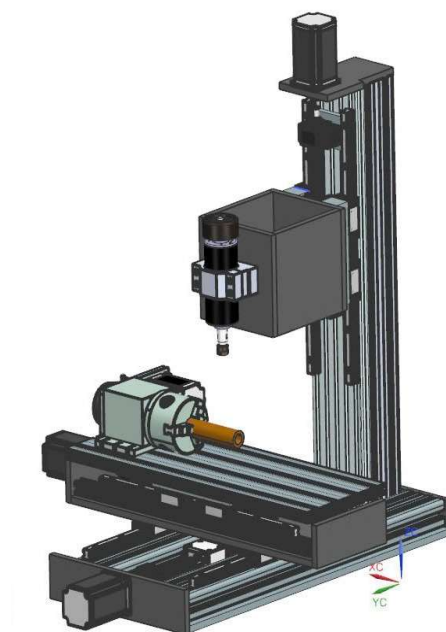
Hình 13. Lắp ráp cụm trục chính và trục Z



Hình 10. Lắp ráp 3 trục X, Y, A

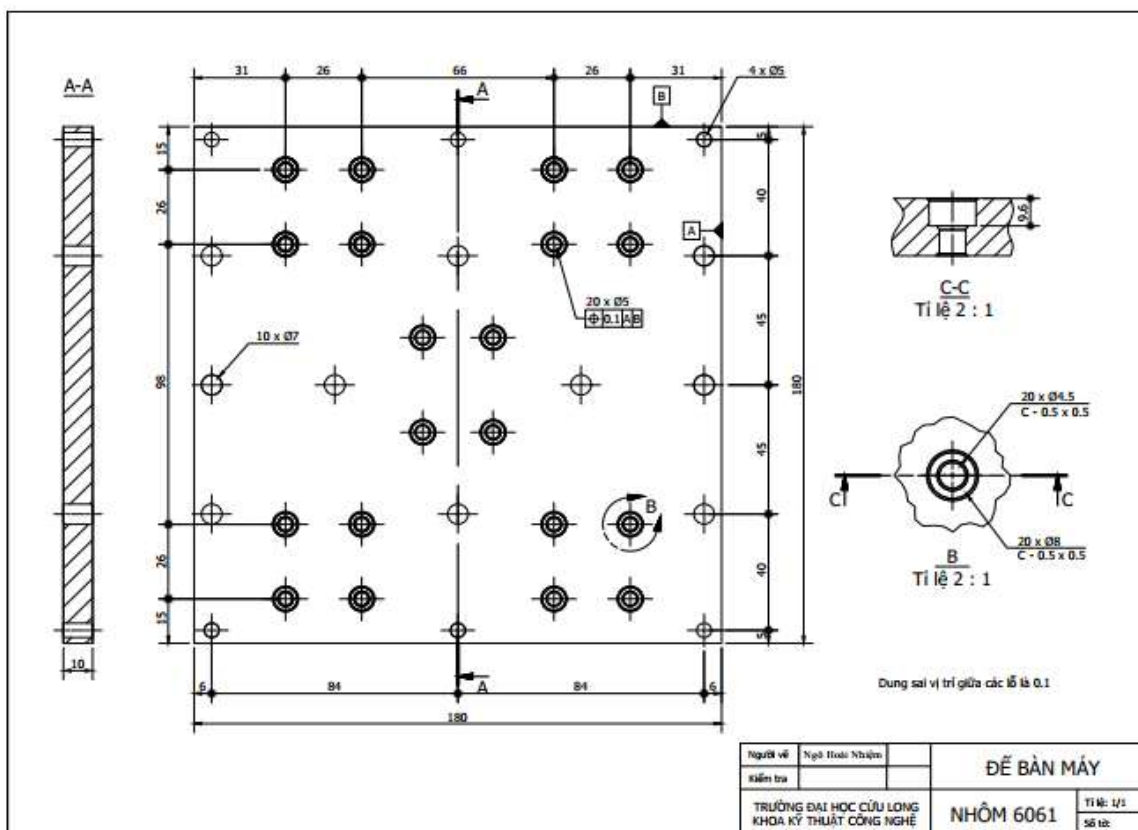


Hình 11. Lắp ráp cụm trục chính

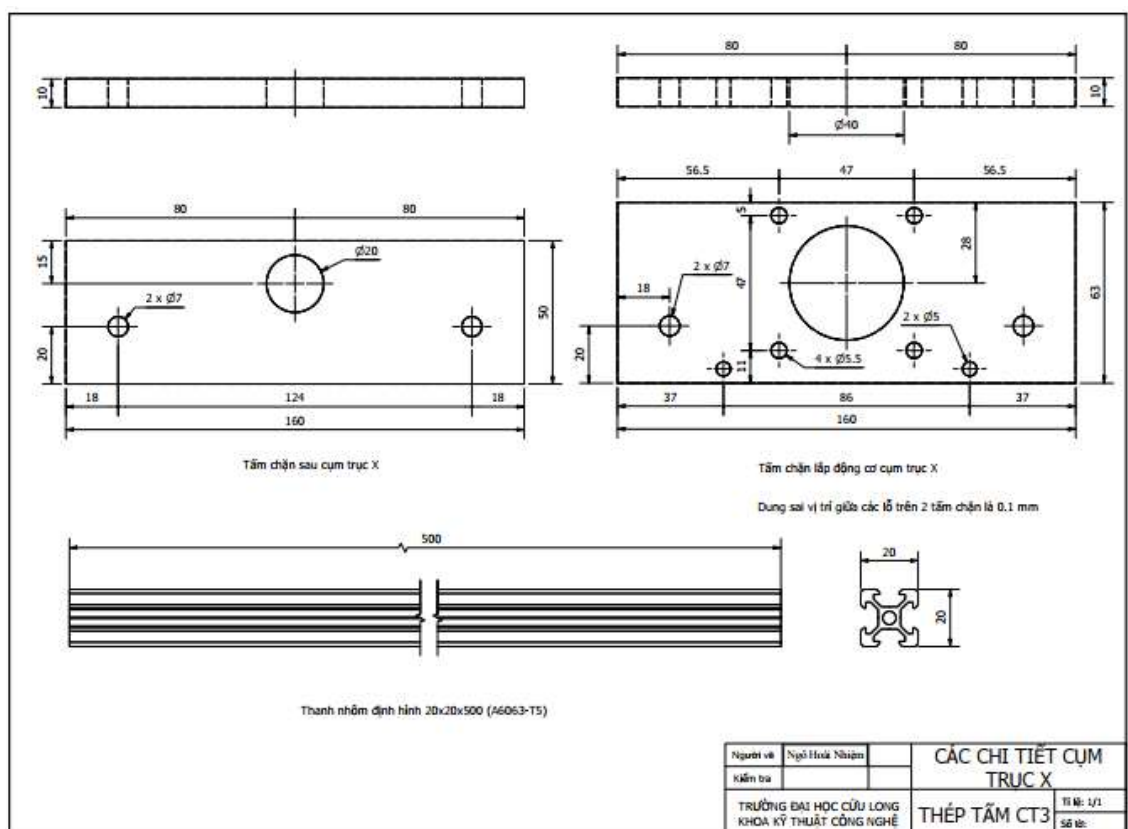


Hình 14. Máy phay CNC 4 trục lắp ráp hoàn chỉnh

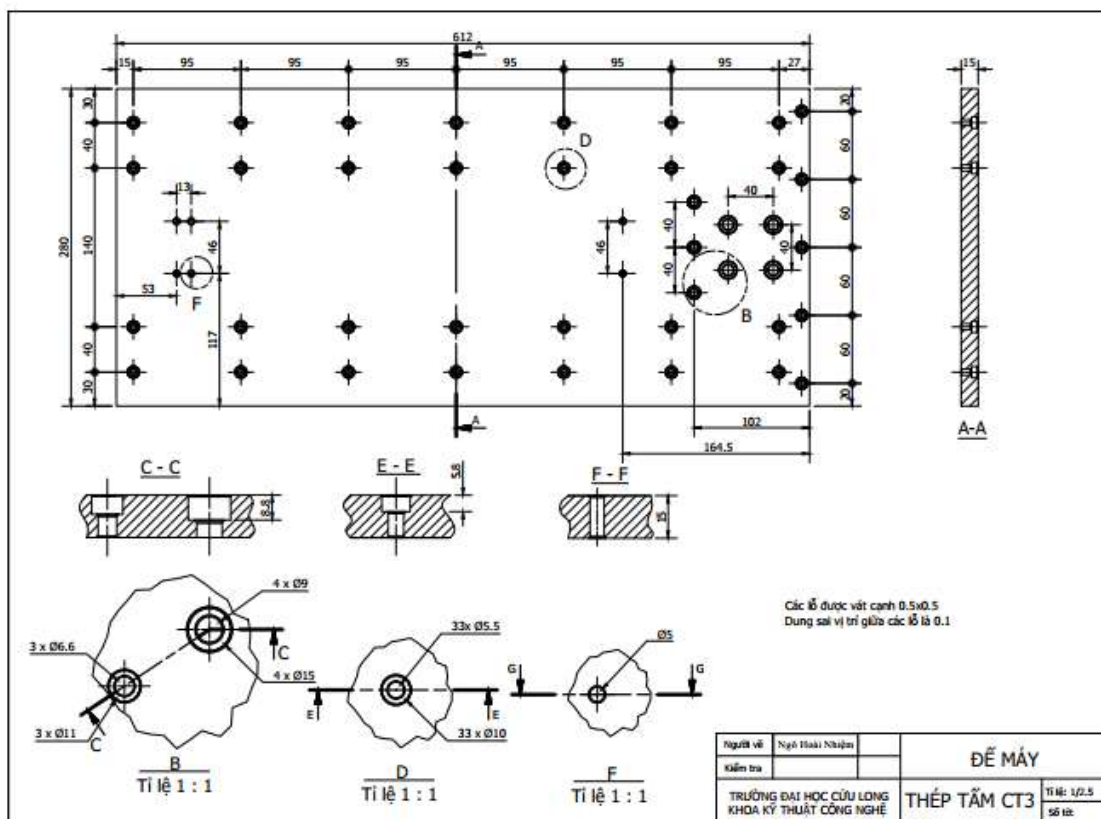
Bản vẽ chi tiết khi xuất bản vẽ từ phần mềm Autodesk Inventor Professional 2025:



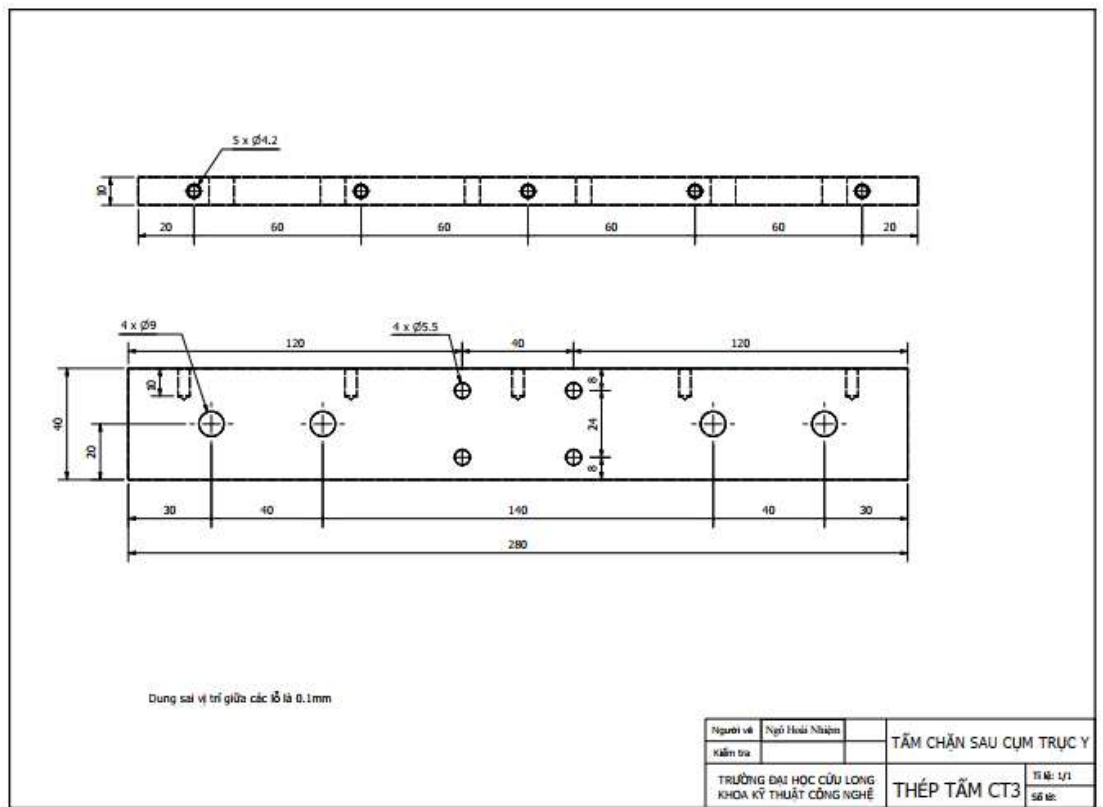
Hình 15. Đế bàn máy



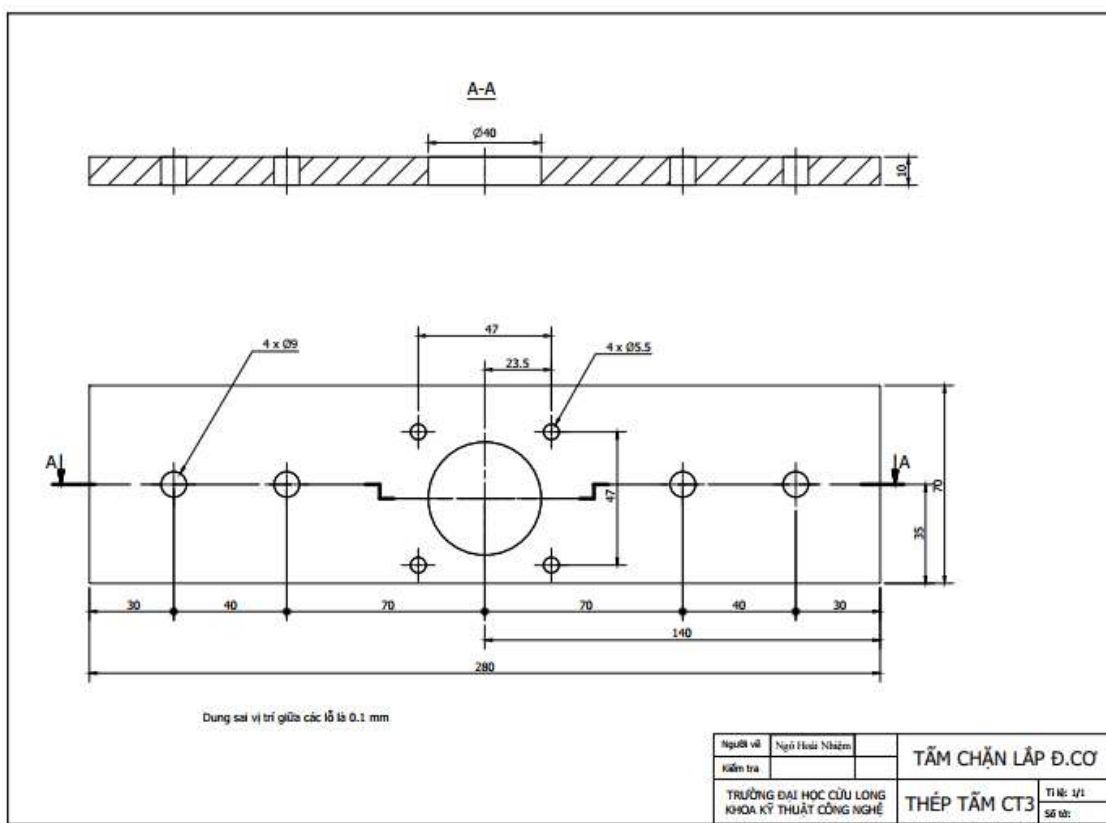
Hình 16. Chi tiết cụm trục X



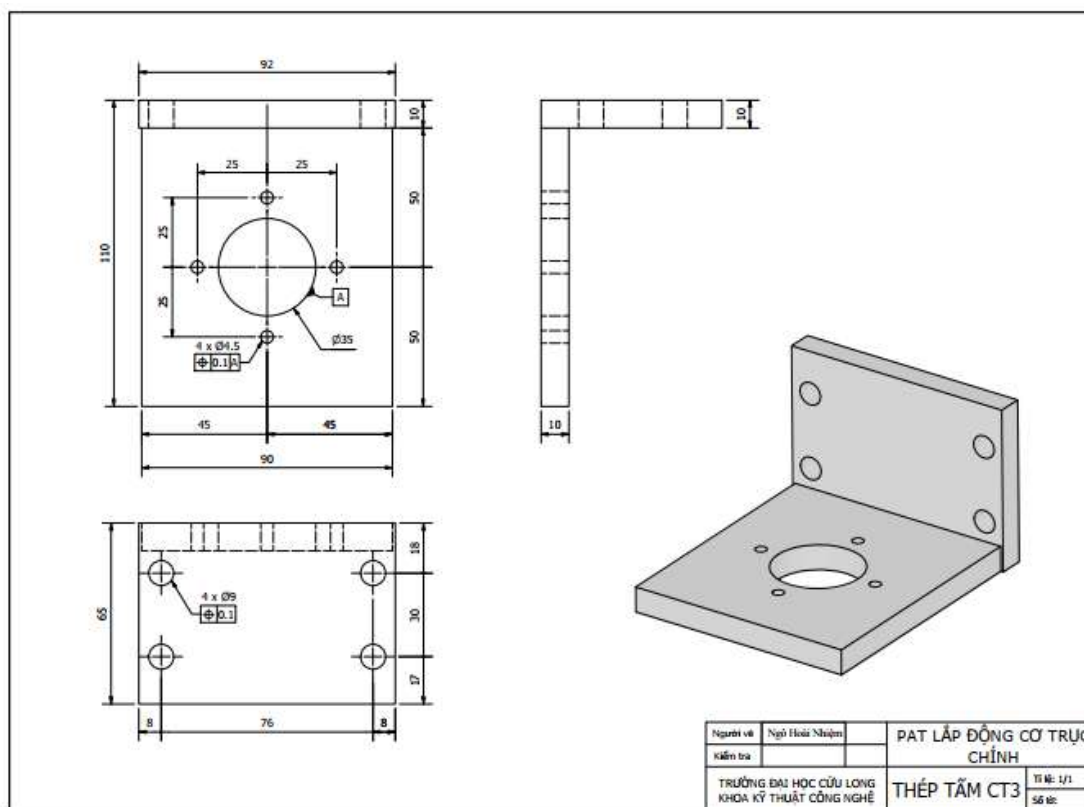
Hình 17. Đế máy



Hình 18. Tấm chặn sau cụm trục Y

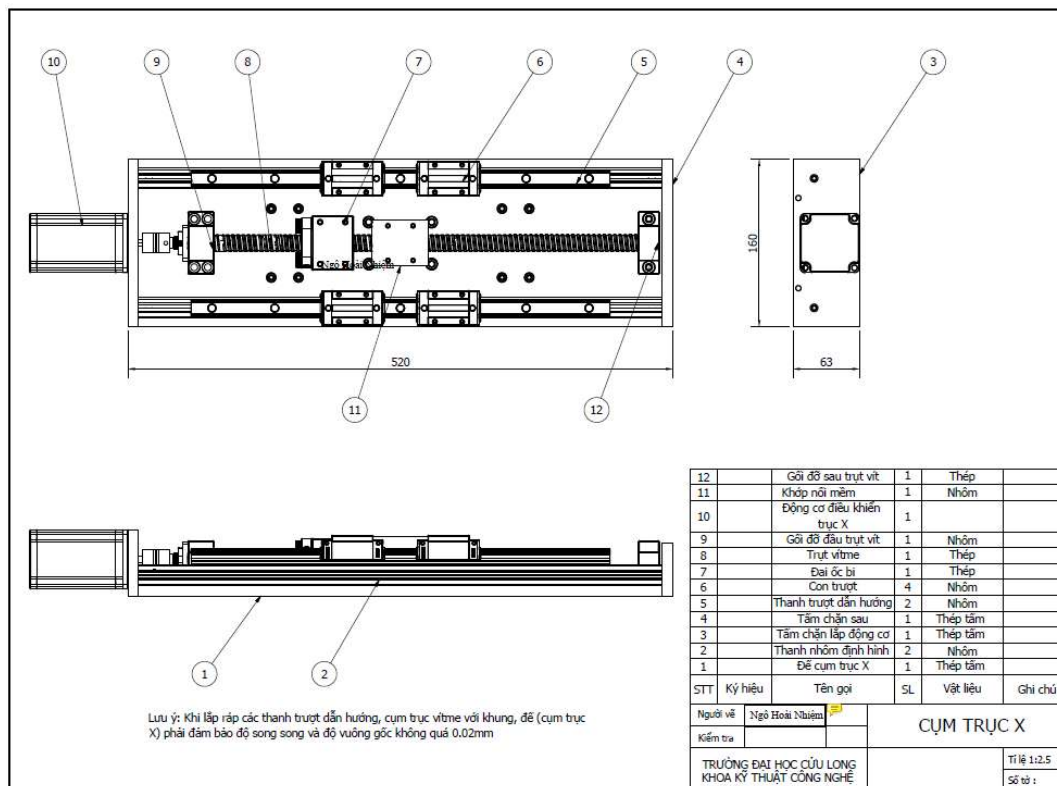


Hình 19. Tấm chặn lắp động cơ

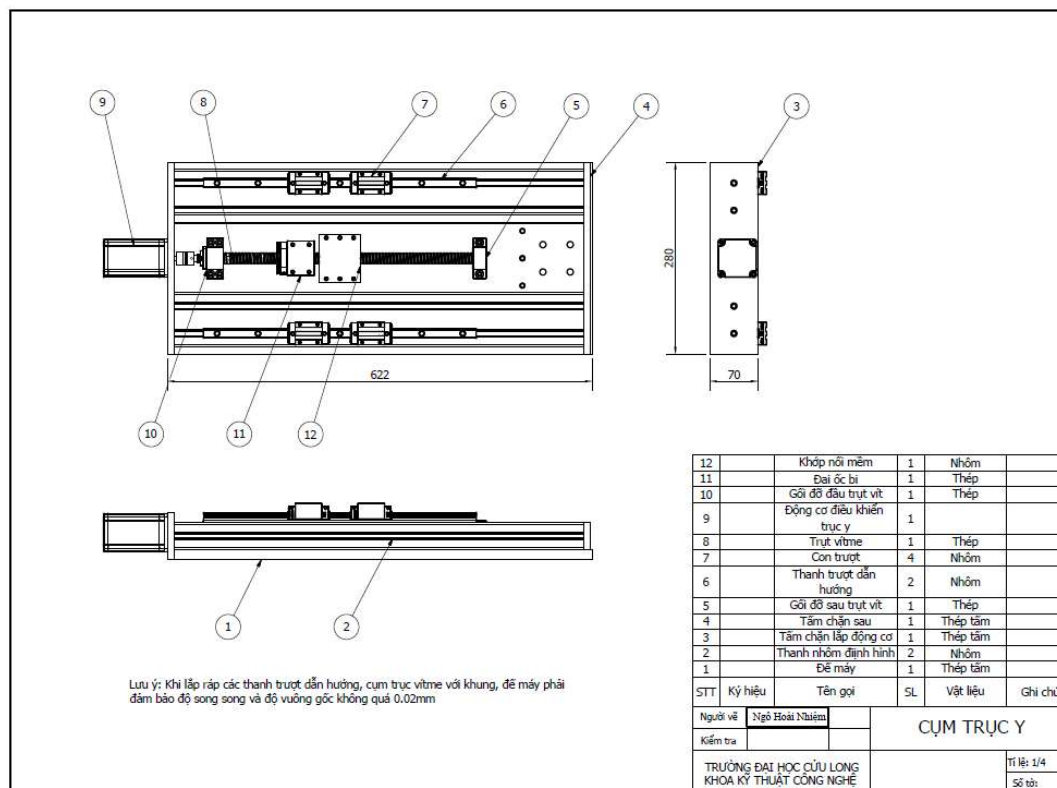


Hình 20. Pat lắp động cơ trực chính

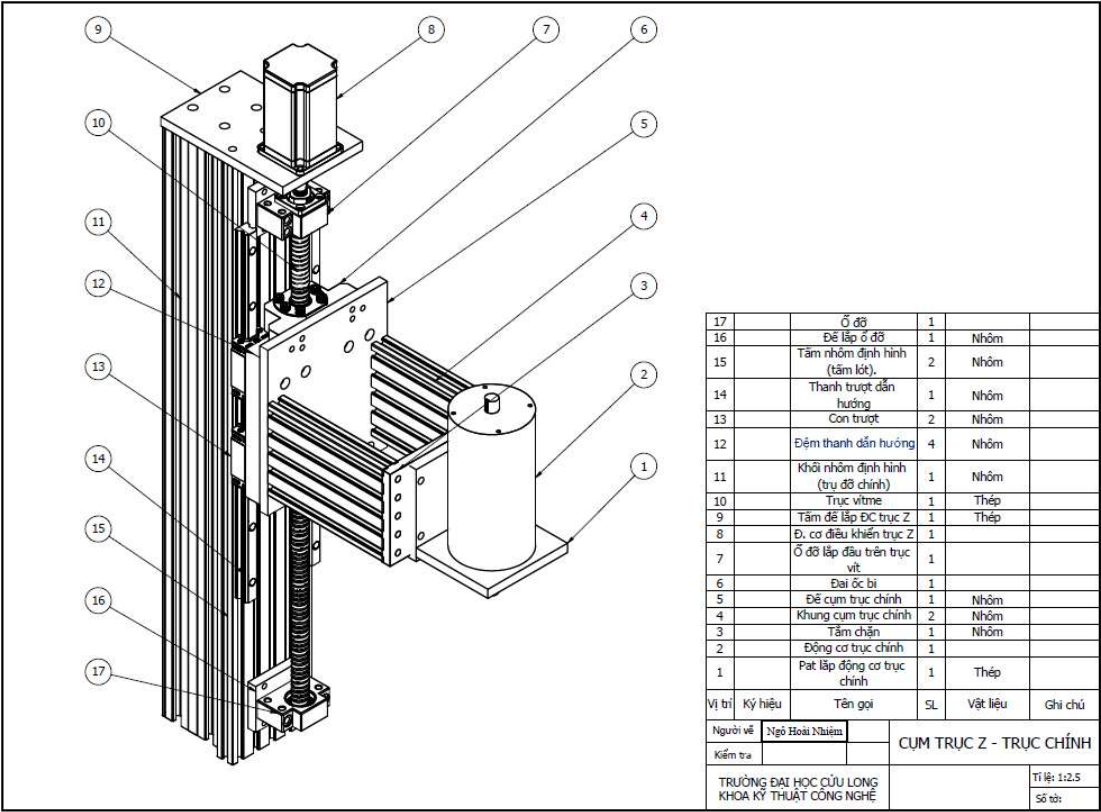
Bản vẽ lắp khi xuất bản vẽ từ phần mềm Autodesk Inventor Professional 2025:



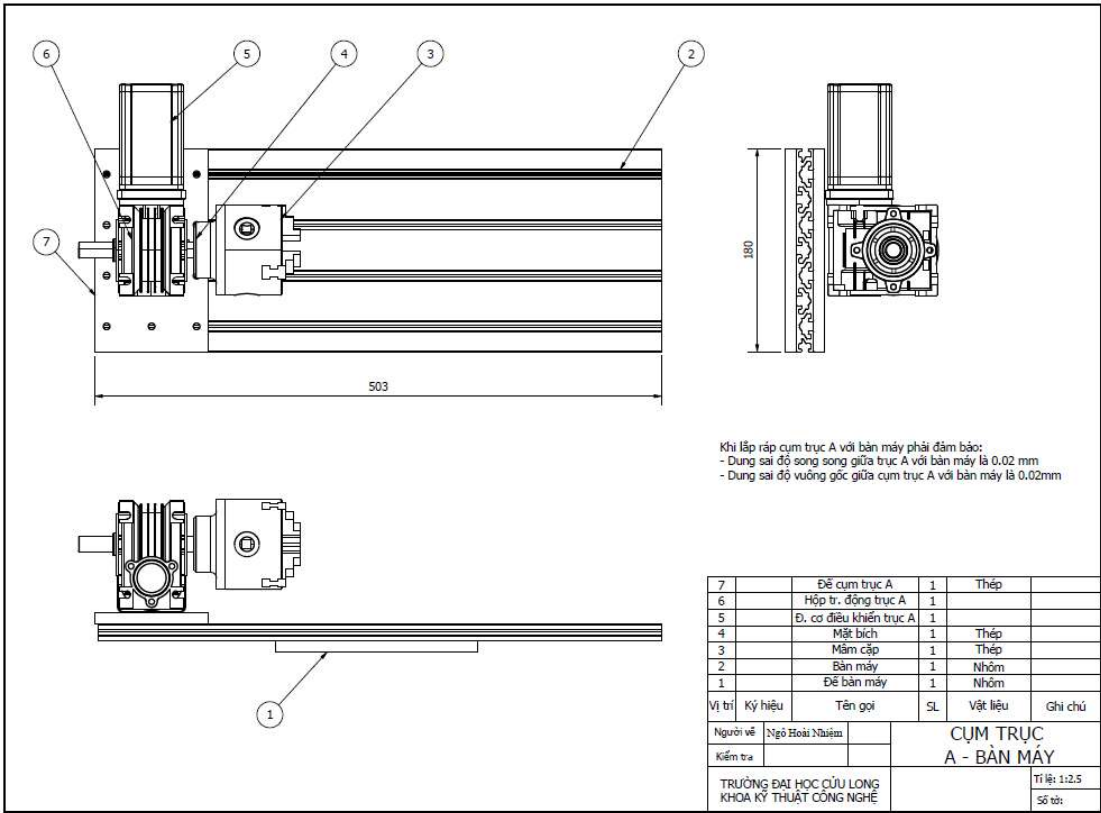
Hình 21. Cụm trục X



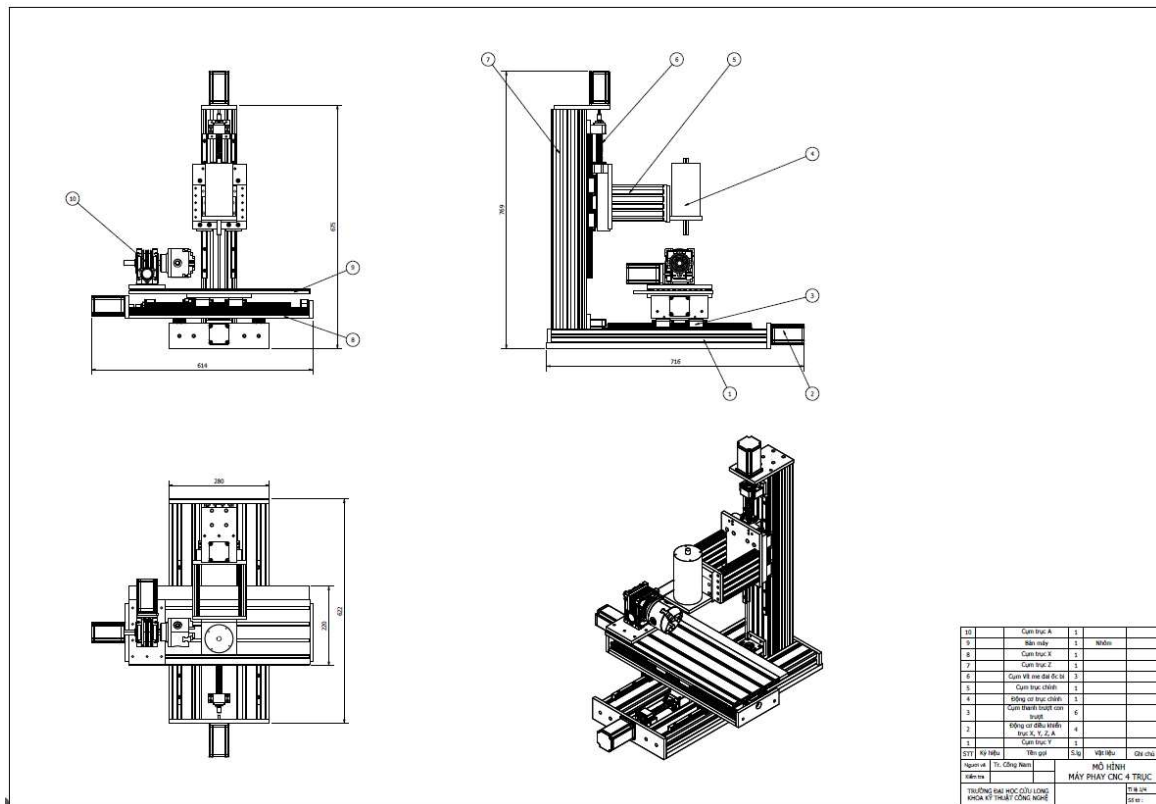
Hình 22. Cụm trục Y



Hình 23. Cụm trục Z – Trục chính



Hình 24. Cụm trục A – Bản máy



Hình 25. Bản vẽ lắp máy phay CNC 4 trục

3.2 Hệ thống điều khiển máy phay CNC 4 trục

Trong thực tế có rất nhiều phần mềm có thể điều khiển cho máy phay CNC như phần mềm: Fanuc, NCstudio, Mach3... Tác giả chọn phần mềm điều khiển máy là Mach3 vì chức năng của nó đa dạng, giao diện đẹp,

đễ khai báo các thông số của hệ thống và dễ sử dụng. Lập trình theo hướng mở rộng liên kết với các Script VB. Cho phép trực tiếp nhập các file dxf, bmp và jpg thông qua phần mềm LazyCam, Visual Gcode hiển thị. Mô phỏng quá trình làm việc rất rõ ràng và tiết kiệm được chi phí đáng kể khi chế tạo máy.



Hình 26. Giao diện trang màn hình khi dùng Mach3 điều khiển máy phay CNC 4 trục

4. Kết quả và thảo luận

4.1 Kết quả tính toán thiết kế và chế tạo

Kết quả tính toán của máy:

Để xác định các thông số cơ bản, nhóm sử dụng công thức tính như sau:

Chế độ cắt cực đại:

Để xác định sơ bộ các thông số t , s , v giới hạn dùng công thức thực nghiệm

$$t_{max} = C^3 \sqrt{d_{max}}$$

Với $C = 0,75$ (đối với thép), d_{max} là đường kính dao

$$\Rightarrow t_{max} = 0,75^3 \sqrt{3} \approx 0,73 \text{ mm}$$

$$t_{min} = (1/2 \div 1/4) t_{max} = (1/2 \div 1/4) 0,73 \\ = (0,365 \div 0,1825)$$

$$\Rightarrow \text{chọn } t_{min} = 0,2$$

$$S_{max} = (1/3 \div 1/7) t_{max} = (1/3 \div 1/7) 0,73 \\ = (0,24 \div 0,1)$$

$$\Rightarrow S_{max} = 0,2$$

$$S_{min} = (1/5 \div 1/10) S_{max} = (1/5 \div 1/10) 0,2 \\ = (0,04 \div 0,02)$$

$$\Rightarrow S_{min} = 0,03$$

Xác định tốc độ cắt:

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m t^x s^y B^u Z^p} K_v$$

Trong đó:

C_v , m , x , y , u , p , q : Hệ số các số mũ

T : chu kỳ bền của dao

Sử dụng dao phay ngón bằng thép P18 có: Đường kính dao $D = 3 \text{ mm}$, bề rộng vết cắt $B = D = 3 \text{ mm}$, số răng của dao $Z = 4$ răng

Dựa vào các thông số đã chọn: $S_z = 0,06 \text{ mm/răng}$, $t = 0,7 \text{ mm}$

Tra bảng 5.39 sổ tay Công nghệ chế tạo máy tập 2, trong đó: $C_v = 46,7$, $q = 0,45$, $x = 0,5$, $y = 0,5$, $u = 0,1$, $p = 0,1$, $m = 0,33$,

chu kỳ bền dao $T = 45 \text{ (ph)}$

K_v : Hệ số điều chỉnh, xác định theo công thức sau:

$$K_v = K_n \left(\frac{750}{\sigma_b} \right)^{n_v}$$

$K_n = 1$, $n_v = 0,9$, $\sigma_b = 750 \text{ Mpa}$ (Bảng 5.1 và 5.4 - [5])

$$K_v = 1 \left(\frac{750}{750} \right)^{0,9} = 1$$

Thay tất cả vào công thức tính vận tốc ta có:

$$V = \frac{46,7 \cdot 3^{0,45}}{45^{0,33} 0,7^{0,5} 0,06^{0,5} 3^{0,1} 4^{0,1}} \approx 58 \text{ (mm/ph)}$$

Vậy ta có số vòng quay của động cơ:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi D}$$

Trong đó:

V : Vận tốc, n : Số vòng quay động cơ, D : đường kính dao

Vậy số vòng quay:

$$n = \frac{1000 \cdot 58}{3,14 \cdot 3} = 6157 \text{ (Vòng/phút)}$$

Lực cắt P_z (N)

$$P_z = \frac{10 C_p t^x s^y B^u Z}{D^q n^w} K_{MP}$$

Trong đó:

$C_p = 68,2$, $x = 0,86$, $y = 0,72$, $u = 1$, $q = 0,73$, $w = 0$, $K_{MP} = 1$ (Bảng 5.41 - [5])

Khi đó:

$$P_z = \frac{10 \cdot 68,2 \cdot 0,3^{0,86} \cdot 0,06^{0,72} \cdot 3^1 \cdot 4}{3^{0,73} \cdot n^0} \cdot 1 = 873 \text{ (N)}$$

Các thành phần lực khi phay

Lực chạy dao ngang:

$$P_h = 0,25 \cdot P_z = 0,25 \cdot 873 = 218 \text{ (N)}$$

Lực chạy dao thẳng đứng:

$$P_v = 0,95 \cdot P_z = 0,95 \cdot 873 = 829 \text{ (N)}$$

Lực chạy dao hướng kính:

$$P_y = 0,35 \cdot P_z = 0,35 \cdot 873 = 305 \text{ (N)}$$

Lực chạy dao hướng trục:

$$P_x = 0,52 P_z = 0,52 \cdot 873 = 453 \text{ (N)}$$

Lực chạy dao xác định theo công thức kinh nghiệm sau:

$$Q = k \cdot P_x + \mu \cdot (P_z + 2P_y + G)$$

Trong đó:

$k = 1,4$ hệ số tăng lực ma sát

$\mu = 0,2$ hệ số ma sát thu gọn trên sống trượt

$$Q = 1,4 \cdot 453 + 0,2 \cdot (873 + 2 \cdot 305 + 200) = 970 \text{ (N)}$$

Tính công suất động cơ trục chính

Trên cơ sở P_z và V đã xác định ở trên, ta có công suất cắt N_c :

$$N_c = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{873 \cdot 58}{1020 \cdot 60} = 0.827 \text{ (kW)}$$

Thông thường công suất cắt chiếm khoảng (70% - 80%) công suất của động cơ. Một cách gần đúng, ta có công suất của động cơ xác định như sau:

$$N_d = \frac{N_c}{\eta}$$

Với $\eta = 0,995^{10} \cdot 0,97^3 \cdot 0,96 = 0,83$

$$\Rightarrow N_d = 0,997 \text{ (kW)}$$

Chọn công suất động cơ với $N = 1,5$ (kW), $V = 10000$ (v/ph)

Để tiết kiệm chi phí chúng tôi lựa chọn động cơ LD63ZL.

Kết quả chế tạo chi tiết của máy:



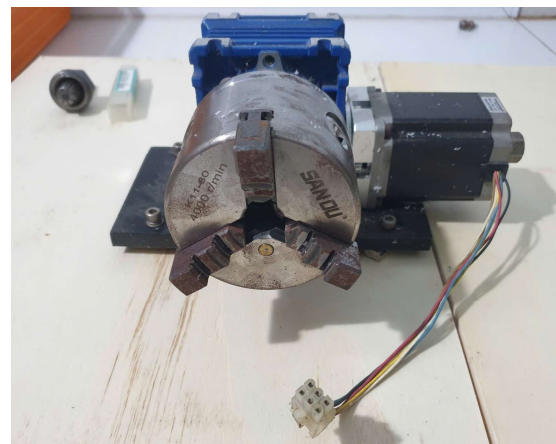
Hình 27. Đế máy phay



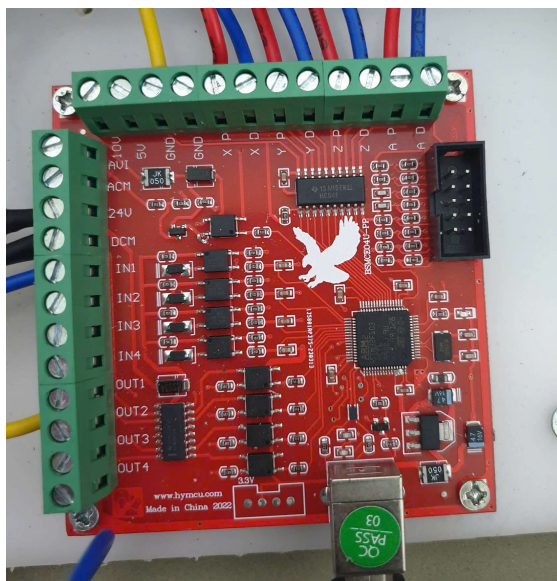
Hình 28. Khớp nối và Gối đỡ



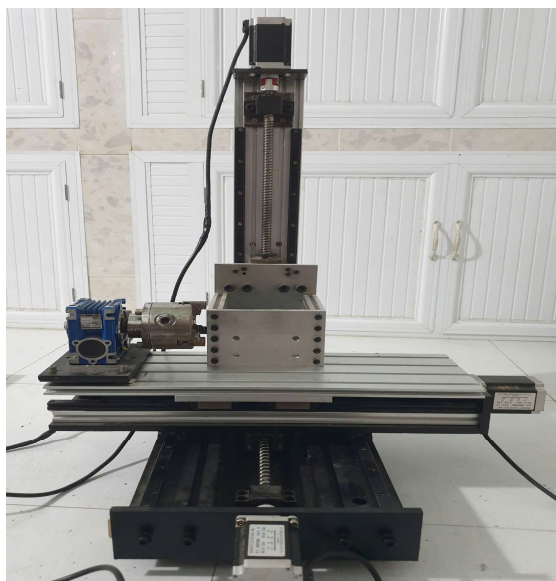
Hình 29. Động cơ trục chính



Hình 30. Bộ trục xoay phôi CNC (Trục A)



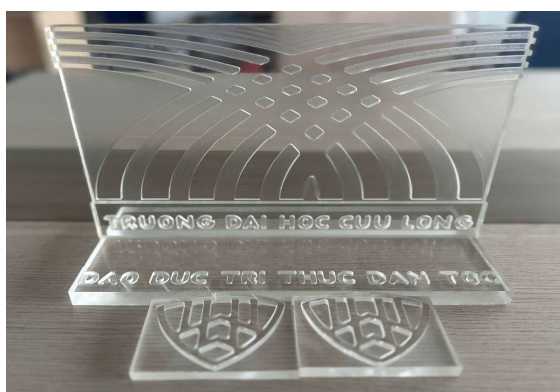
Hình 31. Mạch Mach 3



Hình 32. Máy phay CNC 4 trục hoàn chỉnh



Hình 33. Một số sản phẩm phay trên gỗ



Hình 34. Một số sản phẩm phay trên mica



Hình 35. Sản phẩm phay trên nhôm

4.2 Thảo luận

Qua quá trình khảo nghiệm, nhóm nghiên cứu rút ra một số nhận xét:

- Hệ thống truyền động:
 - + Vít me – đai ốc bi kết hợp ray trượt tuyến tính giúp chuyển động mượt mà, giảm độ rơ trong quá trình gia công.
 - + Ở tốc độ cao, động cơ trục chính phát ra tiếng ồn, cần giải pháp giảm chấn.
- Hệ thống điều khiển: Phần mềm Mach3/ LinuxCNC hỗ trợ thiết lập quy trình gia công thuận tiện, dễ điều chỉnh tham số.

- Hiệu suất và ứng dụng:
 - + Thời gian gia công được rút ngắn so với máy 3 trục.
 - + Máy có thể gia công linh kiện cơ khí chính xác, chế tạo mẫu và điêu khắc trên vật liệu gỗ, nhựa, mica, thậm chí kim loại mềm.
 - + Cần cải thiện hệ thống làm mát để tăng tuổi thọ dao cắt và độ bền của máy.
 - + Độ mịn và độ sắc nét của sản phẩm phụ thuộc trực tiếp vào tốc độ trục chính và tốc độ di chuyển các trục.
- Thông số kỹ thuật của máy phay CNC 4 trục:

Thông số	Giá trị
Khung máy	Khung thép, mặt bàn nhôm đúc, tủ điện
Khô làm việc	300 × 300 × 80 mm
Truyền động trục XYZ	Vít me – đai ốc bi
Động cơ trục chính	1.5 kW
Tốc độ dịch chuyển	24.000 mm/min; bước tiến 0,02 mm
Độ dày vật liệu gia công	≤ 40 mm
Hệ thống điều khiển	Mach3 (4 axis)
Nguồn cấp	220V/50–60 Hz AC
Nhiệt độ làm việc	0 – 45 °C
Độ ẩm	30 – 70%
Trọng lượng	~100 kg

5. Kết luận và Kiến nghị

5.1. Kết luận

- Sau hơn 9 tháng nghiên cứu, với sự hỗ trợ của phần mềm Autodesk Inventor 2020 (education version), nhóm đã thiết kế và chế tạo thành công mô hình máy phay CNC 4 trục. Kết quả khảo nghiệm cho thấy:
 - Máy hoạt động ổn định, vận hành êm ái, độ chính xác cao, phù hợp giảng dạy và nghiên cứu.
 - Có khả năng gia công nhiều loại sản phẩm phức tạp, đáp ứng nhu cầu sản xuất cơ khí chính xác.

- Kích thước nhỏ gọn, dễ lắp ráp, giá thành chế tạo thấp (~27 triệu đồng).
 - Máy có đầy đủ chức năng cơ bản của một máy phay CNC tiêu chuẩn, góp phần tiết kiệm thời gian, nhân công và chi phí sản xuất.
- Hiệu quả kinh tế và kỹ thuật rõ rệt: tăng năng suất, giảm chi phí chế tạo, tạo cơ hội ứng dụng rộng rãi tại các xưởng cơ khí vừa và nhỏ.

5.2. Kiến nghị

Để nâng cao hiệu quả và mở rộng khả năng ứng dụng, nhóm nghiên cứu đề xuất:

- Tối ưu hệ thống truyền động và giảm chấn, đảm bảo chất lượng gia công ở tốc độ cao.

- Nâng cấp hệ thống làm mát và bôi trơn nhằm kéo dài tuổi thọ dao cắt.

- Phát triển phần mềm điều khiển hỗ trợ nhiều loại mã G-code và vật liệu gia công.

- Tiếp tục nghiên cứu các phiên bản nâng cấp như CNC 5 trục hoặc CNC tích hợp tự động hóa, phục vụ sản xuất công nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Trần Văn Định (2004). *Giáo trình Công nghệ CNC*. Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [2]. Nguyễn Ngọc Đào. *Giáo trình CAD-CAM-CNC*. TP. Hồ Chí Minh: NXB Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM.

- [3]. Tạ Duy Liêm. *Hệ thống điều khiển số cho máy công cụ*. [Tài liệu học thuật].
- [4]. Nguyễn Đắc Lộc (chủ biên). *Sổ tay công nghệ chế tạo máy* (Tập 1). Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [5]. Nguyễn Đắc Lộc (chủ biên). *Sổ tay công nghệ chế tạo máy* (Tập 2). Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [6]. Đỗ Xuân Thụ. *Giáo trình Kỹ thuật điện tử*. Hà Nội: NXB Giáo dục.
- [7]. Nguyễn Hữu Lộc (2008). *Mô hình hóa sản phẩm cơ khí với Autodesk Inventor*. Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật.
- [8]. Newfangled Solutions. (n.d.). *Mach3 CNC software*. Truy cập từ <https://www.machsupport.com/software/mach3/>
- [9]. Thế giới CNC. (n.d.). *Thông tin và giải pháp CNC*. Truy cập từ <http://www.thegioicnc.com>