

CÂN BẰNG TỰ ĐỘNG MONOROTOR* ACTIVE BALANCING OF MONOROTOR DURING OPERATION

Lê Đình Tuấn[†], Võ Thái Bình^a, Hoàng Hữu Chung^b, Nguyễn Thiện Lãnh^c

Khoa Kỹ thuật Giao thông, Đại học Bách khoa Tp. Hồ Chí Minh, Việt nam

^(a)Công ty Chế tạo máy Sinco, Tp. Hồ Chí Minh, Việt nam

^(b)Khoa Cơ khí, Đại học Công nghiệp Tp. Hồ Chí Minh, Việt nam

^(c)TOMBOY Aquafeed Ltd., Khu Công nghiệp Tân Tạo, Tp. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực máy quay, mất cân bằng khối lượng tương quan đến rung động và tiếng ồn đáng kể cần phải giảm thiểu. Nghiên cứu này, tiếp theo sau một tóm tắt các kỹ thuật cân bằng kinh điển, đề cập cân bằng tự động các monorotor. Lượng mất cân bằng được đo và khử theo thời gian thực, trong khi máy đang chạy ở trạng thái bình ổn. Phương pháp bao gồm việc tạo ra một lực khử sử dụng hai khối lượng di động, gọi là vệ tinh, được gắn chặt trên cùng một mặt phẳng và di chuyển ở cùng một bán kính đối với trục quay. Thủ tục cân bằng dựa trên phương pháp các hệ số ảnh hưởng là phương pháp được sử dụng rộng rãi trong các máy cân bằng kiểu ca-líp. Hệ thống đo lường và điều khiển đặc thù là cơ sở cho thành công của nghiên cứu này.

Thực nghiệm đầu tiên về cân bằng tự động cũng được giới thiệu. Bệ thử được xây dựng trên nền máy cân bằng động kiểu gối cứng HnB100 đang được thương mại hoá cũng được nghiên cứu. Kết quả chỉ ra sự rung động do mất cân bằng được giảm thiểu đáng kể.

Từ khoá: cân bằng tự động, phương pháp các hệ số ảnh hưởng

ABSTRACT

In the field of rotating machines, mass unbalance are inherent to the considerable vibrations and noise which must be reduced. This work, which follows an overview on classical balancing techniques, concerns the active balancing of monorotors. The unbalance is detected and corrected in real time, during operation in steady state. The method consists of generating a correction force using two moving weights, namely the satellites, fixed on the same plane and moving at a constant radius of the rotation axis. The procedure of balancing is based on the influence coefficients method that is most exploited in calibrated balancing machines. Specific measurement and control systems are essential for the success of this research.

A first experiment on active balancing is also presented. The test bench is based on the hard-type balancing machine HnB100 developed and commercialized by the teamwork is also investigated. The experiments shows that the vibration due to unbalance is significantly decreased.

Keywords: active balancing, influence coefficient method

* Nghiên cứu này là kết quả trong khuôn khổ triển khai nhiệm vụ khoa học công nghệ năm 2004, hợp đồng số 195/ĐH BK/KHCN&QHQT.

[†] E-mail liên lạc: Tuan-Ledinh@hcmut.edu.vn

1. GIỚI THIỆU

1.1 Mô tả chung về cân bằng động

Mất cân bằng ở các máy quay ngày càng trở nên một yếu tố quan trọng trong việc phát triển các thiết bị hiện đại đặc biệt đối với các thiết bị đòi hỏi tốc độ và/hoặc độ tin cậy cao. Sự mất cân bằng máy nói chung là một hiện tượng có hại do đó cần phải xác định và khi cần thiết phải giảm thiểu hoặc trừ khử hoàn toàn. Đó gọi là **cân bằng máy** hoặc **cân bằng động**. Nội dung là đưa ra các biện pháp nhằm khử hoàn toàn hoặc một phần phản lực động phụ ở các khớp động và ở các ổ đỡ, giảm mức độ rung động ở các bộ phận của cơ cấu, máy. Điều này đồng nghĩa với việc tránh hư hỏng do mỏi trong các kết cấu liên quan, giảm tiếng ồn và rung động, làm tăng tuổi thọ và chất lượng của máy khi vận hành.

1.2 Cân bằng tùy động

Bên cạnh việc tối ưu hóa về hình dáng và vật liệu ngay từ khâu thiết kế, nhiều kỹ thuật khác nhau đã được phát triển để điều khiển ứng xử dao động của máy quay. Một trong các kỹ thuật được phát triển gần đây nhất là **điều khiển tùy động**: từ các số liệu đo được thực hiện trong thời gian thực và từ một bộ điều khiển, một hệ thống tùy động cung cấp năng lượng cho cấu trúc nhờ trung gian các bộ dẫn động để giảm rung động theo hàm mục tiêu định trước [2,5]. Kỹ thuật cân bằng sử dụng điều khiển tùy động cũng nhằm làm giảm trực tiếp các nguồn rung động. Nội dung vẫn là đưa thêm hay lấy bớt đi vật liệu sao cho trục quán tính trùng với trục quay. Khác với cách làm truyền thống, kỹ thuật này cho phép thực hiện toàn bộ quá trình cân bằng một cách tự động mà không cần thiết phải dừng máy và xa hơn nữa nó được thực hiện theo quá trình vận hành máy với thời gian thực [2].

1.3 Bảng thử tùy động HnB100J

Ứng dụng thực nghiệm đầu tiên cho nghiên cứu này là việc thiết kế và chế tạo hoàn chỉnh bảng thử HnB100J [2]. Bảng thử cho phép thực nghiệm tùy động các monorotor có chiều dài đến 1,4 m, đường kính $\phi 900$ mm, cân nặng 150 kg. Việc đánh giá kỹ thuật tùy động và hiệu quả của nó cũng được chỉ ra bằng thực nghiệm. Kết quả có được từ nghiên cứu này cũng được áp dụng rộng rãi cho các kỹ thuật cân bằng thông thường.

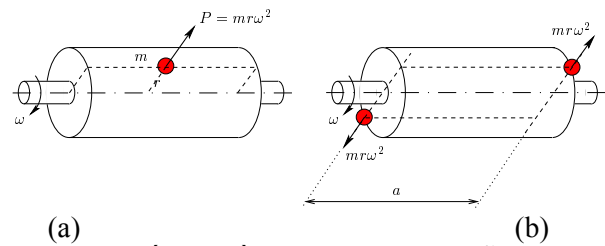
Phản lực do vật quay gây ra trên các gối đỡ đo được nhờ vào các cảm biến áp điện gắn cứng với chúng. Chúng cùng với các bộ tiền khuếch đại/khuếch đại, bộ chuyển đổi số, cảm biến pha là các bộ phận cơ bản của hệ thống đo lường. Hệ thống này chỉ thực sự đầy đủ khi kể đến bộ phân tích ActiveHnB viết trên nền C chuẩn.

2. CÂN BẰNG VẬT QUAY

2.1 Các dạng mất cân bằng vật quay

Ba dạng mất cân bằng cần được phân biệt [4]:

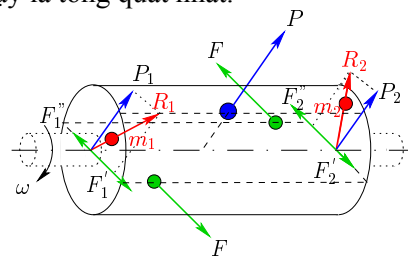
- **Mất cân bằng tĩnh**: trọng tâm vật quay không nằm trùng với trục quay. Các khối lượng không cân bằng của vật quay có thể thay bằng một khối lượng *qui dẫn* m , cách trục quay khoảng cách r (Hình 1, a). Lực ly tâm của khối lượng qui dẫn là $P = mr\omega^2$.



Hình 1: Mất cân bằng tĩnh và động (ngẫu lực).

- **Mất cân bằng động / ngẫu lực**: khối lượng không cân bằng được qui về hai khối lượng cùng nằm trong một mặt phẳng, mô-men tĩnh của các khối lượng đối với trục quay bằng nhau (Hình 1, b). Khi quay, lực ly tâm tạo thành một ngẫu lực $M = mra\omega^2$.

- **Mất cân bằng hỗn hợp**: Lực ly tâm của các khối lượng không cân bằng tương đương với lực P và ngẫu lực (F,F) (Hình 2) và chúng *không nằm trên cùng một mặt phẳng*. Sự mất cân bằng như vậy là tổng quát nhất.

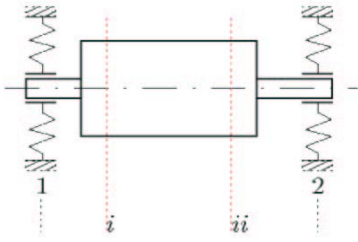


Hình 2: Mất cân bằng hỗn hợp.

Mất cân bằng có thể khử bằng cách đưa vào các khối lượng phụ hay *đối trọng*. Lực ly tâm do chúng sinh ra cân bằng với lực ly tâm của khối lượng qui dẫn. Sự chọn lựa sơ bộ đối trọng cân bằng rồi gắn lên rotor được gọi là **cân bằng**.

2.2 Phương pháp các hệ số ảnh hưởng

Đối với loại rotor cứng, phương pháp thích ứng nhất là chỉ sử dụng các thông tin thực nghiệm. Rotor được mô tả bằng các mặt phẳng đo và bằng các mặt phẳng khử (mặt phẳng cân bằng). Độ nhạy của các mặt phẳng đo so với các mặt phẳng cân bằng xác định đáp ứng của lượng mất cân bằng cho một tốc độ quay xác định. Phương pháp này dựa trên giả thuyết hệ thống làm việc tuyến tính. Trong trường hợp tổng quát, khi việc thêm một khối lượng thử tại một đầu rotor cũng làm thay đổi đáng kể tín hiệu dao động đo được ở đầu kia, phải tiến hành phương pháp cân bằng hai mặt đồng thời. Phương pháp tiêu biểu nhất là *phương pháp các hệ số ảnh hưởng* (ICM) [1,4]. Khi tiến hành cân bằng, đo đồng thời dao động gôi đỡ 1, 2 (Hình 3) truyền đến cảm biến dưới tác động của các lượng mất cân bằng ban đầu B_1, B_2 trong hai mặt phẳng cân bằng i, ii .



Hình 3: Cân bằng động trên 2 mặt đồng thời.

Tiếp theo, việc đo dao động lại được tiến hành sau khi đã gắn thêm các khối lượng thử lần lượt ở trên cùng các mặt này. Ta có quan hệ tỉ lệ:

$$\begin{pmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

trong đó V_{kl} là dao động đo ở gôi đỡ k ở lần chạy máy l (lần thử), giá trị $l = 0$ ứng với lần thử ban đầu, lúc rotor ở trạng thái *nguyên gốc*. Các hệ số ảnh hưởng α_{ik} tùy thuộc vào vận tốc quay của rotor cũng như khối lượng của nó. Chúng ta thực hiện ba lần thử liên tiếp tại cùng một tốc độ:

(1) Lần chạy thứ nhất: Rotor ở trạng thái nguyên gốc, với các lượng B_1, B_2 cần xác định trong mặt phẳng i, ii . Tiến hành đo V_{10}, V_{20} .

(2) Lần chạy thứ nhì: Gắn một khối lượng thử M_1 trên mặt phẳng i , và đo V_{11}, V_{21} .

(3) Lần chạy thứ ba: Tháo M_1 , gắn khối lượng thử M_2 trên mặt phẳng ii , và đo V_{12}, V_{22} .

Nếu xem cơ hệ là tuyến tính, ta có thể viết:

$$\begin{pmatrix} V_{11} \\ V_{21} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} B_1 + M_1 \\ B_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

và

$$\begin{pmatrix} V_{12} \\ V_{22} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 + M_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

(1), (2) và (3) cho phép tính được α_{ij} và, từ đó, B_1 và B_2 . Nếu tính $V_{kl} - V_{k0}$ chỉ do các khối lượng thử, chúng ta nhận được tuần tự

$$\alpha_{kl} = (V_{kl} - V_{k0}) / M_l \quad k, l = 1..2 \quad (4)$$

và tính được khối lượng mất cân bằng:

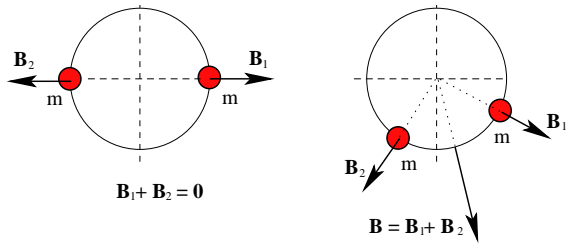
$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = [\alpha]^{-1} \begin{pmatrix} V_{10} \\ V_{20} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Việc áp dụng ICM tuy đơn giản nhưng lại bất tiện do việc khởi động-dừng máy nhiều lần trong khi xác định đặc trưng của bài toán cân bằng [2]. Lời giải của phương pháp là xác định lượng khử mất cân bằng, mà sau đó, được gắn bằng tay lúc rotor dừng. Lượng khử mất cân bằng vì thế không thay đổi được nữa và mất tác dụng trong trường hợp rotor có lượng mất cân bằng thay đổi. Khả năng khử các lượng mất cân bằng trong quá trình máy đang hoạt động vì vậy cần được nghĩ đến. Điều này trở thành mối quan tâm đặc biệt đối với các thiết bị quay nhanh và có trọng lượng lớn do qui trình khởi động hoặc dừng máy phức tạp và có vấn đề về dao động.

3. CÂN BẰNG TỰ ĐỘNG

3.1 Nguyên lý

Nội dung cân bằng tùy động bao gồm việc điều khiển các lực (ly tâm) ở một số vị trí trục quay. Ta dùng hai khối lượng di động, gọi là vệ tinh, có cùng khối lượng bị khống chế và chỉ di chuyển trong cùng một mặt phẳng ở cùng một khoảng cách so với trục của rotor [2]. Chúng tạo ra lực ly tâm có biên độ và pha thay đổi (Hình 4).



Hình 4:-Tạo 1 mắt cân bằng từ 2 khối lượng.

3.2 Tối ưu hóa đường chạy

3.2.1 Xác định các vị trí khử mất cân bằng

Theo sau việc áp dụng ICM, hệ thống cân bằng tùy động cần phải tạo ra một lượng mắt cân bằng B_c . Nếu B_1, B_2 là lượng mất cân bằng được tạo ra bởi các vệ tinh 1 và 2, ta có quan hệ:

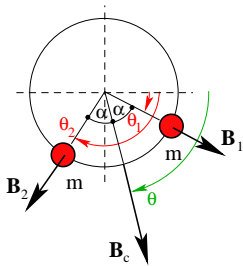
$$B_c e^{i\theta} = B_1 e^{i\theta_1} + B_2 e^{i\theta_2} \quad (6)$$

Hai vệ tinh này có cùng khối lượng m_{vt} nằm trên cùng bán kính r . Biên độ vì thế là như nhau:

$$B_1 = B_2 = m_{vt} r = b \quad (7)$$

Lượng mất cân bằng tự nhiên không âm, $0 < \alpha < \pi/2$, vị trí góc của mỗi vệ tinh (Hình 5) là:

$$\theta_{1,2} = \theta \mp \alpha \quad (8)$$



Hình 5: Các vị trí khử.

Biểu thức tính góc α cho phép xác định vị trí các vệ tinh theo hàm của lượng mất cân bằng:

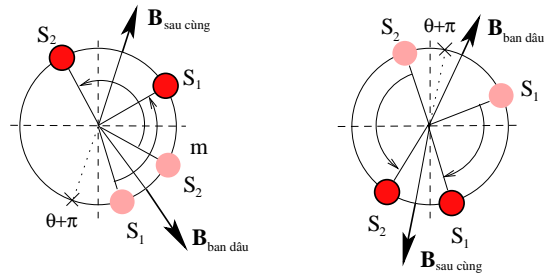
$$\alpha = \arccos(B_c / 2b) \quad (9)$$

Lượng B_c tính được bằng ICM.

3.2.2 Nguyên tắc di chuyển các vệ tinh

Cần phải xác định kiểu di chuyển vệ tinh từ vị trí ban đầu đến vị trí khử mất cân bằng sao cho đảm bảo việc khử mất cân bằng nhanh và tối thiểu hóa ảnh hưởng khi quá độ [2].

Nhiều chiến thuật khác nhau dùng để lái vệ tinh được xem xét (Hình 10). Điều chỉnh tuần tự hoặc đồng thời pha và biên độ. Giải pháp sau là phù hợp nhất nhờ việc khử nhanh chóng. Việc giảm thiểu các ảnh hưởng do sự dịch chuyển các vệ tinh đồng nghĩa với việc giảm thiểu phản lực động sinh ra do sự dịch chuyển vệ tinh không hợp lý. Nếu tính đến giả thuyết về sự tuyến tính của hệ thống thì nguyên tắc này cũng sẽ đảm bảo làm giảm dao động của cả hệ thống.



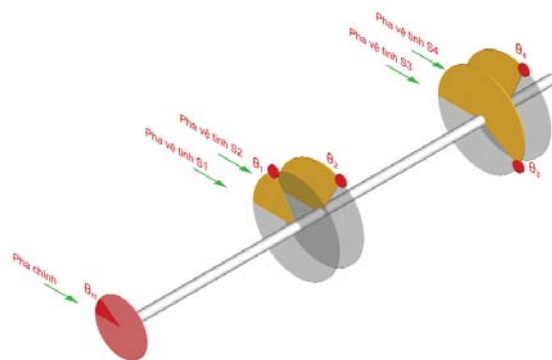
Hình 6: Cách dịch chuyển các vệ tinh.

3.3 Các mô-đun đo lường

Việc xác định các lượng khử mất cân bằng sử dụng ICM cần phải biết chính xác vận tốc quay của monorotor và trạng thái dao động của hệ thống. Để lái vệ tinh về đúng vị trí khử mất cân bằng, vị trí góc của chúng phải được xác định.

3.3.1 Đo vị trí góc của vệ tinh và tốc độ quay

Vị trí góc của vệ tinh được xác định so với điểm góc pha chuẩn của monorotor (Hình 7). Góc pha chuẩn (hay góc pha chính) xác định pha của tín hiệu đo từ 2 cảm biến đo dao động.



Hình 7: Bố trí các cảm biến đo góc pha.

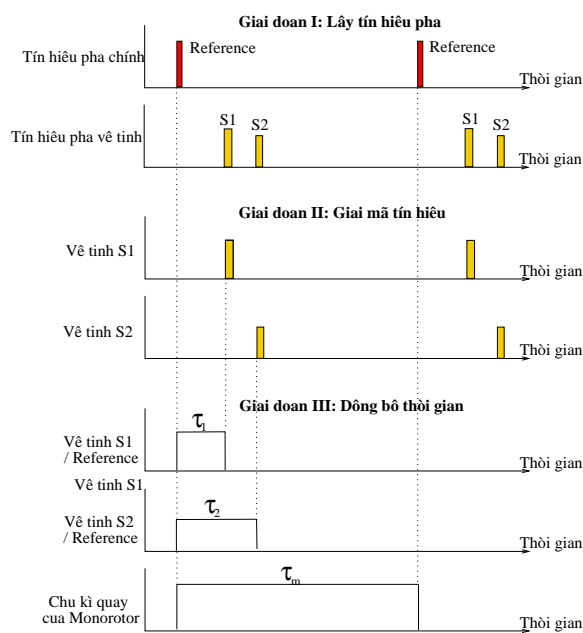
Nguyên tắc xác định pha vệ tinh và chính được minh họa trên Hình 8. Phép đo τ_m , τ_1 , τ_2 cho:

$$\Omega = 60 / \tau_m \quad (v / ph) \quad (10)$$

$$\theta_{1,2} = 360 \times \left(\frac{\tau_{1,2}}{\tau_m} \right) \quad (^\circ) \quad (11)$$

3.3.2 Xử lý tín hiệu dao động

Tồn tại một tương quan giữa các tham số xử lý



Hình 8: Nguyên tắc xác định pha của vệ tinh và chu kỳ quay của monorotor.

tín hiệu với tốc độ quay Ω nên cần thiết lập một mô-đun xử lý tín hiệu đặc thù để xác định biên độ, pha dao động theo Ω [3]. Nguyên tắc này đòi hỏi phải thu nhận được tín hiệu trong mỗi chu kỳ quay chính nhờ đồng bộ bằng pha chính. Tín hiệu được rời rạc hoá cho số điểm mẫu nhất định trong một chu kỳ quay. Việc xác định biên độ, pha chính, pha vệ tinh, vận tốc đều dựa trên thông tin này. Đồng bộ việc lấy mẫu theo pha chính với một số nguyên số vòng quay, việc lấy tín hiệu dao động được thực hiện liên tục sau mỗi vòng lặp phân tích.

Bộ biến đổi fourier rời rạc (DFT-Discrete Fourier Transform [4]) theo thời gian thực cho phép tính toán biên độ và pha dao động ở tốc độ

quay định trước. Nó cũng làm vai trò của bộ lọc nhiễu.

3.4 Tổ chức cân bằng tùy động

Cũng như nguyên lý cân bằng nói chung, cân bằng tùy động cải thiện ứng xử rung động mà không làm thay đổi chức năng của thiết bị [2].

3.4.1 Chiến lược khử mất cân bằng

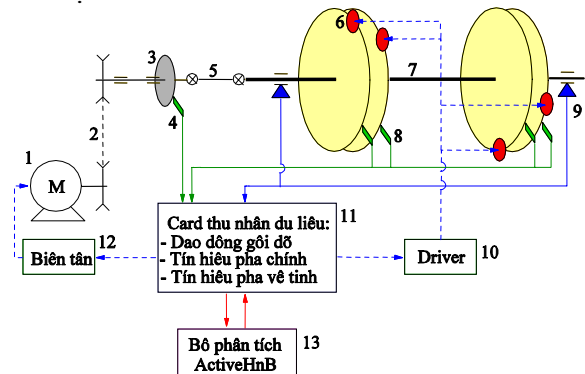
Giải pháp ở đây là đo liên tục độ rung động, kể đó so với lượng mất cân bằng còn lại cho phép để quyết định điều chỉnh vệ tinh hay không [2].

3.4.2 Hai pha chính

Phương pháp các hệ số ảnh hưởng cần phải có pha ca-líp nhằm có đặc trưng của hệ thống. Pha này được thực hiện trước khi tiến hành việc khử mất cân bằng do các vệ tinh đảm nhiệm ở pha sau, pha khai thác, ở chế độ tùy động.

3.4.3 Hệ thống tùy động

Bố trí cân bằng tùy động được chỉ ra trên Hình 9. Monorotor (7) được lắp lên 2 ụ đỡ dao động có tích hợp 2 cảm biến đo phản lực động (9). Trên monorotor có 4 vệ tinh (6) được giám sát vị trí nhờ các cảm biến pha (8). Động cơ điện (1) quay monorotor thông qua bộ dẫn động (2) và khớp dẫn động cardan (5). Pha chính của monorotor được xác định nhờ đĩa pha (3) và cảm biến pha (4). Các tín hiệu dao động từ các gói đỡ, tín hiệu góc pha chính, góc pha vệ tinh được bộ phân tích ActiveHnB xử lý theo thời gian thực thông qua card thu nhận dữ liệu (11). Tốc độ mono-rotor được điều khiển thông qua bộ biến tần (12), còn bộ driver (10) có nhiệm vụ lái các vệ tinh.



Hình 9: Bố trí băng thử cân bằng tùy động.

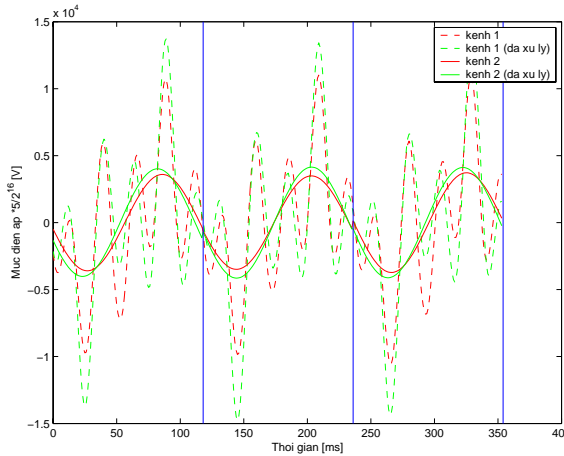
4. THỰC NGHIỆM CÂN BẰNG TỰ ĐỘNG

Việc đánh giá các kết quả thực nghiệm trên cơ sở các thiết kế cơ, điện, các giải thuật,... là quan trọng cho bài toán tối ưu cũng như chỉ ra các giới hạn mà hệ thống đạt được [2].

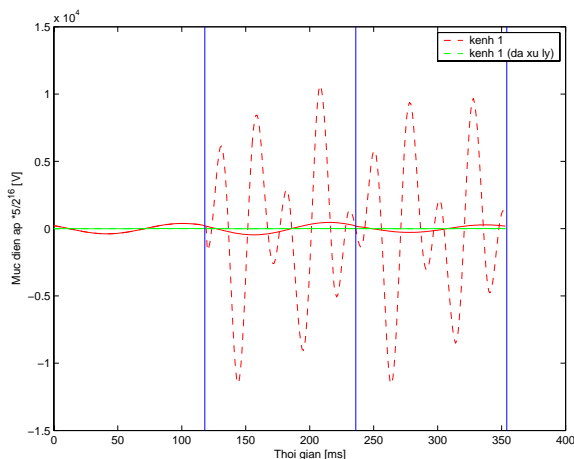
Việc tính toán các hệ số ảnh hưởng α_{ij} được thực hiện ở pha ca-líp và được lưu trữ [4].

Việc kiểm nghiệm ICM cũng được thực hiện trên các loại chi tiết quay khác nhau trước khi áp dụng trên monorotor với pha khai thác sử dụng băng thử HnB100J. Biên độ dao động đo được trước và sau khi kích hoạt hệ thống tùy động cho ở các Hình 10, 11, 12, 13 ở tốc độ 500 vòng/phút.

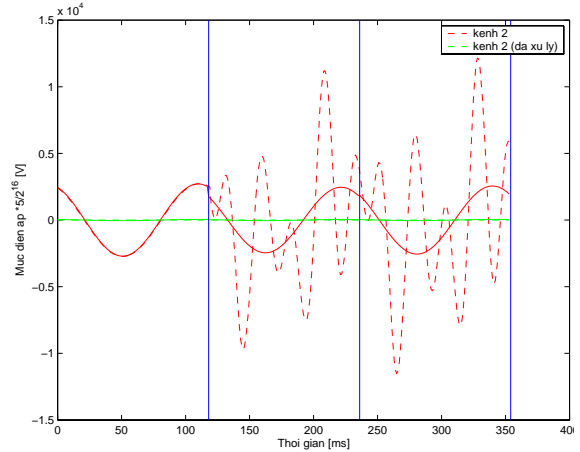
Các lượng mất cân bằng còn lại đều nhỏ hơn mức cho phép (ISO 1940, cấp G 6.3 [4]). Thực



Hình 10: Dao động ban đầu.

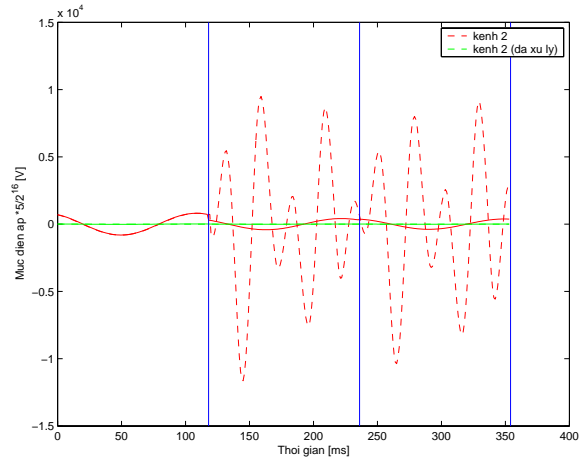


Hình 11: Dao động gói 1 khi cân bằng tùy động.



Hình 12: Dao động gói 2 ban đầu.

tế khối lượng qui đổi từ cặp vệ tinh cho thấy con số 12 g ở bán kính 65 mm là hoàn toàn đạt được. Các kết quả nhận được cũng cho thấy phương án đo đạc, xử lý tín hiệu, giải pháp công nghệ đã chọn là phù hợp. Điều này cho phép khử được tối đa lượng mất cân bằng.



Hình 13: Dao động gói 2 khi cân bằng tùy động.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đề cập một giải pháp cân bằng tùy động cho thiết bị. Phương pháp, chiến lược điều khiển, xử lý tín hiệu và số liệu đo,... được thử nghiệm trên một băng thử đặc thù. Phương pháp các hệ số ảnh hưởng có độ tin cậy cao và dễ áp dụng. Bộ phân tích viết trên nền C chuẩn cho phép thực hiện dễ dàng các thực nghiệm liên quan. Đây là cũng là cơ sở để phát triển các sản phẩm tùy động trong các ứng dụng về sau.

Cân bằng tùy động, mang nhiều tính ưu việt hơn cân bằng động thông thường, cho phép nghiên

cứu đẩy tốc độ quay lên cao hơn trong các thiết bị mới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Dyer S. W. and Ni J., 1999, “Adaptive Influence-Coefficient Control of Single-Plane Active Balancing Systems,” *Manufacturing Science and Engineering, ASME-IMECE 1999, MED-10*, pp.747-755.
2. LÊ ĐÌNH Tuân: Thực nghiệm cân bằng tự động ứng dụng cho monorotor lớn, ĐHQG Tp.HCM, Đề tài cấp Bộ B2004-20-10, 2004.
3. LÊ ĐÌNH Tuân: Dynamiques des constructions mécaniques, cours intersif, Centre EMMC - EPH, 2004.
4. LÊ ĐÌNH Tuân: Hướng dẫn sử dụng máy cân bằng động HnB100, ĐHBK Tp.HCM, 2003.
5. Zhou S. and Shi J., 2001, “Active Balancing and Vibration Control of Rotating Machinery: A Survey,” *Shock Vib. Dig.*, **33**(5), pp. 361-371.