

VỀ CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH VÀ MÔ PHÒNG TRONG QUÁ TRÌNH THIẾT KẾ CON QUAY VI CƠ

TS Nguyễn Văn Chúc, PGS TS Bùi Ngọc Hối, ThS Nguyễn Phú Thảng
Trung tâm KHKH - CNQS

Tóm tắt: Bài báo trình bày tổng quan phương pháp phân tích và mô phỏng con quay vi cơ: phương pháp giải tích, phương pháp phân tích phần tử hữu hạn và phương pháp động lực học. Phương pháp kết hợp đưa ra dựa trên cơ sở sử dụng đồng thời phân tích động lực học và phân tích phần tử hữu hạn. Phương pháp kết hợp cho phép sử dụng các ưu điểm của các phương pháp phân tích và mô phỏng con quay vi cơ kể trên và bỏ qua các hạn chế của chúng. Bài báo cũng trình bày kết quả của chương trình tính toán thiết kế con quay vi cơ có kết cấu kiểu khung dao động 2 bậc tự do.

I. Mở đầu

Con quay vi cơ là thiết bị dùng để đo tốc độ góc của các đối tượng chuyển động, ưu điểm chính của con quay vi cơ đó là giá thành thấp, kích thước nhỏ và năng lượng tiêu thụ thấp. Điều đó cho phép con quay vi cơ ứng dụng trong nhiều thiết bị khác nhau [5-6].

Hạn chế chính của con quay vi cơ là độ chính xác thấp. Điều này liên quan đến sự phức tạp của việc thiết kế chế tạo con quay vi cơ và các sai số công nghệ và sai số nhiệt. Việc giảm thời gian thiết kế và tăng độ chính xác của các con quay vi cơ đòi hỏi nghiên cứu các phương pháp phân tích và mô phỏng.

II. Các phương pháp phân tích và mô phỏng con quay vi cơ

1. Phương pháp giải tích

Phương pháp cơ bản nghiên cứu phân tích và mô phỏng con quay vi cơ là phương pháp giải tích. Để xây dựng phương trình chuyển động sử dụng công thức Lagrăng. Để khảo sát rôto con quay vi cơ như là hệ thống với các thông số tập trung và mô tả chuyển động sử dụng 6 bậc tự do là đủ. Để đơn giản hoá các phương trình, ta thường chỉ xem xét 3 bậc tự do, còn các hàm lượng giác được thay thế bằng giá trị các góc nếu các góc nhỏ. Có thể giải các phương trình ở dạng chung hoặc bằng các phương pháp số trong các chương trình như là MathCad và MatLab.

Ưu điểm của phương pháp giải tích là cho phép có công thức rõ ràng biểu thị mối phụ thuộc của các dao động cảm biến vào chuyển động của đế. Công thức này cho phép ta dễ dàng phân tích. Hiện nay, lý thuyết con quay đã được nghiên cứu khá đầy đủ, và trong nhiều trường hợp có thể sử dụng các phương trình và cách giải đã có sẵn. Tuy nhiên, khi thành lập các phương trình chuyển động có tính đến các sai số công nghệ, sai số nhiệt và sai số điện-từ, không tránh khỏi việc bỏ qua và đơn giản hoá, điều đó dẫn đến làm giảm độ chính xác tính toán và đòi hỏi sự phân tích các đơn giản hoá đó.

Khi thiết kế các con quay truyền thống, thường không đòi hỏi tính toán trạng thái ứng suất-biến dạng của rôto. Chuyển động của rôto con quay vi cơ liên quan với các biến dạng tần số cao của hệ treo đàn hồi và đòi hỏi việc xác định ứng suất trong kết cấu và đánh giá độ bền mỏi của hệ treo đàn hồi. Việc tính toán các đặc tính này đòi hỏi dùng đến lý thuyết sức bền vật liệu hoặc lý thuyết đàn hồi. Điều đó làm phức tạp hoá việc tính toán. Việc tính toán các hệ số trong các phương trình chuyển động đòi hỏi phải tính toán độ cứng của các thành phần kết cấu của rôto.

Phương pháp giải tích đòi hỏi nhiều thời gian và công sức trong việc thành lập và giải các phương trình. Trong thực tế phần lớn thường sử dụng các phương pháp số gần đúng và phương pháp động lực học. Các phương pháp này có các ưu điểm và hạn chế và được xem xét dưới đây.

2. Phương pháp phân tích phần tử hữu hạn

Các phương pháp phân tích phần tử hữu hạn kết cấu dựa trên việc đưa các bài toán của lý thuyết đàn hồi ở dạng các phương trình vi phân và tích phân đến việc giải các bài toán số. Từ quan điểm cơ học vật cứng, phương pháp phần tử hữu hạn thay thế một hệ với vô số bậc tự do bằng một hệ có số bậc tự do hữu hạn. Khi đó khu vực khảo sát được chia thành lưới thành các phần tử hữu hạn với các điểm tính toán ở các đỉnh lưới. Trên khu vực khảo sát, ta đặt các điều kiện biên – dịch chuyển hoặc các lực. Trong các chương trình sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn có thể kể ra là ANSYS, NASTRAN, COSMOS, Pro/Mechanica.

Ưu điểm việc sử dụng các chương trình phân tích phần tử hữu hạn là việc tính toán trạng thái ứng suất-biến dạng của kết cấu khi xác định được các phản lực tác động bên ngoài. Mặt khác, đó cũng là hạn chế của phương pháp phân tích phần tử hữu hạn vì thực chất đó là tính toán tĩnh học. Tính toán tĩnh học chỉ cho phép xác định giá trị biên độ của dao động rôto con quay mà không cho phép tính quá trình chuyển tiếp.

Đa số các chương trình phân tích phần tử hữu hạn không tính đến các mô men Côriôlit khi tính toán. Trong các chương trình đó, có thể xác định phản lực của rôto con quay vì cơ tác động lên tốc độ góc ngoài khi đưa ra mô men con quay gây ra do tốc độ góc ngoài. Mô men này được tính từ các công thức của phương pháp giải tích.

Phương pháp đặt mô men từ chuyển động của đế gồm các bước sau:

- Tính hoặc cho trước mô men của động cơ tĩnh điện;
- Tiến hành phân tích điều hoà để xác định tần số các dao động kích thích;
- Tính toán mô men con quay.
- Đặt lực phân bố từ Mô men con quay lên rô to con quay vì cơ.
- Tiến hành phân tích tĩnh học để nhận được trạng thái ứng suất-biến dạng của rôto con quay vì cơ.

Phương pháp này đòi hỏi phải tính toán mô men con quay theo công thức đã biết. Tương ứng với các sai số hệ thống là việc đơn giản hoá khi thành lập công thức. Giá trị sai số càng lớn nếu chuyển động của đế càng phức tạp. Việc lực phân bố do mô men con quay sinh ra không đổi trong vùng đặt lực là một hạn chế nữa của phương pháp này.

Một trong các chương trình phân tích phần tử hữu hạn có tính đến các mô men Côriôlit là ANSYS [7]. Trong chương trình ANSYS có thể tính toán phản lực lên tốc độ góc ngoài của đế khi kết cấu có vận tốc góc không đổi. Vận tốc này có thể được xem xét như là vận tốc tức thời.

Thứ tự các bước của phương pháp xác định biến dạng gây ra do vận tốc tức thì như sau:

- Tính hoặc cho trước mô men của động cơ tĩnh điện;
- Tiến hành phân tích điều hoà để xác định tần số các dao động kích thích;
- Cho trước vận tốc tức thời của rôto con quay vì cơ và tốc độ góc tức thời và gia tốc của đế;
- Tiến hành phân tích tĩnh học để nhận được trạng thái ứng suất-biến dạng của rôto con quay vì cơ.

Khác với phương pháp trước, trong phương pháp này việc tính toán các mô men Côriôlit được thực hiện trong chương trình phân tích phần tử hữu hạn. Kết quả các lực này được tính riêng cho từng điểm của mô hình phần tử hữu hạn. Vì không cần đưa ra công thức mô men con quay, nên có thể đưa ra bất kỳ sự kết hợp nào của tốc độ góc và gia tốc và đó là ưu điểm lớn so với phương pháp trước.

3. Phương pháp phân tích động lực học.

Tất cả các vật được coi là cứng tuyệt đối, còn các tính chất đàn hồi được mô tả theo các liên kết đàn hồi. Phương pháp này chỉ dùng cho chuyển động của rôto con quay vì cơ khí các tính chất đàn hồi của rôto con quay vì cơ có thể đưa đến các liên kết đàn hồi với hệ treo. Các chương trình sử dụng phương pháp phân tích động lực học có thể kể ra là Pro/Mechanica và Adams.

Thứ tự tính toán khi phân tích động lực học như sau:

- Tính mô men của động cơ tĩnh điện hoặc cho trước qui luật chuyển động của rôto con quay vì cơ.
- Xác định các độ cứng của hệ treo và cho trước các liên kết đàn hồi.
- Cho trước qui luật chuyển động của đế.
- Tiến hành tính toán động lực học và xác định các dao động kích thích và các dao động cảm biến.

Ưu điểm chính của phân tích động lực học là khả năng nghiên cứu các quá trình chuyển tiếp ở bất kỳ chuyển động nào của đế. Bởi vì các vật là cứng tuyệt đối, do đó không có tính toán trạng thái ứng suất-biến dạng của rôto con quay vì cơ. Để thực hiện tính toán, cần phải tính độ cứng các liên kết đàn hồi. Điều này có thể sẽ khó khăn trong các kết cấu phức tạp.

Ngoài các chương trình tổng hợp, còn có một loạt các chương trình chuyên dụng để thiết kế các hệ vi cơ điện tử, trong đó có con quay vì cơ. Ví dụ như là các chương trình Coventor và MEMSCAP. Cả hai chương trình kể trên đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để nghiên cứu kết cấu và chỉ cho phép tính các giá trị biên độ của các dao động từ tốc độ góc ngoài.

Tóm lại, tất cả các phương pháp nghiên cứu chuyển động của con quay vì cơ kể trên đều có ưu điểm và hạn chế. Không có phương pháp nào kể trên cho phép đồng thời tính các quá trình chuyển tiếp và trạng thái ứng suất-biến dạng của rôto con quay vì cơ.

4. Phương pháp kết hợp

Phương pháp kết hợp cho phép sử dụng các ưu điểm của các phương pháp phân tích và mô phỏng con quay vì cơ kể trên và bỏ qua các hạn chế của chúng. Phương pháp này dựa trên cơ sở sử dụng phương pháp phân tích động lực học và dùng phương pháp phần tử hữu hạn để chuẩn bị và xử lý phân tích động lực học.

Các bước của phương pháp này có thể như sau:

- Tiến hành phân tích mô hình trong chương trình phần tử hữu hạn và tính toán độ cứng các liên kết đàn hồi theo các giá trị tần số riêng nhận được.
- Tính toán mô men của động cơ tĩnh điện hoặc cho trước qui luật chuyển động của rôto con quay vì cơ.
- Cho trước qui luật chuyển động của đế.
- Thực hiện tính toán động lực học và xác định chuyển động của rôto con quay vì cơ như là vật cứng tuyệt đối.
- Thực hiện phân tích tĩnh học theo các thông số của tính toán động lực học để nhận được trạng thái ứng suất-biến dạng của vật thể vào thời điểm thời gian yêu cầu.

Phương pháp kết hợp có thể được thực hiện trong chương trình Pro/Mechanica. Chương trình này là một mô đun tính toán của hệ thống Pro/Engineer và bao gồm mô đun phân tích động lực học Pro/Mechanica Motion và mô đun phân tích phần tử hữu hạn Pro/Mechanica Structure.

Phương pháp kết hợp cho phép nhận được tất cả các thông tin về chuyển động của rôto con quay. Khi đó, trạng thái ứng suất-biến dạng của rôto con quay vì cơ chỉ được tính vào thời điểm thời gian yêu cầu (ví dụ, vào thời điểm độ lệch lớn nhất khỏi vị trí cân bằng). Cách tiếp

cận như vậy cho phép giảm đáng kể thời gian tính toán, bởi vì đa số thời gian dùng để tính toán trạng thái ứng suất-biến dạng. Phương pháp này có thể được sử dụng trên máy tính trong hệ thống tự động thiết kế do ЦНИИ "Электронприбор" xây dựng [8].

III. Về một số phần mềm thiết kế con quay vi cơ

Hiện nay, để tiến hành thiết kế các dạng thiết bị khác nhau, người ta sử dụng các bộ chương trình tính toán đa năng, như là ProEngineer, ProMechanica, ANSYS, Matlab. Các bộ chương trình tính toán đa năng dùng để làm việc trong một lĩnh vực thiết kế. Ví dụ, để mô hình hoá các hệ thống động lực học, thử nghiệm hoạt động của các hệ vi cơ điện tử và nghiên cứu các thuật toán điều khiển, ta sử dụng MatLab, còn để nghiên cứu kết cấu các hệ vi cơ điện tử ta sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn của ANSYS hoặc Pro/Mechanica. Thông thường, các bộ phần mềm này không tính đến sự khác biệt của các kết cấu đặc biệt và không cho phép nghiên cứu đồng bộ các vấn đề điều khiển cùng với cơ học và điện tử của các hệ vi cơ điện tử.

Ngày nay, trên thế giới đã có một số chương trình tự động thiết kế chuyên dụng cho phép tiến hành tính toán các kết cấu đặc biệt, từ tính toán các thông số kết cấu cho đến mô hình hoá hoạt động của thiết bị như là một hệ động lực học. Trong lĩnh vực thiết kế hệ vi cơ điện tử, có các phần mềm MEMCAD 4.5, IntelliCAD và CoventorWare [8].

Bộ phần mềm Coventor Ware là bộ chương trình gồm các mô đun dùng để giải quyết các nhiệm vụ thiết kế theo hướng đi xuống cũng như theo hướng đi lên. Trong trường hợp thứ nhất, hướng thiết kế bắt đầu từ mô tả kết cấu, tính toán kết cấu và kết thúc bằng việc mô hình hoá hoạt động của hệ thống như một hệ động lực học. Trong trường hợp thứ hai, đầu tiên người thiết kế mô hình hoá hoạt động của thiết bị ở mức độ hệ thống, sau đó tiến hành các tính toán chính xác cần thiết. Để thực hiện tất cả các dạng thiết kế, chương trình Coventor gồm có 3 mô đun thiết kế chính Designer, Analyzer và Architect.

Phần mềm MEMCAD 4.5 chia làm 4 phần cơ bản:

- Xây dựng kết cấu: thiết kế các mô hình vi cơ điện tử 2D và 3D.
- Mô hình hoá: đặt các điều kiện biên hoặc lựa chọn một hoặc nhiều lời giải để thiết kế thiết bị bằng máy tính.
- Điều khiển mô hình hoá: thay đổi các tham số để nhận được mô hình hoá tối ưu hơn ; sử dụng các phương trình để tính toán chính xác hơn.
- Phần giao diện: xem và phân tích các kết quả mô hình hoá có sử dụng giao diện đồ thị 3D.

Bộ phần mềm IntelliCAD gồm 3 phần mềm để thiết kế các hệ vi cơ điện tử: IntelliCAD, MEMaterial và AnisE-.

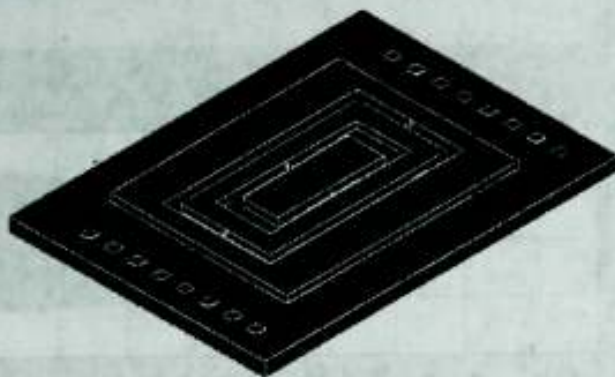
Phần mềm IntelliCAD là công cụ toàn diện nhất. Nó cho phép thiết kế, thử nghiệm và xem xét và đánh giá các đặc tính hoạt động và hoàn toàn được tích hợp trong môi trường máy tính. Đặc điểm mới của chương trình là khả năng tạo ra các nguyên mẫu ảo trước khi đưa đi gia công. Bộ phần mềm sử dụng các phương pháp khác nhau để phân tích, thiết kế và mô hình hoá các thiết bị vi cơ điện tử. Phần mềm gồm 3 mô đun chính: tĩnh điện, cơ học và cơ điện. Phần mềm MEMaterial là cơ sở cho các vật liệu vi điện tử. Sản phẩm cho phép người sử dụng kiểm tra việc thực hiện vật liệu như là chức năng từ quá trình chế tạo. Phần mềm này là sự bổ sung rất tốt cho IntelliCAD, nhưng nó có thể hoạt động như là một hệ thống độc lập. Phần mềm AnisE- là công cụ rất mạnh và thuận tiện để mô hình hoá các quá trình ăn mòn đẳng hướng. Phần mềm này có thể như là một sản phẩm hoàn thiện hoặc được sử dụng cùng với IntelliCAD.

Việc sử dụng các phần mềm này đòi hỏi phải có kinh phí để mua phần mềm có bản quyền và chúng cũng không thể đáp ứng đầy đủ các yêu cầu khi thiết kế một dạng con quay vi cơ cụ thể. Vì vậy yêu cầu đòi hỏi phải tự xây dựng phần mềm chuyên dụng khi thiết kế con

quay vi cơ. Dưới đây giới thiệu một chương trình tính toán và mô phỏng con quay vi cơ thực hiện trong môi trường MATLAB-SIMULINK.

IV. Chương trình tính toán và mô phỏng con quay vi cơ

Trong công trình này trình bày kết quả tính toán thiết kế và mô phỏng con quay vi cơ có kết cấu kiểu khung dao động 2 bậc tự do, tăng khối lượng khung trong bằng cách tăng chiều dày tám (200 μm) với các kết cấu cho phép bù trừ sai số bằng nguyên lý lò xo điện. Vật liệu được chọn là tinh thể silic 110 [1-2].



Hình 1. Hình vẽ 3D mẫu con quay vi cơ kiểu khung dao động

Phần mềm được thực hiện trong MATLAB-SIMULINK gồm những chương trình sau:

- + Chương trình tạo giao diện nhập, sửa chữa số liệu đầu vào
- + Chương trình tính toán toàn bộ các tham số có mặt trong mô hình toán.
- + Chương trình chuẩn bị số liệu cho việc mô hình vi cơ được mô phỏng trong môi trường SIMULINK

+ Chương trình mô phỏng con quay vi cơ trong môi trường SIMULINK

+ Chương trình hiển thị kết quả tính toán một số tham số quan tâm dưới dạng đồ thị

Mô hình toán và mô phỏng đã được trình bày cụ thể trong công trình [2].

Một số kết quả tính toán và mô phỏng:

+ Kích thước khung trong:

* Dài: 6.10^{-3} m. Rộng: 2.10^{-3} m. Dày: 2.10^{-4} m

+ Kích thước khung ngoài:

* Dài bao ngoài: 10.10^{-3} m. Dài bao trong: 8.10^{-3} m.

* Rộng bao ngoài: $5,5.10^{-3}$ m. Rộng bao trong: $3,2.10^{-3}$ m

* Dày: 2.10^{-4} m

+ Mô men quán tính theo trục Ox: $J_x = 1,858.10^{-11}$ kgm²

+ Mô men quán tính theo trục Oy: $J_y = 5,5872.10^{-6}$ kgm²

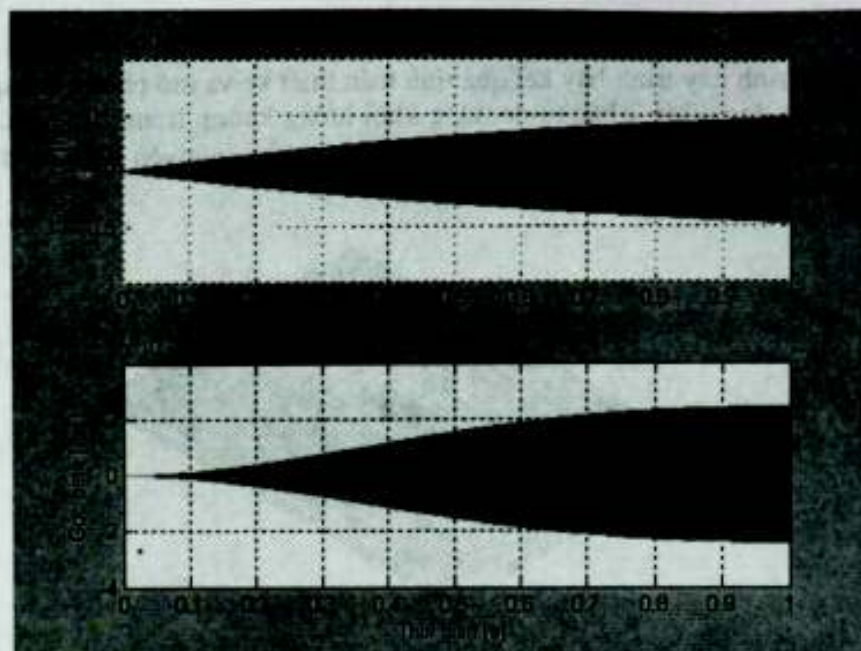
+ Tần số riêng của dao động: $\omega = 1,8609.10^4$ rad/giây

+ Biên độ dao động kích thích $\alpha = 98^\circ$

+ Hệ số phẩm chất $Q_x = Q_y = 10^4$

+ Ngưỡng độ nhảy con quay vi cơ: $\Omega_{\min} = 3,3.10^{-3}$ rad/giây (700 độ/giờ)

- Kết quả mô phỏng biên độ kích thích và biên độ cảm biến.



Hình 2. Kết quả mô phỏng con quay vi cơ

Mô hình nhận được kết quả mô phỏng trong Simulink phù hợp với kết quả mô phỏng bằng các phương pháp khác [3, 4].

Nhờ phần mềm trên cho phép tự động hoá quá trình tính toán, đánh giá các tham số thiết kế, xét ảnh hưởng của các tham số thiết kế tới chỉ tiêu chất lượng; quan sát dạng trung tín hiệu ra của khối vi cơ làm cơ sở thiết kế khối điện tử. Tuy nhiên, phần mềm mới được làm cho một kiểu kết cấu con quay vi cơ. Hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả là tiến hành phân tích, mô phỏng kiểu kết cấu con quay vi cơ này theo phương pháp phần tử hữu hạn bằng phần mềm ANSYS. Ngoài ra, sẽ tiến hành xây dựng mô hình toán và phần mềm tính toán thiết kế con quay vi cơ có kiểu kết cấu dạng đĩa dao động.

IV. Kết luận

Trong bài báo đã xem xét các phương pháp phân tích và mô phỏng trong quá trình thiết kế con quay vi cơ. Tất cả các phương pháp phân tích và mô phỏng kể trên đều có ưu điểm và hạn chế. Không có phương pháp nào kể trên cho phép đồng thời tính các quá trình chuyển tiếp và trạng thái ứng suất-biến dạng của rô to con quay vi cơ. Phương pháp kết hợp đưa ra dựa trên cơ sở sử dụng đồng thời phân tích động lực học và phân tích phần tử hữu hạn. Phương pháp này cho phép nghiên cứu chuyển động của rô to con quay ở bất kỳ chuyển động nào của đế và xác định trạng thái ứng suất-biến dạng của kết cấu ở bất kỳ thời điểm thời gian lựa chọn. Bài báo cũng đã giới thiệu một số phần mềm đa năng và chuyên dụng có thể dùng để thiết kế hệ vi cơ điện tử theo các phương pháp trên.

Bài báo này được hoàn thành với sự trợ giúp của Chương trình Quốc gia về Nghiên cứu Khoa học Tự nhiên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn Chúc, Lê Anh Tuấn, Nguyễn Phú Thắng. *Đánh giá ngưỡng độ nhạy con quay vi cơ*. Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ điện tử toàn quốc lần thứ II, TPHCM Tháng 5, 2004.
- [2] Nguyễn Văn Chúc, Bùi Ngọc Hoi, Lê Anh Tuấn. *Mô hình động lực học và mô phỏng con quay vi cơ bằng phần mềm Matlab-Simulink*. Tuyển tập công trình Hội nghị Khoa học toàn quốc về cơ học kỹ thuật, Hà nội, 12-13 Tháng 10, 2001
- [3] Timo Veijola, Heikki Kuisma, Juha Lahdenperä, Tapani Ryhänen. *Simulation model for micromechanical angular rate sensor*. Sensors & Actuators, A 60 (1997) 113-121.
- [4] Timo Veijola, Heikki Kuisma, Juha Lahdenperä. *Dynamic Modelling and Simulation of Microelectromechanical Devices With a Circuit Simulation Program*. Proceeding of MSM'98, Santa Clara, April 6-8, 1998.
- [5] Navid Yazdi, Farrokh Ayazi, Khalil Najafi. *Micromachined Inertial Sensors*. Proceeding of the IEEE, Vol. 86, No. 8, August 1998.
- [6] Евстифеев М.И. *Состояния разработок и перспективы развития микромеханических гироскопов*. Материалы 2-ой конф. молодежных ученых .СПб.3.2000.
- [7] М.И.Евстифеев, А.А.Унтилов. *Конечно Элементный Анализ Конструкции Микромеханического Гироскопа*. ГИИ РФИИ «Электроприбор», Удк.531.383-11.
- [8] Баженов А.Г., Евстифеев М.И., Унтилов А.А., Шадрин Ю. В. *"Автоматизированная система расчета конструкции чувствительного элемента микромеханического гироскопа"*.

SOME METHODS FOR ANALYSIS AND SIMULATION OF MICROMECHANICAL GYROSCOPES

Nguyen Van Chuc, Bui Ngoc Hoi, Nguyen Phu Thang

Abstract: This paper presents a review of methods for analysis and simulation micromechanical gyroscopes by providing an introduction to analytical method, method of finite element analysis and dynamical method. Based on simultaneously using method of finite element analysis and dynamical method, combining method is discussed. Combining method allows using the advantages and skipping weak points of above-mentioned methods for analysis and simulation micromechanical gyroscopes. This paper also presents the results of program for design calculation of the micromechanical gyroscope, that have a vibrated suspension of two degrees of freedom.