

## TÍNH TOÁN THIẾT KẾ VI ĐỘNG CƠ TUYẾN TÍNH SỬ DỤNG BỘ KÍCH HOẠT ĐIỆN NHIỆT DẠNG CHỮ V

Nguyễn Tiến Dũng\*, Đoàn Kim Tuấn

Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp – ĐH Thái Nguyên

### TÓM TẮT

Bài báo trình bày tính toán và thiết kế mẫu vi động cơ tuyến tính sử dụng bộ kích hoạt điện nhiệt dạng chữ V. Nhóm tác giả tiến hành khảo sát tính toán chuyển vị và lực tác động đối với các bộ kích hoạt có số dầm  $n=3, 6$  và  $10$  với dải điện áp  $V = 5 \div 30V$ , chuyển vị của rotor động cơ đạt từ  $12$  đến  $18 \mu m$ , lực nhiệt có thể đạt tới  $10$  millinewton (mN). Theo tính toán lý thuyết khi tăng số lượng dầm của bộ kích hoạt thì lực tác động tăng lên nhưng chuyển vị thì không đổi. Với các khảo sát đo đạc sơ bộ ban đầu, vi động cơ có thể hoạt động tốt với dải điện áp từ  $15$  đến  $30 V$  trong dải tần số từ  $1$  đến  $30$  Hz. Ưu điểm của các mẫu vi động cơ này là có kết cấu đơn giản, nhỏ gọn, quy trình chế tạo đơn giản, tính chính xác cao, tỷ trọng công suất lớn.

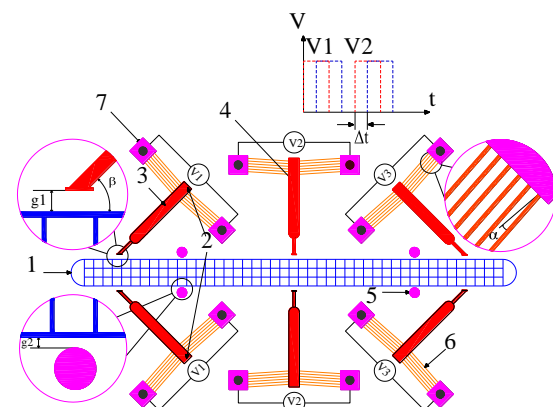
**Từ khóa:** công nghệ vi cơ điện tử (MEMS); Công nghệ vi cơ khí; Vi động cơ; bộ kích hoạt điện nhiệt

### MỞ ĐẦU

Vi động cơ là loại động cơ có kích thước cỡ micro mét chuyển đổi tín hiệu vật lý (nhiệt, điện, từ...) thành chuyển động cơ học (thẳng hoặc quay) dùng trong vi dẫn động các hệ thống [1-3]. Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ vi cơ điện tử (MEMS), vi động cơ đã và đang được nghiên cứu với nhiều tiềm năng ứng dụng trong vi vận chuyển, y sinh, robot sinh học, thiết bị y tế, máy quét chất lượng cao, thiết bị chuyển mạch quang học cho mạng cáp quang,... Có nhiều hiệu ứng vật lý được ứng dụng trong các bộ kích hoạt của vi động cơ, điển hình như: Hiệu ứng tĩnh điện, áp điện, điện từ, giãn nở nhiệt, sử dụng hợp kim nhớ hình... Trong [4-6], các tác giả công bố vi động cơ sử dụng hiệu ứng tĩnh điện. Các loại động cơ này thường có công nghệ chế tạo phức tạp, điện áp dẫn lớn, dễ gây chập điện và hiệu suất thấp, lực tác động nhỏ (lực tĩnh điện). Một vài loại vi động cơ sử dụng hiệu ứng điện từ được trình bày trong [7-9], nhược điểm của hiệu ứng này là hiệu suất thấp, kích thước lớn (do phải tuân thủ kết cấu của một động cơ điện). Hợp kim nhớ hình và hiệu ứng áp điện cũng đã được 1 số nhóm nghiên cứu [10,11]. Tuy nhiên các vi động cơ này hạn chế về chuyển vị, lực tác động và chế tạo phức tạp do phải lắp ghép từ

hiều chi tiết với nhau. Các vi động cơ ứng dụng hiệu ứng điện nhiệt có thể đạt được tỷ trọng công suất cao hơn nhiều so với các hiệu ứng dẫn động khác và có điện áp dẫn thấp hơn, momen và lực sinh ra lớn [12-14]. Trong bài báo này, các tác giả đưa ra thiết kế, tính toán, mô phỏng và chế tạo thử nghiệm mẫu vi động cơ tuyến tính sử dụng sáu bộ kính hoạt nhiệt với hệ dầm dạng chữ V từng đôi một đối xứng tạo các chuyển vị thuận, nghịch và hãm dừng. Mẫu vi động cơ này có kết cấu đơn giản, tỷ trọng công suất cao, điện áp dẫn nhỏ, công nghệ chế tạo đơn giản, dễ chế tạo hàng loạt và tỷ lệ thành công cao.

### CẤU TẠO NGUYÊN LÝ LÀM VIỆC



Hình 1. Cấu tạo vi động cơ tuyến tính

Vi động cơ có cấu tạo được mô tả như hình vẽ 1, rotor (1) có khả năng chuyển động sang trái hoặc sang phải, được định vị, dẫn hướng bởi

\*Tel: 0915 662707, Email: dungnguyentien@tut.edu.vn

các vấu (5), khe hở  $g_2$  giữa các vấu (5) và rotor (1) được tính toán đủ lớn để rotor dễ dàng chuyển động nhưng không bị lệch hướng; Vì động cơ sử dụng 3 cặp bộ kích hoạt giãn nở nhiệt (2), từng đôi một đối xứng điều khiển rotor (1) chuyển động tịnh tiến sang trái, sang phải và hãm dừng. Khi cấp điện áp  $V_1$  (dạng xung vuông hoặc nửa hình sin) vào các điện cực (7), các dầm mảnh (6) của 2 bộ kích hoạt bên trái sẽ có dòng điện chạy qua, do điện trở của các dầm mảnh tương đối lớn nên các dầm được đốt nóng và giãn nở dài, do kết cấu các dầm được sắp xếp hình chữ V nên hệ thống dầm sẽ đẩy thanh đẩy (3) tịnh tiến theo hướng đỉnh chữ V. Sau khi khắc phục khe hở  $g_1$  các thanh đẩy (3) sẽ kẹp chặt và đẩy rotor (1) chuyển động sang trái. Ở nửa chu kỳ tiếp theo điện áp  $V_1=0$ , các dầm mảnh (6) được làm nguội và trở về vị trí ban đầu, chuẩn bị cho chu kỳ làm việc tiếp theo. Đồng thời lúc này ta cấp điện áp  $V_2$  (ngược pha với  $V_1$ ) để kẹp chặt và giữ rotor (1) ở vị trí vừa dịch chuyển tới. Các chu kỳ tiếp theo hoạt động tương tự, như vậy với sự phối hợp điều khiển  $V_1$  và  $V_2$  ngược pha nhau, rotor (1) được dịch chuyển từng bước sang bên phải, ta điều khiển  $V_3$  và  $V_2$  ngược pha nhau tương tự như việc phối hợp giữa  $V_1$  và  $V_2$ .

TÍNH TOÁN VÀ MÔ PHỎNG CÁC BỘ KÍCH HOẠT ĐIỆN NHIỆT

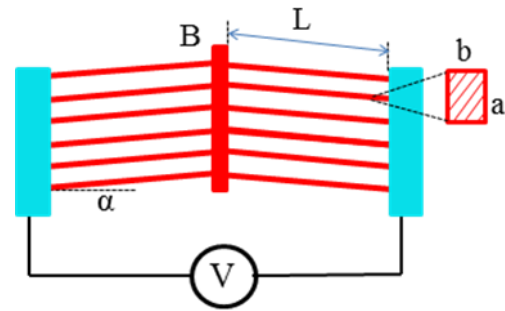
Tính toán chuyển vị

Mô hình nguyên lý và kết cấu mỗi hệ dầm chữ V có dạng như Hình 2

Sự phân bố nhiệt trên dầm chữ V được tính theo phương trình truyền nhiệt dạng thu gọn [15]:

$$k \frac{d^2T}{dx^2} + J^2 \rho = 0 \tag{1}$$

Trong đó:  $k$  là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu ( $W/\mu m.K$ );  $T$  là nhiệt độ tại vị trí  $x$ ;  $\rho$  là điện trở suất của dầm;  $J$  là mật độ dòng điện ( $A/\mu m^2$ ).



Hình 2. Mô hình tính toán hệ dầm chữ V

Giải phương trình (1) ta sẽ xác định được nhiệt độ trung bình phân bố trên các dầm.

$$T_{avg} = \frac{1}{2L} \int_0^{2L} T(x) dx \tag{2}$$

Từ kết quả tính toán trong [16,17], độ giãn nở của dầm đơn được xác định theo các công thức sau:

$$\Delta L = \int_0^L \alpha(T) [T(x) - T_s] dx = \alpha_l \left[ \frac{B}{A^2} L + \frac{C_1}{A} (e^{AL} - 1) - \frac{C_2}{A} (e^{-AL} - 1) \right] \tag{3}$$

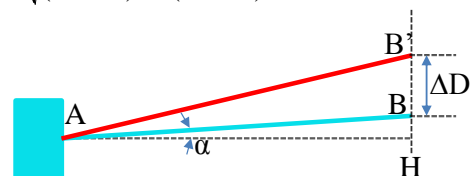
Với:  $B = \frac{U^2}{l^2 r_0 k_T}$ ,  $l = 2L$ ,  $A^2 = B \alpha_\rho$ ;

$$C_1 = -\frac{1}{\alpha_\rho} \frac{(-e^{-2AL} + 1)}{(e^{2AL} - e^{-2AL})}; C_2 = -\frac{1}{\alpha_\rho} \frac{(e^{2AL} - 1)}{(e^{2AL} - e^{-2AL})} \tag{4}$$

Trong đó:  $r_0(\Omega m)$  là điện trở ban đầu của dầm;  $T_s(^{\circ}C)$  là nhiệt độ môi trường;  $L(\mu m)$  chiều dài ban đầu của dầm đơn,  $\alpha_\rho(K^{-1})$ ,  $\alpha_l(K^{-1})$  là hệ số nhiệt của điện trở suất và hệ số giãn nở dài của vật liệu và  $k_T (W/\mu m.K)$  được tra theo thông số kỹ thuật của vật liệu silic tinh thể đơn.

Chuyển vị  $\Delta D$  của đỉnh hệ dầm B được xác định theo sơ đồ Hình 3

$$\Delta D = B'H - BH = \sqrt{AB'^2 - AH^2} - BH = \sqrt{(L + \Delta L)^2 - (L \cos \alpha)^2} - L \sin \alpha \tag{5}$$



Hình 3. Sơ đồ tính toán chuyển vị đỉnh dầm chữ V

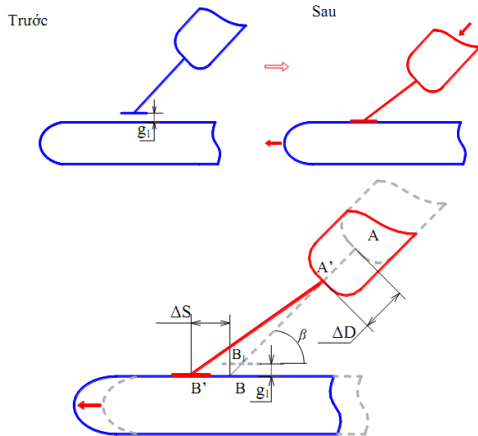
Xác định chuyển vị của rotor

Giả sử thanh đẩy chỉ biến dạng ở cổ (hình 4), và không có sự trượt giữa thanh đẩy và rotor, ta có chuyển vị ngang của rotor

$$\Delta S = \sqrt{d^2 - (d' \sin \beta)^2} - d' \cos \beta \quad (6)$$

$$d' = A'B = d - \Delta D + \frac{g_1}{\sin \beta} \quad (7)$$

Với:  $d = AB_1$



**Hình 4.** Sơ đồ tính toán chuyển vị của rotor

**Tính toán lực**

Từ hàm phân bố nhiệt trên các dầm đơn được tính toán tại [15-17], ta xác định được độ giãn dài  $\Delta L$  của dầm đơn theo công thức (3) và lực sinh ra do biến dạng nhiệt là:

$$F_b = S\sigma = SE\varepsilon = ES \frac{\Delta L}{l} = ES\alpha\Delta T \quad (7)$$

Trong đó: E là mô đun Young của vật liệu chế tạo; S là diện tích mặt cắt ngang của thanh;  $\sigma$  là ứng suất trên mặt cắt ngang của dầm;  $\varepsilon$  là biến dạng dài tương đối của dầm; L là chiều dài của dầm đơn;  $\alpha$  là góc nghiêng của dầm so với phương vuông góc với phương chuyển động.

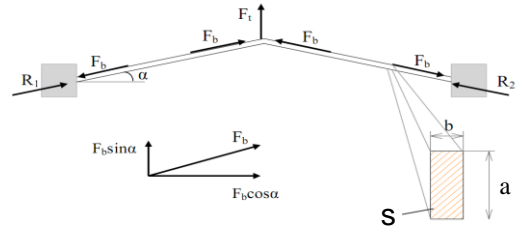
Lực đẩy tại đỉnh cặp dầm chữ V là:

+ Tính cho một cặp dầm:

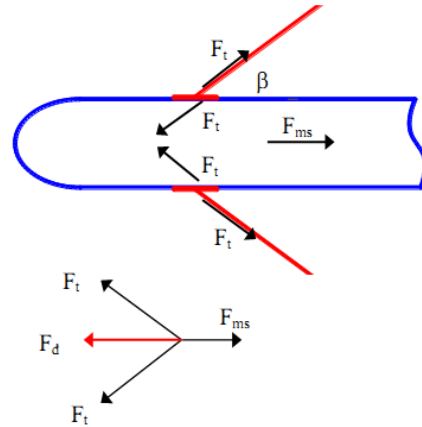
$$F_t = 2F_b \sin \alpha = 2ES \frac{\Delta L}{l} \sin \alpha \quad (8)$$

+ Tính cho n cặp dầm:

$$\sum F_n = 2nSE \frac{\Delta L}{L} \sin \alpha \quad (9)$$



**Hình 5.** Sơ đồ tính toán lực đẩy đỉnh dầm chữ V



**Hình 6.** Sơ đồ tính toán lực đẩy rotor

Để tính toán đơn giản, ta bỏ qua sự trượt của dầm đẩy và rotor. Lực đẩy chung của cặp dầm  $F_d$  (với mỗi chiều dài dịch chuyển) là tổng hợp của các lực đẩy tại đỉnh dầm đẩy  $F_t$  và lực ma sát rotor với nền  $F_{ms}$ :

$$F_d = 2F_t \cos \beta - F_{ms} = 2nAE \frac{\Delta L}{L} \sin \alpha \cos \beta - F_{ms} \quad (10)$$

Với điện áp  $V_1$  có biên độ 15 (V),  $r_0=1200(\Omega mm)$ ,  $T_s=20^{\circ}C$ ,  $L=750(\mu m)$ ,  $S=ab=6 \times 30(\mu m^2)$ ,  $\alpha_p=1,25 \cdot 10^{-3} (K^{-1})$ ,  $\alpha_l (K^{-1})$  và  $k_T (W/\mu m.K)$  được tra theo thông số kỹ thuật của vật liệu silic tinh thể đơn, ta tính được chuyển vị và lực cho các dầm đẩy có số dầm lần lượt  $n=3, 6, 10$  được kết quả như bảng sau ( $F$  [mN],  $\Delta S$  [ $\mu m$ ]):

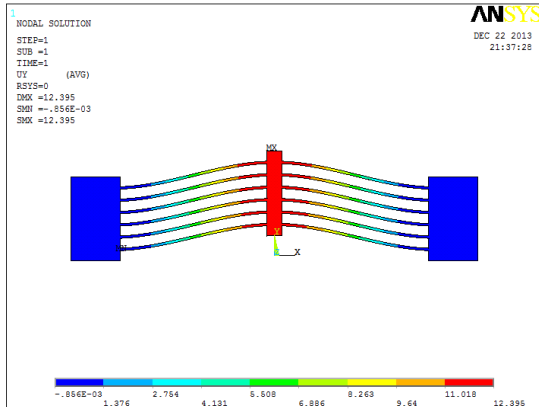
**Bảng 1.** Kết quả tính toán lực và chuyển vị của vị động cơ ứng với các bộ kích hoạt có số dầm lần lượt  $n=3, 6, 10$

Số cặp dầm n	3	6	10
$\alpha=2^{\circ}$	$\Delta S= 18,3$ $F=2,7$	$\Delta S= 18,3$ $F=5,4$	$\Delta S= 18,3$ $F=9,0$

**Mô phỏng nhiệt và chuyển vị của hệ dầm chữ V**

Nhằm kiểm tra nhiệt độ lớn nhất sinh ra trên hệ thống dầm và chuyển vị đạt được, các tác

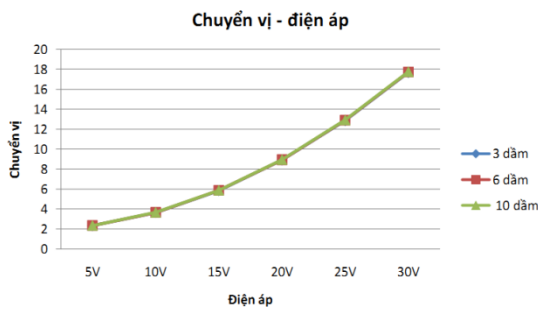
giả đã tiến hành mô phỏng các cấu trúc bộ kích hoạt dùng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). So sánh với kết quả tính toán theo các công thức từ (5) đến (10), đồng thời so sánh các phương án thiết kế ta thu được kết quả như Hình 7,8.



**Hình 7.** Chuyển vị của đỉnh dầm chữ V ứng với biên độ điện áp = 25 V

Với các bộ kích hoạt n=3, 6,10 cặp dầm, tại dải điện áp từ 5-30 V ta thu được quan hệ chuyển vị theo đồ thị như hình 8.

Từ kết quả mô phỏng (hình 8) và kết quả tính toán (bảng 1) ta thấy rằng khi thay đổi số cặp dầm chữ V thì chuyển vị của hệ thống không thay đổi, nhưng lực đẩy thì tỷ lệ thuận với số cặp dầm.

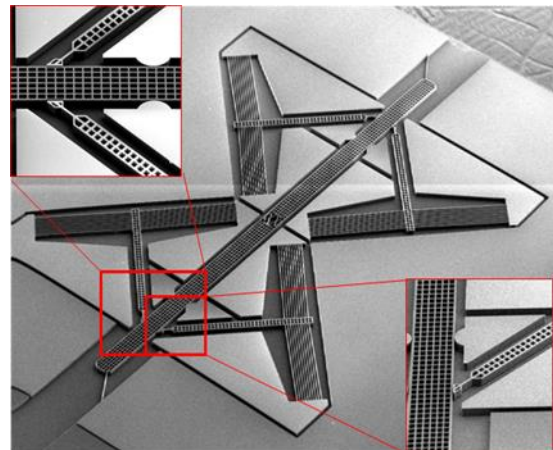


**Hình 8.** Đồ thị so sánh chuyển vị của các bộ kích hoạt có n=3,6,10 ứng với dải điện áp từ 5-30V

**KẾT QUẢ CHẾ TẠO BƯỚC ĐẦU**

Vi động cơ được chế tạo từ phiến silic kép (Silicon On Insulator-SOI wafer) sử dụng 1 mặt nạ (single mask) dựa trên công nghệ MEMS tiêu chuẩn. Các công đoạn như chế tạo mặt nạ, quang khắc và hiện hình, ăn mòn ion hoạt hóa sâu được thực hiện tại phòng thí

nghiệm của trường đại học Ritsumeikan – Nhật Bản. Các công đoạn còn lại như cắt chip, làm sạch, ăn mòn axit bốc bay (Vapor HF) được thực hiện tại viện ITIMS – ĐH Bách khoa Hà Nội). Hình 9 là ảnh chụp SEM (Scanning Electron Microscope) hệ thống vi động cơ và các bộ phận.



**Hình 9.** Hình ảnh chụp SEM 1 mẫu vi động cơ

Qua kết quả chụp SEM, ta nhận thấy: các kích thước của vi động cơ hoàn toàn phù hợp với bản vẽ thiết kế, các kết cấu là sắc nét và đảm bảo các đặc tính kỹ thuật. Điều này khẳng định quy trình chế tạo thử nghiệm là phù hợp. Các mẫu vi động cơ sau khi chế tạo sẽ được kiểm tra hoạt động thông qua hệ thống đo kiểm, đánh giá thực nghiệm so sánh với các kết quả tính toán lý thuyết, mô phỏng và sẽ được công bố ở các nghiên cứu tiếp theo.

**KẾT LUẬN**

Bài báo đề xuất thiết kế mẫu vi động cơ tuyến tính dẫn động bằng bộ kích hoạt giãn nở nhiệt dạng chữ V, Vi động cơ được chế tạo dự trên công nghệ MEMS. Mỗi vi động cơ được chế tạo trên chip có kích thước 5x5 mm. Bộ kích hoạt giãn nở nhiệt dạng chữ V có kích thước hình học L=750 μm, chiều rộng dầm, chiều sâu dầm đơn b= 30 μm.

Các tính toán lý thuyết về nhiệt độ, chuyển vị, lực đẩy nhằm đưa ra các kích thước hình học sơ bộ cho vi động cơ. Bộ kích hoạt giãn nở nhiệt cũng được mô phỏng dựa trên phần mềm ANSYS nhằm kiểm nghiệm các kết quả

tính toán và so sánh lựa chọn các kết cấu phù hợp hơn.

Các kết quả đã trình bày có thể thấy rằng ưu điểm lớn nhất của các mẫu vi động cơ này là kết cấu đơn giản, nhỏ gọn dễ chế tạo, lực đẩy lớn nên có khả năng ứng dụng cao trong các bài toán cụ thể. Các tính toán và mô phỏng cho thấy khi làm việc ở điện áp cao (>30 V) thì nhiệt độ trên các bộ kích hoạt có thể lên tới trên 400 °C có thể gây ảnh hưởng tới các chi tiết xung quanh đây cũng chính là nhược điểm của các bộ kích hoạt điện nhiệt và cần khắc phục ở các nghiên cứu tiếp theo.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi kinh phí NCKH trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp trong đề tài mã số T2016-86.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Tai, Y. C. (1995), "Micromotors"; The Caltech Micromachining Group, Electrical Engineering, California Institute of Technology; *Journal Of Microelectromechanical Systems*, IEEE, pp.8-11.
2. Dave Polka (2003), "*Motors and Drives: A Practical Technology Guide*". ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, ISBN 1-55617-800-X
3. Dang Bao Lam, Vu Ngoc Hung, Pham Hong Phuc (2012); "*Micro mechanisms in the micro robot systems: case studies of the electrostatic micro mechanisms*"; Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ IX.
4. Sarajlic E. *et al.* (2010), "Three-Phase Electrostatic Rotary Stepper Micromotor With a Flexural Pivot Bearing", *Journal of MicroElectroMechanical System*, Vol. 19, No 2, pp. 338-349.
5. Stranczl M. *et al.* (2011). *Modal Analysis and Modeling of a Frictionless Electrostatic Rotary Stepper Micromotor*. Proceedings of IEEE MEMS 2011, Cancun, MEXICO, pp. 1257-60.
6. Phuc Hong Pham, Dzung Viet Dao, Lam Bao Dang, Susumu Sugiyama, (2012) "*Single mask, simple structure micro rotational motor driven by electrostatic comb-drive actuators*", *J. Micromech. Microeng* 22.
7. Ki Hoon Kim, Hyeun Joong Yoon, Ok Chan Jeong, Sang Sik Yang, (2005) "*Fabrication and test of a micro electromagnetic actuator*", *Sensors and Actuators A* 117, pp. 8-16
8. Mei Lin Chan *et al.* (2011). *Low friction liquid bearing mems micromotor*. IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems , pp. 1237-1240.
9. Đặng Phước Vinh, Ngô Thanh Nghị, Võ Như Thành (2013)...*Thiết kế và chế tạo vi động cơ từ trở tích hợp cảm biến dòng điện Eddy*, Hội nghị toàn quốc lần thứ 2 về Điều khiển và Tự động hoá - VCCA-2013
10. Young Pyo Lee, *al* ; *Locomotive Mechanism (2004) Design and Fabrication of Biomimetic Micro Robot Using Shape Memory Alloy*; Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation.
11. Takashi Shigematsu, *al* (2001), "*Nanometer Stepping Drives of Surface Acoustic Wave Motor*", *Nanotechnology*, 2001. IEEE-NANO 2001. Proceedings of the 2001 1st IEEE Conference on, pp. 495 - 500
12. Changhong Guan and Yong Zhu (2012), "*Bidirectional Electrothermal Actuator With Z-Shaped Beams*", *IEEE Sensor journal*. Vol.12, No 7, pp.2508-9.
13. Amer Abdallah, *al* (2014), "*Thermal Analysis of Electrostatic Micro Actuator*", *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*, Vol. 4(10), Jan, 2014, pp. 23-32, ISSN: 2305-0543
14. Jae-Sung Park *et al.* (2001), "Bent-Beam Electrothermal Actuators - Part II: Linear and Rotary Microengines", *J. of MicroElectroMechanical Sys.*, Vol. 10, No. 2, pp. 255-262.
15. Qing Ji and Karen L. Scott, "*First Order Modeling of Thermal Actuators in SUGAR*", Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California.
16. Nguyễn Tiến Dũng, Trần Văn Quân, Phạm Hồng Phúc, Nguyễn Quang Địch (2014), "*Phát triển vi động cơ quay dẫn động bằng bộ kích hoạt nhiệt dựa trên công nghệ MEMS*" Hội nghị Cơ học kỹ thuật toàn quốc, Kỷ niệm 35 năm thành lập Viện Cơ học Hà Nội, 09/04/2014. Tập 1 Cơ học máy, tr. 3-8.
17. Nguyễn Tiến Dũng, Phạm Hồng Phúc, Nguyễn Quang Địch (2015), "*Thiết kế, chế tạo thử vi động cơ đường kính 2,5mm dựa trên công nghệ MEMS*"; *Tạp chí khoa học và công nghệ các trường ĐH Kỹ thuật*; tập 108-2015, tr. 26-32.

## SUMMARY

**DESIGN THE MICRO LINEAR MOTOR  
USING V-SHAPED ELECTRO-THERMAL ACTUATORS****Nguyen Tien Dzung<sup>\*</sup>, Doan Kim Tuan***University of Technology - TNU*

This paper presents a micro linear motor with simulation and measurement of electro-thermal actuators based on thermal expansion of V-shape silicon beams when applying a voltage. The processes have been carried out with three types of motors with different numbers of thermal expansion beams, i.e. 3, 6 and 10 in  $V = 5 \div 30V$  voltage range. In theoretical calculations, the driving force increase with the larger number of actuator beams but the displacements is constant. Measured displacements of the motor shuttle are from 12 to 18  $\mu\text{m}$  and driving force can reach tens of millinewton (mN). By measurement of the step displacement with driving frequency from 1 to 30 Hz, it can be seen that the optimal range of applied voltage is from 15 to 30 V. The advantages of the motor are small size, simple fabrication process with only single mask, high accuracy control.

**Keywords:** *MEMS Technology, Bulk – Micromachining, micro linear motor, Electro-thermal actuator*

*Ngày nhận bài: 18/12/2017; Ngày phản biện: 04/01/2018; Ngày duyệt đăng: 05/3/2018*

---

<sup>\*</sup> *Tel: 0915 662707, Email: dungnguyentien@tmut.edu.vn*