

садопаркове хоз-во” / М.И. Калинин ; ред. А. М. Лаврова. – М. : Экология, 1991. – 176 с. : ил. 10. Вихров В.Е. Строение и физико-механические свойства дуба. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1954. – 259 с. 11. Усольцев В.А. Рост и структура фитомассы древостоев. – Новосибирск: Наука, 1988. – 253 с. 12. Drzewa podkarpackich lasów, <http://www.zielonepodkarpacie.pl> 13. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов // МГЭИК, 2006, Том 4: Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования, Глава 2: Общие методологии, применимые к различным категориям землепользования 14. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов, МГЭИК, 2006, Том 4: Сельское хозяйство, лесное хозяйство и другие виды землепользования, Глава 4: Лесные площади 15. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України / Р.А. Бунь, М.І. Густі, В.С. Дачук та ін.; За ред. Р.А. Буня. – Львів: УАД, 2004. –376 с. 16. Электронный ресурс. http://www.lasy.gov.pl/o_lasach/ochrona_przyrody/ Ochrona przyrody/Dodat: Małgorzata Haze 17. Lasy w Polsce 2011. Raport na podstawie materiałów Ministerstwa Środowiska, Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych, Instytutu Badawczego Leśnictwa, Biura Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej, Głównego Urzędu Statystycznego oraz statystyk międzynarodowych. Centrum Informacyjne Lasów Państwowych, 2011.

УДК 519.711; 681.5; 621.382

А. Головатий*, М. Лобур

*Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя,
кафедра програмної інженерії;
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра систем автоматизованого проектування

VHDL-AMS МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОТЕПЛООВОГО МІКРОАКТЮАТОРА ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЛОГІЧНОГО РІВНЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

© Головатий А., Лобур М., 2013

Розроблено VHDL-AMS модель електротеплового мікроактюатора для автоматизованого проектування засобами hAMSter, що дає змогу моделювати залежність деформації (згину) плечей мікроактюатора від їх довжини і прикладеної напруги до анкерів, струму від прикладеної напруги і довжини плеча мікроактюатора, розподіл температури вздовж його плечей, енергоспоживання мікроактюатора від прикладеної напруги, а також проводити аналіз поведінки цього пристрою на функціонально-логічному рівні проектування.

Ключові слова: MEMS, електротепловий мікроактюатор, закон Джоуля-Ленца, VHDL-AMS модель, автоматизоване проектування

VHDL-AMS model of electro-thermal microactuator for computer-aided design is created using hAMSter. The created model allows to simulate the dependence of the bending of hot (thin) and cold (wide) arms on their lengths and the applied voltage between the anchors of the microactuator, dependence of the current on the applied voltage and the arm length of the microactuator, temperature distribution along the arms, dependence of the power consumption on the applied voltage, and also to perform the behavioral analysis of this device at the functional-logic design level.

Key words: MEMS, electro-thermal microactuator, Joule-Lenz's law, VHDL-AMS model, computer-aided design.

Вступ

Мікроелектромеханічні системи (MEMS) – це пристрої з розмірами в діапазоні від 20 мкм до 1 мм, що поєднують мікроелектронні й мікроемеханічні компоненти, і які виготовляють за технологією виготовлення інтегральних мікросхем. Однією з важливих компонент MEMS є

мікроактюатор – це пристрій, що перетворює енергію на керований рух. Діапазон застосування мікроактюаторів надзвичайно широкий і різний та постійно зростає. Вони використовуються в робототехніці, керуючих пристроях, аерокосмічній області, біомедицині, дозиметрії, у вимірювальних приладах, технологіях розваг, автомобілебудуванні тощо. Основні методи, які використовують для здійснення активації (руху, деформації, приведення в дію) в таких пристроях, можна звести до таких: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний і тепловий. Оскільки електротеплова активація забезпечує простий контрольований метод мікроактуації, сумісний зі стандартною мікроелектронікою, то електротеплові мікроактюатори є одними з найбільш поширених і перспективних пристроїв керування МЕМС [1–3].

Одним із найважливіших етапів розроблення МЕМС є його математичне моделювання. На ринку ПЗ існує велика кількість програмних пакетів числового моделювання інтегральних пристроїв і технологічних процесів. Найвні універсальні програмні засоби найчастіше представляють середовища з широким набором функцій для розв'язку алгебраїчних і диференціальних рівнянь та графічним відображенням отриманих результатів. Застосування таких універсальних програм дає змогу доволі ефективно розв'язувати науково-дослідницькі задачі, але ці засоби не завжди зручні в процесі проектування, коли необхідно отримати розв'язок з необхідною точністю за досить короткий проміжок часу [6].

Оскільки для проектування МЕМС потрібне володіння інформацією з таких фізичних областей знань, як електроніка, механіка, електростатика, термодинаміка, то їх повний статичний та динамічний аналіз є дуже складним. Практичний шлях – це створення моделей на мовах опису апаратури (VHDL-AMS, Verilog-AMS, MAST) з використанням спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад, такого як: Synopsys Saber, MATLAB, Cadence, hAMSter, SMASH (Dolphin Integration) та іншого [7–9].

Тому розроблення поведінкових моделей пристроїв МЕМС для їх моделювання і аналізу на функціонально-логічному рівні проектування є актуальним завданням.

Конструкція та принцип дії двоплечового електротеплового мікроактюатора

Конструкція двоплечового електротеплового мікроактюатора складається з тонкого (гарячого) плеча, широкого (холодного) плеча і плеча згину, які з'єднані в одному кінці й еластично приєднані до анкерів. Анкери нерухомо закріплені до підкладки інтегрального пристрою (рис. 1). Гаряче плече зазвичай тонше за холодне, тому електричний опір гарячого плеча більший від опору холодного.

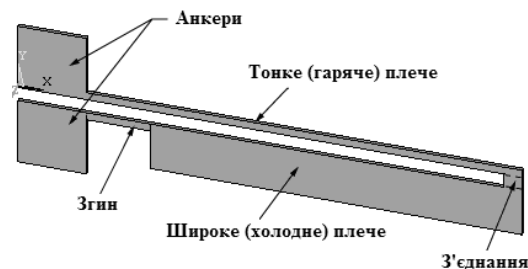


Рис. 1. Конструкція МЕМС двоплечового електротеплового актюатора

Розглянемо принцип дії такого двоплечового електротеплового мікроактюатора, що ґрунтується на законі Джоуля–Ленца. До анкерів мікроактюатора прикладається напруга, що створює електричне поле. Коли електричний струм протікає через холодне і гаряче плече, генерується тепло в гарячому плечі, яке набагато більше від тепла, згенерованого в холодному плечі. Своєю чергою, це приводить до того, що температура гарячого плеча стає набагато вищою за температуру холодного плеча. Оскільки холодне і гаряче плече виготовлені з одного матеріалу і мають відповідно однаковий коефіцієнт теплового розширення, то різниця температур призводить до більшого розширення гарячого плеча, ніж холодного. Результатом такого розширення є деформація (згин) мікроактюатора, тобто виникнення механічного руху.

Математична модель електротеплового мікроактюатора

Під час побудови моделі електротеплового мікроактюатора й аналізу розподілу температури нехтуємо теплом, яке розсіюється в навколишнє середовище через конвекцію і радіацію. Оскільки довжина кожного плеча мікроактюатора набагато довша від його ширини і висоти, то для аналізу достатньо побудувати двовимірну модель. Відповідно до принципу теплопередачі, теплопровідність визначаємо з рівняння [1]:

$$Q = -K_p S \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

де K_p – коефіцієнт теплопровідності полікремнію; S – теплопровідна площа поперечного перерізу балки; T – температура і x довжина структури. Якщо тепло переноситься в структурі і поза її межами, то теплопровідність в структурі визначаємо з рівняння:

$$Q_i = -K_p wh \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x. \quad (2)$$

Теплопровідність поза межами структури визначаємо з рівняння:

$$Q_0 = -K_p wh \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx}, \quad (3)$$

де w – ширина і h – висота мікроактюатора. При прикладенні напруги до анкерів електротеплового мікроактюатора виникає струм, що протікає через плечі мікроактюатора і згідно із законом Джоуля–Ленца призводить до їх нагрівання:

$$Q_j = j^2 \rho wh dx, \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 [1 + \xi(T - T_0)], \quad (5)$$

$$j = \frac{V}{\rho L}, \quad (6)$$

де j – густина струму; ρ – питомий електричний опір структури мікроактюатора; ρ_0 – питомий електричний опір балки при температурі T_s ; T_s – температура підкладки; ξ – температурний коефіцієнт електричного опору; V – напруга, прикладена до анкерів; L – довжина плеча. Згідно з першим законом термодинаміки (збереження енергії):

$$Q_i + Q_j = Q_0. \quad (7)$$

Підставивши рівняння (2) і (4) у рівняння (7) і взявши границю $dx \rightarrow 0$, отримаємо таке диференціальне рівняння другого порядку:

$$K_p wh \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) + j^2 \rho wh = 0 \quad (8)$$

Оскільки мікроактюатор має однакову теплопровідну площу поперечного перерізу, рівняння (8) можна спростити до такого вигляду:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) = - \frac{j^2 \rho}{K_p}. \quad (9)$$

Граничні умови визначаємо з того, що анкери мають таку саму температуру, як підкладка T_s , тобто:

$$T(0) = T(L) = T_s \quad (10)$$

Розв'язавши рівняння (9) і (10), отримаємо розподіл температури вздовж плеча:

$$T(x) = \frac{V^2}{2L^2 \rho K_p} (Lx - x^2) + T_s \quad (11)$$

З рівняння (11) температура змінюється параболічно і симетрична в центральній точці довжини з максимальною температурою, T_m при $x = L/2$. Підставивши $x = L/2$ в рівняння (11), отримаємо максимальну температуру:

$$T_m = \frac{V^2}{8\rho K_p} + T_s \quad (12)$$

Якщо тепловий градієнт перпендикулярний до осі балки, теплоперенесення у площині балки:

$$T(x) = (T - T_s)x / L + T_s, \quad (13)$$

$$T(y) = \frac{T_h - T_c}{h} y + \frac{T_h + T_c}{2} \quad (14)$$

де T_s – температура нижньої частини балки (температура холодного плеча) і T_h – температура верхньої частини балки (температура гарячого плеча).

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + P \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = F, \quad (15)$$

де E – модуль Юнга балки; I – момент інерції, згин (деформація) балки; P – навантаження на балку і F – прикладена сила. Припускаємо, що балка не рухається в площині y - z . Тоді прикладену силу визначаємо з формули:

$$F = p(x) - \frac{\partial^2 M_{T_z}}{\partial x^2}. \quad (16)$$

Момент M_{T_z} обчислюємо за формулою:

$$M_{T_z} = \int_s \alpha E T y dS, \quad (17)$$

де M_{T_z} – момент згину і α – коефіцієнт теплового розширення. З рівняння (17), припустивши, що α і E константи, отримаємо:

$$M_{T_z} = \frac{\alpha E w h^2}{12} (T_h - T_c). \quad (18)$$

Припускаємо, що немає руху в площині y - z , тоді аналогічну величину M_{T_z} визначаємо з формули:

$$M_{T_y} = \int_s \alpha E T z dz \quad (19)$$

Це рівняння дорівнює нулю. Вираз для M_{T_z} матиме вигляд:

$$\frac{\partial^2 M_{T_z}}{\partial x^2} = 0 \quad (20)$$

Підставивши рівняння (19) у рівняння (15) дає $F=0$. Тому обидва рівняння можна привести до вигляду:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + P \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0. \quad (21)$$

Далі, припустивши, що $P=0$, спростуємо його до вигляду:

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0. \quad (22)$$

Припустивши, що лівий кінець балки нерухомо закріплено, граничні умови визначимо так:

$$v(0) = \frac{\partial y}{\partial x}(0) = 0. \quad (23)$$

Припустимо, що правий кінець балки вільний (не закріплений). За наявності теплового напруження граничні умови на вільному кінці балки:

$$EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}(L) = -M_{T_z}, \quad (24)$$

$$EI \frac{\partial^3 v}{\partial x^3}(L) + P \frac{\partial y}{\partial x} = -\frac{\partial M_{T_z}}{\partial x}. \quad (25)$$

Якщо використати рівняння (18), рівняння (25) набуде вигляду:

$$EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}(x) = -\frac{\alpha Ewh^2}{12}(T_h - T_c) \quad (26)$$

Продиференціювавши рівняння (26), отримаємо:

$$\frac{\partial^3 v}{\partial x^3}(L) = 0 \quad (27)$$

Проінтегрувавши рівняння (28) і наклавши граничні умови, знайдемо вигин плеча:

$$EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}(x) = -\frac{\alpha Ewh^2}{12}(T_h - T_c) \quad (28)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}(x) = -\frac{\alpha wh^2}{12I}(T_h - T_c) \quad (29)$$

Остаточно вигин плеча в рівнянні (28) буде таким:

$$v(x) = -\frac{\alpha wh^2}{24I}(T_h - T_c)x^2 \quad (30)$$

де I – визначаємо як:

$$I = \int_S y^2 dS = \frac{wh^3}{12} \quad (31)$$

Тому рівняння (28) набуде вигляду:

$$v(x) = -\frac{\alpha}{2h}(T_h - T_c)x^2 \quad (32)$$

$$h = \left(\frac{L_{ch}}{L_h}\right)(w_h + w_c + L_g) + \left(\frac{L_c - L_{ch}}{L_h}\right)(w_h + w_c) + \left(\frac{L_f}{L_h}\right)(w_f + w_c) \quad (33)$$

Електричний опір електротеплового мікроактюатора визначаємо через питомий електричний опір структури і геометричні розміри мікроактюатора:

$$R = \rho \left(\frac{L_h}{w_h h_h} + \frac{L_c}{w_c h_c} + \frac{L_f}{w_f h_f} \right). \quad (34)$$

Енергоспоживання мікроактюатора можна визначити, знайшовши струм, що протікає через мікроактюатор, з такої формули:

$$P = IV. \quad (35)$$

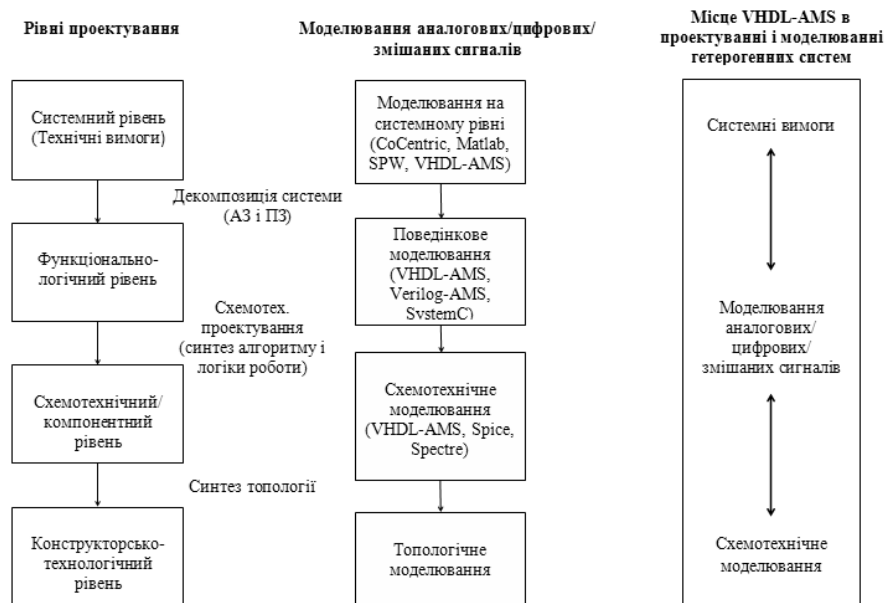


Рис. 2. VHDL-AMS у проектуванні пристроїв мікросистемної техніки

Розроблення VHDL-AMS моделі електротеплового мікроактюатора

Проектування пристроїв MEMC на функціонально-логічному рівні передбачає побудову поведінкової моделі. Особливістю таких моделей є те, що вони містять дані з різних сфер науки та техніки. Зокрема, в моделі теплового мікроактюатора, який виготовляють за MEMC технологіями, використовують величини з механіки, електрики та термодинаміки. Для побудови таких моделей застосовують спеціальну мову VHDL-AMS, яка дає змогу описати роботу таких пристроїв.

Розширення стандарту VHDL до VHDL-AMS (Very High Speed Integrated Circuits Hardware Description Language Analog-Mixed Signals), призначеного для опису цифрових, аналогових та змішаних моделей пристроїв, що використовують не тільки електричні сигнали, але й оптичні, хімічні, теплові, механічні та інші, є важливим кроком на шляху створення універсальних САПР ВІС/MEMC, що дозволяє здійснювати автоматичну компіляцію топологічних рішень на основі високорівневих текстових описів [6–8].

```
LIBRARY DISCIPLINES;
LIBRARY IEEE;

USE DISCIPLINES.ELECTROMAGNETIC_SYSTEM.ALL;
USE DISCIPLINES.Kinematic_system.all;
USE DISCIPLINES.THERMAL_SYSTEM.ALL;
USE IEEE.MATH_REAL.ALL;

ENTITY electrothermal_actuator IS
  GENERIC (
    E: REAL := 162.0e9;
    alfa: REAL := 4.7e-6;
    rho: REAL := 5.0e-4;
    ksi: REAL := 1.3e-3;
    Kp: REAL := 41.0);
  PORT (
    TERMINAL a, b: ELECTRICAL;
    TERMINAL t : THERMAL);
END electrothermal_actuator;

ARCHITECTURE behavoir OF electrothermal_actuator IS
  QUANTITY Lh : REAL := 220.0e-6;
  QUANTITY Lg : REAL := 2.0e-6;
  QUANTITY Lc : REAL := 182.0e-6;
  QUANTITY Lch : REAL := 2.0e-6;
  QUANTITY Lf : REAL := 38.0e-6;
  QUANTITY wh : REAL := 2.0e-6;
  QUANTITY wc : REAL := 16.0e-6;
  QUANTITY wf : REAL := 2.0e-6;
  QUANTITY hh : REAL := 2.0e-6;
  QUANTITY hc : REAL := 2.0e-6;
  QUANTITY hf : REAL := 2.0e-6;
  QUANTITY Vab ACROSS Ia THROUGH a TC b;
  QUANTITY Temp ACROSS Thermal_power THROUGH t TC thermal_ground;
  QUANTITY Temp0 : REAL := 25.0;
  QUANTITY R0, Ra, disp, x, h: REAL;
  QUANTITY Temp_max: REAL;
BEGIN
  -- electrothermal model part
  Temp == (Vab*Vab)/(2*Lh*Lh*rho*Kp)*(Lh*x-x*x)+Temp0;
  Temp_max == (Vab*Vab)/(8*rho*Kp)+Temp0;
  -- mechanical model part
  h == (Lch/Lh)*(wh+wc+Lg)+(Lc-Lch)/Lh*(wh+wc)+(Lf/Lh)/(wf+wc);
  disp == -alfa/(2*h)*(Temp-Temp0)*x*x;
  -- electrical model part
  R0 == rho*(Lh/(wh*hh)+Lc/(wc*hc)+Lf/(wf*hf));
  Ra == R0*(1+ksi*(Temp-Temp0));
  Ia == Vab/Ra;
  Thermal_power == Ia*Vab;
END behavior;
```

Рис. 3. Фрагмент VHDL-AMS моделі двоплечого електротеплового мікроактюатора

Результати комп'ютерного моделювання

Побудована VHDL-AMS модель дає змогу моделювати залежність деформації (згину) плечей від їх довжини і прикладеної напруги до анкерів мікроактюатора, струму від прикладеної напруги і довжини його плеча, розподіл температури вздовж його плечей, енергоспоживання мікроактюатора від прикладеної напруги до його анкерів. Результати моделювання графічно зображено на рис. 4 – 11.

Параметри мікроактюатора, використані для моделювання

<i>Механічні властивості</i>	<i>Значення</i>
Модуль Юнга полікремнію, E	162×10^9 [Па]
Коефіцієнт Пуассона	0,22
<i>Теплові властивості</i>	
Теплопровідність полікремнію, K_p	41 [$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$]
Коефіцієнт теплового розширення, α	$4,7 \times 10^{-6}$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
Температурний коефіцієнт опору, ζ	$1,3 \times 10^{-3}$ [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
<i>Електричні властивості</i>	
Питомий електричний опір полікремнію, ρ	5×10^{-4} [$\text{Ом} \cdot \text{м}$]
<i>Геометричні розміри, мкм</i>	
Довжина тонкого (гарячого) плеча, L_h	220
Довжина зазору між широким (холодним) і тонким (гарячим) плечем, L_g	2
Довжина широкого (холодного) плеча, L_c	182
Ширина тонкого (гарячого) плеча, w_h	2
Ширина широкого (холодного) плеча, w_c	16
Висота тонкого (гарячого) плеча, h_h	2
Висота широкого (холодного) плеча, h_c	2

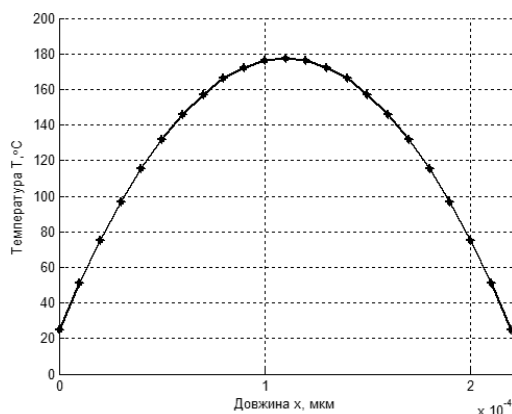


Рис. 4. Розподіл температури вздовж плеча мікроактюатора

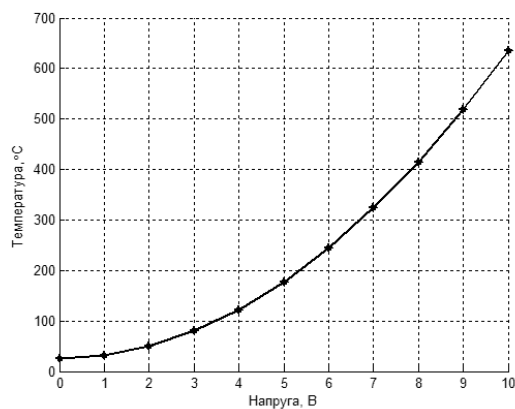


Рис. 5. Залежність температури плеча мікроактюатора від напруги, прикладеної до його анкерів

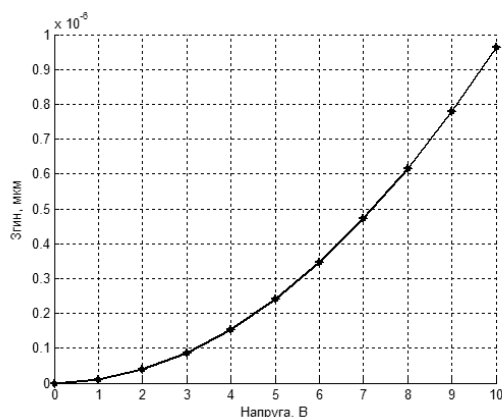


Рис. 6. Залежність згину мікроактюатора від напруги, прикладеної до його анкерів

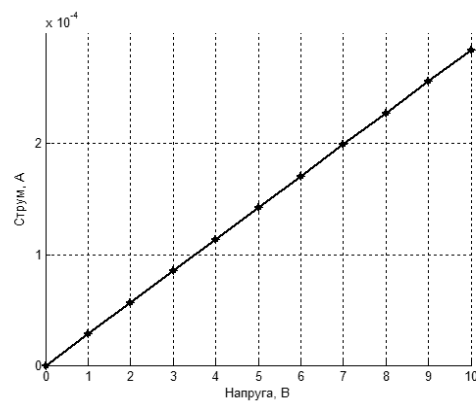


Рис. 7. Залежність струму від напруги, прикладеної до анкерів мікроактюатора

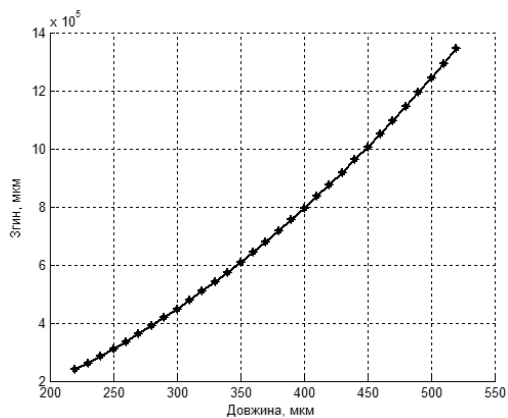


Рис. 8. Залежність згину мікроактюатора від довжини його плеча

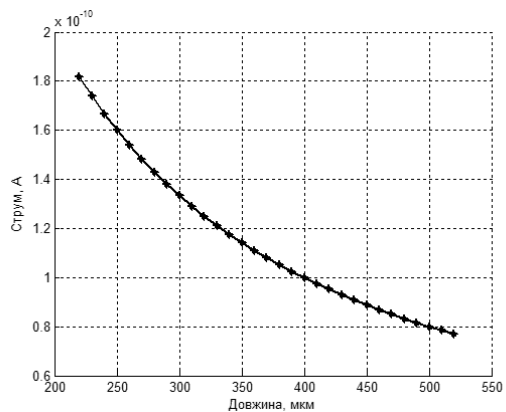


Рис. 9. Залежність струму від довжини плеча мікроактюатора

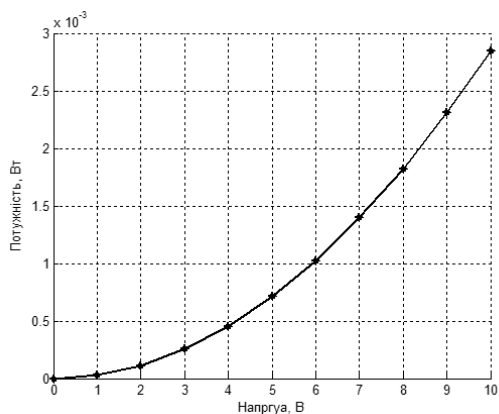


Рис. 10. Залежність енергоспоживання мікроактюатора від напруги, прикладеної до його анкерів

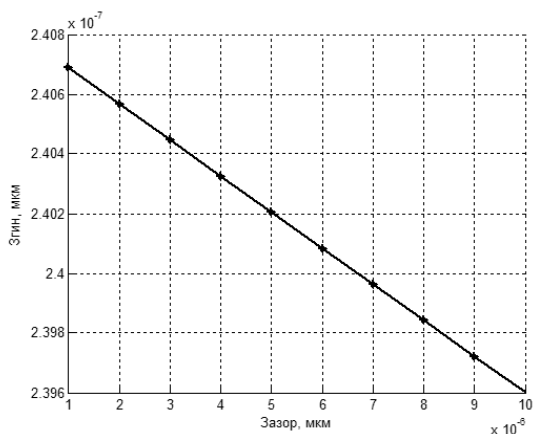


Рис. 11. Залежність згину мікроактюатора від зазору між його тонким (гарячим) і широким (холодним) плечем

Висновок

Розроблено VHDL-AMS модель електротеплового мікроактюатора засобами ПЗ hAMSter, яка дає змогу моделювати залежність деформації (згину) плечей від їх довжини і напруги, прикладеної до анкерів мікроактюатора, струму від прикладеної напруги і довжини його плеча, розподіл температури вздовж його плечей, енергоспоживання мікроактюатора від прикладеної напруги до його анкерів, а також виконувати аналіз поведінки цього пристрою на функціонально-логічному рівні проектування.

1. Dong Yan. *Mechanical Design and Modeling of MEMS Thermal Actuators for RF Applications* / Dong Yan // Thesis.— University of Waterloo, Ontario, 2002 – pp. 93. 2. Shannon Zelinski. *Design of Vertical-Lateral Thermal Actuators for MEMS* / Shannon Zelinski. // Department of Electrical Engineering and Computer Sciences. – University of California, Berkeley, 2001 – pp. 4. 3. Amarendra Atre. *Design of a Micromachined Electro-Thermal Beam Flexure Polysilicon Actuator* / Amarendra Atre // NSTI-Nanotech – 2005 – pp. 4. 4. Ang Beng Seng. *Design and Analysis of Thermal Microactuator* / Ang Beng Seng // European Journal of Scientific Research – 2009 – p. 281-292. 5. Pavel V. *VHDL-AMS based modeling and simulation of mixed-technology Microsystems* / Pavel V. Nikitin, C.-J. Richard Shi // Tutorial – 2005 – p. 261. 6. Qing Ji. *First Order Modeling of Thermal Actuators in SUGAR* / Qing Ji, Karen L. Scott // University of California – 2005 – p. 4. 7. Krassimir Hristov Denishev. *Thermal Microactuator* / Krassimir Hristov Denishev, Eleonora Zhivkova Krumova // ELECTRONICS'2005 – 2005 – pp. 6. 8. Michael S. *Final Report: Compliant Thermo-Mechanical MEMS Actuators LDRD #52553* / Michael S. Baker, Richard A. Plass, Thomas J. Headley, Jeremy A. Walvaren // Sandia National Laboratories –2004. 9.

hAMSter Software for VHDL-AMS Simulations, http://www.theoinf.tu-ilmenau.de/~twangl/VHDL-AMS_online_en/Home.html. 10. Peter J. Ashenden EDA CONSULTANT, ASHENDEN DESIGNS PTY. LTD., "VHDL Tutorial", Elsevier Science 2004 – pp. 84. 11. Standard VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions - Packages for Multiple Energy Domain Support – 2003 – pp. 21. 12. VHDL 1076.1: Analog Extensions to VHDL, Ernst Christen, Analog Inc. – April 1997 – pp. 9.

УДК 004.5: 303.822.7

О. Кіріленко, Ю. Кузнецова, Є. Соколова, Г. Фролова
Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського "ХАІ",
кафедра інженерії програмного забезпечення

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ USABILITY ІНТЕРФЕЙСУ КОРИСТУВАЧА

© Кіріленко О., Кузнецова Ю., Соколова Є., Фролова Г., 2013

Досліджено особливості підходів щодо підвищення usability користувацького інтерфейсу (КІ). Описано фактори, що відображають необхідність проведення оцінювання usability КІ. Наведено характеристики вимірюваних показників usability: ефективність, продуктивність, суб'єктивна задоволеність. Описано кількісні й якісні методи оцінювання usability КІ. Виявлено особливості підходів щодо підвищення usability і методів тестування usability КІ, які можуть використати розробники і тестувальники програмного забезпечення для підвищення його конкурентоспроможності.

Ключові слова: usability користувацького інтерфейсу, методи оцінювання usability КІ, ефективність, продуктивність, задоволеність.

The article investigated special methods of increasing user interface (UI) usability. There are factors that described needs of using usability testing; the phases of testing UI were selected; systematized and described method of estimation usability, more over they were classified. The article described characteristics of the measured indicators usability: effectiveness, efficiency, subjective satisfaction. Detected method of increasing and testing usability UI can be used by developers and quality assurance to increase competitiveness of the software.

Key words: usability of user interface, usability evaluation methods of user interface, effectiveness, efficiency, satisfaction.

Вступ

В умовах постійного зростання кількості та складності наявного програмного забезпечення (ПЗ) і змінення версій розроблення зручного у використанні користувацького інтерфейсу (КІ) дає змогу підвищити конкурентоспроможність ПЗ, знизити вартість розроблення ПЗ, збільшити аудиторію використання ПЗ і задоволеність користувачів, а також зменшити витрати на навчання та підтримку користувачів. Зручним у використанні вважається той програмний продукт, завдяки якому користувачі досягають поставлених цілей і безперешкодно вирішують різні завдання. Зручність використання характеризується часом виконання завдань користувачем, продуктивністю, ступенем задоволеності користувачів і простотою їхнього навчання. У науково-технічній літературі висвітлено різні аспекти поняття "зручність використання (usability)":

– як властивість програмного продукту – легкість, з якою користувач може навчитися керувати, готувати дані для введення й інтерпретувати результати роботи системи або компонента [1];