

## РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ТА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО БАГАТОРІВНЕВОГО ПРОЕКТУВАННЯ МЕМС

© Теслюк В.М., 2007

Запропоновано структуру системи для автоматизованого проектування мікроелектромеханічних систем (МЕМС), яка включає: підсистему моделювання технологічних маршрутів виготовлення інтегральних схем (ІС) та МЕМС – «ПроМІС-Т (МЕМС)», підсистему твердотільного (ПроМІП-Тв), функціонального (ПроМІП-Ф) та системного (ПроМІП-С) моделювання. Розроблено модель об'єкта проектування та процесу автоматизованого проектування МЕМС на основі мереж Петрі і запропоновано використовувати теорію чутливості для підвищення ефективності автоматизованого проектування на ієрархічних рівнях.

**In the paper the structure of a system for automated MEMS design is proposed. The structure includes a subsystem for technological IC and MEMS development strategy modeling, subsystems for solid item (ПроМІП-Тв), functional (ПроМІП-Ф), and system (ПроМІП-С) modeling. A model for designed object and design process on the base of Petri nets on hierarchical levels was developed. To increase the efficiency of automated MEMS design process, the use of sensitivity theory is proposed.**

**Вступ.** Удосконалення технології виготовлення мікроелектромеханічних систем МЕМС [1], покращання їх техніко-експлуатаційних характеристик, скорочення повного циклу впровадження нових виробів сьогодні визначається автоматизацією як проектування інтегральних пристроїв, так і технологічним процесом їх виробництва.

Сучасний процес проектування МЕМС під час використання найпередовіших технологій потребує одночасної оптимізації технологічного процесу, конструкції інтегрального приладу та функціональної схеми. Тому системи автоматизованого проектування (САПР) МЕМС є невід'ємною складовою процесу сучасного виробництва інтегральних пристроїв, а роботи, пов'язані з розробкою нових математичних моделей, методик та програмних засобів для автоматизації проектування МЕМС, є актуальним питанням сьогодення.

Мікроелектромеханічна система включає такі основні складові: давач, актюатор, мікропроцесор, підсистеми керування та передачі даних і мікромодуль живлення. Залежно від призначення МЕМС певні складові можуть бути відсутні, а фізичні розміри знаходяться в межах від кількох міліметрів до мікронів.

Давач призначений для визначення змін чи впливу оточуючого середовища. Як правило, до вхідних перетворювачів належать мікродавачі. Такі пристрої перетворюють зміну тиску, напруження чи деформації в зміну електричного параметра, який можна обробити за допомогою мікропроцесора. В багатьох мікропроцесорах як вихідний електричний параметр може бути опір, ємність, частота, напруга, струм тощо. Оскільки безпосередньо аналогову величину напруги чи струму мікропроцесор обробляти не може, то після мікродавача має бути розміщений аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), з якого вже цифровий сигнал поступає на шину даних мікропроцесора. Мікропроцесор обробляє отримані дані за попередньо визначеним алгоритмом і результатом обробки і у формі цифрового сигналу видає на цифрово-аналоговий перетворювач

(ЦАП). ЦАП перетворює отриманий код в аналоговий сигнал, який безпосередньо подається на вихідний перетворювач. Як вихідний перетворювач виступають актюатори – це мікропристрої, які перетворюють, як правило, електричну енергію в керований рух.

**Постановка задачі.** Проведений аналіз літературних джерел в області математичного забезпечення САПР МЕМС [1–12] дає змогу стверджувати, що практично відсутні моделі для опису об'єкта та самого процесу автоматизованого проектування, відсутні постановки задач для системного рівня проектування та не приділено належної уваги розробленню математичних моделей, які враховують специфіку та особливості автоматизованого багаторівневого проектування мікроелектромеханічних систем.

Найчастіше, розробляючи МЕМС, використовують такі програмні системи: Abaqus [4], MEMCAD[5], IntelliCAD [6], Solidis [7], Ansys [8], Simulink [9], Saber [10], SUGAR ver. 5.0 [11], NODAS [12] та ін. Наведені системи проектування МЕМС та їх елементи мають багато недоліків, зокрема:

- виконують проектування лише окремих процедур з загального процесу проектування МЕМС;

- їх важко інтегрувати в єдину систему (САПР);
- відсутня інформація про закладені в них математичні моделі та їх адекватність і точність;
- відсутні засоби для вбудовування власних математичних моделей тощо.

Отже, для ефективного проектування МЕМС необхідно розробити структуру САПР, де будуть відсутні вищенаведені недоліки.

**Модель об'єкта проектування (МЕМС).** Одним з основних елементів автоматизованого проектування є об'єкт проектування. Загалом модель об'єкта проектування (МЕМС) можна описати за допомогою такої сукупності множин:

$$\mathcal{S} = \{F, P, M, E\},$$

де  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$  – множина функцій, які реалізує МЕМС ( $n$  – кількість функцій);  $P$  – множина обмежень на вхідні та вихідні параметри МЕМС;  $M$  – множина зв'язків між елементами структури МЕМС;  $E$  – множина пристроїв, які наявні в МЕМС.

Множина обмежень  $P = P_{in} \cup P_{out}$  включає дві підмножини. Перша підмножина  $P_{in} = \{P_{in}^1, P_{in}^2, \dots, P_{in}^k\}$  включає обмеження на вхідні параметри,  $P_{out} = \{P_{out}^1, P_{out}^2, \dots, P_{out}^m\}$  – на вихідні параметри об'єкта проектування ( $k, m$  – кількість вхідних та вихідних параметрів об'єкта проектування). Кожний елемент для  $i$ -го вхідного  $P_{in}^i$  чи  $j$ -го вихідного  $P_{out}^j$  елемента включає значення обмежень  $P_{in}^i = \{P_{in,low}^i, P_{in,high}^i\}$  та  $P_{out}^j = \{P_{out,low}^j, P_{out,high}^j\}$ .

Множина пристроїв включає три основні підмножини:

$$E = E_{sense} \cup E_{circuit} \cup E_{akt},$$

де  $E_{sense} = \{E_{sense}^1, E_{sense}^2, \dots, E_{sense}^l\}$  – множина давачів, які включає МЕМС ( $l$  – кількість давачів);  $E_{circuit} = \{E_{circuit}^1, E_{circuit}^2, \dots, E_{circuit}^r\}$  – множина схем обробки, передачі та збереження інформації ( $r$  – кількість схем обробки даних);  $E_{akt} = \{E_{akt}^1, E_{akt}^2, \dots, E_{akt}^q\}$  – множина актюаторів, наявних у цій МЕМС ( $q$  – кількість актюаторів).

Варто зазначити, що кількість підмножин множини  $E$  може зростати залежно від деталізації опису та у міру розвитку науково-прикладної області МЕМС.

Множина зв'язків може бути подана як підмножина зв'язків кожного елемента  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_h\}$ . Кожний елемент підмножини описує набір вхідних та вихідних зв'язків з іншими елементами структури. При описі зв'язків між елементами МЕМС можна скористатися теорією графів, а саме: побудувати дводольний граф і описати його за допомогою матриць інцидентності та суміжності.

Запропонована модель МЕМС уможливило формалізувати об'єкт проектування та використати її в процесі проектування та аналізу для збереження інформації про інтегральну структуру.

**Модель процесу проектування МЕМС.** Проектування МЕМС здебільшого передбачає використання проектування зверху вниз, хоча у міру розвитку цієї області все частіше використовуватиметься проектування знизу вгору. Ці види автоматизованого проектування передбачають такі рівні проектування: системний (СП), функціональний (ФП), компонентний (КП) та елементний (ЕП). Подамо автоматизоване проектування зверху вниз за допомогою простої мережі Петрі. Розроблену мережу показано на рис. 1, яку можна описати за допомогою таких співвідношень:

$$N_{\text{petry}} = \{S, T, F, M_0\},$$

де  $P = \{S_1, S_2, \dots, S_g\}$  – множина позицій (стати);  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_v\}$  – множина переходів;  $F$  – множина дуг, яка включає дві підмножини вхідних та вихідних дуг по відношенню до переходу;  $M_0$  – множина, яка задає початкове маркування мережі Петрі;  $g, v$  – кількість позицій та переходів відповідно.

Призначення усіх подій та позицій наведено у табл. 1 та 2.

Множина позицій включає одинадцять елементів  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{12}\}$ , множина переходів –  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_9\}$ , а множина дуг – 25 (12 вхідних та 13 вихідних), що можна записати так:

$$F = \left\{ \begin{array}{l} \langle 0, t_1, S_1 \rangle, \langle S_1 + S_3, t_2, S_2 \rangle, \langle S_2, t_3, S_3 + S_4 \rangle, \\ \langle S_4 + S_6, t_4, S_5 \rangle, \langle S_5, t_5, S_6 + S_7 \rangle, \langle S_7 + S_9, t_6, S_8 \rangle, \\ \langle S_8, t_7, S_9 + S_{10} \rangle, \langle S_{10} + S_{12}, t_8, S_{11} \rangle, \langle S_{11}, t_9, S_{12} + 0 \rangle \end{array} \right\},$$

де  $\langle S_1 + S_3, t_2, S_2 \rangle$  означає, що перехід  $t_2$  має дві вхідні дуги від позицій  $S_1$  та  $S_3$  і одну вихідну, яка направлена до позиції  $S_2$ .

Початкову розмітку наведеної мережі запишемо у такій формі:  $M_0 = S_3 + S_6 + S_9 + S_{12}$ , що означає наявність по одному маркеру в позиціях  $S_3, S_6, S_9$  та  $S_{12}$ .

Перший етап роботи розробленої мережі Петрі передбачає появу маркера в позиції  $S_1$ , що означає наявність ТЗ на МЕМС. Другий етап передбачає виконання системного проектування, а третій та четвертий – рівень макропроектування і мікропроектування. На п'ятому етапі виконується технологічне проектування. Хоча здебільшого на системному рівні проектування вже визначено технологію виготовлення МЕМС, все ж таки виникає необхідність доробки базового технологічного процесу. Наступний етап передбачає випуск проектної документації на виріб.

Таблиця 1

Таблиця переходів мережі Петрі (рис. 1)

Перехід	Призначення переходу
$t_1$	Активізація ТЗ на МЕМС
$t_2$	Початок системного проектування (СП)
$t_3$	Завершення системного проектування
$t_4$	Початок макропроектування (МакП)
$t_5$	Завершення макропроектування
$t_6$	Початок мікропроектування (МікП)
$t_7$	Завершення мікропроектування
$t_8$	Початок технологічного проектування
$t_9$	Завершення технологічного проектування

Таблиця позицій мережі Петрі (рис. 1)

Позиція	Призначення позиції
S <sub>1</sub>	Наявність ТЗ на МЕМС
S <sub>2</sub>	Системне проектування
S <sub>3</sub>	Підсистема СП в стані очікування
S <sub>4</sub>	Результати СП готові
S <sub>5</sub>	Рівень макропроектування
S <sub>6</sub>	Підсистема МакП в стані очікування
S <sub>7</sub>	Результати МакП готові
S <sub>8</sub>	Рівень мікропроектування
S <sub>9</sub>	Підсистема МікП в стані очікування
S <sub>10</sub>	Результати МікП готові
S <sub>11</sub>	Рівень технологічного проектування
S <sub>12</sub>	Підсистема технологічного проектування в стані очікування

Вдосконалення запропонованої моделі автоматизованого проектування МЕМС часовим механізмом, присвоєнням пріоритетів, використанням ієрархічних та кольорових мереж Петрі дає змогу визначити основні вихідні параметри проектування, зокрема: термін проектування МЕМС, виявити конфліктні ситуації під час проектування, ефективно використовувати ресурси під час проектування тощо.

**Розробка моделі проектування МЕМС на системному рівні.** Задачу прийняття рішення під час проектування МЕМС на системному рівні проектування можна сформулювати за допомогою такого кортежу:

$$Z_{pr} = \langle A, K_p, Model, Main \rangle,$$

де  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_d\}$  – множина альтернатив проектного рішення ( $d$  – кількість альтернатив);  $K_p = \{K_1, K_2, \dots, K_w\}$  – множина критеріїв, які визначають можливі зміни вихідних параметрів, кількість яких дорівнює  $w$ ;  $Model = \{Model_1, Model_2, \dots, Model_{ii}\}$  – множина моделей, які уможливають визначити на основі альтернативи множину критеріїв;  $Main$  – основний критерій, який дає змогу в ситуації багатокритеріальної задачі визначити найкращий результат (альтернативу).

Варто зазначити, що кожний  $i$ -й елемент множини критеріїв є підмножиною і включає мінімальне та максимальне значення критерію, тобто  $K_i = \{k_{min}^i, k_{max}^i\}$ .

Алгоритм розв'язання задачі на системному рівні проектування передбачає послідовний розв'язок такої сукупності задач: постановка задачі, формування множини критеріїв, генерація множини альтернативних рішень (АР), побудова множини математичних моделей, побудова основного критерію оптимальності, вибір оптимального рішення, аналіз отриманих результатів.

На цьому етапі проектування технічне завдання та множина критеріїв є вже сформовані. Процес генерації множини альтернатив ґрунтується на побудові множини альтернативних рішень за допомогою І-АБО дерева та правил, які враховують специфіку мікроелектромеханічних систем і вимоги ТЗ [13]. Особливості збереження інформації про альтернативне рішення та мову опису АР детально розглянуто в [13].

На системному рівні проектування МЕМС використовується переважно математичний апарат теорії масового обслуговування і мережі Петрі. Приклад застосування мережі Петрі для побудови математичних моделей описано в [14].

Як основний критерій вибору альтернативного рішення використовуємо адитивну його форму, зокрема [17]:

$$Main = \sum_{e=1}^m K_e \psi_e, \quad \psi_e > 0, \quad \sum_{e=1}^m \psi_e = 1,$$

де  $\psi_e$  – коефіцієнт відносної важливості  $K_e$ -го критерію.

Набагато зручніше працювати з нормованим значенням  $K_e$ , тому використовуємо такий вираз за мінімізації цільової функції:

$$\text{Main} = \sum_{e=1}^m \left( \frac{k_{\max}^e - k^e}{k_{\max}^e - k_{\min}^e} \right) \psi_e.$$

За необхідності усунути можливість компенсації якості одного часткового критерію іншим використовують такий вид критерію оптимальності [17]. У разі пошуку мінімуму цільової функції

$$\text{Main} = \sqrt{\sum_{e=1}^m \psi_e \left( \frac{k^e}{k_{\min}^e} - 1 \right)^2}.$$

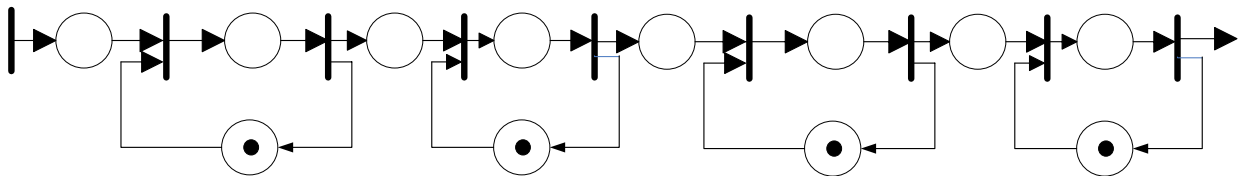


Рис. 1. Проста мережа Петрі для ієрархічного автоматизованого проектування МЕМС

Під час розв'язання задачі структурного синтезу запропоновано використати метод гілок та границь [17, 18].

**Розробка структури САПР МЕМС.** Запропонована структурна схема системи для автоматизованого проектування МЕМС включає п'ять основних підсистем (рис. 2), які покривають програмними продуктами модель, показану на рис. 1: підсистему моделювання технологічних маршрутів виготовлення МЕМС; підсистему мікромоделювання МЕМС (твердотільне моделювання); підсистему макромодювання МЕМС (функціональне моделювання); підсистему системного моделювання МЕМС та підсистему оптимізації.

Згідно з технічним завданням необхідно синтезувати конструкцію мікроелектромеханічної системи. Ця операція виконується на системному рівні з використанням модуля оптимізації (OptimMEMS) [15] та бібліотеки математичних моделей системного проектування (БММСП). На цьому етапі розв'язують задачу, сформульовану вище.

Вихідними даними системного проектування є параметри пристрою та структурна схема МЕМС, яка вибирається з множини можливих рішень і параметрів ТЗ. Процедура розв'язання задач системного проектування виконується за допомогою програми ПроМПП-С (МЕМС) (Програма моделювання інтегральних пристроїв – Системне проектування), де використовуються моделі з теорії систем масового обслуговування та мереж Петрі [17, 18]. Завершується проектування на системному рівні, коли виконуються усі умови на вихідні параметри пристрою:

$$X_{nn,\min} \leq X_{nn} \leq X_{nn,\max},$$

де  $X_{nn,\min}$  – nn-те мінімальне значення вихідного параметра системного проектування;  $X_{nn}$  – nn-те номінальне значення;  $X_{nn,\max}$  – nn-те максимальне значення вихідного параметра системного проектування; nn – кількість вихідних параметрів МЕМС.

Наступний рівень проектування передбачає забезпечення вихідних параметрів кожної складової (пристрою) МЕМС. При цьому використовується бібліотека математичних моделей функціонального проектування (БММФП), підсистема ПроМПП-Ф (МЕМС) та модуль OptimMEMS. Називається цей рівень функціональним (рівень макромодювання), де використовуються моделі, які включають системи диференціальних рівнянь (СДР). Для розв'язку СДР використовуються чисельні методи Ейлера, Рунге-Кутти [19] та ін. Будуються моделі з використанням СДР на основі теорії аналогій, що дає змогу описати процеси різної природи: електромеханічні, електротермічні,

електромагнітні тощо. Після виконання нижченаведених умов, накладених на параметри рівня макромодельовання, переходимо до рівня мікромодельовання. Відповідні умови виглядають так:

$$Y_{jj,\min} \leq Y_{jj} \leq Y_{jj,\max},$$

де  $Y_{jj,\min}$  –  $jj$ -те мінімальне значення вихідного параметра функціонального проектування;  $Y_{jj}$  –  $jj$ -те номінальне значення;  $Y_{jj,\max}$  –  $jj$ -те максимальне значення вихідного параметра функціонального проектування;  $jj$  – кількість вихідних параметрів.

На рис. 2 відповідний рівень деталізації позначено рівнем твердотілого проектування. Особливістю його є те, що математичні моделі включають рівняння в часткових похідних з відповідними початковими та крайовими умовами [20–23]. Під час розв’язання відповідних задач, як правило, використовують метод скінченних різниць [24], метод скінченних елементів [25], метод граничних елементів, методи Монте-Карло [26, 27] тощо. Це дає змогу отримати вихідні параметри елементів МЕМС з високою точністю та врахувати нелінійні і нестационарні процеси у цих пристроях. В процесі твердотілого проектування елементів МЕМС використовують підсистему ПроМІП – Тв (МЕМС), модуль OptimMEMS і бібліотеку математичних моделей твердотілого проектування (БММТвП). Завершується проектування на рівні мікромодельовання за виконання умов:

$$Z_{ii,\min} \leq Z_{ii} \leq Z_{ii,\max},$$

де  $Z_{ii,\min}$  –  $ii$ -те мінімальне значення вихідного параметра твердотілого проектування;  $Z_{ii}$  –  $ii$ -те номінальне значення;  $Z_{ii,\max}$  –  $ii$ -те максимальне значення вихідного параметра твердотілого проектування;  $ii$  – кількість вихідних параметрів.

Завершальний рівень проектування передбачає модифікацію чи доробку базового технологічного процесу виготовлення МЕМС. При цьому використовують такі програмні засоби: ПроМІС-Т (МЕМС), бібліотеку математичних моделей технологічних процесів та модуль OptimMEMS.

Підсистема моделювання техпроцесів виготовлення МЕМС призначена для визначення основних вихідних параметрів технологічного процесу, зокрема: профілі розподілу домішок в напівпровідникових структурах, поверхневі опори, глибини залягання р-п-переходів, глибини травлення плівок, товщини окисних, епітаксійних і осаджених плівок тощо. Реалізована ця підсистема за допомогою програми «ПроМІС-Т (МЕМС)» [21, 28 – 31], яка дає змогу проводити одно-, дво- та тривимірне моделювання операцій технологічного маршруту виготовлення МЕМС: дифузії, термічного відпалу, іонної імплантації, епітаксії, термічного окислення, іонного травлення та осадження.

Вхідними даними для цієї підсистеми є параметри технологічних переходів (час, температура, тип домішки, окисник, енергія іонів, орієнтація напівпровідникової підкладки тощо).

Завершується робота підсистеми технологічного проектування видачею твердої копії, в якій наявні усі вхідні та вихідні параметри техпроцесу. У разі, коли вихідні технологічні параметри не задовольняють поставленим вимогам, відбувається корегування вхідних даних з подальшим перерахунком усіх вихідних параметрів технологічного моделювання. Тобто мають бути виконані умови:

$$F_{b,\min} \leq F_b \leq F_{b,\max},$$

де  $F_{b,\min}$  –  $b$ -те мінімальне значення вихідного параметра технологічного проектування;  $F_b$  –  $b$ -те номінальне значення;  $F_{b,\max}$  –  $b$ -те максимальне значення вихідного параметра технологічного проектування;  $b$  – кількість вихідних параметрів.

**Особливості проектування МЕМС на ієрархічних рівнях.** Під час проектування пристроїв такого типу використовують здебільшого стандартні методи проектування “зверху вниз”, “знизу вверх” та паралельне [17, 18]. Разом з тим виникає багато проблем під час проектування та

моделювання пристроїв МЕМС, а саме: при розв'язанні задач структурної і параметричної оптимізації МЕМС.

Складність проектування закладена в самій суті цих пристроїв і пов'язана з тим, що вони визначають вхідні та вихідні параметри з різних наукових областей. Для прикладу електростатичний давач тиску містить параметри, які відносяться до електрики і механіки. Встановити зв'язок між такими групами параметрів за допомогою моделей – дуже важка задача, яку необхідно розв'язувати під час проектування інтегральних пристроїв цього типу.

Процес проектування інтегральних пристроїв МЕМС носить ітераційний характер. Зменшити вартість та час проектування можна зменшенням кількості ітераційних процедур, які використовуються при параметричній оптимізації. Досягнути цього можна проведенням цілеспрямованої оптимізації за рахунок використання результатів дослідження кореляційних залежностей та чутливості між вихідними і вхідними параметрами різних груп.

Результати дослідження чутливості враховуються під час організації процесу оптимізації. Приклад організації оптимізації параметрів пристрою МЕМС на одному з ієрархічних рівнів автоматизованого проектування показано на рис. 2, який передбачає визначення матриці чутливості.

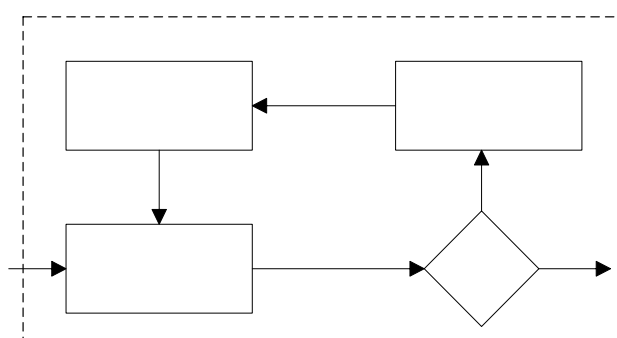


Рис. 2. Структурна схема розв'язання задачі параметричної оптимізації

Під час проектування МЕМС на кожному ієрархічному рівні виникають задачі, пов'язані з необхідністю покращання проектного рішення і не завжди при цьому можна використати методи оптимізації. Через міждисциплінарність області МЕМС особливого значення набуває теорія чутливості, яка дає змогу ціленаправлено впливати на вхідні параметри пристрою проектування для досягнення заданих згідно з технічним завданням вихідних параметрів.

Отже, загалом під чутливістю згідно з [19] розумітимемо деяку числову величину, яка дає можливість отримати додаткову інформацію про поведінку фізичної системи і визначити, як впливають зміни одного параметра на інший.

Для визначення коефіцієнта чутливості між  $u$ -м вихідним та  $e$ -м вхідним параметрами деякого пристрою МЕМС, який описується множинами вхідних  $x_e (e=1,2,\dots,n)$  та вихідних  $y_u (u=1,2,\dots,m)$  параметрів, використовується похідна від диференційованої функції  $y$  за параметром  $x$ , а саме:

$$S_{e,u} = \frac{dy_u(x_1, x_2, \dots, x_n)}{dx_e} \quad (1)$$

Вираз для коефіцієнта чутливості (1) не є безрозмірною величиною, що викликає певні труднощі під час виконання різного роду операцій з ним, тому переважно використовують нормоване значення чутливості:

$$S_{e,u}^n = \frac{x_e}{y_u} \frac{dy_u}{dx_e} \quad (2)$$

Разом з тим варто зауважити, що у разі рівності нулю одного з параметрів необхідно використовувати напівнормовані значення чутливості:

$$S_{e,u}^n = x_e \frac{dy_u}{dx_e}, \quad S_{e,u}^n = \frac{1}{y_u} \frac{dy_u}{dx_e}. \quad (3)$$

Перша формула використовується за рівності нулю вихідного параметра, а друга – вхідного параметра.

Загалом можемо на основі виразів (1)–(3) визначити матрицю коефіцієнтів чутливості між вхідними та вихідними параметрами пристроїв МЕМС, попередньо опустивши знак нормування та приймаючи, що кількість стовпчиків дорівнює кількості вихідних параметрів, а кількість рядків – кількості вхідних параметрів об'єкта проектування:

$$S = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,m} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \dots & S_{2,m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n,1} & S_{n,2} & \dots & S_{n,m} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для визначення зміни вихідного параметра за заданої зміни вхідного використовується такий вираз:

$$dy_{u,e} = \left( \frac{Dy_u}{y_u} \right)_e = S_{e,u} \frac{Dx_e}{x_e}, \quad (5)$$

де  $dy_{u,e}$  – відносна зміна  $u$ -го вихідного параметра за зміни  $e$ -го вхідного параметра.

За необхідності визначення одночасного впливу усіх вхідних параметрів на  $u$ -й вихідний параметр використовують такий вираз:

$$dy_u = \frac{Dy_u}{y_u} = \sum_{e=1}^n \frac{\partial y_u}{\partial x_e} \frac{Dx_e}{x_e}, \quad (6)$$

де  $dX_e = \frac{Dx_e}{x_e}$ .

**Результати.** Проведено аналіз дослідження чутливостей між вхідним та вихідним параметрами для мікродавача ємнісного типу, конструкцію якого показано на рис. 3 [7]:

$$S_C^L = 0.31; S_C^{L_1} = 0.24; S_C^h = -0.32; S_C^d = 0.0008.$$

Отримані результати дають змогу стверджувати, що для збільшення ємності необхідно збільшувати значення довжини штирів та їх висоти, а для зменшення – збільшувати відстань між штирями.

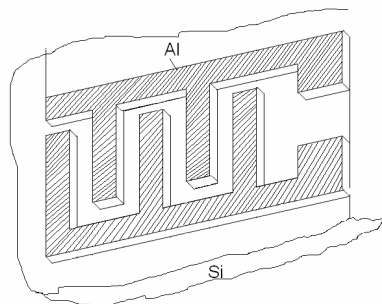


Рис. 3. Конструкція давача ємнісного типу

**Висновки.** Отже, запропонована система проектування МЕМС дає змогу:

- прискорити процес проектування МЕМС шляхом використання засобів САПР;
- зменшити вартість розробки, скоротивши матеріальні витрати на доробку технологічного маршруту виготовлення МЕМС;
- дослідити вплив первинних параметрів техпроцесу та конструкції інтегрального приладу на вихідні контрольовані параметри техпроцесу;



- дослідити кореляційні зв'язки між технологічними, електричними та конструктивними параметрами інтегральних елементів, що є надзвичайно актуально під час виробництва МЕМС;
- підвищити якість, відсоток виходу придатних МЕМС та їх конкурентоспроможність, які проектують з використанням систем автоматизованого проектування інтегральних приладів;
- використання теорії чутливості дасть змогу підвищити ефективність автоматизованого проектування пристроїв МЕМС.

1. Bustillo, J M, Howe, R T and Muller, R S, (1998). 'Surface micromachining for microelectromechanical systems,' *Proc. IEEE*, 86 (8), 1552–1574. 2. Kovacs G T A, Maluf N I, Petersen K E (1998). 'Bulk micromachining of silicon,' *Proc. IEEE*, 86 (8), 1536–1551. 3. Ikuta K and Hirowatari K, (1993). 'Real three dimensional microfabrication using stereo lithography and metal molding,' *Proc. IEEE MEMS*, 42–47. 4. Abaqus ver. 5.7. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI, <http://www.hks.com>. 5. MEMCAD ver. 4.5. Microcosm Technologies, Inc., Research Triangle, NC, <http://www.memcad.com>. 6. IntelliSuite, IntelliSense Corp. Wilmington, MA, <http://www.intellisense.com>. 7. Funk J.M., Korvink J.G., Buhler J., Bachtold M., Bakes H. SOLIDIS: A tool for microactuator simulation in 3-D // *J.Microelectromechanical Systems*. Mar. 1997. Vol. 6, №1. P.70–82. 8. ANSYS/Multiphysics ver. 5.5. Ansys, Inc., Canonsburg, PA, <http://www.ansys.com>. 9. Simulink ver. 3.0, The Mathworks, Inc., Natick, MA, <http://www.mathworks.com>. 10. SABER. Analog Inc., Beaverton, Oregon, <http://www.analogy.com>. 11. N. Zhou, J. V. Clark, K. S. J. Pister. "Nodal Analysis for MEMS Design Using SUGARv0.5," Santa Clara CA April 6–8 (1998). 12. Jan E. Vandemeer, Nodal Design of Actuators and Sensors (NODAS), M.S. Thesis 13. Теслюк В.М. Побудова множини можливих рішень за допомогою I - АБО – дерева при розв'язанні задач структурного синтезу на системному рівні проектування МЕМС // *Науково-технічний журнал "Інформаційні технології і системи"*. – Львів. – Т. 9, № 1. – 2006. – С. 101–108. 14. Теслюк В.М. Застосування мереж Петрі при проектуванні МЕМС на системному рівні // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика"*. – 2006. – № 564. – С. 45 – 53. 15. Теслюк В. М., Гранат П. П., Марков В. О. Система для розв'язку оптимізаційних задач при проектуванні інтегральних мікробудованих систем *OptimMEMS: Матеріали Міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій»*, 18–21 травня, 2005, м. Євпаторія, Крим. – Т. 4. – С. 159–164. 16. Лобур М. В., Теслюк В.М., Керницький А. Б., Денисюк П. Ю., Раєвський П. Ю. Гетерогенна система автоматизованого проектування вбудованих систем // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Радіoeлектроніка та телекомунікації"*. – 2005. – № 534. – С. 130–138. 17. Петренко А. И., Семенов А. И. Основы построения систем автоматизированого проектирования. – К.: Вища шк., 1984. – 296 с. 18. Норенков И.П. Основы теории и проектирования САПР. – М.: Высш. шк., 1990. – 334 с. 19. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 560 с. 20. Лобур М. В., Теслюк В.М., Колесник К. К., Денисюк П. Ю. Застосування САЕ-систем для дослідження напружено-деформованого стану пружного елемента давача ємнісного типу та визначення його функціональних можливостей // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі"*. – 2004. – № 523. – С. 92– 98. 21. Лобур М. В., Теслюк В.М., Колісник К.К., Денисюк П.Ю. Математична модель для обчислення термонапружень та переміщень в актюаторі на базі двошарової пластини // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології"*. – 2003. – №496. – С. 94 – 99. 22. Лобур М.В., Теслюк В.М., Свиридова Т.В., Денисюк П.Ю. и др. Математическое моделирование исходных электрических и конструктивных параметров резонатора емкостного типа // *Электронная техника: Межвузовский сборник научных трудов / Под ред. Д.В. Андреева*. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – С. 89–96. 23. Лобур М.В., Теслюк В.М., Колесник К.К. Математична модель для аналізу вихідних характеристик інтегрального давача тиску на компонентному рівні проектування: *Наук.-техн. зб. "Електроніка і зв'язь"*, Тематичний випуск "Проблеми електроніки". – Ч.2. – Київ: НТУУ "КПІ", 2005. – С. 109–111. 24. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1973. – 400 с. 25. Норри Д., Ж. де Фриз. Введение в метод конечных элементов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1981. –

304 с. 26. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках / Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 494 с. 27. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. – М.: Наука, 1985. – 80 с. 28. V. Tesliuk, O. Korbetskyu. A Program for Modeling of Technological Routes of VLSI Fabrication - «ProMIC-T» Technical Proceeding of the Second International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems. April 19–21 San Juan Marriot Resort and Stellaris Casino San Juan, Puerto Rico, USA, 99–101, 1999. 29. Теслюк В.М., Корбецький О.Р. Система для моделювання технологічних маршрутів виготовлення біполярних, n-МОН, р-МОН, КМОН І КНІ приладів-«ПроМІС-Т» // Вісник ДУ “Львівська політехніка” “Радіоелектроніка та телекомунікації”. – 1998. – № 352. – С. 105–108. 30. Lobur M., Kosobutckiy P., Tesliuk V. 3-Dimensional Mathematical Models of Technological Processes of MEMD Production . Proceeding of the XI Polish-Ukrainian Conference on “CAD in Machinery Design – Implementation and Educational Problems.”, Warsaw University of Technology Instytut of Machine Design Fundamentals Press WARSAW, Poland, June 2003 – pp. 27 – 35. 31. Теслюк В.М., Денисюк П.Ю., Гранат П.П. Розробка та реалізація підсистеми збереження та обробки даних системи «ПроМІС-Т» // Вісник Державного університету “Львівська політехніка” “Комп’ютерні системи проектування. Теорія і практика”. – 2003. – № 470. – С. 64 – 69. 32. Хомович Р., Вакубратович М. Общая теория чувствительности / Пер. с сербс. и с англ.; Под. ред. Я.З. Цыпкина – М.: Советское радио, 1972. – 240 с. 33. Лучинин В.В. Микросистемная техника. Направления и тенденции развития // Научное приборостроение. – 1999. – Т. 9, № 1. – С. 3–18. 34. Бочаров Л.Ю., Мальцев П.П. Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом // Микросистемная техника. – 1999. – №1. – С. 41–46. 35. Teslyuk V., Lobur M., Kernytckyy A., Denysyuk P. Mathematical Model for Optimization of Input Design Parameters Of Integrated Electrostatic Sensors // Proc. of XIII Polish-Ukrainian Conf. on CAD in Machinery Design – Implementation and Educational Problems. – Jurata, Poland, 2005. – P. 71–78.

УДК: 621.385.832

М.Й. Николишин

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра радіоелектронних пристроїв та систем

## ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПИСЕМНО-МОВНОЇ КОМУНІКАЦІЇ

© Николишин М.Й., 2007

Розглянуто нову інформаційну модель писемно-мовної комунікації. Описано основні мікрофункції, що зустрічаються під час формування та опрацювання сигналів писемної та мовної комунікації. Відзначено специфіку писемної комунікації, яка полягає у багатократному використанні динамічного сигналу, який формується на основі статичного сигналу, що переносить інформацію у часі.

In the article new information model of written – spoken communication is investigate. Main microfunctions that have place at the written and spoken communication signals processing are described. A specific of written communication which is in a many times dynamic signal usage, which is formed at the base of static signal carrying information in the time is marked.

**Вступ.** Писемна комунікація як своєрідний просторово-часовий канал обміну інформацією між людьми виникла значно пізніше від мовної комунікації, приблизно 2000 років до н. е. У поєднанні з мовною комунікацією писемна комунікація створила передумови формування особливого системотвірного середовища, в якому почалося творення інформаційного ресурсу