

РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА СИНТЕЗУ МЕМС

© Теслюк В., 2008

Розроблено структурну схему інформаційної технології для аналізу та синтезу мікроелектромеханічних систем, яка ґрунтується на використанні блочно-ієрархічного підходу до розроблення інтегральних структур, визначено основні особливості багатоваріантної розробки МЕМС та вдосконалено бібліотеку математичних моделей.

The block diagram of information technology for analysis and synthesis of the microelectromechanical systems based on the utilizing block and hieratical approach to development of integral structures is developed, essential features of multilevel development of MEMS is formed and library of mathematical models is improved.

Вступ

Рубіж XX –XXI століть характеризується інтенсивним розвитком існуючих та появою нових міждисциплінарних науково-прикладних областей. Однією з них є область мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [1–3], які об'єднують досягнення механіки, мікроелектроніки, оптики, електротехніки та інших науково-практичних областей.

З розвитком технологій виготовлення мікроелектромеханічних систем виникла гостра потреба в розробленні нових технологій, методів, методик, моделей і програмних інструментів для автоматизації побудови таких пристроїв. Оскільки стаття присвячена розробленню інформаційної технології (ІТ) для аналізу та синтезу МЕМС, то, відповідно, ця робота є актуальною.

1. Розроблення структурної схеми інформаційної технології

Процес розроблення пристроїв складної структури, гетерогенних та міждисциплінарних систем неможливий без використання нових інформаційних технологій, використання нових підходів до аналізу та синтезу таких об'єктів, нових методів та засобів.

Типовий приклад розроблення МЕМС з використанням процедур аналізу та синтезу наведено на рис.1. Цей взаємозв'язок має характер вкладеності процедур аналізу в процедуру оптимізації (параметричного синтезу) і процедури оптимізації в процедуру синтезу, що поєднує синтез структурний і параметричний.

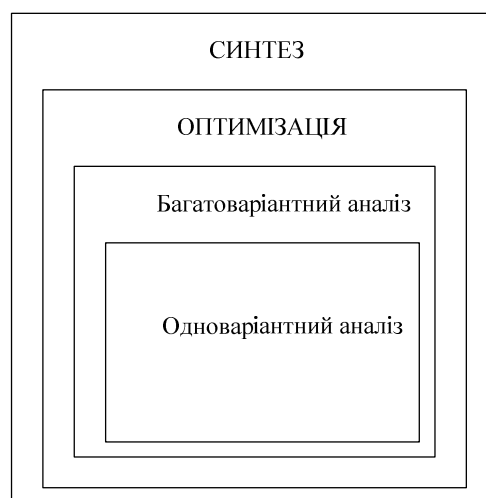


Рис. 1. Вкладеність процедур розроблення МЕМС

Структурна схема побудованої інформаційної технології, яка призначена для розробки пристроїв складної структури, зображена на рис. 2. Основними елементами ІТ аналізу та синтезу мікроелектромеханічних систем є технічне завдання, яке є первинною інформацією та піддається обробці методами та засобами, що включені в інформаційну технологію аналізу і синтезу МЕМС. Результатом обробки первинної інформації є інформація нової якості, тобто: конструкторсько-технологічна документація на виготовлення ще не існуючого об'єкта чи процесу розроблення. Обробка первинної інформації відбувається за допомогою методів та засобів організаційно-технічної системи з використанням засобів комп'ютерної техніки під керуванням представників проектної організації. Ядром ІТ аналізу та синтезу МЕМС є програмно-технічний комплекс (програмно-технічні засоби), який містить низку програмно-методичних комплексів і пакетів прикладних програм для розв'язання спеціалізованих задач синтезу та аналізу МЕМС.

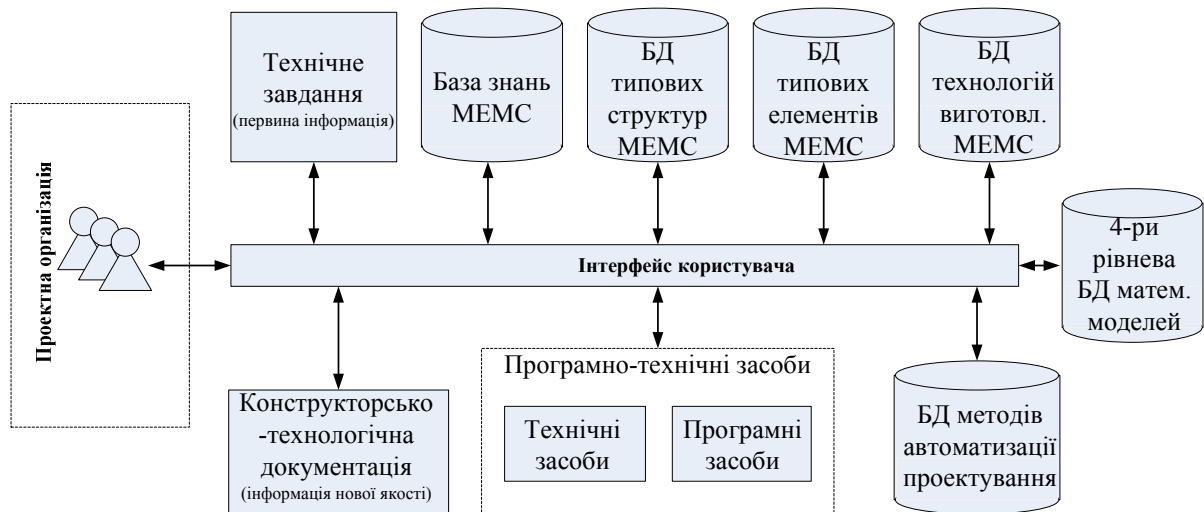


Рис. 2. Структура інформаційної технології аналізу та синтезу мікроелектромеханічних систем

Особливістю цієї ІТ є те, що побудова таких складних систем чи мікросистем неможлива без використання бази знань, бази даних про специфічні технології та їх можливості, бази даних типових структур та елементів МЕМС.

В структуру ІТ введено чотирирівневу базу даних математичних моделей, де присутні моделі для системного, схемотехнічного та компонентного рівнів розробки МЕМС, та моделі для аналізу та синтезу технологічних процесів, операцій та маршрутів виготовлення МЕМС.

2. Особливості застосування блочно-ієрархічного підходу при розв'язанні задач аналізу та синтезу МЕМС

При розв'язанні задач аналізу та синтезу МЕМС використано блочно-ієрархічний підхід, який передбачає використання принципу ієрархічності для структурування представлень про об'єкти за ступенем деталізації описів та принцип декомпозиції (блочності, модульності) для розбиття представлень кожного рівня на ряд складових (довершених блоків) з можливістю їх поблочного аналізу та синтезу [4–6].

На верхньому рівні МЕМС позначимо як S_{MEMS}^1 , де одиниця означає перший рівень деталізації. Оскільки МЕМС є складною системою і її можна розбити на блоки нижчого рівня для зручності розв'язання задач синтезу та аналізу, то введемо рівень 2, який міститиме n блоків. Відповідно, кожний блок другого рівня позначимо через $S_{MEMS}^{2,j}$, де j – номер блока другого рівня розбиття ($j = 1, 2, \dots, n$). Тут МЕМС можна описати як

$$S_{MEMS}^1 = \bigcup_{j=1}^n S_{MEMS}^{2,j} .$$

Оскільки блоки другого рівня також є складними об'єктами, які можна розглядати як системи відносно блоків третього рівня, доцільно з технічного боку розбити їх на простіші блоки, а кожний блок (систему відносно блоків третього рівня) другого рівня можна описати як об'єднання блоків третього рівня

$$S_{MEMS}^{2,j} = \bigcup_{l=1}^{K_j} S_{MEMS}^{3,l},$$

де K_j – кількість блоків третього рівня в j -му блоці (системі) другого рівня, l – номер блока третього рівня розбиття ($l = 1, 2, \dots, K_j$).

При технічній доцільності блоків четвертого рівня блоки третього рівня можна описати так

$$S_{MEMS}^{3,l} = \bigcup_{z=1}^{Z_l} S_{MEMS}^{4,z},$$

де Z_l – кількість блоків четвертого рівня в l -му блоці (системі) третього рівня, z – номер блока четвертого рівня розбиття ($z = 1, 2, \dots, Z_l$).

Так процес продовжується доти, поки блоки m -го рівня вже недоцільно, з певних міркувань, піддавати декомпозиції на простіші. Блоки найнижчого рівня, як правило, називають базовими елементами.

Припустивши, що інформаційна технологія аналізу та синтезу МЕМС потребує чотири рівні ієрархії (деталізації) можна описати з допомогою виразу

$$S_{MEMS}^I = \bigcup_{j=1}^n S_{MEMS}^{2,j} \bigcup_{l=1}^{K_j} S_{MEMS}^{3,l} \bigcup_{z=1}^{Z_l} S_{MEMS}^{4,z}. \quad (1)$$

Поділ на блоки виконується, як правило, за функціональною ознакою. Тобто, у випадку побудови елементів МЕМС, де при розробленні використовуються три рівні на відміну від розроблення інтегральних схем (розроблення підсистеми обробки, збереження та передачі даних), перший рівень – МЕМС з набором функцій, зазначених в технічному завданні, блоки другого рівня – це є пристрої для контролю стану навколишнього середовища, пристрої для збирання, обробки, збереження та видачі керуючих сигналів, пристрої для впливу на навколишнє середовище та ін., а блоки третього рівня – балки, пружини, інерційні маси, інтегральні транзистори, резистори, конденсатори тощо.

В процесі розробки МЕМС переважно використовують класичне багаторівневе ієрархічне проектування [7, 8] “згори–донизу”, “знизу–догори”, паралельне їх поєднання, наскрізне тощо. Процес розробки МЕМС з врахуванням особливостей проектування підсистеми збирання, обробки, збереження та видачі керуючих сигналів у формі інтегральної схеми містить чотири рівні, які мають класичні назви: перший – системний, другий – функціональний, третій – схемотехнічний, а четвертий – компонентний.

На сучасному етапі розроблення саме електромеханічних, електромагнітних, п'єзоелектричних, електротеплових та інших елементів МЕМС використовують три рівні, тобто: системний, схемотехнічний та компонентний. Відповідно, відсутній функціональний рівень. Хоча складність фізичних процесів, які проходять в цих пристроях з мікронними розмірами, жорсткі вимоги до точності їх виготовлення (допуски на конструктивні параметри елементів МЕМС жорсткіші, ніж на елементи електронних схем), багатофункціональність елементів конструкції, необхідність оцінки принципової можливості функціонування пристрою та можливості його реалізації за допомогою наявних технологій особливо при розробці нових елементів МЕМС, потребують розв'язання ряду задач, що знаходяться між системним та схемотехнічним рівнями (задачі кінематики в механіці, які можна віднести до функціонального рівня проектування, задачі, пов'язані з розробленням алгоритмічного забезпечення МЕМС та інші). Надалі в роботі будемо дотримуватися тривірневого підходу до розроблення МЕМС. У більшості випадків кількість рівнів визначається технічною доцільністю, здоровим глуздом проектувальників, наявними програмними системами для проектування МЕМС тощо.

Отже, у випадку використання розробки “згори–донизу” (рис. 3) пристрій МЕМС розбивається на функціонально довершені модулі: блоки живлення, мікродавачі, модулі обробки, передачі та збереження інформації, виконавчих пристроїв тощо. У цьому випадку маємо справу з схемотехнічним рівнем автоматизованого проектування.

Далі задача розробки мікродавачів та мікроактуаторів розбивається на задачі проектування компонент (елементів), які є задачами компонентного рівня і пов’язані, для наприклад, з розробленням пружини чи джерела живлення електростатичного мікроактуатора тощо. За потреби компоненти МЕМС можна піддати подальшій декомпозиції на елементи. У цьому випадку будемо мати справу з елементним рівнем, на якому розробляємо балки, анкери, пластини тощо.

Використання блочно-ієрархічного підходу до аналізу та синтезу МЕМС має низку переваг над іншими, тобто: з простішими об’єктами розроблення зручніше працювати, побудувати математичну модель даного об’єкта проектування, змоделювати його роботу, виконати верифікацію та тестування результатів розробки тощо. До того ж треба звернути увагу на особливість МЕМС, яка полягає в тому, що функціональні пристрої можуть належати до різних наукових галузей, і розробник практично не може бути спеціалістом в усіх галузях науки та техніки.

Розроблення “знизу–догори” (рис. 4) використовують у тому випадку, коли необхідно побудувати подібний інтегральний пристрій і значна частина складових МЕМС частково чи повністю вже є спроектована. Цей вид розробки МЕМС з кожним роком все частіше використовується, оскільки бібліотека розроблених елементів з часом зростає. На перших етапах це стане можливим для окремих елементів МЕМС, компонент і підсистем.

Разом з тим, низку елементів мікроелектромеханічної системи доцільно розробляти паралельно, що дасть змогу на певних етапах значно прискорити процес проектування. Наприклад, мікродавачі, мікроактуатори та системи керування обробки і передачі даних можна розробляти паралельно.

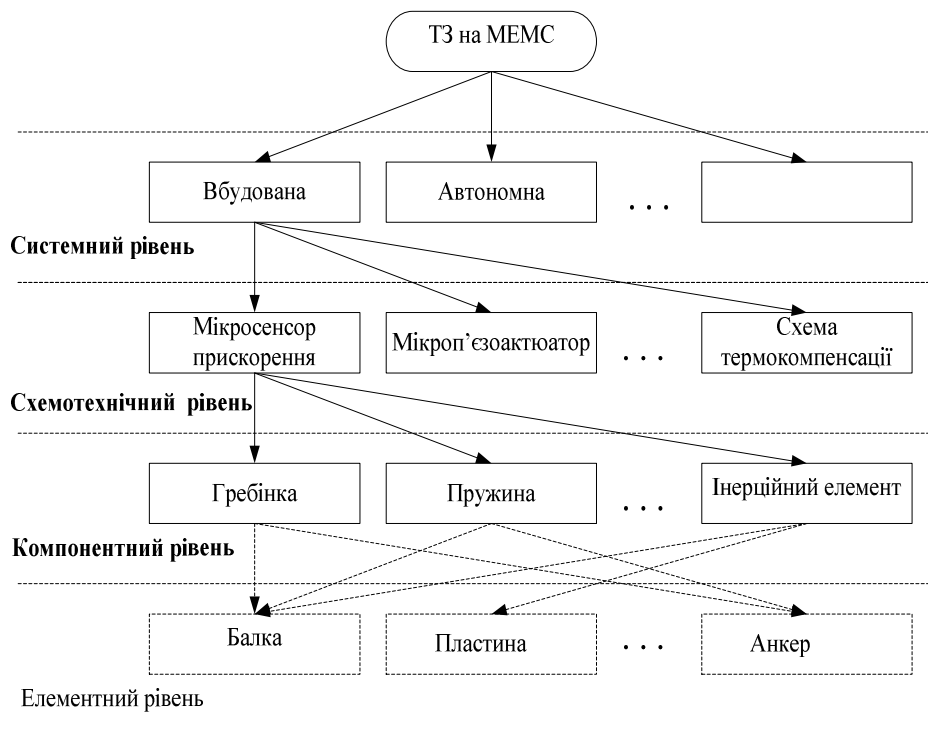


Рис. 3. Рівні розробки МЕМС “згори–донизу”

Отже, при побудові мікроелектромеханічних систем необхідно використовувати методи розроблення “знизу–догори”, “згори–донизу”, їх поєднання і особливу увагу приділити паралельному проектуванню, що обумовлено особливостями мікросистем, тобто роботою складових за різними фізичними принципами.

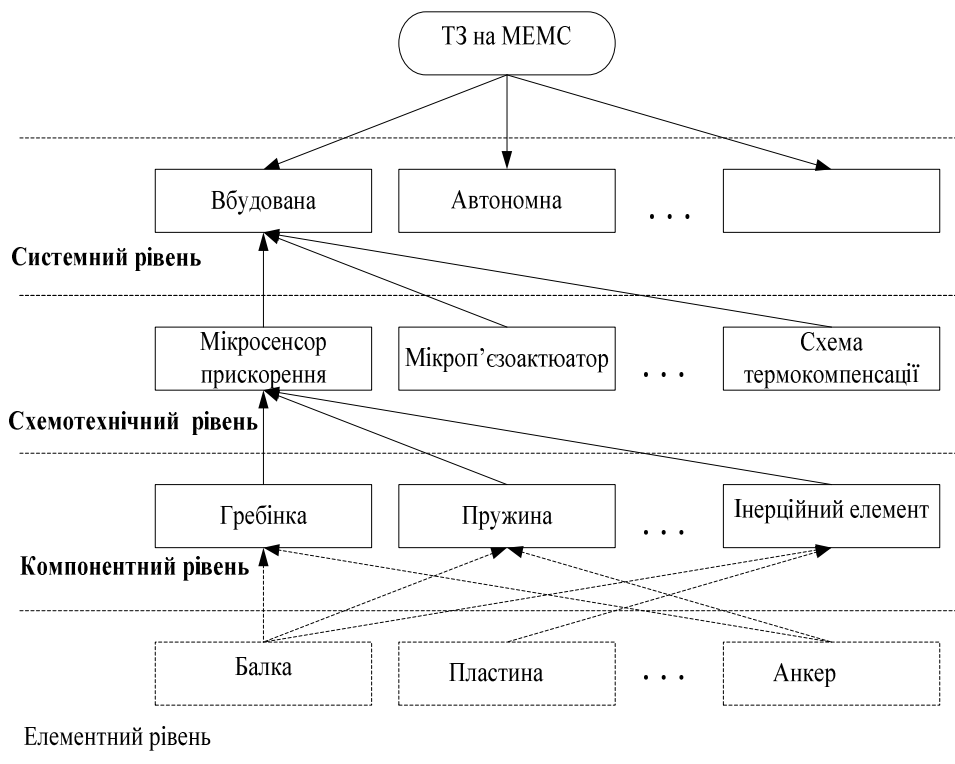


Рис. 4. Приклад розроблення MEMC “знизу–догори”

3. Вдосконалення бібліотеки математичних моделей ІТ

Інформаційна модель систем дає змогу створити бібліотеку моделей елементів MEMC, яка б охоплювала широкий спектр реально існуючих сьогодні мікропристроїв [9].

У кожному завданні на моделювання може бути специфіковано кілька задач моделювання, в кожній з яких вказується тип задачі, присвоюються відповідні значення параметрам інформаційної моделі та властивостям методу моделювання, а також специфікуються потрібні результати. Сьогодні підсистеми підтримують чотири типи задач моделювання, які визначаються рівнем розроблення (*системним, схемотехнічним та компонентним*) та моделюванням технологічного процесу виготовлення MEMC.

Структура запропонованої чотирирівневої бібліотеки математичних моделей для ієрархічного розроблення показана на рис. 5.

Робота наведеної вище бібліотеки ММ починається з аналізу вхідних даних, після якого вибирається математична модель об'єкта розроблення. Наступний крок передбачає виконання процесу розроблення.

Підсистема аналізу вхідного завдання на базі рівня розроблення, необхідної точності вихідних параметрів, наявних ресурсів ЕОМ визначає математичну модель з бібліотеки ММ, для опису яких використано XML-формат.

Структура даних, яка містить код математичної моделі, наведена на рис. 6.

Вона визначає інформацію про код рівня розроблення моделювання (1–4) гідравлічних MEMC.

Кожний ієрархічний рівень потребує ММ різної складності, універсальності, точності та економічності. Тому існують групи математичних моделей з різними вихідними параметрами. Відповідно до запропонованого коду робиться вибір з бібліотеки математичних моделей елементів гідравлічних MEMC.

Бібліотека ММ елементів MEMC містить чотири групи: системну, схемотехнічну, компонентну та технологічну.

Перша група математичних моделей гідравлічних MEMC містить ММ, які не потребують значних затрат ресурсів ЕОМ. Як правило, ці моделі записані у формі простих аналітичних виразів. Відповідно їх точність становить 10–20 %.

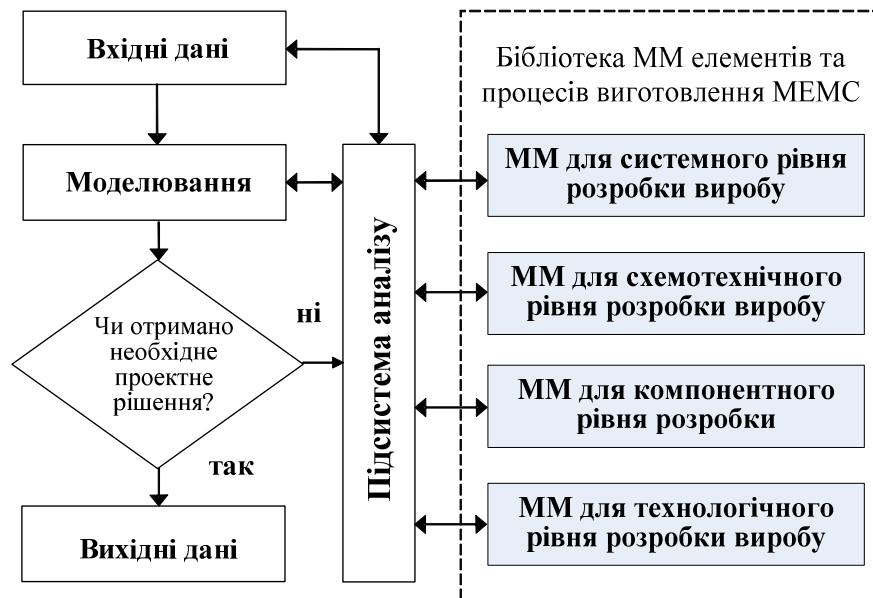


Рис. 5. Структурна схема бібліотеки математичних моделей базових елементів МЕМС



Рис. 6. Структура коду ММ

Друга група містить математичні моделі, які ґрунтуються на звичайних диференціальних рівняннях, або їх системи. Для їх розв'язання використовуються чисельні методи (неявна схема Ейлера, методи Рунге–Кутта тощо). Точність відповідних математичних моделей становить 7–15 % і вони використовуються на компонентному рівні розроблення.

Математичні моделі, які належать до третьої групи, містять рівняння в часткових похідних, а при їх розв'язанні використовують метод скінченних різниць чи метод скінченних елементів. Вони мають найвищу точність (2–8 %), але при цьому потребують значних затрат ресурсів ЕОМ. Математичні моделі такого рівня використовуються на елементному рівні автоматизованого проектування.

Четверта група містить ММ для технооперацій виготовлення МЕМС. Ці моделі використовуються, як правило, на компонентному рівні розроблення.

Всі дані, що належать до інформаційної моделі, для процесу зберігання в системі розроблення МЕМС та інформаційного обміну між компонентами системи, подають у внутрішньому XML-форматі (Extended Markup Language). XML-формат отримав широке використання в розподілених системах різноманітного призначення. Вибір XML-формату обумовлений такими основними перевагами [10]. По-перше, XML-формат зручний та ефективний для відображення ієрархічних структур даних та сіткових структур з перехресними посиланнями. По-друге, XML-формат є надзвичайно гнучким та придатним для розширення. По-третє, XML-формат є стандартним форматом представлення даних, що робить його привабливим інтеграційним засобом для інформаційного узгодження неоднорідних систем. І, нарешті, існують численні бібліотеки, розроблені для різних мов програмування і призначені для перетворення даних з XML-формату в інші форми представлення та навпаки [11].

Розроблений XMML формат даних відрізняється від існуючого XML формату тим, що в ньому було додано основні математичні операції: додавання, віднімання, ділення, множення, логарифм натуральний, експонента, синус, косинус.

Для ілюстрації розробленого формату на рис. 7 наведено XMML-представлення математичної моделі двохшарової структури плоскої мембрани п'єзоелектричної мікропомпи.

```

01: <model name="Мембрана мікропомпи">
02: <description> Мембрана з п'єзоелектричним приводом
      </description>
      03: <unit>
          04: <x>0.001</x>
          05: <y>0.001</y>
          06: <z>0.001</z>
      07: </unit>

08: <structure id="Пластина" type="single-layered">
      09: <length>2</length>
      10: <width>2</width>
      11: <height>0,1</height>
      12: <material>Si</material>
          13: <x>0</x>
          14: <y>0</y>
          15: <z>0</z>
      16: </structure>

17: <actuator id="П'єзоелектрик" type="plane">
      18: <length>1</length>
      19: <width>1</width>
      20: <height>0,1</height>
      21: <material>PZ</material>
      22: <power>UPower</power>
          23: <x>0,5</x>
          24: <y>0,5</y>
          25: <z>0,1</z>
      26: </actuator>
      27: </model>

      28: <material name="Si" type="solid">
29: <description>Кремній</description>
      30: <МодульЮнга>1.69e11</МодульЮнга>
      31: <КоефПуассона>0.21</КоефПуассона>
      32: <density>2400.0</density>
          33: </material>
      34: <material name="PZ" type="solid">
35: <description>П'єзоелектрик</description>
      36: <МодульЮнга>1.9e11</МодульЮнга>
      37: <КоефПуассона>0.35</КоефПуассона>
      38: <density>2700.0</density>
          39: </material>

```

Рис. 7. Внутрішнє XММL-представлення моделі мембрани мікропомпи з п'єзоелектричним приводом

У наведеному XММL-визначенні моделі рядок 01 відкриває специфікацію моделі з іменем Мембрана мікропомпи, короткий опис якої подається в рядку 02. В рядках 03–07 відбувається визначення одиниць вимірювання, до яких прив'язуються всі геометричні параметри моделі. Рядки 04–06 визначають кроки по координатах x (1 мм), y (1 мм) та z (1 мм), відповідно. З рядка 08

починається опис одношарової фізичної структури з ідентифікатором “Пластина”, яка відображає заданий елемент. В рядках 09, 10 та 11 визначається довжина (2 мм), ширина (1 мм) та висота (0,1 мм) структури в заданих вище одиницях вимірювання. Рядок 12 містить назву матеріалу (Si), з якого виготовлена структура. Рядки 13–15 визначають положення структури у тривимірному просторі. Рядок 16 завершує опис фізичної структури з ідентифікатором “Пластина”. З рядка 17 починається визначення плоского актюатора з ідентифікатором “П’єзоелектрик”. В рядках 18–20 визначається довжина (1 мм), ширина (1 мм) та висота (0,1) пластини п’єзоелектрика, а в рядку 21 вказується електрична напруга (UPower), яка подається на актюатор. Просторове розміщення актюатора в моделі задається в рядках 23–25. Рядок 26 завершує визначення актюатора з ідентифікатором “П’єзоелектрик”. Нарешті, рядок 27 завершує опис моделі “Мембрана” мікропомпи.

Висновки

1. Вперше розроблена структура інформаційної технології аналізу та синтезу мікроелектромеханічних систем, призначена для автоматизації розв’язання задач аналізу та синтезу МЕМС на основі технічного завдання на виріб за допомогою використання методів аналізу та синтезу, побудованих баз знань, БД типових структур МЕМС, БД типових елементів МЕМС, БД технологій виготовлення МЕМС, 4-рівневої бази даних математичних моделей, програмно-технічних засобів і проектної організації.

Результатом застосування побудованої інформаційної технології є автоматизація розв’язання задач аналізу, оптимізації і синтезу та виготовлення документації на виготовлення ще неіснуючого інтегрального виробу, тобто МЕМС.

2. Вдосконалена структура бібліотеки математичних моделей, яка, на відміну від існуючої, містить моделі технологічного рівня розроблення МЕМС та використовує вдосконалений формат XMML для їх внутрішнього представлення в бібліотеці, що забезпечує єдиний підхід до збереження даних в інформаційних технологіях аналізу та синтезу МЕМС.

1. Лысенко И.Е. Проектирование сенсорных и актюаторных элементов микросистемной техники. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 103 с. 2. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике и системах телекоммуникаций: Учеб. пособие / Ф.Ф. Колпаков, Н.Г. Борзяк, В.И. Кортунов. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 82 с. 3. Варадан, К. Виной, К. Джозе. ВЧ МЭМС и их применение. – М.: Техносфера, 2004. – 528 с. 4. Норенков И.П. Основы теории и проектирования САПР. – М.: Высш. шк., 1990. – 334 с. 5. Teslyuk V., Pereyuta M., Karkulyovskyy V., Lobur M. Features of microelectromechanical systems design // Proc. of the 2nd Inter. Conf. of Young Scientists “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” (MEMSTECH 2006). – Lviv–Polyana, Ukraine, 2006. – P. 67–70. 6. Teslyuk V., Lobur M., Denysyuk P., Kolesnyk K. Methodology of the Automated MEMS Design. // Proc. of the IIIrd International Conference of Young Scientists MEMSTECH’2007, May, 23-26, Lviv, Polyana, 84–85. 7. Системы автоматизированного проектирования: Учеб. пособие для вузов: В 9 кн. / И.П. Норенков. Кн. 1. Принципы построения и структура. – М.: Высш. шк., 1986. – 127 с. 8. Коваль В.О., Лобур М.В. Автоматизация технологического моделирования полупроводниковых ИС: Учебн. пособие. – Львов: ЛПИ, 1987. – 84 с. 9. Лобур М. В., Теслюк В.М., Денисюк П.Ю. Побудова бібліотеки математичних моделей для проектування елементів вбудованих систем // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка»: Комп’ютерна інженерія та інформаційні технології, 2005. – № 521. – С.101–103. 10. Denysyuk P., Teslyuk V., Khimich I., Farmaga I. XML application for microfluidic devices description // Proc. of the IX-th Intern. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM’2007). – Lviv – Polyana, 2007. – P. 567–569. 11. Денисюк П.Ю. Застосування XML-формату для опису конструкцій гідравлічних МЕМС // Збірник наукових праць Української академії друкарства “Комп’ютерні технології друкарства”. – 2007. – № 17. – С.93–99.