

струмів коротких замикань, за довільних під'єднань обмоток трансформатора до інших елементів ЕЕС та груп з'єднання обмоток у випадку трифазних двообмоткових трансформаторів.

1. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. – М., 1974. – 192 с. 2. Беляков Ю.С. Схемы замещения автотрансформаторов с регулировочными трансформаторами // *Электричество*. – 1988. – № 5. – С. 26–33. 3. Пинцов А.М. Уравнения и схемы замещения трансформаторов с учетом тока намагничивания // *Электричество*. – 1976. – № 4. – С. 29–34. 4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М., 1979. – 152 с. 5. Веников В.А., Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока: Учеб. пособие для вузов. – М., 1985. – 272 с. 6. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. – 3-е вид., перероб. і доп. – Львів, 1989. – 464 с. 7. Лисяк Г.М., Малиновський А.А., Пастух О.Р. Методика вибору основних параметрів схеми підвищеної надійності блочних електростанцій з умови підтримання бажаного рівня напруги на шинах власних потреб під час зовнішніх трифазних коротких замикань // *Технічна електродинаміка*. – 200. – № 4. – С. 51–55.

УДК 631.3

**М.М. Лобур**

Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра систем автоматичного проектування

## **ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СТРУКТУР ДЛЯ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ САПР**

© Лобур М.М., 2003

**Описані кілька підходів до моделювання та симуляції мікроелектромеханічних структур, використовуючи сучасні САПР та мову VHDL-AMS**

**This paper present few approaches to modeling and simulation of microelectromechanical structures using CFDRC software and VHDL-AMS language**

Розвиток техніки за останні роки свідчить про виразну тенденцію появи продуктів, які є “інтелектуальними”, тобто вони мають вбудовані функції самонавчання та самокерування. Практична реалізація таких систем все частіше опирається на використання технології мікросистем. У цьому напрямку ми можемо зауважити дуже швидкий прогрес у технології виготовлення мініатюрних “інтелектуальних” компонент, реалізуючих конкретні функції, хоча вони надалі є дорогими у виготовленні. В результаті, поступово вибагливі вимоги користувачів можуть бути задоволені і розв’язання конструкторських проблем стає можливим. Тобто ринок є вже готовим для прийняття продуктів, створених на новаторських теоріях і концепціях в цій галузі.

При проектуванні вбудованих систем виникає така проблема: для отримання задовільних результатів функціонування кінцевої системи необхідні детальні знання щодо функціонування окремих її складових.

Для отримання такої інформації можна використати моделювання із застосуванням числових методів, що є значно дешевшим, ніж проведення експериментів. У той час, коли традиційні методи проектування нових систем шляхом низки експериментів вимагають декількох продукційних циклів для досягнення необхідних показників, проектування за допомогою комп'ютера (Computer-Aided Design – CAD) дозволяє зменшити число коштовних спроб та скорочення часу чергових ітерацій процесу проектування. Відповідно чисельне моделювання – це альтернативний підхід до проектування: дешевий, детальний та такий, що дає змогу впровадити економію часу.

Існує декілька підходів до проектування: використання вже готових САПР програм та застосування мов моделювання (VHDL-AMS). Нижче наведемо приклад моделювання властивостей мікроструктури із використанням обох підходів.

Існуючі системи дозволяють замодельовувати як топологію системи, так і проводити експерименти, використовуючи спрощену схему. Звичайно моделювання з використанням спрощеної схеми не дозволяє отримати реальної поведінки системи, оскільки доводиться нехтувати деякими параметрами. Наприклад, для проектування та дослідження властивостей наведеної нижче структури можна використати декілька програмних пакетів – CFD ACE+, PSpice, мову VHDL-AMS. Програмний пакет CFD ACE дозволяє проектувати структуру по шарах, побудувати тривимірну модель та візуалізувати результати моделювання (розподіл температури, електричного потенціалу, деформації). Тобто при використанні цього програмного пакету проектувальник може змінюючи геометрію структури одразу бачити вплив цих змін на режими її функціонування. PSpice дозволяє проводити експерименти тільки над еквівалентною електричною схемою, що звичайно спричиняє низку труднощів щодо інтерпретації результатів.

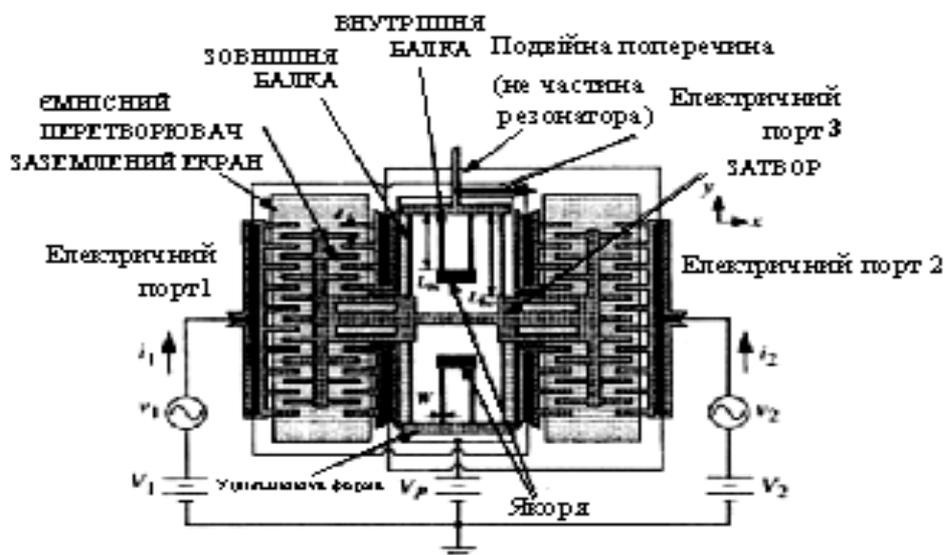


Рис. 1. Модель пристрою

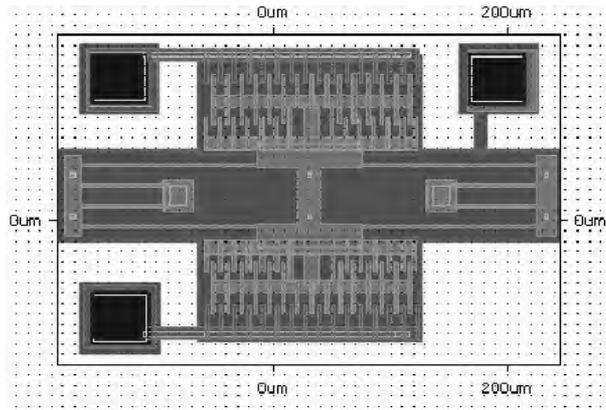


Рис. 2. Топологія структури в CFD ACE+

Програмний пакет CFD ACE+ дозволяє проектувати структуру пошарово, одразу відображаючи і етапи її виготовлення (рис. 3)

```
entity MICRO_RESONATOR is
  generic (
    constant overlap_in : REAL := 22.3e-6;
    constant overlap_out : REAL := 22.3e-6;
    constant gap_in : REAL := 2.0e-6;
    ....
    constant finger_number_in : REAL := 83.0;
    ....
    constant thickness : REAL := 2.0e-6;
    constant beam_l : REAL := 183.4e-6;
    ....
    constant mass1_w : REAL := 658.0e-6;
    ....
  port ( terminal VIN, VOUT, VP : ELECTRICAL );
end entity MICRO_RESONATOR;

architecture FUNCTIONAL of MICRO_RESONATOR is
  constant poly_den : REAL := 2330.0;
  constant E : REAL := 165.0e9;
  ....
  constant B : REAL := visc_air * ( As / air_gap + thickness * ( finger_length_in + 4.0e-6 ) /
gap_in + thickness * ( finger_length_out + 4.0e-6 ) / gap_out );
  ....
  quantity temp1 : REAL;
  quantity temp2 : REAL;
begin
  cap_in == 2.0 * finger_number_in * eps0 * thickness * ( overlap_in + y ) / gap_in;
  ....
  i_VIN == temp1'dot;
  i_VOUT == temp2'dot;
  i_VP == - temp1'dot - temp2'dot;
  m_total * y_accl + B * y_vel + k_sys * y + force_in + force_out == 0;
end architecture FUNCTIONAL;
```

Рис. 3. Опис структури з використання VHDL-AMS

Структурна схема проектування з використанням САПР CFD ACE+ показана на рис. 4., а схема проектування з використанням VHDL-AMS – на рис. 5.

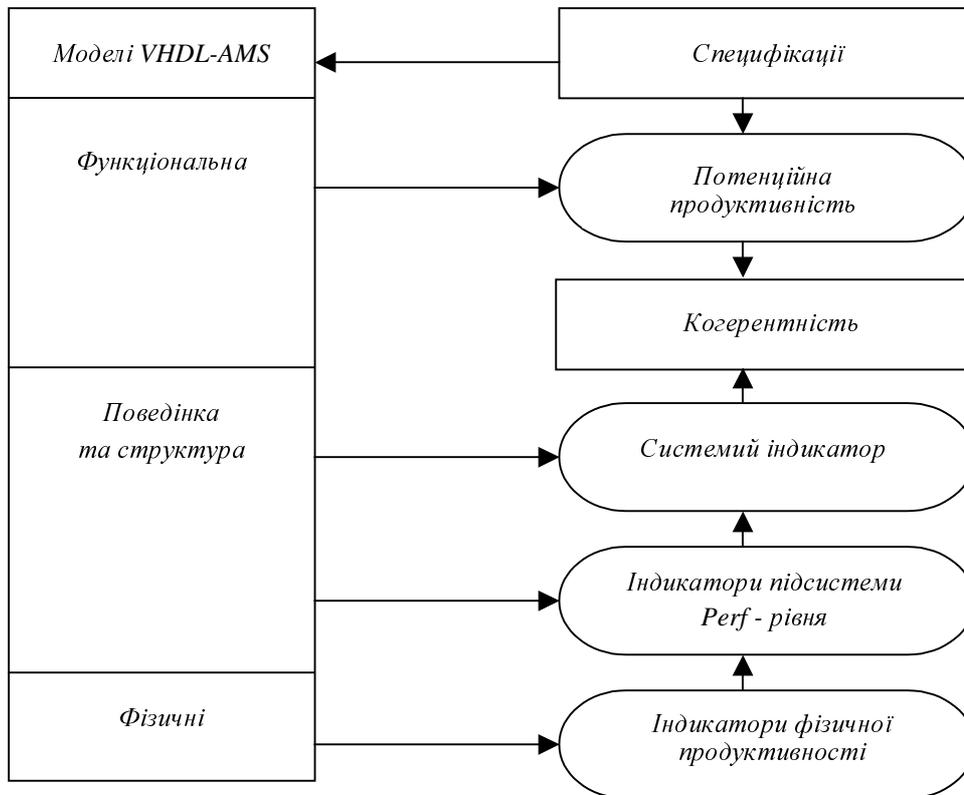
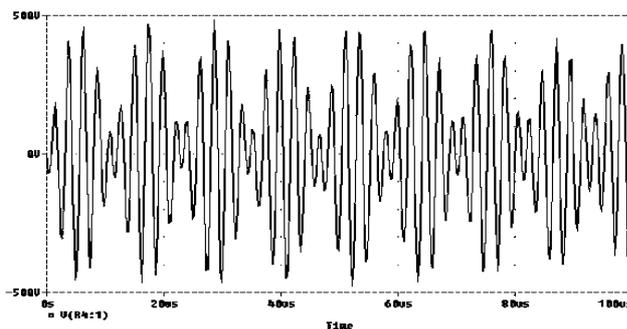
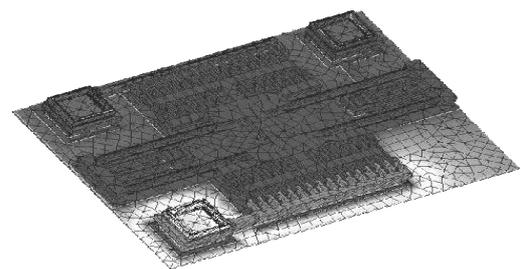


Рис. 4. Схема проектування з використанням VHDL-AMS

### Результати моделювання



а



б

Рис. 5. Результати моделювання у системах відповідно VHDL-AMS та CFD ACE+

Як одна так і друга системи дозволяють замодельовати безпосередньо топологію структури, не використовуючи редукованих (спрощених) схем на відміну від PSpice, та отримати результати, що відображають реальну поведінку системи.

### Висновки

Існує декілька підходів до проектування, в яких проектувальник може виокремити ті чи інші можливості засобу проектування. У випадку технології МЕМС з'являються нові підходи до проектування і всі вони дуже різняться один від одного. Вони не тільки дозволяють візуалізувати процес виготовлення пристрою, але й дають змогу проектувальнику приймати оптимальні рішення під час проектування.

1. Kun Wang, Clark T.-C.Nguyen. *High-order medium frequency micromechanical electronics filters // IEEE J. of Microelectromechanical Systems.* – Dec.1998. – Vol. 8, N 4. – P. 534–557. 2. Lin L., Howe R.T., Pisano A.P. *Micromechanical filters for signal processing // IEEE J. of Microelectromechanical Systems.* – Sept.1998. – Vol. 7, No.3. – P. 286–294. 3. CFD-Micromesh<sup>TM</sup>. *Tutorials. Version 1.4; CFD Research Corporation.* – July 2001. 4. Varghese M., Rabinovich V.L., Sentura S.D. *Reduced-order models of stress-stiffened MEMS structures.* 5. Wachutka G. *From Continuous Field Modeling to MEMS Macromodels, MIXDES 2002.*

УДК. 621. 313. 33

В.С. Маляр, І.Р. Гавдьо

Національний університет "Львівська політехніка"  
кафедра теоретичної та загальної електротехніки

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ З ЕКРАНОВАНИМИ ПОЛЮСАМИ НЕЯВНИМ МЕТОДОМ НА ОСНОВІ СПЛАЙН-ФУНКЦІЙ

© Маляр В.С., Гавдьо І.Р., 2003

**Розроблена математична модель для розрахунку перехідних процесів в асинхронних двигунах з екранованими полюсами неявним методом інтегрування диференціальних рівнянь на основі апроксимації інтегральної кривої кубічними сплайнами. При цьому для розрахунку електромагнітних зв'язків використовується розгалужена заступна схема магнітопроводу двигуна.**

**A mathematical model for transient processes analysis in shaded-pole induction motor using implicit method of integration based on integral curve approximation by cubic splines is presented. The electromagnetic couplings are calculated on the base of ramified equivalent circuit of motor magnetic circuit.**

### Постановка проблеми

Серед широкого спектра електричних мікромашин чинне місце належить однофазним асинхронним двигунам з екранованими полюсами (АДЕП), які нерідко називають двигунами з розщепленими полюсами. На явновиражених полюсах такого двигуна розміщена зосереджена обмотка збудження, яка живиться від джерела синусоїдної напруги, а частина полюса охоплена короткозамкненим витком, який створює часовий зсув магнітного потоку, що через нього проходить. Ротор АДЕП симетричний і має короткозамкнену обмотку типу білячої клітки. Отже, двигун має магнітну та електричну несиметрію, внаслідок чого