

УДК 62-82:658.512.011.56

О.Ю. Безносик, В.В. Ладугубець, канд. техн. наук, О.Д. Фіногенов, канд. техн. наук

Методи підвищення ефективності Y-Δ перетворення при побудові схемних макромоделей МЕМС

Проанализированы особенности использования процедуры Y-Δ преобразования для построения схемных макромоделей неэлектрических составляющих МЭМС, и определены отдельные этапы, которые влияют на погрешность конечной макромоделей и время её получения. Предложены модификации метода выбора сокращаемых узлов, которые обеспечивают значительное уменьшение как времени расчетов, так и количества вновь созданных элементов в процессе Y-Δ преобразования.

The specific features of using of Y-Δ transformation procedure for formulation of circuit macromodels for non-electrical components of MEMS have been analyzed, and the separate stages have been defined which influence the accuracy of the ultimate macromodel and the time of its formulation. The modifications of the method for selection of nodes to be reduced have been suggested, which provide the considerable reduction both a calculation time and a number of newly created elements during the Y-Δ transformation process.

Ключевые слова: макромоделей, Y-Δ преобразование, RLC-схема, МЭМС, моделирование.

Вступ

При проектуванні сучасних пристроїв важливу роль відіграє можливість використання єдиного інструментарію для моделювання об'єктів, в яких відбуваються різні фізичні процеси: електричні, механічні, оптичні, теплові і т.д. Це вимагає представлення різних підсистем початкового об'єкту у вигляді еквівалентних моделей однієї і тієї ж фізичної природи, що дозволить об'єднати їх для вирішення в єдиному обчислювальному процесі. На етапі схемотехнічного моделювання для формування математичної моделі об'єкту складної фізичної природи найчастіше застосовується метод електромеханічних аналогій. Це, у свою чергу, вимагає наявності схемних реалізацій моделей неелектричних блоків, які характеризуються необхідним ступенем точності. Більшість сучасних засобів САПР, які використовуються при проектуванні механічних систем, для побудови математичної моделі використовують метод скінчених елементів. Головною проблемою, яка постає на цьому шляху, є розмірність вихідної системи рівнянь, що відображає математичну модель неелектричних скла-

дових МЕМС, яка може досягати десятків або навіть сотень тисяч рівнянь. Відповідно, схемний еквівалент такої системи рівнянь складається з десятків або навіть сотень тисяч компонентів. Внаслідок сумарних розмірів об'єкта проектування, навіть такі відомі пакети схемотехнічного проектування як Hspice, SPECTR, Saber (всі – США), NetALLTED (Україна, НТУУ «КПІ») [1], ПА-7 (Росія) стають неспроможними. Єдиним можливим виходом з такого положення є скорочення розмірів математичних моделей неелектричних складових МЕМС та отримання відповідних макромоделей МЕМС. Одним з найбільш ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є використання методу Y-Δ перетворення [2]. Однак час розрахунків та кінцева точність отриманих макромоделей в значній мірі залежать від урахування особливостей математичних моделей неелектричних складових МЕМС та аналізу витоків похибок методу Y-Δ перетворення. Тому задача підвищення ефективності методу Y-Δ перетворення при побудові макромоделей неелектричних складових МЕМС є досить актуальною.

1. Аналіз витоків похибок методу Y-Δ перетворення

В базовому алгоритмі [3] при скороченні i -го вузла, що з'єднаний з вузлами a і b провідностями y_a і y_b , нова провідність, представлена

виразом $y_{ab} = (y_a y_b) / Y_i$, де $Y_i = \sum_{j=1}^k y_j$ (k – кіль-

кість вузлів, з'єднаних з вузлом i), буде поліномом в p -області, що ускладнює її автоматичну ідентифікацію у вигляді типових RLC-компонентів. Для виходу з цієї ситуації пропонується таке рішення [3]. Якщо кожна провідність, підключена до пари вузлів, в початковій схемі складається з R, L та C елементів, то y_{ab} приймає такий вигляд:

$$y_{ab} = \frac{\left(g_a + \frac{b_a}{p} + p c_a\right) \left(g_b + \frac{b_b}{p} + p c_b\right)}{\left(G_i + \frac{B_i}{p} + p C_i\right)}, \quad (1)$$

де $C_i = \sum_{j=1}^k c_j$ – сума всіх ємностей, $B_i = \sum_{j=1}^k b_j$ – сума всіх величин, зворотних індуктивностям,

$$G_i = \sum_{j=1}^k g_j - \text{сума всіх провідностей, підключе-}$$

них до вузла i , p – оператор Лапласа.

Для спрощення (1) скористаємося такими міркуваннями. Для кожного вузла у колі визначені дві часові сталі: $\tau_{RC_i} = C_i/G_i$ та $\tau_{LC_i} = \sqrt{C_i/B_i}$. Часова стала вузла i визначається як $\tau_i = \max(\tau_{RC_i}, \tau_{LC_i})$, а i -й вузол вважається швидким, якщо $\tau_i < \tau_{\min} = 2\pi/\omega_{\max}$, де τ_{\min} – часова стала, визначена користувачем, яка залежить від верхньої границі діапазону частот, що розглядається – ω_{\max} . Відзначимо, що τ_{\min} пропорційно $1/\omega_{\max}$.

При розрахунку сумарних значень зворотної індуктивності B_i , ємності C_i та провідності G_i можлива ситуація, коли ці значення будуть менше 0. Оскільки стала часу τ вузла є, по суті, визначенням швидкості вузла, то для процесу скорочення цікавість представляють не абсолютні значення B_i , C_i , G_i , а їх відношення. Тому, для розрахунку механічних компонентів, в приведених вище формулах обрахунку τ_{RC_i} і τ_{LC_i} необхідно використовувати абсолютні значення відношень сумарних ємностей, індуктивностей і провідностей.

Отже, швидкий вузол задовольняє таким умовам: $\omega C_i < G_i$, $G_i < B_i/\omega$ та $\omega C_i < B_i/\omega$. Для того, щоб виключити швидкий вузол з RLC-кола, розглянемо два випадки.

У першому випадку $\tau_{RC_i} \gg \tau_{LC_i}$. Тоді, з урахуванням $\omega C_i < G_i$, (1) перетвориться до вигляду:

$$y_{ab} = (g_a + pc_a)(g_b + pc_b) / (G_i + pC_i). \quad (2)$$

Розкладемо (2) в ряд Маклорена. Тоді (2) прийме вигляд:

$$y_{ab} = \frac{g_a g_b}{G_i} + p \frac{c_a g_b + c_b g_a}{G_i} + p^2 \frac{4c_a c_b}{G_i} + \dots \quad (3)$$

В багатьох випадках, останній ненульовий член розкладу (3) вносить внесок в загальне значення, що відрізняється на 5-6 порядків від

першого члена розкладу (3) і на 2-3 порядки від другого. І тому ним в цих умовах можна нехтувати. Відзначимо, що за відсутності однієї з ємностей c_a або c_b залишковий член розкладу (3) дорівнює нулю.

Постійний коефіцієнт в (3) дає значення провідності, яке потрібно помістити між вузлами a і b при виключенні вузла i , а коефіцієнт при p дає значення ємності.

У другому випадку $\tau_{LC_i} \gg \tau_{RC_i}$. По аналогії з (3), (2) перетвориться до вигляду:

$$y_{ab} = \frac{1}{p} \frac{b_a b_b}{B_i} + p \frac{c_a b_b + c_b b_a}{B_i} + \dots \quad (4)$$

Коефіцієнт при $1/p$ в (4) дає значення величини, зворотної до індуктивності, яку потрібно підключити між вузлами a і b при виключенні вузла i , а коефіцієнт при p дає значення ємності.

Конкретні співвідношення для внесення нових елементів між вузлами a і b при виключенні i -го вузла, розташованого між ними, для обох випадків для всіх можливих ситуацій представлені в роботі [3].

На відміну від RLC-кіл, які моделюють паразитні ефекти у великих інтегральних схемах, значення R, L, C елементів, які є складовими схемних макромоделей неелектричних компонентів MEMS, у більшості випадків, мають такі значення, для яких похибка формул (3) та (4) може бути суттєвою. Так, на рис. 1 представлена еквівалентна схема закріпленої однорідної балки з одним ступенем свободи [4]. Для даної моделі були отримані наступні номінали елементів: C1..C99 = -0.11667 Ф; C100..C199 = 0.7 Ф; L1..L99 = 5E-12 Гн; L100 = 5E-12 Гн.

При таких значеннях компонентів L та C практично усі вузли мають однакові сталі часу; крім того, похибка формул (3) та (4) може бути досить значною, особливо у тих випадках, коли ці формули використовуються багатократно. Це неодмінно вплине на точність кінцевої макромоделі. Тому алгоритм Y-Δ перетворення потрібно модифікувати таким чином, щоб кількість разів використання формул (3) та (4) для отримання кінцевого результату була найменшою.

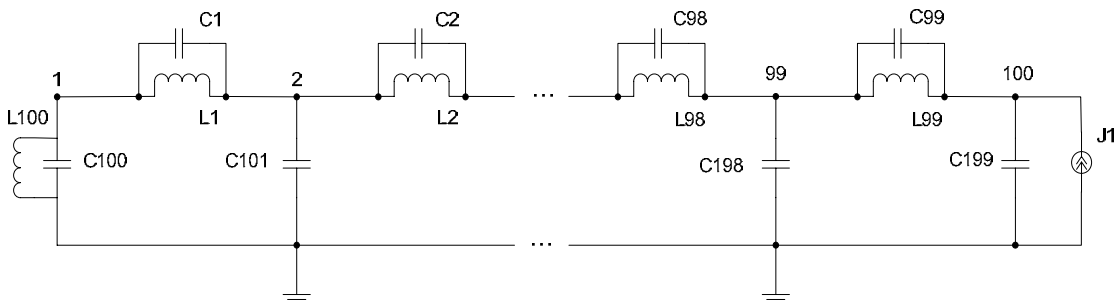


Рис.1. Еквівалентна схема заміщення однорідної балки з одним ступенем свободи

В базовому алгоритмі умову скорочення вузла визначено як:

$$\tau_j < \tau_{\min} \quad (5)$$

При цьому, якщо декілька вузлів мають однакові сталі часу, то у якості вузла, що виключається, вибирається той, який стоїть у черзі першим. Проте, відомо, що при видаленні вузла утворюється $k(k-1)/2$ нових елементів, де k – кількість сусідніх (з i -м) вузлів. Це означає, що якщо, при рівних сталих часу, два вузли мають різну кількість з'єднань з сусідніми вузлами, то кількість елементів у схемі на наступному кроці скорочення також може бути різною, причому більшою ніж на попередньому кроці. А це, у свою чергу, призводить до збільшення кількості використань формул (3) та (4) для розрахунку значень нових елементів, що утворилися.

Так, в еквівалентній схемі закріпленої однорідної балки з трьома ступенями свободи [5] окремі вузли мають порівняно невисоку кількість з'єднань з іншими (5-7 компонентів). При цьому, загальна кількість компонентів в цій схемі дорівнює 776. Але кількість компонентів під час її скорочення за допомогою Y-Δ перетворення може значно зростати (рис. 2.) і досягає 1256 компонентів.

Для інших об'єктів початкова кількість компонентів у схемі може на окремих кроках скоро-

чення за допомогою Y-Δ перетворення збільшуватись у 5-7 разів у випадках, коли середня кількість компонентів, підключених до одного вузла, сягає 10-20. Це може призводити як до значного зростання часу, що потрібен для отримання схемної макромоделі неелектричної складової MEMS, так і до зниження її точності. Тому, необхідним є розробити такі модифікації базового методу скорочення в частині вибору вузлів, що виключаються за допомогою Y-Δ перетворення, які б не призводили до зростання кількості елементів в еквівалентній схемі під час скорочення.

Частково вказані вище проблеми вирішуються в запропонованій в роботі [6] модифікації (**модифікація 1**) методу вибору вузлів, що виключаються при використанні Y-Δ перетворення для скорочення розмірності схемних еквівалентів неелектричних моделей MEMS з метою отримання відповідної макромоделі. Суть її полягає в тому, що у випадку, коли в схемі є декілька вузлів з однаковою сталою часу, пріоритет на скорочення надається вузлу з найменшою кількістю під'єднаних до нього елементів. На відміну від цього, в даній роботі пропонується дослідити ефективність використання наступних варіантів алгоритму вибору вузлів, що скорочуються.



Рис.2. Залежність кількості компонентів схеми від кроку скорочення

2. Методи вибору вузлів, що скорочуються при використанні $Y-\Delta$ перетворення

Модифікація 2. Якщо головним критерієм при скороченні вузла вважати не його «максимальну швидкість», тобто значення сталої часу t , а мінімальний час, необхідний для його скорочення, то можливою є така модифікація базового методу скорочення:

Крок 1. Формується множина вузлів, для яких виконується умова $\tau_i < \tau_{\min}$;

Крок 2. Вузол, який входить до цієї множини та має найменшу кількість під'єднаних до нього елементів, виключається першим;

Крок 3. Якщо таких вузлів декілька, то пріоритет віддається вузлу з меншою сталою часу.

Ця модифікація спрямована на мінімізацію кількості новостворюваних елементів під час скорочення й, відповідно, часу скорочення. Головним недоліком даної модифікації є те, що під час скорочення послідовність видалення вузлів не залежить від значення сталої часу конкретного вузла, що може призвести до збільшення похибки отриманих в результаті скорочених схем.

Модифікація 3. Цікавим є поєднання першої та другої модифікацій з точки зору як зменшення часу скорочення, так і контролю послідовності видалення вузлів. Вочевидь, що сталі часу в черзі вузлів, що видаляються, можуть бути практично однаковими, в той час як кількість під'єднаних до цих вузлів елементів суттєво відрізняються. Тому доцільно ввести поняття «діапа-

Таблиця 1. Результати скорочення (балка, $\tau_{\min} = 1,5 \cdot 10^5$)

| | Вихідне коло | Скорочене коло | | | | | | | |
|------------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | Мод.1 | Мод.2 | Модифікація 3 | | | | | |
| | | | | $\Delta=0,5$ | $\Delta=0,4$ | $\Delta=0,3$ | $\Delta=0,25$ | $\Delta=0,2$ | $\Delta=0,1$ |
| Кількість вузлів | 151 | 23 | 22 | 22 | 22 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| Кількість елементів | 776 | 119 | 115 | 115 | 115 | 125 | 125 | 125 | 119 |
| 1 пік, Гц (похибка, %) | 13,988 | 12,903 (7,76) | 13,926 (0,44) | 13,926 (0,44) | 13,926 (0,44) | 13,922 (0,47) | 13,922 (0,47) | 13,922 (0,47) | 13,922 (0,47) |
| 2 пік, Гц (похибка, %) | 91,794 | 91,292 (0,55) | 91,316 (0,52) | 91,316 (0,52) | 91,316 (0,52) | 91,296 (0,54) | 91,296 (0,54) | 91,397 (0,43) | 91,439 (0,39) |
| 3 пік, Гц (похибка, %) | 176,29 | 176,28 (0,01) | 176,25 (0,02) | 176,25 (0,02) | 176,25 (0,02) | 176,25 (0,02) | 176,25 (0,02) | 176,25 (0,02) | 176,28 (0,01) |
| 4 пік, Гц (похибка, %) | 477,44 | 477,21 (0,05) | 477,01 (0,09) | 477,01 (0,09) | 477,01 (0,09) | 477,01 (0,09) | 477,01 (0,09) | 477,01 (0,09) | 477,21 (0,05) |
| 5 пік, Гц (похибка, %) | 495,51 | 529,10 (6,78) | 528,52 (6,66) | 528,52 (6,66) | 528,52 (6,66) | 528,90 (6,74) | 528,90 (6,74) | 528,05 (6,57) | 528,74 (6,71) |
| 6 пік, Гц (похибка, %) | 861,82 | 920,22 (6,78) | 921,13 (6,88) | 921,13 (6,88) | 921,13 (6,88) | 923,89 (7,20) | 923,89 (7,20) | 914,57 (6,12) | 921,91 (6,97) |
| MaxN* | - | 1256 | 776 | 776 | 776 | 776 | 776 | 776 | 776 |
| Час, с | - | 0,368 | 0,164 | 0,124 | 0,120 | 0,112 | 0,112 | 0,116 | 0,128 |

* MaxN – максимальна кількість елементів в схемі під час скорочення

зону швидкості», коли спочатку за певним критерієм визначається підмножина «швидких вузлів» з множини вузлів, що відповідають критерію $\tau_i < \tau_{\min}$, а скорочення в межах цього «діапазону» ведеться з огляду на мінімальний час скорочення, тобто з врахуванням кількості підключених до вузлів елементів.

Відповідний діапазон можливо визначити, узявши за початок відліку найбільш повільний вузол із значенням $t = \max(\tau_i)$, $i=1(1)n$. В цьому випадку частина вузлів, що має близькі до «найбільш повільного вузла» значення сталої часу, не підлягає скороченню, а решта скорочується за критерієм мінімальної кількості новостворюваних елементів.

Таким чином, алгоритм прийме вигляд:

Крок 1. Для усіх вузлів розраховуються сталі часу, серед яких визначається t_{\max} як максимальне значення t серед усіх вузлів;

Крок 2. Формується множина вузлів, для яких виконуються умови $\tau_i < \tau_{\min}$ та $\tau_i \leq \Delta \cdot \tau_{\max}$, де Δ – деяка стала менше одиниці;

Крок 3. Вузол, який входить до цієї множини та має найменшу кількість під'єднаних до нього елементів, виключається першим;

Крок 4. Якщо таких вузлів декілька, то пріоритет віддається вузлу з меншою сталою часу.

3. Результати чисельних експериментів

Ефективність запропонованих модифікацій методу вибору вузлів, що виключаються при використанні $Y-\Delta$ перетворення, була перевірена на низці прикладів. Так, в таблицях 1 і 2

Таблиця 2. Результати скорочення (мембрана, $\tau_{\min} = 5 \cdot 10^{-5}$)

| | Вихідне коло | Скорочене коло | | | | | | | |
|------------------------|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | Мод.1 | Мод.2 | Модифікація 3 | | | | | |
| | | | | $\Delta=0,5$ | $\Delta=0,4$ | $\Delta=0,3$ | $\Delta=0,25$ | $\Delta=0,2$ | $\Delta=0,1$ |
| Кількість вузлів | 1883 | 6 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Кількість елементів | 62826 | 30 | 42 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 1 пік, Гц (похибка, %) | 181,36 | 180,93 (0,24) | 181,27 (0,05) | 180,93 (0,24) | 180,93 (0,24) | 180,93 (0,24) | 180,93 (0,24) | 180,93 (0,24) | 180,93 (0,24) |
| 4 пік, Гц (похибка, %) | 3427,7 | 3223,5 (5,96) | 3227,5 (5,84) | 3220,3 (6,05) | 3219,3 (6,08) | 3220,8 (6,04) | 3220,9 (6,04) | 3221,0 (6,03) | 3220,2 (6,06) |
| MaxN* | - | 735306 | 128068 | 127856 | 128330 | 128684 | 126975 | 127882 | 125776 |
| Час, с | - | 6021 | 640 | 404,37 | 465,569 | 420,43 | 452,22 | 460,448 | 523,189 |

представлені результати скорочення за допомогою модифікацій 1, 2 і 3 еквівалентних схем заміщення закріпленої неоднорідної балки з трьома ступенями свободи [5] та мембрани акселерометра [7] відповідно (напівжирним шрифтом виділено найкращий варіант скорочення). На рис. 3 показано криві зміни кількості елементів у схемі, що скорочується, для схемної макромоделі мембрани для модифікацій 1, 2 та 3.

Приведені дані свідчать про те, що, з точки зору як кількості нових елементів, що утворюються в процесі скорочення вихідного схемного еквіваленту тестових задач, так і часу скорочення, беззаперечно перевагу мають модифікації під номерами 2 і 3.

Висновки

На основі аналізу можливих витоків похибок методу Y- Δ перетворення для побудови схемних макромоделей неелектричних складових MEMC

запропоновані дві модифікації (модифікація 2 та 3) методу вибору вузлів, що скорочуються, які відрізняються від існуючих методикою визначення множини вузлів, що можуть підлягати скороченню на кожному кроці Y- Δ перетворення та критеріями вибору вузла, що підлягає скороченню, із множини можливих, що забезпечує значне зменшення кількості новостворюваних елементів у процесі Y- Δ перетворення та не призводить до збільшення похибки.

Експериментально, на прикладах побудови схемних макромоделей механічних вузлів доведено ефективність запропонованих модифікацій методу вибору вузлів, що скорочуються. При цьому, при використанні модифікацій 2 та 3, максимальна кількість елементів в схемі під час скорочення, порівняно з модифікацією 1, зменшується від 2 до 6 разів, а час отримання кінцевого результату – від 2 до 14 разів.

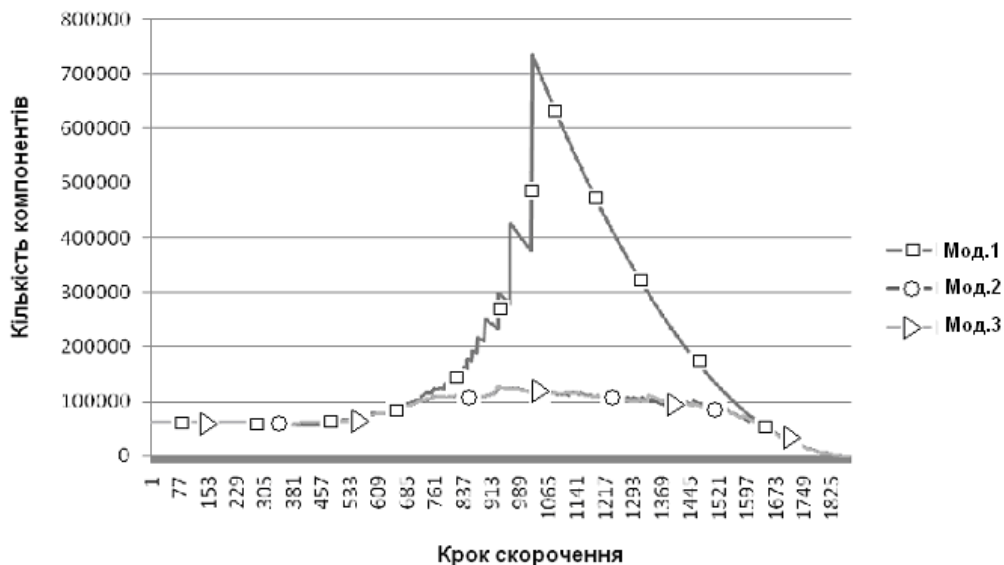


Рис. 3. Залежність кількості елементів схеми від кроку скорочення для мембрани для модифікацій 1, 2 та 3

Література

1. *Ладогубец В.В.* Состояние и перспективы развития автоматизированного схемотехнического проектирования / Ладогубец В.В. // *Электроника и связь : тематический выпуск «Проблемы электроники»*. – 2005. – Ч. 1. – С. 121–127.
2. *Руденко Ю.А.* Алгоритм уменьшения размерности RLC цепей / Руденко Ю.А., Ладогубец В.В., Ладогубец А.В. // *Электроника и связь*. – 2004. - №21. – с. 72-74.
3. *Ладогубец В.В.* Методы макромоделирования МЭМС / Ладогубец В.В., Безносик А.Ю., Крамар А.В., Финогонов А.Д. // *Электроника и связь: тематический выпуск «Проблемы электроники»*. – 2008. – Ч. 1. – С. 244–248.
Ладогубец В.В. Метод формирования схемных реализаций математических моделей неэлектрических объектов / Ладогубец В.В., Чкалов А.В., Безносик А.Ю., Финогонов А.Д. // *Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць. Випуск 46*. – 2008. - С. 114-120.
4. *Beznosyk O.* Using circuit design software to simulate microelectromechanical components / Beznosyk O., Finogenov O., Ladogubets V., Tchkalov O. // *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design : IV-th International Conference of Young Scientists MEMSTECH'2008, 21-24 May 2008, Lviv-Polyana, Ukraine: proc.* – Lviv : Publishing House Vezha & Co , 2008. – P. 130–133.
5. *Безносик О.Ю.* Зменшення неоднозначності алгоритму скорочення розмірності RLC-схем / Безносик О.Ю., Кот Д.М. // *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр.* – К. : ВЕК+, 2009. – № 50. – С. 19–22.
6. *Петренко А.И.* Расчет собственных частот мембранных структур с использованием пакетов схемотехнического проектирования / Петренко А.И., Ладогубец В.В., Безносик А.Ю. [и др.] // *Радиоэлектроника*. – 2009. – № 7. – С. 19–25.