

Безносик А.Ю., Ладогубец В.В., Финогенов А.Д., Чкалов А.В.  
УНК «ИПСА» НТУУ «КПИ»

## Построение пассивных моделей МЭМС

При проектировании современных СБИС важную роль играет возможность использования единого инструментария для совместного расчета характеристик МЭМС компонентов и электрических составляющих. Предлагается методика построения макромодели в виде эквивалентной электрической схемы для использования в пакетах схемотехнического САПР.

Ряд пакетов, используемых на сегодняшний день для расчета характеристик МЭМС, основываются на построении системы УРЧП методом конечных элементов.

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = BF, \quad y = Cx,$$

где  $M$ ,  $D$  и  $K$  – матрицы массы, демпфирования и жесткости соответственно;  $B$  – матрица входов;  $C$  – матрица выходов;  $x$  – вектор неизвестных, включающий все степени свободы;  $F$  – внешний вектор силы и  $y$  – вектор выходных переменных. Переходя к электромеханическим аналогиям, получим:

$$\tilde{C}\ddot{v} + \tilde{G}\dot{v} + \tilde{L}v = F(t)$$

где  $\tilde{C} = M$ ,  $\tilde{G} = D$ ,  $\tilde{L} = K$  – равноценные матрицы емкостей, проводимостей и индуктивностей. Элементы матриц  $C$ ,  $G$ ,  $L$  формируются из элементов матриц  $M$ ,  $D$  и  $K$  по формулам [1]:

$$C_{ij} = -m_{ij}, \quad i, j = 1(1), \quad i \neq j, \quad C_{ii} = \sum_{j=1}^N m_{ij}, \quad i = 1(1)N,$$

$$L_{ij} = -1/k_{ij}, \quad i, j = 1(1), \quad i \neq j, \quad L_{ii} = 1/\sum_{j=1}^N k_{ij}, \quad i = 1(1)N,$$

$$G_{ij} = -d_{ij}, \quad i, j = 1(1), \quad i \neq j, \quad G_{ii} = \sum_{j=1}^N d_{ij}, \quad i = 1(1)N,$$

где  $N$  – количество уравнений или степеней свободы для данной микросхемы.

Главным препятствием для применения полученной эквивалентной схемы является ее размерность. Поэтому для уменьшения размерности предлагается использовать алгоритм, описанный в [2].

**Выводы.** Предложенный подход к построению моделей МЭМС обеспечивает пассивность модели. В отличие от известных подходов к построению моделей, результатом является не математическая модель, а эквивалентная сокращенная схема, которая может быть использована в уже существующих пакетах схемотехнического проектирования (таких как SPICE, ALLTED и т.п.).

## Литература

1. Hsu J.L., Vu-Quoc. A rational formulation of thermal circuit models for electrothermal simulation. – part 1: finite element method. IEEE TRANS. Circuits & Systems – I: Fund. Theory & Appl., 43, 1996, 9, 721–732.
2. Руденко Ю.А., Ладогубец В.В., Ладогубец А.В. Алгоритм уменьшения размерности RLC цепей // Электроника и связь. – 2004. – №21. – с. 72–74.