

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МАКРОМОДЕЛЕЙ МЭМС

Ладогубец В.В., Безносик А.Ю., Финогенов А.Д., Чкалов А.В.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

г. Киев, пр. Победы, 37, 03056, Украина

тел.: +380 44 2808778, e-mail: sasha@cad.kiev.ua

Аннотация – Предлагается использование конечно-элементной математической модели для получения эквивалентной электрической схемы замещения механических компонентов. Данный подход распространен на получение эквивалентных схем для МЭМС компонентов. Для уменьшения размерности полученных схем предложено использование RLC сокращения. Рассмотрен пример получения эквивалентной электрической схемы микроакселерометра.

I. Введение

При проектировании современных устройств важную роль играет возможность использования единого инструментария для моделирования объектов, в которых протекают различные физические процессы. Это требует представления различных подсистем исходного объекта в виде эквивалентных моделей одной и той же физической природы.

На этапе схемотехнического моделирования для формирования математической модели объекта наиболее часто применяется метод электромеханических аналогий. Это, в свою очередь, требует наличия схемных реализаций моделей неэлектрических блоков, обладающих необходимой степенью точности. Большинство современных средств САПР, применяемых при проектировании механических систем, для построения математической модели используют метод конечных элементов. В этом случае, актуальной является разработка метода получения моделей неэлектрических объектов в виде эквивалентных электрических схем на основе готового инструментария построения математической модели.

II. Основная часть

Первым этапом построения модели является получение ее конечно-элементной модели. Для этого можно использовать существующие пакеты, например, ANSYS Multiphysics [1]. Для данного пакета с помощью программы mor4ansys [2] можно получить полноразмерные матрицы, которые описывают состояние системы, из файлов проекта ANSYS (FULL и EMAT). Эти матрицы представляют собой коэффициенты уравнения

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

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 [3], получим:

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

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:

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

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

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

где N – количество уравнений для данной системы. Используя полученные матрицы C , G , L , можно перейти к эквивалентной схеме замещения. Полученная эквивалентная электрическая схема при необходимости может быть сокращена на основе Y-Δ преобразования [4].

Рассмотрим изложенный механизм построения эквивалентной сокращенной модели на примере некоторого микроакселерометра (рис. 1).

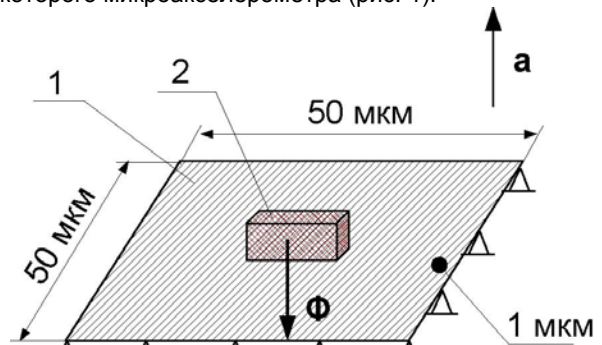


Рис. 1. Расчетная схема микроакселерометра

Fig. 1. Microaccelerometer's calculation scheme

Микроакселерометр выполнен в виде квадратной кремниевой пластинки (мембраны) 1 толщиной 1 мкм со стороной квадрата 50 мкм. Стороны пластинки опираются на основу, а остальная часть поверхности свободна и может прогибаться. В центре пластинки закреплен металлический груз 2 в виде квадратной пластинки со стороной 10 мкм. При движении объекта с ускорением \vec{a} , на котором установлена мембрана, на груз действует сила инерции $\vec{\Phi} = -m\vec{a}$ в противоположном направлении, что вызывает прогиб мембраны. Поскольку данная деформация упругая, имеет место зависимость между прогибом мембраны и величиной силы инерции, а значит, по величине прогиба можно определить величину ускорения объекта.

Расчет собственных частот микроакселерометра выполнен методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS Multiphysics v10.0. Для дискретизации пластинки использованы конечные элементы типа SHELL 93 прямоугольной формы размером 5×5 мкм. Определены 4 первые собственные частоты и соответствующие формы колебаний (приведены в табл. 1 в колонке «Исходная схема»).

Первая частота гораздо ниже других (181 кГц), и именно она соответствует «рабочей» деформации пластинки с максимальным прогибом в центре. Вторая и третья частоты равны между собой (около 1 МГц) и соответствуют паре антисимметричных форм, у которых прогиб в центральной точке отсутствует. Четвертая форма, соответствующая частоте приблизительно 3 МГц, включает деформацию центральной пластинки-груза. Эти колебания будут практически

отсутствовать в рабочем режиме акселерометра.

Полученные из ANSYS с помощью программы mor4ansys полноразмерные матрицы были использованы для создания эквивалентной электрической схемы на входном языке пакета NetALLTED [5]. Полученная эквивалентная RLC электрическая схема уменьшается с помощью алгоритма Y-Δ преобразования при таком значении параметра τ_{min} , которое позволяет получить адекватные результаты моделирования. Моделирование сокращенной схемы проводилось в диапазоне частот 0,05 – 3,5 МГц (рис. 2).

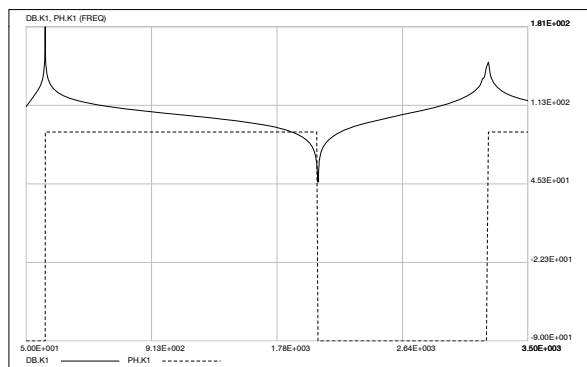


Рис. 2. АЧХ, ФЧХ сокращенной схемы

Fig. 2. AFC, PFC of reduced circuit

Частоты, отвечающие второму и третьему пикам, не отображены, так как отсутствует соответствующий прогиб в центральной точке мембраны, для которой проводилось наблюдение. Количество узлов и элементов исходной и сокращенной схем, а также результаты моделирования сокращенной схемы приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты сокращения

Table 1. Reduction results

	Исходная схема	Сокращенная схема
τ_{min}	-	$5 \cdot 10^{-5}$
Количество узлов	1883	6
Количество элементов	35954	30
Уплотнение по узлам, %	-	99.68
Уплотнение по элементам, %	-	99.92
1 пик, кГц (погрешность)	181.36	181.5 (<0.1%)
2 пик, кГц	1018.1	-
3 пик, кГц	1018.1	-
4 пик, кГц (погрешность)	3427.8	3223.3 (6%)

III. Заключение

Предложенный метод формирования схемных реализаций моделей неэлектрических объектов позволяет моделировать такие устройства с помощью пакетов схемотехнического проектирования, предназначенных для применения в области электроники. Этот метод может быть использован для получения моделей неэлектрических объектов при условии возможности получения их математической модели в виде конечно-элементных матриц.

IV. Список литературы

- [1] Ansys Inc.: <http://www.ansys.com/>.
 [2] Rudnyi E., Lienemann J., Greiner A., Korvink J. G. mor4ansys: Generating Compact Models Directly from ANSYS Models // Technical Proceedings of the 2004 Nanotechnology Conference and Trade Show (Nanotech 2004, March 7-11, 2004). – Boston, Massachusetts, USA, vol. 2. – P. 279-282.

- [3] Hsu J. T., Vu-Quoc L. A rational formulation of thermal circuit models for electrothermal simulation. – part 1: Finite element method // IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications, vol. 43, 1996. – P. 721-732.
 [4] Руденко Ю.А., Ладогубец В.В., Ладогубец А.В. Алгоритм уменьшения размерности RLC цепей // Электроника и связь. – 2004. - №21. – с. 72-74.
 [5] Petrenko A., Ladogubets V., Tchkalov V., Pudlowski Z. ALLTED – a computer-aided engineering system for electronic circuit design. – Melbourne: UICEE, 1997, 205 p.

MEMS MACROMODELS CONSTRUCTION METHOD

Petrenko A. I., Ladogubets V. V., Beznosyk A. Y.,
 Finogenov A. D., Tchkalov A. V.
 National Technical University of Ukraine “KPI”
 37, Peremogy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
 Ph.: +380 44 2808778, e-mail: sasha@cad.kiev.ua

Abstract – It is offered to use a finite-element mathematic model for receiving the equivalent electrical circuit of mechanical components. The given approach is spread on getting the equivalent circuits for MEMS components. To reduce dimensions of the circuits received it is proposed to use the RLC-reduction. The example of getting microaccelerometer's equivalent electrical circuit is considered.

I. Introduction

On the stage of schematic design, the method of electro-mechanic analogies is mostly used to build a mathematical model of the object of complex physical structure. This, in turn, requires the presence of circuit realizations of non-electrical blocks' models, which have the necessary level of accuracy. The majority of modern CAD tools applied for mechanical system simulation use the finite element method to build a mathematical model. In this case, the development of an algorithm to obtain non-electrical object models in the form of equivalent electrical circuits to be applied in schematic design software on the basis of the existent tools of building up mathematical model is actual.

II. Main Part

The first stage to build a model is receiving its finite-element model. For this, it is possible to use the existing software, e.g. ANSYS Multiphysics. For this software, by the help of mor4ansys program it is possible to get full-size matrices describing the system state from ANSYS project files. Using the received matrices, it is possible to move to the equivalent circuit. If necessary, the equivalent electrical circuit received can be reduced by means of the Y-Δ transformation.

Let's consider the method in question by an example of the microaccelerometer. The calculation of its eigenfrequencies is done by a finite element method using ANSYS Multiphysics v10.0 tool. The first four eigenfrequencies are defined (see Table 1, 'Source circuit' column).

The matrices got from ANSYS have been used to create an equivalent electrical circuit in NetALLTED input language. The RLC equivalent electrical circuit obtained has to be reduced by means of the Y-Δ transformation algorithm. The simulation of the reduced circuit has been conducted for the frequency range of 50 kHz – 3.5 MHz. The number of nodes and elements of the source and reduced circuits as well as the reduced circuit's simulation results are presented in Table 1.

III. Conclusion

The proposed method to form circuit realizations of non-electrical object models allows simulation of such devices by means of the circuit design software destined for application in the field of electronics and can be used for receiving non-electrical object models if there is a possibility to receive their mathematical models in the form of finite-element matrices.