



аудитории или с одним преподавателем, то они соединяются ребром. Это эквивалентно запрету одновременного проведения этих занятий. Тогда задача составления расписания представляется как минимизация числа цветов, необходимых для раскраски графа. Каждый цвет соответствует одному периоду расписания.

Таким образом, в результате применения метода отжига осуществлена оптимизация задачи составления расписания учебных занятий кафедры вуза.

Литература

1. Глушань В.М. Метод имитации отжига // Известия ТРТУ, №2 (31), 2003. – С. 158-150
2. Лопатин А.С. Метод отжига [Электронный ресурс] Режим доступа : <http://www.math.spbu.ru/user/gran/sb1/lopatin.pdf> (Дата обращения 22.03.2018)
3. Сусов Р.В. Модели и методы оптимизации бизнес-процессов для повышения эффективности функционирования организации: автореф. дис.... канд. экон наук. – Москва, 2014. – 25 с.

В.М. Матвеев, И.В. Годовицын, Д.А. Ефимов

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

(Научно-производственный комплекс "Технологический центр", г. Зеленоград)

Конечно-элементный метод реализует итерационный подход к решению системы нелинейных уравнений, описывающих модель исследуемого объекта [1,2]. Широкое распространение конечно-элементный метод получил только в последние десятилетия, когда вычислительная мощность компьютеров стала достаточно высокой. Конечно-элементный метод позволяет получить зависимости характеристик чувствительного элемента от конструктивных параметров без существенных материальных и временных затрат [3,4]. Также, несомненным достоинством конечно-элементного моделирования является возможность использования экспериментальных результатов с целью повышения точности расчета.

В основе конечно-элементного анализа лежит разбиение модели объекта на элементы, размер которых значительно меньше самого объекта. Каждый элемент имеет связь с соседними элементами, испытывает воздействие с их стороны и воздействие нагрузки. Для каждого элемента можно составить уравнение равновесия относительно какой-либо физической величины (сила, ускорение, температура, давление и т.д.). Это уравнение будет иметь N неизвестных, где N - количество элементов, на которое разбит объект. Большинство коэффициентов в этом уравнении равны нулю, так как каждый элемент связан не со всеми оставшимися элементами, а только с ближайшими соседями. Вся мо-



дель будет описываться системой из N уравнений с N неизвестными. Данную систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\{K\} \cdot \{X\} = \{B\}, \quad (1)$$

где $\{K\}$ – матрица коэффициентов связи, так называемая "матрица жесткости", $\{X\}$ – вектор неизвестных, $\{B\}$ – вектор граничных условий.

Решение системы уравнений (1) достигается путем умножения вектора граничных условий на матрицу, обратную матрице K :

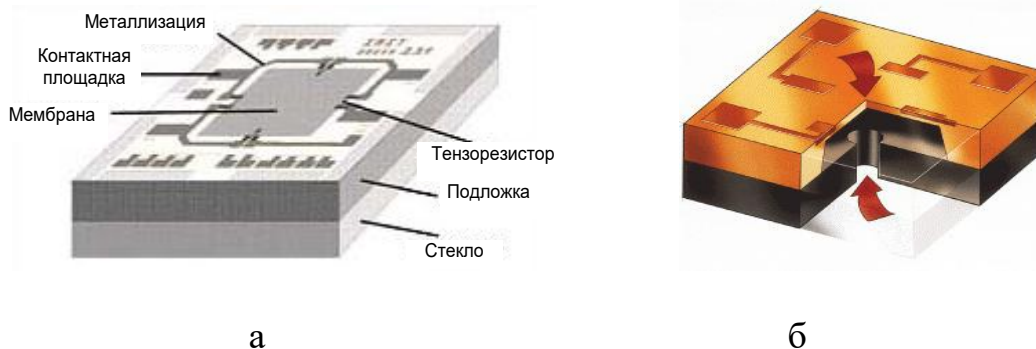
$$\{X\} = \{B\} \cdot \{K\}^{-1}. \quad (2)$$

Недостатком данного метода является большой объем вычислений. По этой причине широкое применение метода конечных элементов началось только с развитием вычислительной техники.

Использование конечно-элементного моделирования в разработке кремниевых преобразователя давления дает существенную экономию временных и материальных ресурсов. Наиболее важной проблемой, которую приходится решать при выполнении моделирования – нахождение баланса между точностью получаемых результатов и временными затратами. Последние напрямую связаны с компьютерными ресурсами, находящимися в распоряжении разработчика. В большинстве случаев эти ресурсы ограничены настольным компьютером офисной конфигурации. Точность расчета прямо пропорциональна количеству элементов модели, поэтому для получения достоверных результатов необходимо увеличение количества элементов до максимально возможного. Однако, увеличение количества элементов приводит к увеличению времени расчета, причем эта зависимость имеет нелинейный, близкий к экспоненциальному характер. Для получения удовлетворительной точности результатов за приемлемое время необходима оптимизация процесса конечно-элементного моделирования, то есть создание модели, имеющей наименьшее количество элементов и обеспечивающую удовлетворительную точность расчета.

Структура кремниевого преобразователя давления имеет ряд существенных особенностей, обусловленных как характеристиками используемых материалов, так и технологическими подходами, применяемыми при изготовлении [5,6]. С точки зрения конструкции, структура кремниевого преобразователя давления имеет те же элементы, что и предшествовавшие не кремниевые (металлические) преобразователи давления (рисунок 1) – мембрана, рамка, тензорезисторы, токоведущие дорожки и др.

Наиболее эффективным подходом, используемым для уменьшения размера модели кремниевого преобразователя давления, является использование симметрии преобразователя. Как правило, структура преобразователя симметрична как минимум, по одной плоскости, а в большинстве случаев, по двум. Использование симметрии позволяет проводить расчет модели не полного преобразователя, а половины или четверти. Тем самым размер модели существенно уменьшается. Влияние отброшенной части модели описывается граничными условиями симметрии. В результате, уменьшается время расчета, что снижает требования к вычислительной мощности вычислительного оборудования.



а

б

а – общий вид;

б – разрез

Рисунок 1 – Структура чувствительного элемента кремниевого преобразователя давления

Другим не менее эффективным подходом, с помощью которого можно уменьшить размер модели преобразователя давления, служит использование элементов различного размера для описания разных компонентов структуры. Разработчика обычно интересуют физические процессы, происходящие в наиболее важных компонентах структуры – для кремниевого преобразователя давления это тензорезисторы. Чтобы получить детальную информацию, необходимо наиболее подробно описать данную область, то есть увеличить количество элементов для этого компонента, уменьшив их размер. Другие компоненты структуры, которые не представляют интереса, могут быть описаны меньшим количеством элементов.

Описанные выше подходы использованы при оптимизации модели кремниевого тензорезистивного преобразователя давления рисунок 2. Модель имеет компоненты с разными характерными размерами – от 1 мкм (тензорезисторы) до 400 мкм (подложка). При использовании для всей модели элемента с размером 1 мкм ее размер будет очень велик и расчет на обычном компьютере окажется невозможен. Поэтому используются оба подхода к уменьшению размера модели – разбиение на части по плоскостям симметрии и применение элементов разного размера для разных компонентов структуры.

Расчет основных характеристик кремниевого преобразователя давления может быть проведен с помощью программы конечно-элементного моделирования ANSYS, которая дает возможность расчета тензорезистивных эффектов с учетом анизотропии тензорезистивных и упругих свойств материала [7]. С помощью программы может быть рассчитана зависимость сопротивления тензорезисторов от давления и температуры и построена выходная характеристика с учетом того, что тензорезисторы объединены в полную мостовую схему, которая может быть использована для расчета метрологических характеристик преобразователя с использованием методик и соотношений, описанных в [8].

Разработанная модель имеет около 30 тыс. элементов. По оценке, расчет одной точки выходной характеристики для на компьютере офисной конфигурации будет занимать 2-3 минуты. Это время является приемлемым, так как позволяет выполнять значительный объем расчетов за относительно небольшой временной промежуток.



5. Данилова Н.Л., Панков В.В., Суханов В.С., Михайлов Ю.А. Интегральный преобразователь давления // Патент РФ №2362132. 2009.
6. Игнатьева Е. В., Михайлов Ю. А. О показателе чувствительности конструкции кремниевых тензопреобразователей давления, Датчики и системы. 2008. №10, С. 35 –38.
7. Официальный сайт компании ANSYS [электронный ресурс] ULD: www.ansys.com (дата обращения: 01.12.2017).
8. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи, М., Энергоатомиздат, 1983., 136 с.

О.И. Малыхина

АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕТОДА МНОГОКРАТНОГО ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ

(Самарский университет)

Несмотря на существование большого числа пакетов программ для математических вычислений, которые могут применяться для проведения различных расчетов при решении широкого класса инженерных задач, популярность математического пакета MathCad остается на стабильно высоком уровне. Это объясняется как ее широким распространением, так и удобством, а также интуитивно понятными принципами работы в данной программе. Время, которое необходимо затратить на ее освоение оказывается минимальным, что определяет весьма широкий круг инженерных работников, знакомых с данной программой. Указанные обстоятельства определяют тот факт, что программы, написанные в MathCad играют роль языка общения, способного передавать не только математические формулы, которые необходимы для проведения тех или иных расчетов, но и алгоритмы, содержащие логику практической реализации автоматизированного решения сложных инженерных задач. Это весьма важно, так как зачастую позволяет в значительной степени сэкономить время на разработку алгоритмов и расчетных программ, что является неотъемлемой частью работы современного инженера-расчетчика. При этом программы, написанные в MathCad, четко демонстрируют логическую структуру алгоритма и, при необходимости, могут быть с легкостью переработаны в программы, написанные средствами любого другого математического пакета или языка программирования.

С учетом указанных особенностей программы MathCad построена книга [1], в которой приведены алгоритмы и программы, которые могут быть использованы при проведении расчетов для решения конкретных практических задач. Одной из задач, рассмотренных в указанной книге, является задача расчета форм и частот колебаний балок с переменными по длине массовыми и жесткостными характеристиками. Авторы приводят оригинальный способ решения данной задачи с использованием многократного решения задачи Коши, однако