

УДК 531.781.2

С.В. КОВАЛЮХ, В.В. ШЕВЕЛЬ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ДАТЧИКОВ СИЛЫ

Предложена система алгоритмов автоматизации проектирования тензорезисторных датчиков силы (ТДС), перспективность применения которой продемонстрирована на примере разработки программного комплекса, использующего возможности популярных пакетов SolidWorks™ и COSMOSWorks™. Разработанная система алгоритмов базируется на исследовании мирового опыта и современных методов проектирования ТДС.

автоматизация, проектирование, тензодатчики, алгоритмизация, SolidWorks, COSMOSWorks

Множество фирм во всем мире занимается разработкой и внедрением оборудования, основанного на использовании тензорезисторных датчиков силы (ТДС), что находит отражение в количестве патентов, созданных за более чем полувековую историю их применения. В аэрокосмической технике спектр задач, решаемый с использованием таких преобразователей, охватывает проблемы измерения силы, веса, давления, крутящего и изгибающего момента, ускорения. Проектирование ТДС отличается значительной трудоемкостью, требует ощутимых временных затрат, однако и по сей день практически не автоматизировано.

Анализ проведенных исследований [1, 2, 3, 5] показал, что в настоящее время широко автоматизировано только лишь определение характеристики преобразования датчика заданной конфигурации, что существенно облегчает проведение поверочного расчета ТДС. В то же время проектировочный расчет, состоящий в определении оптимальных геометрических параметров упругого элемента (УЭ), точек наклейки, ориентации и схемы включения тензорезисторов, полностью возлагается на конструктора. Такая ситуация в отрасли приводит к необоснованной потере времени и материальных средств, что в условиях рынка и жесткой конкуренции неприемлемо. Задача автоматизации проектирования ТДС на данном этапе развития

электротензометрии актуальна и требует решения.

Целью данной работы является исследование возможности автоматизации проектирования ТДС.

Вследствие коммерческой направленности разработки ТДС в настоящий момент не существует однозначного руководства по их проектированию. Методики проектирования представляют «know-how» фирм производителей и держатся ими в секрете. Однако существуют некоторые общие рекомендации, которые должны быть учтены в процессе проектирования ТДС. В частности, при проектировании ТДС необходимо:

1. Подобрать материал УЭ таким образом, чтобы его свойства обеспечили линейность и стабильность характеристики преобразований, т.е. однозначность и повторяемость деформаций. Для удовлетворения этих требований материал должен обладать хорошими упругими свойствами, высокой прочностью, минимальным гистерезисом и постоянством модуля упругости. Согласно опытным данным, высокая точность измерений достигается при максимальной величине нормального напряжения, ограниченной 30...60% предела текучести, что для специальных сортов стали составляет $(0,3 - 1,0) \cdot 10^3$ МПа [5].

2. Выбрать оптимальную форму и размеры УЭ, так как от этого зависят чувствительность ТДС и

равномерность распределения напряжения по сечению:

а) с точки зрения чувствительности геометрия УЭ должна быть такой, чтобы на нем имелись поверхности, деформируемые с разными знаками, а размеры сечения позволяли вызывать значительные деформации для получения достаточно мощных сигналов на выходе мостовой схемы при допустимом гистерезисе [5];

б) если разрабатываемый датчик предназначен для исследования динамических процессов, необходимо обратить внимание на рабочий диапазон частот, который зависит от конструкции УЭ и его массы. Для неискаженного преобразования переменных величин необходимо, чтобы частота собственных колебаний УЭ по меньшей мере в 5 раз превосходила частоту вынужденных колебаний [2]. Повышение частоты собственных колебаний УЭ, обеспечиваемое увеличением жесткости УЭ, является причиной снижения чувствительности ТДС к измеряемой величине. Поэтому для оценки степени пригодности УЭ для использования их в динамическом режиме ввели понятие о *динамической добротности*, которая определяется как произведение квадрата собственной частоты на относительную деформацию:

$$D = \omega_0^2 \varepsilon . \quad (1)$$

3. Выбрать принципиальную электрическую схему включения тензорезисторов, подобрав определенное соотношение сопротивлений плеч, согласовав сопротивление выхода моста с сопротивлением измерителя и величину питающего мост напряжения. Вопрос рационального выбора измерительной схемы тщательно изучен в специальной литературе [2].

4. Определить расположение точек наклейки и ориентацию тензорезисторов. При наклейке на деталь тензорезистор должен быть ориентирован так,

чтобы его чувствительный элемент (например нити решетки) подвергался максимальному растяжению или сжатию. Тензорезисторы с одинаковыми знаками приращения сопротивлений должны включаться в противоположные плечи моста, а с разными – в смежные плечи [5].

Чувствительность схемы к измеряемому параметру можно повысить путем уменьшения сечения детали (разумеется, с таким расчетом, чтобы не превысить предела упругости материала) или путем применения материала с меньшим модулем упругости, что позволяет при одних и тех же нагрузках сильнее деформировать деталь. Если испытываемая деталь имеет участки с различным сечением, то с точки зрения чувствительности схемы к измеряемому параметру тензорезисторы выгоднее размещать на более тонких участках детали, при этом необходимо, чтобы напряжения в детали в области наклейки были распределены равномерно.

Существует большое разнообразие конструктивных схем УЭ, используемых для тензоизмерителей [3]. К числу наиболее распространенных можно отнести стержневые, балочные, кольцевые, шаровые, мембранные, параллелограммные и т.д. Правильный выбор схемы УЭ является залогом успешного проектирования датчика в целом. Определяющими критериями при выборе той или иной схемы являются требования придать тензоизмерителю определенную форму, обусловленную необходимостью обеспечения сопряжения с узлами оборудования, обеспечить требуемый диапазон и точность измерений, чувствительность к измеряемому параметру.

Анализ перечисленных рекомендаций позволяет определить перечень задач, которые должны быть решены при проектировании ТДС:

1. Определение требуемого диапазона и точности измерений, чувствительности к измеряемому параметру, а также условий работы и конструктив-

ных особенностей УЭ при его сопряжении с узлами оборудования.

2. Выбор конструктивной схемы УЭ.
3. Выбор материала, из которого изготавливается УЭ.
4. Выбор типа используемых тензорезисторов и их параметров.
5. Выбор принципиальной электрической схемы включения тензорезисторов.
6. Определение оптимальных параметров геометрии УЭ для достижения заданного диапазона и точности измерений, а также чувствительности к измеряемому параметру при максимально возможной частоте его собственных колебаний.
7. Определение оптимальных точек наклейки и ориентации тензорезисторов для достижения максимальной для данного УЭ чувствительности.
8. Оценка работоспособности ТДС путем проведения поверочного расчета.

Фирмы-производители ТДС для разработки новых датчиков, как правило, используют одни и те же марки материалов, тензорезисторы и схемы их включения, т.к. освоение новых средств требует дополнительных капитальных вложений, связанных с проведением исследований и поиском поставщиков. Заданный диапазон измерений и чувствительность датчика достигаются при этом посредством изменения геометрических параметров УЭ. Таким образом, задачи 2 – 5, перечисленные выше, имеют общие для большинства ТДС решения, сформированные годами, в то время как решение задач 6, 7 и 8 связано с определением оптимальных параметров, характерных для конкретной конструкции датчика, и оценкой работоспособности ТДС, то есть является наиболее важным.

Поиск оптимальной геометрии УЭ осложняется достаточно противоречивыми требованиями к его конструкции: с одной стороны, необходимо обеспечить требуемую чувствительность датчика, а с другой (во избежание частотных погрешностей при

динамических измерениях) – повысить собственную частоту колебаний УЭ. Противоречие состоит в том, что для повышения собственной частоты необходимо увеличивать жесткость УЭ, в то время как повышение жесткости ведет к уменьшению чувствительности преобразователя.

Для решения такой комплексной задачи применяют искусственные концентраторы напряжений, что позволяет повысить точность измерений, но приводит к увеличению сложности формы УЭ и, как следствие, резко усложняет их расчет. Сложность конструкции современных датчиков требует использования нетривиальных методов расчета.

Отсутствие удовлетворительного теоретического решения задач 6, 7 и 8 требует широкого привлечения экспериментальных методов исследования (макетирование), что приводит к росту трудоемкости работ и увеличению их стоимости. Даже появление компьютерных систем инженерного анализа, позволяющих рассчитать напряженно-деформированное состояние УЭ, лишь частично облегчило разработку ТДС. Решение этих задач является наиболее трудоемким этапом проектирования ТДС, автоматизация которого необходима в первую очередь.

В соответствии с выделенными задачами 1 – 8 предложен следующий подход к автоматизации процесса проектирования ТДС.

Требуемый диапазон и точность измерений, чувствительность к измеряемому параметру, а также условия работы и конструктивные особенности УЭ при его сопряжении с узлами оборудования представляют собой исходные данные для решения задачи проектирования ТДС и содержатся в техническом задании на разрабатываемый датчик.

Выбор конструктивной формы УЭ, его материала, типа используемых тензорезисторов и принципиальной схемы их включения (задачи 2 – 5) в силу своей трудоемкости целесообразно автоматизировать путем применения баз знаний, в которых

хранятся стандартные решения для каждой из этих задач.

Наибольшую сложность представляет автоматизация решения задач 6 и 7, связанных с оптимизацией геометрических параметров УЭ и поиском оптимальных точек наклейки тензорезисторов. Это вызвано необходимостью использования в целевой функции параметров напряженно-деформированного состояния УЭ. Определение последнего зачастую невозможно без применения метода конечного элемента, реализованного в виде специализированных программных средств. Процесс поиска решения в этом случае носит итерационный характер.

Поиск оптимальных геометрических параметров УЭ необходимо производить так, чтобы в результате обеспечить как требуемый диапазон измерений и чувствительность, так и максимальную жесткость УЭ. При этом максимизация жесткости не должна приводить к уменьшению чувствительности преобразователя, т.е. жесткость УЭ должна быть увеличена за счет таких ресурсов, которые не приводят к уменьшению относительных удлинений баз тензорезисторов.

Поиск оптимальных геометрических параметров УЭ состоит в оптимизации геометрии ТДС для получения требуемого уровня сигнала (напряжения или силы тока) на выходе измерительного моста при заданных параметрах тензорезисторов, схемы их включения и известном напряжении или силе тока на входе моста. Поэтому целевая функция оптимизации геометрических параметров может иметь следующий вид:

– при поиске по напряжению

$$f(x) = \left| \frac{U_3 - U(x)}{U_3} \right| \rightarrow \min; \quad (2)$$

– при поиске по силе тока

$$f(x) = \left| \frac{I_3 - I(x)}{I_3} \right| \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $U(x)$ и $I(x)$ – соответственно напряжение и сила тока на выходе моста тензорезисторов, x – варьируемый параметр, U_3 и I_3 – соответственно заданные (требуемые) напряжение и сила тока на выходе моста.

Ввиду сложности определения напряжения (силы тока) на выходе измерительного моста как функции от геометрических параметров УЭ для определения оптимума можно применять итерационную оптимизацию, при которой на каждом шаге поиска осуществляется расчет напряженно-деформированного состояния УЭ и изменения сопротивлений каждого из тензорезисторов. Считается, что решение найдено, если минимум целевой функции в заданном диапазоне значений варьируемого параметра равен нулю с некоторой заданной точностью.

Так как в роли варьируемого параметра выступает параметр геометрии упругого элемента, а его изменение ведет к перераспределению удлинений детали, решение задачи оптимизации можно выполнить двумя способами:

1. Если изменение варьируемого параметра приводит к пропорциональному изменению уровня сигнала на выходе измерительного моста, т.е. множество значений целевой функции (аргументом которой является геометрия УЭ) является упорядоченным, то поиск оптимума целесообразно осуществлять методом бинарного поиска [4].

2. Если изменение варьируемого параметра не приводит к пропорциональному изменению уровня сигнала на выходе измерительного моста, то для поиска оптимума можно применить метод полного перебора.

Возможность поиска оптимума методом бинарного поиска существенно увеличивает производительность и ускоряет решение задачи поиска оптимальной геометрии упругого элемента.

Поиск оптимального расположения тензорезисторов можно осуществлять путем привязки их баз к

конечноэлементной сетке модели УЭ. Не составляет труда при построении сетки в предполагаемой области поиска точки наклейки задать такой размер конечного элемента, при котором размеры базы тензорезистора были бы кратны расстоянию между двумя соседними узлами сетки (рис. 1). В этом случае оптимальная точка наклейки тензорезистора в области поиска – это точка, при наклейке в которой тензорезистора его изменение сопротивления будет максимальным для выбранной области. Изменение сопротивления тензорезистора в данном случае целесообразно определять через удлинение каждого из конечных элементов, попадающих в область, ограниченную базой тензорезистора. На рис. 1 приведена сетка конечных элементов в области поиска оптимальной точки наклейки. Элементы с большим относительным удлинением выделены оттенками серого цвета.

Такой подход определения оптимальных точек наклейки тензорезисторов позволяет легко управлять точностью путем изменения размеров конечного элемента в области поиска. Кроме того, данный метод не зависит от характера поверхности, на которую наклеивается тензорезистор, и пригоден как для плоских, так и для цилиндрических поверхностей.

Очень важно в процессе проектирования произвести корректную оценку работоспособности полученного ТДС (задача 8). Работоспособность датчика можно подтвердить путем анализа напряженно-деформированного состояния УЭ и частотного анализа.

Датчик считается работоспособным в следующих случаях:

1. Уровень сигнала на выходе моста тензорезисторов соответствует с заданной точностью требуемому напряжению. Проверка этого условия осуществляется путем расчета напряженно-деформированного состояния УЭ и определения

изменения сопротивлений каждого из тензорезисторов. Полученное значение напряжения (силы тока) на выходе измерительного моста сравнивается с заданным значением этого параметра.

2. Напряжения в детали УЭ не превышают предела текучести для выбранного материала, что контролируется посредством сравнения известного значения предела текучести с определяемыми методом полного перебора экстремальными напряжениями в элементах и узлах конечно-элементной модели УЭ.

3. Удлинения баз тензорезисторов не превышают максимально допустимые для выбранного типа тензорезисторов, что контролируется посредством сравнения известного значения допустимого удлинения с фактическим значением, определяемым методом суммирования удлинений элементов модели в области, ограниченной базой тензорезистора (см. рис. 1).

4. Если разработанный датчик предназначен для исследования динамических процессов, необходимо осуществить оценку работоспособности по рабочему диапазону частот. При этом, во-первых, собственная частота УЭ должна по меньшей мере в 5 раз превышать частоту вынужденных колебаний, а, во-вторых, динамическая добротность датчика (1) должна быть не ниже заданной. Оценка работоспособности в данном случае можно осуществить путем проведения частотного анализа методом конечного элемента.

Если перечисленные критерии удовлетворены, то датчик считается работоспособным, а процесс проектирования ТДС завершен успешно.

Разработанная система алгоритмов отличается универсальностью и может быть применена для решения различных задач проектирования ТДС, связанных с расчетом как стандартных конструктивных схем, так и датчиков более сложной конфигурации, широко применяемых в аэрокосмической технике.

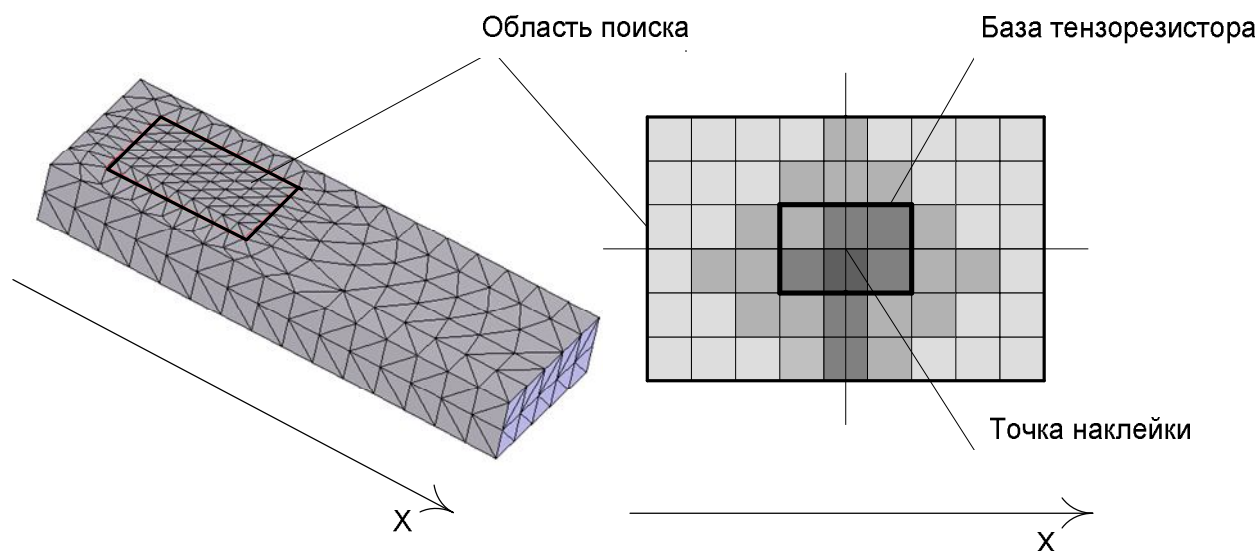


Рис. 1. Поиск оптимального положения тензорезисторов

Реализация изложенных алгоритмов может быть осуществлена на базе уже используемых при проектировании систем инженерного анализа, что позволяет сэкономить на приобретении нового программного обеспечения и обучении персонала.

Предложенная система алгоритмов была положена в основу разработки программного комплекса, использующего возможности популярных пакетов SolidWorks™ и COSMOSWorks™. Данный программный комплекс позволяет решить выделенные в ходе текущего исследования задачи проектирования ТДС, существенно сократив материальные затраты и время разработки преобразователя.

Выводы

В результате проведенного исследования сформулированы задачи автоматизации проектирования ТДС, проведена их алгоритмизация и разработано программное обеспечение, тестирование которого подтверждает перспективность выбранного направления исследования.

Литература

1. Буканов Е.Г., Лойцкер Б.Р., Храбровицкая Е.Д. Тензорезисторные датчики силы для автоматизации процессов взвешивания, дозирования и испытания материалов. – М.: ИНИИТЭИ Приборостроения, 1987. – 48 с.
2. Глаговский Б.А., Пивен И.Д. Электротензометры сопротивления. – 2-е изд., перераб. – Л.: «Энергия», 1972. – 112 с.
3. Годзиковский В.А. Упругие элементы тензорезисторных датчиков силы. – М.: ИНИИТЭИ Приборостроения, 1976. – 56 с.
4. Кнут, Дональд, Эрвин. Искусство программирования. Учеб. пособие: Пер. с англ.: – М.: Издат. дом «Вильямс», 2000. – Т. 3. Сортировка и поиск, 2-е изд. – 832 с.
5. Шушкевич В.А. Основы электротензометрии. – Минск.: Вышэйш. шк., 1975. – 351 с.

Поступила в редакцию 22.04.04

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Г. Сухоребрый, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков