

Спосіб розташування сенсорів також має значення – вертикально розташовані сенсори демонструють кращі результати, ніж аналогічні, розташовані горизонтально. Також виявлено, що сенсори з поєднаними приймачем та передавачем ефективніші за сенсори з тими самими параметрами, але з відстанню між приймачем та передавачем.

Література

1. Рябченко В.В., Дацун Н.Н. Программно-аппаратный комплекс управления роботами-манипуляторами фирмы Neuronics AG // Материалы 4-й международной научно-технической конференции "Моделирование и компьютерная графика – 2011". Донецк, 5-8 октября 2011 г. С. 295 – 299
2. Taghirad H.D., Bélanger P.R. Modeling and parameter identification of Harmonic Drive systems // Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control. – 22 p. [электронный ресурс].

УДК 539.3:534.1

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН ИЗ ЭЛЕКТРОВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

Е. В. Савченко

Черниговский государственный технологический университет, Украина

Введение. Рассматривается методика проектирования оптимальных композитных пластин из электровязкоупругих материалов. Предполагается, что пластины состоят из эквидистантных слоев вязкоупругих и электровязкоупругих материалов, соединенных без проскальзывания. Оптимальная конструкция многослойной пластины получена путем соответствующей компоновки слоев из материалов с различными свойствами для обеспечения заданных макрохарактеристик, в частности, высоких демпфирующих свойств, максимальных скоростей затухания колебаний, минимальных значений амплитуд колебаний, что, в конечном счете, определяет необходимые эксплуатационные характеристики и ресурс изделия, содержащего пластинчатые элементы.

Исследования, посвященные проектированию виброустойчивых тонкостенных конструкций, до недавнего времени развивались в направлении использования пассивных демпфирующих материалов в качестве накладок, вставок, прослоек, композиционных слоев [1]. С начала нынешнего столетия интенсивно изучаются возможности использования материалов со специальными свойствами, так называемых smart-материалов. Применительно к динамике конструкций такими перспективными материалами являются пьезоматериалы, обладающие способностью превращения механической энергии в электрическую и наоборот [2-4]. Использование таких материалов открыло возможности активного управления колебаниями и формой конструкции. Однако при этом увеличилось количество параметров, опреде-

ляющих эффективность конструкции, что потребовало использования адекватных методов оптимизации, отличных от классических, где количество оптимизационных параметров ограничено. Такими методами могут быть поисковые эволюционные методы оптимизации, в частности, генетические алгоритмы [5].

Математическая модель. В настоящей работе получены уравнения колебаний композитных пластин, состоящих из слоев пассивных и активных демпфирующих материалов, и предложена методика синтеза оптимальных структур путем соответствующей компоновки слоев с помощью генетических алгоритмов. Используются уравнения линейной электровязкоупругости. В отличие от опубликованных ранее работ задача колебаний рассматривается в пространстве преобразований Фурье, что позволяет корректно использовать комплексные модули материалов и анализировать нестационарные колебания, возникающие при импульсных электрических и силовых воздействиях. В большинстве опубликованных работ по этой тематике рассматриваются моногармонические колебания, что позволяет ввести комплексные модули во временной области.

Определяющие уравнения получены с использованием вариационного уравнения Лагранжа в свертках [1] с учетом слагаемых, определяющих работу электровязкоупругих элементов. Физические уравнения для материалов слоев принимаются в виде свертков:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{C} * \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{e}^T * \mathbf{E}, \\ \mathbf{E} &= \mathbf{e} * \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{g}^T * \mathbf{E},\end{aligned}\tag{1}$$

где $\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\varepsilon}$ – тензоры напряжений и деформаций соответственно; \mathbf{D}, \mathbf{E} – векторы электрической индукции и напряженности электрического поля соответственно; $\mathbf{C}, \mathbf{e}, \mathbf{g}$ – комплексные матрицы вязкоупругих, электро-вязкоупругих и диэлектрических модулей соответственно.

Для получения разрешающих уравнений используются зависимости Коши между деформациями и перемещениями, зависимости для векторов напряженности электрического поля и электрической индукции [2]:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}, \quad \mathbf{E} = -grad\varphi, \quad div\mathbf{D} = \mathbf{0},\tag{2}$$

где \mathbf{A} – матрица дифференциальных операторов; φ – потенциал электрического поля; \mathbf{u} – вектор перемещений.

Целесообразно, следуя предложению авторов монографии [2], использовать обобщенный вектор перемещений, включающий потенциал φ ,

$$\mathbf{u} = [u \quad v \quad w \quad \varphi]^T,$$

соответствующие обобщенные векторы напряжений $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$, деформаций $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ и матрицу $\bar{\mathbf{C}}$, объединяющую комплексные матрицы вязкоупругих, электровязкоупругих и диэлектрических модулей.

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \bar{\mathbf{C}} * \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}, \text{ где } \bar{\boldsymbol{\sigma}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\sigma} \\ \mathbf{D} \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{e}^T \\ \mathbf{e} & -\mathbf{g} \end{bmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Введение указанных обобщенных объектов позволяет использовать далее разработанную ранее методику синтеза многослойных пластин и оболочек из пассивных вязкоупругих материалов [1].

В соответствии с методикой на первом этапе рассматривается монослой пластины. Для построения конечно-элементной модели монослоя используется аппроксимация перемещений по толщине (ось z) в виде полиномов Лагранжа, а в двух других направлениях (оси x, y) в виде ортогональных рядов Фурье.

С учётом принятой аппроксимации определяются матрицы динамической жесткости слоёв, глобальные матрицы динамической жесткости пластины, и записывается уравнение колебаний многослойной пластины в свёртках. Для дальнейшего анализа предлагается использовать прямое интегральное преобразование Фурье, после чего получим матричное уравнение относительно изображений обобщенных перемещений [1]. Решение уравнения дает возможность получить амплитуды колебаний и спектр собственных частот пластины. Для перехода во временную область используется обратное быстрое преобразование Фурье.

Полученные декременты, характеризующие демпфирование колебаний, частоты и амплитуды вынужденных колебаний далее используются как целевые функции или ограничения в блоке оптимизации. Программа оптимизации рассматривает комбинации слоев и выбирает наилучшую, удовлетворяющую поставленным условиям оптимальности. Применение методики рассматривается на примере расчета 15-слойной пластины из вязкоупругих и электровязкоупругих материалов.

Методика оптимизации. При проектировании многослойных конструкций можно использовать два пути получения оптимального проекта: модификация материала и модификация конструкции – так называемая топологическая оптимизация. В данной работе рассматривается процесс топологической оптимизации на примере проектирования многослойной пластины со слоями вязкоупругих и электровязкоупругих материалов.

Задача заключается в выборе порядка расположения слоев материалов с заданными параметрами, с целью обеспечения оптимума кри-

терия оптимизации, которым может быть декремент колебаний, первая частота, скорость затухания колебаний и т.п. Задача выбора последовательности слоев с заданными параметрами при наличии большого количества слоев не может быть решена простым перебором. Например, для 15-слойного пакета необходимо рассмотреть более $1,308 \cdot 10^{12}$ вариантов. В связи с этим в последние годы активно развиваются поисковые методы, использующие принципы биологии и генетики. В первую очередь, это генетические алгоритмы [5], основная идея которых состоит в создании популяции индивидов, каждый из которых имеет вид хромосомы, состоящей из генов, которые представляют собой набор наследственных признаков – проектных параметров. Лучший из индивидов выбирается в процессе эволюционного поиска в соответствии с принятой функцией приспособленности. Процесс эволюционного поиска реализуется с использованием операторов, аналогичных биологическим процессам скрещивания, мутации, инверсии. Популяция обновляется с каждым поколением за счет генерации новых индивидов и удаления старых, в результате каждая новая популяция оказывается предпочтительней с точки зрения соответствия требованиям функции приспособленности (целевой функции). Генетические алгоритмы имеют существенные преимущества перед классическими поисковыми методами и позволяют с большой долей вероятности находить глобальные экстремумы.

Для определения оптимальной комбинации материалов слоев конструкции в работе используется классический генетический алгоритм [5]. Варианты построения конструкции кодируются векторами из N элементов, соответствующих слоям конструкции. Каждый из этих элементов содержит значения в диапазоне выбора материала для соответствующего слоя. В примененном в работе генетическом алгоритме рассматривается популяция индивидов – векторов, описывающих конструкцию. Для каждого поколения популяции осуществляется скрещивание набора пар особей, избранных с помощью рулеточного алгоритма, т.е. вероятность выбора некоторого индивида для скрещивания обратно пропорциональна его позиции в рейтинге по значению целевой функции. Для скрещивания используется оператор двухточечного кроссинговера. Кроме того, для некоторых индивидов осуществляется мутация, в случае которой один из генов индивида меняется на новое случайное число в диапазоне. Новая популяция состоит из индивидов, полученных путем скрещивания и мутации, а также части наиболее приспособленных точек предыдущей популяции, т.е. точек с лучшим значением целевой функции. Эта процедура повторяется в течение фиксированного количества поколений до получения оптимального проекта.

Заключення. Показана можливість застосування методики кінцево-елементного синтезу багаторівневих конструкцій в просторі перетворень Фур'є для аналізу нестационарних коливань, визначення динамічних характеристик і синтезу оптимальних конструкцій із в'язкоупругих і електров'язкоупругих матеріалів. Розглянуто приклад проектування оптимальної багаторівневої пластини із в'язкоупругих і електров'язкоупругих матеріалів.

Література

1. Савченко Е. В. Пасивне демпфування коливань композитних конструкцій: монографія / Е. В. Савченко. – Нежин : Аспект-Поліграф, 2006. – 232 с.
2. Шульга Н. А. Колебания пьезоэлектрических тел / Н. А. Шульга, А. М. Болкисев. – Киев : Наукова думка, 1990. – 227 с.
3. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость / В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко, Н. А. Шульга, отв. ред. А. Н. Гузь. – АН УССР, Ин-т механики. – Киев : Наукова думка, 1989. – 280 с.
4. Термомеханическая связанная теория гармонических колебаний слоистых оболочек с физически нелинейными неупругими слоями и распределенными пьезоэлектрическими включениями для контроля колебаний / В. Г. Карнаухов, В. И. Козлов, Я. О. Жук, Т. В. Карнаухова // Математические методы и физико-механические поля, 2001. – 44. – № 4. – С.113-122.
5. Савченко О. В. Метод пошуку глобального екстремуму в задачах оптимізації конструкцій з композиційних матеріалів / О. В. Савченко, І. О. Савченко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів : ЧДТУ, 2009. – № 36. – С. 72-81.

УДК 531.36:62-752+62-755

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ОБЕРТОВОГО НЕСУЧОГО ТІЛА З ДВОХМ'ЯТНИКОВИМ АВТОБАЛАНСИРОМ

І.І. Філімоніхіна

Кіровоградський національний технічний університет, Україна

Процес усунення (чи збільшення) пасивними демпферами кута нутації космічних апаратів (КА), положення яких у просторі стабілізується обертанням, досліджується у рамках оберткових ізольованих механічних систем (ІС), складених з оберткового несучого тіла (НТ) і приєднаних до нього тіл, відносним рухам яких перешкоджають сили в'язкого опору. З часом рух таких ІС встановлюється і вони починають обертатися як одне ціле навколо осі, на якій лежить незмінний вектор кінетичного моменту системи. На основних усталених рухах НТ обертається навколо подовжньої осі, а на побічних – ні. Оскільки на практиці будуть здійснюватися тільки стійкі рухи, то дослідження таких систем зводиться до виділення всіх усталених рухів і дослідження їх