

одномерные особенности характерны, если межатомное взаимодействие в цепочке превышает взаимодействие атомов цепочки с атомами кристалла-матрицы в  $2\div 3$  раза. На локальных плотностях состояний атома цепочки переход к одномерному поведению носит характер излома. То есть, подобен первой ван хововской особенности, которая в аналогичной *периодической* структуре, соответствовала бы переходу от замкнутых изочастотных поверхностей к открытым (квазиплоским). В случае адсорбированной на поверхности цепочки (более интересном с прикладной точки зрения) только высокие значения ее изгибной жесткости могут обеспечить динамическую устойчивость. Иначе среднеквадратичные амплитуды ее поперечных (изгибных) колебаний чрезвычайно быстро растут с температурой.

Для случая цепочки, образованной примесями замещения в поверхностном слое, определены геометрические параметры и соотношения межатомных взаимодействий, соответствующие проявлению в фоновом спектре системы одномерных особенностей при сохранении ее динамической устойчивости.

Проанализировано поведение низкотемпературной теплоемкости и среднеквадратичных амплитуд атомных смещений для линейных цепочек, внедренных в объем или адсорбированных на поверхность кристалла. Показано качественное отклонение поведения теплоемкости таких цепочек от предложенной в [2] модели «безактивационного» поведения фонового спектра таких структур.

Кроме того, в работе проанализировано поведение фоновых спектров графеновых моно- и бислоев, адсорбированных на различные подложки, а также свободных би- и триграфена. Особое внимание уделено динамической устойчивости таких систем, в частности, проанализированы квантовые поправки в классическую теорию [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bagatskii M.I., Sumarokov V.V., Dolbin A.V., *LowTemp. Phys.* 2011. – v.37. – P.424.
2. Šiber A., *Phys. Rev.* – 2002. – В 66. – 235414.
3. Ландау Л.Д., ЖЭТФ – 1937. – v.7. – P. 627.

### **ВИМУШЕНІ НЕЛІНІЙНІ КОЛИВАННЯ ПАКЕТУ ТУРБІННИХ ЛОПАТОК ІЗ ДИНАМІЧНИМ КОНТАКТОМ У РОЗ'ЄМНОМУ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОМУ БАНДАЖУ**

*\*Грицан С.О., Ларін О.О.*

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

Підвищені рівні вібрацій – найпоширеніша причина відмов і поломок, що відбуваються при експлуатації парових турбін. Найбільш динамічно навантаженим елементом при цьому є лопатковий апарат циліндра низького тиску. Внаслідок конструкційних особливостей (велика довжина, складний профіль змінного перерізу та значний кут

попередньої закрутки) лопаткам властива велика згинально–крутильна податливість, що може призвести до небажаних рівнів вібрацій.

У турбобудуванні з метою збільшення жорсткості лопаткового апарату останніх ступенів застосовуються міжлопаткові зв'язки, які являють собою роз'ємні з'єднання. Міцнісні та вібраційні характеристики таких апаратів суттєво залежать від особливостей контактної взаємодії в з'єднаннях, а при дії нестационарних навантажень у системі відбуваються нелінійні коливання. В попередніх дослідженнях [1] вимушених коливань пакетів лопаток не враховувалася наявність статичного навантаження, в результаті були зроблені висновки щодо можливості зриву контакту. Разом із цим дія статичного поля відцентрових сил призводить до досить щільного замикання в бандажних роз'ємних з'єднаннях, істотно впливаючи на динамічну поведінку системи. Таким чином, прийняття до розгляду статичного попереднього напруженого стану при розрахунках вимушених нелінійних коливань лопаткового апарату становить особливий практичний інтерес, тому що може привести до уточнених результатів і висновків.

Для чисельної симуляції використовувалася тривимірна скінченно-елементна (СЕ) модель пакета із двох робочих лопаток четвертої ступені циліндра низького тиску парової турбіни. Лопатки зв'язані одноярусним цілісно фрезованим роз'ємним бандажем, де контакт відбувається в умовах попереднього технологічного натягу. Впливом диска та хвостовика при моделюванні знехтуване. Вважається, що лопатки в кореневій частині мають жорстке закріплення. Контактна взаємодія в бандажній полиці розглянута з урахуванням сухого тертя (згідно до закону Кулона) та моделювалася скінченними елементами типу «поверхня–поверхня». У дослідженні основну увагу зосереджено на вивченні контактування лопаток у бандажі, так як надійне щільне замикання цих з'єднань є однією з найважливіших умов безпечної та стабільної роботи останніх ступенів лопаткового апарату циліндру низького тиску.

Проведено дослідження нерезонансних нелінійних коливань пакету з двох лопаток при дії гармонічного навантаження від пульсації аеродинамічного потоку, з урахуванням статичного навантаження (постійна частина тиску пари та відцентрова сила внаслідок обертання ротора турбіни).

В рамках чисельної симуляції розроблено наступний алгоритм рішення задачі:

– перший крок розрахунку: квазістатичне виведення системи на стан рівноваги при номінальних значеннях навантажень;

– другий крок розрахунку (аналіз перехідних процесів): увімкнення врахування інерційних ефектів, що призводить до початкової задачі та необхідності задання відповідних початкових умов. Поле початкових переміщень є розв'язком першого кроку розрахунку. Початкові швидкості отримуються автоматично з обчислювального алгоритму, що використовує різницеву схему Ньюмарка. На цьому етапі відбувається прикладання динамічного

навантаження, причому статичні навантаження залишаються незмінними.

Вирішення задачі нестационарних вимушених коливань на другому кроці розрахунків в рамках методу скінченних елементів полягає у знаходженні розв'язків матричних рівнянь руху пакета лопаток:

$$[M]\{\ddot{u}\} + ([D_I] + [D_N(\{\dot{u}\})])\{\dot{u}\} + ([K_I] + [K_N(\{u\})])\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

де  $[M]$  – матриця мас системи;  $[D_I]$ ,  $[K_I]$  – лінійні складові матриць демпфування та жорсткості системи;  $[D_N]$ ,  $[K_N]$  – нелінійні складові матриць, які виникають внаслідок контактної взаємодії у з'єднаннях бандажних полиць;  $\{\dot{u}\}$ ,  $\{u\}$ ,  $\{F(t)\}$  – вектори вузлових прискорень, швидкостей, переміщень та навантажень відповідно. Чисельна симуляція виконана за допомогою програмного комплексу, що використовує безпосереднє інтегрування повної системи диференціальних рівнянь (1) на основі різницевої схеми Ньюмарка, де на кожному часовому кроці розв'язується нелінійна задача контактної взаємодії розширеним методом Лагранжа.

В результаті дослідження виявлено нелінійний ефект суттєвого зміщення стану рівноваги (середнього значення коливань) при дії динамічного навантаження. Складні нелінійні явища [1], які отримуються при нехтуванні статичним напруженим станом, нівелюються: повне розмикання контакту унеможливується, модуляція амплітуди коливань на основній гармоніці відсутня внаслідок нехтовно малого внеску амплітуд супергармонік. Отримані амплітуди нелінійних вимушених коливань менші на 5–10% за амплітуди лінійних вимушених коливань.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ларин А. А. Вынужденные нелинейные колебания турбинных лопаток с динамическим контактом в разъемном бандаже / А. А. Ларин, А. С. Степченко // Вибрації в техніці та технологіях. – Вінниця: Вінницький національний аграрний університет, 2011. – № 3 (63). – С. 18–26.
2. Grytsan S.O. Forced Nonlinear Vibrations of Turbine Blades Package with Pre-Stressed Detachable Shroud / S.O. Grytsan, O.O. Larin // Proceedings of the Fourth International Conference “Nonlinear Dynamics – 2013” (June, 19–22, 2013, Sevastopol). – Kharkiv: «Tochka», 2013. – P. 242–247.

#### МНОГОКОМПОНЕНТНЫЕ СПЛОШНЫЕ СРЕДЫ И ИХ ЧИСЛЕННЫЙ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Дейнека В.С.

Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, Киев

При проектировании, в том числе, при использовании новых материалов, продлении ресурса сложных современных сооружений, создании новых объектов на основе нанотехнологий, решении проблем рационального природополь-

зования, экологии, решении проблем энергетики и др. достаточно эффективными являются современные информационные технологии (ИТ), обладающие свойствами самонастраивания на исследуемый объект.

Проблемную часть предметно ориентированных ИТ составляют программно-алгоритмические средства анализа процессов: механического деформирования, формирования температурных полей в многокомпонентных сооружениях, миграции солей в пористых неоднородных структурах, а также уточнения параметров в составляющих таких тел и определения параметров моделей, описывающих эти процессы.

На протяжении последних десятилетий построены новые математические модели процессов в составных сплошных средах как новые классы математических задач с разрывными решениями [1]. Исследованы вопросы оптимального управления состояниями многих многокомпонентных распределенных систем с квадратичными функционалами качеств [2]. Путем использования классов разрывных функций метода конечных элементов для широкого множества классов математических задач в частных производных, задач на собственные значения построены вычислительные алгоритмы повышенного порядка точности их численной дискретизации, в том числе задач Неймана и типа Неймана с разрывными решениями, которые по точности не хуже аналогичных известных для соответствующих классов задач с гладкими решениями [1].

Получены значения оптимальных параметров некоторых градиентных методов для решения дискретных неравенств дискретных аналогов задач со свободными поверхностями

На основе полученных результатов по теории оптимального управления построены явные выражения градиентов функционалов-невязок для идентификации (решения линейных и нелинейных обратных задач) градиентными методами различных параметров в различных многокомпонентных распределенных системах: задачи теплопроводности в многокомпонентных средах, их механического деформирования, термоупругости, псевдопараболических, гиперболических, псевдогиперболических систем и др. [3]. Полученные результаты распространены на задачи идентификации параметров наноматериалов [4].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Дейнека В.С., Сергиенко И. В. Анализ многокомпонентных распределенных систем и оптимальное управление. – Киев: Наук. думка, 2007. – 703 с.
2. Sergienko I.V., Deineka V.S. Optimal Control of Distributed Systems with Conjugation Conditions. – New York: Kluwer Academic Publishers, 2005. – 400 p.
3. Дейнека В.С. Сергиенко И.В. Системный анализ упругих и термоупругих тел. – Киев: Наук. думка, 2012. – 512 с.
4. Сергиенко И.В., Дейнека В.С. Идентификация градиентными методами параметрических задач