

Лавинский В.И., Назаренко С.А.

## ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Развитие науки и техники в условиях информационной ориентированной на развитие рыночной экономики, интенсификация рабочих процессов в современных конструкциях обуславливают необходимость высокого уровня интеграции наукоемких технологий виртуального моделирования жизненного цикла инновационных изделий (Virtual Product Development)[1–4]. Необходимость комплексного моделирования сложных составных конструкций, создания достоверной цифровой модели прототипов и проведения виртуальных испытаний, приближенных к условиям эксплуатации; внутренняя логика интеграции различных научных дисциплин определяют потребность в создании совершенных конечномерных и континуальных моделей структурно связанных систем, обладающих высоким уровнем адекватности реальным объектам и процессам. При разработке современных объектов техники привлекаются специалисты из различных областей знаний и отраслей промышленности, которые сталкиваются с необходимостью проведения больших объемов расчетных и экспериментальных работ по отработке функционирования многих модификаций изделия в различных эксплуатационных режимах. Это стало возможно благодаря увеличению вычислительной мощности компьютеров, повышению эффективности вычислений (в т.ч. за счет сетевых Internet-технологий, многопроцессорности и параллелизации).

Стремительное развитие CAD/CAM/CAE/CIM/CNC/PDF/PLM систем является общемировой тенденцией, что особенно проявляется на крупных предприятиях, использующих наукоемкие технологии: авиа-, авто-, нефтегазовая промышленность и т.д. Жизненный цикл изделия определяется четырьмя основными этапами: проектированием, подготовкой производства, изготовлением и эксплуатацией. Все этапы взаимосвязаны и находятся в единой системе. На первых трех этапах формируется потенциальный уровень протяженности жизненного цикла. Проблема повышения надежности и эффективности использования новой техники связана с решением проблем прогнозирования и диагностики фактического технического состояния при изготовлении, эксплуатации, поступлении в ремонт и после ремонта.

Современные машины (технические объекты) создаются и функционируют как комбинация множества взаимодействующих между собой и с внешней средой конструктивных элементов. Задачу анализа характеристик качества технических объектов  $J = J(h, y)$  можно записать в общем виде  $A(y, h, t) = 0$ , где  $A$  – уравнения состояния в операторной форме, характеризующие математические связи между заданными  $h$  и искомыми  $y$  физическими величинами,  $t$  – время. Структуру уравнений определяет тип исследуемого процесса, состав системы, граничные условия, нагрузки и условия сопряжения. Вектор (функция)  $y$  переменных состояния, образующих пространство решений, может определять перемещения, температуры, потенциалы электрического поля и другое, под вектором (функцией)  $h$  варьируемых и детерминированных параметров понимаются характеристики физико-механических свойств материалов, присоединенных масс и жесткостей, геометрические размеры и другое. Реальные эксплуатационные режимы моделируются нагрузками, которые зависят от характера взаимодействия объекта с окружающей средой (газом, жидкостью) или с внешним полем (темпе-

ратурное, электромагнитное), а также от возможного контакта с другими элементами в структуре объекта.

Возможности классических методов, базирующихся на решении системы уравнений в частных производных, определяющих краевые задачи математической физики, весьма ограничены. Краевая задача может быть приведена к вариационной форме. Вариационные методы приводят к матричной алгебраической проблеме и служат удобной основой для построения теоретически обоснованных расчетных схем. Задачи теории поля (теплопроводность, гидромеханика, расчет электрических или магнитных полей и т.д.) сводятся к системе уравнений, аналогичной соотношениям метода конечных элементов (МКЭ) для задач механики деформируемого твердого тела, являющегося наиболее мощным, универсальным и распространенным методом расчета.

Цель настоящего исследования заключалась в разработке на единой комплексной научно-методологической базе основных конечно-элементных моделей для некоторых объектов новой техники в условиях действия физических полей различной природы. Основное внимание уделялось оценкам влияния степени специфической связанности в системе на получаемые решения при достаточно больших размерностях векторов переменных. Кроме этого, при выполнении процессов анализа с использованием повторяемых и отлаженных этапов, наиболее полно приближенных к реальным условиям работы объекта, была предпринята попытка свести различные по физической природе процессы к единой унифицированной схеме моделирования на разных этапах жизненного цикла.

С точки зрения формальной логики все многообразие расчетных технологий жизненного цикла инновационных изделий удобно классифицировать следующим образом. Рассмотрим вначале двухуровневые модели физических явлений с учетом их взаимного влияния друг на друга, которые являются комбинацией различных по физической природе процессов и, как следствие, расчетных схем взаимодействия. Введем следующие виды степеней связности структурных элементов системы:

– последовательная (при одностороннем действии)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{22}(\bar{y}_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2(\bar{y}_1) \end{Bmatrix}; \quad (1)$$

– сильная (полная)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

– слабая с учетом обратных связей (при двустороннем взаимодействии)

$$\begin{bmatrix} K_{11}(\bar{y}_2) & 0 \\ 0 & K_{22}(\bar{y}_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{F}_1(\bar{y}_2) \\ \bar{F}_2(\bar{y}_1) \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где  $K_{11}$ ,  $K_{21}$ ,  $K_{22}$  – обобщенные матрицы жесткости;  $\bar{y}_1$  и  $\bar{y}_2$  – обобщенные вектора узловых переменных,  $\bar{F}_1$  и  $\bar{F}_2$  – обобщенные вектора нагрузок.

Основная идея применения данного математического обобщения, реализуемого в едином информационном пространстве жизненного цикла инновационных изделий,

заклучена в підвищенні точності результатів, мінімізації затрат часу на підготовку моделі і трансляції проміжних даних. Розбиення на підпункти носить умовний методологічний зміст, оскільки фізичний процес може мати комплексний і взаємодіючий характер. Моделювання структурними рівняннями може включати велике число методів з різних областей.

Основним відмінням моделей з послідовною (слабою) ступенню зв'язаності від сильної ступені є відсутність недиагональних блоків в глобальних матрицях  $K_{21}$ . Прикладами конструкцій, для яких важливий врахування взаємодії фізичних полів різної природи (2) з сильною ступенню зв'язності, є п'єзоелектричні пристрої акустичної електроніки. Відміння польових рівнянь п'єзоелектричних серед від аналогічних рівнянь класичної теорії еластичності обумовлено необхідністю введення додаткових термодинамічних змінних, що характеризують електричний стан середовища. В результаті замість 15 змінних, що описують механічне еластичне поле (зсуви, деформації і напруження), приходимо до 22-х змінних (вектори напруженості і індукції електричного поля, електростатичний потенціал). Початковими співвідношеннями стану для даної задачі будуть рівняння п'єзоелектричного ефекту, що описують електро-механічне перетворення, квазістатичні рівняння Максвелла, рівняння руху елемента середовища; а також геометричні співвідношення Коші.

Основні розв'язуючі рівняння для процесів, що змінюються в часі, можуть бути безпосередньо отримані з узагальненого варіаційного принципу Гамильтона-Остроградського  $\delta \int (\dot{O} - \dot{I} + W) dt = 0$ , де  $T$  – кінетична енергія системи,  $P$  – потенціальна енергія (є найбільш важливою енергетичною характеристикою довільної системи, вираженою через компоненти вибраного простору станів і при необхідності може включати, наприклад, енергію електричної індукції для тривимірного п'єзоелектричного тіла),  $W$  – робота прикладених сил. Після застосування варіаційного принципу і кінцево-елементної дискретизації співвідношення для задачі про власні коливання в матричній формі для п'єзоелемента представляються в вигляді  $K_{yy} \vec{y} + K_{yf} \vec{\phi} - \omega^2 M_{yy} \vec{y} = 0$ ;  $K_{yf}^T \vec{y} + K_{ff} \vec{\phi} = 0$ , де  $K_{yy}; K_{yf}; K_{ff}$  – відповідно матриці жорсткості; п'єзоелектричної зв'язності; електричної проникності,  $M_{yy}$  – матриця мас системи;  $\vec{y}$  і  $\vec{\phi}$  – вектори вузлових зсувів і потенціалів електричного поля в п'єзоелектриці. Відзначимо, що матриці  $K_{yy}; K_{yf}; K_{ff}$  обчислюються одночасно як "загальнена" матриця жорсткості, при цьому в кожному вузлі об'ємного ізопараметричного кінцевого елемента вважаються невідомими три зсуви і потенціал електричного поля.

Для демонстрації розробленого математичного апарату була розглянута задача розрахунку п'єзоелектричного датчика-перетворювача. П'єзokerамічний перетворювач представляє собою куб з матеріалу PZT4 з поляризацією вздовж осі. Електроди розміщені на поверхнях, ортогональних осі поляризації. Розглядалися групи частот коливань, що відповідають як короткозамкнутій ланці, так і розімкнутій. Піделектродна область представляє собою екіпотенціальну поверхню і спеціальним чином не моделюється. Для короткозамкнутій ланці верхній і нижній електроди заземлюються (напруження на електродах дорівнює нулю). Для випадку розімкнутій ланці заземлюється тільки верхній електрод. Випадок короткозамкнутій ланці представляє собою збудження перетворювача прикладеним до електродів потенціалом, а випадок розімкнутій ланці – збудження зарядом. Перетворювач моде-

лировался четвертью куба с приложенными граничными условиями симметрии по поверхностям раздела. Распределение интенсивностей напряжений на соответствующих формах собственных колебаний приведено на рис. 1 и 2. В качестве формы иллюстрации результатов сделана тоновая заливка на поверхности. Светлыми тонами показана зона близких к нулю интенсивностей напряжений, темными – экстремальных.

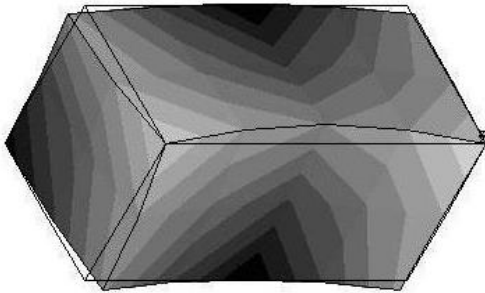


Рисунок 1 – Третья собственная форма.  
Короткозамкнутая цепь

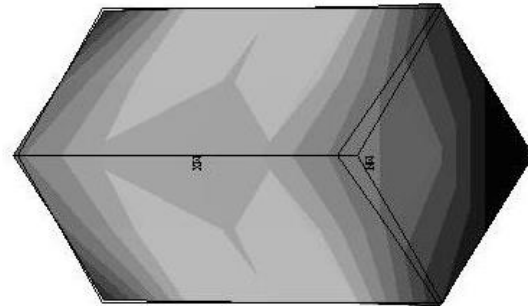


Рисунок 1 – Пятая собственная форма.  
Разомкнутая цепь

Недостатком моделей сильной связанности является увеличение размерности и ширины ленты системы разрешающих уравнений, преимуществом – возможность достижения решения за одну итерацию.

Примерами конструкций, для которых необходим учет воздействия последовательно связанных физических полей различной природы (1), являются колеса турбины, нагруженные тепловым потоком от выхлопных газов цилиндров ДВС. Рассмотрим установившийся режим, когда температурное поле можно считать стационарным. Этот режим устанавливается при достаточно долгом прогреве после включения, постоянной внешней температуре и является основным рабочим режимом. Согласно гипотезе Дюамеля-Неймана обобщенные уравнения состояния приняты в виде тензорно-линейных соотношений:  $\varepsilon_{ij} = A_{ijkl}\sigma_{kl} + \alpha_{ij}T$ , где  $A_{ijkl}$ ,  $\alpha_{ij}$  – компоненты, которыми описываются особенности деформирования и температурного расширения материала,  $T$  – приращение температур, зависящее от координат. После декомпозиции, состоящей в разделении системы (модели) на подсистемы (подмодели) с сохранением структур и принадлежности одних элементов и подсистем другим, задача анализа включает в себя: 1) задачу стационарной теплопроводности  $\Lambda \vec{T} = \vec{Q}$ , где  $\Lambda$  – матрица теплопроводности,  $\vec{Q}$  – вектор обобщенной тепловой нагрузки; 2) задачу термоупругости  $K_{yy}\vec{y}_t = \vec{F}_t$ , где  $\vec{y}_t$  – обобщенный вектор термоупругих перемещений. Решение задачи теплопроводности определяет нагрузки для задачи термоупругости. Температурное нагружение оказывает двойное действие: вызывает дополнительные статические напряжения, связанные с возникновением градиента температур, а также в некотором диапазоне изменяет физико-механические характеристики материала. Совместное решение задачи теплофизики и механики позволяет, с одной стороны, экономить затраты времени (например, за счет генерации единой КЭ сетки), а с другой стороны – более адекватно задавать нагрузки. Анализ проводился с использованием циклической симметрии. Температурные напряжения для колеса турбины ТКР-8.5-ТВ составляют величины порядка 5...7 % напряжений от центробежных сил (рис. 3). Во многих случаях последовательная связь не только эффективнее сильной, но и более удобна, так как имеется возможность выполнять расчеты независимо.

Полная модель колеса турбины связана также с необходимостью решения задач термогазодинамики и колебаний. Задача анализа резонансного состояния колеса турбины в поле центробежных сил и тепловых нагрузок, сводится к матричной проблеме  $[K_{yy} + G(\bar{y}_s) - \lambda M_{yy}] \bar{y}_d = 0$ , где  $G(\bar{y}_s, \bar{u})$  – матрица “геометрической” жесткости (приведенных начальных напряжений), формируемая на решении  $\bar{y}_s$  статической задачи (температура + центробежные силы, рис. 4).

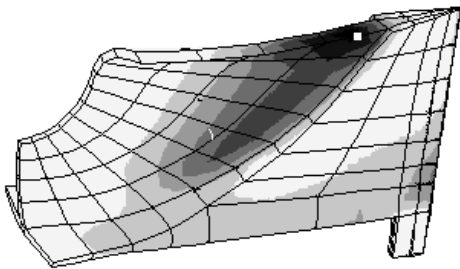


Рисунок 3 – Распределение интенсивностей статических напряжений

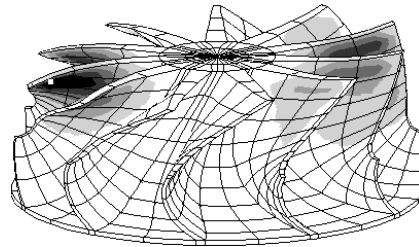


Рисунок 4 – Форма интенсивностей напряжений на 1-ой собственной частоте

Примером конструкций, для которых важен учет воздействия слабосвязанных физических полей различной природы (3), являются резонансные приборы. Особенностью таких задач является учет обратных связей (при двустороннем взаимодействии) и необходимость нескольких итераций при решении нелинейной задачи. Ультразвуковые колебания высокой интенсивности вызывают существенный разогрев системы. Соответствующая связанная нелинейная математическая модель включает стационарные уравнения теплопроводности  $\Lambda \bar{T} = \bar{Q}(\bar{\sigma}(\bar{y}_d))$ ; в которых функция тепловых источников строится по форме резонансных динамических напряжений как доля интенсивности гистерезисных потерь, и уравнения собственных колебаний  $[K_{yy}(\bar{T}) - \omega^2 M_{yy}(\bar{T})] \bar{y}_d = 0$ , включающие зависимость физико-механических характеристик и геометрии элемента  $E = E(T, \bar{x})$ ;  $\rho = \rho(T, \bar{x})$ ;  $\lambda = \lambda(T, \bar{x})$ ; от распределения температуры. При этом выполняются итерации между различными физическими анализами до тех пор, пока не будет достигнут желаемый уровень сходимости. При двустороннем взаимодействии (3) в гидродинамическом анализе необходимо учесть деформации конструктивных элементов и повторить расчет параметров движения среды для новой геометрии. Общая расчетная схема может носить нестационарный характер, при этом временные шаги могут быть различными. Таким методом решаются задачи флаттера несущих поверхностей, вибраций в лопаточных машинах, искусственных сердечных клапанах и т.д.

После сборки, состоящей в преобразовании модели, реализующей поставленную цель из заданных или определяемых подмоделей (структурно связанных и устойчивых), возможно построение многоуровневых иерархических систем. Так в случае излучателя, работающего на большой глубине в жидкости и изготовленного из пьезоактивного материала, для достижения хорошего соответствия математической модели реальному поведению конструкции необходимость учитывать и связь напряженно-деформированного и электрических полей в конструкции:

$$[K_{yy}] \bar{y}_s = \bar{F}_s; \quad \{[K_{yy}] + [G(y_s)] - \omega^2 [M_{yy}]\} \bar{y} + [K_{y\phi}] \bar{\phi} - [R]^T \bar{p} = 0;$$

$$[K_F] \vec{p} - \omega^2 [M_F] \vec{p} - \omega^2 \rho [R] \vec{y} = 0; \quad [K_{\varphi y}] \vec{y} + [K_{\varphi \varphi}] \vec{\varphi} = 0, \quad (4)$$

где  $[M_F]$ ,  $[K_F]$  – матрицы масс и жесткости жидкости или газообразной среды;  $[R]$  – матрица взаимосвязи “давление-перемещение”, определяемая из условия совместности на границе конструкции с жидкостью  $\vec{p}$  – вектор узловых давлений.

Данное исследование позволило провести классификацию задач анализа мультифизических конечноэлементных моделей различной степени связанности, позволяющую построить схему позадачного подхода для декомпозиции комплексной проблемы на ряд отдельных физических задач, и успешно апробировать разработанный математический аппарат на ряде конструкций. Анализ структуры и типов связей между отдельными задачами служит основой схемы и последовательности решения рассматриваемых задач. Использование единой расчетной модели для мультифизического моделирования позволяет минимизировать время, обычно затрачиваемое на подготовку множества расчетных моделей, преобразование и передачу данных от одной расчетной модели в одной системе к другой модели в другой системе. Дальнейшим направлением исследований является применение математического аппарата при исследовании жизненного цикла ряда современных конструкций, а также его развитие на проблемы оптимизации и анализа чувствительности. Применение предложенных технологий позволяет сократить затраты и трудоемкость процессов проектирования, технической подготовки и освоения производства новых изделий; эксплуатации, обслуживания и ремонта изделий.

#### Литература

1. Piegł L.A. Ten challenges in computer-aided design. // Computer-aided design. – 2005. – №37. – p. 461–470.
2. Судов Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. М.: ООО Издательский дом МВМ, 2003. – 264 с.
3. <http://www.cimdata.com/>
4. Лавинский В.И., Назаренко С.А., Анацкий Ю.П. Анализ чувствительности характеристик прочности и жесткости структурно связанных систем. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 38. – с. 77–83.

УДК 539.3

Лавінський В.І., Назаренко С.О.

#### ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ОБ'ЄКТІВ НОВОЇ ТЕХНІКИ

Розглядаються проблемні питання, що виникають при розробці математичних моделей складних конструкцій за наявності дії полів різної природи. Розроблені методи аналізу послідовно зв'язаних, сильно зв'язаних, слабо зв'язаних мультифизичних просторових скінчено-елементних моделей систем. Обґрунтовано використання сукупності методів аналізу при дослідженні життєвого циклу об'єктів нової техніки.