

М.А.ТКАЧУК, докт.техн.наук, НТУ «ХП»;

В.О.РАДЧЕНКО, докт.мед.наук, Інститут патології хребта й суглобів ім. проф. М.І.Ситенка; **Ю.В.ВЕРЕТЕЛЬНИК**, НТУ «ХП»

УЗАГАЛЬНЕНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ ОПИС СКЛАДНИХ БІОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Пропонується узагальнений параметричний підхід до моделювання біомеханічних систем. Описана структура спеціалізованого програмно-апаратного комплексу для моделювання операцій ендопротезування опорно-рухового апарату та хребта, розрахунків міцності та жорсткості протезованих елементів та наслідків операції для вибору оптимальної схеми операції та параметрів ендопротезів.

It is proposed generalized parametrical approach for biomechanical system modelling. Structure of the specialized soft hardware complex for spatial modelling of locomotorium and spine endoprosthesis operations, prosthesis elements strength and rigidity as well as results of prostheses optimal behaviour scheme choice for best operation and prostheses scheme is presented.

1. Суть проблеми

На даний час підвищення ефективності оперативного втручання для ендопротезування опорно-рухового апарату стримується відсутністю засобів передопераційного моделювання самої операції, розрахунків міцності та жорсткості елементів, а також прогнозування поведінки опорно-рухового апарату після операції в реальних умовах життєдіяльності людини. В той же час росте потреба в таких операціях в усьому світі. Це приводить до необхідності розробляти принципово нові схеми операцій. Параметри ендопротезів та схеми оперативного втручання при цьому відпрацьовуються протягом тривалого часу. В той же час при цьому утруднено врахування індивідуальних особливостей пацієнта. Всі ці проблеми може усунути комп'ютерне об'ємне параметричне моделювання, що використовує методи, алгоритми та програмне забезпечення моделювання елементів та систем машинобудівних конструкцій. Ці підходи дозволяють оперувати з об'єктами складної форми, матеріал котрих суттєво неоднорідний, анізотропний та має нелінійності фізико-механічних характеристик.

Таким чином, набутий досвід моделювання та розрахунків складних машинобудівних конструкцій дає змогу створити автоматизовану установку для глибокого та індивідуалізованого моделювання, аналізу та синтезу операцій. В той же час виникає і впливає на перший план проблема опису біомеханічної системи, що утворюється внаслідок оперативного втручання. Дійсно, необхідно в межах єдиного підходу, що на даний час відсутній, описати і геометрію, і фізико-механічні властивості матеріалу, і умови взаємодії елементів суттєво різної природи: механічна складова та біологічні тканини. Це породжує значну наукову проблему, що має насамперед загальнометодологічний характер.

2. Постановка задачі

Розглянемо довільну біомеханічну систему (БМС) S_{BM} . При розв'язанні задач аналізу напружено-деформованого стану (НДС), рухливості, стабільності, травматичності для цієї системи виникає потреба у створенні: 1) математичної моделі (ММ), що досить адекватно описує поведінку БМС; 2) числової моделі (ЧМ), що крім дискретних аналогів величин ММ містить параметри скінченно-елементної моделі та інструменти управління процесом дискретизації; 3) фізичної моделі (ФМ), яка додатково характеризує властивості вимірювальної апаратури, методів досліджень та схем реєстрації. Бажано, щоб усі ці моделі формально можна було записати на основі єдиного методу. Це дасть змогу подолати різнотипність не тільки при описі біологічної та механічної складових, але й різнотипність моделей, що використовуються на різних етапах досліджень.

3. Формалізація задачі

Для опису поведінки біомеханічних систем пропонується розвинути узагальнений параметричний підхід [1-3]. Цей спосіб полягає у тому, що для опису властивостей досліджуваної БМС на всіх етапах моделювання застосовується множина узагальнених параметрів V : $S_{BM} = S_{BM}(V)$, де

$$V = \{P_\alpha\}, \quad \alpha = 1, \dots, N_p. \quad (1)$$

Тут узагальнені параметри (УП) $\{P_\alpha\}$ описують всі значимі параметри як реальної біомеханічної системи, так і її моделей. Як УП можуть виступати числові величини, структура БМС, властивості матеріалів, типи скінченних елементів, варіанти конструктивного виконання ендопротезу.

Такий підхід дає змогу ставити та вирішувати різні типи задач:

1) узагальненого параметричного аналізу, коли досліджуються залежності характеристик H_i БМС від окремих параметрів P_α чи деякої підмножини цих параметрів:

$$H_i = H_i(P_\alpha), \quad (2)$$

2) визначення достовірних параметрів числових чи математичних моделей БМС за результатами експериментальних досліджень:

$$P_\alpha^* = \{P_\alpha : \|u^{N(M)} - u^E\| \leq \varepsilon\}, \quad (3)$$

де індекси N , M , E відносяться до числових, математичних та експериментальних моделей досліджуваної БМС, u – змінна стану (переміщення, деформація, напруження); ε – задана межа невідповідності.

3) визначення індивідуальних параметрів біомеханічної системи (тип ендопротеза, його конструктивна схема, конструктивні параметри) за певними критеріями (міцність, жорсткість, рухливість):

$$P_\alpha^* = \{P_\alpha : Y(N_\alpha) = 0\}. \quad (4)$$

Перевагою запропонованого методу є його нечутливість до типу параметру, складу множини V , а також можливість формально оперувати з P_α як зі

звичайними параметрами у широких межах.

4. Параметричний опис біомеханічної системи

Для визначеності будемо надалі розглядати біомеханічну систему на прикладі системи «хребець-ендопротез-хребець» [4-6]. Як і будь-яка інша БМС, дана біомеханічна система має принципово відмінні складові: біологічні та механічні.

Принципові відмінності складових – на рис. 1.

Принципові відмінності біологічних та механічних складових біомеханічної системи		
Фактори	Біологічні	Механічні
Форма	Задана природою; індивідуальна за параметрами, але топологічно однотипна	Штучно створюється; індивідуальні параметри відшукуються при проектуванні; розміри обмежені; топологія варіюється
Матеріал	Неоднорідний, анізотропний, неваріюємий	Однорідний, ізотропний, варіюється
Комп'ютерне геометричне та скінчено-елементне моделювання	Ускладнене із-за форми та властивостей матеріалу	Не виникає принципових проблем

Рисунок 1

Як відзначалося, досліджувана система S_{BM} може бути розділена на складові за декількома «параметричними» ознаками. Насамперед, досліджувана система S описується множиною параметрів $V = \{P_{Biol}, P_{Surg}, P_{Mech}, P_{Mod}\}$ де P_{Biol} – множина параметрів, що описують параметри **біологічного** об'єкта (у даному випадку – конкретного людського організму); P_{Mech} – множина параметрів, що описують параметри **механічних** складових біомеханічної системи (ендопротез); P_{Surg} – множина параметрів, що описують **схеми оперативних втручань**; P_{Mod} – множина параметрів математичної, геометричної та числової **моделей**, які використовуються для дослідження поведінки біомеханічної системи (наприклад, параметри скінчено-елементної моделі хребець – ендопротез).

Взаємозв'язок параметрів – на рис. 2.

Крім того, параметри можуть бути згруповані за належністю до реально-го об'єкта R , математичної моделі M , числової (N) та експериментальної моделі (E): $V = \{P^R, P^M, P^N, P^E\}$. З точки зору варіюємості множина параметрів залежно від постановки задачі в тому чи іншому випадку розділяється на фіксовані та змінні параметри: $V = \{P_{const}, P_{var}\}$.

Наведені приклади розподілу множини узагальнених параметрів носять не тільки ілюстративний характер. Вони дають змогу наочно продемонструвати можливість створення на базі запропонованого підходу технологій та інструментів для визначення нових схем ендопротезування та індивідуально підібраних ендопротезів.



Рисунок 2

5. Автоматизована система індивідуального проектування ендопротезів

На основі запропонованого підходу пропонується структура автоматизованої системи індивідуалізованого проектування ендопротезів (рис. 3).



Рисунок 3

Дана комп'ютерна система для моделювання хірургічних операцій ендопротезування хребта та дослідження напружено-деформованого стану елементів системи «хребет-ендопротез» дає змогу оптимально підбирати параметри

ендопротезів та схеми хірургічних операцій з урахуванням індивідуальних особливостей пацієнтів.

Для досягнення мети необхідні наступні дослідження:

I. Дослідження геометрії та створення бази даних *параметричних* моделей елементів хребта.

II. Дослідження типів конструкцій *ендопротезів* та створення бази даних їх параметричних моделей.

III. Дослідження, класифікація та створення бази даних *травм (патологій) хребта*.

IV. Розробка *математичної моделі* для параметричного опису поведінки біомеханічної системи «елементи хребта-ендопротез».

V. Розробка *загальної параметричної моделі* біомеханічної системи «елементи хребта-ендопротез».

VI. Розробка *комп'ютерної системи* для моделювання *геометрії* та *напружено-деформованого стану* хребта та ендопротезів.

VII. Дослідження зразків *ендопротезів* методом скінченних елементів та методом голографічної інтерферометрії.

VIII. Розробка *схем хірургічних операцій* з ендопротезування за допомогою розробленої комп'ютерної системи та дослідження результатів у клінічних умовах.

Умовна наочна схема взаємодії етапів – на рис. 4.

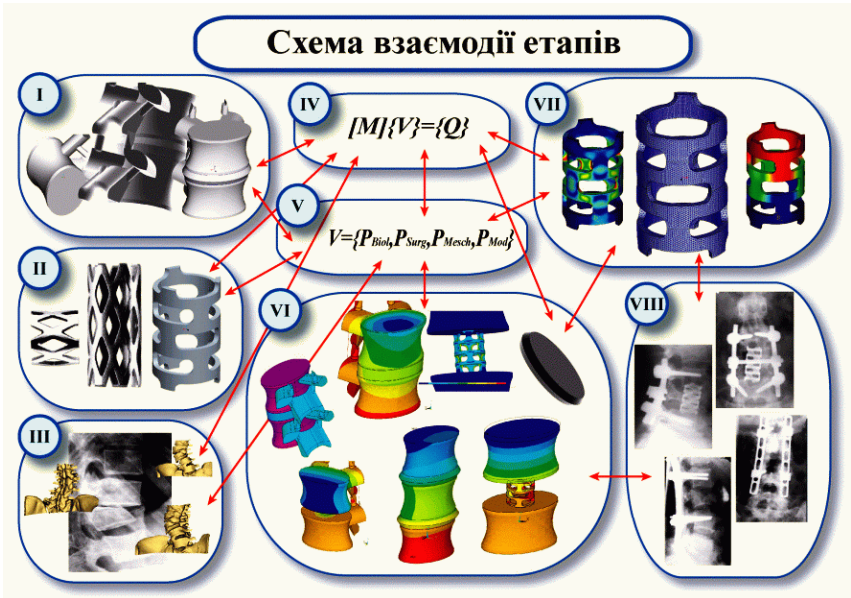


Рисунок 4

Для геометричного моделювання елементів біомеханічних систем пропонується застосовувати CAD-систему Pro/ENGINEER, для скінченно-елементного моделювання – CAE-систему LS-DYNA. Індивідуальні характеристики отримуються за допомогою відповідних рентгенограм та томограм. Експериментальне дослідження виконується на голографічній установці методом голографічної інтерферометрії. База даних та взаємозв'язок даних забезпечуються спеціально створеною програмною оболонкою.

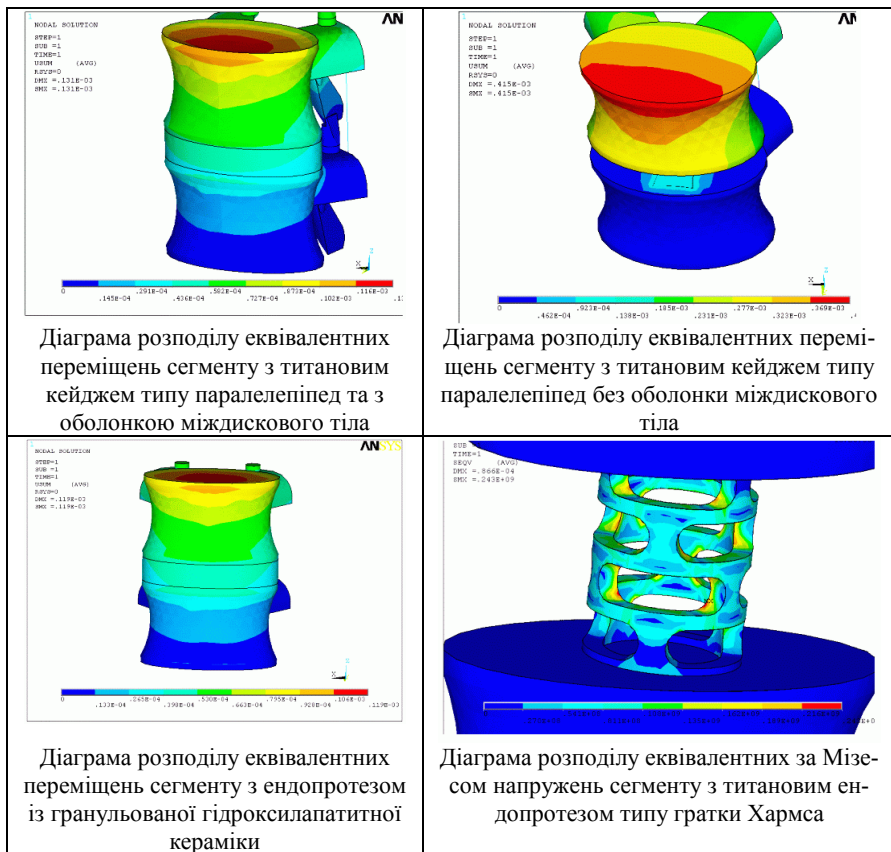


Рисунок 5 – Картини напружено-деформованого стану сегмента хребта

6. Приклади моделювання елементів біомеханічних систем

Модулі та блоки створеної автоматизованої системи були застосовані для визначення напружено-деформованого стану системи «хребець-імплантат-хребець» з різними типами імплантатів: титановий кейдж типу паралелепіпед, блоки та гранульована гідроксилапатитна кераміка (ГАК), тита-

новий ендопротез типу ґратки Хармса. На рис. 5 – приклади результатів проведених розрахунків.

Отримані в результаті багатоваріантних досліджень результати дають змогу обґрунтовано вирішувати весь комплекс задач при моделюванні процесу ендопротезування. Переваги даного підходу полягають ще й у тому, що виникає можливість створення баз даних та знань з параметричного опису поведінки біомеханічних систем досить широкого охопту (рис. 6). Таким чином, розв'язуються задачі як індивідуалізованого спрямування, так і створення узагальнених моделей БМС.



Рисунок 6 – Застосування узагальненого параметричного підходу при моделюванні поведінки біомеханічних систем

7. Напрями подальших досліджень

Запропоновані методи, системи та моделі планується розгорнути у вигляді спеціалізованого програмно-апаратного комплексу, основні складові якого розвиваються в Інституті патології хребта та суглобів ім.проф.Сітенка Академії медичних наук України та Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»). Зокрема, для забезпечення проведення скінченно-елементного моделювання складних біомеханічних систем, що потребує значних обчислювальних ресурсів, використовуються можливості страто-кластера «Політехнік-120», що розгорнений на базі центру «Тензор» НТУ «ХПІ» (<http://tensor.kharkiv.com>, tma@kpi.kharkov.ua).

Список літератури: 1. Ткачук Н.А. Комплексное экспериментальное определение параметров численных моделей элементов механических систем // Механіка та машинобудування.– 2001.– № 1,2. – С.65-69. 2. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск.: «Динаміка і міцність машин». Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2002.– № 10. – С.126-132. 3. Веретельник

Ю.В., Миргородский Ю.Я., Пелешико Е.В., Ткачук Н.А. Параметрические модели элементов сложных систем как основа построения специализированных расчетных систем // Механіка та машинобудування. – 2003. – № 1, т. 2. – С. 3–8. 4. Радченко В.А., Корж Н.А. Практикум по стабилизации грудного и поясничного отделов позвоночника. – Харьков: Прапор, 2004. – 160 с. 5. Костная и металлическая фиксация позвоночника при заболеваниях, травмах и их последствиях / Под ред. Г.Д.Никитин, Н.В.Корнилов, К.Н.Коваленко и др. – С.-П.: Русская графика, 1998. – 442 с. 6. V. Radchenko, Z. Zyman, V. Filippenko, V. Glushko, V. Mezentsev Nonstoichiometric hydroxapatite granules for orthopaedic applications // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2003. – № 1. – С.101-107.

Поступила до редколегії 25.04.2005

УДК 539.3

Н.В.ШИРЯЕВА; К.В.АВРАМОВ, канд.техн.наук, НТУ «ХПИ»

НЕЛИНЕЙНЫЕ ИЗГИБНО-ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ СТЕРЖНЕЙ

Стаття присвячена дослідженню геометрично нелінійних повздожньо-ізгибних коливань стержнів, що обертаються. Стержень моделюється із застосуванням гіпотез Ейлера-Бернулї. Коливання стержня подаються у вигляді ряду по власним формам лінійних коливань нерухомого стержню. У роботі були виведені звичайні диференційні рівняння нелінійних коливань.

Nonlinear axial-bending vibrations of rotating beams are investigated here. Euler-Bernuly hypothesis are used for modeling of a beam. Beam's vibrations are represented in the form of line of natural frequencies nonrotating beam. Ordinary differential equations of nonlinear vibrations are obtained here.

1. Введение

Как показывают экспериментальные исследования лопаток турбомашин и лопастей вертолетов, в таких конструкциях часто наблюдаются геометрически нелинейные колебания с амплитудами, соизмеримыми с толщинами стержней [1]. Линейные колебания закрученных стержней с учетом несовпадения центра тяжести поперечного сечения и центра упругости исследуются в монографии [2]. Одной из первых геометрически нелинейная модель гибких стержней была получена В.А.Светлицким [3]. Колебания вращающихся стержней рассмотрены В.И.Гуляевым [4]. В работе [5] рассмотрены нелинейные колебания балки, нагруженной периодической силой, в условиях комбинированного резонанса. Параметрические колебания стержня с тремя положениями статического равновесия асимптотическими методами исследуются в [6].

В этой статье исследуются геометрически нелинейные продольно-изгибные колебания вращающихся стержней. Колебания стержня представляются в виде ряда по собственным формам линейных колебаний невращающегося стержня. В статье получены обыкновенные дифференциальные уравнения нелинейных колебаний.