

С. О. НАЗАРЕНКО, С. І. МАРУСЕНКО, О. І. ЗІНЧЕНКО

АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ФУНКЦІОНАЛІВ ДИНАМІКИ ТА МІЦНОСТІ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У роботі проведено огляд досліджень у області аналізу чутливості функціоналів динаміки та міцності машинобудівних конструкцій до варіювання параметрів проектування. Умовно методи аналізу чутливості можна розділити на скінченно-різницево наближення градієнта; методи прямого диференціювання і методи введення спряжених змінних. Аналіз чутливості дозволяє ефективно побудувати поліпшену варіацію у системах оптимального автоматизованого і інтерактивного проектування машинобудівних конструкцій; виробляти оперативні оціночні розрахунки великого числа варіантів при коригуванні або ідентифікації їх математичних моделей, стохастичному аналізі характеристик у полі випадкових відхилень властивостей матеріалу і геометричних параметрів при вібродіагностиці і неруйнівному контролі, призначенні полів допусків при виготовленні. У процесі досліджень доцільно використовувати різні методи (або їх поєднання) з деякої доступної їх бази. Наведені приклади реалізованих прикладних інжинірингових розробок і проектування промислових виробів.

Ключові слова: аналіз чутливості, математичне моделювання, комп'ютерна механіка, життєвий цикл, машинобудівні конструкції, оптимізація.

С. А. НАЗАРЕНКО, С. И. МАРУСЕНКО, Е. И. ЗИНЧЕНКО

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В работе проведен обзор исследований в области анализа чувствительности динамических и прочностных характеристик машиностроительных конструкций к варьированию параметров проектирования. Условно методы анализа чувствительности можно разделить на конечно-разностное приближение градиента; методы прямого дифференцирования и методы введения сопряженных переменных. Анализ чувствительности позволяет эффективно построить улучшенную вариацию в системах оптимального автоматизированного и интерактивного проектирования; производит оперативные оценочные расчеты большого числа вариантов машиностроительных конструкций при корректировке или идентификации их математических моделей, стохастическом анализе характеристик в поле случайных отклонений свойств материала и геометрических параметров при вибродиагностике и неразрушающем контроле, назначении полей допусков при изготовлении. В процессе исследований целесообразно использовать в качестве базы различные методы (или их сочетание) из некоторого доступного их множества. Приведены примеры реализованных прикладных инженеринговых разработок и проектирования промышленных изделий.

Ключевые слова: анализ чувствительности, математическое моделирование, компьютерная механика, жизненный цикл, машиностроительные конструкции, оптимизация.

S. NAZARENKO, S. MARUSENKO, O. ZINCHENKO

ANALYSIS OF THE SENSITIVITY OF DYNAMIC AND STRENGTH FUNCTIONALS OF MULTICOMPONENT MACHINE-BUILDING STRUCTURES

In this paper, a review was made of studies in the sensitivity analysis of the dynamic and strength characteristics of machine-building structures to design parameters varying. Derivatives with respect to design variables (sensitivity coefficients) characterize, without modifying the entire model, the direction and speed of changing the target criteria (quality functional) of machine-building structures when the parameters are varied. Conventionally, sensitivity analysis methods can be divided into the finite-difference gradient approximation; methods of direct differentiation and methods for introducing conjugate variables. Sensitivity analysis allows you to effectively build improved variation in systems of optimal automated and interactive design; produce operational estimates of a large number of variants of machine-building structures when adjusting or identifying their mathematical models, stochastic analysis of characteristics in the field of random deviations of material properties and geometrical parameters during vibration diagnostics and non-destructive testing, designation of tolerance fields during manufacturing. In the process of research, it is advisable to use as a base various methods (or their combination) of some available set. Examples of implemented applied engineering developments and design of industrial products are given.

Keywords: sensitivity analysis, mathematical modeling, computer mechanics, life cycle, machine-building structures, optimization.

Вступ. Аналіз чутливості характеристик компонентів машин дозволяє вирішити цілий ряд практичних завдань проектування, доведення, технологічної підготовки виробництва і контролю ефективної експлуатації конструкцій [1–16]. Похідні по проектним змінним (коефіцієнти чутливості) характеризують без модифікації всієї моделі напрямок і швидкість зміни критеріїв мети (функціоналів якості) J машинобудівних конструкцій при варіюванні параметрами проектування u .

У статті [2] представлено огляд існуючих дискретних технологій диференціювання обчислювальних моделей у єдиній математичній структурі. Схеми диференціювання описуються як двоетапний процес: оцінка частинних похідних і обчислення повних похідних, що залежать від частинних похідних. В роботі [4] розрізняють три види технологій: скрінінг (грубе сортування параметрів серед їх великої кіль-

кості на найбільший вплив), заходи значущості (кількісні показники чутливості) і повне дослідження поведінки моделі (вимір впливу вхідних даних на всі варіації функціоналів якості).

Великий теоретичний і практичний інтерес при дослідженні життєвого циклу складних машинобудівних конструкцій представляють проблеми створення математичної моделі, яка адекватно описує масово – інерційні, міцнісні та динамічні характеристики, їх корекцію за результатами експериментів на реальних прототипах при використанні методів аналізу чутливості та кількісної оцінки невизначеності (Verification, Validation), пов'язаної з неточною або неповною інформацією. Невизначеності, справжні і коректовані значення складно структурно пов'язані [11–14].

Аналіз чутливості характеристик машинобудів-

© С. О. Назаренко, С. І. Марусенко, О. І. Зінченко 2019

них конструкцій до варіювання проектних параметрів дозволяє виконувати оперативні оціночні розрахунки великого числа варіантів при коригуванні або ідентифікації їх математичних моделей. Попередній аналіз розподілу похідних дозволяє виділити зони найбільшої чутливості відповідних функціоналів до зміни змінних проектування, внаслідок чого з'являється можливість шляхом зміни мінімального числа проектних змінних підвищити ефективність і швидкість обчислювального процесу [6–10].

Формально у процесі досліджень можна виділити групу уточнюючих моделей та модель, що уточнюється. Побудова картин чутливості характеристик машинобудівних конструкцій до зміни параметрів дозволяє підвищити ефективність подальшої кількісної оцінки невизначеності і калібрування параметрів моделі, включає виявлення як вилучаємих, так і уточнюючих параметрів [11–14].

Аналіз чутливості до зміни приведенного модуля пружності може використовуватися при дослідженні конструкцій, виготовлених з композитних матеріалів, а також при обліку нерівномірності фізико-механічних властивостей, що виникає як при виготовленні (наприклад, перехідні зони між різними матеріалами, що утворилися в результаті зварювання або паяння), так і при експлуатації (наприклад, під впливом градієнта температури, механічного зносу, корозійного деградування, ерозії тощо) [12–16]. Крім того, градієнти функціоналів також можуть застосовуватися при вирішенні нелінійних задач (наприклад, у методі інваріантного занурення).

Умовно методи аналізу чутливості можна розділити на скінченно-різницеve наближення градієнта; методи прямого диференціювання і методи введення спряжених змінних. Відзначимо велику гнучкість застосування та доступність прямого диференціювання, оскільки розрахунок може проводитися незалежно від аналізу чутливості з використанням різноманітних популярних програмних комплексів і скінченно-елементних пакетів [2, 11].

У той же час методи введення спряжених змінних відрізняються більшою чисельною ефективністю, що може компенсувати необхідність модифікації програмного забезпечення. Якщо у постановці задачі кількість проектних змінних значно перевищує число функціоналів, то використання методу, заснованого на введенні спряженої задачі, більш ефективно ніж пряме диференціювання [2, 6–11].

Багато програмних продуктів (NX Nastran, ANSYS Workbench, Abaqus тощо) оснащуються блоками, які реалізують процедури обчислень чутливості до варіювання параметрів (типу «чорної» або «білої скриньки»). У роботах [14, 16] застосовуються технології «сірої скриньки» для визначення залежності характеристик динаміки, міцності та жорсткості варіацій машинобудівних конструкцій від проектних параметрів, причому на основі обмеженої кількості базових розрахунків на основі скінченно-елементного аналізу.

У роботі [12] будуються залежності характеристик конструкцій від конструктивних параметрів моделі у всьому або у виділеному діапазоні варіювання,

а також «експрес – моделі» (обґрунтовано структурно спрощені на підставі різноманітних досліджень) і «експрес – системи» оцінки характеристик окремих елементів машинобудівних конструкцій (у вигляді аналітичних залежностей, таблиць, графіків, програмних модулів або баз даних).

Так як змінні проектування, як правило, входять у коефіцієнти операторів, то рівняння стану щодо варіюваних функцій нелінійні. Математична проблема полягає в тому, щоб проводити дослідження нелінійної задачі аналізу чутливості за допомогою методів, які мають переваги математичних властивостей лінійних операторів стану [6–10].

Досягнення функціонального аналізу і теорії лінійних операторів дали основу для точного математичного аналізу проблеми. Математична теорія показує, що позитивна визначеність (фактично, неухильна еліптичність) операторів є властивістю, яка породжує більшість теоретичних результатів і робить чисельні методи працездатними [8–11]. Однак нерозвиненість теорії і чисельних методів аналізу чутливості для реальних задач проектування, що відрізняються складною просторовою геометрією і необхідністю використання комплексних моделей функціонування конструкції, стримує створення і застосування відповідних програмних засобів.

Результати теоретичних досліджень. Структуру рівнянь стану машинобудівних конструкцій визначає тип досліджуваного процесу, склад системи, граничні умови, навантаження й умови сполучення [5]. Реальні експлуатаційні режими машинобудівних конструкцій моделюються навантаженнями, які залежать від характеру взаємодії з навколишнім середовищем (газом, рідиною) або з зовнішнім полем (температурне, електромагнітне), а також від можливого контакту з іншими елементами у структурі об'єкта.

Перший базовий підхід (скінченно-вимірний) до аналізу чутливості передбачає таку послідовність обчислювальних етапів (на прикладі задачі статики):

1) скінченно-елементна дискретизація задачі аналізу

$$A(\mathbf{u}, \mathbf{y}) = K(\mathbf{u})\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{u}) = \mathbf{0}, \quad (1)$$

де \mathbf{y}, \mathbf{F} – «узагальнені» вектори вузлових переміщень і навантажень;

$K(\mathbf{u})$ – «узагальнена» матриця жорсткості;

\mathbf{u} – вектор змінних параметрів конструкції;

2) введення вектора спряжених змінних $\boldsymbol{\psi}$ при обліку рівності $K^T = K$ і того, що спряжена задача повторює за винятком правої частини структуру задачі статики

$$K^T(\mathbf{u})\boldsymbol{\psi} = K(\mathbf{u})\boldsymbol{\psi} = \mathbf{g} = \nabla_{\mathbf{y}} J \quad (2)$$

дозволяє знайти в вираженні скалярний добуток найбільш економічним чином:

$$\left(\frac{\partial J}{\partial \mathbf{y}}, \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial \mathbf{u}_i} \right) = -\mathbf{y}^T K_{u_i} \boldsymbol{\psi} + \mathbf{F}_{u_i}^T \boldsymbol{\psi}. \quad (3)$$

3) обчислення градієнтів від функціоналів якості машинобудівної конструкції

$$\nabla_u J = \left\{ \left(\frac{\partial J}{\partial \mathbf{y}}, \mathbf{y}'_{u_i} \right) + \frac{\partial J^a}{\partial u_i} = -\frac{\partial H^a}{\partial u_i}, i = \overline{1, n} \right\}, \quad (4)$$

де похідну від гамільтоніану $H = (K(u)\mathbf{y}, \Psi) - J(\mathbf{u}, \mathbf{y})$ беремо лише по явно вхідним змінним параметрам.

У другій базовій методиці спряжені змінні вводяться безпосередньо для варіаційного або диференціального формулювання задачі аналізу

$$a(y, z) = (f, z). \quad (5)$$

Після чого редукція початкової та спряженої задачі (перехід від безперервних змінних до дискретних з одночасним позбавленням від операцій диференціювання і\або інтегрування), а також варіювання функції форми конструкції (введення поняття матеріальної похідної) може виконуватися як три формально незв'язаних етапи. При цьому для деякого фіксованого віртуального переміщення можна взяти варіацію від обох частин рівняння стану:

$$a(y', z) = f'(z) - a'(y, z), \quad (6)$$

де в правій частині штрих ' означає варіацію білінійної форми a і лінійної форми навантаження f по аргументу u , який входить явно. Відзначимо, що y' залежить від значення змінної проектування u , при якій обчислюється варіація, та є функцією незалежної змінної системи координат x і лінійно залежить від δu , представляючи похідну Фреше від змінної стану y по u , обчисленому в напрямку δu . Припускаючи, що y – розв'язок (5), можна сказати, що (6) – варіаційне рівняння з такою ж енергетичною білінійною формою для першої варіації y' .

Перевагою другої методики є те, що для похідних можуть бути отримані явні вирази у термінах фізичних величин, а не в термінах сум похідних від матриць скінченних елементів машинобудівних конструкцій. Скінченно-вимірний і континуальний підходи пов'язані між собою (перший є апроксимацією другого). Після дискретизації геометрії системи і введення набору змінних параметрів проводиться перерахунок функціональних похідних в матеріальні

$$\nabla_t J = \int_{\Omega_i} \frac{\partial H^T}{\partial \mathbf{u}} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} dx, \quad (7)$$

де t_i – варіюваний параметр,

Ω_i – підобласть інтегрування в системі координат x , «що відноситься» до параметру t_i ;

$\mathbf{u}(x)$ – варіювана вектор – функція.

Розглянемо задачу пошуку власних значень машинобудівної конструкції (скінченно-вимірний підхід)

$$[K - \lambda M] \mathbf{y} = \mathbf{0}, \quad (8)$$

Градієнт власного значення у випадку ізольова-

ного простого резонансу має вигляд

$$\lambda'_{u_i} = \mathbf{y}^T [K' - \lambda M'] \mathbf{y} / \mathbf{y}^T M \mathbf{y}. \quad (9)$$

Як видно, із співвідношень аналізу чутливості власних частот або характеристик напружено-деформованого стану (НДС) машинобудівних конструкцій до варіювання параметрів обчислення похідних від критерію оптимізації (або функціоналів у постановці Парето) і функціональних обмежень включає не тільки диференціювання рівнянь стану, але і співвідношень для градієнтів від скінченно-елементних матриць.

Вибір способу дискретизації і типів проектних змінних, критерію якості і функціональних обмежень проводиться залежно від призначення конструкції, її розрахункової моделі та інших факторів. Цей комплекс вимог реальних задач проектування ставить вирішення проблеми аналізу чутливості у ряд атрибутів інженерного конструкторського мистецтва, що погано формалізуються. Сучасні машинобудівні конструкції створюються як комбінація множини взаємодіючих між собою і з зовнішнім середовищем конструктивних елементів, яка описується досить складною математичною моделлю. При аналізі чутливості складових конструкцій обсяг і складність обчислень настільки великі, що необхідно сегментування системи.

Машинобудівна конструкція представляється у вигляді сукупності ієрархічно субпідрядних підсистем різних рівнів зі збереженням структур і приналежності. Дослідження чутливості всієї конструкції можна базувати на незалежному аналізі природно заданих субструктур, а потім пов'язувати ці підконструкції у єдину систему. Області підконструкцій на своїх границях взаємопов'язані за допомогою кінематичних обмежень, т. ч. компоненти взаємодіють за допомогою з'єднань, що зв'язують сусідні субструктури, і обмежують поля можливих переміщень усередині елементів. Граничні області у залежності від геометричної форми підконструкції можуть складатися як з однієї, так і з декількох незв'язаних ділянок. Принцип Гамільтона–Остроградського призводить до об'єднаного варіаційного формулювання рівнянь поведінки машинобудівної конструкції, яке застосовується для аналізу чутливості складових систем. При цьому передбачається, що задовольняються гіпотези суворої еліптичності енергетичних білінійних форм.

Викладений підхід робить можливим вилучення з повної розрахункової моделі певної її частини, перестроювання сітки і більш детальний аналіз для виділеної області. Це може підвищити ефективність чисельного моделювання, так як спочатку робиться аналіз для грубої сітки, а потім для області, що цікавить, подрібнюється сітка і уточнюється аналіз чутливості. При цьому можна отримати більш точну інформацію для частини конструкції, не збільшуючи складність повної її моделі.

Способи зниження розмірності задач і зменшення часу аналізу чутливості складових конструкцій можна умовно розділити на облік окремих еле-

ментів як зосереджених чинників, суперелементний підхід (статична конденсація і динамічне редукування), облік симетрії і регулярності. Аналіз чутливості багатокомпонентних поворотно-симетричних конструкцій (ПСК) специфічний тим, що повний набір перемінних параметрів визначається комплектом, що описує змінні проектування окремого сектора, а подібні функціоналі відшукуються для цілої ПСК [11].

Повна або часткова статична конденсація внутрішньої області сектора багатокомпонентної поворотно-симетричної конструкції принципово не модифікує методику розв'язку. Коригування чисельної моделі аналізу чутливості машинобудівної конструкції повинно проводитися незалежно для кожної підконструкції, тому структуру даних необхідно організувати ієрархічно. Облік повторюваності підсистем призводить до значного зменшення кількості арифметичних операцій та істотного зниження обсягів збереженої і оброблюваної інформації.

Знаходження функціональних похідних багатокомпонентних поворотно-симетричних конструкцій складається з ряду обчислювальних задач, об'єм і точність рішення яких не залежить від кількості секторів N і визначається розмірністю виключно окремого сектора. Наявність симетрії дозволяє перевести задачу аналізу чутливості з накладеними умовами циклічності до аналізу моделі окремого сектора.

Принциповою особливістю динаміки машинобудівної ПСК є існування кратного резонансу, при якому визначаються групи взаємозалежних власних форм, які мають фіксоване число хвиль деформацій. Аналіз чутливості систем ускладнюється принципово недиференційовністю (у сенсі Фреше) кратної власної частоти у довільному околі точки повного простору змінних проектування, «підозрюваної на оптимальність», проте диференційовністю (у сенсі Гато) у напрямку.

Відповідний математичний апарат розглянемо для кратності 2 з потенціалом поширення на випадки більш високої кратності основоположних результатів. Нехай \mathbf{y}_1 і \mathbf{y}_2 – два взаємно ортогональних, нормованих вектора, що відповідають кратному значенню $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$.

При цьому простір рішень вихідної задачі (8) включає два довільних параметра

$$\mathbf{y} = \gamma_1 \mathbf{y}_1 + \gamma_2 \mathbf{y}_2 = B(\mathbf{y}_1 \cos \varphi + \mathbf{y}_2 \sin \varphi), \quad (10)$$

що характеризують норму власного вектора B і його поворот φ в підпросторі власних форм. Для визначеності \mathbf{y}_1 і \mathbf{y}_2 , крім умов ортогональності і нормування

$$\mathbf{y}_j^T M \mathbf{y}_i = \delta_{ij}; \quad i, j = 1, 2, \quad (11)$$

треба зафіксувати "кутове" положення однієї з мод

$$\mathbf{n}^T M \mathbf{y}_1 = 0. \quad (12)$$

Аналіз збуреної $(\mathbf{u} + \delta \mathbf{u})$ системи рівнянь (8) приводить до співвідношення для "розщеплення" кратного власного значення

$$\delta \lambda_{1,2} = 0.5(\alpha_{11} + \alpha_{22} \pm \sqrt{(\alpha_{11} - \alpha_{22})^2 + \alpha_{12}^2}), \quad (13)$$

$$\text{де} \quad \alpha_{ij} = \mathbf{y}_i^T (\delta K - \lambda \delta M) \mathbf{y}_j, \quad \delta M_{r,s} = \delta \mathbf{u}^T \nabla_u M_{r,s}, \\ \delta K_{r,s} = \delta \mathbf{u}^T \nabla_u K_{r,s}.$$

Спільне рішення вихідної (12) і спряжених задач

$$[K - \lambda M] \Psi_{1,2} = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{y}_{1,2}} \quad (14)$$

призводить до умов $\mathbf{y}_i^T \frac{\partial J}{\partial \mathbf{y}_j} = 0$.

Повні співвідношення для похідної у підпросторі кратних мод формуються підсумовуванням однотипних виразів $\nabla_u J = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} + \frac{\partial \lambda}{\partial \mathbf{u}} \Psi^T M \mathbf{y}$ і мають у своєму розпорядженні фільтрувальну властивість до загальної частини спряжених рішень:

$$\Psi_1 = \gamma_{11} \mathbf{y}_1 + \gamma_{12} \mathbf{y}_2 + \Psi_1^*, \quad \Psi_2 = \gamma_{21} \mathbf{y}_1 + \gamma_{22} \mathbf{y}_2 + \Psi_2^*. \quad (15)$$

Відзначимо, що відхилення конструктивно-технологічних параметрів машинобудівних конструкцій при виробництві та експлуатації носять випадковий характер і складні для виявлення. Їх можна для поворотно-симетричних конструкцій умовно розчленувати на 2 видозміни:

1) конструкція, повернена щодо осі обертання на довільний кут, кратний $2\pi/N$, збереже інваріантність власних фізичних і геометричних параметрів (властивості циклічної симетрії) – регулярні похибки;

2) порушується властивість суворої циклічної симетрії – нерегулярні похибки.

При аналізі чутливості власних частот і резонансних характеристик машинобудівних конструкцій ПСК, що залежать від власних форм, існують принципово відмінні підходи. У першому підході відповідні варіації M і K мають квазіциклічну структуру, при цьому зберігаються вирази для похідних по Фреше, виконується умова нерозщеплення спектра $\delta \lambda_1 = \delta \lambda_2 = \delta \lambda$, що накладає на варіацію змінних проектування додаткові обмеження $\alpha_{11} = \alpha_{22}$. Принциповим наслідком у підпросторі \mathbf{u} кратного резонансу є збереження однозначного лінійного зв'язку між $\delta \mathbf{u}$, $\delta \lambda$ і $\delta \mathbf{u}$. При другому підході відбувається порушення симетрії, розщеплення кратного спектра, «прив'язка» в окрожному напрямку форм. Варіації власних частот і мод коливань характеризуються нелінійними співвідношеннями (13). При вимушених коливаннях відбувається підвищення динамічної навантаженості (перевантаження).

Результати прикладних досліджень. З метою демонстрації запропонованих методів аналізу чутливості машинобудівних конструкцій наведемо приклади розв'язання практичних задач.

На рис. 1 наведено приклад розрахунку багатокомпонентної поворотно-симетричної конструкції – оборотної гідромашини високонапірної ГАЕС. Кришка гідротурбіни є несучою просторовою ПСК, що

складається з оболонок обертання, об'єднаних N ребрами. Отвори призначені для зменшення ваги і розміщення механізмів, а також для ремонту і демонтажу окремих лопаток без повного розбирання направляючого апарату. На рис. 1 у якості форми ілюстрації результатів наведено розподіл коефіцієнтів чутливості четвертої власної частоти гідромашини до зміни приведенного модуля пружності. Синім кольором представлена зона близьких до нуля коефіцієнтів чутливості власних частот на відповідних формах коливань, червоним – екстремальних.

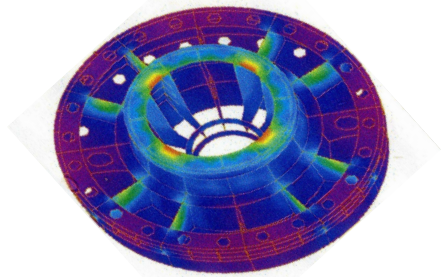


Рисунок 1 – Аналіз чутливості оборотної гідромашини

Розглянемо складову конструкцію – вертикальну установку підйому сталкової ємністю 300 т, що складається з набору складних конструктивних елементів (див. рис. 2).

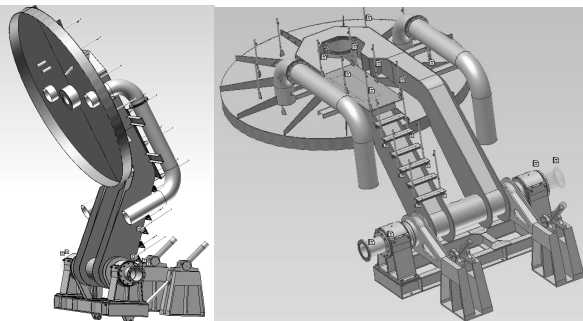


Рисунок 2 – Вертикальна установка підйому сталковівів

Розподіл полів коефіцієнтів чутливості інтегральної піддатливості до зміни приведенного модуля пружності взаємодіючих конструктивних елементів наведено на рис. 3. Синім кольором представлена зона близьких до нуля коефіцієнтів чутливості інтегральної піддатливості, червоним – екстремальних.

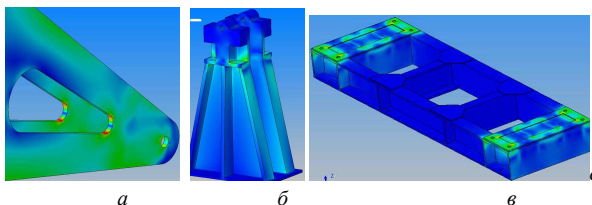


Рисунок 3 – Аналіз чутливості:

a – зворотного важеля; b – опори гідроциліндру; c – рами

Висновки. У роботі проведено огляд досліджень в області аналізу чутливості функціоналів динаміки та міцності машинобудівних конструкцій до варіювання параметрів проектування. Умовно методи аналізу чутливості можна розділити на скінченно-

різницеve наближення градієнта; методи прямого диференціювання і методи введення спряжених змінних.

Аналіз чутливості дозволяє ефективно побудувати поліпшену варіацію в системах оптимального автоматизованого і інтерактивного проектування машинобудівних конструкцій; виробляти оперативні оціночні розрахунки великого числа варіантів при коригуванні або ідентифікації їх математичних моделей, стохастичному аналізі характеристик в полі випадкових відхилень властивостей матеріалу і геометричних параметрів при вібродіагностиці і неруйнівному контролю, призначенні полів допусків при виготовленні.

У процесі досліджень доцільно використовувати різні методи (або їх поєднання) з деякої доступної їх бази. Наведені приклади реалізованих прикладних інжинірингових розробок і проектування промислових виробів.

Список літератури

1. Ткачук Н. А., Климов В.Ф., Хлань А. В., Шейко А.И., Малакей А. Н., Кохановский В.И., Грабовский А.В., Танченко А.Ю., Васильев А.Ю., Бондаренко М.А., Зарубина А.А., Набоков А. В. Компьютерный программно-аппаратный комплекс для анализа и синтеза моделей элементов объектов бронетанковой техники. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР.* 2017. № 12 (1234). С. 96–109.
2. Martins J.R.R.A., Hwang J. T. Review and unification of methods for computing derivatives of multidisciplinary computational models. *AIAA journal.* 2013. Vol. 51. № 11. P. 2582–2599.
3. NTU «KhPI» in the field of mathematical modeling in engineering. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mathematical modeling in engineering and technologies.* 2015. № 18 (1127). P. 14–19.
4. Iooss B. A., Lemaître P. Review on global sensitivity analysis methods. *Uncertainty Management in Simulation–Optimization of Complex Systems.* Springer US, 2015. P. 101–122.
5. Назаренко С. А., Симсон Э. А. Математические модели элементов машин при воздействии физических полей и внешней среды. *Механика та машинобудування.* 2009. № 1. С. 69–77.
6. Allaire G. A review of adjoint methods for sensitivity analysis, uncertainty quantification and optimization in numerical codes. *Ingénieurs de l'Automobile.* 2015. Vol. 836. P. 33–36.
7. Nazarenko S. A. Most important phases of development optimization of complex structure. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Dynamics and strength of machines.* 2015. № 57 (1166). P. 87–90.
8. Benek J. A., Luckring J. M. Overview of the AVT–191 Project to Assess Sensitivity Analysis and Uncertainty Quantification Methods for Military Vehicle Design. *AIAA Paper.* 2017. № 1196.
9. Назаренко С. А. Математические модели мультифизического анализа конструкций для CALS технологий. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин.* 2008. № 1. С. 125–132.
10. Deng S., Suresh K. Multi-constrained topology optimization via the topological sensitivity. *Structural and Multidisciplinary Optimization.* 2015. Vol. 51. № 5. P. 987–1001.
11. Симсон Э. А., Назаренко С. А., Трохан М. В. Методика анализа чувствительности вибрационных параметров механических систем. *Восточно – европейский журнал передовых технологий.* 2008. № 2/4. С. 44–47.
12. Веретельник Ю. В., Ткачук А.В., Кохановская О.В., Храмова И.Я., Зарубина А.А., Кохановский В.И., Ткачук Н.А., Малакей А. Н., Набоков А. В., Головин А.М., Веретельник О.В. Компьютерное моделирование процессов и состояний сложных систем: обоснование параметров моделей расчетно-экспериментальным путем. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР.* 2017. № 12 (1234). С. 14–25.
13. U. V. Mehta *Simulation Credibility. Advances in Verification, Validation, and Uncertainty Quantification.* NASA/TP–2016–219422. JANNAF/GL–2016–0001. JDOC Abstract Number: 2016–0002. 2016. 530 p.
14. Ткачук Н. А., Хлань А.В., Шейко А.И., Малакей А.Н., Набоков А.В., Грабовский А.В., Танченко А.Ю., Васильев А.Ю., Ткачук

- А.В. Разработка математического аппарата для решения задач расчетно-экспериментального исследования элементов механических систем. *Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Машинознавство та САПР*. 2017. № 12 (1234). С. 110–131.
15. Назаренко С. А. Анализ чувствительности конструкций при воздействии физических полей различной природы. *Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Динаміка і міцність машин*. 2006. № 32. С. 119–122.
 16. А.Ю. Танченко, Литвиненко А.В., Чепурной А.Д., Костенко Ю.В., Ткачук Н.А. Метод прямого конечного возмущения численных моделей при исследовании динамических, жестких и прочностных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2014. № 4 (44). С. 114–124.
- References (transliterated)**
1. Tkachuk N. A., Klimov V.F., Hlan' A. V., Shejko A.I., Malakej A. N., Kohanovskij V.I., Grabovskij A.V., Tanchenko A.Ju., Vasil'ev A.Ju., Bondarenko M.A., Zarubina A.A., Nabokov A. V. Komp'yuternyj programmno-apparatnyj kompleks dlja analiza i sinteza modelej jelementov ob'ektov bronetankovoj tehniki [Computer software and hardware system for the analysis and synthesis of models of elements of armored vehicles objects]. *Visnyk NTU "XPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2017, no. 12 (1234), pp. 96–109.
 2. Martins J.R.R.A., Hwang J. T. Review and unification of methods for computing derivatives of multidisciplinary computational models. *AIAA journal*. 2013, vol. 51, no. 11, pp. 2582–2599. doi:10.2514/1.J052184.
 3. Nazarenko S. A., Marusenko S. I. Main achievements of scientists of NTU «KhPI» in the field of mathematical modeling in engineering. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*. 2015, no. 18 (1127), pp. 14–19.
 4. Iooss B. A., Lemaître P. Review on global sensitivity analysis methods. *Uncertainty Management in Simulation–Optimization of Complex Systems*. Springer US, 2015. P. 101–122. Martins J.R.R.A. Review and unification of methods for computing derivatives of multidisciplinary computational models / J.R. R. A. Martins, J. T. Hwang // *AIAA journal*. 2013, vol. 51, no. 11, pp. 2582–2599. doi:10.2514/1.J052184.
 5. Nazarenko S. A., Simson Je. A. Matematicheskie modeli jelementov mashin pri vozdejstvii fizicheskikh polej i vneshnej sredy [Mathematical models of machine elements under the influence of physical fields and the external environment] *Mexanika ta mashynobuduvannya*. 2009, no. 1, pp. 69–77.
 6. Allaire G. A review of adjoint methods for sensitivity analysis, uncertainty quantification and optimization in numerical codes. *Ingénieurs de l'Automobile*. 2015, vol. 836, pp. 33–36.
 7. Nazarenko S. A. Most important phases of development optimization of complex structure. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines*. 2015, no. 57 (1166), pp. 87–90. doi: 10.20998/2078–9130.2015.57.72583.
 8. Benek J. A., Luckring J. M. Overview of the AVT–191 Project to Assess Sensitivity Analysis and Uncertainty Quantification Methods for Military Vehicle Design. *AIAA Paper*. 2017, no. 1196.
 9. Nazarenko S. A. Matematicheskie modeli mul'tifizichnogo analiza konstrukcij dlja CALS tehnologij [Mathematical models of multiphysical analysis of structures for CALS technologies]. *Visnyk NTU «XPI». Seriya: Dy`namika i micznist' mashyn*. 2008, no. 36, pp. 125–132.
 10. Deng S., Suresh K. Multi-constrained topology optimization via the topological sensitivity. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2015, vol. 51, no. 5, pp. 987–1001.
 11. Simson Je. A., Nazarenko S. A., Trohman M. V. Metodika analiza chuvstvitel'nosti vibracionnyh parametrov mehanicheskikh system [Methods of analyzing the sensitivity of vibration parameters of mechanical systems]. *Vostochno – evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. 2008, no. 2/4, pp. 44–47.
 12. Veretel'nik Ju. V., Tkachuk A.V., Kohanovskaja O.V., Hramcova I.Ja., Zarubina A.A., Kohanovskij V.I., Tkachuk N.A., Malakej A. N., Nabokov A. V., Golovin A.M., Veretel'nik O.V. Komp'yuternoe modelirovanie processov i sostojanij slozhnyh sistem: obosnovanie parametrov modelej raschetno-jeksperimental'nym putem [Computer modeling of processes and states of complex systems: justification of model parameters by calculation and experimentally]. *Visnyk NTU "XPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2017, no. 12 (1234), pp. 14–25.
 13. U. B. Mehta *Simulation Credibility. Advances in Verification, Validation, and Uncertainty Quantification*. NASA/TP–2016–219422. JANNAF/GL—2016–0001. JDOC Abstract Number: 2016–0002. 2016, 530 p.
 14. Tkachuk N. A., Hlan' A.V., Shejko A.I., Malakej A.N., Nabokov A.V., Grabovskij A.V., Tanchenko A.Ju., Vasil'ev A.Ju., Tkachuk A.V. Razrabotka matematicheskogo apparata dlja reshenija zadach raschetno-jeksperimental'nogo issledovanija jelementov mehanicheskikh sistem. *Visnyk NTU "XPI". Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. 2017. no. 12 (1234), pp. 110–131.
 15. Nazarenko S. A. Analiz chuvstvitel'nosti konstrukcij pri vozdejstvii fizicheskikh polej razlichnoj prirody x Analysis of the sensitivity of structures when exposed to physical fields of different nature]. *Visnyk NTU «XPI». Seriya: Dy`namika i micznist' mashyn*. 2006, no 32, pp. 119–122.
 16. А.Ю. Танченко, Литвиненко А.В., Чепурной А.Д., Костенко Ю.В., Ткачук Н.А. Метод прямого конечного возмущения численных моделей при исследовании динамических, жестких и прочностных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций [The method of direct final perturbation of numerical models in the study of the dynamic, stiffness and strength characteristics of thin-walled elements of machine-building structures]. *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2014, no. 4 (44), pp. 114–124.

Надійшла (received) 01.12.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Назаренко Сергій Олександрович (Назаренко Сергей Александрович, Nazarenko Sergej Aleksandrovich) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8213-6590>; e-mail: nazarenkoserzh7@gmail.com

Марусенко Світлана Іванівна (Марусенко Светлана Ивановна, Marusenko Svitlana Ivanivna) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1340-5491>; e-mail: svivmar@ukr.net

Зінченко Олена Іванівна (Зинченко Елена Ивановна, Zinchenko Olena Ivanivna) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2961-5861>; e-mail: zinchenko.zinchenko@gmail.com