

УДК 539.3

Розрахунок елементів машинобудівних конструкцій на віброміцність

Бабенко А.С., Боронко О.О., Трубачев С.І., Лавренко Я.І.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

***Анотація.** Розроблен метод та автоматизована система розрахунку елементів конструкцій на віброміцність. Алгоритми розрахунку базуються на новому методі формування функціоналів типу Релея, та мінімізації їх методом покоординатного спуску. Використання метода покоординатного спуску дозволяє уникнути проблеми, які виникають в зв'язку з формуванням, зберіганням та оперуванням з глобальними матрицями жорсткості та мас. Це дає змогу розв'язувати задачі великої розмірності використовуючи тільки оперативну пам'ять ПСОМ. Розроблений підхід дозволяє розв'язувати задачі на власні та вимушені коливання. Програмне забезпечення сформоване за модульним принципом, що дає можливість удосконалювати та розширювати даний пакет прикладних програм. Програмне забезпечення пройшло тестування на великій кількості тестових та прикладних задач. Запропонований метод розрахунку та розроблена автоматизована система були впроваджені в інженерну практику.*

***Ключові слова.** Розрахунок на віброміцність метод покоординатного спуску, власні коливання, вимушені коливання.*

Конструкції, які використовуються в сучасному машинобудуванні у процесі експлуатації зазнають інтенсивних вібраційних навантажень. Такі навантаження створюють пряму загрозу міцності елементів машинобудівних конструкцій, тому визначення динамічних характеристик конструкцій являє собою актуальну задачу. Слід підкреслити, що аналітичні методи розрахунку визначення динамічних характеристик складних багатозв'язних пластинчато-оболонкових та стрижневих систем, з реальними умовами закріплення не завжди ефективні. Тому необхідно розвивати універсальні і ефективні чисельні методи та алгоритми розрахунку.

З урахуванням вимог сучасної промисловості був розроблений новий метод визначення власних частот та власних форм коливань елементів машинобудівних конструкцій, який базується на мінімізації побудованих функціоналів методом покоординатного спуску [1–3]. Для визначення основної власної частоти та відповідної форми застосовується метод квазістатичних ітерацій, яких базується на заміні розв'язання задачі на власні числа послідовністю розв'язання задач при статичних навантаженнях. Для визначення більш високих частот використовувався метод підвищення жорсткостей [1]. Метод підвищення жорсткостей, являється більш ефективним та економічним методом, з точки зору обчислювальних ресурсів, в порівнянні з традиційним методом, де кожна наступна форма і частота знаходиться шляхом мінімізації на підпросторі, що ортогональний всім попереднім знайденим власним векторам. Метод підвищення жорсткостей дозволяє визначити весь спектр власних частот і форм коливань включаючи кратні, що важливо для розв'язку задачі о вимушених коливаннях механічних систем.

Слід підкреслити, що застосування метода покоординатного спуску дозволяє уникнути проблем, які пов'язані з формуванням матриць інерції та жорсткості та оперуванням з ними. Це дозволяє вирішувати задачі великої розмірності з мінімальною потребою обчислювальних ресурсів. Оптимальне використання методу покоординатного спуску залежить від того, як швидко збігається ітераційний процес. Для прискорення збіжності ітераційного процесу використовується метод неповної релаксації [1, 2].

При практичній реалізації ітераційний процес продовжується до тих пір, поки відношення $\|\tilde{\lambda}^k\| / \|\tilde{v}^k\|$ не стане менше деякого, наперед заданого числа. Число підбирається таким

чином, щоб похибка ітераційного процесу була приблизно рівна похибці апроксимації переміщень $O(h^s)$. Де $\|\vec{\lambda}^k\|, \|\vec{v}^k\|$ - норми векторів прирістів та переміщень на k -й ітерації.

В зв'язку з тим, що власні форми коливань повинні задовільняти граничним умовам, то приходимо до задачі мінімізації відношення типа Релея-Ритца з обмеженнями. В багатьох випадках переміщення задаються у вигляді фіксованих величин на частини границі. Підставляючи їх у функціонал, получимо задачу мінімізації без обмежень на просторі меншої розмірності. Даний метод є стійким відносно обчислювальних помилок, які обумовлені точністю обчислювання ЕОМ.

Отримані власні частоти та власні форми коливань використовувались при розв'язанні задачі про вимушені коливання. На основі запропонованого методу було розроблено алгоритми та пакети прикладних програм (ППП) [3].

З огляду на те, що ППП побудовано за модульним принципом, це дозволяє розвивати його структуру за допомогою додаткових сервісних програм, а також видозмінювати та додатково розробляти програми для нових задач. Для роботи ППП необхідні групи вхідних даних щодо задачі, що розв'язується. А саме: інформація о топології області; інформація о типі задачі; інформація о фізичних параметрах конструкції; інформація о кінематичних граничних умовах та навантаженні.

ППП було перевірено та вдосконалено на великій кількості тестових прикладах та реальних практичних задачах різної складності. Чисельні результати було порівняно з результатами, що були отримані іншими авторами за допомогою аналітичних або чисельних методів, а також із відомими експериментальними результатами. Найбільша похибка у визначенні власних частот була не вище 5%.

Одержані в результаті розрахунку стали теоретичною основою інженерного підходу дослідження вимушених коливань машинобудівних конструкцій, а також для визначення оптимальних конструктивних параметрів механічних систем під вібраційним навантаженням. Розроблений метод, що реалізований у вигляді автоматизованої системи розрахунку механічних конструкцій отримали впровадження в інженерну та дослідницьку практику.

Список літератури

1. Бабенко А. Є. Определение частотного спектра и собственных форм колебаний упругих систем методом повышения жесткостей // А. Е. Бабенко, О. А. Боронко, О. Н. Василенко, С. И. Трубачев / Проблемы прочности. – 1990. – № 2 – с. 122–124.
2. Бабенко А. Є. Применение и развитие метода покоординатного спуска в задачах определения напряженно-деформированного состояния при статических и вибрационных нагрузках // А. Е. Бабенко, Н. И. Бобырь, С. Л. Бойко, О. А. Боронко / – К.: Инрес, 2005. – 264 с.
3. Бабенко А.Є. Автоматизована система розрахунку елементів машинобудівних конструкцій на міцність// Бабенко А.Є., Боронко О.О., Трубачев С.І., Лавренко Я.І. /Матеріали 20 Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка технологія та інженерна освіта» 10–13 вересня, 2019 р., м. Київ-м.Херсон- КПІ імені Ігоря Сікорського.–2019.–С.78–81.

Calculation of elements of machine-building structures on vibration strength

Babenko A., Boronko O, Trubachev S., Lavrenko Y.

Abstract. A method and an automated system for calculating structural elements for vibration strength have been developed. The calculation algorithms are based on a new method of forming Rayleigh-type functionals and minimizing them by the coordinate descent method. The use of the coordinate descent method avoids the problems associated with the formation, storage and operation of global matrices of stiffness and mass. This makes it possible to solve large-scale problems using only the operational memory of the PC. The developed approach allows to solve problems on own and forced fluctuations. The software is formed on a modular basis, which allows you to improve and expand this package of applications. The software has been tested on a large number of test and application tasks. The proposed calculation method and the developed automated system were implemented in engineering practice.

Keywords. Calculation of vibration strength method of coordinate descent, natural oscillations, forced oscillations.