УДК 622.691.4:517.946

РОЗРАХУНКОВІ СХЕМИ ДИНАМІКИ ГАЗООХОЛОДЖУЮЧОГО УСТАТКУВАННЯ ГАЗОКОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ ТА МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ВІБРОНАПРУЖЕНЬ

© 1997, З.П.Лютак

Автором розроблена математична модель визначення рівня вібронапружень, використовуючи метод континуального моделювання. Розроблена схема і здійснений алгоритм та програмна реалізація оптимальної віброноглинаючої системи.

ІФДТУНГ. Проведена експериментальна вібродіагностика газоохолоджуючого устаткування виявила в окремих елементах конструкції небезпечні вібронапруження, джерелом яких є вентиляторні пристрої. Домінантна частота коливань збігається з частотою обертання валів вентиляторів. Для дослідження вібраційних процесів та визначення оптимальних шляхів зменшення рівнів вібронапружень у найбільш небезпечно вібронавантажених елементах конструкції необхідно зробити розрахункову схему.

Розрахункова схема конструкції (РС). Конструкція газопроводу - це сполучення функціональних елементів:

A - наземного та підземного колектора;

B - пучків газоохолоджуючих труб;

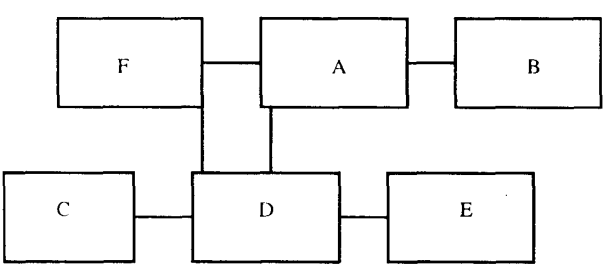
C - вентиляторних установок;

D - несучої просторової фермової конструкції;

E - огороджувальних елементів, трапів, сходів...;

F - фундаментні плити, інженерне обладнання підземної частини колектора.

Всі ці елементи взаємопов'язані та взаємно впливають на рівень вібрації. Для визначення рівнів вібропереміщень та пов'язаних з ними вібронапружень використовуємо дискретноконтинуальне моделювання та метод модального синтезу [1, 3, 4]. Для цього розглянемо розрахункову схему.



Розрахункова схема

Рівняння динамічної рівноваги конструкції з лінійно-пружного матеріалу при малих деформаціях будуть (без демпфування)

$$Mu'' + Ku = f. \qquad (1)$$

Тут M - матриця мас, K - матриця жорсткості, u - вектор узагальнених переміщень, f - вектор зовнішніх зусиль.

Якщо вибрати для u таку апроксимацію

$$u = \begin{bmatrix} q_1(t)\cdot\varphi_i(X) \\ \cdots \\ q_n(t)\cdot\varphi_n(X) \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

де φ_i - власні форми коливань, то система (1) розпадеться на N незалежних рівнянь [1].

Для визначення власних частот і власних форм розроблені способи, що базуються на декомпозиції конструкції A на підконструкції A_i. Для A_i можна записати аналогічну (1) систему рівнянь

$$M_i \ddot{u}_i + K_i u_i = f_i . \qquad (3)$$

Цю систему можна розглядати незалежно, якщо вважати відомими складові вектора зусиль f_i в зоні контакту A_i з суміжними підконструкціями розрахункової схеми.

При синтезі РС для A_i для A важливим є вибір узагальнених переміщень. У модальному методі [4] їх вибирають у формі (2)

$$u_i^0 = \begin{bmatrix} q_{i1}^0(t)\cdot\varphi_{i1}^0(X) \\ \cdots \\ q^0(t)\cdot\varphi^0(X) \end{bmatrix}; \qquad (4)$$

$$u_i^1 = \begin{bmatrix} q_{i1}^1(t)\cdot\varphi_{i1}^1(X) \\ \cdots \\ q^1(t)\cdot\varphi^1(X) \end{bmatrix}; \qquad (5)$$

$$u_i^2 = \begin{bmatrix} q_{i1}^2(t)\cdot\varphi_{i1}^2(X) \\ \cdots \\ q^2(t)\cdot\varphi^2(X) \end{bmatrix}, \qquad (6)$$

Тут φ^o_{ij} - зміщення A_i як жорсткого цілого, φ^1_{ij} - власні форми однорідного рівняння (3) з однорідними граничними умовами, φ^2_{ij} - функції, що відповідають збуренню границі [4].

Також відомі методи, де при заданні φ_i врахований вплив приєднаних до A_i елементів конструкції [3].

Розглянемо двоступінчасту РС, умовно названих Р1 і Р2.

Р1. Визначення динамічних характеристик конструції (її власних частот і власних форм коливань) (Р1).

Визначення концентрації напружень, виходячи з отриманих на основі Р1 динамічних характеристик (Р2).

Розглянемо РС Р1. Введем матриці динамічної жорсткості для кожної підконструкції A_i. Якщо конструкцію розбито на підконструкції так, що в РС A_i з'єднані послідовно (наприклад, подовгасті конструкції), то для кожної A_i задамо матрицю динамічної жорсткості у вигляді [1]:

$$\begin{matrix} f(\omega) \\ u(\omega) \end{matrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}. \qquad (7)$$

Тут f - узагальнені силові чинники, u - узагальнені переміщення.

Значення u і f ідентичні віртуальним переміщенням на границі з'єднання підконструкцій та узагальненим силам на цих переміщеннях. Нижче буде вказаний точний зміст цих значень, а поки що відмітимо, що для узагальнених матриць динамічної жорсткості S мають місце всі ці операції, як і для випадку звичайних одновимірних задач [2]. Зокрема, результуюча матриця S конструкції, що представлена послідовним з'сднанням підконструкцій, дорівнює

$$S=S_1*S_2***S_k \qquad (8)$$

Одержані таким чином власні форми коливань будуть ортогональними як по енергії деформації, так і по кінетичній енергії

$$\int_V \rho\cdot\varphi_i^g(X)\cdot\varphi_j^g(X)dv = 0; \qquad (9)$$

$$\int_V \bar{\sigma}\cdot\delta\bar{\varepsilon}dv = q_j\cdot\int_V W_\sigma(\varphi_j)\cdot W_\varepsilon(\varphi_i)dv\cdot\delta q_i; \qquad (10)$$

$$\int_V W_\sigma(\varphi_j) W_\varepsilon(\varphi_i)dv = 0, \qquad (11)$$

і, отже, в даному випадку система рівнянь динамічної рівноваги, отримана, наприклад, на основі варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського

$$\int_0\left[\int_V\left(\hat{\sigma}\cdot\delta\hat{\varepsilon}+\rho\cdot\ddot{u}\cdot\delta u\right)dv-\int_s(P-F)\cdot\delta u\cdot ds\right]dt=0 \qquad (12)$$

розпадеться на систему диференційних рівнянь при підстановці

$$\ddot{q}_i + q_i\frac{\int_V W(\varphi_i^g)W(\varphi_i^g)dv}{\int_V \rho\,\varphi_i^g(X)\,\varphi_j^g(X)dv} = 0. \qquad (13)$$

Часто конструкцію можна схематизувати при розрахунку вібраційних навантажень як з'єднання одного континуального елемента з декількома дискретними. Така схематизація дещо подібна до розглянутої вище. Однак там розглядали лише з'єднання по краях окремих елементів. Тепер розглянемо випадок, коли до подовгастого континуального елемента A_c приєднані деякі дискретні елементи не лише по краях, але й в точках X_i посередині прольоту. Звичайно, можна було б розробити A_c на піделементи (по точках X_i), і звести задачу до одного з алгоритмів, які були розглянуті вище. Однак можна застосувати і інший спосіб. Використаємо як координатні функції деяку систему функцій, що задані одним аналітичним виразом по всій довжині A_c.

Виберемо деяке представлення переміщень в A_c у вигляді (2)

$$u(X, t) = q_i(t) * \varphi_i(X).$$

З варіаційного принципу (12) отримаємо

$$M * q'' + K * q = F(X_i) * \varphi(X_i). \qquad (14)$$

Тут $\varphi(X_i)$ - вектор значень координатних функцій в точках контакту.

Для замикання системи рівнянь необхідно було б задати значення $F(X_i)$. Якщо дискретні елементи під'єднані через пружні безінерційні елементи, то можна записати

$$F(X_i) = k_i\left(\sum_j q_j(t)\,\varphi_j(X_i) - U_i^0\right), \qquad (15)$$

Тут U^0_i - зміщення контактуючого з A_c масивного елемента з дискретної схеми D_i, що контактує з A_c в точці X_i.

Додаючи до (14) - (15) рівняння для D_i

$$M * u_i'' + K * u_i = -F(X_i, t) * \varphi_i(X), \qquad (16)$$

отримаємо замкнуту систему рівнянь для визначення динамічних навантажень в усій конструкції. Причому, якщо координатні функції вибрані ортогональними по кінетичній енергії, то система розв'язуваних рівнянь прийме нормальну форму з діагональною матрицею при похідних по часу.

Вищевказану апроксимацію можна застосувати при побудові РС конструкцій зі змінними по об'єму параметрами та з деревовидним графом механічної схеми. Розглянемо систему координатних функцій, ортогональних по кінетичній енергії (9).

Точки X_i - точки розгалуження або точки різкої зміни механічних параметрів. Виберемо наступну систему координатних функцій

$$\varphi_i (X) = \rho^{0.5} (X) * \varphi_i (X)^c \qquad (17)$$

Тут $\rho(X)$ - густина, $\varphi^c(X_i)$ - деякий набір ортогональних на всьому об'ємі V функцій.

Ці функції можна вибирати з системи власних форм коливань стержневих елементів, наприклад, у вигляді добутку функцій Крилова [1]

$$\varphi_i^c(X) = \cosh\beta_i x - \cos\beta_i x - \sigma_i(\sinh\beta_i x - \sin\beta_i x);$$

$$\sigma_i = \frac{\sinh\beta_i L - \sin\beta_i L}{\cosh\beta_i x + \cos\beta_i x}, \qquad (18)$$

де $\beta_1 L=1,87510$, $\beta_2 L=4,69409$, $\beta_3 L=7,85476$ та довільної системи ортогональних функцій $\psi_j(r)$, $\xi_k(0)$. (Розглядається циліндрична система координат).

При підготовці розкладу переміщень

$$U(X,t) = \sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_2}\sum_{k=1}^{N_3} q_{ijk}(t)\rho^{-0.5}(x)\varphi_i^c(x)\phi_j(r)\xi_k(\theta), \qquad (19)$$

в (12) отримаємо систему рівнянь у нормальній формі (густина вважається лише функцією поздовжньої координати x) (13).

Якщо густина залежить і від координат r,θ, то розклад переміщень можна записати у вигляді

$$U(X,t) = \sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_2}\sum_{k=1}^{N_3} q_{ijk}(t)\left(\rho(x)\rho(r)\rho(\theta)\right)^{-0.5}\varphi_i^c(x)\phi_j(r)\xi_k(\theta) \qquad (20)$$

якщо можливий такий розклад густини:

$$\rho(X) = \rho(x)\rho(r)\rho(\theta). \qquad (21)$$

Ці функції бажано вибирати такими, щоб вони задовольняли крайові умови. Однак при застосуванні моделей вищого порядку, ніж балка Ейлера, наприклад, балки Тимошенко, це не завжди вдасться зробити. Хоча аналогічно до статичних крайових задач можна показати, що координатні функції довільні на вільному краї в інтегральному значенні апроксимуються як розв'язок.

При підстановці (20) в (12) система розв'язуваних рівнянь запишеться в діагональній формі (13).

З рівнянь, записаних у формі (34), легко отримати рівняння в частотній області

$$-\omega^2 M u_i + K u_i = -F(X_i,\omega)\varphi(X_i). \qquad (22)$$

На основі (22) легко тепер побудувати амплітудно-частотні характеристики (АЧХ).

Подібно до випадку одного континуального елемента розглянемо РС з декількома континуальними елементами.

Розглянемо деякий елемент конструкції і побудуємо для нього локальну РС. Вважаємо, що ця РС або дискретного або континуального типів. Звичайно, пізніше можна будувати ієрархічні РС, використовуючи як блоки моделі змішаного дискретно континуального типу. Для кожного з К блоків, незалежно від його виду, рівняння динамічної рівноваги будуть

$$M_k \ddot{q} + K_k q = F_k + F_k^z. \qquad (23)$$

Тут F_k - контактні зусилля в точках з'єднання, F^z_k - зовнішні зусилля, що діють на елемент k.

Об'єднання дискретних блоків відбувається добре відомими способами [1]. Деякі особливості має об'єднання лише континуального елемента з дискретним блоком або з іншим дискретним елементом. Дійсно, при об'єднанні двох дискретних елементів (розглянемо конструкцію, що складається лише з двох блоків) отримаємо

$$F_1 = -F_2 = k (U^s_1 - U^s_2). \qquad (24)$$

Тут $U^s_{1,2}$ - переміщення контактуючих мас чи жорстких важких тіл у цих блоках. Загальну матрицю жорсткості можна зобразити як суму двох

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 00\cdots0-k00\cdots0k0\cdots0 \\ 00\cdots0-k00\cdots0k0\cdots0 \\ \cdots \\ -k-k\cdots-k-k-k0\cdots0k0\cdots0 \\ 00\cdots0000\cdots000\cdots0 \\ kk\cdots kkk0\cdots00\cdots0 \\ 00\cdots0000\cdots000\cdots0 \end{bmatrix}. \qquad (25)$$

Тут друга матриця симетрична з двома відмінними від нуля стовпцями та рядками. Показники i, j - це просто номери в загальній РС контактуючих елементів.

При розгляді контакту двох блоків, з яких один континуальний, наприклад, перший, додаткова матриця також буде симетричною, але заповненою [3].

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1^s & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & K_{12}^s \\ K_{12}^s & K \end{bmatrix}; \quad (26)$$

$$K_{12}^s = \begin{bmatrix} \varphi_1(a)\varphi_1(a)\cdots\varphi_N(a)\varphi_1(a) \\ \varphi_1(a)\varphi_N(a)\cdots\varphi_N(a)\varphi_N(a) \end{bmatrix}; \quad (27)$$

$$K_{12}^s = \begin{bmatrix} 0 & 0\cdots & 0 & -k & \varphi_1(a) & 00 \\ 0 & 0\cdots & 0 & -k & \varphi_2(a) & 00 \\ & & \cdots & & & \\ 0 & 0\cdots & 0 & -k & \varphi_N(a) & 00 \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Для електронних схем можливий поблочний розрахунок з наступним об'єднанням в загальну РС на основі законів електротехніки. Для вібраційних полів також відомий такий метод, однак, в цьому випадку задача значно ускладнюється внаслідок тривимірного характеру вібронапружень. Крім того, значні труднощі виникають при спробі розглянути поелементно конструкції, в яких власне вузли з'єднань не досить малогабаритні, щоб можна було вважати їх точковими. Наведені в [3, 4] види мод коливань, які застосовують при одержанні рівнянь динамічної рівноваги, часто не є незалежними для двох окремих елементів. Справді, їх важко розділити для елементів зі значною поверхнею контакту, наприклад, для колектора і фундаменту конструкції. Тут можливе розділення мод на внутрішні φ^v_i та граничні φ^g_j [1, 3, 4].

На сучасному рівні розробки програмних засобів домінуючим став об'єктно-орієнтований підхід. Він дає змогу маніпулювати не дрібними дозами інформації, а зразу її значними обсягами, що тісно пов'язані з фізичними об'єктами, які вони моделюють. Запропонований у даній роботі спосіб побудови РС вібраційних полів у конструкції газоохолодника повністю можна реалізувати програмно на основі об'єктно-орієнтованого методу. Справді, параметри, що описують даний елемент конструкції можна розділити на дві групи: зовнішні λ^g_j і внутрішні λ^v_i. Очевидний зв'язок: φ^v_i - λ^v_i; φ^g_j - λ^g_j. Основний признак РС, що наведений в даній роботі - це ієрархічність. Тобто можливість уточнювати вібраційні поля в небезпечних зонах на основі побудови ієрархічних вкладених моделей. Цей же спосіб є характерним для методології об'єктно-орієнтованого програмування. Об'єкти можуть бути піделементами інших об'єктів.

Цей підхід реалізовано в програмному комплексі GACT. Комплекс є працездатним на найпоширеніших комп'ютерах PC AT починаючи з 286 моделі. Конденсація на фізичному рівні параметрів моделі дали можливість уникнути обробки громіздких масивів як вхідної, так і проміжної інформації і включити блок оптимізації, пошуку оптимальної вібропоглинаючої системи.

1. Дружинский И.А. Механические цепи. Л., 1997. 2. Коренёв Б.Г., Резников Л.М. Динамические гасители колебаний // Теория и технические приложения. М., 1988. 3. Benfield W.A., Hrudo R.F. Vibration Analysis of Structures by Component Mode Substitution // AIAA Jour. 1971. Vol. 9. No. 7. P.1155-1261. 4. Hurti W.C. Dynamic Analysis of Struktural System Using Component Models // AIAA Jour. 1965. Vol. 3. No. 4. P.678-685.

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ТА ТЕХНІЧНА ДІАГНОСТИКА НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТУ

© 1997, О.М.Карпаш

НВФ "ЗОНД", м.Івано-Франківськ

Проаналізовано сучасний стан неруйнівного контролю та технічної діагностики нафтогазового обладнання та інструменту, зокрема його складових частин (організаційне, технічне, методичне та кадрове забезпечення). Визначено основні завдання по кожному напрямку та шляхи їх реалізації.

Забезпечення народного господарства паливно-енергетичною сировиною за рахунок збільшення обсягів видобутку нафти і газу - є однією із найважливіших економічних проблем України. Національна програма "Нафта і газ України до 2010 року" та "Державна програма розвитку робіт по видобутку нафти і газу в українському шельфі Азовського та Чорного морів" передбачають значне збільшення обсягів та темпів спорудження нафтових і газових свердловин при їх оптимальній собівартості та виконанні вимог екологічної безпеки. Тільки в 1996 р. в Україні має бути пробурено 426 тисяч