

нетрудно определить проекции гидродинамических сил на линию центров и направление, перпендикулярное ей.

Выводы. 1. Предложена методика определения величины давления в узких щелевых зазорах с учётом локальных сил инерции жидкости, позволяющая его рассчитывать для подшипников/подпятников скольжения грузоподъёмных кранов.

2. Полученные в данной работе результаты могут быть в последующем служить для уточнения и совершенствования существующих инженерных методов расчёта подобных систем как на стадии их проектирования/конструирования, так и в режимах реальной эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 847 с.
2. Бургвиц А.Г. Устойчивость движения валов в подшипниках жидкостного трения. / А.Г. Бургвиц, Г.А. Завьялов. – М.: Машиностроение, 1964. – 124 с.
3. Токарь И.Я. Нестационарные режимы смазки кольцевых уплотнений роторов турбогенераторов. / И.Я. Токарь. – В кн.: Колебания валов на масляной плёнке. – М.: Наука, 1968. – С. 31-38.
4. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1966. – 735 с.

УДК 681.326.74.06

В.С. ЛОВЕЙКІН, докт. техн. наук,

Ю.В. ЧОВНІЮК, канд. техн. наук, Ю.О. РОМАСЕВИЧ, канд. техн. наук.

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

МОДЕЛЬ ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МЕХАНІЗМІВ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ КРАНІВ ЯК ОБ'ЄКТІВ НЕПЕРЕРВНОГО ТИПУ

Постановка проблеми. Технічний стан (ТС) механізмів підйому (у подальшому об'єктів діагностування - ОД) з плином часу змінюється. Причинами цього у загальному випадку є організована взаємодія ОД із „зовнішнім середовищем” чи робочі вхідні впливи й неорганізована взаємодія об'єкту з середовищем, а також

умови експлуатації ОД. Ці фактори обумовлюють стан об'єкту чи течію процесу функціонування ОД.

Технічний стан ОД та їх стан досить повно можуть бути описані скінченною сукупністю V (на прийнятому чи заданому рівні деталізації об'єкту) метричних величин. Розіб'ємо множину V на дві підмножини Π та H , які не перетинаються між собою. Елементами множини Π є змінні технічного стану ОД, а елементами H – змінні стану ОД. Множина H представляється у вигляді об'єднання трьох підмножин, що не перетинаються: вхідних впливів X , внутрішніх змінних станів S та вихідних впливів Y .

Граф причинно-наслідкових зв'язків між множинами змінних умов експлуатації B показаний на рис. 1. Граф ілюструє перетворення вхідних впливів X у вихідні Y через внутрішні змінні стану S . Змінні умови експлуатації справляють випадкові впливи на змінні стану, а останні, у свою чергу, є причинами зміни деяких змінних середовища, що характеризують безпосередню взаємодію ОД з середовищем. Крім розглянутих зв'язків, об'єктивно існує контур причинно-наслідкових зв'язків між елементами множин Π та S , а для ОД зі зворотними зв'язками – між елементами Π та SUY .

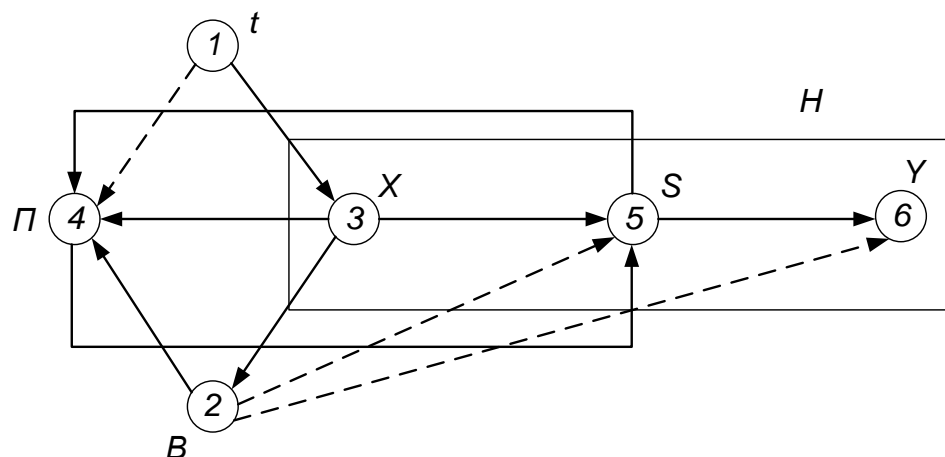


Рис. 1. Граф причинно-наслідкових зв'язків між змінними моделі.

Аналіз публікацій. Теорія графів та сфери їх застосування викладені у роботах [1-6]. Проте аналітичні моделі зміни технічного стану ОД, змістовний опис взаємозв'язків між елементами множини Π з елементами множин B , X , S , поданий на рис. 1, а також формальний опис узагальненого процесу зміни ТС й ОД відсутні. Дане дослідження проведене задля того, щоб створити адекватну модель зміни ТС ОД як об'єктів неперервного типу [1, 3, 5, 6].

Мета роботи полягає у отриманні аналітичної моделі зміни технічного стану ОД. Іншими словами, отримання рівняння, яке пов'яже елементи множини Π з елементами множин B , X , S . Змістовний опис взаємозв'язків між елементами вказаних множин

ілюструється на рис. 1. Нижче розробляється та досліджується формальний опис узагальненого процесу зміни ТС й ОД.

Основна частина. Для зручності аналізу впорядкуємо певним чином елементи множин Π , B , X , S . Кожному елементу цих множин надамо порядковий номер. У результаті вказані множини можна розглядати як багатовимірні вектори, а саме: \vec{d} - n -вектор змінних технічного стану ОД, \vec{b} - m -вектор змінних умов експлуатації, \vec{x} - r -вектор вхідних впливів та \vec{s} - k -вектор внутрішніх змінних стану ОД.

У загальному випадку елементи вектора \vec{d} знаходяться під одночасним впливом зі сторони елементів \vec{b} , \vec{x} та \vec{s} . Структура цього впливу може бути як завгодно складною. Припустимо, що структура цієї взаємодії лінійна, тобто приймається гіпотеза суперпозиції відносно впливів \vec{b} , \vec{x} та \vec{s} . Це обмеження дозволяє вести розробку моделі, користуючись композиційним принципом.

Припустимо також, що ОД функціонує безперервно на відрізку часу $[0, t_{\sigma}]$, де t_{σ} - момент часу проведення профілактичного впливу. Після отримання моделі зміни ТС на відрізку $[0, t_{\sigma}]$ буде проаналізований випадок порушення гіпотези безперервності функціонування ОД.

Розглянемо дугу [2, 4] граф-моделі причинно-наслідкових зв'язків на рис. 1. Поставимо проміжну задачу отримання аналітичного виразу, який пов'язує елементи $d_i(t)$ вектору \vec{d} з елементами $b_j(t)$, $j = (\overline{1, m})$. Зрозуміло, що першим членом цього виразу буде модуль $\vec{d}(0)$ вектору номінальний значень змінних ТС. Відомо, що модель повинна відображати процес „накопичення” (будівля, ефекти втомлення тощо) взаємодії $\vec{d}(t)$ з елементами $\vec{b}_j(t)$; крім того, у неї повинні входити кількісні характеристики цієї взаємодії. Враховуючи наведене вище і використовуючи гіпотезу суперпозиції, шуканий вираз можна подати у виді:

$$\vec{d}_b(t) = \vec{d}_0 + \Delta_b \vec{d}(t);$$

$$\Delta_b \vec{d}(t) = \left(\int_0^t \vec{b}^T(\tau) \cdot \vec{W}_1^b d\tau, \dots, \int_0^t \vec{b}^T(\tau) \cdot \vec{W}_n^b d\tau \right)^T, \quad (1)$$

де \vec{W}_1^b - m -вектор коефіцієнтів, які характеризують вплив $\vec{b}(t)$ на $d_i(t)$, $t \in [0, t_{\sigma}]$.

Наступний етап розробки моделі пов'язуємо з формалізацією оператора дуги [3, 4] вихідного графа. Суттєва особливість цього етапу полягає у тому, що вектор $\vec{d}(t)$ залежить від вектору $\vec{b}(t)$. Якщо у цій залежності також використати гіпотезу

суперпозиції, тоді збурюючим впливом на $\vec{d}_x(t)$ буде вектор $\vec{d}(t) + \vec{N}_b(t)$, й результат дії цього збурення можна подати у вигляді:

$$\vec{d}_x(t) = \vec{d}_0 + \Delta_x \vec{d}(t); \quad (2)$$

$$\Delta_x \vec{d}(t) = \int_0^t [\vec{x}(\tau) + \vec{N}_b(t)]^T \vec{W}_i^x d\tau, \quad i = (1, n),$$

де \vec{W}_i^x - r-вектор коефіцієнтів впливу $\vec{d}(t)$ на $d_i(t)$, $t \in [0, t_\delta]$; $\vec{N}_b(t)$ - вектор, який характеризує адитивний вплив $\vec{b}(t)$ на $\vec{d}(t)$.

При формуванні оператора дуги [5, 4] необхідно врахувати те, що, по-перше, вектор $\vec{s}(t)$ детермінований вектором $\vec{d}(t)$ чи $\vec{d}(t) + \vec{N}_b(t)$, по-друге, оператор A дуги [3, 5] залежить від поточного стану ТС чи $\vec{d}(t)$ (існує об'єктивний зворотний зв'язок), тобто $\dot{A} = \dot{A}[\vec{d}(t)]$. Врахування цих двох особливостей й прийняті вище обмеження визначають вид шуканого виразу:

$$\vec{d}_s(t) = \vec{d}_0 + \Delta_s \vec{d}(t); \quad (3)$$

$$\Delta_s \vec{d}_i(t) = \int_0^t \left\{ A[\vec{d}(t)] \cdot [\vec{x}(\tau) + N_b(\tau)] \right\}^T \vec{W}_i^s d\tau,$$

де \vec{W}_i^s - k-вектор коефіцієнтів впливу $\vec{s}(t)$ на $\vec{d}_i(t)$, $i = (1, n)$, $t \in [0, t_\delta]$.

На основі гіпотези суперпозиції об'єднаємо вирази (1), (2) та (3), у результаті чого отримаємо шукану узагальнену модель зміни поточного стану ОД:

$$\vec{d}(t) = \vec{d}_0 + \Delta_b \vec{d}(t) + \Delta_x \vec{d}(t) + \Delta_s \vec{d}(t). \quad (4)$$

При розробці моделі (4) приймаємо припущення про безперервність функціонування ОД на $[0, t_\delta]$. Для деяких об'єктів (наприклад, металоконструкції крану або тросової системи механізму підйому вантажу) це положення дійсно має місце. Існує великий клас ОД, котрі тільки частину часу відрізка $[0, t_\delta]$ використовуються за призначенням, а іншу частину знаходяться у режимі зберігання (до речі, вантажопідйомні крани відносяться саме до таких ОД). Позначимо тривалість і-того випадку використання ОД за призначенням відрізком часу $[t_i^I, t_i^E]$, тоді відрізок часу і-того випадку знаходження ОД у режимі зберігання може бути поданий у вигляді $[t_i^E, t_{i+1}^I]$, $i = (1, \overline{N})$, при цьому $t_1^I = 0$ й $t_N^E = t_\delta$, N - число випадків використання ОД за призначенням на відрізку $[0, t_\delta]$. Довжини відрізків часу зберігання й використання можуть суттєво відрізнитись одна від одної. Для прикладу на рисунку 2 наведений варіант рівномірного чередування цих відрізків на $[0, t_\delta]$.

Загальний вид моделі (4) для ОД з циклічним режимом експлуатації не змінюється. Але при цьому зміст виразів (1)-(3) певним чином трансформується. Елементи векторів $\Delta_x \vec{d}(t)$ й $\Delta_s \vec{d}(t)$ у виразах (2) і (3) будуть мати вид:

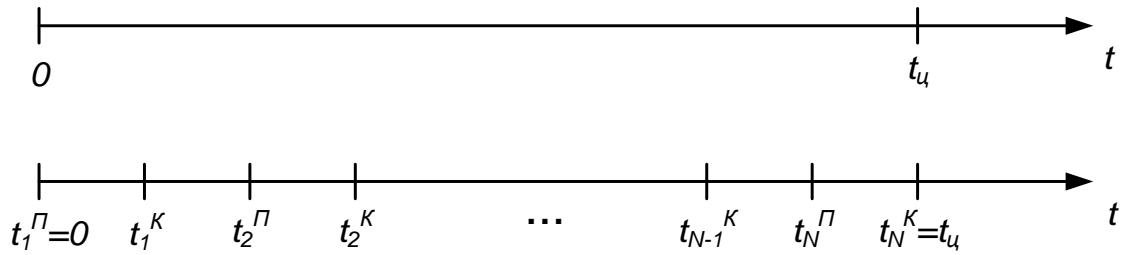


Рис. 2. Приклад рівномірного режиму експлуатації ОД.

$$\Delta_x \vec{d}_i(t) = \begin{cases} \Delta_x \vec{d}_{ij}(t) = \Delta_x \vec{d}_i(t_{j-1}^K) + \int_{t_j^i}^t [\vec{x}(\tau) + \vec{N}_b(t)]^T \vec{W}_i^x d\tau, & \forall t \in [t_j^i, t_j^E]; \\ 0, & \forall t \in [t_j^K, t_{j+1}^i], j = (\overline{1, N}); \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta_s \vec{d}_i(t) = \begin{cases} \Delta_s \vec{d}_i(t_{j-1}^K) + \int_{t_j^i}^t \{A[\vec{d}(t)] \cdot [\vec{x}(\tau) + N_b(\tau)]\}^T \vec{W}_i^s d\tau, & \forall t \in [t_j^i, t_j^E]; \\ 0, & \forall t \in [t_j^K, t_{j+1}^i], j = (\overline{1, N}). \end{cases} \quad (6)$$

Вектор змінних умов експлуатації характеризується тією особливістю, що певна частина його елементів $\vec{b}_*(t)$ продовжує справляти вплив на ТС об'єкту, навіть якщо ОД знаходиться в умовах зберігання. Тому вираз для $\Delta_b \vec{d}_i(t)$ у формулі (1) перетвориться у наступний:

$$\Delta_b \vec{d}_i(t) = \begin{cases} \Delta_b \vec{d}_{ij}(t) = \Delta_b \vec{d}_i(t_{j-1}^K) + \int_{t_j^i}^t \vec{b}^T(\tau) \cdot \vec{W}_i^b d\tau, & \forall t \in [t_j^i, t_j^E]; \\ \Delta_b \vec{d}_{ij}(t) = \Delta_b \vec{d}_i(t_j^K) + \int_{t_j^i}^t \vec{b}_*^T(\tau) \cdot \vec{W}_i^b d\tau, & \forall t \in [t_j^K, t_{j+1}^i], j = (\overline{1, N}); \\ j = (\overline{1, N}). \end{cases}$$

Згідно виразу (3) між $\vec{d}(t)$ й $\vec{s}(t)$ існує зворотній зв'язок. За своєю фізичною сутністю він зазвичай позитивний. Погіршення ТС об'єкту призводить до більш жорстких з позицій надійності режимів функціонування ОД, що у свою чергу, може розглядатись як додатковий вплив на елементи вектору $\vec{d}(t)$. Крім того, у технічних

системах, які працюють по замкненому циклу (вантажопідйомні крани та механізми, САУ, адаптивні системи), вхідний вплив $\vec{d}(t)$ організується у відповідності з деяким екстремальним значенням критерію, який залежить від $\vec{b}(t)$ й $\vec{d}(t)$. Наприклад, $\vec{x}(t) = F\{\vec{y}[\vec{b}(t), \vec{d}(t), t] - \vec{y}_T(t)\}$, де $\vec{y}_T(t)$ - вектор необхідних вихідних впливів ОД.

Для таких об'єктів вирази певним чином трансформуються. Аналіз цих виразів призводить до висновку про те, що замкнені режими функціонування є причиною додаткового впливу, що призводить до зміни змінних ТС.

На рис. 1. пунктирними лініями зображені дуги [2, 5], [5, 2], [2, 6], [6, 2]. Це умовне позначення випадкового взаємного впливу середовища, внутрішніх й вихідних змінних один на одного. Звичайно, врахування цієї взаємодії уточнює модель (4), але рівень її складності також зростає.

Актуальність розробки моделей зміни ТС обумовлена, з однієї сторони, діагностичними задачами щодо визначення фактичного ТС ОД, а з другої – неможливістю прямого вимірювання змінних ТС. Ці фактори, які знаходяться у протиріччі, ставлять проблему опосередкованої оцінки змінних ТС. Одним з можливих методів розв'язку цієї проблеми можна вважати розробку моделі зміни ТС.

Висновки. 1. Задача реалізації процесу побудови досить повної моделі зміни ТС конкретного ОД (вантажопідйомного механізму крану) пов'язана зі значними труднощами. Труднощі пояснюються перш за все великими розмірностями векторів $\vec{d}(t)$, $\vec{b}(t)$, $\vec{x}(t)$ й $\vec{s}(t)$, необхідністю складних експериментальних досліджень щодо оцінки елементів векторів \vec{W}_i^b , \vec{W}_i^x , \vec{W}_i^s , причому ці величини також можуть бути функціями часу, і необхідністю розробки моделі функціонування ОД (отримання явного виразу для оператора A).

2. Якщо модель зміни ТС побудована, тоді її використання за призначенням (наприклад, для оцінки ТС та його прогнозування) пов'язане з необхідністю безперервного вимірювання причин, які визначають процес зміни ТС, тобто елементів векторів $\vec{b}(t)$, $\vec{x}(t)$ й $\vec{s}(t)$.

3. Запропонована у даному дослідженні узагальнена модель зміни ТС вантажопідйомних механізмів кранів як об'єктів неперервного типу має, на думку авторів роботи, певне теоретичне значення й може бути у подальшому покладена в основу теорії діагностування подібних технічних (складних) систем. Наприклад, при розв'язуванні такої фундаментальної задачі технічної діагностики, як вибір множини параметрів ОД,

необхідних для достатньо повної оцінки його ТС, за основу дослідження прийняти модель (4), тоді ця задача може бути розв'язана у результаті визначення величин:

$$q_i = \frac{d[d_i(t)]}{dt} = \frac{d[\Delta_b d_i(t)]}{dt} + \frac{d[\Delta_x d_i(t)]}{dt} + \frac{d[\Delta_s d_i(t)]}{dt}, \quad (8)$$

та їх використання при аналізі співвідношень залежності на множині P .

ЛІТЕРАТУРА

1. Оре О. Графы и их применение / О. Оре. – М.: Мир, 1965. – 174 с.
2. Басакер Р. Конечные графы и сети / Р. Басакер, Т. Саати, М: Наука, 1974. – 220 с.
3. Берж К. Теория графов и ее применение / К. Берж. – М.: ИЛ, 1962. – 300 с.
4. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера / В.П. Сигорский. – К.: Техніка. 1975. – 800 с.
5. Харари Ф. Теория графов / Ф. Харари. – М.: Мир, 1973. – 365 с.
6. Белов В.В. Теория графов / В.В. Белов, Е.М. Воробьев, В.Е. Шаталов. – М.: Высшая школа, 1976. – 430 с.

УДК 621.873

В.С. ЛОВЕЙКІН, докт. техн. наук, Ю.О. РОМАСЕВИЧ, канд. техн. наук.
Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ РУХОМ ДВОМАСОВИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

Постановка проблеми. Велика кількість машин та механізмів може бути представлена двомасовими моделями [1, 2, 3]. Таке представлення необхідне для того, щоб провести динамічний аналіз руху цих машин, що дає змогу оцінити величину та характер зміни динамічних навантажень у їх ланках. Це, у свою чергу, дозволяє розрахувати елементи машини чи механізму за діючими навантаженнями.

Виникнення та еволюція динамічних навантажень пов'язана із структурою машини, її параметрами (коефіцієнти жорсткості та дисипації, маси та моменти інерції окремих елементів тощо) та зовнішніми впливами. Під зовнішніми впливами слід розуміти всі діючі на динамічну систему зусилля та моменти. Джерелами зовнішніх