

Євгеній Юрійович Сахно

доктор технічних наук, професор кафедри геодезії, картографії та землеустрою

Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна).

E-mail: evsakhno@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>. SCOPUS ID: 57190493489

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ МОДЕРНІЗОВАНОГО ГІДРОСТАТИЧНОГО ПІДШИПНИКА З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

У науковій статті наведені дослідження процесів моделювання роботи модернізованого гідростатичного підшипника з використанням елементів теорії графів. Показано, що вдосконалення полягає в тому, що в запропонованому регуляторі корпус оснащений електромагнітним датчиком, який працює в парі з кільцем із феромагнітними вставками, яке закріплено на валу гідростатичного підшипника. Також наведено теоретичні дослідження структурного моделювання технічної системи при проектуванні та аналізі її роботи з використанням матриць інцидентності.

Рис.: 4. Табл.: 4. Бібл.: 6.

Актуальність теми. Розглядаючи тему модернізації гідростатичних підшипників (ГСП), постає питання швидкого, цілеспрямованого силового впливу на зміну навантаження в гідростатичних опорах технологічного обладнання для компенсації навантажень, що відбуваються в процесі роботи устаткування. З'ясовано, що компенсація навантажень відбувається за рахунок подачі в опору додаткового об'єму робочої рідини безпосередньо в точці найбільшого контакту вала з перемичкою підшипника швидко й короткочасно, і після зменшення навантаження рух рідини припиняється. Для проведення подальших досліджень та визначення ймовірності стабільної та безвідмовної роботи технологічної системи рекомендовано використовувати теорію графів, що є досить коректним методом аналізу при структурному моделюванні, оскільки досить часто завдання комп'ютерного програмування можна подати у вигляді математичної моделі та вирішити поставлені завдання досить простими дослідницькими методами та прийомами. Крім цього, у процесі роботи не обов'язково використовувати графічні зображення об'єкта досліджень, достатньо відомих наукових підходів та імітаційного моделювання, що дає можливість отримувати заданий результат та підвищити ефективність проектних рішень.

Постановка проблеми. Враховуючи, що множину об'єктів можна використовувати для абстрагування практично будь-якого типу технічних даних, теорія графів (ТГ) дає можливість глибокого дослідження взаємозв'язку між заданими технічними параметрами гідростатичного підшипника, що дає адекватні відповіді на питань розташування, налаштування гідросистеми, оптимізації та узгодження режимів її функціонування. Крім того, у такій постановці завдання проектування структури технологічної системи та її використання дає можливість застосовувати апарати штучного інтелекту, що зменшує час і спрощує побудову математичної моделі роботи гідромережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Так, у роботах [1; 2] показано, що вирішення прикладних задач у сфері інформаційних технологій потребує адаптації інформації та її спирання на математичну основу, а знання способів побудови логічних математичних конструкцій на базі теорії графів необхідно для ефективного аналізу інформації та створення нових програмних комплексів. Також проаналізовано сучасні науково-методичні роботи з теорії графів на тему практичного застосування ТГ у різних галузях людського життя, виявлено основні напрями використання ТГ під час розв'язування типових задач логістики, оптимізації, програмування, хімії та біології. У монографії [3] показано, що гідростатичні підшипники разом з підвищенням надійності і продуктивності обробки дозволяють забезпечити виключно високі показники якості деталей у порівнянні з іншими типами шпindelьних опор. Робота [4] містить теоретичні матеріали, методики

структурного моделювання технічних систем та розрахунку параметрів їхньої надійності, які необхідні при проектуванні системних моделей. У роботі [5] показано, що класичним способом представлення графа є матриця інциденції, у якій вказуються зв'язки між інцидентними елементами графа (ребро і вершина). Стовпці матриці відповідають ребрам, рядки – вершинам, а ненульове значення в клітинці матриці вказує на зв'язок між вершиною і ребром, тобто їх інцидентність.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Таким чином, теорія графів може бути використана для моделювання парних взаємозв'язків між елементами заданої множини модернізованого ГСП. Використовуючи відповідні інформаційні підходи можливо отримати візуальну ілюстрацію заданих технічних параметрів та визначити ступінь відношень між ними. Використання запропонованого методу дозволяє представити надто численні або складні дані, для їх адекватного опису в системній моделі, з подальшою розробкою алгоритму та керуючою програмою управління роботи гідровузла. Забезпечення чіткості та коректності опису даних у графах також формує ефективність використання запропонованої теорії при моделюванні процесів та систем гідроавтоматики.

Мета статті. Метою цієї роботи є розроблення теоретичних підходів та практичних рекомендацій щодо проектування нової системи живлення гідростатичних опор з використанням теорії графів, що дає можливість з'ясувати зв'язки між параметрами технічної системи, що дозволяє розробляти технічні рішення для стабілізації положення вала при його зміщенні під навантаженням.

Результати досліджень. Загальновідомо, що наочно граф можна представити як геометричну конфігурацію, що складається з точок (вершин) і ребер (ліній або відрізків, які сполучають деякі точки) [1,2]. Нехай $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ деяка скінченна множина вершин, тоді M_2 – множина всіх невпорядкованих пар елементів з X ,

$$M_2 = \{(x_i, x_j) : x_i \in X, x_j \in X, i \neq j\}.$$

У результаті маємо граф $G(X, W)$ з парою множин $X, W \in M_2$, де множина X – це множина вершин, а W відповідно множина ребер. Якщо $(x_i, x_j) \in W$, то можна казати, що ребро (x_i, x_j) сполучає вершину x_i з вершиною x_j , тобто вони інцидентні.

Для моделювання гідростатичного підшипника з використанням теорії графів розглянемо основні елементи модернізованої гідромережі. В основу запропонованого винаходу поставлено задачу вдосконалити ГСП (див. патент України № 77639) шляхом усунення металевих контактів між спряженими поверхнями. Удосконалення полягає в тому, що в запропонованому регуляторі корпус оснащений електромагнітним датчиком, який працює в парі з кільцем, закріпленим на валу гідроопори. В останнє вмонтовано феромагнітні вставки і при переміщенні шийки вала під дією зовнішнього навантаження відбувається їх взаємодія, у результаті цього виникає електричний імпульсний сигнал, який подається до підсилювача імпульсу, а той, у свою чергу, передає його до електрогидравлічного клапана, через який додатковий об'єм робочої рідини подається до ГСП від окремeho насоса й за допомогою якого здійснюється компенсація витрат рідини в гідростатичному підшипнику [3; 6].

Запропонована конструкція складається з корпусу 10 (рис. 1), на якому закріплено датчик електромагнітного імпульсу ДІ, який має гвинт для регулювання зазору 8, підсилювач електричного імпульсу ПІ, електрогидравлічного клапана КІЗ, автономного джерела живлення системи Н2 та додаткового каналу 9. Контроль переміщень кривошипу під час перевантажень здійснюється за допомогою кільця 6 з феромагнітними вставками 5, що закріплене на корінній шийці кривошипу 4 гвинтами 7, встановленими під кутом 120°, і є проміжною ланкою між корінною шийкою 4 кривошипу 2 і датчиком електрич-

ного імпульсу ДІ. Після встановлення в кільце чотирьох феромагнітних вставок 5 (у прорізи через 90°), зовнішня поверхня кільця оброблена шліфуванням. У момент збільшення навантаження фізична вісь обертання вала 2 зміщується відносно геометричної осі. Під час запуску двигуна кривошип 2 завдяки роботі шатуна 1 починає обертатися, при цьому осьовий зазор δ_2 зменшується, і феромагнітна вставка 5 наближається до датчика ДІ, викликаючи підсилення збудження в котушці, унаслідок чого виникає стрибок напруги (імпульс). Далі сигнал потрапляє до підсилювача імпульсів ПІ, і подається до електрогідравлічного клапана КПЗ, який відкриває прохід рідині змащування від додаткової системи з тиском p_2 від насоса Н2 до гідростатичної опори 12, доповнюючи систему живлення від насосу Н1 через канал 3 з тиском p_1 . Величина компенсації тисків залежить від величини відкриття вікна каналу підводу рідини, яка своєю чергою залежить від величини переміщення кривошипу під навантаженням зі зменшенням робочого зазору δ_1 [6].

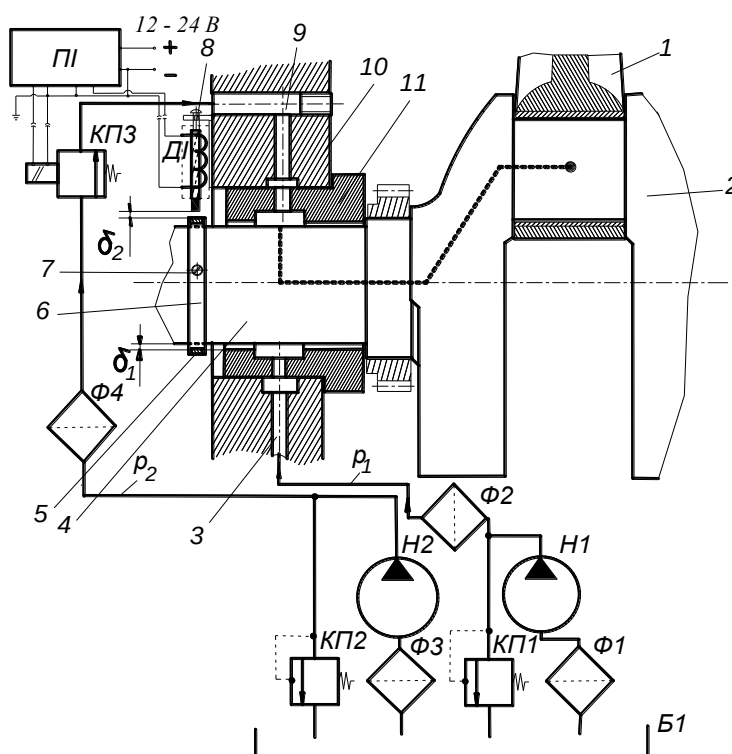


Рис. 1. Схема живлення модернізованого гідростатичного підшипника

Для побудови графа гідромережі введемо такі умовні позначення табл. 1.

Табл. 1 – Умовні позначення для створення графа гідромережі

N, пп	Найменування	Умовні позначення	Вершини графа
1	Бак	Б1	X ₁
2	Основний насос гідромережі	Н1	X ₂
3	Карман гідроопори	КО1	X ₃
4	Вал підшипника з кільцем	В1	X ₄
5	Датчик коливань	Д1	X ₅
6	Підсилювач сигналу	П1	X ₆
7	Додатковий насос гідромережі	Н2	X ₇
8	Клапан запобіжний	КЗ1	X ₈
9	Додаткові отвори ГСП	ДО1	X ₉
10	Виконавчий механізм	ВМ1	X ₁₀

Таким чином на основі табл. 1 будемо мати мультиграф або просто (орієнтований) граф G , який описується парою об'єктів $G = (X, \Gamma)$, де X – множина, а Γ – скінченна підмножина прямого добутку $X \times X \times Z$, де Z – множина невід'ємних цілих чисел. При цьому X називається множиною вершин, а Γ – множиною дуг графа G (рис. 2).

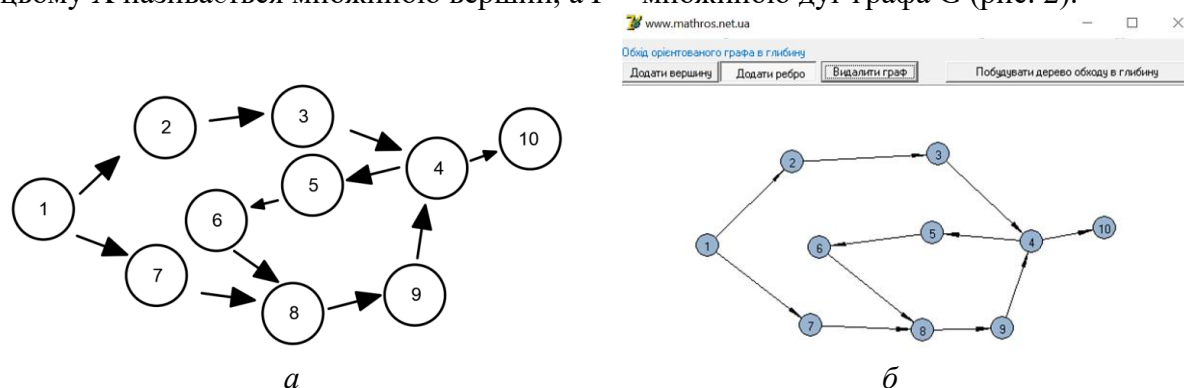


Рис. 2. Побудова графа гідромережі:
а – граф структури технічної системи;
б – граф у програмному комплексі із сайту Mathros.net.ua

Покажемо, як уведене визначення формалізує поняття графа гідромережі, що описана вище. Дугу (стрілку), що з'єднує вершини x_i, x_j , позначимо через (x_i, x_j, n) , де x_i , початок дуги, x_j – її кінець, а n – номер дуги. Таким чином, граф який зображено на рис. 2 може бути описаний такими аналітичними рівняннями:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}.$$

$$\Gamma = \{(x_1, x_2, 1), (x_2, x_3, 1), (x_3, x_4, 1), (x_4, x_{10}, 1), (x_4, x_5, 1), (x_5, x_6, 1), (x_6, x_7, 1), (x_1, x_7, 1), (x_7, x_8, 1), (x_8, x_9, 1), (x_9, x_4, 1)\}.$$

Проведемо аналіз структури технічної системи та зробимо розрахунок параметрів їхньої надійності [4]. Оберемо такі вихідні дані для розрахунку: граф заданої структури (рис. 2); ланцюг елементарної структури, що забезпечує надійність функціонування системи автоматизованого керування гідромережі і яку потрібно оцінити – 4, 5, 6, 8, 9; номери, які резервуються – 5, 8; ймовірність безвідмовності роботи ланок $p_4 = 0,98$, $p_5 = 0,85$, $p_6 = 0,88$, $p_8 = 0,91$, $p_9 = 0,98$; ймовірності резервованих ланок $p_{5R} = 0,89$, $p_{8R} = 0,93$; параметри розподілу випадкової величини (часу виконання операцій технічною системою): $\lambda = 0,18 \text{ год}^{-1}$, $t_0 = 3,0 \text{ год}$, $\sigma = 0,4 \text{ год}$.

Далі проведемо аналіз елементів заданого графа. Загальновідомо, що в орієнтованому графі ступенем виходу вершини v називають загальну кількість дуг, що закінчуються у вершині v , і її позначають $outdeg_v$. Ступенем входу вершини v називають кількість дуг, які починаються у вершині v , і її позначають $indeg_v$. Якщо $indeg_v = 0$, то вершину v називають джерелом, якщо $outdeg_v = 0$, то вершину v називають стоком. Висяча вершина може мати ступень виходу, яка дорівнює 1 та ступень входу, яка дорівнює 0 та навпаки [1; 2]. У табл. 2 представлено визначення ступеня вершин орієнтованого графа.

Табл. 2 – Ступені вершин графа

Вершини	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$indeg_v$	0	1	1	4	1	1	1	2	1	1
$outdeg_v$	2	1	1	2	1	1	1	1	1	0

Таким чином встановлено, що система має один вхід (вершина 1) і один вихід (вершина 10). Структура системи побудована коректно, оскільки не містить ізольованих вершин.

Визначаємо міру надлишкових зв'язків для цього графа побудувавши матрицю суміжності:

$$V = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

За відомими залежностями, використовуючи матрицю суміжності, визначаємо суму зв'язків у її рядках:

$$R = 2 + 1 + 1 + 2 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 0 = 12.$$

Тоді, враховуючи, що кількість вершин $n = 10$, міра надлишку зв'язків визначаються:

$$\alpha = \frac{R}{n-1} - 1 = \frac{12}{10-1} - 1 = 0,333.$$

У структурі ТС, яка аналізується, присутній надлишок зв'язків.

Для визначення діаметра структури знаходимо мінімальні шляхи між вершиною 1 і тупиковою 10. З аналізу графа очевидно, що $d_{\min 1-10} = 4$ ребра (шлях 1-2-3-4-10). Тоді діаметр структури визначаємо:

$$d = \max(d_{\min ij}) = \max(4) = 4.$$

Тут діаметр структури дорівнює найкоротшому шляху між одним входом і одним виходом із системи і становить 4 ребра.

Далі визначимо показник складності структури ТС. Проведемо аналіз її елементів і підрахуємо загальну кількість шляхів, які ведуть з однієї вершини 1 у одну тупикову 10: $\rho_{1-10} = 2$ (шляхи 1-2-3-4-10, 1-7-8-9-4-10). Підсумовуючи всі переховані шляхи та підставляючи їх у формулу, отримуємо:

$$\rho = \frac{1}{m_1 m_2} \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} \rho_{ij} - 1 = \frac{1}{1 \cdot 1} (2) - 1 = 1.$$

З результатів видно, що структура складна, оскільки структура з мінімальною складністю повинна мати показник $\rho = 0$.

Якщо розглянути основні показники надійності, то можна помітити, що всі вони за своїм характером є випадковими величинами. З цієї причини основним математичним апаратом, який застосовується для побудови математичних моделей надійності ТС та розрахунку її параметрів, є теорія ймовірностей і математична статистика. Оскільки ймовірність безвідмовної роботи ТС є найголовнішим показником надійності в усіх подальших прикладах, будемо розраховувати саме її значення [4]. Надійність роботи такий ТС можна розрахувати за залежністю:

$$P = p_1 p_2 p_3 \dots p_n = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (1)$$

де P – надійність системи; $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ – надійність окремих її елементів; n – кількість елементів системи.

Нерезервована ТС являє собою послідовне (за аналогією з провідниками в електротехніці) з'єднання n елементів, жоден з яких не має резерву, і у відмови одного елемента означає вихід з ладу всієї ТС. Якщо надійності окремих елементів системи рівні, тобто: $p_1 = p_2 = p_3 = \dots p_n$, то залежність (1) можна переписати у вигляді:

$$P = p^n \text{ чи } p = \sqrt[n]{P}. \quad (2)$$

Отже, при послідовному з'єднанні нерезервованих елементів, надійність ТС дорівнює добутку надійностей усіх елементів системи. Накреслимо структурні схему, яка містить визначені елементи (рис. 3, а).

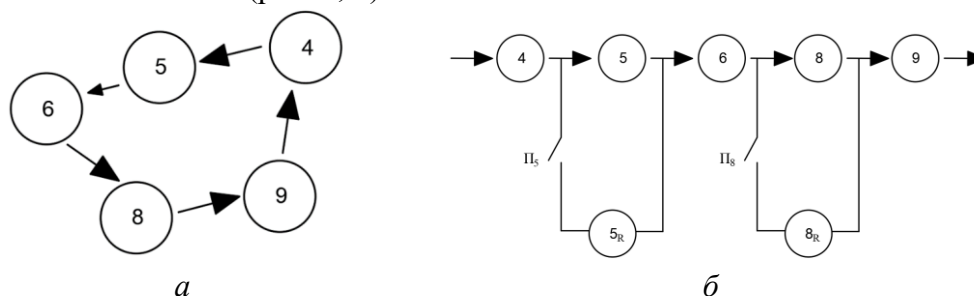


Рис. 3. а – елементарна структура до розрахунку параметрів надійності; б – схема резервування елементу ТС: 4, 5, 6, 8, 9 – основні елементи системи; 5_Р, 8_Р – резервні елементи системи; П₅, П₈ – перемикачі, які автоматично включаються в ланцюг резервні елементи у разі відмови основних

Для підвищення надійності ТС, в їх склад вводять резервні елементи для заміни основних елементів, які відмовили. Схема резервування ТС показана на рис. 3, б. Розрахуємо надійність елемента n з урахуванням його резерву – елемента n_p . Спочатку розрахуємо надійність резерву, який є ділянкою з послідовним з'єднанням резервного елемента n_p і перемикача Π_n . Згідно з (1), надійність такої ділянки визначиться:

$$p_p = p_{I_p} p_{\Pi_n} \quad (3)$$

Якщо продовжити аналогію з електротехнікою, таку систему можна розглядати як електричний ланцюг зі змішаним (паралельно-послідовним) з'єднанням елементів. В роботі [4] отримано залежність для розрахунку надійності такої системи:

$$P = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)(1 - p_{i_p} p_{\Pi_i})], \quad (4)$$

де p_p – надійність резерву; $p_{n_p} p_{\Pi_n}$ – надійності, відповідно, резервного елемента n і перемикача Π_n .

Таким чином, використовуючи наведені вище залежності, можна розрахувати ймовірність безвідмовної роботи ТС, якщо відомі ймовірності безвідмовної роботи всіх її елементів. Вказані ймовірності визначаються шляхом експериментальних досліджень з подальшою обробкою експериментальних даних за допомогою методів математичної статистики. Залежно від закону розподілу, яке застосовується при математичній обробці експериментів, отримують формули для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи ТС або її елемента [4]. Рішення цієї задачі виконуємо у два етапи.

Етап 1. Визначення еквівалентних можливостей для елементів 5 і 8:

$$p_{5e} = 1 - (1 - p_5)(1 - p_{5R} p_{\Pi 5}) = 1 - (1 - 0,85)(1 - 0,89 \cdot 0,97) = 0,9795;$$

$$p_{8e} = 1 - (1 - p_8)(1 - p_{8R} p_{\Pi 8}) = 1 - (1 - 0,91)(1 - 0,93 \cdot 0,97) = 0,9912.$$

Етап 2. Знаходження загальної ймовірності безвідмовної роботи ТС

$$p = p_4 p_{5e} p_6 p_{8e} p_9 = 0,98 \cdot 0,9795 \cdot 0,88 \cdot 0,9912 \cdot 0,98 = 0,82054.$$

Проведемо розрахунок ймовірності безвідмовної роботи ТС при виконанні нею задання випадкової тривалості. Для прикладу візьмемо технічна система – верстат з ЧПК для обробки заготовок складної просторової форми, функціонування якого характеризується потоком збоїв з інтенсивністю $\lambda = 0,18 \text{ год}^{-1}$. Тривалість обробки заготовок є випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом із середнім часом $t_0 = 3,0 \text{ год}$ і середнім квадратичним відхиленням $\sigma = 0,4 \text{ год}$. Ймовірності того, що під обробки довільної обробки заготовки не буде збою у роботі верстата така [4]:

нормальне значення: $W(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}$; точне вираження: $W(t) = e^{-0,18 \cdot 3 + \frac{0,4^2 - 0,18^2}{2}} = 0,58$;

приблизне вираження: $W(t) = 1 - 0,18 \cdot 3 + \frac{0,18^2(3^2 + 0,4^2)}{2} = 0,6$.

На сьогодні важливим завданням системного моделювання складних організаційно-технічних об'єктів є виявлення взаємозв'язків між елементами, що зводиться до їх кількісного опису. Тому згідно з поставленою метою проведемо дослідження взаємозв'язків гідромережі з використанням матриці суміжності [5]. Матрицею суміжності мультиграфа $G = (X, \Gamma)$ будемо називати матрицю розміру $n \times n$, де $n = |X|$, у якій елемент a_{ij} , дорівнює числу елементів Γ , що мають вигляд (x_i, x_j, m) . У графі без кратних дуг елементи a_{ij} , можуть дорівнювати одиниці або нулю залежно від того, чи входить дуга в (x_i, x_j) у Γ чи ні. Для побудови матриці інцидентності всієї гідромережі проведемо ініціалізацію ТС та визначимо вхідні та вихідні параметри гідровузла (табл. 3).

Таблиця 3 – Параметри ініціалізації технічної системи

Вхідні параметри $x(t)$		Вихідні параметри $y(t)$	
$x_1(t)$	Осьове та радіальне навантаження	$y_1(t)$	Несуча здатність(жорсткість)
$x_2(t)$	Частота обертання валу	$y_2(t)$	Амплітудно-частотні характеристики
$x_3(t)$	Тип тертя в опорі	$y_3(t)$	Рівень коливань ротора
$x_4(t)$	В'язкість робочої рідини	$y_4(t)$	Термін служби роторного вузла
$x_5(t)$	Геометричні параметри роторного вузла	$y_5(t)$	Енерговитрати та експлуатаційні витрати
$x_6(t)$	Статична та динамічна невірноваженість ротора	$y_6(t)$	Зміщення вала
$x_7(t)$	Тиск та витрати робочої рідини	$y_7(t)$	Робочий зазор в підшипнику
		$y_8(t)$	Температура підшипника

Розглянемо відношення $R_{(T)}$ між x і y як бінарні, які відображають необхідні параметри множини X_i для визначення відповідних елементів множини Y_i , тоді $R_{(I)} \subset X \times Y$ є відношення процесу ініціалізації. Кінцеве відношення представляється за допомогою фактор-множини або за допомогою матриці (табл. 4.).

Табл. 4 – Матриця інцидентій

$x \backslash y$	$y_1(t)$	$y_2(t)$	$y_3(t)$	$y_4(t)$	$y_5(t)$	$y_6(t)$	$y_7(t)$	$y_8(t)$
$x_1(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$x_2(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$x_3(t)$	1	1	1	1	1	0	0	1
$x_4(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$x_5(t)$	1	1	1	0	1	1	1	1
$x_6(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1
$x_7(t)$	1	1	1	1	1	1	1	1

Матричне представлення відносин ґрунтується на тому, що стовпці відповідають першим параметрам, а рядки другим параметрам. На перетині i -того стовпця та j -того рядка ставимо одиницю, якщо виконано відношення між x_i та y_j , і нуль, якщо це відношення не виконується.

Бінарне рівняння буде:

$R_T = f\{(x_1, y_1); (x_1, y_2); (x_1, y_3); (x_1, y_4); (x_1, y_5); (x_1, y_6); (x_1, y_7); (x_1, y_8); (x_2, y_1); (x_2, y_2); (x_2, y_3); (x_2, y_4); (x_2, y_5); (x_2, y_6); (x_2, y_7); (x_2, y_8); (x_3, y_1); (x_3, y_2); (x_3, y_3); (x_3, y_4); (x_3, y_5); (x_3, y_8); (x_4, y_1); (x_4, y_2); (x_4, y_3); (x_4, y_4); (x_4, y_5); (x_4, y_6); (x_4, y_7); (x_4, y_8); (x_5, y_1); (x_5, y_2); (x_5, y_3); (x_5, y_5); (x_5, y_6); (x_5, y_7); (x_5, y_8); (x_6, y_1); (x_6, y_2); (x_6, y_3); (x_6, y_4); (x_6, y_5); (x_6, y_6); (x_6, y_7); (x_6, y_8); (x_7, y_1); (x_7, y_2); (x_7, y_3); (x_7, y_4); (x_7, y_5); (x_7, y_6); (x_7, y_7); (x_7, y_8)\}$.

Цю матрицю інцидентностей можна використовувати при розробці програм для інформаційної системи та нейромережевого моделювання гідромережі. Композиція відносин $R_{(T)} \subset X \times Y$ представляється за допомогою графу (рис. 4).

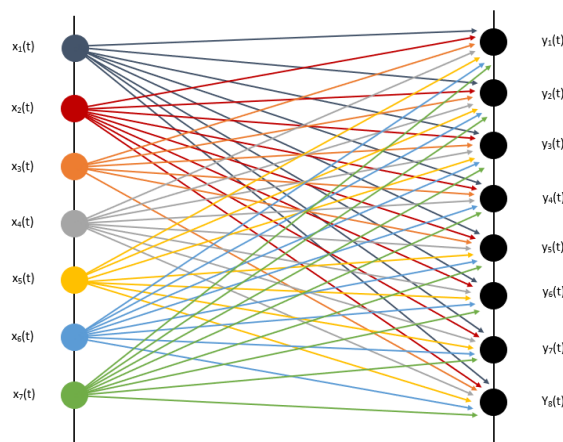


Рис. 4. Граф впливів параметрів гідромережі

З аналізу роботи ТС та графу впливів зрозуміло, що всі входні та вихідні параметри гідромережі пов'язані між собою, а мова може йти лише про ступінь зв'язку між елементами. Ці зв'язки тією чи іншою мірою представлено в науково-технічній літературі, деякі досить ретельно, деякі потребують подальших досліджень. Проте рішення поставленої задачі у вигляді графа дає можливість зрозуміти відносини між елементами гідромережі, що дає можливість проводити подальше моделювання (регресійний, кореляційний аналіз) та керувати параметрами гідросистеми при зміні силового навантаження на вал ГСП.

Висновки. На основі вищезазначеного можна стверджувати, що розробка теоретичних підходів аналізу модернізованого гідростатичного підшипника на основі теорії графів, що адекватно відображають технологічні процеси в ТС, є важливим та актуальним завданням наукового дослідження роботи щодо протікання робочих процесів під час роботи гідромережі. Також на основі вищезазначеного можна стверджувати, що розробка математичних моделей рідинного впливу на вал гідростатичного підшипника, що досить коректно відображають технологічні процеси з використанням сучасної теорії графів, є важливим та актуальним завданням, вирішення якого дозволить отримати нові знання щодо функціонування елементів технологічної системи з можливістю керування технічними параметрами її елементів.

Список використаних джерел

1. Кузьменко, І. М. (2020). *Теорія графів: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерний моніторинг та геометричне моделювання процесів і систем» спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»*. КПІ ім. Ігоря Сікорського.
2. Бобрицька, Г.С. (2017). Прикладне застосування теорії графів у різних сферах життя суспільства та окремої особистості. *Фізико-математична освіта*, 3, 26-30.
3. Федориненко, Д. Ю., Сапон, С. П. (2016). *Шпindelні гідростатичні підшипники: монографія*. ЧНТУ.
4. Федорович С. А., Литовченко П. І. (Уклад.). (2004). *Методичні вказівки та завдання до контрольних робіт з курсу «Теорія технічних систем» для студентів спеціальності 7.090202 «Технологія машинобудування» денної та заочної форм навчання*. НТУ "ХПІ".
5. DMOJ: Modern Online Judge. (б.д.). Матриця інцидентності – DMOJ: Modern Online Judge. <https://dmoj.uzhnu.edu.ua/problem/122>.
6. Сахно, Є. Ю. (2022). Визначення основних параметрів модернізованого гідростатичного підшипника з урахуванням зміщення вала під навантаженням. *Технічні науки та технології*, 1(27), 7-15.

References

1. Kuzmenko, I.M. (2020). *Teoriia hrafiv: navch. posib. dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra za osvituioi prohramoiu «Kompiuterni monitorynh ta heometrychne modeliuvannia protsesiv i system» spetsialnosti 122 «Kompiuterni nauky»* [Graph theory: teaching. manual for bachelor's degree holders in the educational program "Computer monitoring and geometric modeling of processes and systems" specialty 122 "Computer science"]. KPI named after Igor Sikorskyi.
2. Bobrytska, G.S. (2017). *Prykladne zastosuvannia teorii hrafiv u riznykh sferakh zhyttia suspilstva ta okremoï osobystosti* [Applied application of graph theory in various spheres of society and individual life]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and mathematical education*, 13, 26-30.
3. Fedorovych, S.A., Litovchenko, P.I. (2004). *Metodychni vkazivky ta zavdannia do kontrolnykh robot z kursu «Teoriia tekhnichnykh system» dlia studentiv spetsialnosti 7.090202 «Tekhnolohiia mashynobuduvannia» dennoi ta zaochnoi form navchannia* [Methodological instructions and tasks for control papers from the course "Theory of technical systems" for students of the specialty 7.090202 "Technology of mechanical engineering" of full-time and correspondence forms of study]. NTU "KhPI".
4. Fedorinenko, D.Y., Sapon, S.P. (2015). *Shpyndelni hidrostatychni pidshypnyky* [Spindle hydrostatic bearings]. Chernihiv. Nats. Technol. Un-t.
5. DMOJ: Modern Online Judge. (n.d.). Matrytsia intsydentnosti [Incidence matrix]. <https://dmoj.uzhnu.edu.ua/problem/122>.
6. Sakhno, E.Y. (2022). *Vyznachennia osnovnykh parametriv modernizovanoho hidrostatychnoho pidshypnyka z urakhuvanniam zmishchennia vala pid navantazhenniam* [Determination of the main parameters of the modernized hydrostatic bearing taking into account the displacement of the shaft under load]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 1(27), 7-15.

Отримано 20.01.2025

UDC 621.92

Yevgeniy Sakhno

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management,
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: evsakhno@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9789-7242>. SCOPUS ID: 57190493489

MODELING OF WORKING PROCESSES OF A MODERNIZED HYDROSTATIC BEARING USING ELEMENTS OF GRAPH THEORY

Continuing the topic of modernization of hydrostatic bearings, the issue of rapid, targeted force influence on the change in load in hydrostatic supports of technological equipment to compensate for loads occurring during the operation of the product becomes relevant.

For further research and determination of the probability of stable and uninterrupted operation of the technological system, it is recommended to use graph theory, which is a fairly correct method of analysis in structural modeling, since quite often computer programming tasks can be presented in the form of a video platform and the tasks set can be solved using straightforward research methods and techniques.

The purpose of this work is to formulate theoretical frameworks and practical guidelines for the design of a novel hydrostatic support power supply system utilising graph theory. This approach enables the elucidation of the relationships between the parameters of the technical system, thereby facilitating the development of technical solutions for the stabilisation of the shaft's position during displacement under load.

Given that a set of objects can be used to abstract almost any type of technical data, graph theory allows for in-depth study of the relationship between the given technical parameters of a hydrostatic bearing, which provides adequate answers to the questions of location, hydraulic system configuration, optimization and coordination of operating modes. In addition, in this formulation of the task of designing the structure of a technological system and its use, it is possible to use artificial intelligence devices, which reduces time and simplifies the construction of a mathematical model of the hydraulic system.

Keywords: graph, hydrostatic bearing, incident matrix.

Fig.: 4. Table: 4. References: 6.