

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

На тему: « **ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СТІЙКОСТІ ОБЕРТАННЯ РОТОРА
ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРА С325 ГЦ2-65 6/6 56М12** »

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: Комп'ютерна механіка

Виконав: студент групи *КМ.М-91*:

Стремоухов Д. О.

Керівник: проф. Симоновський В. І.

Рецензент: Холод В.Б.

SUMSST

SUMS

SUMS

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра: 55 с., 28 рис., 3 граф., 1 табл., 12 джер..

Об'єкт дослідження – відцентрового компресора С325 ГЦ2-65 6/6 56М12.

Предмет досліджень – стійкість ротора відцентрового компресора .

Мета роботи – оцінка впливу циркуляційних сил в проточній частині та параметрів підшипників на стійкість роторів відцентрових компресорів.

Методи дослідження – чисельний метод розрахунку власних частот і форм коливань ротора відцентрового компресора із застосування програмного комплексу MathCAD; аналітичний метод побудови трьохмасової моделі ротора; розрахунок стійкості роторної 2-масової системи із застосуванням програми Равлюк.

В роботі були поставлені наступні задачі:

1. За допомогою методу скінченних елементів оцінити дискретну 3-масову модель ротору.
2. Побудувати дискретну лінійну модель коливань ротора відцентрового компресору С325 ГЦ2-65 6/6 56М12 КС «Газлі»..
3. Розрахувати області стійкості обертання в залежності від можливих значень коефіцієнтів циркуляційних сил у проточній частині та коефіцієнту демпфування підшипників.
4. Проаналізувати вплив підшипників та циркуляційних сил в проточній частині відцентрового компресору на стійкість ротора.

В результаті проведених розрахунків було знайдено та побудовано області стійкості для ротору відцентрового компресору в результаті чого було виявлено закономірність впливу величини коефіцієнту циркуляційних сил у проточній частині та параметрів підшипників на стійкість обертання.

**ДИСКРЕТНА МОДЕЛЬ РОТОРА, ОБЛАСТЬ СТІЙКОСТІ,
ЦИРКУЛЯЦІЙНА СИЛА, ТРЬОХМАСОВА МОДЕЛЬ РОТОРА.**

ЗМІСТ

Список головних позначень.....	7
Вступ.....	8
1. Об'єкт дослідження.....	11
2. Побудова дискретної лінійної моделі ротора.....	14
2.1 Знаходження власних частот і форм СЕ-моделі ротора.....	14
2.2 Висновки.....	15
3. Метод побудови неконсервативної дискретної моделі для роторної системи.....	16
3.1 Розрахунок еквівалентних для трьохмасової дискретної моделі ротора	16
3.2 Висновки.....	22
4. Дослідження стійкості ротора відцентрового компресору.....	23
4.1 Побудова полегшеної, нелінійної 2-масової моделі ротора.....	23
4.2 Знаходження областей стійкості для ротору з використання програми Равлюк при умові відсутності циркуляційної сили в проточній частині відцентрового компресору	27
4.3 Знаходження областей стійкості для ротору в програмі Равлюк з врахуванням величини коефіцієнту циркуляційних сили в проточній частині.....	29
4.4 Висновки.....	31
Висновки	32
Перелік посилань.....	33
Додаток А.....	35
Додаток Б.....	36
Додаток В.....	37
Додаток Г.....	39
Додаток Д.....	41
Додаток Е.....	42
Додаток Є.....	54

СПИСОК ГОЛОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ω – частота обертання ротора;
- ω_p – робоча частота обертання ротора;
- $\omega_{гр}$ – гранична частота обертання для області стійкості;
- $m_{екв}$ – еквівалентна маса ротора;
- c – жорсткість ротора;
- $Q_{гч}$ – коефіцієнт циркуляційної сили в проточній частині;
- E – модуль пружності;
- x_i, y_i – координати мас ротора [$i=1,2,3$];
- m_i – i -та маса дискретної моделі
- ρ – щільність рідини;
- R – характеристичний показник;
- ПК – портативний комп'ютер;
- МСЕ – метод скінченних елементів;
- ЕОМ – електронно-обчислювальна машина.

ВСТУП

Агрегати (машини) основним блоком яких є ротор – а саме, вал із встановленими на ньому робочими блоками (органами), котрі обертаються, себто роторні агрегати, представляють собою найбільший клас агрегатів. Ротор є центральним елементом (органом) в енергетичних машинах (відцентрових насосах, турбінах, компресорах та турбокомпресорах), машинах текстильної та хімічної промисловості, електричних машинах (синхронних та асинхронних двигунах, синхронних генераторах) та багато іншого. Ротор є визначальним знаряддям, котрий призначається для перетворення теплової енергії пару в механічну, котра застосовується в різноманітних сферах промисловості та в техніці, а саме в парових турбінах на теплоелектроцентралях (ТЕЦ) та газокompресорних станціях.

Для збільшення потужностей та зменшення габаритних розмірів відцентрових компресорів безперервно збільшують швидкість обертання роторів, в результаті чого ротор вимушений обертатися за першою критичною частотою, що тривалий період вважало неможливим.

Внаслідок переходу через першу критичну частоту ротор виробляє шкідливі вібрації, котрі мають негативний вплив на цілісність самого агрегату. Поняття вібрації включає в себе цілий комплекс понять: дрижання (тремтіння), гуготіння, тряска, стукіт і т.д.. Механічні коливання ротора тоб-то вібрація призводить до проявлення акустичних ефектів які елементарно помітити. Коливання ротора (вібрація) призводить до підвищеного зносу модулів, що в свою чергу призводить до зменшення надійності та робочого ресурсу агрегатів та механізмів.

У зв'язку з цим в переважаючій кількості випадків технічний стан роторних агрегатів визначається, насамперед, їхніми вібро-акустичними параметрами, котрі визначаються переважно вібраційним станом ротора. В процесі роботи ротор викликає та піддається коливанням широкого спектру,

як від типів коливань (радіальні, кутові, торсіонні (крутні), осьові) так і у відношенні частот.

Відцентрові агрегати (машини) через прояв гідродинамічні процеси в проточній частині, продукують коливання переважно більш потужні та значно ширші за спектральним складом аніж ротори агрегатів інших класів. В результаті розвинутої системи ущільнень в проточної частини відцентрових компресорів характерна утрата стійкості та поява коливань, властивих нелінійним системам.

В конструкції нових моделей відцентрових машин (агрегатів) частота обертання ротора здебільшого досягає другої або третьої критичної частоти, що насамперед вводить жорсткі вимоги до вібронадійності, котра переважно залежить від точності та достовірності динамічних розрахунків на ранній стадії проектування.

Враховуючи результати досліджень маємо змогу оцінити вплив циркуляційних сил в проточній частині та параметрів підшипників на динамічну стійкість ротора та побачити, як урахування впливу циркуляційних сил та параметрів підшипників дає можливість більш точно оцінити область стійкості частот обертання.

Мета роботи – оцінка впливу циркуляційних сил та параметрів підшипників на стійкість роторів відцентрових компресорів.

В роботі були поставлені наступні задачі:

1. За допомогою методу скінченних елементів провести оцінку дискретної 3-масової моделі ротора.
2. Скласти систему ДР 3-масової моделі ротора, яка враховує вплив циркуляційних сил та параметрів підшипників на стійкість ротора.
3. Побудувати області стійкості для ротору відцентрового компресора С325 ГЦ2-65 6/6 56М12.
4. Провести аналіз впливу на стійкість ротора циркуляційних сил в проточній частині та коефіцієнту демпфування підшипників .

Об'єкт дослідження – відцентровий компресор С325ГЦ2-650/6-56М12.

Методи дослідження - розрахунок стійкості роторної системи з використанням програми Равлюк й аналітичний метод побудови 3-х масової моделі ротора.

В результаті розрахунків була отримана 3-х масова модель ротора відцентрованого компресора й система диференціальних рівнянь, котра враховує вплив циркуляційних сил та параметрів підшипників на стійкість ротора.

Робота магістра складається з вступу, 4-х розділів, висновків та переліку посилань.

Перший розділ присвячений приведенню даних про об'єкт досліджень.

Другий розділ присвячений побудові 3-масової динамічної моделі.

В третьому розділі було побудовано неконсервативну дискретну модель ротору.

У четвертому розділі йдеться про аналіз областей стійкості частоти обертання ротора..

1. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

В роботі об'єктом дослідження виступає ротор (Рис. 1.1) відцентрового компресору С325ГЦ2-650/6-56М12 КС Газлі (Рис. 1.2). Відцентрові компресори даного класу призначені для перекачування природного газу. Ротори компресорів даного класу – гнучкі, тобто, такі частота обертання ротора яких перевищує 3-ю критичну частоту обертання. Схему ротору відцентрового компресора наведено на (Рис. 1.3). Технічні характеристики для відцентрового компресора приведені в таблиці 1.1.



Рис 1.1 –Вигляд ротора відцентрового компресора С325ГЦ2-650/6-56М12

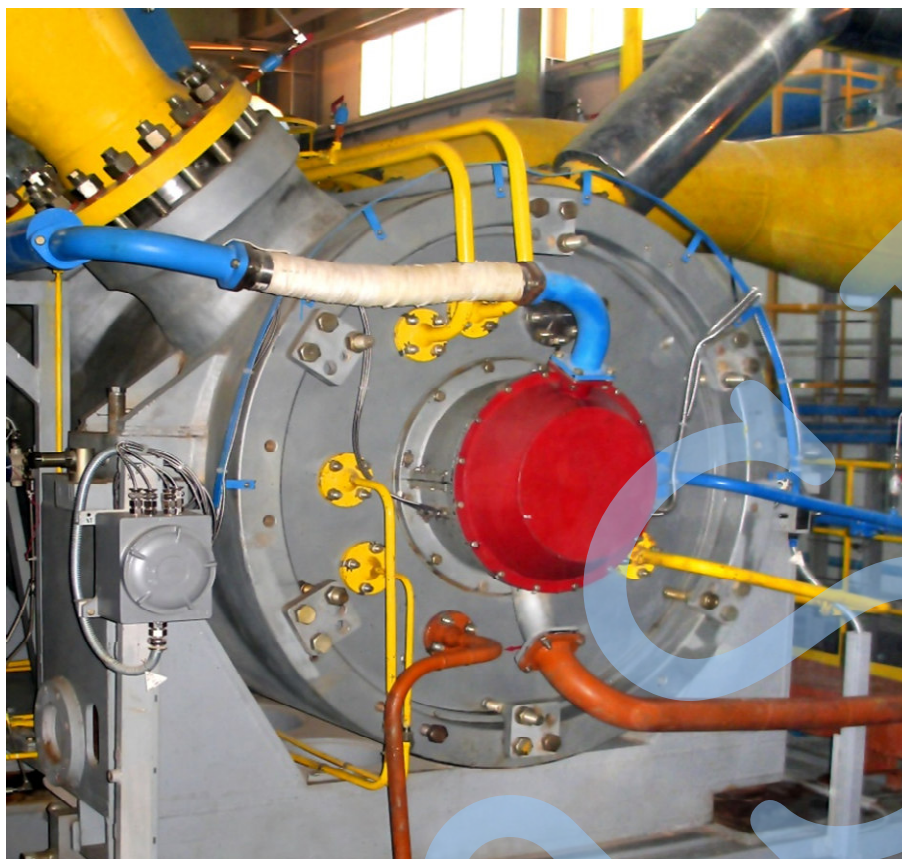


Рис 1.2 – Компресор відцентрового компресору С325ГЦ2-650/6-56М12 КС Газлі

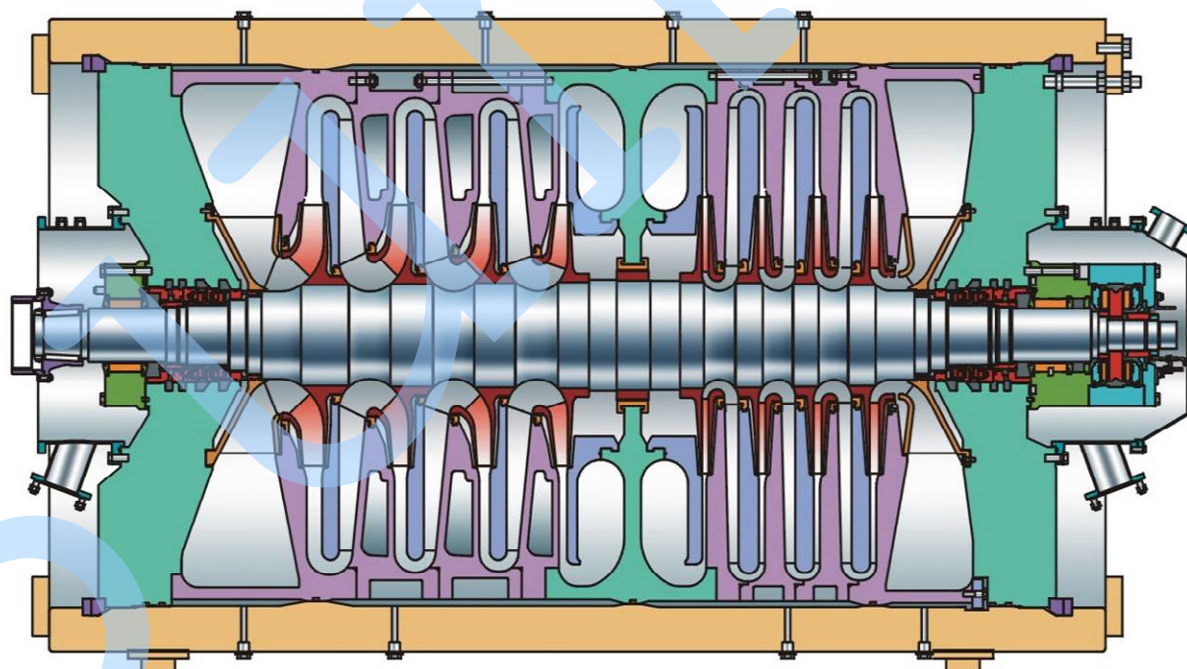


Рис 1.3 – Переріз ротору відцентрового компресора



Рис 1.4 – Корпус відцентрового компресора С325ГЦ2-650/6-56М12 КС Газлі

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики відцентрового компресор

Продуктивність роботи, (млн.м3/доб)	5.4
Початковий абсолютний тиск, МПа (кгс/см ²)	6
Кінцевий абсолютний тиск, МПа (кгс/см ²)	56
Відношення тисків	9.4
Частота обертання ротора (об/хв)	7500
Потужність, МВт	25
Вага, т	47

2. ПОБУДОВА ДИСКРЕТНОЇ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ

2.1 Знаходження власних частот і форм СЕ-моделі ротора

Щоб розрахувати власні частоти та форми коливання ротора скористаємося методом скінченних елементів (МСЕ). Для проведення розрахунку застосуємо програму створену на базі методу скінченних елементів для балочних систем в програмному комплексі Mathcad. Було побудовано модель ротора, яка урахувала геометричні параметри ділянок ротора, котрі приведені в додатку А. Для опису кожної ділянки ротора були використані наступні параметрами: внутрішній та зовнішній діаметр, довжиною валу ротора, коефіцієнт жорсткості на краях ділянки та величина зосередженої точкової маси, густина матеріалу ($\rho = 7.85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), модуль пружності ($E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$). Розрахункову схему ротора, що враховує всі перераховані вище параметри наведено на рисунку 2.1.

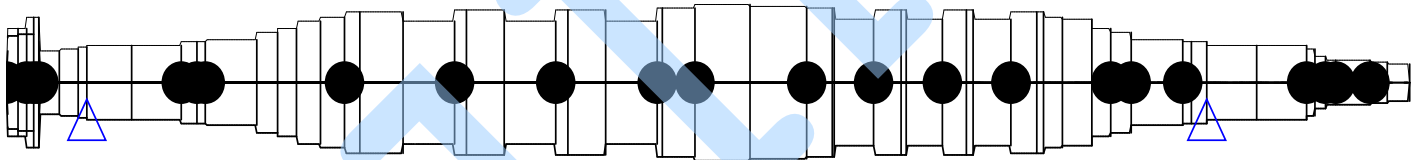


Рис. 2.1 – Розрахункова схема ротора; ● – місце розташування зосередженої точкової маси; Δ – місце розташування пружної опори.

У наслідку обчислень були отримано перші три критичних частоти

$$\omega = (308\ 991\ 1689) \text{ с}^{-1}.$$

та відповідні власні форми коливань ротора. Графіки для власних форм коливання ротора приведені в додатку Б. Таблиці значень функцій форм вільних коливань ротора наведені в Додатку В.

2.2 Висновки

1. У даному розділі було розглянуто скінченну елементну модель ротора, на основі якої розраховано власні частоти та форми коливань для ротору заданого компресору.

2. Було одержано значення перших трьох критичних част, які дорівнюють:

$$\omega_1 = 308 \text{ с}^{-1}, \omega_2 = 991 \text{ с}^{-1}, \omega_3 = 1689 \text{ с}^{-1}$$

3. МЕТОД ПОБУДОВИ НЕКОНСЕРВАТИВНОЇ ДИСКРЕТНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ РОТОРНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Розрахунок еквівалентних мас для трьохмасової дискретної моделі ротора

Розрахункова хема 3-масової дискретної моделі ротора наведена на рисунку 3.1. Скориставшись СЕ-моделлю було отримано коефіцієнти впливу λ_{ij} сил F_j прикладених в j -й точці на переміщення x_i i -ї точки. Коефіцієнт λ_{ij} визначається за допомогою програми вимушених коливань ротора, як прогин ротора в i -й точці при прикладеному в j -й точці дисбалансу $D = 1$ та при частоті обертання ротора $\omega = 1$.

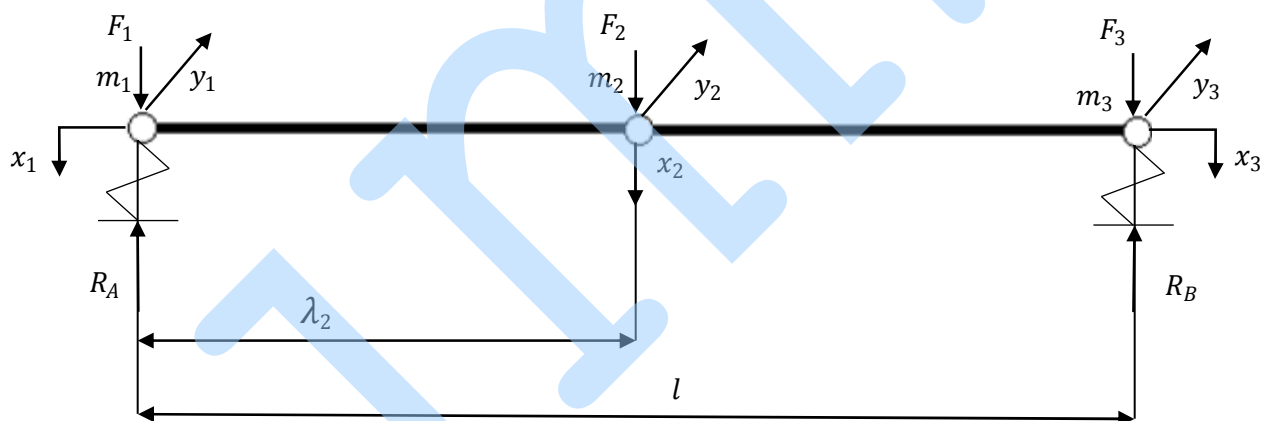


Рис. 3.1 – Розрахункова схема 3-масової дискретної моделі ротора

Запишемо систему диференціальних рівнянь (3.1) вільних коливань ротора в зворотній формі:

$$\begin{cases} x_1 = \lambda_{11}F_1 + \lambda_{12}F_2 + \lambda_{13}F_3 \\ x_2 = \lambda_{21}F_1 + \lambda_{22}F_2 + \lambda_{23}F_3 \\ x_3 = \lambda_{31}F_1 + \lambda_{32}F_2 + \lambda_{33}F_3 \end{cases} \quad (3.1)$$

В систему диференційних рівнянь (3.1) використовуючи принцип Д'Аламбера підставимо рівність (3.2).

$$F_j = -m_j \cdot x_j \quad (3.2)$$

В результаті підстановки 3.2 в 3.1 маємо систему диференційних рівнянь вільних коливань (3.3) лінійної 3-хмасової моделі ротора.

$$\begin{cases} x_1 = -\lambda_{11}m_1\ddot{x}_1 - \lambda_{12}m_2\ddot{x}_2 - \lambda_{13}m_3\ddot{x}_3 \\ x_2 = -\lambda_{21}m_1\ddot{x}_1 - \lambda_{22}m_2\ddot{x}_2 - \lambda_{23}m_3\ddot{x}_3 \\ x_3 = -\lambda_{31}m_1\ddot{x}_1 - \lambda_{32}m_2\ddot{x}_2 - \lambda_{33}m_3\ddot{x}_3 \end{cases} \quad (3.3)$$

Для знаходження розв'язку коливань дискретних мас x_1, x_2, x_3 подамо рівність у вигляді:

$$\begin{cases} x_1 = B \cdot \sin(\omega t), \\ x_2 = B \cdot \sin(\omega t), \\ x_3 = B \cdot \sin(\omega t), \end{cases} \quad (3.4)$$

Підставивши (3.4) в (3.3) та скоротивши на $\sin(\omega t)$, маємо:

$$\begin{cases} B_1 = \lambda_{11}m_1B_1\omega^2 + \lambda_{12}m_2B_2\omega^2 + \lambda_{13}m_3B_3\omega^2 \\ B_2 = \lambda_{21}m_1B_1\omega^2 + \lambda_{22}m_2B_2\omega^2 + \lambda_{23}m_3B_3\omega^2 \\ B_3 = \lambda_{31}m_1B_1\omega^2 + \lambda_{32}m_2B_2\omega^2 + \lambda_{33}m_3B_3\omega^2 \end{cases} \quad (3.5)$$

Введемо заміну $\omega^2 = z$ та згрупуємо:

$$\begin{cases} (\lambda_{11}m_1 - z)\mathbf{B}_1 + \lambda_{12}m_2\mathbf{B}_2 + \lambda_{13}m_3\mathbf{B}_3 = 0 \\ \lambda_{21}m_1\mathbf{B}_1 + (\lambda_{22}m_2 - z)\mathbf{B}_2 + \lambda_{23}m_3\mathbf{B}_3 = 0 \\ \lambda_{31}m_1\mathbf{B}_1 + \lambda_{32}m_2\mathbf{B}_2 + (\lambda_{33}m_3 - z)\mathbf{B}_3 = 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Скоротивши систему рівнянь (3.6) на \mathbf{B}_1 прийдемо до вигляду:

$$\begin{cases} (\lambda_{11}m_1 - z) + \lambda_{12}m_2U_2 + \lambda_{13}m_3U_3 = 0 \\ \lambda_{21}m_1 + (\lambda_{22}m_2 - z)U_2 + \lambda_{23}m_3U_3 = 0 \\ \lambda_{31}m_1 + \lambda_{32}m_2U_2 + (\lambda_{33}m_3 - z)U_3 = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Оскільки з розрахунку скінченної елементної моделі тепер відомі значення власних частот ω_k (а отже, відомі і відповідні \mathbf{z}_k) та відносні амплітуди вільних коливань на власних частотах $U_i^{(k)}$ (i – номер маси; k – номер власної частоти), можемо аналізувати задачу оцінювання, за параметри якої оберемо маси дискретної моделі (3.8).

Запишемо рівність (3.7) в наступному вигляді:

$$\bar{\mathbf{D}} * \bar{\mathbf{m}} = \bar{\mathbf{C}} \quad (3.8)$$

Де $\bar{\mathbf{D}}$ – матриця розмірністю (9×3) :

$$\bar{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12}U_2^{(1)} & \lambda_{13}U_3^{(1)} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22}U_2^{(1)} & \lambda_{23}U_3^{(1)} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32}U_2^{(1)} & \lambda_{33}U_3^{(1)} \\ \lambda_{11} & \lambda_{12}U_2^{(2)} & \lambda_{13}U_3^{(2)} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22}U_2^{(2)} & \lambda_{23}U_3^{(2)} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32}U_2^{(2)} & \lambda_{33}U_3^{(2)} \\ \lambda_{11} & \lambda_{12}U_2^{(3)} & \lambda_{13}U_3^{(3)} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22}U_2^{(3)} & \lambda_{23}U_3^{(3)} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32}U_2^{(3)} & \lambda_{33}U_3^{(3)} \end{bmatrix}$$

\bar{m} – вектор-стовпець еквівалентних мас розмірністю (9×3):

$$\bar{m} = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_2 \end{pmatrix} \text{ кг}$$

\bar{c} – вектор-стовпець прaviх частин розмірністю (9×1):

$$\bar{c} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_1 U_2^{(1)} \\ z_1 U_3^{(1)} \\ z_2 \\ z_2 U_2^{(2)} \\ z_2 U_3^{(2)} \\ z_3 \\ z_3 U_2^{(3)} \\ z_3 U_3^{(3)} \end{bmatrix}$$

Використавши формули для лінійної регресії

$$\bar{m} = [\bar{D}^T \bar{D}]^{-1} \bar{D}^T \bar{c}$$

були отримані значення величин еквівалентних мас для ротора (додаток Г):

$$\bar{m} = \begin{pmatrix} 182.735 \\ 1333 \\ 724.648 \end{pmatrix} \text{ кг}$$

Правильність побудованої трьохмасової моделі ротора було перевірено за допомогою порівнянь значень критичних (власних) частот коливань ротора. Похибка розрахунків для значень частот SE-моделі та 3-масової визначались за формулою (3.9):

$$\varepsilon_k = \frac{\omega_k - \omega_k^*}{\omega_k^*} \% \quad (3.9)$$

де ω_k^* - відповідна критична частота коливань ротора СЕ-моделі

ω_k - критична частота коливань дискретної 3-масової моделі

За допомогою умови нетривіального розв'язку системи (3.7) відносно амплітуд U_k , знайдемо критичні (власні) частоти коливань дискретної трьохмасової моделі з рівняння (3.10):

$$\Delta(\lambda) = \begin{bmatrix} \lambda_{11}m_1 - \delta & \lambda_{12}m_2 & \lambda_{13}m_3 \\ \lambda_{21}m_1 & \lambda_{22}m_2 - \delta & \lambda_{23}m_3 \\ \lambda_{31}m_1 & \lambda_{32}m_2 & \lambda_{33}m_3 - \delta \end{bmatrix} = 0 \quad (3.10)$$

Результатом розв'язання системи (3.8) є знайдені власні частоти коливань дискретної трьохмасової моделі:

$$\omega_k = \begin{bmatrix} 308.339 \\ 933.382 \\ 1876 \end{bmatrix} \text{ c}^{-1}$$

Відповідні критичні частоти коливань ротора СЕ-моделі:

$$\omega_k^* = \begin{bmatrix} 308 \\ 991 \\ 1689 \end{bmatrix} \text{ c}^{-1}$$

Підставивши отримані значення в рівняння (3.9) маємо наступні значення величини похибки:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.11 \\ -5.814 \\ 11.083 \end{bmatrix} \% \quad (3.11)$$

З результатів (3.11), які отримані з рівності (3.9) ми бачимо, що величина значень похибки є допустимою, що в свою чергу дозволяє проводити подальші розрахунки. Розрахунки для пошуку похибки наведені в додатку Г.

3.2 Висновки

1. В даному розділі було отримано систему рівнянь вільних коливань трьохмасової дискретної моделі ротора відцентрового компресору, скориставшись якою в подальшому було знайдено значення величин дискретних мас за формулою лінійної регресії для перших трьох критичних частот.
2. Було проведено оцінку похибки розрахунку для власних (критичних) частот для скінченної елементної моделі й трьохмасової дискретної моделі ротора. Величина похибки для перших трьох критичних частот є наступною: 0.11%, -5.8% й 11.08%.

4. ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СТІЙКОСТІ РОТОРА ВІДЦЕНТРОВОГО КОМПРЕСОРУ

4.1. Побудова полегшеної нелінійної двох масової моделі ротора

Для вивчення складних нелінійних динамічних процесів, що протікають в роторах відцентрових агрегатах (машинах) в даний період застосовують складні багато масові дискретні системи (моделі) вищих порядків. В результаті чого, більш складні системи, за допомогою яких можливо урахувати більш точніші параметри справжнього ротору, виникають проблеми котрі пов'язані з чисельною реалізацією розв'язку системи.

Розв'язком 3-масової моделі ротору є характеристичне рівняння 12-го порядку, яке викликає складності при дослідженні (розв'язанні). Тим часом наступні вихідні дані, $d_{п}$, $q_{пч}$, мають властивість змінюватися в ході роботи ротору відцентрового компресора у широкому діапазоні. Враховуючи ці умови, вважається доцільним використання більш спрощеної (полегшеної) двох-масової неконсервативної моделі ротору, в результаті розв'язання котрої отримуємо результати стійкості, котрі цілком відповідають ступеню достовірності вихідних даних. Розрахункову схему для 2-масової системи ротору приведено на рисунку (4.1)

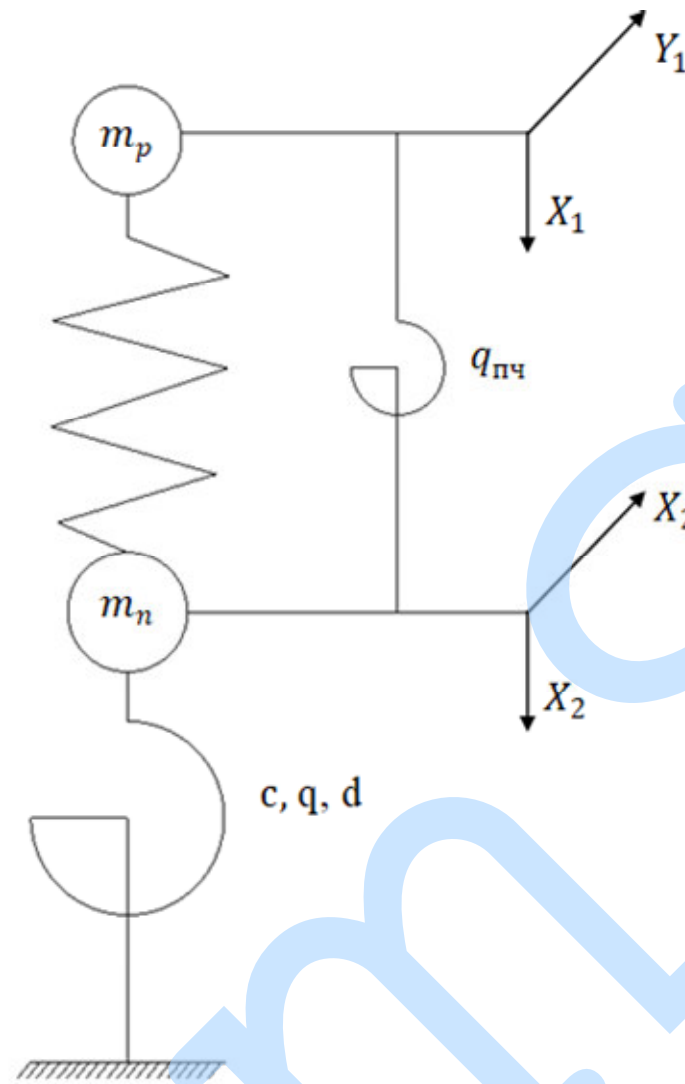


Рисунок 4.1 – Схема спрощеної двох-масової моделі ротора

З урахуванням розрахункової схеми приведеної на рисунку 4.1 запишемо систему диференціальних рівнянь (4.1) вільних коливань ротора двох-масової моделі:

$$\begin{cases} m_p \ddot{X}_1 + c_{\text{в}}(X_1 - X_2) + q_{\text{пч}}(Y_1 - Y_2) = 0 \\ m_p \ddot{Y}_1 + c_{\text{в}}(Y_1 - Y_2) - q_{\text{пч}}(X_1 - X_2) = 0 \\ m_n \ddot{X}_2 + cX_2 + qY_2 + q_{\text{пч}}(Y_2 - Y_1) + d\dot{X}_2 + c_{\text{в}}(X_2 - X_1) = 0 \\ m_n \ddot{Y}_2 + cY_2 - qX_2 - q_{\text{пч}}(X_2 - X_1) + d\dot{Y}_2 + c_{\text{в}}(Y_2 - Y_1) = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Для опису вільних коливань 2-х масової моделі ротора використовується система диференційних рівнянь характеристичне рівняння якої має 8-й порядок:

$$\sum_{n=0}^8 \lambda_n \cdot p^{8-n} = 0 \quad (4.2)$$

Запишемо характеристичний поліном (4.3), що відповідає рівнянню (4.2)

$$\lambda_0 p^8 + \lambda_1 p^7 + \lambda_2 p^6 + \lambda_3 p^5 + \lambda_4 p^4 + \lambda_5 p^3 + \lambda_6 p^2 + \lambda_7 p + \lambda_8 = 0 \quad (4.3)$$

Запишемо характеристичне рівняння (4.3) в наступному вигляді:

$$\begin{bmatrix} m_p p^2 + c_B & q_{пч} & c_B & -q_{пч} \\ -q_{пч} & m_p p^2 + c_B & q_{пч} & -c_B \\ -c_B & -q_{пч} & m_{пп} p^2 + dp + (c_B + c) & q + q_{пч} \\ q_{пч} & -c_B & -(q + q_{пч}) & m_{пп} p^2 + dp + (c_B + c) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Розпишемо значення коефіцієнтів:

$m_p = m_2$ – еквівалентна маса для ротору,

$m_{пп} = m_1 + m_3$ – еквівалентна маса для підшипників,

$c_B = \frac{2c_{п}}{\lambda_{22} \cdot 2c_{п} - 1}$ – значення жорсткості центру валу,

c_n – коефіцієнт жорсткості в підшипниках,

$c = 2c_n$ – значення еквівалентної жорсткості у підшипникаї,

$q_{пч}$ – коефіцієнт циркуляційної сили в проточній частині ротора,

$q = 2\delta\omega d_n$ – еквівалентний коефіцієнт циркуляційної підшипників,

$d = 2d_n$ – еквівалентний коефіцієнт демпфування,

Величина визначника характеристичного рівняння залежить від величини коефіцієнтів циркуляційних сил та демпфування. Для того, щоб побудувати область стійкості ми повинні змінювати наступні параметри системи: коефіцієнт демпфування в підшипниках, коефіцієнт циркуляційної сили проточної частини, частоту обертання ротору для знаходження частот при котрих система буде втрачати свою стійкість. Для розв'язку даної задачі було використано програму Равлюк, яка в свою чергу була створена для вирішення таких задач.

4.2 Знаходження областей стійкості для ротору з використання програми Равлюк, при умові відсутності циркуляційної сили в проточній частині відцентрового компресору

Програма Равлюк використовує чотири файли формату txt, та один файл формату txt, котрі в свою чергу взаємодіють між собою. У першому вікні файлу задаються значення для масиву a_{ij} , у другому вікні файлу для b_{ij} , у третьому для c_{ij} . В самому вікні програми задається тільки крок для проведення розрахунку згідно з методикою.

Всі дані отримані в результаті проведення розрахунків в програмі Равлюк зберігаються у файл програми result.txt. Дана програма показує значення величини коефіцієнтів характеристичного поліному, котрі обчислені згідно із методикою, та показує стійка чи не стійка система з урахуванням заданих параметрів в масивах.

Визначник (4.3) має один варіаційний параметр та одну змінну ω :

Де d_n – величина еквівалентного коефіцієнту демпфування у підшипниках;

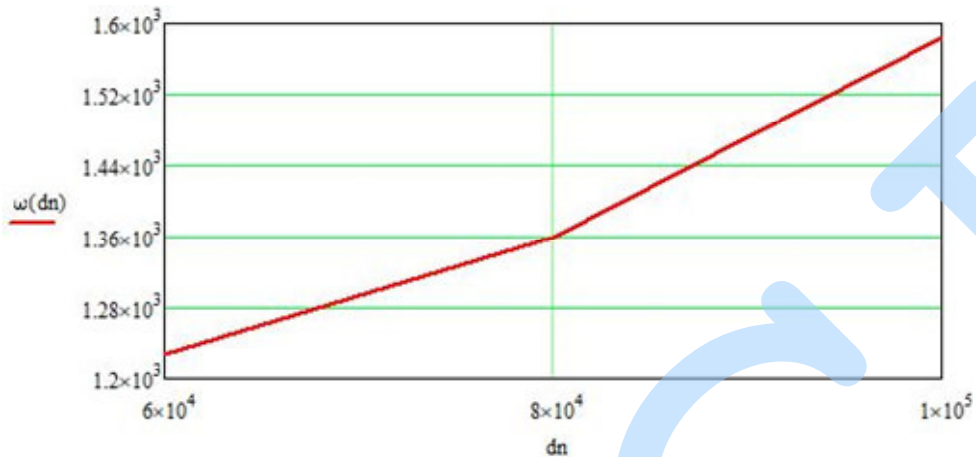
Для дослідження візьмемо три значення коефіцієнту демпфування, які мають наступну величину: $6 \cdot 10^4$, $8 \cdot 10^4$, $1 \cdot 10^5$.

Чисельно змінюючи коефіцієнту демпфування ми отримаємо три графіки областей стійкості ротора.

Де, ω – частота обертання ротора;

Знайдемо 3 критичні точки в кожному з 3-х графіків та побудуємо графік області стійкості ротору.

Зразок для перевірки стану стійкості системи приведений у додатку Д.



Графік 4.1 – Граничні частоти коливань ротору в залежності від коефіцієнта демпфування в підшипниках сили в проточній частині.

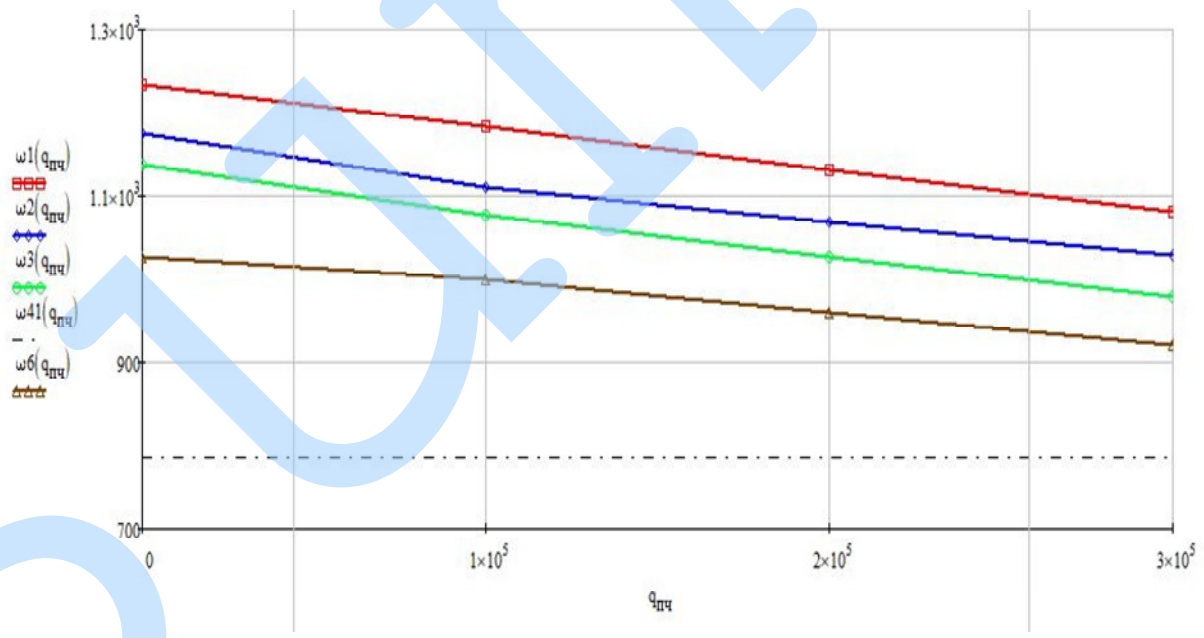
З графіку ми бачимо що величина значення еквівалентного коефіцієнту демпфування в підшипниках має позитивний вплив на стійкість роторної системи. Розрахунок області стійкості ротору проводився без урахування величини **коефіцієнт циркуляційної сили в проточній частині $q_{пч}$** , тому будемо вважати, що робоча частота ротора має достатньо великий запас стійкої зони.

4.3 Знаходження областей стійкості для ротору в програмі Равлюк з врахуванням величини коефіцієнту циркуляційних сили в проточній частині

Розрахунки, що не враховують коефіцієнт циркуляційних сил ($q_{пч}$) в проточній частині дають неповну картину областей стійкості для ротору. Тому, для отримання більш достовірних даних для областей стійкості в подальших розрахунках ми будемо враховувати значення $q_{пч}$.

Значення величини коефіцієнту циркуляційних сил будемо варіювати в межах від $1 \cdot 10^5$ до $3 \cdot 10^5$.

Провівши всі розрахунки, побудуємо графіки областей стійкості ротору з урахуванням значення коефіцієнту циркуляційних сил. В додатку Е наведено наглядний приклад впливу величини $q_{пч}$ на область стійкості ротору.



афік 4.2 – Границя стійкості для 1) $q_{пч} = 0$, 2) $q_{пч} = 1 \cdot 10^5$,
3) $q_{пч} = 2 \cdot 10^5$, 4) $q_{пч} = 3 \cdot 10^5$

Робочу частоту показано на графіку 4.2 штрих-пунктирною лінією.
Робоча частота ротору вірна: $\omega_p = 785$ рад/с.

Побудована двохмасова модель ротора дає можливість аналізувати вплив значення величини коефіцієнта циркуляційних сил в проточній частині на область стійкості ротору відцентрового компресору.

4.4 Висновки

1. Розрахунок стійкості ротору було проведено в програмі Равлюк
2. Проведені розрахунки показують, що при зростанні коефіцієнта демпфування в підшипниках d_{π} система збільшує область стійкості.
3. З результатів розрахунку ми бачимо, що збільшення значення коефіцієнту циркуляційних сил в проточній частині негативно впливає на динаміку ротору.

ВИСНОВКИ

1. В даній роботі було побудовано 2-х масову модель ротору та складено для неї систему диференціальних рівнянь, характеристичний поліном якої має 8-й порядок. Дана модель дає змогу врахувати вплив коефіцієнти демпфування в підшипниках ковзання в роторах відцентрових компресорів.

2. За допомогою програми Равлюк було проведено дослідження впливу коефіцієнтів циркуляційних сил та демпфування на стійкість обертання ротору.

3. З результатів розрахунків можна зробити висновок, що збільшення коефіцієнту демпфування підвищує стійкість системи, але збільшення коефіцієнтів циркуляційних сил зменшує область стійкості обертання ротору.

4. Результати розрахунку стійкості показують, що при варіюванні можливих параметрів коефіцієнту демпфування в підшпниках та величини циркуляційних сил забезпечується доволний запас стійкості роботи ротора на робочих частотах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. В. І. Симоновський. Уточнення математичних моделей коливальних систем за експериментальними даними. – Суми, вид-во СумДУ, 2010. – 91 с.
2. Павленко І.В., Симоновський В.І. Комп'ютерна програма «Critical frequencies of the rotor». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №59855 від 27.05.2015.
3. Исследование устойчивости ротора на сегментных подшипниках / Л. Ю. Равлюк, В. И. Симоновский, Д. В. Лейких // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2011. – № 4. – С. 83–87.
4. Марцинковский В.А. Динамика роторов центробежных машин / Марцинковский В.А./ Сумы 2012
5. Симоновский В.И. Устойчивость и нелинейные колебания роторов центробежных машин / В.И. Симоновский. – М. : Изд-во «Вища школа», 1986. – 128 с.
6. Симоновський В.І. Динамика роторов центробежных машин / В.І. Симоновський. – Сумы. СумГУ, 2006. – 126 с.
7. Симоновський В. І. Оцінювання коефіцієнтів математичних моделей за експериментальними даними. Теорія і практика. / В.І. Симоновський. – Суми, 2015. – 120 с.
8. Равлюк, Л.Ю. Разработка нелинейной математической модели ротора турбокомпрессора, вращающегося в сегментных подшипниках [Текст] / Л.Ю. Равлюк, В.И. Симоновский // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2012. — № 2. — С. 84-89.
9. Павленко І.В., Симоновський В.І. Комп'ютерна програма «Forced oscillation of the rotor». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №61788 від 23.09.2015.
10. Спицын Н.А. Опоры валов и осей машин и приборов. М.: Машиностроение, 1970. 570с.

11. Симоновський В.І. Оцінювання параметрів динамічних моделей роторів / Симоновський В.І., Хворост В.А.. – Суми: СумДУ, 2002. – 144 с.
12. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1968. – 560 с.

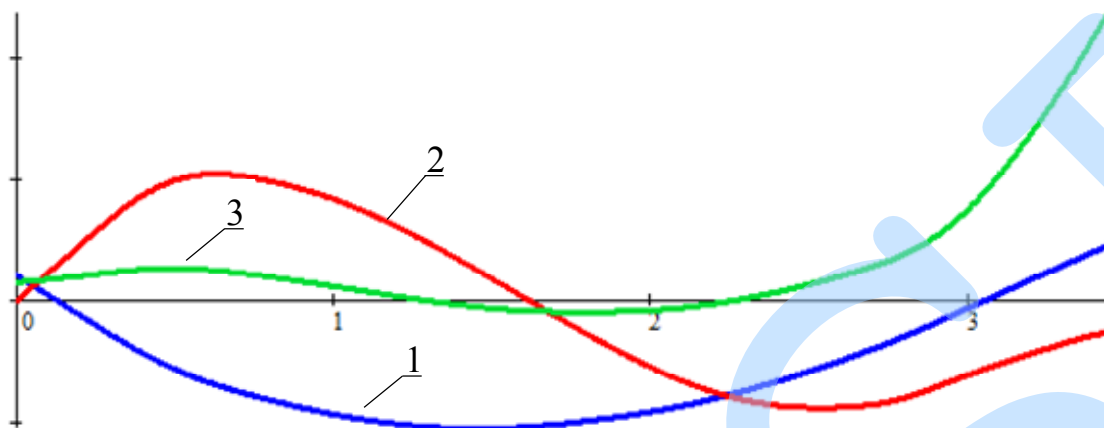
Додаток А

Значення параметрів ротора

$\Delta_{\text{м}} :=$

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.03	0.227	0.198	18	0	0	0	0
2	0.021	0.227	0.206	0	0	0	0	0
3	0.015	0.275	0.206	2.5	0	0	0	0
4	0.015	0.275	0.188	2.5	0	0	0	0
5	0.05	0.133	0	12	0	0	0	0
6	0.045	0.139	0	0	0	0	0	0
7	0.022	0.152	0	0	0	0	0	0
8	0.11	0.16	0	0	0	$6 \cdot 10^8$	0	0
9	0.12	0.16	0	0	0	0	0	0
10	0.04	0.171	0	2	0	0	0	0
11	0.021	0.176	0	8	0	0	0	0
12	0.125	0.18	0	8	0	0	0	0
13	0.053	0.21	0	0	0	0	0	0
14	0.046	0.23	0	0	0	0	0	0
15	0.058	0.26	0	0	0	0	0	0
16	0.06	0.275	0	0	0	0	0	0
17	0.037	0.3	0	102	0	0	0	0
18	0.105	0.3	0	0	0	0	0	0
19	0.125	0.26	0	0	0	0	0	0
20	0.03	0.305	0	100	0	0	0	0
21	0.096	0.305	0	0	0	0	0	0
22	0.124	0.26	0	0	0	0	0	0
23	0.032	0.31	0	99	0	0	0	0
24	0.089	0.31	0	0	0	0	0	0
25	0.129	0.262	0	0	0	0	0	0
26	0.012	0.315	0	92	0	0	0	0
27	0.08	0.315	0	0	0	0	0	0
28	0.133	0.33	0	22.5	0	0	0	0
29	0.139	0.325	0	0	0	0	0	0
30	0.065	0.315	0	98	0	0	0	0
31	$5.9 \cdot 10^{-3}$	0.315	0	0	0	0	0	0
32	0.095	0.264	0	0	0	0	0	0
33	0.068	0.31	0	99	0	0	0	0
34	0.013	0.31	0	0	0	0	0	0
35	0.089	0.264	0	0	0	0	0	0
36	0.06	0.305	0	100	0	0	0	0
37	0.016	0.305	0	0	0	0	0	0
38	0.092	0.264	0	0	0	0	0	0
39	0.063	0.3	0	102	0	0	0	0
40	0.019	0.3	0	0	0	0	0	0
41	0.044	0.274	0	0	0	0	0	0
42	0.072	0.264	0	0	0	0	0	0
43	0.046	0.23	0	0	0	0	0	0
44	0.053	0.21	0	8	0	0	0	0
45	0.125	0.18	0	8	0	0	0	0
46	0.021	0.176	0	2	0	0	0	0
47	0.04	0.171	0	0	0	0	0	0
48	0.121	0.16	0	0	0	$6 \cdot 10^8$	0	0
49	0.122	0.16	0	0	0	0	0	0
50	0.02	0.14	0	1.5	0	0	0	0
51	0.027	0.11	0	0	0	0	0	0
52	0.025	0.092	0	15	0	0	0	0
53	0.086	0.091	0	4.2	0	0	0	0
54	0.04	0.09	0	1.3	0	0	0	0
55	0.055	0.08	0	0	0	0	0	0

Додаток Б



Графік. 1.1 –Форми власних коливань ротора для перших трьох критичних частот

Додаток В

Значення форм вільних коливань ротора для перших трьох критичних частот

$\omega_1 = 308$	$\omega_2 = 991$	$\omega_3 = 1689$
0.039	-3.435e-3	0.027
0.029	0.01	0.029
0.022	0.02	0.03
0.017	0.027	0.031
0.012	0.034	0.031
-4.259e-3	0.057	0.034
-0.019	0.077	0.036
-0.026	0.087	0.038
-0.062	0.137	0.044
-0.097	0.179	0.049
-0.107	0.189	0.05
-0.112	0.194	0.05
-0.139	0.207	0.047
-0.147	0.206	0.045
-0.154	0.203	0.042
-0.162	0.198	0.038
-0.17	0.191	0.034
-0.175	0.186	0.031
-0.187	0.169	0.023
-0.198	0.144	0.013
-0.2	0.137	0.01
-0.206	0.113	2.357e-3
-0.211	0.079	-6.764e-3
-0.212	0.069	-8.826e-3
-0.213	0.042	-0.014
-0.21	2.855e-3	-0.019
-0.21	-8.356e-4	-0.02
-0.206	-0.025	-0.021
-0.199	-0.064	-0.021
-0.188	-0.102	-0.02
-0.183	-0.118	-0.018
-0.182	-0.12	-0.018
-0.172	-0.14	-0.013
-0.164	-0.152	-8.428e-3
-0.163	-0.154	-7.47e-3
-0.151	-0.166	2.314e-4
-0.142	-0.172	6.307e-3
-0.139	-0.173	7.968e-3

-0.125	-0.178	0.019
-0.114	-0.179	0.027
-0.111	-0.179	0.03
-0.103	-0.178	0.036
-0.089	-0.176	0.047
-0.081	-0.173	0.055
-0.07	-0.168	0.065
-0.042	-0.148	0.098
-0.038	-0.144	0.106
-0.028	-0.135	0.121
2.055e-4	-0.113	0.184
0.029	-0.091	0.265
0.034	-0.088	0.279
0.04	-0.083	0.298
0.046	-0.079	0.317
0.066	-0.066	0.388
0.075	-0.061	0.422
0.088	-0.054	0.469

Додаток Г

Знаходження еквівалентних мас за допомогою програми Mathcad

ORIGIN:= 1

$$\lambda_{1,1} := 1.667 \times 10^{-9}$$

$$\lambda_{2,1} := 8.966 \times 10^{-10}$$

$$\lambda_{3,1} := 1.084 \times 10^{-15}$$

$$\lambda_{1,2} := 8.966 \times 10^{-10}$$

$$\lambda_{2,2} := 7.832 \times 10^{-9}$$

$$\lambda_{3,2} := 7.701 \times 10^{-10}$$

$$\lambda_{1,3} := 1.081 \times 10^{-15}$$

$$\lambda_{2,3} := 7.701 \times 10^{-10}$$

$$\lambda_{3,3} := 1.667 \times 10^{-9}$$

$$B_{1,1} := 1$$

$$B_{1,2} := 1$$

$$B_{1,3} := 1$$

$$B_{2,1} := 8.192$$

$$B_{2,2} := 0.482$$

$$B_{2,3} := -0.368$$

$$B_{3,1} := 1.077$$

$$B_{3,2} := -1.552$$

$$B_{3,3} := 3.184$$

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 8.192 & 0.483 & -0.368 \\ 1.077 & -1.552 & 3.184 \end{pmatrix}$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} 1.667 \times 10^{-9} & 8.966 \times 10^{-10} & 1.081 \times 10^{-15} \\ 8.966 \times 10^{-10} & 7.832 \times 10^{-9} & 7.701 \times 10^{-10} \\ 1.084 \times 10^{-15} & 7.701 \times 10^{-10} & 1.667 \times 10^{-9} \end{pmatrix}$$

$$\omega := (308 \ 991 \ 1.689 \cdot 10^3)^T$$

$$\delta_1 := \frac{1}{(\omega_1)^2}$$

$$\delta_2 := \frac{1}{(\omega_2)^2}$$

$$\delta_3 := \frac{1}{(\omega_3)^2}$$

$$C := \begin{pmatrix} \lambda_{1,1} & \lambda_{1,2} \cdot B_{2,1} & \lambda_{1,3} \cdot \lambda_{3,1} \\ \lambda_{1,2} & \lambda_{2,2} \cdot B_{2,1} & \lambda_{2,3} \cdot B_{3,1} \\ \lambda_{1,3} & \lambda_{3,2} \cdot B_{2,1} & \lambda_{3,3} \cdot B_{3,1} \\ \lambda_{1,1} & \lambda_{1,2} \cdot B_{2,2} & \lambda_{1,3} \cdot B_{3,2} \\ \lambda_{1,2} & \lambda_{2,2} \cdot B_{2,2} & \lambda_{2,3} \cdot B_{3,2} \\ \lambda_{1,3} & \lambda_{3,2} \cdot B_{2,2} & \lambda_{3,3} \cdot B_{3,2} \\ \lambda_{1,1} & \lambda_{1,2} \cdot B_{2,3} & \lambda_{1,3} \cdot B_{3,3} \\ \lambda_{1,2} & \lambda_{2,2} \cdot B_{2,3} & \lambda_{2,3} \cdot B_{3,3} \\ \lambda_{1,3} & \lambda_{3,2} \cdot B_{2,3} & \lambda_{3,3} \cdot B_{3,3} \end{pmatrix}$$

$$D := \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_1 \cdot B_{2,1} \\ \delta_1 \cdot B_{3,1} \\ \delta_2 \\ \delta_2 \cdot B_{2,2} \\ \delta_2 \cdot B_{3,2} \\ \delta_3 \\ \delta_3 \cdot B_{2,3} \\ \delta_3 \cdot B_{3,3} \end{pmatrix}$$

$$\underline{\underline{m}} := (C^T \cdot C)^{-1} \cdot C^T \cdot D = \begin{pmatrix} 182.735 \\ 1.333 \times 10^3 \\ 724.648 \end{pmatrix}$$

$$C(x) := \begin{pmatrix} \lambda_{1,1} \cdot m_1 - x & \lambda_{1,2} \cdot m_2 & \lambda_{1,3} \cdot m_3 \\ \lambda_{2,1} \cdot m_1 & \lambda_{2,2} \cdot m_2 - x & \lambda_{2,3} \cdot m_3 \\ \lambda_{3,1} \cdot m_1 & \lambda_{3,2} \cdot m_2 & \lambda_{3,3} \cdot m_3 - x \end{pmatrix}$$

$$f(x) := |C(x)|$$

$$x := f(x) \text{ solve, } x \rightarrow \begin{pmatrix} 2.8408460492472524431e-7 \\ 0.000001147839163451060151 \\ 0.000010518258467619808797 \end{pmatrix}$$

$$\omega_1 := \sqrt{\frac{1}{x}}$$

$$\omega_1 = \begin{pmatrix} 1.876 \times 10^3 \\ 933.382 \\ 308.339 \end{pmatrix}$$

$$\omega_{1n} := \omega_{13} = 308.339$$

$$\omega_{1c} := \omega_1 = 308$$

$$\omega_{2n} := \omega_{12} = 933.382$$

$$\omega_{2c} := \omega_2 = 991$$

$$\omega_{3n} := \omega_{11} = 1.876 \times 10^3$$

$$\omega_{3c} := \omega_3 = 1.689 \times 10^3$$

$$\eta_1 := \frac{\omega_{1n} - \omega_{1c}}{\omega_{1c}} \cdot 100 = 0.11$$

$$\eta_2 := \frac{\omega_{2n} - \omega_{2c}}{\omega_{2c}} \cdot 100 = -5.814$$

$$\eta_3 := \frac{\omega_{3n} - \omega_{3c}}{\omega_{3c}} \cdot 100 = 11.083$$

ДОДАТОК Д

Зразок знаходження коефіцієнтів для масиву a, b, c.

$$dn := \begin{pmatrix} 2.5 \\ 3.5 \\ 4.5 \end{pmatrix} \cdot 10^4 = \begin{pmatrix} 2.5 \times 10^4 \\ 3.5 \times 10^4 \\ 4.5 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

$$d := 2 \cdot dn = \begin{pmatrix} 5 \times 10^4 \\ 7 \times 10^4 \\ 9 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

$$\omega := 785$$

$$m1 := 182.735$$

$$m2 := 724.648$$

$$m3 := 1333$$

$$\lambda_{2,2} := 7.832 \cdot 10^{-9}$$

$$n := 0.3$$

$$cp := 3 \cdot 10^8$$

$$c_{\text{max}} := 2 \cdot cp = 6 \times 10^8$$

$$mrot := m2 = 724.648$$

$$mp := m1 + m3 = 1.516 \times 10^3$$

$$cv := \frac{2cp}{\lambda_{2,2} \cdot 2cp - 1} = 1.622 \times 10^8$$

$$cv + c = 7.622 \times 10^8$$

$$mp + d = \begin{pmatrix} 5.152 \times 10^4 \\ 7.152 \times 10^4 \\ 9.152 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

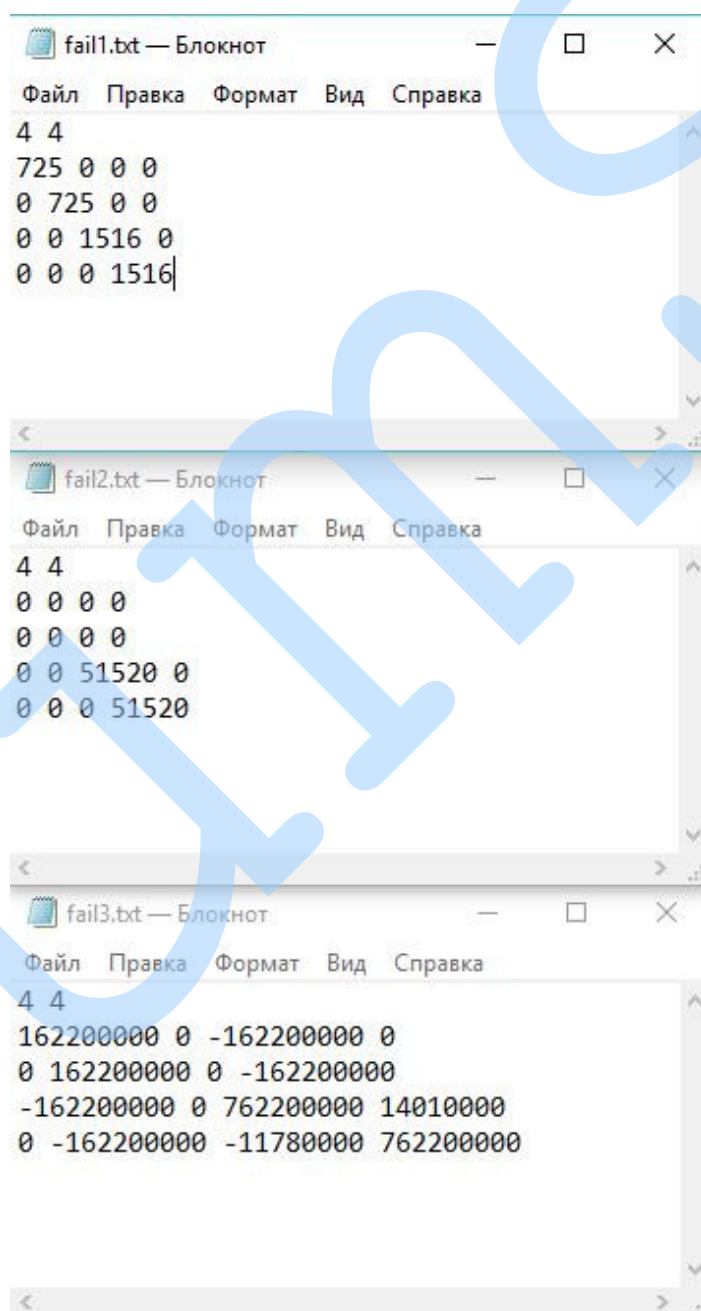
$$mrot + cv = 1.622 \times 10^8$$

$$mp + d + cv + c = \begin{pmatrix} 7.622 \times 10^8 \\ 7.623 \times 10^8 \\ 7.623 \times 10^8 \end{pmatrix}$$

$$q := 2 \cdot dn \cdot n \cdot \omega = \begin{pmatrix} 1.178 \times 10^7 \\ 1.649 \times 10^7 \\ 2.119 \times 10^7 \end{pmatrix}$$

ДОДАТОК Е

Розрахуємо області стійкості ротору без врахування величини коефіцієнту циркуляційних сил в проточній частині з використання програми Равлюк :



The image shows three overlapping Notepad windows, each containing a set of input parameters for a rotor stability problem. The windows are titled 'fail1.txt — Блокнот', 'fail2.txt — Блокнот', and 'fail3.txt — Блокнот'. Each window has a menu bar with 'Файл', 'Правка', 'Формат', 'Вид', and 'Справка'. The text in the windows is as follows:

```
fail1.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
725 0 0 0
0 725 0 0
0 0 1516 0
0 0 0 1516

fail2.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 51520 0
0 0 0 51520

fail3.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
162200000 0 -162200000 0
0 162200000 0 -162200000
-162200000 0 762200000 14010000
0 -162200000 -11780000 762200000
```

Рисунок 4.2 – вхідні параметри для розв’язку задачі

```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\Новая па...
массив значений a1
7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003
массив значений a2
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004
Введите массив значений a3
1.6E+0008 0.0E+0000 -1.6E+0008 0.0E+0000
0.0E+0000 1.6E+0008 0.0E+0000 -1.6E+0008
-1.6E+0008 0.0E+0000 7.6E+0008 1.4E+0007
0.0E+0000 -1.6E+0008 -1.1E+0007 7.6E+0008
Введите шаг h
100

```

Рисунок 4.3 – задання значення величини кроку

```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\Новая папка (1)\pr...
-3.61724895567940E+0031
2.44574055451680E+0031
7.80197669040602E+0029
7.80197669040602E+0029
7.80197669040602E+0019
5.14239673358459E+0030
-2.13319067865085E+0030
1.75663632957008E+0030
1.75663632957008E+0030
1.75663632957008E+0018
3.46456543439783E+0029
8.21071663796261E+0027
8.21071663796261E+0027
8.21071663796261E+0013
1.20802081000650E+0028
1.20802081000650E+0028
1.20802081000650E+0012
1.20802081000650E+0012 8.21071663796261E+0013 1.75
663632957008E+0018 7.80197669040602E+0019 8.5222651
6696831E+0023 2.06154336880316E+0025 1.555257246374
52E+0029 1.62651834239403E+0030 9.47535058045783E+0
033
8.00000000000000E+0000 9.47535058045783E+0033 1.62
651834239403E+0030 1.55525724637452E+0029 2.0615433
6880316E+0025 8.52226516696831E+0023 7.801976690406
02E+0019 1.75663632957008E+0018 8.21071663796261E+0
013 1.20802081000650E+0012
Система устойчива!

```

Рисунок 4.4 – результат розрахунку

З результату розрахунку ми бачимо, що дана система є стійкою.

Проведемо розрахунок області стійкості ротору з урахуванням величини коефіцієнту циркуляційних сил в проточній частині при наступних параметрах: $d_{\text{п}} = 2.5 \cdot 10^4$ та $q_{\text{пч}} = 1 \cdot 10^5$

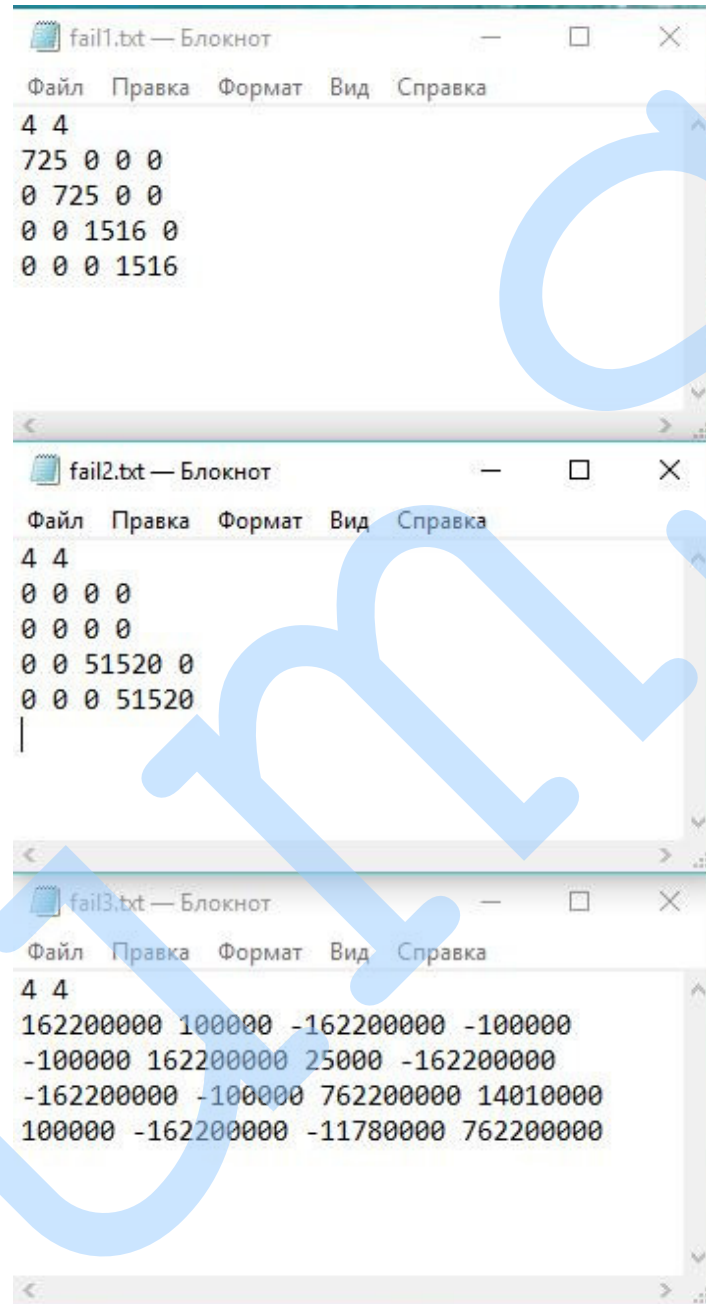


Рисунок 4.5 – вхідні параметри для розв'язку задачі


```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\dp=25e3 q=1e5\program1.exe
массив значений a1
7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003
массив значений a2
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004
Введите массив значений a3
1.6E+0008 1.0E+0005 -1.6E+0008 -1.0E+0005
-1.0E+0005 1.6E+0008 2.5E+0004 -1.6E+0008
-1.6E+0008 -1.0E+0005 7.6E+0008 1.4E+0007
1.0E+0005 -1.6E+0008 -1.1E+0007 7.6E+0008
Введите шаг h
100

```

Рисунок 4.6 – задання значення величини кроку

```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\Новая папка (1)\program1.exe
8.52226500207225E+0031
8.52226500207225E+0031
8.52226500207225E+0023
4.09634614469757E+0031
-3.61724895567874E+0031
2.44574055451954E+0031
7.80197669120520E+0029
7.80197669120520E+0029
7.80197669120520E+0019
5.14239673358420E+0030
-2.13319067865373E+0030
1.75663632955857E+0030
1.75663632955857E+0030
1.75663632955857E+0018
3.46456543439902E+0029
8.21071663883152E+0027
8.21071663883152E+0027
8.21071663883152E+0013
1.20802081000382E+0028
1.20802081000382E+0028
1.20802081000382E+0012
1.20802081000382E+0012 8.21071663883152E+0013 1.75663632955857E+0018 7.801976691205
20E+0019 8.52226500207225E+0023 2.06154331284171E+0025 1.55525963474348E+0029 1.62
651834239686E+0030 9.47540547387335E+0033
8.00000000000000E+0000 9.47540547387335E+0033 1.62651834239686E+0030 1.555259634743
48E+0029 2.06154331284171E+0025 8.52226500207225E+0023 7.80197669120520E+0019 1.75
663632955857E+0018 8.21071663883152E+0013 1.20802081000382E+0012
Система устойчива!

```

Рисунок 4.7 – результат розрахунку

З результату розрахунку ми бачимо, що дана система є стійкою.

при: $d_{II} = 2.5 \cdot 10^4$ та $q_{пч} = 2 \cdot 10^5$

```

fail1.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
725 0 0 0
0 725 0 0
0 0 1516 0
0 0 0 1516

fail2.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 51520 0
0 0 0 51520

fail3.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
162200000 200000 -162200000 -200000
-200000 162200000 25000 -162200000
-162200000 -200000 762200000 14010000
100000 -162200000 -11780000 762200000
  
```

Рисунок 4.8 – вхідні параметри для розв’язку задачі

```

D:\1.learn\6kysr\Diplom\Ravliuk\dp=25e3 q=2e5\program1.exe
8.52226607624329E+0023
4.09634614469759E+0031
-3.61724895567869E+0031
2.44574055451924E+0031
7.80197669093502E+0029
7.80197669093502E+0029
7.80197669093502E+0019
5.14239673358418E+0030
-2.13319067865333E+0030
1.75663632956292E+0030
1.75663632956292E+0030
1.75663632956292E+0018
3.46456543439882E+0029
8.21071663846872E+0027
8.21071663846872E+0027
8.21071663846872E+0013
1.20802081000504E+0028
1.20802081000504E+0028
1.20802081000505E+0012
1.20802081000505E+0012 8.21071663846872E+0013 1.75663632956292E+0
018 7.80197669093502E+0019 8.52226607624329E+0023 2.061543912182
69E+0025 1.55525760416997E+0029 1.62652019711645E+0030 9.4754222
7712327E+0033
8.00000000000000E+0000 9.47542227712327E+0033 1.62652019711645E+0
030 1.55525760416997E+0029 2.06154391218269E+0025 8.522266076243
29E+0023 7.80197669093502E+0019 1.75663632956292E+0018 8.2107166
3846872E+0013 1.20802081000505E+0012
Система устойчива!
^N

```

Рисунок 4.9 – задання значення величини кроку

```

D:\1.learn\6kysr\Diplom\Ravliuk\dp=25e3 q=2e5\program1.exe
8.52226607624329E+0023
4.09634614469759E+0031
-3.61724895567869E+0031
2.44574055451924E+0031
7.80197669093502E+0029
7.80197669093502E+0029
7.80197669093502E+0019
5.14239673358418E+0030
-2.13319067865333E+0030
1.75663632956292E+0030
1.75663632956292E+0030
1.75663632956292E+0018
3.46456543439882E+0029
8.21071663846872E+0027
8.21071663846872E+0027
8.21071663846872E+0013
1.20802081000504E+0028
1.20802081000504E+0028
1.20802081000505E+0012
1.20802081000505E+0012 8.21071663846872E+0013 1.75663632956292E+0
018 7.80197669093502E+0019 8.52226607624329E+0023 2.061543912182
69E+0025 1.55525760416997E+0029 1.62652019711645E+0030 9.4754222
7712327E+0033
8.00000000000000E+0000 9.47542227712327E+0033 1.62652019711645E+0
030 1.55525760416997E+0029 2.06154391218269E+0025 8.522266076243
29E+0023 7.80197669093502E+0019 1.75663632956292E+0018 8.2107166
3846872E+0013 1.20802081000505E+0012
Система устойчива!
^N

```

Рисунок 4.10 – результат розрахунку

З результату розрахунку ми бачимо, що дана система є стійкою.

при: $d_{\pi} = 3.5 \cdot 10^4$ та $q_{\text{пч}} = 3 \cdot 10^5$

```

fail1.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
725 0 0 0
0 725 0 0
0 0 1516 0
0 0 0 1516

fail2.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 51520 0
0 0 0 51520

fail3.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
162200000 300000 -162200000 -300000
-300000 162200000 35000 -162200000
-162200000 -300000 762200000 14010000
300000 -162200000 -11780000 762200000
  
```

Рисунок 4.11 – вхідні параметри для розв'язку задачі


```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\dp=35e3 q=3e5\program1.exe
массив значений a1
7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003
массив значений a2
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004
Введите массив значений a3
1.6E+0008 3.0E+0005 -1.6E+0008 -3.0E+0005
-3.0E+0005 1.6E+0008 3.5E+0004 -1.6E+0008
-1.6E+0008 -3.0E+0005 7.6E+0008 1.4E+0007
3.0E+0005 -1.6E+0008 -1.1E+0007 7.6E+0008
Введите шаг h
100

```

Рисунок 4.12 – задання значення величини кроку

```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\dp=35e3 q=3e5\program1.exe
8.52226756059666E+0031
8.52226756059666E+0023
4.09634614469756E+0031
-3.61724895567891E+0031
2.44574055451861E+0031
7.80197669096720E+0029
7.80197669096720E+0029
7.80197669096720E+0019
5.14239673358431E+0030
-2.13319067865271E+0030
1.75663632956197E+0030
1.75663632956197E+0030
1.75663632956197E+0018
3.46456543439858E+0029
8.21071663858147E+0027
8.21071663858147E+0027
8.21071663858147E+0013
1.20802081000455E+0028
1.20802081000455E+0028
1.20802081000456E+0012
1.20802081000456E+0012 8.21071663858147E+0013 1.75663632956197E+0018 7.80
197669096720E+0019 8.52226756059666E+0023 2.06154480714777E+0025 1.5552561
5022633E+0029 1.62652328831624E+0030 9.47545116782887E+0033
8.00000000000000E+0000 9.47545116782887E+0033 1.62652328831624E+0030 1.55
525616022633E+0029 2.06154480714777E+0025 8.52226756059666E+0023 7.8019766
9096720E+0019 1.75663632956197E+0018 8.21071663858147E+0013 1.208020810004
56E+0012
Система устойчива!

```

Рисунок 4.13 – результат розрахунку

З результату розрахунку ми бачимо, що дана система є стійкою.

при: $d_{\pi} = 4.5 \cdot 10^4$ та $q_{\text{пч}} = 3 \cdot 10^5$

```

fail1.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
725 0 0 0
0 725 0 0
0 0 1516 0
0 0 0 1516

fail2.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 51520 0
0 0 0 51520

fail3.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
162200000 300000 -162200000 -300000
-300000 162200000 45000 -162200000
-162200000 -300000 762200000 14010000
300000 -162200000 -11780000 762200000
  
```

Рисунок 4.14 – вхідні параметри для розв'язку задачі

```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\dp=45e3 q=3e5\program1.exe
массив значений a1
7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003
массив значений a2
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004
Введите массив значений a3
1.6E+0008 3.0E+0005 -1.6E+0008 -3.0E+0005
-3.0E+0005 1.6E+0008 4.5E+0004 -1.6E+0008
-1.6E+0008 -3.0E+0005 7.6E+0008 1.4E+0007
3.0E+0005 -1.6E+0008 -1.1E+0007 7.6E+0008
Введите шаг h
100

```

Рисунок 4.15 – задання значення величини кроку

```

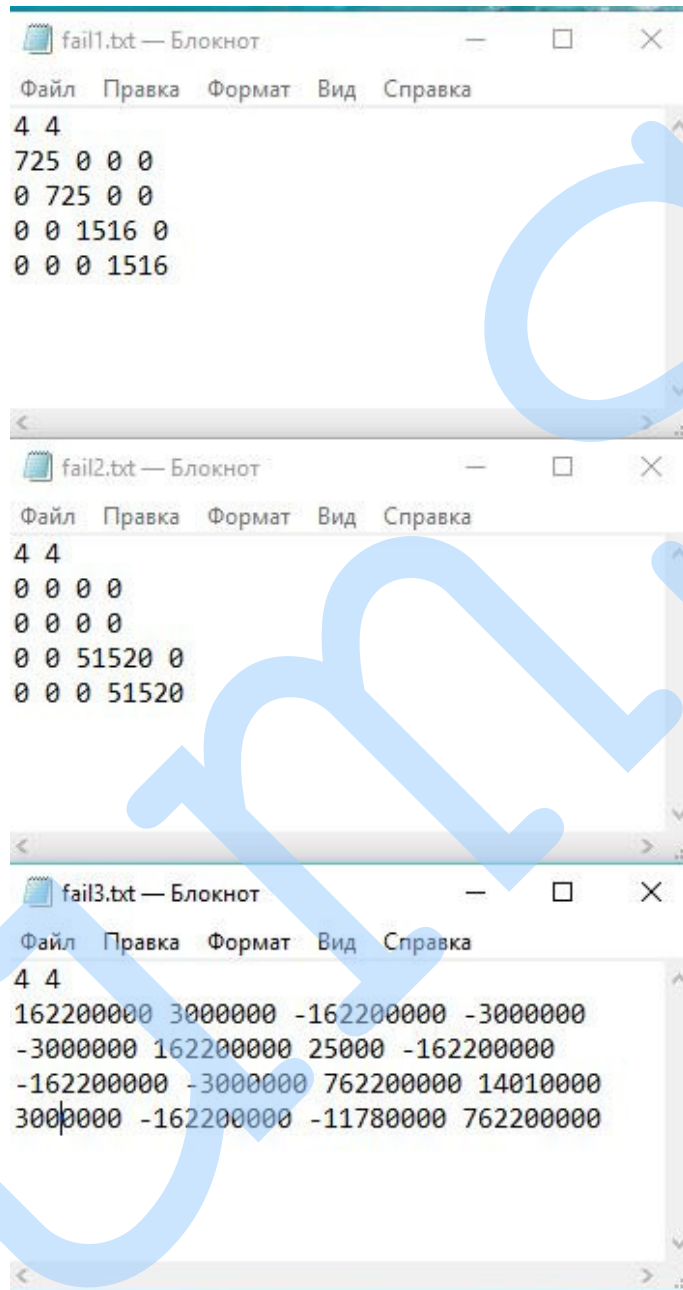
D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\dp=45e3 q=3e5\program1.exe
8.52226759355797E+0023
4.09634614469759E+0031
3.61724895567866E+0031
2.44574055451953E+0031
7.80197669126938E+0029
7.80197669126938E+0029
7.80197669126938E+0019
5.14239673358417E+0030
2.13319067865366E+0030
1.75663632955757E+0030
1.75663632955757E+0030
1.75663632955757E+0018
3.46456543439896E+0029
8.21071663891992E+0027
8.21071663891992E+0027
8.21071663891992E+0013
1.20802081000348E+0028
1.20802081000348E+0028
1.20802081000349E+0012
1.20802081000349E+0012 8.21071663891992E+0013 1.75663632955757E+0
918 7.80197669126938E+0019 8.52226759355797E+0023 2.061544818378
54E+0025 1.55525601205331E+0029 1.62652328831739E+0030 9.4754475
5087457E+0033
8.00000000000000E+0000 9.47544756087457E+0033 1.62652328831739E+0
930 1.55525601205331E+0029 2.06154481837854E+0025 8.522267593557
97E+0023 7.80197669126938E+0019 1.75663632955757E+0018 8.2107166
3891992E+0013 1.20802081000349E+0012
система устойчива!

```

Рисунок 4.16 – результат розрахунку

З результату розрахунку ми бачимо, що дана система є стійкою.

при: $d_{\pi} = 2.5 \cdot 10^4$ та $q_{\text{пч}} = 3 \cdot 10^6$



The image shows three Notepad windows stacked vertically, each containing input parameters for a problem solution. The windows are titled 'fail1.txt', 'fail2.txt', and 'fail3.txt'. Each window has a menu bar with 'Файл', 'Правка', 'Формат', 'Вид', and 'Справка'. The content of each window is as follows:

```
fail1.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
725 0 0 0
0 725 0 0
0 0 1516 0
0 0 0 1516

fail2.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 51520 0
0 0 0 51520

fail3.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
162200000 3000000 -162200000 -3000000
-3000000 162200000 25000 -162200000
-162200000 -3000000 762200000 14010000
3000000 -162200000 -11780000 762200000
```

Рисунок 4.17 – вхідні параметри для розв'язку задачі


```

D:\1.learn\6kysr\Diplom\Ravliuk\dp=25e3 q=3e6\program1.exe
массив значений a1
7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003
массив значений a2
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004
Введите массив значений a3
1.6E+0008 3.0E+0006 -1.6E+0008 -3.0E+0006
-3.0E+0006 1.6E+0008 2.5E+0004 -1.6E+0008
-1.6E+0008 -3.0E+0006 7.6E+0008 1.4E+0007
3.0E+0006 -1.6E+0008 -1.1E+0007 7.6E+0008
Введите шаг h
100

```

Рисунок 4.18 – задання значення величини кроку

```

D:\1.learn\6kysr\Diplom\Ravliuk\dp=25e3 q=3e6\program1.exe
8.52257097389676E+0031
8.52257097389676E+0031
8.52257097389676E+0023
4.09634614469761E+0031
-3.61724895567841E+0031
2.44574055452124E+0031
7.80197669200978E+0029
7.80197669200978E+0029
7.80197669200978E+0019
5.14239673358402E+0030
-2.13319067865557E+0030
1.75663632954631E+0030
1.75663632954631E+0030
1.75663632954631E+0018
3.46456543439980E+0029
8.21071663981652E+0027
8.21071663981652E+0027
8.21071663981652E+0013
1.20802081000058E+0028
1.20802081000058E+0028
1.20802081000058E+0012
1.20802081000058E+0012 8.21071663981652E+0013 1.75663632954631E+0018 7.80197669
023 2.06171751067943E+0025 1.55534895764135E+0029 1.62707414015968E+0030 9.477
8.00000000000000E+0000 9.47782852196329E+0033 1.62707414015968E+0030 1.55534895
025 8.52257097389676E+0023 7.80197669200978E+0019 1.75663632954631E+0018 8.210
58E+0012
Система неустойчива!

```

Рисунок 4.19 – результат розрахунку

З результату розрахунку ми бачимо, що дана система є не стійкою.

ДОДАТОК Є

З результатів проведених розрахунків ми бачимо, що система є не стійкою у випадку коли $q_{\Pi} = 3 \cdot 10^6$. Тому для даного випадку розв'яжемо задачу з підвищеним коефіцієнтом демпфування в підшипниках $d_{\Pi} = 5.5 \cdot 10^4$

```

fail1.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
725 0 0 0
0 725 0 0
0 0 1516 0
0 0 0 1516

fail2.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
0 0 0 0
0 0 0 0
0 0 51520 0
0 0 0 51520

fail3.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
4 4
162200000 3000000 -162200000 -3000000
-3000000 162200000 55000 -162200000
-162200000 -3000000 762200000 14010000
3000000 -162200000 -11780000 762200000
  
```

Рисунок 4.20 – вхідні параметри для розв'язку задачі

```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\dp=35e3 q=3e6\program1.exe
массив значений a1
7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 7.3E+0002 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 1.5E+0003
массив значений a2
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004 0.0E+0000
0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000 5.2E+0004
Введите массив значений a3
1.6E+0008 3.0E+0006 -1.6E+0008 -3.0E+0006
-3.0E+0006 1.6E+0008 5.5E+0004 -1.6E+0008
-1.6E+0008 -3.0E+0006 7.6E+0008 1.4E+0007
3.0E+0006 -1.6E+0008 -1.1E+0007 7.6E+0008
Введите шаг h
100

```

Рисунок 4.21 – задання значення величини кроку

```

D:\1.learn\6kyrs\Diplom\Ravliuk\dp=35e3 q=3e6\program1.exe
3.45183633360127E+0030
8.52227649629272E+0031
8.52227649629272E+0031
8.52227649629272E+0023
4.09634614469756E+0031
-3.61724895567887E+0031
2.44574055451828E+0031
7.80197669059510E+0029
7.80197669059510E+0029
7.80197669059510E+0019
5.14239673358429E+0030
-2.13319067865230E+0030
1.75663632956796E+0030
1.75663632956796E+0030
1.75663632956796E+0018
3.46456543439838E+0029
8.21071663807566E+0027
8.21071663807566E+0027
8.21071663807566E+0013
1.20802081000629E+0028
1.20802081000629E+0028
1.20802081000629E+0012
1.20802081000629E+0012 8.21071663807566E+0013 1.75663632956796E+0018 7.80197669059510E+0019 8.52227649629272E+0
023 2.06154784383964E+0025 1.55522308580764E+0029 1.62652328831521E+0030 9.47461397558199E+0033
8.00000000000000E+0000 9.47461397558199E+0033 1.62652328831521E+0030 1.55522308580764E+0029 2.06154784383964E+0
025 8.52227649629272E+0023 7.80197669059510E+0019 1.75663632956796E+0018 8.21071663807566E+0013 1.208020810006
29E+0012
Система устойчива!

```

Рисунок 4.22 – результат розрахунку

З результату розрахунку ми бачимо, що дана система є не стійкою.