

Г.Б. Філімоніхін, проф., д-р фіз.-мат. наук, О.В. Коваленко, асп.
Кіровоградський національний технічний університет

Моделювання процесу зрівноваження ротора з нерухомою точкою двохмаятниковим автобалансиrom із застосуванням програми Solid Works і модуля motion

Використано підпрограму Solid Motion для моделювання динаміки зрівноважування двохмаятниковим автобалансиrom ротора з нерухомою точкою на одній в'язко пружній опорі. Визначено різні режими руху системи в залежності від величин сил в'язкого опору, що діють на маятники.

моделювання, програма Solid Motion, ротор, двохмаятниковий автобалансиrom, зрівноважування, режими руху

Пасивні автобалансири застосовують для зрівноважування на ходу на закритичних швидкостях обертання роторів, чий дисбаланс змінюється в процесі експлуатації. Конструкція, принцип дії і динаміка пасивних автобалансирів досліджувалися в роботах [1-3]. При проведенні досліджень в аналітичному вигляді в цих роботах не вдалося дослідити низку задач, пов'язаних з дослідженнями перехідних процесів системи, підбором конкретних величин параметрів системи, що забезпечують настання автобалансирування за мінімальний проміжок часу тощо. В роботі [4] ці задачі вирішувалися для ротора на симетричних в'язко-пружних опорах, який статично зрівноважується двохмаятниковим автобалансиrom. Динаміка системи моделювалася із використанням програми Solid Works (SW) корпорації UGS (США) і її модуля - Motion. У даній статті аналогічні дослідження проводяться для ротора з нерухомою точкою, який зрівноважується на ходу двохмаятниковим автобалансиrom. При цьому досліджується вплив сил в'язкого опору, які діють на маятники, на швидкість настання автобалансирування, та на різні режими руху системи.

1. Опис моделі ротора й автобалансира

Опис деталей і зборки. Система складається з вала, барабана і двох маятників. Конструктивні особливості системи представлені на рис. 1, 2. Основні параметри деталей наступні.

Характеристики вала (рис. 1, а): довжина: 302 мм; маса 0,67 кг; координати центра мас відносно власної системи координат $x=0$ мм, $y=0$ мм, $z=106,9$ мм.

Характеристики барабана (рис. 1, б): діаметр 160 мм; маса 5,87 кг; координати центра мас відносно власної системи координат $x=0$ мм, $y=3,26$ мм, $z=0$ мм.

Характеристики маятників (рис. 1, в) ідентичні: діаметр від центра зачеплення до верхньої кромки - 64 мм; маса 0,302 кг; координати центра мас відносно власної системи координат $x=0$ мм, $y=40$ мм, $z=0$ мм. У зборці на вал насаджуються барабан і маятники (рис. 2).

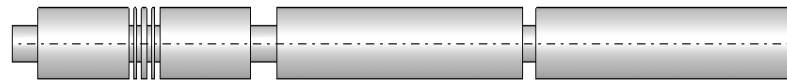
Обробка зборки підпрограмою Motions. Зборка оброблялася додатком Motion пакета Solid Works. Правий кінець вала закріплювався до землі сферичним з'єднанням, яке моделювало нерухому точку (нерухому сферичну опору ротора). Інша опора –

ізотропна і в'язко-пружна, розташована лівіше. Вона моделювалася втулкою з жорсткостями і коефіцієнтами демпфування по осях X , Y , Z відповідно 30000 Н/м , 300 Н·с/м . Відносному рухові маятників перешкоджають моменти сил в'язкого опору з коефіцієнтом $h=0\div 10 \text{ Н·м·с/град}$. Кріплення маятників до вала імітувалося об'єктами петля і втулка. Модель петлі обмежує рух маятника щодо вала, втулка утворює момент сил в'язкого опору. В розрахунках приймалося, що швидкість обертання ротора – стала і дорівнює $\omega=25 \text{ об/сек}$.

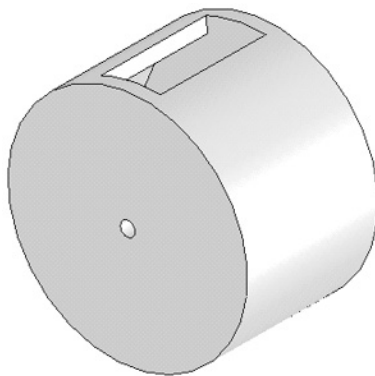
2. Тестування моделі і задачі досліджень

Побудована модель була перевірена наступними тестами:

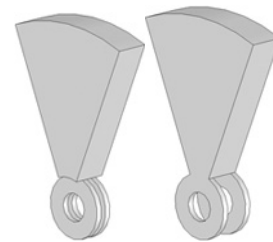
- 1) перевірка статичного прогину вала при відсутності обертання ротора, без і з маятниками;
- 2) вивчення коливань кожного маятника окремо на жорстко закріпленому валі;



а



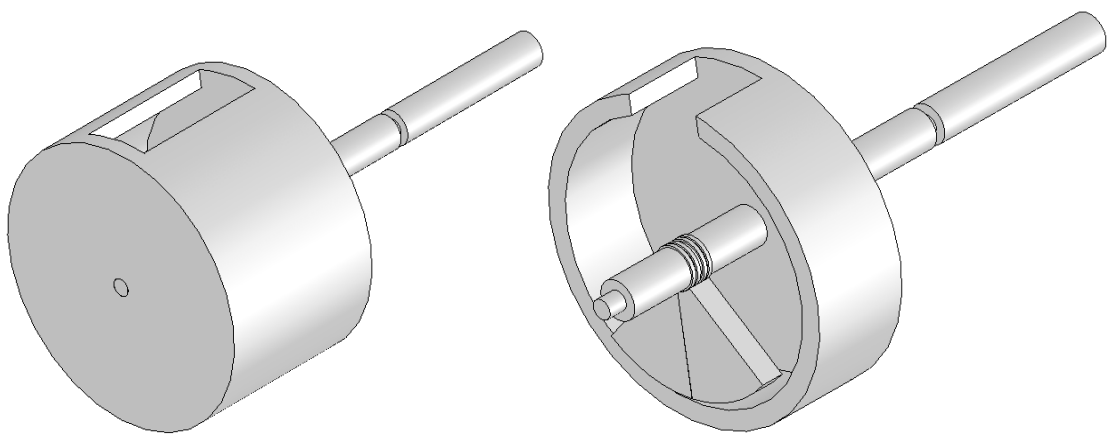
б



в

а) вал, б) барабан, в) маятники

Рисунок 1 – Деталі зборки



а) повна зборка

б) зборка з розрізом по ротору

Рисунок 2 – Зборка ротора з автобалансирами

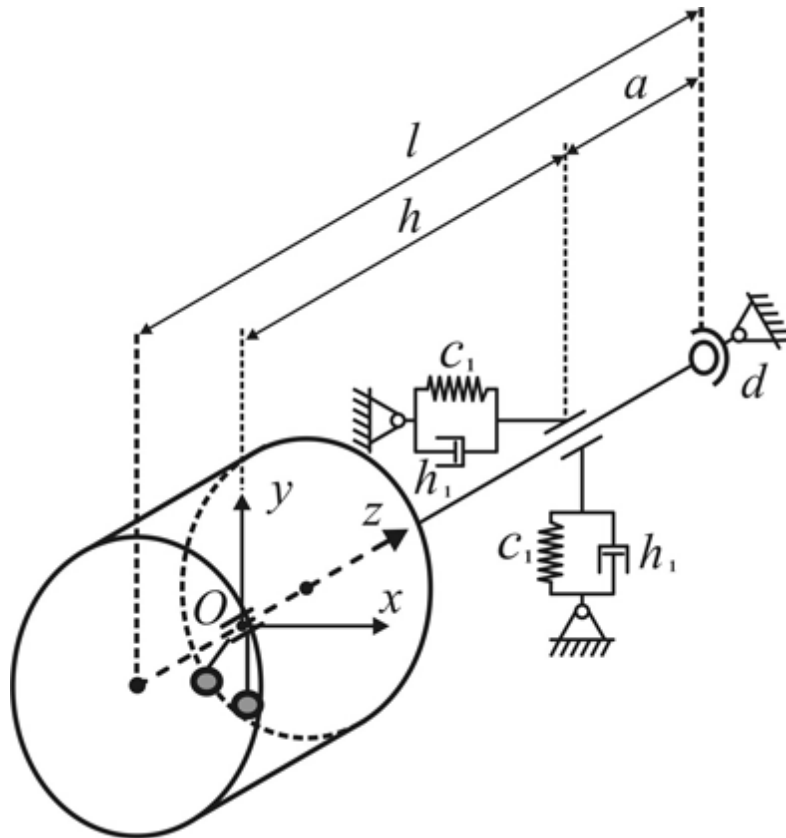


Рисунок 3 – Модель ротора з нерухомою точкою на в'язко-пружній опорі, що зрівноважується двома маятниками

- 3) вивчення динаміки ротора без маятників при наявності і відсутності сил ваги;
- 4) вивчення роботи системи з одним маятником при наявності і відсутності сил ваги;

Отримані результати комп'ютерного моделювання цілком погоджуються з відомими результатами теорії роторних систем і теорією коливань фізичного маятника.

Надалі розв'язувалися наступні задачі комп'ютерного моделювання - виділити різні режими руху системи в залежності від величини внутрішніх сил в'язкого опору h при наявності і відсутності сил ваги, і оцінити швидкість настання автобалансування. Рух ротора будемо вивчати за рухом точки O , розташованій на повздовжній осі вала у площині корекції ротора. Зокрема будемо будувати графік модуля відхилення т. O від положення, яке відповідає недеформованим опорам. При цьому по горизонталі відкладатимемо час, в секундах, по вертикалі - модуль відхилення в метрах. Також при необхідності будуватимемо траєкторії руху точки O у вертикальній площині Oxy , розмірність у метрах.

Відмітимо, що врахування сил ваги актуально для горизонтально розташованого ротора, а не врахування – для вертикально розташованого ротора.

3. Результати моделювання

Наявність сил ваги. Сили опору бралися в межах $1 \times 10^{-6} \div 10 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$. Було встановлено, що зміна параметра h істотно впливає на швидкість балансування роторної системи, що відповідає загальній теорії [2,3].

1) При дуже малому h , що змінюється в межах $1 \times 10^{-6} \div 4,3 \times 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$, маятники не залучаються до руху ротора, висять і дещо відхиляються від вертикалі через обертання ротора (рис. 4, табл., п. 1).

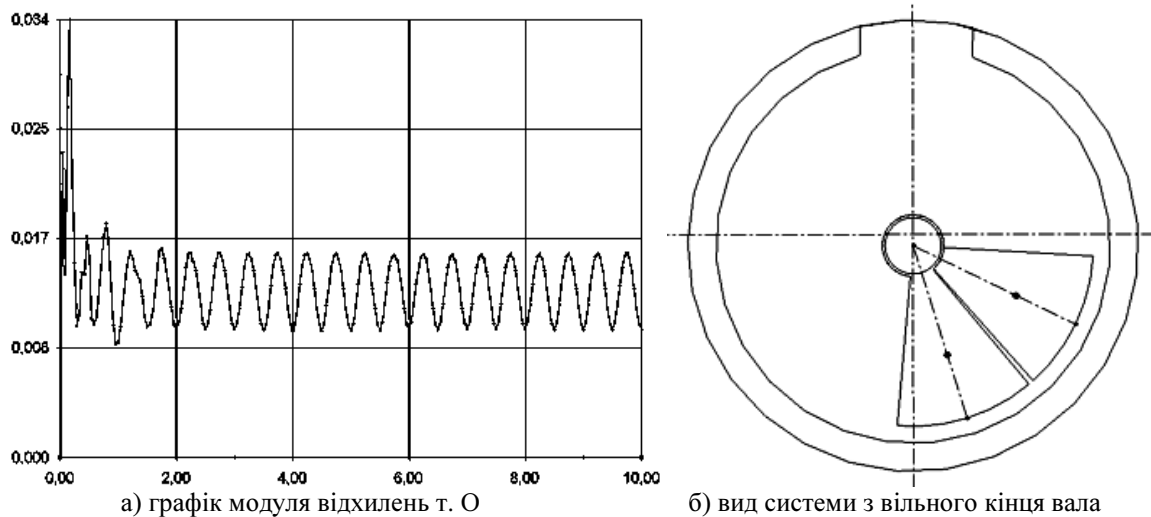


Рисунок 4 – Маятники не залучаються до руху: $h=4,2 \times 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$

2) При дуже малому параметрі h , що змінюється в межах $4,3 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$, маятники здійснюють квазіперіодичний рух (рис. 5, табл., п. 2). У ньому маятники щільно притиснуті один до одного і не можуть здгогнати ротор. Вони обертаються відносно землі із кутовою швидкістю, близькою до першої критичної швидкості обертання ротора. Наявність цього режиму відома з теорії пасивних автобалансирів [3]. Траєкторія руху точки O наведена на рис. 6. Ця траєкторія – гіпоциклоїда. Вона утворена двома складовими – повільною прецесією із частотою, що дорівнює кутовій швидкості обертання маятників, і швидкою нутацією із частотою, що дорівнює кутовій швидкості обертання ротора.

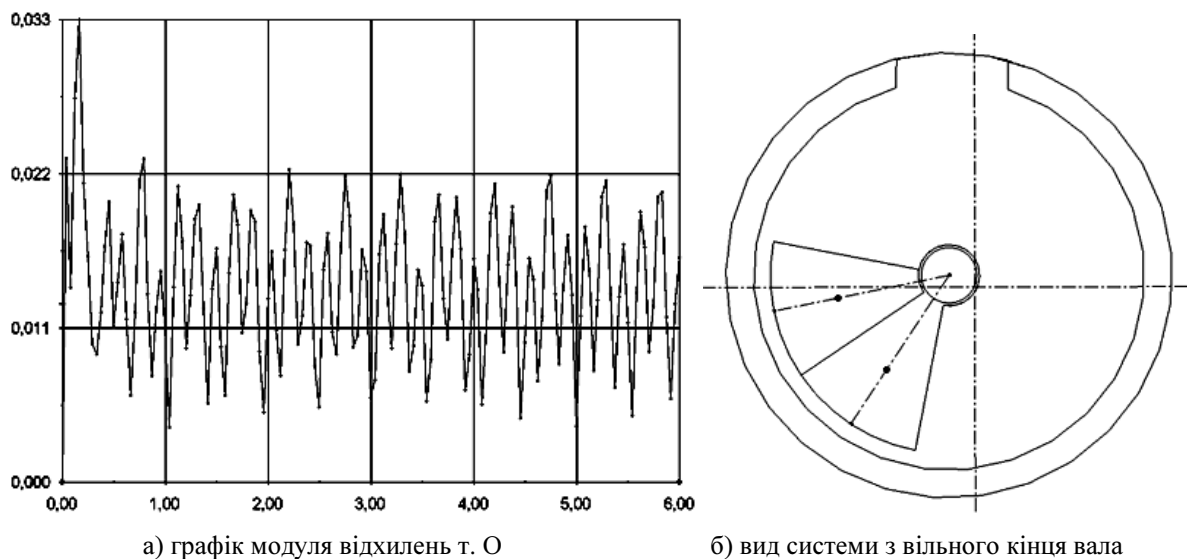


Рисунок 5 – Квазіперіодичний рух: $h=4,4 \times 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$

3) При малому h , що змінюється в межах $5 \times 10^{-6} \div 2 \times 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$, відбувається повільне балансування роторної системи через велику рухливість маятників щодо ротора (рис. 7, табл., п. 3).

4) При середніх значеннях параметра h , що змінюється в межах $2 \times 10^{-5} \div 3 \times 10^{-2} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$, відбувається швидке балансування роторної системи (рис. 8, табл., п. 4).

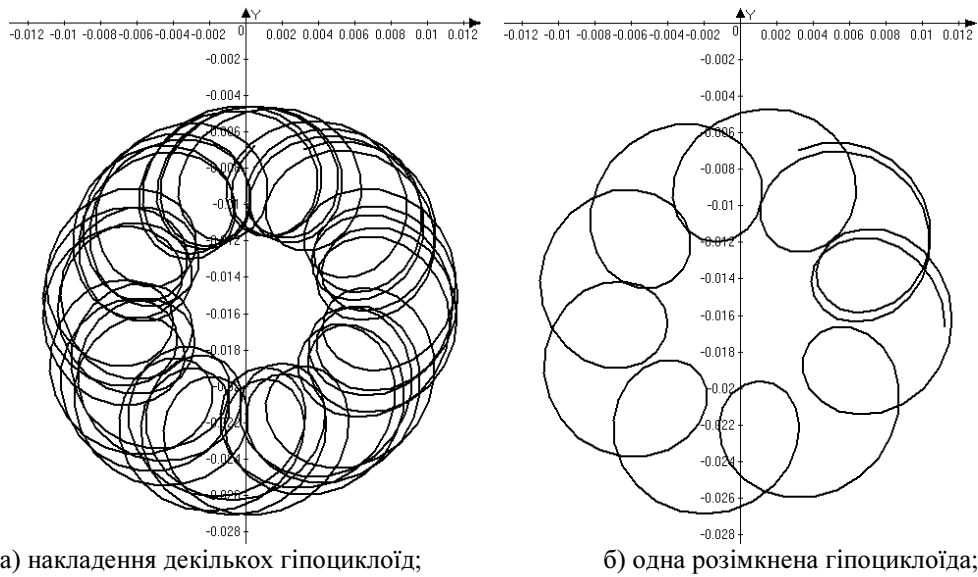
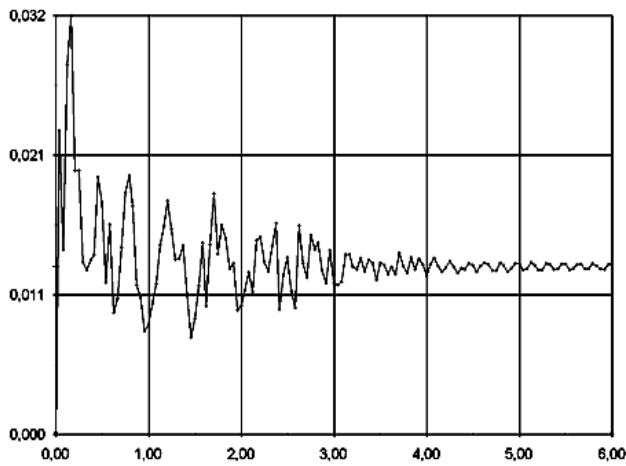
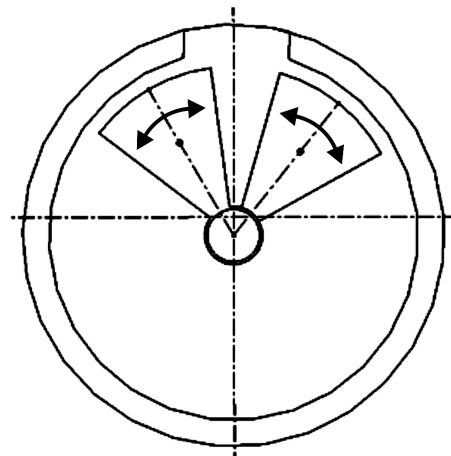


Рисунок 6 – Гіпоциклоїди $h=4,4 \times 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{град}$

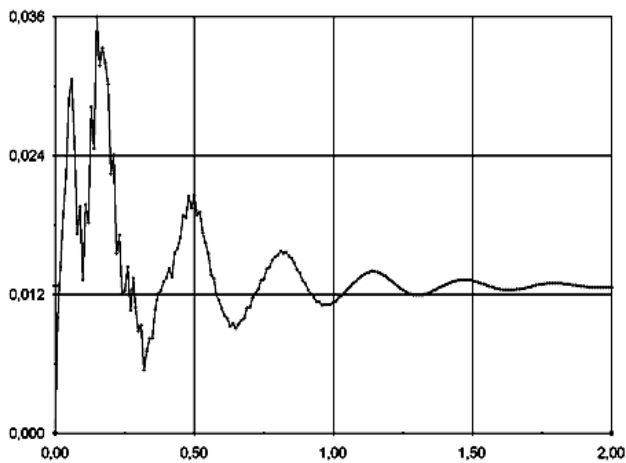


а) графік модуля відхилень т. О

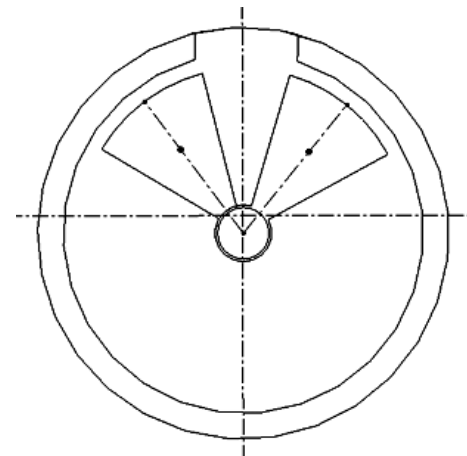


б) вид системи з вільного кінця вала

Рисунок 7 – Повільне балансування при малих силах опору: $h=6 \times 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{град}$



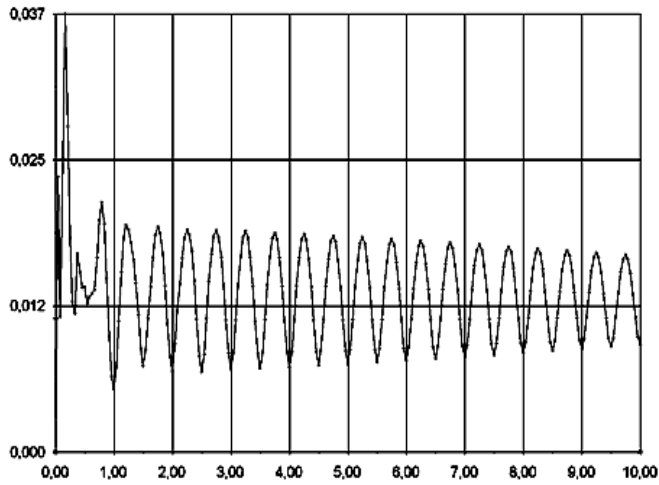
а) графік модуля відхилень т. О



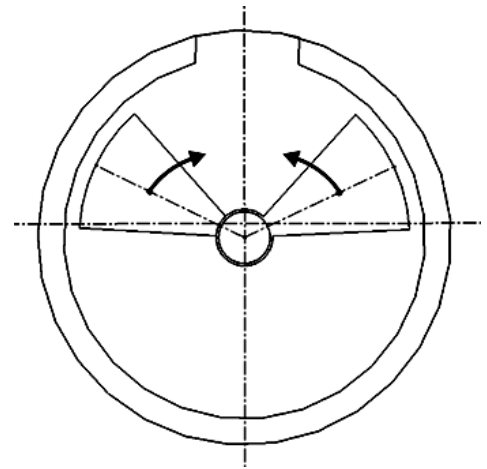
б) вид системи з вільного кінця вала

Рисунок 8 – Швидке балансування: $h=0,001 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{град}$

5) При великих значеннях параметра h , що змінюється в межах $3 \times 10^{-2} \div 10 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$, відбувається повільне балансування через повільне переміщення маятників щодо ротора (рис. 9, табл., п. 5).



а) графік модуля відхилень т. О

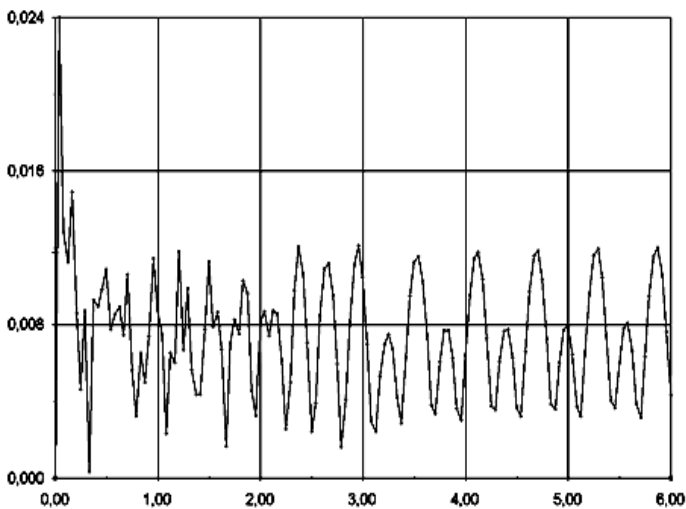


б) вид системи з вільного кінця вала

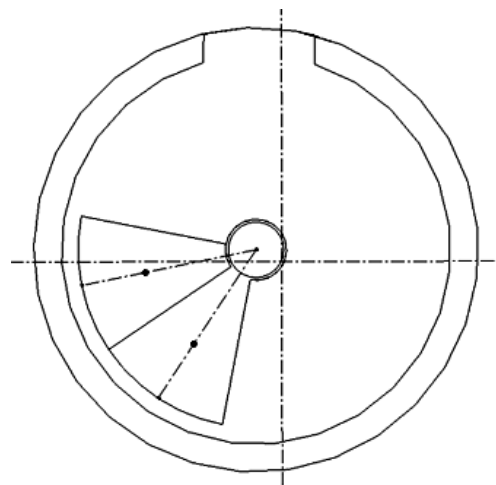
Рисунок 9 – Маятники повільно приходять у положення балансування: $h=0,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$

Відсутність сил ваги. Сили опору змінювалися в межах $1 \times 10^{-6} \div 10 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$.

1) При дуже малому параметрі h , що змінюється в межах $0 \div 7 \times 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$, маятники здійснюють квазіперіодичний рух (рис. 10, табл., п. 2). Наявність цього режиму відома з теорії пасивних автобалансирів [3].



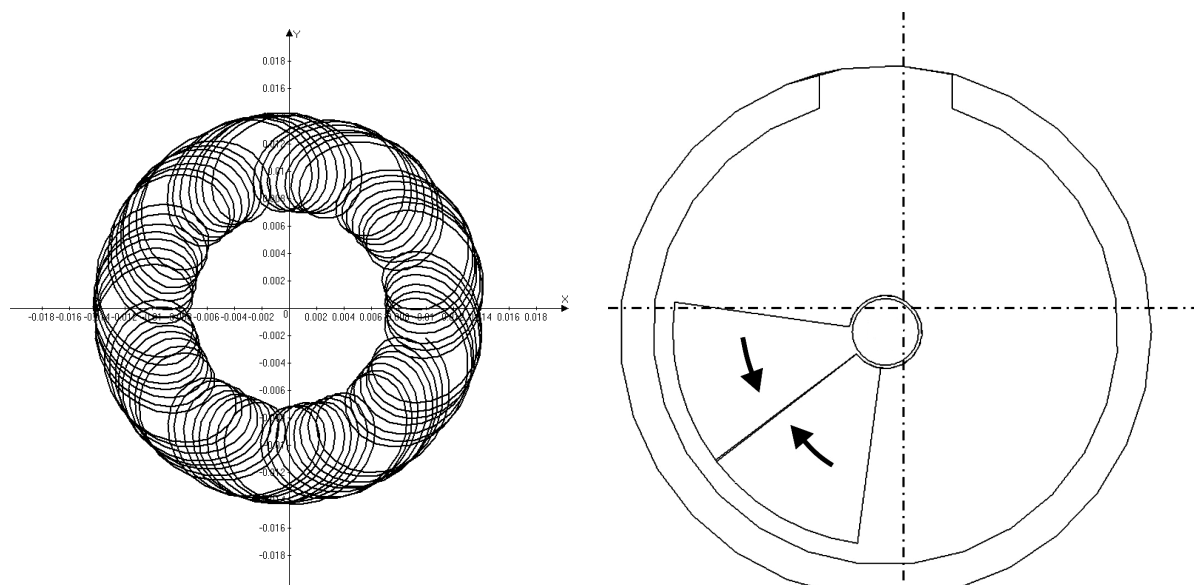
а) графік модуля відхилень т. О



б) вид системи з вільного кінця вала

Рисунок 10 – Квазіперіодичний рух: $h=4 \times 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}/\text{град}$

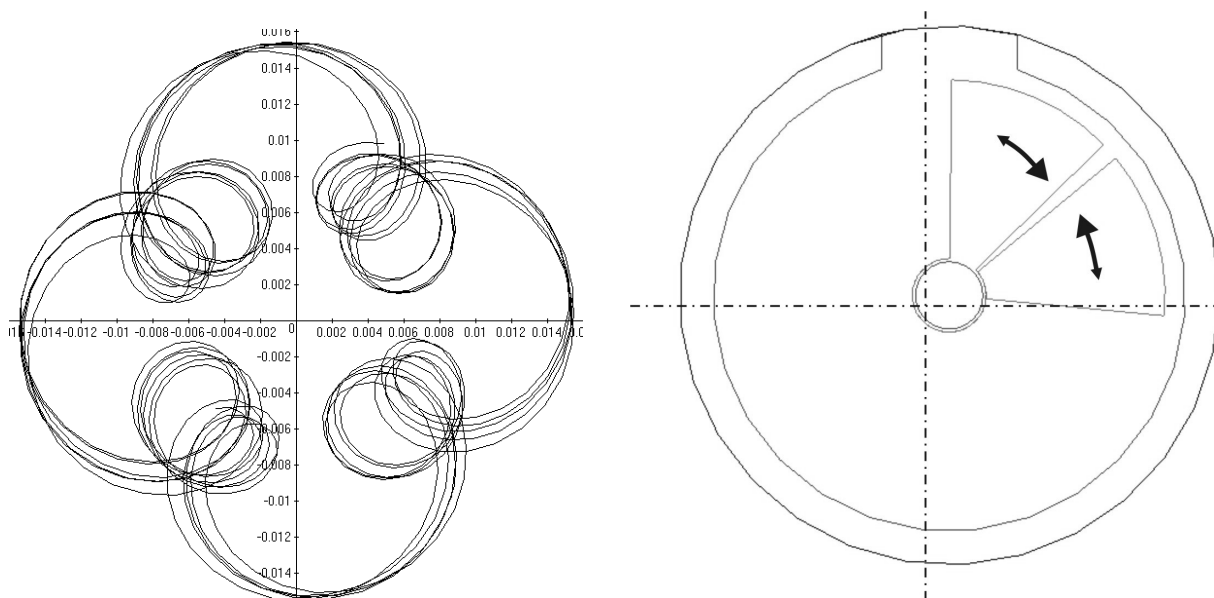
Картина звичайного квазіперіодичного руху системи без урахування сил ваги приведена на рис. 11. У ньому маятники дотикаються один до одного. Можливі також аномальні квазіперіодичні рухи, при яких маятники дещо зближуються і віддаляються один від одного, що призводить до появи додаткових коливань, які накладаються на гіпоциклоїди (рис. 12).



а) накладення декількох гіпоциклоїд;

б) вид системи збоку

Рисунок 11 – Звичайна гіпоциклоїда $h=4 \times 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{град}$



а) накладення декількох гіпоциклоїд;

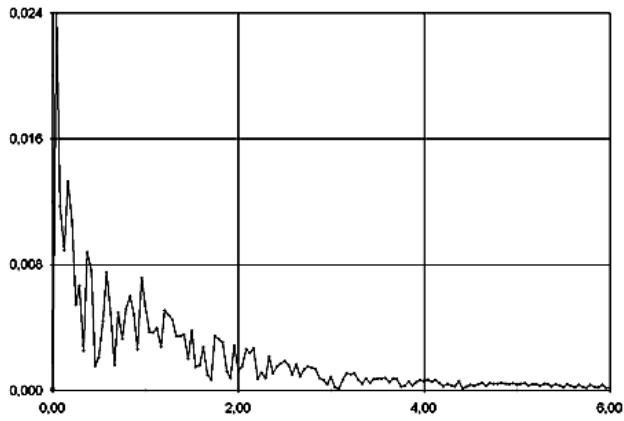
б) вид системи збоку

Рисунок 12 – Незвичайна гіпоциклоїда, $h=6 \times 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{град}$

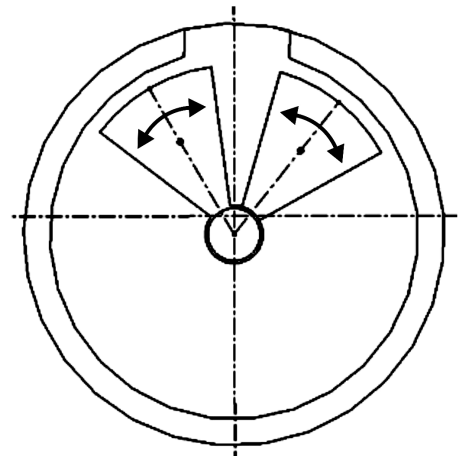
2) При малому параметрі h , що змінюється в межах $7 \times 10^{-6} \div 3 \times 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{град}$, відбувається повільне балансування ротора через велику рухливість маятників щодо ротора (рис. 13, табл., п. 3).

3) При середньому h , що змінюється в межах $3 \times 10^{-5} \div 2 \times 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{град}$, відбувається швидке балансування роторної системи (рис. 14, табл., п. 4).

4) При великому h , що змінюється в межах $2 \times 10^{-2} \div 10 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{град}$, відбувається повільне балансування через повільний рух маятників щодо ротора (рис. 15, табл., п. 5).

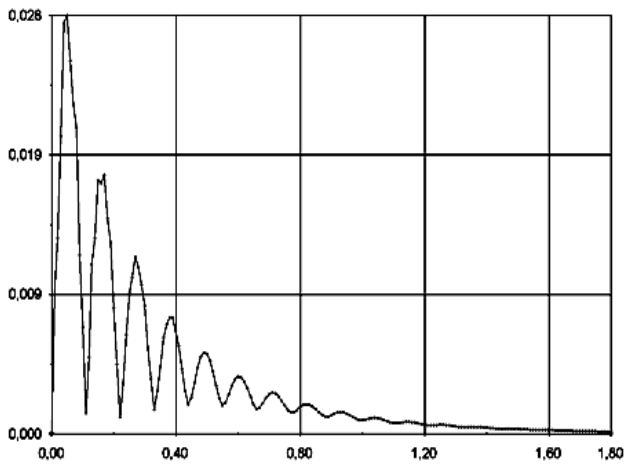


а) графік модуля відхилень т. О

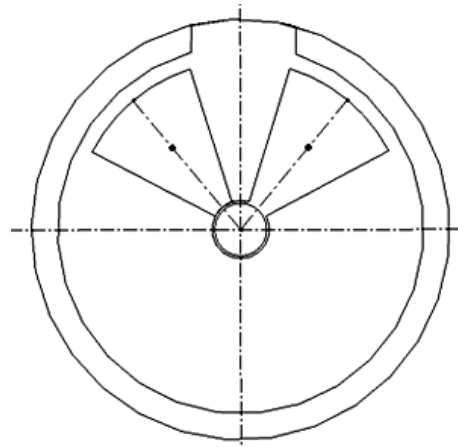


б) вид системи з вільного кінця вала

Рисунок 13 – Повільне балансування: $h=2 \times 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{град}$

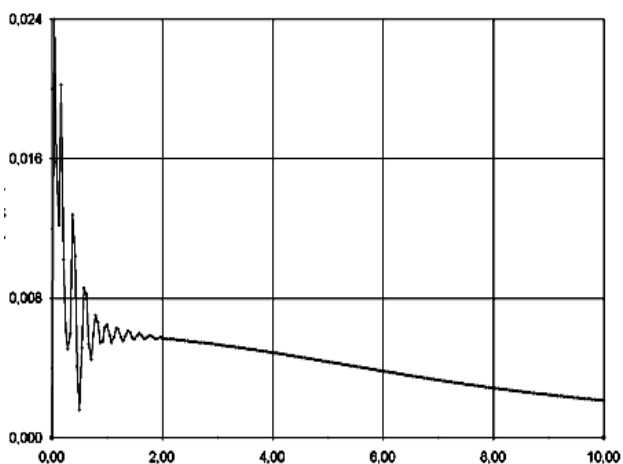


а) графік модуля відхилень т. О

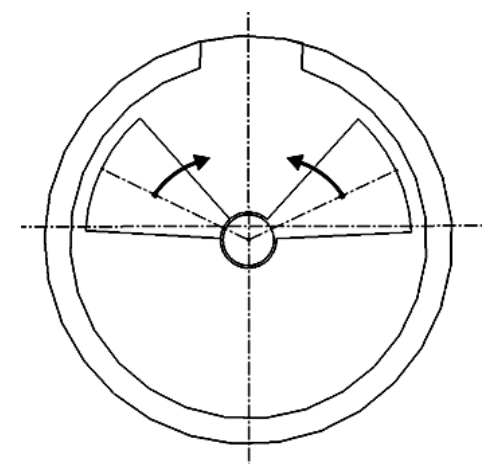


б) вид системи з вільного кінця вала

Рисунок 14 – Швидке балансування: $h=0,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{град}$



а) графік модуля відхилень т. О

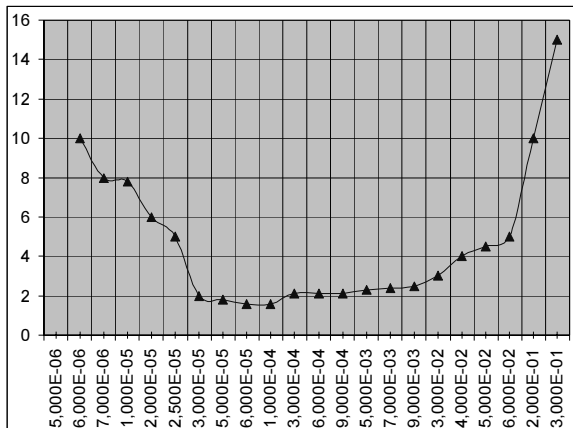


б) вид системи з вільного кінця вала

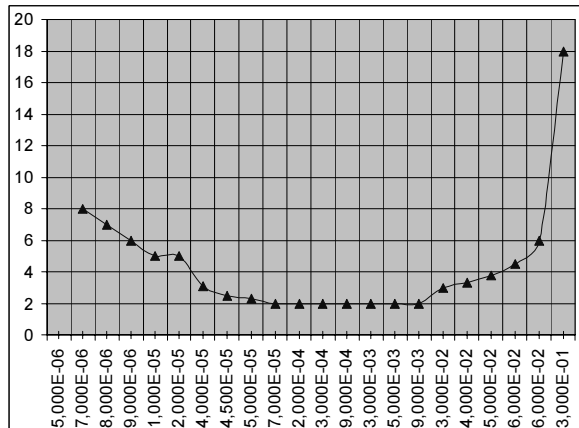
Рисунок 15 – Повільне балансування: $h=0,5 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{град}$

Таблиця 1 - Вплив сил в'язкого опору, діючих на маятники на процес балансування ротора

№	Режим руху	Параметр h		$T_{пер, сек}$	Характеристики руху
		Сили ваги ϵ	Сил ваги немає		
1	Маятники висять (дуже мале h)	$1 \cdot 10^{-6} \div 4,3 \cdot 10^{-6}$	-	-	Маятники висять, дещо відхилившись від вертикалі
2	Квазіперіодичні рухи (мале h)	$4,3 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6} \div 7 \cdot 10^{-6}$	$10 \div \infty$	Маятники здійснюють квазіперіодичні рухи
3	Повільне балансування (мале h)	$5 \cdot 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-5}$	> 3	Маятники довго коливаються навколо положення балансування через надмірну рухливість
4	Швидке балансування (середнє h)	$2 \cdot 10^{-5} \div 3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-5} \div 0,02$	< 3	Маятники швидко приходять в положення балансування
5	Повільне балансування (велике h)	$3 \cdot 10^{-2} \div 10$	$0,02 \div 10$	$10 \div \infty$	Маятники повільно приходять в положення балансування з тривалим перехідним процесом



а) Сили ваги ϵ



б) Сили ваги відсутні

Рисунок 16 – Вплив величини сил в'язкого опор, діючих на маятник на швидкість настання балансування

Висновки:

1. Створена модель ротора з нерухомою точкою на в'язко-пружній опорі, що зрівноважується двохмаятниковим автобалансиром і показана можливість моделювання динаміки системи в модулі Motion, програми SW.

2. Вивчено вплив сил в'язкого опор, діючих на маятники, на різні режими руху системи при врахуванні і не врахуванні сил ваги. Встановлено, що:

а) як за наявності, так і за відсутності сил ваги у системи існують три режими настання автобалансування: повільний – при малих силах опору; швидкий – при середніх силах опору; повільний – при великих силах опору;

б) за наявності сил ваги і малих силах опору у системи існує режим руху, при якому маятники не можуть розігнатися і тому автобалансування не настає;

в) за наявністю і відсутністю сил ваги, при малих силах опору, у системи існує звичайний квазіперіодичний режим руху, при якому маятники щільно притиснуті один до одного, відстають від ротора, і автобалансування не настає.

г) за відсутністю сил ваги у системи може існувати незвичайний квазіперіодичний режим руху, у якому до звичайної гіпоциклоїди додаються додаткові складові, викликані наближенням і розходженням маятників.

Список літератури

1. Thearle E. L. Automatic dynamic balancers Part 2 – Ring, pendulum and ball balancers // Machine Design, 1950b, Vol. 22 No 10, pp. 103-106.
2. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия. -М.: Наука, 2002. -119 с.
3. Філімоніхін Г.Б. Зрівноваження і віброзахист роторів автобалансирами з твердими коригувальними вантажами: Монографія (за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин). - Кіровоград: КНТУ, 2004. - 352 с.
4. Г.Б.Філімоніхін, А.В.Коваленко. Дослідження процесу зрівноважування ротора двохмаятниковим автобалансиром із застосуванням програми Solid Works і модуля Motion // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні.- Львів: «Львівська політехніка».-2006 -№ 40 –С. 254-261.

Использовано под программу Solid Motion для моделирования динамики уравновешивания двухмаятниковым автобалансиром ротора с неподвижной точкой на одной вязко упругой опоре. Определенно разные режимы движения системы в зависимости от величин сил вязкого сопротивления, которые действуют на маятники.

It is used subprogram Solid Motion for the design of dynamics of balancing of rotor a two-pendulum autobalanser with an immobile point on one viscidly resilient support. Certainly different modes of motion of the system depending on the sizes of forces of viscid resistance of, which operate on pendulums.

Одержано 27.10.06