

УДК 531.36:62-752+62-755

І.І.Філімоніхіна, асист., Г.Б.Філімоніхін, проф., д-р техн. наук  
Кіровоградський національний технічний університет

## Комп'ютерне моделювання динаміки обертового несучого тіла з маятниковими автобалансирами

У програмному середовищі SolidWorks з використанням модуля Cosmos Motion змодельована динаміка ізольованої обертової системи, складеної з незрівноваженого обертового несучого тіла і одного чи двох двохмаятникових автобалансирів. Комп'ютерним моделюванням якісно перевірений прояв двох тенденцій при русі ізольованих обертових систем з автобалансирами – до зменшення кута нутації і до автобалансування. Підтверджені результати, одержані раніше аналітичними методами досліджень.  
**обертове тіло, кут нутації, демпфер кута нутації, автобалансир**

**Вступ.** В роботах [1-9] вирішується актуальна задача з методики визначення усталених рухів та дослідження їх на умовну стійкість для ізольованих систем, складених з обертового несучого тіла і різних приєднаних до нього тіл, відносному руху яких перешкоджають сили в'язкого опору.

В роботах [4-8] конкретизовані дві методики, які ґрунтуються на енергетичних підходах Лагранжа і Рауса. Вони дозволяють складати рівняння усталених рухів, виділяти ці рухи і оцінювати їх стійкість без складання диференціальних рівнянь руху. Показано, що методики дають ідентичні результати і дозволяють одержувати необхідні умови умовної стійкості усталених рухів, що з точністю до меж співпадають з достатніми. У роботах [3,5,7,8] із застосуванням конкретизованої методики і евристичного методу встановлено існування двох незалежних тенденцій при роботі автобалансирів (АБ) будь-якого типу: зменшення кута нутації, викликаного неточним наданням початкового обертання тілу тільки у разі сплюсненого складеного тіла (робота АБ як демпфера кута нутації); тенденція до приходу тіл АБ до положення, в якому вони зрівноважують тіло у випадках витягнутого або сплюсненого складеного тіла (робота АБ як автобалансира).

Метою цієї роботи є якісна перевірка і вивчення прояву двох тенденцій при русі ізольованих обертових систем з АБ з використанням комп'ютерного моделювання у програмному середовищі SolidWorks з використанням модуля Cosmos Motion. Моделювання процесу автобалансування проводиться відповідно до методики, розробленої у роботах [10,11].

**Задачі комп'ютерного моделювання.** Відповідно до результатів робіт [3,5,7,8] треба змодельовати рух таких ізольованих обертових механічних систем:

- а) система з двома АБ утворює витягнуте складене тіло ( $A, B > C$ );
- б) система з двома АБ утворює сплюснуте складене тіло ( $C > A, B$ );
- в) система з одним АБ утворює витягнуте складене тіло ( $A, B > C$ );
- г) система з одним АБ утворює сплюснуте складене тіло ( $C > A, B$ ), причому АБ віддалений від центра мас тіла так, що принаймні  $C < A + b^2 M_{\Sigma}$ , або  $C < B + b^2 M_{\Sigma}$ ;
- д) система з одним АБ утворює сплюснуте складене тіло ( $C > A, B$ ), причому АБ віддалений від центра мас тіла так, що  $C > A + b^2 M_{\Sigma}$ ,  $C > B + b^2 M_{\Sigma}$ .

У експериментах 1,2 треба розглянути випадки: відсутності незрівноваженості; статичної незрівноваженості; моментної незрівноваженості; повної незрівноваженості.

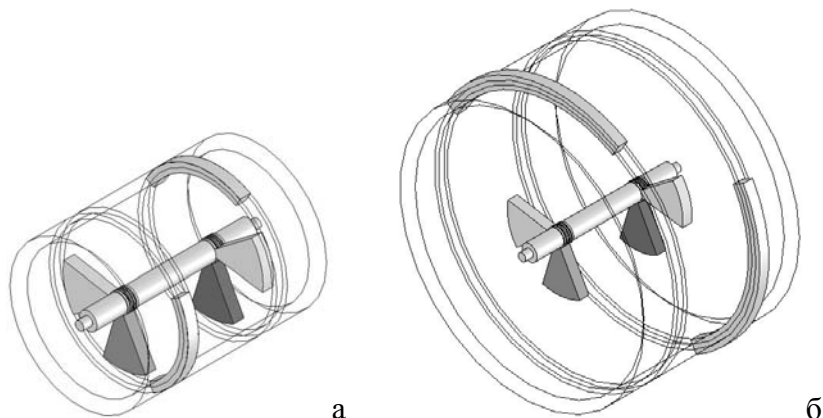
У експериментах 3-5 треба розглянути випадки: відсутності незрівноваженості; статичної незрівноваженості у площині маятників.

Під якісною перевіркою мається на увазі спостереження за рухом різних обертових систем доколи не встановиться певний усталений рух, виділення різних етапів перехідних процесів, що відповідають проявам двох тенденцій, та дослідження взаємного впливу цих тенденцій одна на одну. Конкретні параметри окремих тіл, що утворюють систему, не мають принципового значення для такої перевірки. Тому у моделюванні ці величини не вказуються.

Відповідно до одержаних результатів для асимптотичної стійкості усталених рухів необхідна наявність внутрішніх сил в'язкого опору. Величини цих сил не впливають на стійкість, а впливають на перебіг перехідних процесів. Тому нижче величини сил в'язкого опору вказуються тільки в окремих випадках, у яких це потрібно для опису перехідних процесів. Також вказується, якщо експерименти проводяться для випадку, коли тільки на одне тіло в АБ діють сили в'язкого опору. Такі експерименти потрібні для дослідження явища, у якому відносні рухи одних тіл АБ затухають за рахунок розсіювання енергії іншими тілами АБ.

У зв'язку із обчислювальними складнощами, виникаючими на межах областей, у всіх експериментах масо-інерційні і геометричні параметри системи змінюються у межах, що забезпечують виконання відповідних умов із запасом 3% і більше. Наприклад, в експериментах з витягнутим складеним тілом  $A, B \geq 1,03 \cdot C$ .

**Динаміка несучого тіла з двома АБ.** Для проведення експериментів 1, 2 була створена трьохвимірний комп'ютерна модель обертової ізольованої механічної системи, складеної з обертового несучого тіла і двох двохмаятникових АБ (рис. 1). Етапи комп'ютерного моделювання наступні (відповідно до робіт [10,11]).



а – складене тіло – витягнуте; б – сплюснуте

Рисунок 1 – Механічна система у зборі (зборка, корпус для наочності каркасний)

**Створення окремих деталей (у Solid Works).** Спочатку були створені окремі тіла (деталі), що у сукупності складають систему: вісь; дві пари маятників; корпус (витягнутий і сплюснутий); кільцеві сектори для створення дисбалансу.

**Створення із деталей зборки (у Solid Works).** Варіанти механічних систем у зборі (зборка) зображені на рис. 1. Для проведення експерименту 1 використовується витягнутий корпус (рис. 1, а), а для експерименту 2 – сплюснутий (рис. 1, б). Для перевірки буде складене тіло витягнуте, чи сплюснуте використовується інструмент «Массовые характеристики» в меню «Инструменты», призначений для розрахунку масо-інерційних характеристик як окремих тіл, так і їх зборок. Для моделювання будь-якої незрівноваженості використовуються два кільцевих сегменти. Величини незрівноваженостей регулюються завданням мас сегментів, а напрямки векторів незрівноваженостей – місцем розташування сегментів на кільцевих доріжках корпусу.

При відсутності незрівноваженостей сегменти до складу системи не входять.

### **Обробка зборки модулем Cosmos Motion**

**Накладання кінематичних в'язей.** Всі тіла віднесені до рухомих (Moving Part). З використанням інструменту фіксуючого з'єднання (Fixed) вісь жорстко з'єднується із корпусом. Так само із корпусом жорстко з'єднуються сегменти, що створюють незрівноваженість. Разом – корпус, вісь і сегменти утворюють несуче тіло. З використанням в'язі типу петля (Revolute Joint) маятникам надається можливість вільно обертатися навколо осі. Маятники – створюють АБ.

**Додавання силових взаємодій між тілами системи.** З використанням інструмента *Add Torsion Damper* до маятників були прикладені моменти сил в'язкого опору ( $10^{-6} \pm 0,1$  [Н·м·с/град]), що діють на маятники при їх обертанні навколо осі. З використанням інструменту “Add Impact Force” маятникам забороняється проходити один скрізь другого і створюються сили, що виникають при їх ударах.

**Завдання початкових умов.** З використанням інструменту IC's (Initial velocities) задаються початкові умови для кожного тіла системи. У більшості описаних експериментів початкова складова швидкості обертання несучого тіла навколо повздовжньої осі приймалася рівною 5 об/с. Решта початкових умов задаються так, щоб центр мас системи мав нульову початкову швидкість.

Спостереження за перехідними процесами проводилося:

- а) візуально, зокрема за рухом несучого тіла і відносними рухами маятників;
- б) за графіком зміни кута Ейлера  $\theta$  (кута нутації), побудованого для осі (з корпусом і кільцевими сегментами), який відраховується від початкового положення повздовжньої осі несучого тіла;
- в) за графіком зміни модуля кутової швидкості обертання, побудованого для осі (з корпусом і кільцевими сегментами).

### **Результати моделювання**

**Експерименти 1.** Система з двома АБ утворює витягнуте складене тіло ( $A, B > C$ ). Результати експериментів 1 приведені у табл. 1. Для зручності корпус на рисунках не показаний. Якщо моменти сил в'язкого опору діють на кожен маятник, то у поведінці системи виділяються такі характерні ділянки:

- а) перехід маятників в околі положення, у якому вони зрівноважують несуче тіло;
- б) рух маятників в околі положення, у якому вони зрівноважують несуче тіло – ділянка автобалансування;
- в) перехід маятників у кінцеве положення, яке відповідає усталеному руху;
- г) усталений режим руху системи – „перекидом”.

Зміна параметрів моделювання показує, що прояву тенденції автобалансування сприяють такі фактори:

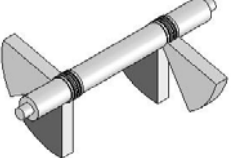
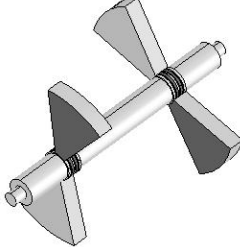
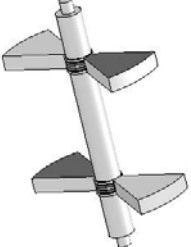
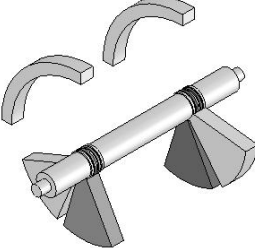
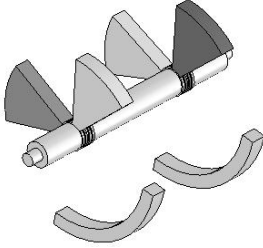
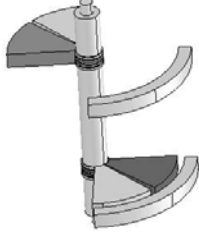
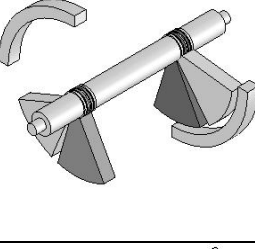
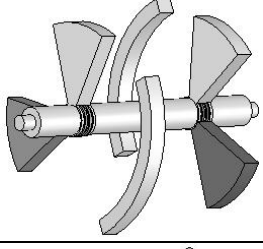
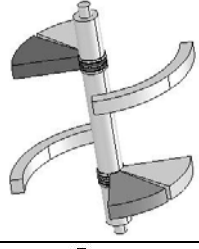
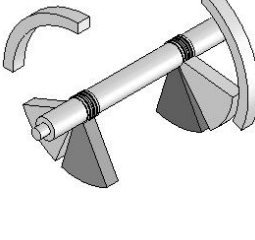
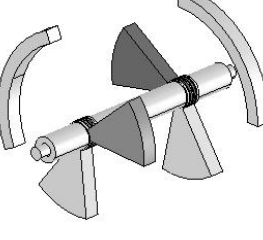
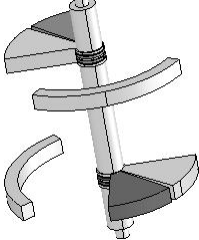
- збільшення моменту в'язкого тертя між маятниками і віссю;
- початкові умови, що задають початкове обертання складеного тіла майже навколо повздовжньої осі несучого тіла.

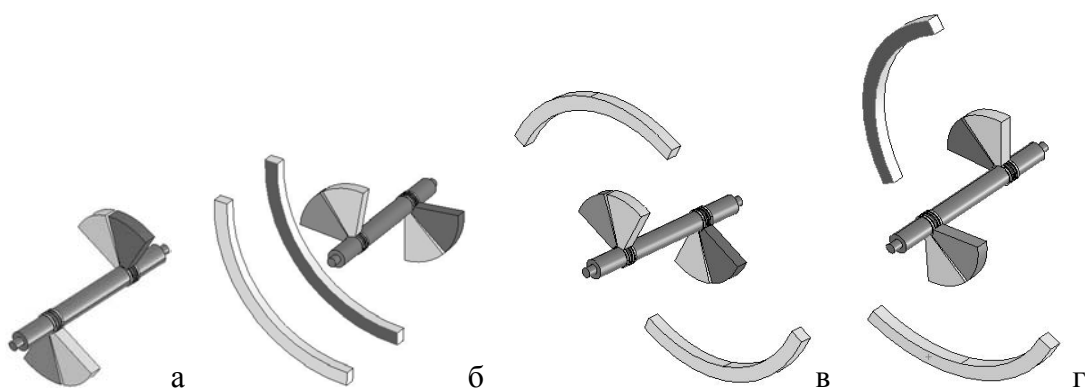
Етап автобалансування може не проявлятися при зменшенні моменту в'язкого тертя між маятниками і віссю. Так, у проведених експериментах при автобалансуванні момент опору, що діє на кожен маятник, складав  $10^{-5} \pm 0,1$  [Н·м·с/град]. Автобалансування майже не спостерігається при моменті, меншому за  $10^{-5}$  [Н·м·с/град], діючому принаймні на один маятник. В цьому випадку відбувається деякий перехідний процес, на якому немає закономірностей у рухах маятників і який закінчується відповідним усталеним рухом системи.

**Експерименти 2.** Система з двома АБ утворює сплюснуте складене тіло ( $C > A, B$ ). При будь-якій незрівноваженості несучого тіла спостерігається перехідний

процес, на якому маятники кожної пари сходяться і приходять в те положення, у якому створюють найбільшу моментну незрівноваженість системи (рис. 2).

Таблиця 1 – Експерименти 1, система з двома АБ утворює витягнуте складене тіло ( $A, B > C$ )

Тип нерівноваженості	Початкове положення	Ділянка автобалансування	Усталений рух – „перекидом”
1. Немає			
2. Статична			
3. Моментна			
4. Повна			



а – незрівноваженості немає; б – статична незрівноваженість;  
в – моментна незрівноваженість; г – повна незрівноваженість

Рисунок 2 – Експерименти 2 – система з двома АБ утворює сплюснуте складене тіло ( $C > A, B$ ), положення маятників щодо несучого тіла на усталених рухах при різних типах незрівноваженості несучого тіла (корпус не показаний)

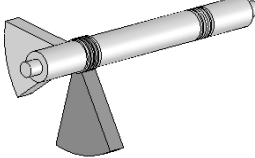
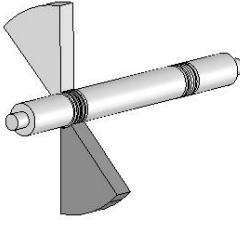

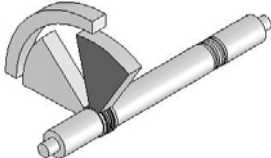
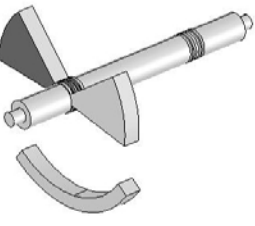
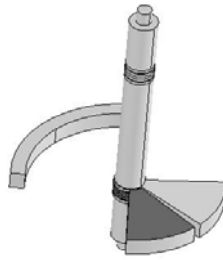
У подальшому система обертається як одне жорстке ціле навколо осі, що близька до повздовжньої осі несучого тіла – нової осі найбільшого осьового моменту інерції системи. Невеликий сталий залишковий кут нутації, викликаний незрівноваженістю системи відносно повздовжньої осі несучого тіла. Таким чином, АБ не проявляють властивості автобалансування, але проявляють властивості демпферів кута нутації.

Описана якісна поведінка системи не залежить від величин сил в'язкого опору, що діють на маятники. Ці сили тільки впливають на тривалість перехідних процесів. Зокрема момент сил в'язкого опору може діяти тільки на один маятник. При цьому відносні рухи решти маятників все одне припиняться через розсіяння енергії цим маятником.

**Динаміка витягнутого несучого тіла з одним АБ**

**Експерименти 3.** Система з одним двохмаятниковим АБ утворює витягнуте складене тіло ( $A, B > C$ ). Несуче тіло зрівноважене або має статичну незрівноваженість у площині маятників. Для проведення цих експериментів використовується таж сама комп'ютерна модель системи, що і для проведення експерименту 1, тільки з однією парою маятників. Результати експериментів занесені у табл. 2 (корпус не показаний). Система поводитья аналогічно експериментам 1.

Таблиця 2 – Експерименти 3, система з одним АБ утворює витягнуте складене тіло ( $A, B > C$ )

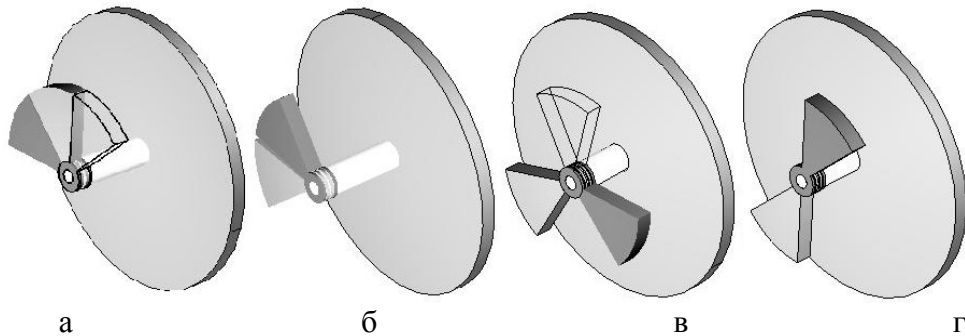
Тип незрівноваженості	Початкове положення	Ділянка автобалансування	Усталений рух – „перекидом”
1. Немає			
2. Статична			

**Динаміка сплюсненого несучого тіла з одним АБ.** Для проведення експериментів 4, 5 була створена відповідна модель обертової ізольованої механічної системи з одним двохмаятниковим АБ (рис. 3-6). Етапи комп'ютерного моделювання такі ж самі, як і вище. Система складається з: осі (короткої чи довгої); пари маятників; маятника, що створює статичну незрівноваженість; диска.

Зміною довжини осі, а разом з цим і параметра  $b$  можна забезпечувати як виконання умови настання автобалансування ( $C > A + b^2 M_{\Sigma}$ ,  $C > B + b^2 M_{\Sigma}$ ), так і її порушення. Статична незрівноваженість створюється третім маятником (зображається каркасно), який жорстко зв'язується із віссю. Маятники, що утворюють АБ, встановлюються на вісь із можливістю вільного обертання.

**Експерименти 4.** В експериментах вісь – довга, тобто умова ( $C > A + b^2 M_{\Sigma}$ ,  $C > B + b^2 M_{\Sigma}$ ) не виконується. В експерименті 4.1 несуче тіло – статично не зрівноважене (рис. 3, а), а в експерименті 4.2 – зрівноважене (рис. 3, б).

В обох експериментах маятники приходять у кінцеве положення і система починає обертатися із сталою кутовою швидкістю як одне ціле навколо нерухомої у просторі осі. При цьому подовжня вісь несучого тіла рухається по конусу, а маятники зібрані разом і створюють найбільшу статичну незрівноваженість несучого тіла (рис. 3, а, б). Сталій залишковий кут нутації викликаний незрівноваженістю складеного тіла відносно подовжньої осі несучого тіла.



а – вісь довга, несуче тіло статично не зрівноважене (експеримент 4.1);  
 б – вісь довга, несуче тіло статично зрівноважене (експеримент 4.2);  
 в – вісь коротка, несуче тіло статично не зрівноважене (експеримент 5.1);  
 г – вісь коротка, несуче тіло статично зрівноважене (експеримент 5.2)  
 Рисунок 3 – Експерименти 4, 5 – сплюснуте складене тіло з одним АБ, усталені рухи системи

**Експерименти 5.** В експериментах вісь – коротка, тобто умова ( $C > A + b^2 M_{\Sigma}$ ,  $C > B + b^2 M_{\Sigma}$ ) виконується. В експерименті 5.1 несуче тіло – статично не зрівноважене (рис. 3, в), а в експерименті 5.2 – зрівноважене (рис. 3, г).

В обох експериментах маятники приходять у кінцеве положення, у якому складене несуче тіло зрівноважене відносно подовжньої осі несучого тіла і система починає обертатися навколо цієї осі із сталою кутовою швидкістю як одне ціле, тобто здійснюється так званий основний рух (рис. 3, в, г).

Якщо в експериментах 5 моменти сил в'язкого опору діють тільки на один рухомий маятник, то тривалість перехідних процесів збільшується, але після них система здійснює основний рух, тобто зрівноважена.

Експерименти 5 проводилися при різній довжині осі. Було встановлено, що при виконанні умови ( $C > A + b^2 M_{\Sigma}$ ,  $C > B + b^2 M_{\Sigma}$ ) автобалансування відбувається (стійкий – основний рух), а при невиконанні – ні. В останньому випадку маятники завжди збираються разом, чим створюють найбільшу статичну незрівноваженість. Виявити побічний рух, що зароджується із основного, на межі області стійкості ( $C \approx A + b^2 M_{\Sigma}$ ,  $C \approx B + b^2 M_{\Sigma}$ ) обчислювальними експериментами не вдалося.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволяють зробити такі висновки для обертаних ізольованих систем, складених з обертового несучого тіла і одного чи двох двохмаятникових АБ.

1. При русі системи проявляються дві тенденції – до демпфірування кута нутації у випадку сплюсненого складеного тіла і до автобалансування – у випадках витягнутого складеного тіла з одним чи двома АБ, чи сплюсненого складеного тіла з одним АБ, встановленим поблизу центра мас системи.

2. Дві тенденції проявляються разом тільки у випадку сплюсненого складеного тіла з одним АБ, встановленим поблизу центра мас системи. Тому тільки в цьому випадку повністю усувається кут нутації.

3. Величини моментів сил в'язкого тертя, діючих на маятники, впливають на час перебігу перехідних процесів, але не впливають на усталений рух системи, який з часом встановиться. Для того, щоб з часом рух системи встановився, достатньо, щоб сили в'язкого опору діяли тільки на один маятник.

## Список літератури

1. Горошко О.О. Стабілізація положення осі обертання абсолютно твердого тіла багатомаятниковим (багатокульовим) автобалансиром / О.О. Горошко, Г.Б. Філімоніхін, В.В. Пирогов, І.І. Філімоніхіна // Вісник Київського ун-ту. Серія: фізико-матем. науки. – 2005. – №4. – С. 67–76.
2. Филимоныхин Г.Б. Стабилизация маятниковыми демпферами пространственного положения оси вращения несущего тела / Г.Б. Филимоныхин, В.В. Пирогов, И.И. Филимоныхина // Прикладная механика, т.43, №10, 2007. –С.120-128.
3. Філімоніхіна І.І. Умови зменшення автобалансирами кута нутації обертового супутника Землі // Вібращі у техніці та технологіях. –2007.– №1 (46), – С. 34-37.
4. Філімоніхіна І.І. Визначення умов зрівноважування обертових тіл пасивними автобалансирами // Тези доповідей 8-го Міжнародного симпозіуму Українських інженерів-механіків у Львові, 22-25.05.2007, С. 33.
5. Филимоныхина И.И. Условия уравновешивания автобалансирами вращающегося тела в изолированной системе / И.И. Филимоныхина, Г.Б. Филимоныхин // Прикладная механика. – 2007. – Т.43.– №11. – С. 113–120.
6. Філімоніхіна І.І. Усталені рухи і умови самозрівноваження одного типу ізольованої системи // Вісник Київського ун-ту. Серія: фізико-матем. науки. 2007. №3. –С.103-109.
7. Застосування пасивного автобалансира як демпфера кута нутації сплюсненого обертового космічного апарата: Пат. на корисну модель № 28407 Україна, МПК В64G 1/00 / І. І. Філімоніхіна, Г.Б. Філімоніхін (Україна); КНТУ - № 200708020; Заявл. 16.07.2007; Опубл. 10.12.2007, Бюл.№20.
8. Горошко О.О. Достатні умови усунення автобалансирами кута нутації незрівноваженого обертового тіла в ізольованій системі / О.О. Горошко, І.І. Філімоніхіна // Вісник Київського ун-ту. Серія: фізико-матем. науки. 2008. -№1. –С.53-58.
9. Філімоніхіна І.І. Умови стійкості основних рухів чотирьох обертових ізольованих систем / І.І. Філімоніхіна, О.О. Горошко // Вісник Київського ун-ту. Серія: фізико-матем. науки.– 2008. -№3. – С. 99-105.
10. Філімоніхін Г.Б. Дослідження процесу зрівноважування ротора двомаятниковим автобалансиром із застосуванням програми SolidWorks і модуля Motion / Г.Б.Філімоніхін, О.В.Коваленко // Український міжвідомчий науково-технічний збірник “Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні”, 2006. Вип №40, С. 254-261.
11. Філімоніхін Г.Б. Моделювання процесу зрівноваження ротора з нерухою точкою двомаятниковим автобалансиром із застосуванням програми SolidWorks і модуля Motion / Г.Б.Філімоніхін, О.В.Коваленко // Загальнодержавний міжвідомчий н.-т. збірник “Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин”, 2006.– Вип. 36, – С. 19-28

*И.Филимоныхина, Г.Филимоныхин*

### **Компьютерное моделирование динамики вращающегося несущего тела с маятниковыми автобалансирами**

В программной среде SolidWorks с использованием модуля Cosmos Motion смоделирована динамика изолированной вращающейся системы, состоящей из неуравновешенного вращающегося несущего тела и одного или двух двухмаятниковых автобалансиров. Компьютерным моделированием качественно проверено проявление двух тенденций при движении таких систем – к уменьшению угла нутации и к автобалансировке. Подтверждены результаты, полученные ранее аналитическими методами исследований.

*I. Filimonikhina, G. Filimonikhin*

### **The computer dynamics modeling of rotating lifting body with pendular autobalancers**

In the software environment SolidWorks with the use of the Cosmos Motion module the dynamics of the isolated revolved system consisting of the unbalanced revolved bearing body and one or two two-pendulum autobalancer is modeled. By the computer design is tested the display of two tendencies at motion of such systems – to reduction of corner of notation and to autobalancing. Are confirmed the results which was obtain before by analytical methods of researches.

Одержано 23.11.09