

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**Дашкевич Андрій Олександрович**

УДК 514.18

**ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ ДІЇ ПЛАНЕТАРНИХ ТІСТОМІСИЛЬНИХ  
МАШИН**

Спеціальність 05.01.01 –  
Прикладна геометрія, інженерна графіка

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2008**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: - доктор технічних наук, професор  
*Куценко Леонід Миколайович,*  
професор кафедри інженерної  
і аварійно - рятувальної техніки,  
Університет цивільного захисту України  
(м. Харків).

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор  
*Борисенко Валерій Дмитрович,*  
завідувач кафедри інженерної графіки,  
Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова; (м. Миколаїв);

- кандидат технічних наук, доцент  
*Ренкас Андрій Гнатович,*  
начальник кафедри пожежної  
і аварійно - рятувальної техніки,  
Львівський державний університет  
безпеки життєдіяльності (м. Львів).

Захист відбудеться 27.02.2008 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.06 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою:

03680, Київ-680, Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 466

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою:

03680, Київ-680, Повітрофлотський проспект, 31

Автореферат розісланий 25.01.2008 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.О. Плоский

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Рівень науково-виробничого потенціалу України визначається використанням новітніх технологій світового рівня. Зокрема, в харчовому машинобудуванні перспективними вважаються технології перемішування в'язких речовини з важільними робочими органами, рухи яких задаються планетарними механізмами. Процес змішування характеризується складною траєкторією руху важеля, що забезпечує високий ступінь гомогенності змішуваних матеріалів. Проблема полягає у виборі такої конструкції робочого органу змішувача, яка б дозволила провести прийнятний для практики процес перемішування при знижених енерговитратах. Ефективність процесу перемішування (тобто енерговитрати на отримання одиниці об'єму змішуваних матеріалів) залежить від форми траєкторії руху робочого органу. Для прикладної геометрії при використанні планетарного механізму цікавим є те, що форма траєкторії руху робочого органу може бути одержана як параметрична трохойдна крива, належна сім'ям епі- або гіпоциклоїд. Визначення на стадії проектування раціональної схеми конструкції змішувача сприятиме появі новітньої техніки і технології світового рівня, що вказує на актуальність вибраної теми досліджень.

Розраховувати рух робочого органу змішувача доцільно за допомогою геометричного моделювання процесу перемішування. При цьому предметом досліджень можуть бути кінематичні криві і поверхні, які походять від сімей кривих епі- і гіпоциклоїд, а також енергетичні поверхні у фазових просторах. Зазначимо, що геометричне моделювання об'єктів складної форми є одним з головних напрямків розвитку прикладної геометрії і інженерної графіки. Значний внесок у розв'язання конкретних задач формоутворення зробили В.В.Ванін, С.М.Ковальов, В.Є.Михайленко, В.М.Найдиш, В.С.Обухова, А.В.Павлов, А.М.Підкоритов, О.Л.Підгорний, К.О.Сазонов, І.А.Скидан та ін. Проте, проведені дослідження не дозволяють здійснити наскрізне проектування змішувачів планетарного типу. Однією з причин цього була відсутність геометричних і математичних моделей, які б дозволили описати сім'ї кінематичних кривих класу трохойд, що включають епі- і гіпоциклоїди, а також відсутність математичних процесорів, які б дозволили досліджувати такі криві на аналітичному і графічному рівнях в реальному масштабі часу.

У роботах Л.М.Куценка та його учнів С.В.Росохи, Д.Л.Соколова, О.Б. Васильєва та В.Г.Рєви проведені дослідження стосовно формоутворення геометричного об'єкта за допомогою планетарних механізмів. При цьому ще не дослідженим виявилось питання створення ефективних алгоритмів побудови, аналітичного опису та унаочнення кривих та поверхонь як результату формоутворення планетарним механізмом для виявлення раціональних значень його параметрів, коли функція мети пов'язана з енергозатратами для руху привідної ланки цього планетарного механізму. Тому, доцільними будуть дослідження впливу параметрів траєкторії руху активної частини важільного планетарного механізму на енергію, яку необхідно витратити для руху його привідної ланки, що буде певним кроком до технології проектування змішувачів матеріалів зі зниженими енерговитратами.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі нарисної геометрії і комп'ютерної графіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках науково-технічної програми кафедри на замовлення НПП „Екструдер”.

**Мета і задачі дослідження.** Метою є спосіб дослідження тістомісильного механізму планетарного типу шляхом опису траєкторій руху його точок, належних робочому органу, та аналізу графіка функції його повної енергії.

*Об'єктом дослідження* є явище формоутворення кривих і поверхонь шляхом унаочнення результатів різновидів обкатки планетарним механізмом.

*Предметом дослідження є спосіб складання алгоритмів геометричного моделювання роботи важільних місильних механізмів планетарного типу з подальшим визначенням їх раціональних параметрів.*

*Методи дослідження:* положення прикладної геометрії, аналітичні можливості Maple, методи обчислювальної математики і комп'ютерної графіки. Застосовуються елементи теоретичної механіки і теорії машин та механізмів.

Для досягнення мети досліджень у дисертації поставлено такі **задачі**:

1. Здійснити огляд схем дії важільних механізмів у якості змішувачів сипких і в'язких речовин.

2. Розробити спосіб опису при планетарному русі траєкторії точки, належної робочому органу змішувача, в залежності від вхідних величин, що дозволить обирати схеми змішувачів зі знизеними енерговитратами шляхом варіювання вхідними параметрами.

3. Розробити спосіб опису сім'ї кривих, паралельних (на відстані  $h$ ) траєкторії руху точки робочого органу змішувача, що дозволить визначити переміщення речовини у околі робочого органу (ефект затягування речовини).

4. Розробити способи опису результатів моделювання поверхонь перемішування, коли робочим органом є відрізок, та побудови зображень фаз руху місильного механізму у вигляді кадрів анімаційного фільму, що дозволить скласти уяву про характер руху робочого органу у об'ємі чану.

5. Побудувати графіки розподілу енергетичних характеристик механізмів за заданими схемами, що дозволить формалізувати в залежності від вхідних параметрів аналіз форми кінематичної кривої робочого органу змішувача.

6. Результати впровадити в НПП «Екструдер» при проектуванні схем місильних апаратів для перемішування в'язких і сипучих матеріалів зі знизеними енерговитратами, та у навчальний процес НТУ «ХП».

**Наукову новизну** роботи має метод дослідження схеми планетарного механізму змішувача сипких і в'язких речовин з метою визначення його раціональних параметрів, складовими чого є:

- ◆ вперше описані рівняннями у параметричному вигляді траєкторії руху точок робочого органу змішувача в залежності від вхідних параметрів;

- ◆ вперше описані сім'ї кривих, паралельні (на відстані  $h$ ) траєкторії руху точки, належної робочому органу змішувача;

- ◆ вперше описані поверхні перемішування як результат моделювання траєкторії руху робочого органу у вигляді відрізка;

- ◆ спосіб визначення раціональних параметрів планетарного механізму змішувача шляхом побудови графіка функції його повної енергії.

**Вірогідність та обґрунтованість** результатів підтверджується доведеннями тверджень, аналітичними перетвореннями в середовищі Maple і графічними зображеннями траєкторій руху робочого органу змішувача і енергетичних характеристик для тестових прикладів, а також розрахунками в процесі впровадження методу в практику.

**Практичне значення одержаних результатів.** Викладені в дисертації результати досліджень дозволяють створювати та впроваджувати в реальну практику алгоритми розрахунку схем змішування в'язких і сипких матеріалів в хімічній і харчовій промисловості, що забезпечить ефективність виробництва. Впровадження результатів роботи виконано в НПП „Екструдер” при проектуванні нових схем місильних апаратів для перемішування в'язких і сипких матеріалів, та у навчальний процес НТУ «ХП» при підготовці бакалаврів і магістрів спеціалізації «Інформаційні технології проектування».

**Особистий внесок здобувача.** Особисто автором розроблена теоретична основа методу геометричного моделювання траєкторій руху робочого органу змішувача як результату руху привідної ланки за заданим законом. Конкретний внесок автора до наукових праць полягає в

опису траєкторії руху робочого органу змішувача в параметричному вигляді; а також у складанні конкретних алгоритмів моделювання схем змішувачів, які рухаються за заданими законами.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: науковому семінарі кафедри нарисної геометрії та графіки НТУ під керівництвом к.т.н., проф. А.М.Краснокутського (м. Харків, 2005 - 2007 рр.); міській секції графіки під керівництвом д.т.н., проф. Л.М.Куценка (м. Харків, 2006 р.); другій та третій науково-практичній конференції „Геометричне і комп’ютерне моделювання: енергозбереження, екологія, дизайн” (м. Сімферополь, 2005 р., 2006 р.); україно–російській науково–практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м. Харків, 2005 р., 2007 р.); науково – практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м. Дніпропетровськ, 2006 р.); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми геометричного моделювання» (м. Мелітополь, 2007 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 7 робіт, з них 6 одноосібно, всі у виданнях, які рекомендовано ВАК України.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновку, списку використаних джерел із 132 найменувань та додатків. Робота містить 138 сторінок машинописного тексту та 62 рисунки.

## ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить загальну характеристику роботи. Обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі досліджень. Показано наукову новизну і практичну цінність отриманих розв'язків.

У **першому розділі** наведено огляд схем дії тістомісильних машин, поширених на практиці. На рис. 1 наведено схеми деяких з них.



Рис. 1. Приклади схем тістомісильних машин.

До головних недоліків схем слід віднести те, що траєкторія руху робочого органу *не завжди заповнює ємність з речовиною*, внаслідок цього збільшується час перемішування, що призводить до зайвих енерговитрат. Звідси слідує, що кращою є схема перемішування з використанням *планетарного механізму*, перевага якої полягає у можливості забезпечення складної траєкторії руху робочого органу. Розрахунок дії тістомісильної машини має складатися з опису як траєкторії руху точки, належної робочому органу, так і робочого органу в цілому, визначення кінематичних (швидкості та прискорення) і динамічних характеристик роботи тістомісильної машини, а також визначення повної енергії для приводу її в дію, в залежності від схеми планетарного механізму.

В **другому розділі** розглянуто основи геометричного моделювання траєкторії руху за схемою планетарного механізму точок, належних робочому органу тістомісильної машини. Як лінії течії переміщуваної речовини в околі робочого органу, наведено описи сім'ї ліній, еквідистантних до зазначених траєкторій руху (в тісті під час перемішування виключається поява вихору).

Нехай рух робочого органу тістомісильної машини - важеля АМ - приводиться в дію за допомогою планетарного механізму (рис. 2).

Рис. 2. Схема „планетарної” тістомісильної машини.

Вважається, що коло радіуса R нерухоме, а коло радіуса r котиться без проковзування всередині більшого кола. Тоді довільна точка меншого кола опише гіпоциклоїду, рівняння якої в прямокутних координатах  $Oxy$  має вигляд

$$\begin{aligned} x_A &= (R - r) \sin t - (r + h) \sin \frac{(R - r)t}{r}; \\ y_A &= (R - r) \cos t + (r + h) \cos \frac{(R - r)t}{r}. \end{aligned} \quad (1)$$

Тут  $t$  – кут між віссю  $Oy$  і радіус-вектором точки А;  $h$  – мінімальна відстань між точкою А і точкою дотику кіл. Важіль робочого органу тістомісильної машини довжиною  $L$  приєднаний в точці А до рухомого кола і проходить через фіксовану точку повідця В. Точка С важеля рухається всередині ємності чана з тістом.

Розроблено спосіб складання рівняння траєкторії руху точки С. Із рівняння прямої  $AB$   $\frac{x}{x_A} = \frac{y + H}{y_A + H} = z$  одержуємо вирази для опису координат точки С:  $x_C = zx_A$ ;  $y_C = (y_A + H)z - H$ . Значення параметра  $z$  визначаємо як корінь рівняння, складеного на основі виразу для обчислення довжини важеля  $(x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 = L^2$ .

Епіциклоїдним є такий механізм, у якому рух робочого органу забезпечується зовнішнім коченням колеса радіуса  $r$  по колесу радіуса  $R$ . Якщо колесо радіуса  $r$  котиться всередині колеса радіуса  $R$ , то такий механізм є гіпоциклоїдним. Математичний процесор Maple дозволяє отримати рівняння координат точки С в аналітичному вигляді. Наприклад, для гіпоциклоїдного механізму в позначеннях синтаксису Maple функції для опису координат точки С мають вигляд:

$$\begin{aligned} x := & - \left( 2R + 4r + 4 - \left( \left( (R - r) \sin\left(\frac{rt}{R}\right) - r \sin\left(\frac{(R - r)t}{R}\right) \right)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + \left( (R - r) \cos\left(\frac{rt}{R}\right) + r \cos\left(\frac{(R - r)t}{R}\right) + 2 + R + 2r \right)^2 \right)^{(1/2)} \right) \\ & \left( (R - r) \sin\left(\frac{rt}{R}\right) - r \sin\left(\frac{(R - r)t}{R}\right) \right) / \left( \left( (R - r) \sin\left(\frac{rt}{R}\right) - r \sin\left(\frac{(R - r)t}{R}\right) \right)^2 \right. \\ & \left. + \left( (R - r) \cos\left(\frac{rt}{R}\right) + r \cos\left(\frac{(R - r)t}{R}\right) + 2 + R + 2r \right)^2 \right)^{(1/2)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y := & -2 - R - 2r - \left( 2R + 4r + 4 - \left( \left( (R-r) \sin\left(\frac{rt}{R}\right) - r \sin\left(\frac{(R-r)t}{R}\right) \right)^2 \right. \right. \\
& \left. \left. + \left( (R-r) \cos\left(\frac{rt}{R}\right) + r \cos\left(\frac{(R-r)t}{R}\right) + 2 + R + 2r \right)^2 \right)^{(1/2)} \right) \\
& \left( (R-r) \cos\left(\frac{rt}{R}\right) + r \cos\left(\frac{(R-r)t}{R}\right) + 2 + R + 2r \right) / \left( \right. \\
& \left. \left( (R-r) \sin\left(\frac{rt}{R}\right) - r \sin\left(\frac{(R-r)t}{R}\right) \right)^2 \right. \\
& \left. + \left( (R-r) \cos\left(\frac{rt}{R}\right) + r \cos\left(\frac{(R-r)t}{R}\right) + 2 + R + 2r \right)^2 \right)^{(1/2)}
\end{aligned} \tag{2}$$

На рис. 3 наведено приклади траєкторій, побудованих за формулами (3). Але траєкторія на площині не є показовою для того, щоб охарактеризувати процес перемішування в об'ємі ємності. Щоб перейти до тривимірних координат введемо параметр  $\psi = f(t)$ , який характеризує кут повороту місильної камери (чану), в залежності від кута  $t$ . Тоді просторові координати руху точки на робочому органі можна обчислити за формулами  $X = X' \sin \psi$ ;  $Y = X' \cos \psi$ ;  $Z = Y'$ , де  $X'$ ,  $Y'$  – координати точки на робочому органі. На рис. 4 наведено приклади просторових зображень кінематичних траєкторій переміщення точки С, належної робочому органі, де точка D - центр рухомого кола і  $\psi = 2t$ .

Для отримання наближеної до адекватної картини процесу перемішування в роботі пропонується здійснити перехід від поняття *траєкторії точок*, належних робочому органі, до поняття *поверхні перемішування*. Коли робочий орган має вигляд відрізка, то поверхнею перемішування буде *лінійчата поверхня*, утворена твірною, яка рухається вздовж траєкторій двох точок на робочому органі тістомісильної машини. При цьому задаються початкові розміри ланок механізму тістомісильної машини: радіуси малого  $r$  і великого  $R$  кола планетарного механізму; відстань  $a$  від центру малого колеса до точки закріплення робочого органу; залежність  $\psi = \psi(t)$  кута повороту ємності з тістом від кута повороту ведучої ланки; співвідношення розмірів  $OB$  і  $AC$ ; відстань від точки А до точки D, яка утворює верхню твірну поверхні перемішування. На рис. 5 наведено приклади поверхонь перемішування для випадку гіпоциклоїдального закону руху, на рис. 6 - для епіциклоїдального.

$r=1; R=5; h=0,5; H=10$ і $L=24$ .	$r=2; R=5; h=2; H=10$ і $L=25$ .
------------------------------------	----------------------------------

Рис. 3. Кінематичні траєкторії точки М для гіпоциклоїдного механізму

$r=1; R=6; AD=1,5; OB=10$ і $AC=20$ .	$r=1; R=7; AD=0,5; OB=9$ і $AC=18$ .
$r=1; R=8; AD=1,5; OB=11$ і $AC=22$ .	$r=2; R=7; AD=1,5; OB=12$ і $AC=24$ .

Рис. 4. Тривимірні траєкторії руху точки М, належній робочому органі.

$a = 1 \cdot r$	$a = 1,5 \cdot r$	$a = 2,0 \cdot r$
-----------------	-------------------	-------------------

Рис. 5. Результати роботи алгоритму при  $R/r = 6/1$ ,  $\psi = 1 \cdot t$ .

--	--	--



$a = 1 \cdot r$	$a = 1,5 \cdot r$	$a = 2,0 \cdot r$
-----------------	-------------------	-------------------

Рис. 6. Результати роботи алгоритму при  $R/r = 6/1$ ,  $\psi = 1 \cdot t$ .

В роботі зазначено, що для більш ефективного перемішування необхідно, щоб потік часток речовини змінювався в часі таким чином, щоб лінії току, які відповідають картині течії в різні моменти часу, перетинались. Також виявлено, що для досягнення ефективного перемішування в обмежених системах необхідно, щоб частка речовини поверталася до свого початкового положення. Внаслідок того, що досить складними будуть аналітичні вирази, які визначають траєкторію руху точки на робочому органі, то для них важко підібрати відповідні конформні перетворення, якими звичайно оперують при розрахунках течій. Висока в'язкість тіста дає можливість припустити, що доцільнішим буде використання еквідистантних ліній як ліній течії часток речовини, тому що в тісті під час перемішування вірогідність появи вихору є незначною.

Нехай рух робочого органа тістомісильної машини – важеля довжиною  $AC$  - приводиться в дію за допомогою планетарного механізму (рис. 2). Важіль приєднаний в точці  $A$  до рухомого кола і проходить через фіксовану точку повідця  $B$ . Точка  $C$  важеля рухається всередині ємності чана з перемішуваною речовиною (тістом). Необхідно, маючи аналітичні вирази для траєкторії точки  $C$ , скласти рівняння еквідистанти для цієї траєкторії. Коли рух точки на робочому органі можна визначити через рівняння точки  $C$  з координатами  $X_C = f(\phi)$  і  $Y_C = g(\phi)$ , то описи внутрішньої та зовнішньої еквідистант мають вигляд

$$X = X_C \mp h \cdot \frac{Y'_C}{\sqrt{X'^2_C + Y'^2_C}}; \quad Y = Y_C \pm h \cdot \frac{X'_C}{\sqrt{X'^2_C + Y'^2_C}},$$

де  $h$  – відстань по нормалі

між еквідистантою і траєкторією руху точки  $C$ . На рис. 7 наведено результати роботи складеного алгоритму при  $h=1 \div 5$ . Лінії еквідистанти уявляють прошарки «затягування» часточок тіста «у околі дії» робочого органа тістомісильної машини, а значення параметра  $h$  залежатимуть від в'язкості тіста.

$r=1; R=4; AD=1,5; OB=8$ і $AC=16$ ,	$r=1; R=5; AD=0,95; OB=7$ і $AC=14$ .
$r=1; R=6; AD=1,5; H=10$ і $L=20$ .	$r=1; R=3; AD=0,5; OB=5$ і $AC=10$ .

Рис. 7. Криві та їх еквідистанти в залежності від параметрів.

Одержані результати дозволяють переконатися у тому, що розглянута конструкція тістомісильної машини забезпечує необхідну густину кривих проходження робочого органа в одиниці об'єму чану, що є необхідним для інтенсивного перемішування.

Наголосимо, що всі зображені криві було описано параметричними рівняннями (тобто точно) у середовищі математичного процесора Maple.

В **третьому розділі** для визначення умов стабільності роботи планетарного механізму тістомісильної машини розглянуто поверхні повної енергії та фазові портрети, що дозволили дослідити її кінематичні та динамічні характеристики. Зазначено, що відомі методи кінематичного аналізу такі, як метод чисельного диференціювання і інтегрування, графічного диференціювання та векторний метод, не дають можливості точного визначення швидкостей і прискорень ланок механізму. Тому, в роботі розглянуто спосіб, який дозволяє більш точно визначити ці показники.

Сутність методу полягає в точному диференціюванні в середовищі процесора Maple аналітичних залежностей  $X = X(t)$  і  $Y =$

Рис. 8. Схема тістомісильної машини.

$Y(t)$  для координат руху точки С, належної робочому органу тістомісильної машини (рис. 8).

Важіль робочого органа тістомісильної машини довжиною АС приєднаний в точці А до рухомого кола і проходить через фіксовану точку повідця В. Точка С важеля рухається всередині ємності чана, наповненого тістом. Чан обертається навколо своєї вісі. Для складання траєкторії руху точки С в місильній камері в координатах (x,y,z) необхідно ввести до розрахунку додатковий параметр  $\psi = f(t)$ , який характеризує кут повороту місильної ємності в залежності від кута повороту початкової ланки механізму t.

Маємо вирази для координат точки С:  $x_C = y_B - BC \cdot \cos \angle B \cdot \sin \psi$ ;  $y_C = y_B - BC \cdot \cos \angle B \cdot \cos \psi$ ;  $z_C = y_B - BC \cdot \sin \angle B$ , де  $\cos(\angle B)$  і  $\sin(\angle B)$  – косинус і синус кута нахилу прямої АВ до осі x відповідно. Для розрахунку координат будь-якої точки на важелі АС необхідно отримані значення координат точки С помножити на коефіцієнт  $k$  ( $0 < k < 1$ ).

Керуючим параметром кінематичної кривої є кут  $\theta$  повороту кривошипу  $O_1A$ ,  $0 < \theta < (R/r) \cdot 2\pi$ . Хоча обертання є рівномірним, але точки на шатунній кривій не будуть розташовані рівномірно. На рис. 9 для параметрів  $R=8$ ;  $r=1$ ;  $a=3$ ;  $AC=26$ ;  $OB=13$  наведено графіки залежності щільності розташування точок на кривій від кута повороту  $O_1A$ . На рис. 10 наведено графік довжини шляху переміщення точки по шатунній кривій. На рис. 11 і 12 зображено графіки швидкості і прискорення руху точки по шатунній кривій в залежності від кута  $\theta$ , який на рисунках позначено як angle.

Аналізуючи отримані графіки можна побачити, що небезпечні стрибки швидкості та прискорення під час роботи механізму відбуваються на ділянках з величиною кута  $\psi = (22 \text{ ч } 24) \cdot \pi$  і  $\psi = (26 \text{ ч } 28) \cdot \pi$ , тобто там, де щільність точок мінімальна.

Рис. 9. Графік щільності розташування точок на шатунній кривій.	Рис. 10. Графік довжини шляху переміщення точки по кривій.
Рис. 11. Графік швидкості точки по шатунній кривій.	Рис. 12. Графіки прискорення точки по шатунній кривій.

Для розрахунку швидкості точки С необхідно знайти похідні від її координат за параметром t. Швидкість точки С можна обчислити за формулою  $V_C = \sqrt{V_{Cx}^2 + V_{Cy}^2 + V_{Cz}^2}$ ,

де  $V_{Cx} = \frac{dx_C}{dt}$ ;  $V_{Cy} = \frac{dy_C}{dt}$ ;  $V_{Cz} = \frac{dz_C}{dt}$ . Тоді кінетичну енергію системи можна оцінити виразом  $T = \frac{m \cdot V_C^2}{2}$ .

Для побудови траєкторії точки С і розрахунку кінетичної енергії системи було складено Maple – програму. Результати розрахунку кінетичної енергії механізму наведено на рис. 13 – 16.

Рис. 13. Кінетична енергія при: $r=1$ ; $R=4$ ; $AD=1,5$ ; $OB=8$ і $AC=16$ .	Рис. 14. Кінетична енергія при: $r=1$ ; $R=5$ ; $AD=0,95$ ; $OB=7$ і $AC=14$ .
Рис. 15. Кінетична енергія при: $r=1$ ; $R=8$ ; $AD=1,5$ ; $OB=11$ і $AC=22$ .	Рис. 16. Кінетична енергія при: $r=2$ ; $R=7$ ; $AD=1,5$ ; $OB=12$ і $AC=24$ .

Розглянутий алгоритм дозволяє проаналізувати рух будь-якої точки на робочому органі всередині місильної камери, а також розрахувати кінетичну енергію руху робочого органу. Розподіл кінетичної енергії в місильній камері за час перемішування є нерівномірним, що забезпечує високу ступінь відносного зсуву шарів тіста.

В роботі розглянуто алгоритм визначення стабільності роботи механізму на основі аналізу енергетичних поверхонь і фазових портретів механізму. При цьому повну енергію системи було обчислено за формулою:

$$E = m_1 g R \left[ 1 + \cos \varphi \right] + m_2 g r \left[ 1 + \sin \varphi_1 \right] + \frac{m_2 \omega_2^2 (R + r)^2}{2} + \frac{I_2 \omega_2^2}{2} + \frac{m_3 \omega_3^2 BC^2}{2} + \frac{I_3 \omega_3^2}{2},$$

де  $\varphi$  і  $\varphi_1$  – кути обертання коліс радіуса  $R$  і  $r$ , відповідно;  $m_1, m_2, m_3$  – маси сонячного колеса, сателіту і важелю АС відповідно;  $\omega_2, \omega_3$  – кутові швидкості сателіту і важелю АС;  $I_2, I_3$  – осьові моменти інерції сателіту і важелю АС.

В якості прикладу обрано такі параметри механізму:  $m_1 = 3,5$  кг,  $m_2 = 1,2$  кг,  $m_3 = 0,5$  кг;  $R = 0,4$  м,  $r = 0,1$  м;  $I_2 = 0,3$  м<sup>2</sup>,  $I_3 = 0,1$  м<sup>2</sup>.

В результаті побудови поверхні повної енергії роботи планетарного механізму отримуємо фазовий портрет системи, який дозволяє аналізувати енергію, що витрачається на процес перемішування, і рекомендувати вибір раціональних геометричних розмірів місильного механізму. Наведено приклади розрахунку роботи алгоритму. На рис. 17–18 зображено поверхні повної енергії (тобто графіки повної енергії) і відповідні їм фазові портрети для випадку епіциклоїдального закону. При цьому фазові портрети побудовано як множину проєкцій на координатну площину сім'ї перерізів графіка повної енергії площинами рівня  $E = \text{const}$ .



Рис. 17. Повна енергія механізму і фазовий портрет для  $R/r = 2/1$ .

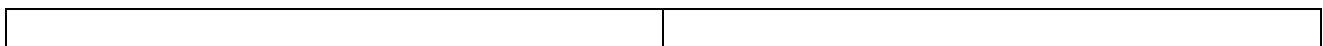


Рис. 18. Повна енергія механізму і фазовий портрет для  $R/r = 6/1$ .

Аналіз одержаних поверхонь і фазових портретів показує, що зі зростанням співвідношення  $R/r$  лінії постійної енергії на фазових портретах стають паралельними, що дає змогу говорити про стабільну роботу механізму і раціональний розподіл енергії всередині місильної ємності. Але, з іншого боку, зі збільшенням співвідношення  $R/r$  зростає і енергія, що витрачається, тому, з точки зору енергозбереження, доцільним є використання механізмів зі співвідношенням  $R/r = 4/1 \div 6/1$ .

Розглянуто питання моделювання коливань механізму тістомісильної машини з метою її врівноваження. Система складається з механізму, що має масу, яка обертається. Механізм розміщується на еластичному матеріалі. Коефіцієнт демпфування  $c$  можна визначити шляхом візуалізації амплітуди демпфування як функції частоти і коефіцієнту демпфування. Механізм складається з маси  $m_M$ , і маси, що обертається  $m_U$ . Еластичний матеріал має жорсткість  $d$ . Нехай  $r$  – радіус кривошипу і  $\omega t$  його кутова швидкість. Для опису процесу коливань використано диференціальне рівняння

$$(m_M + m_U) \left( \frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) + c \left( \frac{d}{dt} x(t) \right) + d x(t) + m_U r \omega^2 \cos(\omega t) = 0 \quad (3)$$

Було складено програму його розв'язання, в результаті чого отримано поверхню відносної амплітуди коливань як функції частоти обертання ведучої ланки і жорсткості (рис. 19). В

результаті було визначено кінематичні (швидкості і прискорення) і динамічні (сили) показники, які виникають під час роботи механізму. Складено програму моделювання фазового портрету системи і поверхні відносної амплітуди коливань системи. Це дозволило здійснити крок до встановлення зв'язку геометричних розмірів тістомісильної машини з енергетичними характеристиками планетарного механізму, що дає змогу це на стадії проектування визначати раціональні параметри. Результати дисертації планується покласти в основу системи проектування конструкцій тістомісильних машин. Також можливе впровадження результатів у галузях, де важливим є точний опис кінематичної траєкторії точки і визначення її диференціальних характеристик.

Рис. 19. Графік залежності ефективності демпфування від жорсткості і кута.

## ВИСНОВКИ

Дисертацію присвячено новому розв'язанню задачі геометричного моделювання схеми дії тістомісильного механізму планетарного типу шляхом опису траєкторій руху його точок, належних робочому органу, та аналізу графіка функції його повної енергії. В результаті досліджень було виявлено раціональні значення параметрів механізму, які забезпечать можливість розробок змішувачів сипких та в'язких речовин зі зниженими енерговитратами.

*Значення для науки* роботи полягає у подальшому розвитку способів дослідження кінематичних кривих та поверхонь в процесі конструювання важільних тістомісильних механізмів.

*Значення для практики* досліджень полягає в скороченні термінів та підвищенні точності моделювання коливань, одержанні моделей, що задовольняють заданим вимогам і прискорюють проектування виробів.

При цьому отримані результати, що мають науково-практичну цінність.

1. Здійснено огляд схем дії тістомісильних машин, а також методів опису та побудови зображень траєкторії руху важільних механізмів, що виявляє необхідність розробок комп'ютерних програм розрахунку траєкторій руху робочих органів тістомісильних машин на основі планетарних механізмів.

2. Розроблено спосіб опису при планетарному русі траєкторії точки, належної робочому органу змішувача, в залежності від вхідних величин, що дозволило обирати схеми змішувачів зі зниженими енерговитратами шляхом варіювання вхідними параметрами.

3. Розроблено спосіб опису сім'ї кривих, паралельних (на відстані  $h$ ) траєкторії руху точки робочого органу змішувача, що дозволило унаочнити переміщення речовини у околі робочого органу (ефекту затягування речовини).

4. Розроблено спосіб опису результатів моделювання поверхонь перемішування, коли робочим органом є відрізок, та побудови зображень фаз руху місильного механізму у вигляді кадрів анімаційного фільму, що дозволило скласти уяву про характер руху робочого органу у об'ємі чану.

5. Побудовано графіки розподілу енергетичних характеристик механізмів за заданими схемами, що дозволить формалізувати в залежності від вхідних параметрів аналіз форми кінематичної кривої робочого органу в процесі перемішування.

6. Результати впроваджено в НПП «Екструдер» при проектуванні схем місильних апаратів для перемішування в'язких і сипучих матеріалів зі зниженими енерговитратами, та у навчальний процес Національного технічного університету «ХПІ» при підготовці бакалаврів і магістрів за напрямком 0804, спеціалізації «Інформаційні технології проектування».

Основні положення дисертації опубліковано у таких роботах:

1. *Дашкевич А. О.* Геометричне моделювання руху робочого органу тістомісильної машини // Геометричне та комп'ютерне моделювання. Харків: ХДУХТ, 2004. Вип. 6. – С. 112 – 116.

2. *Дашкевич А. О.* Дослідження епіциклоїдного роторно-планетарного механізму тістомісильної машини // Геометричне та комп'ютерне моделювання. Харків: ХДУХТ, 2006. Вип. 14. – С. 132 – 138.

3. *Дашкевич А. О.* Геометричне моделювання дії епіциклоїдного механізму для тістомісильної машини // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип. 4. Том 31.– Мелітополь: ТДАТА, 2006– С.147-153

4. *Дашкевич А. О.* Алгоритм моделювання схеми дії механізму тістомісильної машини // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник – Випуск 2 (43) – Дніпропетровськ, 2006. – С. 78 – 83.

5. *Дашкевич А. О.* Геометричне моделювання еквідистантних кривих в процесі перемішування тіста // Вісник київського національного університету технологій та дизайну. Доповіді третьої кримської науково-практичної конференції „Геометричне та комп’ютерне моделювання: енергозбереження, екологія, дизайн” – Випуск 4 (30) – Сімферополь, 2006. – С. 197 – 201.

6. *Дашкевич А. О.* Геометричне моделювання та аналіз роботи тістомісильної машини // Геометричне та комп’ютерне моделювання. Збірник наукових праць – Випуск 18 – Харків, 2007. – С. 261- 267.

7. *Куценко Л.М., Дашкевич А. О.* Порівняльний аналіз роботи важільних і біпланетарних місильних машин // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип. 4. Том 35.– Мелітополь: ТДАТА, 2007– С.19 - 25

**Дашкевич А.О. Геометричне моделювання схем дії планетарних тістомісильних машин.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна, 2007.

Дисертацію присвячено новому розв’язанню задачі геометричного моделювання тістомісильного механізму планетарного типу шляхом опису траєкторій руху його точок, належних робочому органу, та аналізу графіка функції його повної енергії. В результаті досліджень було виявлено раціональні значення параметрів механізму, які забезпечать можливість розробок змішувачів сипких та в’язких речовин зі зниженими енерговитратами.

В процесі роботи були отримані результати, що мають наукову і практичну цінність. До головних результатів слід віднести: розроблений метод опису траєкторії руху робочого органу змішувача при планетарному русі рівняннями у параметричному вигляді, розроблені схеми роботи важільних місильних механізмів для випадків руху привідної ланки за рівняннями епі- і гіпоциклоїди, коли вхідні величини (параметри розмірів схеми) змінюються в певних межах; складені алгоритми побудови зображень фаз руху місильного механізму та опису результатів моделювання, у тому числі і засобами комп’ютерного анімаційного моделювання, що дозволить доповнити множину анімаційних зображень в прикладній геометрії. Також побудовано графіки розподілу енергетичних характеристик механізмів за заданими схемами та розроблено спосіб аналізу ефективності перемішування завдяки застосуванню поверхні перемішування; все це дозволило формалізувати аналіз форми кінематичної кривої точки робочого органу механізму в процесі перемішування.

**Ключові слова:** тістомісильна машина, перемішування, планетарний механізм, кінематична крива.

**Дашкевич А.А. Геометрическое моделирование схем действия планетарных тестомесильных машин.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.01 – Прикладная геометрия, инженерная графика. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина, 2007.

Диссертация посвящена новому решению задачи геометрического моделирования тестомесильного механизма планетарного типа путем описания траекторий перемещения его точек, принадлежащих рабочему органу, а также анализу графика функции его полной энергии. В результате исследований были выявлены рациональные значения параметров планетарного механизма, которые обеспечат возможность разработок смесителей сыпучих и вязких веществ с пониженными энергозатратами.

Уровень научно-производственного потенциала Украины определяется использованием новейших технологий мирового уровня. В частности, в пищевом машиностроении актуальны технологии проектирования смесителей вязущих материалов со сниженными энергозатратами. С точки зрения прикладной геометрии при этом меньше всего исследованы технологии перемешивания материалов с помощью смесителей, в которых перемешивание проводится с помощью рычажных рабочих органов. Процесс смешивания обеспечивается сложной траекторией движения рычага, который обеспечивает высокую степень гомогенности смешиваемых материалов. Эффективность процесса (энергозатраты на получение единицы объема смешиваемых материалов) зависит от формы траектории движения рабочего органа. Задача состоит в выборе такой конструкции рабочего органа смесителя, которая позволила бы провести процесс перемешивания при сниженных энергозатратах. При этом, с точки зрения прикладной геометрии интересным есть то, что форма траектории движения рабочего органа может быть получена как параметрическая кривая, которая происходит от семейства таких кривых, как эпи- и гипоциклоиды. Определение на стадии проектирования рациональной конструкции рабочего органа смесителя будет оказывать содействие появлению новейшей техники и технологии мирового уровня, который указывает на актуальность выбранной темы исследований.

Осуществить адекватное описание движения рабочего органа смесителя возможно с помощью *геометрического моделирования процесса перемешивания*. Подчеркнем, что геометрическое моделирование объектов сложной формы есть одним из главных направлений развития прикладной геометрии и инженерной графики. Тем не менее проведенные исследования не разрешают осуществить геометрическое моделирование движения рабочего органа смесителя. Одной из причин этого было *отсутствие геометрических и математических моделей*, которые бы разрешили описать параметрические кривые, что происходят от семейств кривых эпициклоиды и гипоциклоиды, а также *отсутствие математических процессоров*, которые разрешили бы исследовать такие кривые на аналитическом и графическом уровнях в реальном масштабе времени. В работах Л.Н.Куценко и его учеников проведены исследования относительно формообразования объекта как огибающей, в том числе и реализованных средствами математического процессора Maple. При этом, еще не занятой «научной нишей» оказалось создание эффективных алгоритмов профилирования обкатки планетарным механизмом с целью выявления рациональных значений ее параметров с возможностью осуществлять контроль изменения результата формообразования. Поэтому целью данной работы есть создание теоретической базы для алгоритмов геометрического моделирования результата формообразования по схеме планетарного механизма.

В процессе работы были получены результаты, которые имеют научную и практическую ценность. К главным результатам нужно отнести: разработан метод описания уравнениями в параметрическом виде траектории движения рабочего органа смесителя при планетарном движении, разработаны схемы работы рычажных месильных механизмов для случаев движения приводного звена согласно уравнениям эпи- и гипоциклоиды, когда исходные величины (параметры размеров схемы) изменяются в определенных границах; составлены алгоритмы построения изображений фаз движения месильного механизма и описания результатов моделирования, в том числе и средствами компьютерного анимационного моделирования, что позволит дополнить множество анимационных изображений в прикладной геометрии. Также построены графики распределения энергетических характеристик механизмов согласно заданным схемами и разработан способ анализа эффективности перемешивания благодаря применению поверхности перемешивания. Все это позволило формализовать анализ формы кинематической кривой точки рабочего органа механизма в процессе перемешивания.

**Ключевые слова:** тестомесильная машина, перемешивание, планетарный механизм, кинематическая кривая.

**Dashkevich A.A. Geometrical design of charts of action of planetary machine for interfusion of dough.** - the Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a specialty 05.01.01 - Applied geometry, engineering graph. - Kiev national university of construction and architecture, Kiev, Ukraine, 2007.

Dissertation is devoted to the new decision of task of geometrical design of kinematics curve which characterizes motion of working organ of machine for interfusion of dough of planetary type. These researches are conducted by the purpose of exposure of rational values of parameters of planetary mechanism that would provide introduction of rational charts of machine for interfusion of dough. In the process of work results which have a scientific and practical value were got. It is needed to take to the main results: developed method of description of trajectory of motion of working organ of mixer at planetary motion equalizations in a parametric kind, developed charts of work of mechanisms of mixers of levers for the cases of motion of drive link in obedience to equalizations of epi- and gipocicloids, when initial sizes (parameters of sizes of chart) change in the set borders; made algorithms of construction of representing the phases of motion of mixer mechanism and description of design results, including by facilities of computers animation design, that will allow to complement the great number of images of animations in the applied geometry. The graphs of distributing of power descriptions of mechanisms are also built in obedience to set charts and the method of analysis of efficiency of interfusion due to application of surface of interfusion is developed. All of this allowed formalizing the analysis of form of the kinematics crooked point of working organ of mechanism in the process of interfusion.

**Keywords:** machine for interfusion of dough machine, interfusion, planetary mechanism, kinematics curve.

Підписано до друку 12.12.2007 р.

Формат 60x80 1\16 Друк.

ризограф.

Ум. друк. арк. 1,25

Наклад 100

Вид. №

Зам. №

АЦЗ України, 61023, м. Харків, вул. Чернишевського, 94.