

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

На правах рукопису

**ДАНИЛЕНКО ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ**

**СПОСОБИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ТА ВЕРСТАТНЕ  
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОБРОБКИ ПОЛІГОНАЛЬНИХ  
ПОВЕРХОНЬ З КРИВОЛІНІЙНИМИ ДІЛЯНКАМИ**

Спеціальність: 05.03.01 - "Процеси механічної обробки,  
верстати та інструмент"

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

КИЇВ - 1996

21.8  
Дисертація є рукопис.

AB 36.5-14

Роботу виконано у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" на кафедрі "Комп'ютерна механіка" машинобудівного факультету.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00743929 (Y)

Наукові керівники:

кандидат

академік АІН України, доктор технічних наук  
професор В.Б.Струтинський

Науковий консультант:

доктор технічних наук А.М.Гуржій

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Петко І.В.  
кандидат технічних наук Сидорко В.І.

Провідна організація:

Конструкторсько-технологічний  
центр верстатобудування

Захист відбудеться *27 січня* 1997 року о *15:00* на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.09 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 252056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, учбовий корпус № 1, аудиторія 214.

Просимо прийняти участь в засіданні ради, або прислати відгуки у двох примірниках з підписами, затвердженими печаткою Вашого підприємства, на ім'я вченого секретаря спеціалізованої ради на вище вказану адресу.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці НТУ України "Київський політехнічний інститут"

Автореферат розіслано *25* грудня 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої ради,  
доктор технічних наук, професор

Н.С.Равська

## **Загальна характеристика роботи**

**Актуальність теми дослідження.** Способи формоутворення, що використовуються в більшості металорізальних верстатів, розраховані на обробку поверхонь, що складаються з прямолінійних ділянок або циліндричних поверхонь з постійним радіусом кривизни. Обробка поверхонь з непостійним радіусом кривизни вимагає використання змінених способів формоутворення.

Забезпечення формоутворення поверхонь деталей з непостійними геометричними характеристиками, до яких відносяться полігональні поверхні, є однією з найбільш складних задач обробки на металорізальному обладнанні.

Способи формоутворення, що використовуються, в більшості випадків розглядають обробку конкретної поверхні як окрему, незалежну від інших операцію. В умовах сучасного виробництва часто доцільнішою буде концентрація операцій на одному верстаті, наприклад на токарному багатопіндальному автоматі. В такому випадку традиційний підхід до формоутворення призводить до зниження продуктивності наладки в цілому, тому що обробка складних поверхонь у відповідності з існуючими технічними розробками є лімітуючою операцією.

В зв'язку з цим однією з задач роботи було забезпечення можливості використання додаткових пристроїв, які здійснюють нетипові для даного обладнання операції, без зменшення продуктивності наладки, що використовувалась раніше.

Враховуючи наведене вище, ця робота актуальна.

**Метою роботи є** розробка та дослідження автоматичного станочного обладнання, яке підвищує ефективність формоутворення регулярних полігональних поверхонь та полігональних поверхонь з криволінійними ділянками.

**Для досягнення мети розв'язано ряд задач, з яких на захист вносяться:**

- кінематичний аналіз способів формоутворення полігональних поверхонь;
- розробка автоматичного верстатного обладнання для обробки цих поверхонь;
- розробка комплексної математичної моделі динамічної системи верстата;
- дослідження впливу геометричних та кінематичних похибок елементів пружної системи верстату на точність формоутворення;
- математичне моделювання та експериментальні дослідження динамічних похибок обробки;
- розробка нових способів та технічних рішень вузлів для формоутворення регулярних полігональних поверхонь та полігональних поверхонь з криволінійними ділянками.

**Наукові положення, розроблені дисертантом, та новизна теми**

- здійснено кінематичний аналіз різних схем формоутворення складних поверхонь;
- на основі виконаного кінематичного аналізу розроблені нові способи формоутворення;
- розроблено вдосконалену математичну модель динамічної системи верстата;
- проведено аналіз похибок способу формоутворення, кінематичних ланцюгів верстата, деформаційних статичних та динамічних похибок формоутворення;
- розроблені методики розрахунку геометричних та кінематичних характеристик пристроїв для обробки полігональних поверхонь, що дозволяють одержати дані для їх конструювання.

### *Практичне значення.*

Розроблені практичні рекомендації для вибору параметрів обладнання для обробки полігональних поверхонь. Запропоновані оригінальні способи формоутворення та конструкції обладнання, захищені авторськими свідоцтвами. Розроблені та практично апробовані в промислових умовах пристрої та верстати для обробки полігональних поверхонь різного виду.

### *Реалізація роботи.*

Спіраючись на виконані розробки, у 1985 році була здійснена модернізація вертикально-фрезерувального верстата з використанням копіювальної системи з розгортанням оброблюваного контура способом прокатування (за схемою відповідно а.с. № 1199586) та здійснено його випробування при обробці кронштейнів приладів на Київському ВО ім. С.П.Корольова. Очікуваний річний економічний ефект від використання одного такого верстата складає 6356,6 крб. (в цінах 1985 р.), економічний ефект від повного використання розробок для обробки кронштейнів приладів - 73038 крб. на рік. Запропоновані способи формоутворення дозволили підготувати методикку розрахунку кінематичних та геометричних параметрів пристроїв для обробки полігональних поверхонь, з використанням якої спроектовано і виготовлено пристрої, застосування яких дозволило одержати у 1990 році дольовий економічний ефект (12%) 57980 крб. на рік (Житомирський завод верстатів-автоматів). Економічний ефект від використання розробок, запропонованих в дисертаційній роботі, за відомостями 1995 року складає 5 млрд. карбованців (ВАТ Верстатуніверсалмаш, м. Житомир).

### *Апробація роботи.*

Основні положення та результати роботи доповідались на 8 науково-технічних конференціях: "Комплексна автоматизація та механізація виробництва на основі впровадження верстатів з ЧПУ, промислових роботів, гнучких виробничих систем і роторно-конвейєрних ліній", (Луцьк, 1988); "Автоматичне маніпулювання об'єктами та технологічна оснастка у верстатах з ЧПУ та ГВС", (Тернопіль, 1988); "Підвищення ефективності виробництва машинобудівних підприємств", (Душанбе, 1990); "Вдосконалення процесів різання та засобів автоматизації для підвищення продуктивності гнучких виробничих систем", (Курган, 1990); "Типові механізми верстатів-автоматів та верстатів з програмним управлінням і ефективність їх впровадження", (Київ, 1992); "Проектування, виробництво та експлуатація систем гідропневмоприводу, гідропневоавтоматики і гідромашин та їх компонентів", (Київ, 1995); "Гідромеханіка в інженерній практиці", (Київ, 1996); "Автоматизація проектування та виробництва виробів в машинобудуванні", (Луганськ, 1996).

### *Публікації.*

Основні положення та результати дисертаційної роботи наведені в 24 публікаціях, з них 1 брошура, 3 статті, методичні вказівки до навчального курсу, тезиси доповідей 8 науково-технічних конференцій та 11 авторських свідоцтв на винаходи.

*Структура і обсяг роботи.* Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку літератури і додатків. Матеріали дисертації представлені на 149 сторінках машинописного тексту мають 108 ілюстрацій, список літератури містить 187 джерел.

### **Зміст роботи.**

**У вступі** обґрунтовано актуальність досліджуваної проблеми, наукова новизна та практична цінність; сформульована мета роботи та названі задачі, які потрібно розв'язати для досягнення поставленої мети; наведено відомості про реалізацію результатів роботи, апробацію її на науково-технічних конференціях та наявні публікації.

**У першому розділі** наведено результати аналізу поверхонь, що можуть бути відтворені як плоскі контури, особливостей їх обробки на металорізальних верстатах; способів формоутворення, формоутворюючих систем та пристроїв для їх реалізації.

Формоутворення полігональних поверхонь різанням здійснюється з використанням значної кількості різноманітних способів. Найбільш поширена обробка з використанням способу ділення, механізмів-побудовувачів, пристроями з синхронним планетарним рухом інструменту, що обертається, відносно заготовки, копіювальної обробки, кінематичних способів.

Результати патентно-інформаційних досліджень дозволяють зробити висновок про доцільність використання формоутворюючих систем, характер рухів в яких обумовлюється формою відтворюваної поверхні. Найменший рівень нестационарності процесу обробки буде досягнуто, якщо буде забезпечена як відповідність характеру поверхні та формоутворюючих перемішень, так і здійснення цих перемішень одним простим безперервним рухом від одного приводу, тобто умови обробки будуть подібними, наприклад, тим, що мають місце при точінні циліндричної поверхні.

Особливості забезпечення формоутворення поверхонь з плоскими контурами та характеристики самих контурів, які відрізняють їх від поверхонь постійної кривизни, обумовлюють необхідність враховувати фактори, що впливають на рівень нестационарності процесу, при оцінці способів відтворення заданого контуру. Вибір тієї чи іншої схеми обумовлюється ступенем урахування вимог до технологічного процесу обробки. Ці вимоги в узагальненому вигляді можуть бути сформульовані наступним чином:

- механізм для здійснення формоутворюючих рухів при обробці поверхонь з плоским контуром повинен забезпечувати перехід до обробки еквідистантного контура одним простим рухом, який у зв'язку з цим повинен бути спрямованим по нормалі до контуру в будь-якій його точці;
- кути різання, швидкість та інші параметри процесу різання в будь-якій точці контура повинні бути постійними або мати відхилення в прийнятних межах;
- швидкість відносного руху (подача) вздовж контура відтворюючої точки (лінії) інструмента повинна бути постійною або мати відхилення в допустимих межах;
- сили різання та їх орієнтація відносно осей станка та напрямку руху робочих органів повинна бути постійна або змінюватись несуттєво;
- кут тиску в парі інструмент-деталь повинен бути постійним або змінюватись в прийнятних межах.

На підставі здійсненого аналізу можна відмітити, що при вирішенні задач формоутворення полігональних поверхонь їх обробка в більшості випадків розглядається як операція, не пов'язана ніякими обмеженнями з іншими операціями. Нестационарність параметрів процесу формоутворення, що виникає при обробці поверхонь зі

змінною кривизною та центром кривизни, що змінює своє розташування, як правило не враховується. Так як в умовах спеціалізованого виробництва із значним обсягом виробництва має місце тенденція до концентрації операцій, а складність форми деталей зростає, розробка способів і обладнання для формоутворення це актуальна проблема.

У другому розділі наведені результати кінематичного аналізу способів формоутворення регулярних полігональних поверхонь та полігональних поверхонь з великим відношенням довжини контура до його ширини, які можуть мати криволінійні ділянки.

Формоутворення однієї грані багатогранного контура здійснюється при кожному оберті інструмента, наприклад, різцевої головки з одним різцем. При умові, що за час повного оберта заготовки інструмент здійснить стільки повних обертів, скільки граней має багатогранник, формоутворення контура буде здійснене повністю. В цьому випадку будуть послідовно оброблятися сусідні грані. Зменшивши частоту обертання інструмента вдвічі, одержимо співвідношення, при якому чергова оброблювана грань буде розташована через одну від попередньої і так далі. Таким чином, передаточне відношення, яке забезпечує ділення контура на задану кількість граней, можна навести у вигляді залежності:  $K_{\omega} = N/K = \omega_u/\omega_3$ , де  $N$  - кількість граней багатогранника;  $K$  - ціле число, що вказує, яка по порядку після оброблюваної грань буде оброблюватись наступною;  $\omega_u$  - кутова швидкість інструмента;  $\omega_3$  - кутова швидкість заготовки. Однак слід враховувати, що при обробці багатогранників, кількість граней яких не виражається простим числом, формоутворення усіх граней багатогранника одним інструментом може здійснюватись не при всіх передаточних відношеннях. Мінімальна необхідна для обробки заданого багатогранника кількість інструментів може бути визначена за залежністю:  $N \geq N_u = |K \cdot N \cdot j|_{min} \geq 1$ , де  $N_u$  - мінімальна, необхідна для формоутворення заданого багатогранника, кількість інструментів;  $j = 0, 1, 2, 3 \dots$

Формоутворення багатогранників з гранями, що наближаються до прямолінійних, потребує забезпечення не тільки відповідних кінематичних, але й геометричних співвідношень. При цьому обмеженням є продуктивність процесу. З урахуванням цих вимог здійснено аналіз схем формоутворення.

В дисертації наведено результати кінематичного аналізу найбільш поширених схем формоутворення багатогранників. Як приклад розглянемо схему, наведену на рис. 1.

Для цієї схеми швидкість різання визначається як сума швидкостей поверхні оброблюваної деталі та ріжучої кромки інструмента:  $V = V_u + V_3$ , де  $V$  - швидкість різання при обробці грані;  $V_u$  - швидкість поверхні оброблюваної грані;  $V_3$  - швидкість ріжучої кромки.

Підставивши в залежність параметри, що використовуються при розрахунках режимів різання, та враховуючи, що  $r = R_3 \cdot \cos(\pi/N)$ , одержимо:

$$R_u = \frac{1}{K_{\omega}} \left( \frac{500 V}{\pi n_3} + R_3 \cos \frac{\pi}{N} \right)$$

де  $r$  - радіус вписаного в багатогранник кола;

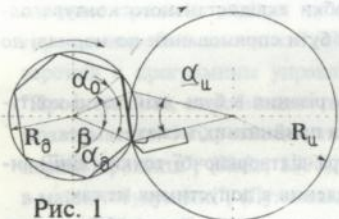


Рис. 1

$R_u$  - радіус розміщення ріжучих кромки інструмента;  $n_3$  - частота обертання заготовки;  $R_3$  - радіус кола, описаного навколо багатогранника. Ця залежність дозволяє визначити радіус розміщення ріжучих кромки в інструменті при заданій частоті обертання заготовки та відомій нормативній швидкості різання для обраного інструмента.

Необхідні геометричні залежності визначаються за умови, що ріжуча кромка повинна проходити через крайні точки грані, а по середині відстань між заданим профілем грані та ріжучою кромкою не повинна перевищувати заданої величини. Враховуючи цю умову, відстань між осями обертання заготовки та інструменту повинна відповідати залежності:  $L = r + R_u + H$ , де  $L$  - відстань між осями;  $H$  - відстань, що допускається між заданим та відтворюваним контуром у середньому перетині грані, а проходження ріжучої кромки крізь крайні точки грані забезпечується, якщо поворот на кути, необхідні для формоутворення грані, буде здійснюватись заготовки та інструментом за однаковий час, тобто  $\alpha_0/\omega_3 = \alpha_u/\omega_u$  (див. рис. 1.) Звідси, враховуючи, що  $\omega_u = K_m \cdot \omega_3$ , одержимо:  $\alpha_0 = \alpha_u/K_m$ , з іншого боку:  $\alpha_0 = 2\pi/N - \alpha_3$ , тоді прирівнюючи праві частини, одержимо:  $\alpha_u = K_m(2\pi/N - \alpha_3)$ , де  $\alpha_0$  - кут повороту заготовки за час обробки однієї грані;  $\alpha_u$  - кут повороту інструменту за час обробки однієї грані;  $\alpha_0$  - кут зони контакту кола, описаного навкруг багатогранника, з колом, на якому розташовані ріжучі кромки інструменту.

Враховуючи наведені вище залежності, умови контакту ріжучої кромки з крайніми точками теоретичного профілю грані (тобто кінематичні та геометричні умови здійснення способу формоутворення) можуть бути представлені рівняннями:

$$\alpha_u = K_m(2\pi/N - \alpha_3)$$

$$L = R_u + R_3 \cdot \cos(\pi/N) + H$$

$$R_3 [\cos(\pi/N) - \cos(\alpha_3/2)] R_u [1 - \cos(\alpha_u/2)] + H = 0$$

$$R_3 \sin(\alpha_3/2) - R_u \sin(\alpha_u/2) + H = 0$$

$$R_u = [(500 \cdot V) / (\pi / n_3) - R_3 \cdot \cos(\pi/N)] / K_m$$

Аналогічним шляхом можуть бути одержані залежності і для інших схем.

Такі системи рівнянь дозволяють визначити п'ять взаємозалежних параметрів ( $K_m$ ,  $R_u$ ,  $L$ ,  $\alpha_u$ ,  $\alpha_3$ ), які описують спосіб формоутворення і можуть використовуватись як вихідні дані при проектуванні пристроїв для верстатів.

Для виконання розрахунків у відповідності з розглянутим способом формоутворення розроблені програми, що дозволяють одержати графіки, по яким можна вибрати основні параметри, необхідні для проектування пристроїв. Приклад таких графіків наведено на рис. 2. Графіки дозволяють зробити висновок про доцільність використання способу формоутворення при  $K_m=3$  та  $K_m=2$ . На графіках відмічені точки, що відповідають прийнятним геометричним та кінематичним параметрам пристроїв.

Для відмічених на графіках (рис.2) точок побудовані траєкторії ріжучих кромки та наведено форму грані шестигранника, яка забезпечується при використанні пристроїв, що виготовлені відповідно до цього способу.

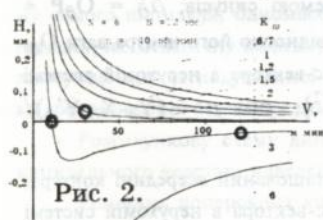


Рис. 2.

Похибка форми грані, що відповідає першій точці на графіках рис. 2, становить 2 мкм (Рис.3), для другої - 40 мкм (Рис.4) і для третьої - 31 мкм (Рис.5). Аналогічний

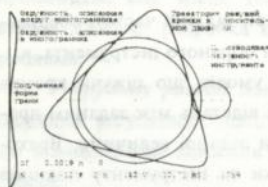


Рис. 3.

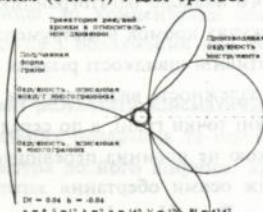


Рис. 4.

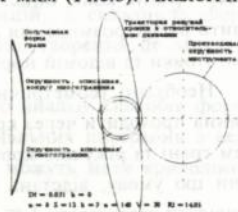


Рис. 5.

результат забезпечує використання схеми формоутворення з інструментом, що озолює оброблювану заготовку, при попутному різанні для  $K_{\omega} = 1,5$  та  $K_{\omega} = 2$ .

Формоутворення поверхонь з великим відношенням довжини контура до його ширини при використанні традиційних способів обробки супроводжується значними змінами параметрів процесу різання та схеми навантаження у формовідтворюючій системі. При використанні механізмів для здійснення формоутворюючих переміщень, які ґрунтуються на способі розгортання оброблюваного контура на напрямну поверхню, забезпечується стабілізація більшості параметрів процесу формоутворення завдяки постійній орієнтації нормалі до відтворюваного контура відносно ріжучого інструмента.

Кінематичний аналіз цього способу формоутворення здійснювався для випадків розгортання на напрямну поверхню у вигляді кругового циліндра, на нерухому площину та площину, що рухається у напрямку, протилежному напрямку подачі (спосіб прокатування). Залежності, що описують траєкторію руху центра ваги контура, визначалися по розрахунковій схемі, наведеній на рис. 6.

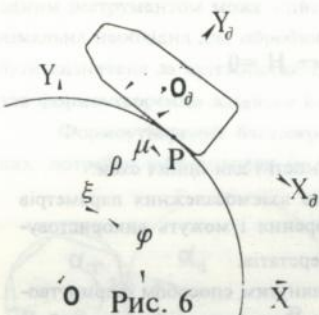


Рис. 6

Оброблюваний контур задається у вигляді системи параметричних рівнянь у центральній системі координат  $X_a O_a Y_a$ , зв'язаній з контуром, у функції довжини дуги контура, яка задається через величину подачі та час. Тоді траєкторію центра ваги контура можна навести у вигляді:

$$X = \rho \cdot \cos(\varphi + \xi)$$

$$Y = \rho \cdot \sin(\varphi + \xi)$$

де  $X, Y$  - координати центра ваги контура;  $\varphi = S \cdot t / R$  - кут повороту приводної ланки;  $S$  - подача приводної ланки;  $t$  - час;  $R = OP$  - радіус напрямної поверхні;  $\xi = \arcsin(\rho_a / \rho \cdot \sin \mu)$  - з трикутника  $OO_aP$  за теоремою синусів;  $\rho_a = O_aP = \sqrt{X_a^2 + Y_a^2}$  - модуль радіус-вектора точки контура відносно його центра ваги  $O_a$ ;  $\rho = OO_a = (\rho_a^2 + R^2 - X_2 \cdot R \cdot \cos \mu)^{1/2}$  - модуль радіус-вектора в нерухомій системі координат;  $\sin \mu = (X_a + Y_a \cdot Y'_a) / \{\rho_a [1 + (Y'_a)^2]^{1/2}\}$ ;  $\cos \mu = (Y_a - X_a \cdot Y'_a) / \{\rho_a [1 + (Y'_a)^2]^{1/2}\}$ ;  $Y'_a = (dY/dt) / (dX/dt)$ .

У випадку розгортання на круговий циліндр, розташований всередині контура, змінюється знак у виразі для обчислення модуля радіус-вектора в нерухомій системі

координат  $\rho = (\rho_0^2 + R^2 + X^2 \cdot R \cdot \cos \mu)^{1/2}$ . При розгортанні на нерухому площину:

$$X = S \cdot t \cdot \rho \cdot \sin \mu; \quad \text{а при прокатуванні:} \quad X = S \cdot t \cdot \rho \cdot \sin \mu;$$

$$Y = \rho \cdot \cos \mu, \quad Y = \rho \cdot \cos \mu,$$

З використанням цих залежностей розроблені програми, які дозволяють побудувати траєкторію центра ваги контура та графіки зміни його швидкості при відтворенні ділянок контура з різними характеристиками. Зразки розрахункових траєкторій та графіків зміни швидкості наведені на рис. 7. - 11.

Зміна форми напямної поверхні та основних параметрів формуючої системи (R та E) призводить до зміни як траєкторії центра ваги контура (рис. 7-10), так і величини його швидкості на ділянках контуру з різною формою (рис. 11). При різних співвідношеннях радіуса напямної поверхні R та еквідистантного збільшення формозадаючої поверхні E величина зміни швидкості змінюється, отже можливо в кожному конкретному випадку визначити раціональне співвідношення параметрів формуючої системи, при якому стрибки швидкості будуть мати найменшу величину.



Рис. 7.

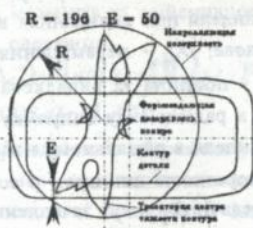


Рис. 8.

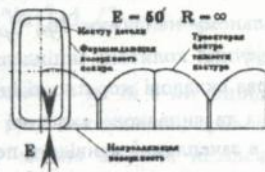


Рис. 9.



Рис. 10.

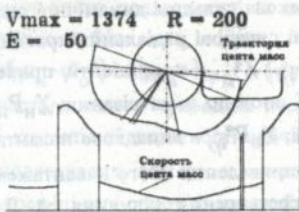


Рис. 11.

У третьому розділі здійснена розробка математичної моделі динамічної системи верстата. Верстат розглядається як складна багатомасова коливальна система, до складу якої входять підсистеми шпіндельної групи, супортної групи та процес різання. Шпіндельна група, в свою чергу, містить: еквівалентну одномасову коливну систему самого шпінделя; одномасову коливну систему труби подачі; коливну систему заготовки, як механічну коливну систему з розподіленими параметрами; одномасову коливну систему затискувальної вилки з повзуном та коливну систему частини заготовки, розташованої безпосередньо в патроні та зоні різання.

Розрахункову схему динамічної системи шпіндельної групи токарного багатшпіндельного верстата наведено на рис. 12.

Рівняння поперечних коливань шпінделя в радіальному відносно шпіндельного барабана напрямку, складене відповідно до розрахункової моделі, має вигляд:

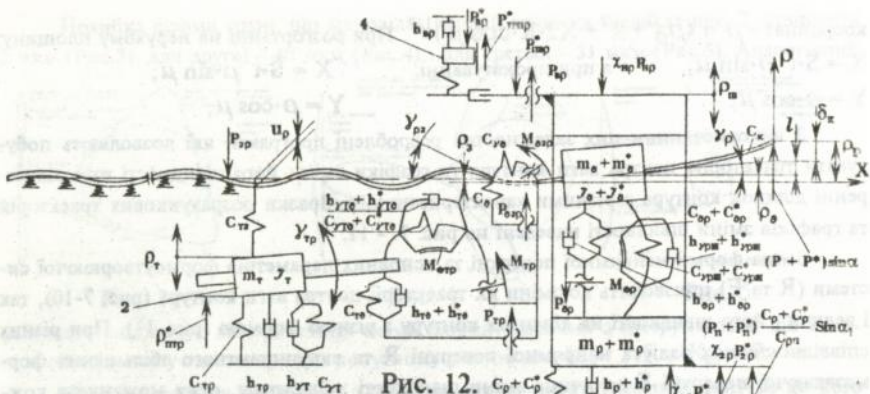


Рис. 12.

$$(m_p + m_p^*) \cdot d^2 \rho_{ш} / dt^2 + (h_p + h_p^*) \cdot d\rho_{ш} / dt + (C_p + C_p^*) \cdot \rho_{ш} = P_{\partial\rho} + [(C_p + C_p^*) / (C_{\rho_n} + C_{\rho_n}^*) \cdot \sin \alpha_1] \cdot (P_n + P_n^*) + \chi_{1\rho} P_{1\rho} + \chi_{2\rho} P_{2\rho}^* + \chi_n P_{n\rho} + \chi_B P_{B\rho}^*$$

де  $(m_p, m_p^*)$  - звідена маса шпінделя при коливаннях в радіальному щодо барабана напрямку та її випадкова складова;  $\rho_{ш}$  - переміщення шпінделя в зоні різання в радіальному напрямку;  $h_p, h_p^*$  - постійна та випадкова складові коефіцієнта опору поперечних коливань шпінделя в радіальному напрямку;  $C_p, C_p^*$  - постійна та випадкова складові жорсткості шпінделя в радіальному напрямку;  $C_{\rho_n}, C_{\rho_n}^*$  - детермінована та випадкова складові жорсткості шпінделя в зоні різання при прикладенні сили в зачепленні привідної передачі;  $\alpha_1$  - кут зачеплення привідної передачі;  $P_{\partial\rho}$  - проекція сили взаємодії заготовки та шпінделя на радіальний напрям;  $P_n, P_n^*$  - детермінована та випадкова складові динамічної складової зусилля у привідній передачі;  $P_{1\rho}, P_{2\rho}^*$  - випадкові складові радіальних проекцій навантажень в задній та передній опорах шпінделя;  $\chi_{1\rho}, \chi_{2\rho}$  - коефіцієнти приведення навантажень в підшипниках задньої та передньої опор до зони різання;  $\chi_n P_{n\rho}$  - проекція на радіальний напрям випадкової складової;  $\chi_B P_{B\rho}^*$  - випадкове навантаження на шпіндель від затискуючої вилки та коефіцієнт приведення цього навантаження до зони різання.

Виконавши перетворення рівняння за Лапласом при нульових початкових умовах вважаючи, що випадкові складові маси, коефіцієнта опору та жорсткості постійні у часі для невеликого інтервалу часу, а випадкові складові навантажень - змінні випадкові процеси, одержимо:

$$(m_p + m_p^*) \cdot s^2 + (h_p + h_p^*) \cdot s + (C_p + C_p^*) \cdot \rho_{ш}(s) = P_{\partial\rho}(s) + [(C_p + C_p^*) / (C_{\rho_n} + C_{\rho_n}^*) \cdot \sin \alpha_1] \cdot [P_n(s) + P_n^*(s)] + \chi_{1\rho} P_{1\rho}(s) + \chi_{2\rho} P_{2\rho}^*(s) + \chi_n P_{n\rho}(s) + \chi_B P_{B\rho}^*(s)$$

де  $S$  - оператор Лапласа, а дужки з оператором Лапласа за змінною вказують, що ця змінна є зображення за Лапласом відповідної функції часу. Використавши нові позначення для коефіцієнтів, одержимо:

$$(T_{\rho 1} \cdot s^2 + T_{\rho 2} \cdot s + 1) \cdot \rho_{ш}(s) = K_{\partial\rho} \cdot P_{\partial\rho}(s) + K_{\rho_n} \cdot [P_n(s) + P_n^*(s)] + K_{1\rho} P_{1\rho}(s) + K_{2\rho} P_{2\rho}^*(s) + K_n P_{n\rho}(s) + K_B P_{B\rho}^*(s)$$

Це рівняння у операторній формі описує коливання першої підсистеми у вигляді одномасової коливної системи шпінделя, яка здійснює коливання в радіальному відносно осі шпіндельного барабана напрямку. Рівняння встановлює зв'язок між відображенням за Лапласом переміщення шпінделя та силами, що діють на цю підсистему.

Рівняння крутильних коливань шпінделя матиме вигляд:

$$(I_{ш} + I_{ш}^*) \cdot d^2\varphi/dt^2 = M_p - M_{II} - M_{\varphi} - (h_{\varphi} + h_{\varphi}^*) \cdot d\varphi/dt$$

де  $I_{ш}$ ,  $I_{ш}^*$  - момент інерції мас шпінделя, що коливаються, та його випадкова складова;  $\varphi$  - динамічна складова кута повороту шпінделя, яка визначається у вигляді відхилення кута повороту шпінделя від номінального значення, що відповідає обертанню шпінделя з постійною частотою;  $M_p$  - динамічний обертальний момент від сили різання;  $M_{II}$  - момент від зусилля у приводній передачі;  $M_{\varphi}$  - момент, що діє на шпіндель з боку заготовки як системи з розподіленими параметрами, що здійснює коливальний рух;  $h_{\varphi}$ ,  $h_{\varphi}^*$  - детермінована та випадкова складові коефіцієнта опору при крутильних коливаннях шпінделя.

Підставивши значення моментів та здійснивши перетворення за Лапласом при нульових початкових умовах, одержимо

$$\begin{aligned} [(I_{ш} + I_{ш}^*) \cdot s^2 + (h_{\varphi} + h_{\varphi}^*) \cdot s] \cdot \varphi(s) + [P_n(s) + P_n^*(s)] \cdot d_n / 2 \cdot \cos \alpha_1 = \\ = [P(s) + P^*(s)] \cdot d / 2 \cdot \cos \alpha - M_{\varphi}(s) \end{aligned} \quad (1)$$

Привідний вал шпінделя здійснює обертання усіх 4-х, 6-ти чи 8-ми шпінделів, тому коливання одного з них мало впливають на закон руху та коливання приводного вала. У зв'язку з цим кут повороту приводного валу можна вважати незалежною функцією часу, в загальному випадку - функцією випадкового характеру. З врахуванням цієї обставини рівняння, що описує вплив податливості та демпфування привідної зубчастієї передачі на коливання шпінделя, буде мати вигляд:

$$P_n \cdot d_n / 2 \cdot \cos \alpha_1 = (C_{\varphi_n} + C_{\varphi_n}^*) \cdot (\varphi_n - \varphi_o^*) + (h_{\varphi_n} + h_{\varphi_n}^*) \cdot (d\varphi_n/dt - d\varphi_o/dt)$$

де  $d_n$  - діаметр діляльного кола зубчастого колеса приводної передачі;  $C_{\varphi_n}$ ,  $C_{\varphi_n}^*$  - детермінована та випадкова складові крутильної жорсткості зубчастієї передачі;  $\varphi_n$  - кут повороту колеса без врахування податливості зубчастого зачеплення;  $h_{\varphi_n}$ ,  $h_{\varphi_n}^*$  - детермінована та випадкова складові коефіцієнта опору приводної передачі.

Враховуючи, що  $\varphi = i_{ш} \varphi_n$ , та здійснивши перетворення за Лапласом при нульових початкових умовах, одержимо;

$$\begin{aligned} P_n(s) \cdot d_n / 2 \cdot \cos \alpha_1 = [(C_{\varphi_n} + C_{\varphi_n}^*) / i_{ш} + (h_{\varphi_n} + h_{\varphi_n}^*) / i_{ш} \cdot s] \varphi(s) - \\ - [(C_{\varphi_n} + C_{\varphi_n}^*) + (h_{\varphi_n} + h_{\varphi_n}^*)] \varphi_o^*(s) \end{aligned}$$

де  $\varphi_o^*(s)$  - відображення за Лапласом динамічної складової кута повороту приводного вала, яке є незалежна функція часу.

З цього рівняння знайдемо відображення за Лапласом динамічної складової кута повороту шпінделя як функцію відображення зусилля в приводній передачі та кута повороту приводного вала. Після спрощення та заміни постійних одержимо:

$$\varphi(s) = \{K_{\varphi_n} / [T_n s + 1]\} P_n(s) + i_{ш} \cdot \varphi_o^*(s)$$

загальному вигляді може бути подана функціональним співвідношенням

$$\rho_{\omega}(s) \cdot \rho_{\omega}[s, P(s), P^*(s), M^* \varphi(s), \varphi^*(s), P^* I_{\rho}(s), P^* z_{\rho}(s), P_{H\rho}(s), P_{\rho}(s), P_{\rho}(s)]$$

Така математична залежність може бути подана у вигляді структурної схеми, яка має десять вхідних параметрів та один вихідний, або записана за допомогою матриці-рядка передаточних функцій:

$$[W_{\rho_{\omega}}] = [W_{\rho_{\omega}P} \ W_{\rho_{\omega}P^*} \ W_{\rho_{\omega}P^*n} \ W_{\rho_{\omega}M^*} \ \dots \ W_{\rho_{\omega}P^*I_{\rho}} \ W_{\rho_{\omega}P^*z_{\rho}} \ W_{\rho_{\omega}P_{H\rho}} \ W_{\rho_{\omega}P_{\rho}}]$$

Розглянемо навантаження на шпіндель, що виникають внаслідок незрівноваженості його мас. Шпіндельна група представлена як маса, яка розміщується в підшипниках з ексцентриситетом. Величина ексцентриситету складається з детермінованої та випадкової частин. Враховуючи, що незрівноважена маса знаходиться на значній відстані від зони різання, можна вважати, що коливання шпінделя в зоні різання мало змінюють величину ексцентриситету

Визначимо динамічні складові сил від незрівноваженості мас шпінделя.

Тангенційна сила інерції може бути описана лінійною залежністю:

$$P_{HT} = m_{\omega}(\epsilon_0 + \epsilon_0^*)\ddot{\varphi} \quad \text{де } m_{\omega} - \text{ маса шпінделя; } \epsilon_0 - \text{ постійна складова ексцентриситету; } \epsilon_0^* - \text{ випадкова складова ексцентриситету незалежна від часу.}$$

Залежність для визначення відцентрової сили інерції при обертанні шпінделя матиме вигляд:  $P_{HЦ} = m_{\omega}(\epsilon_0 + \epsilon_0^* + \epsilon^*)\omega^2$ , де  $\epsilon^*$  - випадкова складова ексцентриситету, залежна від часу;  $\omega$  - абсолютна кутова швидкість обертання шпінделя.

Останній вираз є нелінійна залежність двох змінних  $\omega$  та  $\epsilon^*$ . Для її лінеаризації розкладемо функцію в ряд по ступеням змінних та, обмежуючись першими ступенями розкладення, одержимо динамічну складову відцентрової сили у вигляді:

$$P_{HЦ} = m_{\omega}(\epsilon_0 + \epsilon_0^*)\omega^2 \epsilon^* + 2m_{\omega}(\epsilon_0 + \epsilon_0^*)\omega_y \varphi,$$

де  $\omega_y$  - номінальне значення кутової швидкості обертання шпінделя.

Визначивши проєкції динамічних складових навантаження на шпіндель від незрівноваженості його мас з врахуванням одержаних  $P_{HЦ}$  та  $P_{HT}$  та виконавши необхідні заміни та перетворення, одержимо в матричній формі:

$$[W_{H\rho}] = [W_{H\rho\epsilon^*} \ W_{H\rho P} \ W_{H\rho P^*} \ \dots \ W_{H\rho P^*n} \ W_{H\rho M_{\rho}} \ W_{H\rho \varphi_0^*}]$$

$$[W_{HЦ}] = [W_{HЦ\epsilon^*} \ W_{HЦ P} \ W_{HЦ P^*} \ \dots \ W_{HЦ P^*n} \ W_{HЦ M_{\rho}} \ W_{HЦ \varphi_0^*}]$$

Подібним чином здійснено вивод і необхідні перетворення для рівнянь, що описують решту підсистем динамічної системи верстата. В кінцевому підсумку математична модель верстата представлена у вигляді векторно-матричного рівняння:  $\{Y\} = [W] \{X\}$ , або в розгорнутому вигляді:

$$\begin{pmatrix} \Delta \\ Y_C \\ Y_{III} \\ P \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} W_{\Delta a} & W_{\Delta X_{II}^*} & [W_{\Delta XY_c}] & [W_{\Delta XZ_c}] & [W_{\Delta X\rho m}] & [W_{\Delta X\rho m}] & [W_{\Delta X\xi m}] \\ W_{Y_c a} & W_{Y_c X_{II}^*} & [W_{Y_c XY_c}] & [W_{Y_c XZ_c}] & [W_{Y_c X\rho m}] & [W_{Y_c X\rho m}] & [W_{Y_c X\xi m}] \\ W_{Y_{III} a} & W_{Y_{III} X_{II}^*} & [W_{Y_{III} XY_c}] & [W_{Y_{III} XZ_c}] & [W_{Y_{III} X\rho m}] & [W_{Y_{III} X\rho m}] & [W_{Y_{III} X\xi m}] \\ W_{P a} & W_{P X_{II}^*} & [W_{P XY_c}] & [W_{P XZ_c}] & [W_{P X\rho m}] & [W_{P X\rho m}] & [W_{P X\xi m}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ X_{II}^* \\ X_{Y_c} \\ X_{Z_c} \\ X_{\varphi} \\ X_{\rho m} \\ X_{\xi m} \end{pmatrix}$$

У четвертому розділі здійснено аналіз похибок формоутворення, які обумовлені геометричними та кінематичними похибками верстата, технологічними факторами (знос інструменту), деформаційними статичними та динамічними похибками, що супроводжують обробку з використанням процесу різання. Похибки формоутворення розглядаються як такі, що мають детерміновану та випадкову складові.

Формоутворення починається в точці перетину кола, радіус якого дорівнює радіусу заготовки, з колом, на якому розміщені ріжучі кромки інструмента. Приймаючи, що початок системи координат співпадає з серединою ідеальної грані, одержимо залежності, які описують траєкторію ріжучої кромки у системі координат, з'єднаних з оброблюваною деталлю:

$$Y_F = L \cdot \cos \psi - R_u \cdot \cos (1 - K_\omega) \psi$$

$$Z_F = L \cdot \sin \psi - R_u \cdot \sin (1 - K_\omega) \psi$$

де  $\psi = \varphi - (\pi/N - \alpha_3/2)$ ;  $L$  - відстань між осями обертання заготовки та інструмента;  $R_u$  - радіус інструмента;  $K_\omega = \omega_u/\omega_3$  - відношення кутових швидкостей інструмента та заготовки;  $Y_F$  - відхилення оброблюваної поверхні від прямолінійності;  $Z_F$  - відстань вздовж оброблюваної поверхні.

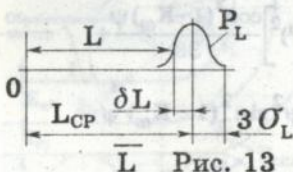
Визначимо варіацію форми кривої. Для цього продиференціюємо як складні функції залежності кінематичних та геометричних параметрів:

$$\delta Y_F = \partial Y_F / \partial L \cdot \delta L + \partial Y_F / \partial R_u \cdot \delta R_u + \partial Y_F / \partial K_\omega \cdot \delta K_\omega,$$

$$\delta Z_F = \partial Z_F / \partial L \cdot \delta L + \partial Z_F / \partial R_u \cdot \delta R_u + \partial Z_F / \partial K_\omega \cdot \delta K_\omega,$$

де  $\delta Y_F$  - відхилення точки контуру у напрямку  $Y$ ;  $\delta Z_F$  - відхилення форми профілю у напрямку  $Z$ ;  $\delta L$  - відхилення міжосьової відстані від номінального значення;  $\delta R_u$  - відхилення величини радіуса інструмента;  $\delta K_\omega$  - фактичне відхилення визначеної раніше умови ділення.

Одержані вирази (після підстановки похідних) визначають відхилення форми в залежності від варіацій вхідних параметрів процесу обробки -  $\delta L$ ,  $\delta R_u$ ,  $\delta K_\omega$ . Враховуючи малі відхилення величини  $L$  від її номінального значення і значну кількість факторів, що впливають на ці відхилення, можна вважати що закон густини вірогідності відхилення міжосьової відстані буде нормальним. Графічна ілюстрація вірогідності виникнення похибки міжосьової відстані наведена на рис. 13. Максимальна похибка може бути визначена як сумарне биття підшипників і складає  $6\sigma_L$ . Це дає можливість



визначити дисперсію відхилення міжосьової відстані від номінального значення за виразом:  $D_L = 6\sigma_L^2 \approx (\Delta_n/6)$ , де  $\sigma_L$  - середньоквадратичне відхилення міжосьової відстані;  $\Delta_n$  - найбільше можливе биття підшипників шпінделя та інструмента.

Розглянемо можливі зміни радіусу інструменту. Можна вважати, що ці зміни викликані трьома факторами: биття осі, знос інструменту та похибка його установки. Відповідно зміни радіусу можуть бути подані у вигляді суми:  $\delta R_u = \delta R_{u1} + \delta R_{u2} + \delta R_{u3}$ , де  $\delta R_{u1}$  - зміна  $R_u$  за рахунок биття осі інструменту;  $\delta R_{u2}$  - похибка  $R_u$  за рахунок установки та закріплення інструменту;  $\delta R_{u3}$  - похибка  $R_u$  внаслідок зносу інструменту.

Відхилення радіусу інструменту від номінальної величини за рахунок биття осі та неточності установки можуть вважатися постійними (мало залежними від часу), а похибка, обумовлена зносом інструменту, залежить від часу. Розглянувши ці складові окремо, одержимо загальну похибку, пов'язану з впливом цих факторів. Математичне очікування відхилення величини радіусу інструменту:  $M_u = R_u [(\delta_a + \delta_i)/2 - 1] + C_{из} t^{q_1}$ , де  $\delta_a = R_{max}/R_u$ ,  $\delta_i = R_{min}/R_u$  - відносні максимальне і мінімальне можливі значення радіусу інструменту;  $t$  - час;  $C_{из} Q_1$  - емпіричні постійна та показник ступеню. Дисперсія відхилення радіусу від середнього значення може бути визначена як дисперсія суми незалежних випадкових величин:  $D_u = [(\delta_{\delta_m})^2 + R_u^2 (\delta_a - \delta_i)^2 / 2 + (K_{из} C_{из} \cdot t^{q_1})^2] / 36$ , відповідно середньоквадратичне відхилення:  $\sigma_u = D_u^{1/2}$ , а довірчий інтервал зміни радіусу інструменту відносно його математичного очікування -  $\Delta_u = \pm 3\sigma_u$ .

Третій вхідний параметр має вигляд відношення кутових швидкостей. Варіацію цього відношення можна визначити як диференціал:  $\partial K_\omega = d(\omega_u/\omega_3) = (d\omega_u - K_\omega d\omega_3)/\omega_3$ . Визначивши необхідні складові, в кінцевому вигляді одержимо математичне очікування відношення кутових швидкостей:  $M_\omega = (C_3/\omega_3/\psi^2 m)(M_{\omega u} + K_\omega M_{3\omega})$ , та дисперсію  $\sigma_\omega^2 = (C_3/\omega_3/\psi^2 m)^2 (\sigma_{\delta\varphi_{\Sigma u}}^2 + K_\omega^2 \sigma_{\delta\varphi_{\Sigma 3}}^2)$ .

Загальні похибки полігонального контуру, обумовлені геометричними та кінематичними похибками верстату, можуть бути представлені у вигляді:

- математичне очікування похибки контуру полігональної поверхні

$$M_{YF} = - \left\{ \left[ R_{II} \left( \frac{\delta_a - \delta_i}{2} - 1 \right) + C_{из} t^{q_1} \right] \cos(1 - K_\omega) \psi + \frac{C_\epsilon}{\omega_3 \psi_m^2} \left[ \sum_{i=1}^{n_{II}} \frac{1}{i_i} E_{v_{in}}^\varphi - K_\omega \sum_{i=1}^{n_3} \frac{1}{i_i} E_{v_{i3}}^\varphi \right] R_{II} \psi \sin(1 - K_\omega) \psi \right\}$$

$$M_{ZF} = - \left\{ \left[ R_{II} \left( \frac{\delta_a - \delta_i}{2} - 1 \right) + C_{из} t^{q_1} \right] \sin(1 - K_\omega) \psi + \frac{C_\epsilon}{\omega_3 \psi_m^2} \left[ \sum_{i=1}^{n_{II}} \frac{1}{i_i} E_{v_{in}}^\varphi - K_\omega \sum_{i=1}^{n_3} \frac{1}{i_i} E_{v_{i3}}^\varphi \right] R_{II} \psi \cos(1 - K_\omega) \psi \right\}$$

- дисперсія похибки контуру полігональної поверхні

$$D_{YF}^2 = \frac{\Delta_{II}^2}{36} \cos^2 \psi + \left[ \delta_{\delta m}^2 + R_{II}^2 (\delta_a + \delta_i)^2 + (K_{из} C_{из} t^{q_1})^2 \right] \frac{\cos^2(1 - K_\omega) \psi}{36} + \frac{C_\epsilon^2}{\omega_3^2 \psi_m^4} \left[ \sum_{i=1}^{n_{II}} \left( \frac{V_{in}^\varphi}{i_i} \right)^2 + K_\omega^2 \sum_{i=1}^{n_3} \left( \frac{V_{i3}^\varphi}{i_i} \right)^2 \right] R_{II}^2 \psi^2 \sin^2(1 - K_\omega) \psi$$

$$D_{ZF}^2 = \frac{\Delta_{II}^2}{36} \sin^2 \psi + \left[ \delta_{\delta m}^2 + R_{II}^2 (\delta_a + \delta_i)^2 + (K_{из} C_{из} t^{q_1})^2 \right] \frac{\cos^2(1 - K_\omega) \psi}{36} + \frac{C_\epsilon^2}{\omega_3^2 \psi_m^4} \left[ \sum_{i=1}^{n_{II}} \left( \frac{V_{in}^\varphi}{i_i} \right)^2 + K_\omega^2 \sum_{i=1}^{n_3} \left( \frac{V_{i3}^\varphi}{i_i} \right)^2 \right] R_{II}^2 \psi^2 \sin^2(1 - K_\omega) \psi$$

По цих залежностям визначимо середньоквадратичні відхилення похибок кон-  
туру:  $\sigma_{YF} = D_{YF}^{1/2}$ ,  $\sigma_{ZF} = D_{ZF}^{1/2}$ .

Похибки формоутворення, що обумовлені статичними деформаціями, визнача-  
ються з врахуванням змін сили різання, обумовлених змінами параметрів процесу  
різання: глибини різання ( $t$ ); переднього кута ( $\gamma$ ) та швидкості різання. На основі  
відомих залежностей, враховучи зміни параметрів процесу різання, одержимо:

$$P_Z = C_{Pz} \left( R_3 \sqrt{R_H^2 + E^2} - 2LR_H [\cos\psi \cos(1-K_\omega)\psi + \sin\psi \sin(1-K_\omega)\psi] \right)^{X_{Pz}} \cdot$$

$$\cdot \left[ \frac{\pi n_3}{500} \left( K_\omega R_H \sqrt{R_H^2 + E^2} - 2LR_H [\cos\psi \cos(1-K_\omega)\psi + \sin\psi \sin(1-K_\omega)\psi] \right) \right]^{I_{Pz}} \cdot$$

$$\cdot S^{Y_{Pz}} K_{M_{Pz}} K_{\varphi_{Pz}} \left\{ 1 + 0,01 \left( 10 - \gamma_{Табл} + (1-K_\omega) \left[ \psi + \left( \frac{\pi}{N} - \frac{\alpha_3}{2} \right) \right] \right) \right\} K_{\lambda_{Pz}} K_{\Gamma_{Pz}}$$

$$P_Y = C_{Py} \left( R_3 \sqrt{R_H^2 + E^2} - 2LR_H [\cos\psi \cos(1-K_\omega)\psi + \sin\psi \sin(1-K_\omega)\psi] \right)^{X_{Py}} \cdot$$

$$\cdot \left[ \frac{\pi n_3}{500} \left( K_\omega R_H \sqrt{R_H^2 + E^2} - 2LR_H [\cos\psi \cos(1-K_\omega)\psi + \sin\psi \sin(1-K_\omega)\psi] \right) \right]^{I_{Py}} \cdot$$

$$\cdot S^{Y_{Py}} K_{M_{Py}} K_{\varphi_{Py}} \left\{ 1 + 0,04 \left( 10 - \gamma_{Табл} + (1-K_\omega) \left[ \psi + \left( \frac{\pi}{N} - \frac{\alpha_3}{2} \right) \right] \right) \right\} K_{\lambda_{Py}} K_{\Gamma_{Py}}$$

Похибка формоутворення визначається як сумарна величина взаємного віджат-  
тя заготовки та інструменту в напрямку, перпендикулярному до оброблюваного кон-  
туру, тобто:  $\Delta = P_H(1/C_3 + 1/C_\omega) = P_Y(1/C_3 + 1/C_\omega)$ , де  $C_3$  - жорсткість шпін-  
дельного вузла з заготовкою;  $C_\omega$  - жорсткість інструментальної головки.

Перевірка запропонованих методик визначення геометричних та деформаційних  
похибок обробки полігональних поверхонь здійснена співставленням результатів  
розрахунку з даними експерименту. Виміри здійснювались на партії з 10 оброблених  
деталей, які мають шестигранну поверхню з розміром під ключ  $S = 19$  мм. Обробка  
здійснювалася на токарному багатшпіндельному автоматі моделі 1Б240-6К.

Найбільша різниця розмірів розрахункової та вимірної на деталі форми грані  
складає 0,015 мм при відхиленні обробленої поверхні від прямолінійності 0,13 мм,  
тобто 11,5 %.

При обробці поверхонь, що мають велике від-  
ношення довжини контуру до його ширини, з вико-  
ристанням копіювальних механізмів з центроїдними  
парами виникає похибка формоутворення, обумов-  
лена особливостями конструкції притискуючого на-  
прямого механізму. Аналіз цих похибок здійснено  
на основі розрахункової схеми рис. 14. Така схема  
обумовлює наявність ділянки переходу в місцях  
з'єднання елементів контуру різної кривизни, або  
з'єднання зі зломом (в обох випадках має місце змі-  
на розташування центру кривизни суміжних діля-  
нок контуру).

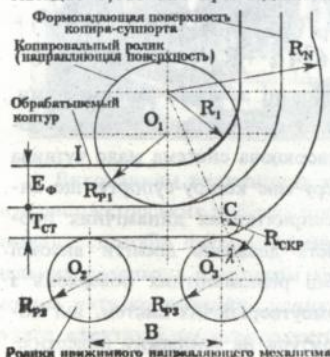


Рис. 14

Кінцеві вирази для визначення похибки на прямолінійній ділянці мають вигляд:

$D_F = (X_{O1}^2 + Y_{O1}^2)^{1/2} - R_u - R_1$ , де  $X_{O1} = X_{O1} + O_1 O_u (Y_{O2} - Y_{O3}) / B_p$ ,  $Y_{O1} = Y_{O1} + O_1 O_u \times (X_{O2} - X_{O3}) / B_p$ ,  $Y_{O1} = R_1 + E_{\Phi} + R_{P1}$ ,  $X_{O1} = X_{y1} + Y_{O1} TG$ , для криволінійної -  $D_F = R_1 - Y_{O1}$ ,  $Y_{O1} = [R_{B1} + (R_{B1}^2 - 4R_{A1}R_{C1})^{1/2}] / (2R_{B1})$ , а координати поверхні копіру, при яких компенсується похибка, відповідно для прямолінійної ділянки:  $X_K = X_{O1}$ ,  $Y_K = R_1 + E_{\Phi} + D_F$ , і для криволінійної ділянки:  $X_K = X_{O1}(R_1 - D_F) / R_{O1}$ ,  $Y_K = Y_{O1}(R_1 - D_F) / R_{O1}$

Динамічні явища, які виникають при використанні копіювальних механізмів з

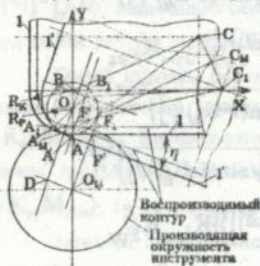


Рис. 15

центроїдними парами, можуть призводити до перебігання центром мас копіра-супорта з деталлю номінального положення, що обумовлює виникнення похибки формоутворення. Для визначення впливу відхилення центру мас копіра-супорта від теоретично потрібного положення використано розрахункову схему рис. 15.

На схемі показані два положення копіра-супорта - положення у момент закінчення відтворення криволінійної ділянки та положення, що відповідає перебігання центру мас копіра-супорта. Внаслідок перебігання центр мас копіра-супорта переміщується з точки С в точку С<sub>1</sub>, точка С, що належить супорту, зміщується в положення С', а контакт формозадаючого контуру копіру (1' - 1') з копіювальним роликом здійснюється в точці А<sub>1</sub>. Така зміна положення копіра-супорта призводить до врізання інструмента в оброблюваний контур на величину D<sub>F</sub> яку можна визначити з трикутника O<sub>u</sub>OD:  $D_F = (R_u + R_d)(1 - \cos \eta)$ , де R<sub>u</sub> - радіус інструмента, R<sub>d</sub> - радіус кривизни контуру деталі в точці А, η - кут повороту копіра-супорту при перебіганні його центру мас на величину  $l = CC_1$ . Невідома величина в цій залежності - кут повороту копіра-супорту η. Минаючи проміжні вкладки, одержимо:  $\eta^6 \cdot A + \eta^5 \cdot B + \eta^4 \cdot C + \eta^3 \cdot D + \eta^2 \cdot E + \eta \cdot F + G = 0$ , де  $A = a^2 \cdot [R_k \cdot R_p / (R_k - R_p)]^2$ ;  $B = 2 \cdot x_c \cdot (a^2 + R_k^2) [R_k \cdot R_p / (R_k - R_p)]$ ;  $C = (a^2 + R_k^2) + 4 \cdot x_c^2 \cdot R_k^2$ ;  $D = 2 \cdot x_c \cdot l^2 [R_k \cdot R_p / (R_k - R_p)]$ ;  $E = 2 \cdot l^2 \cdot (a^2 + R_k^2)$ ;  $F = 0$ ;  $G = -l^2$ .

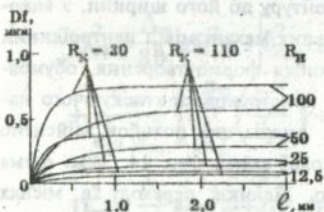


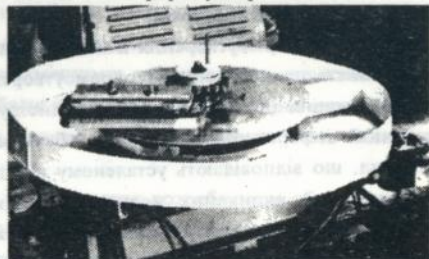
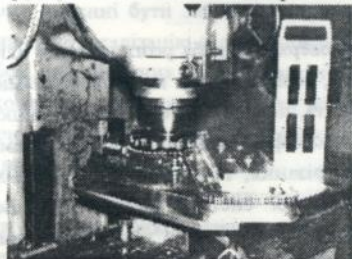
Рис. 16

Графіки, побудовані за цими залежностями, наведені на рис. 16. З графіків випливає, що досліджувана формоутворююча система мало чутлива до перебігання центру мас копіра-супорту, що виникає внаслідок несприятливих динамічних процесів. Ця особливість дозволяє досягти високої точності при обробці різноманітних поверхонь з використанням формоутворюючих систем, які побудовані на принципі розгортання оброблюваного контуру на напрямну поверхню, незважаючи навіть на наявність ступінчатої зміни швидкості при переході від обробки однієї ділянки до сусідньої з іншою кривизною.

У п'ятому розділі описані способи формоутворення та формоутворюючі системи, розроблені відповідно до одержаних в роботі результатів. Спосіб обробки багатогранників відповідно до а.с. № 1623840 дозволяє забезпечити необхідну точність формоутворення грані та визначити мінімальний радіус інструмента, що забезпечує таку точність. Спосіб обробки багатогранних поверхонь відповідно до а.с. № 1618503 дозволяє при використанні пристроїв для обробки таких поверхонь у складі багатоінструментних наладок не зменшувати продуктивність верстата, що досягається завдяки врахуванню швидкості різання (частоти обертання шпінделя), розрахованої для наладки без врахування операції обробки багатогранної поверхні, а також передбачає можливість визначити мінімальну, необхідну для обробки заданої багатогранної поверхні, кількість ріжучих кромки інструмента. При виконанні останньої умови в формоутворенні кожної грані приймає участь лише одна ріжуча кромка, що полегшує досягнення необхідної точності.

Запропоновані пристрої, які дозволяють покращити умови формоутворення полігональних поверхонь знижуючи рівень вібрацій та зменшуючи вірогідність перерозподілення чи розкриття зазорів у кінематичних ланцюгах верстатів. Наведені технічні рішення, які дозволяють розширити область застосування пристроїв для обробки полігональних поверхонь. наприклад, в складі наладки токарно-револьверних верстатів, а також описані пристрої, які забезпечують виконання допоміжних операцій (підрізання торців, протачування канавок та відрізання оброблених деталей).

Описані пристрої та верстати для копіювальної обробки, що забезпечують формоутворення полігональних поверхонь з великим відношенням довжини до ширини, в яких реалізовано спосіб розгортання оброблюваного контура на напрямку поверхню за допомогою механізмів з центроїдними парами. Наведені фотографії установок, створених для дослідження запропонованих способів формоутворення.



Виконанням теоретичних та експериментальних досліджень, комплексу дослідно-конструкторських робіт та промислової апробації доведена ефективність запропонованих способів формоутворення регулярних полігональних поверхонь та полігональних поверхонь з великим відношенням довжини контура до його ширини, які можуть мати криволінійні ділянки. Розроблене верстатне обладнання дозволяє реалізувати ефективні високопродуктивні технологічні процеси. Для забезпечення необхідних параметрів технологічного процесу розроблені науково обгрунтовані рекомендації, які є результатами виконаної дисертаційної роботи.

## Висновки.

1. На основі аналізу способів формоутворення полігональних поверхонь можна зробити висновок, що найбільш ефективними є формоутворючі системи, характер переміщень в яких відповідає характеру оброблюваних поверхонь. При цьому забезпечується найменший рівень нестационарності процесу обробки, який може бути досягнутим при умовах: зміни швидкості, кутів та сили різання повинні мати обмежені величини; для поверхонь з плоским контуром перехід до обробки еквідистатного контура здійснюється одним простим рухом по нормалі до контура.

2. Для одержання багатогранної поверхні на верстатах токарної групи з використанням розробленого обладнання повинні бути забезпечені необхідні кінематичні та геометричні співвідношення для елементів приводів та кінематичних ланцюгів. Ці співвідношення встановлюють зв'язок між розмірами багатогранника, радіусом розміщення ріжучих кромки інструмента відносно осі його обертання, відстанню між осями обертання інструмента та заготовки, а також співвідношенням куткових швидкостей заготовки та інструмента.

3. Формоутворення полігональних поверхонь може бути здійснене як при зовнішньому дотиканні, так і при охоплюванні траєкторією ріжучих кромки інструмента поверхні заготовки. При цьому форма поверхні граней може бути опукла, вгнута, а також може мати кривизну обох типів. Вибором розмірів елементів формоутворюючої системи можна, у більшості випадків, забезпечити необхідне значення відхилення оброблюваної грані від площини.

4. Обробку складних полігональних поверхонь доцільно здійснювати з використанням копіювальних механізмів з центроїдними парами. Аналіз формоутворення за допомогою таких механізмів показує їх низьку чутливість до перебігання центра мас рухомих частин та наявність можливості здійснення компенсації похибок за рахунок корекції формозадаючої поверхні.

5. Похибки формоутворення полігональних поверхонь треба розглядати як адитивну сукупність похибок способу формоутворення, геометричних похибок окремих деталей обладнання та використовуваного інструмента, похибок кінематичних ланцюгів, статичних деформаційних похибок, обумовлених деформаціями пружної системи під дією сил, що відповідають усталеному процесу різання, та динамічних деформаційних похибок, викликаних коливаннями динамічної системи обладнання. Всі вищевказані похибки формоутворення мають складові випадкового характеру і тому повинні бути представлені своїми статистичними характеристиками.

6. Аналіз динамічних випадкових похибок формоутворення доцільно виконувати методами математичного моделювання. Розроблена математична модель враховує основні нелінійності динамічної системи, розподіленість параметрів по довжині заготовки, наявність пружно-фрикційного шарніра в цанговому патроні, а також випадкові зміни структури та параметрів динамічної системи верстата. Математична модель подана у вигляді матричної передаточної функції від входу у вигляді вектора вхідних дій. Математична модель дозволяє знайти статистичні характеристики динамічної похибки обробки. Нелінійні блоки математичної моделі шляхом перетворення комплексних функцій приведені до стандартних комплекснозначних функцій дійсних ар-

гументів, які реалізуються стандартними процедурами мов програмування.

7. Аналіз похибок способу формоутворення, геометричних та кінематичних похибок обладнання показав, що реальний полігональний контур відрізняється від ідеалізованого, причому ці відмінності змінюються по довжині контура. При обробці шестигранника з розміром під ключ 19 мм математичне сподівання відхилення від площинності по довжині контура, яке виникає як наслідок геометричних та кінематичних похибок, досягає 0,015 мм, діапазон розсіяння значень координати контура (6 стандартів) складає 0,02 ... 0,04 мм, збільшуючись в напрямку від середини грані контура.

8. Деформації деталей та з'єднань, що виникають в обладнанні під дією статичних складових сили різання, обумовлюють похибки обробки випадкового характеру. Розсіяння значень координати (6 стандартів) приблизно відповідає розсіянню геометричних та кінематичних похибок. Відхилення кривої математичного очікування оброблюваної поверхні від площини складає 0,04 мм, що приблизно в 2,5 рази вище ніж відхилення за рахунок кінематичних похибок.

9. Динамічні випадкові похибки формоутворення мають більш вузьку (приблизно в чотири рази) область розсіяння значень ніж статичні похибки. Розсіяння значень похибок (6 стандартів) складає 0,005 ... 0,02 мм. В той же час відхилення математичного очікування координати поверхні від площини перевищує статичне значення у 1,5 ... 3 рази і складає 0,055 ... 0,065 мм. Крива математичного очікування відхилення форми полігональної поверхні внаслідок виникнення динамічної похибки приймає характерну S-подібну форму, що пояснюється переважаючим впливом інерційності обладнання на виникнення похибок.

10. Запропоновані технічні рішення, які захищені авторськими свідоцтвами, дозволяють створити обладнання для формоутворення полігональних поверхонь. При цьому повинні бути забезпечені кінематичні та геометричні співвідношення, що забезпечують реалізацію запропонованих способів формоутворення. Для зменшення похибок, обумовлених статичними та динамічними деформаціями пружної системи, рекомендується використовувати розроблені фрикційні та фрикційно-інерційні демпфери крутильних коливань інструмента, а також пристрої автоматичного балансування інструмента.

11. Підвищення експлуатаційних характеристик розробленого обладнання може бути досягнене використанням запропонованих у винаходах, захищених авторськими свідоцтвами, конструктивних рішень приводів супортів та використанням пристроїв для здійснення супутніх з обробкою полігональних поверхонь операцій.

12. Розроблені на рівні винаходів конструкції верстатів для обробки складних поверхонь відрізняються високою продуктивністю та якістю обробки, що підтверджується позитивним досвідом їх експлуатації на ряді промислових підприємств.

#### *Основні положення дисертації викладено у наступних роботах:*

науково-технічні статті:

1. Федоренко И.Г., Верба И.И., Даниленко А.В. Новые механизмы для осуществления формообразующих движений в станках. К.: Знание УССР. 1982, 18 с. Внесок здобувача - 40 %.

2. Федоренко И.Г., Даниленко А.В. Формаобразующие системы станков для обработки замкнутых плоских контуров // Станки и инструмент, 1987, № 6, с.21-23. Внесок здобувача 60 %.
3. Федоренко И.Г., Даниленко А.В., Верба И.И. Кинематические характеристики поперечной обработки на токарно-револьверных станках. // Известия ВУЗов. Машиностроение - 1981- № 2 с.115-117. Внесок здобувача 40 %.
4. Федоренко И.Г., Даниленко А.В., Погребняк А.П., Кошоруба В.В. Вибродиагностика узлов многошпиндельных токарных автоматов. // Металлорежущие станки: Респ.межвед.науч.-техн.сб. - Киев, 1988 - вып. 16 с.47-51. Внесок здобувача 25 %.

**методичні вказівки:**

5. Струтинский В.Б., Гейчук В.Н., Чикин С.В., Протасов С.В., Даниленко А.В. Методические указания к лабораторной работе "Расчет на ЭВМ частотных характеристик динамической системы токарного станка" по курсу "Математическое моделирование станков и станочных комплексов". - К: КПИ, 1992. - 47 с. Внесок здобувача - 20 %.

**тези доповідей на науково-технічних конференціях:**

6. Даниленко А.В. Особенности формообразования полигональных поверхностей при использовании многоинструментальных наладок. // Повышение эффективности производства машиностроительных предприятий. Тез.докл.науч. техн.-конф. - Душанбе, 1990.
7. Даниленко А.В. Повышение производительности обработки полигональных поверхностей на вращающейся заготовке. // Совершенствование процессов резания и средств автоматизации для повышения производительность гибких производственных систем. Тез.докл.конф. - Курган, 1990.
8. Даниленко А.В. Обеспечение стабильности работы механизмов для формообразования контуров деталей. // Типовые механизмы станков-автоматов и станков с программным управлением и эффективность их внедрения. Тез.докл.конф. - Киев, 1992.
9. Даниленко А.В., Струтинский В.Б., Шевченко А.В. Совершенствование виброакустических характеристик токарных станков. // Автоматизация проектирования и производства изделий в машиностроении. Тез.докл.конф. Луганск, 1996
10. Федоренко И.Г., Даниленко А.В. Кинематические и динамические особенности копировальных устройств, повышающих эффективность использования станков с ЧПУ. // Автоматическое манипулирование объектами и технологическая оснастка в станках с ЧПУ и ПС. Тез.докл.конф. - Тернополь, 1988.
11. Федоренко И.Г., Даниленко А.В., Кантур Е.Ю. Устройства, повышающие эффективность использования станков с ЧПУ. // Комплексная механизация и автоматизация производства на основе внедрения станков с ЧПУ, промышленных роботов, гибких производственных систем и роторно-конвейерных линий. Тез.докл.конф. - Луцк, 1988.
12. Струтинский В.Б., Гуржий А.Н., Даниленко А.В. Расчет на ЭВМ статистических параметров случайных колебаний системы приводов многошпиндельного токарно-го автомата // Проектирование, производство и эксплуатация систем гидроприво-

да, гидропневмоавтоматики и гидромашин и их компонентов. Тез. докл. научн.-техн. конф. - К., 1995.

13. Струтинский В.Б., Даниленко А.В. Обработка полигональных поверхностей на токарных многошпиндельных автоматах. // Гидромеханика в инженерной практике. Тез. докл. конф. - Киев, 1996.

авторські свідоцтва на винаходи:

14. А. с. № 916272 СССР, МКИ В23В 39/00. Устройство для обработки фасонных поверхностей. / Ю.В.Петраков, И.Г.Федоренко, А.В.Даниленко, Н.П.Стародуб, И.Н.Цема - опубл. 1982, Бюл. № 12.
15. А. с. № 986738 СССР, МКИ В23В 19/08, В23С 1/16. Станок для обработки сложных поверхностей. / И.Г.Федоренко, Ю.В.Петраков, А.В.Даниленко, И.И.Верба, Н.П.Стародуб, И.Д.Корниенко - опубл. 1983, Бюл. № 1.
16. А. с. № 1006802 СССР, МКИ F15В 15/02, В23Q 5/02. Привод суппорта токарно-револьверного станка. / А.В.Даниленко, И.Г.Федоренко, И.И.Верба - опубл. 1983, Бюл. № 11.
17. А. с. № 1024771 СССР, МКИ G01М 1/36. Устройство для балансировки роторов. / И.Г.Федоренко, А.В.Даниленко, А.В.Бараболя, А.Н.Вестфаль - опубл. 1983, Бюл. № 23.
18. А. с. № 1168337 СССР, МКИ В23В 21/00. Револьверный суппорт. / И.Г.Федоренко, И.И.Верба, А.В.Даниленко - опубл. 1985, Бюл. № 27.
19. А. с. № 1199586 СССР, МКИ В23Q 35/00. Копировальный станок / И.Г.Федоренко, А.В.Даниленко, Н.П.Стародуб, И.Д.Корниенко - опубл. 1985, Бюл. № 47.
20. А. с. № 1303288 СССР, МКИ В23С 1/16, В23Q 35/00. Станок для обработки сложных поверхностей. / А.В.Даниленко, И.Г.Федоренко, Н.П.Стародуб, Б.М.Пушкарь, Ю.В.Петраков - опубл. 1987, Бюл. № 14.
21. А. с. № 1399018 СССР, МКИ В23С 7/02, В23D 45/02. Отрезной суппорт. / И.Г.Федоренко, С.В.Чикин, А.В.Даниленко - опубл. 1988, Бюл. № 20.
22. А. с. № 1551521 СССР, МКИ В23Q 35/00. Копировальный станок / А.В.Даниленко, И.Г.Федоренко, Н.П.Стародуб, И.Н.Цема - опубл. 1990, Бюл. № 11.
23. А. с. № 1618503 СССР, МКИ В23В 1/00, В23В 5/44. Способ обработки многогранных поверхностей / А.В.Даниленко, И.Г.Федоренко, О.Н.Ступак, П.П.Брюханда, И.П.Вовкогон - опубл. 1991, Бюл. № 1.
24. А. с. № 1623840 СССР, МКИ В23В 1/00, В23В 5/44. Способ обработки многогранных поверхностей / А.В.Даниленко, И.Г.Федоренко, О.Н.Ступак, П.П.Брюханда, И.П.Вовкогон - опубл. 1991, Бюл. № 4.

#### Аннотация

Даниленко А.В. Способы формообразования и станочное оборудование для обработки полигональных поверхностей с криволинейными участками.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 - "Процессы механической обработки, станки и инструмент". Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 1996.

Защищаются 24 научные работы, в том числе 11 авторских свидетельств, в которых приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований способов формообразования регулярных полигональных поверхностей и полигональных поверхностей с криволинейными участками при большом отношении длины контура к его ширине и механизмов для их осуществления. Проведен кинематический анализ способов формообразования, разработана усовершенствованная математическая модель динамической системы станка с учетом распределенности параметров заготовки, а ее взаимодействие со шпинделем в патроне представлено как упруго-фрикционный шарнир. Осуществлен анализ влияния на точность воспроизведения контура погрешностей способа формообразования, кинематических и геометрических погрешностей элементов кинематических цепей станка, деформационных статических и динамических погрешностей формообразования. Выполнено математическое моделирование динамических погрешностей и экспериментальное исследование суммарной погрешности формообразования многогранной поверхности. Приведены технические решения, предлагаемые для повышения эффективности обработки полигональных поверхностей. Результаты исследований внедрены в промышленность.

#### Summary

Danilenko A.V. Production methods of forming and machine tools for machining polygonal surfaces with curved sections.

Thesis is submitted for academic degree of Candidate of Technical Sciences on the speciality 05.03.01 - "Processes of machining, machine tools and instruments". The National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev, 1996.

24 scientific works including 11 inventions, which present theoretical results and experimental data forming of regular polygonal surfaces and polygonal surfaces having curved sections with large ratio amount of length of countour to its width and mechanisms for their realization are defended. Kinematic analysis of forming methods was carried out. Modified mathematical model of mashine tool dynamic system is developed and parameters distribution of a stock part and its interaction with the spindle of machine tool in the clamping chuck is considered as an elasticjoint with friction are taken into account at that. Analysis of the influence on precision of forming method, kinematic and geometry errors of kinematic elements in machin element chain as a result of deformation of the total system static and dynamic errors have been carried out. Mathematical modelling of dynamic errors and experimental research data of the polygonal surface total error during forming is performed. Engineering decicions for improving the efficiency of machining poygonal surfaces is given. The results of researches have been introduced in the industry.

Ключові слова: формоутворення, способи, обладнання, кінематичний аналіз, математичне моделювання, аналіз похибок.

Здобувач



О.В.Даниленко

Підл. до друку 23,12,96 Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Папір друк. № 2 . Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 10.  
Умовн. фарбо-відб. 10 . Обл.-вид. арк. 10 .  
Тираж 100 . Зам. № 6-4308.

---

Фірма «ВІПОЛ»  
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

438950

AB 36.514

**AB 36.514**