

## МЕТРОЛОГІЯ, СТАНДАРТИЗАЦІЯ, СЕРТИФІКАЦІЯ ТА ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

УДК 620

DOI: 10.31891/2219-9365-2019-64-1

КВАСНИКОВ В. П.

Національний авіаційний університет

ФЕСЮН Б. М.

ПАТ «НВО «Київський завод автоматики»

### ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ШВИДКОСТІ ВИМІРЮВАНЬ КРИВОЛІНІЙНИХ ПОВЕРХОНЬ КОНТАКТНИМ СПОСОБОМ

*У статті розглянуто методи вимірювання геометричних параметрів металорізальних інструментів із криволінійною поверхнею на координатно-вимірювальних машинах (КВМ). Наведений контактний метод вимірювань черв'ячної фрези на КВМ. Описаний спосіб підвищення точності та швидкості вимірювань даним методом завдяки урахуванню похибок вимірювань, застосування апроксимації та програмного забезпечення.*

*Ключові слова:* координатно-вимірювальна машина, контактний метод, відхилення форми, рівняння поверхні довільної форми, програмне забезпечення Poverinspect.

KVASNIKOV V.

National Aviation University

FESYUN B.

PJSC "NGO" Kyiv Automation Plant "

### INCREASING THE ACCURACY AND FAILURE OF THE MEASUREMENTS OF CURVINAL SURFACES BY CONTACT

*The modern stage of development of mechanical engineering is characterized by the use, on the one hand, of achievements in the field of design, and on the other - the advanced technologies of measurement. The latter is primarily due to the intensive use of the latest information technologies and efficient mathematical modeling methods, which led to the creation of formalized models for measuring metal-cutting tools with complex spatial surfaces and technological tools for their production and development on this basis of application packages.*

*Coordinate measuring machines (CMMs) are widely used to control objects with complex spatial surfaces other than analytically described surfaces. The numerical values of the coordinates obtained by KVM do not completely solve the problem of control of complex spatial surfaces. It is necessary to compare not only the sets of points of measurement and mathematical model obtained, but also the equation of surfaces. It is also necessary to take into account the error of the radius of the measuring tip and the error of the deviations of the form. At the present stage of development of technology of precision measurement of coordinates of points of a surface on which it is possible to reproduce the surface of the cutting edge of the tool, is carried out with the help of software products, which provides in a single complex the solution of problems of triangulation of surfaces and the approximation of results in the measurement process, which leads to an increase in speed and accuracy of the data obtained. The article deals with the methods of measuring geometrical parameters of metal-cutting tools with curved surface on coordinate-measuring machines (CMM). Here is a contact method for measuring a worm cutter on a CMM. A method of improving the accuracy and speed of measurements by this method is described by taking into account measurement errors, the use of approximation and software.*

*Keywords:* coordinate measuring machine, contact method, shape deviation, arbitrary surface equation, Poverinspect software.

**Вступ.** Сучасний етап розвитку машинобудування характеризується використанням, з одного боку, досягнень в галузі проектування, а з іншого – передових технологій вимірювання. Останнє пов'язано перш за все з інтенсивним використанням новітніх інформаційних технологій та ефективних методів математичного моделювання, що призвели до створення формалізованих моделей вимірювання металорізальних інструментів зі складною просторовою поверхнею та технологічної оснастки для їх виготовлення й розробки на цій основі пакетів прикладних програм.

Для контролю об'єктів із складною просторовою поверхнею, відмінною від поверхонь, що аналітично описуються, широко використовують координатно-вимірювальні машини (КВМ). Цифрові значення координат, отримані за допомогою КВМ, не вирішують повністю задачу контролю складних просторових поверхонь. Необхідно порівняти не тільки набори точок вимірювальних і отриманих по математичній моделі, а також рівняння поверхонь. Також необхідно враховувати похибку радіуса вимірювального накінцевика та похибки відхилень форми. На сучасному етапі розвитку технології високоточного вимірювання координат точок поверхні, за якою можна відтворити поверхню різальної кромки інструменту, здійснюють за допомогою програмних продуктів, що забезпечує в єдиному комплексі розв'язання задач триангуляції поверхонь та апроксимації результатів в процесі вимірювання, що призводить до підвищення швидкості та точності отриманих даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасного стану наукових робіт, пов'язаних зі створенням нових методів вимірювання геометричних параметрів інструменту та деталей зі складною просторовою поверхнею, свідчить про стрімкий розвиток досліджень з використанням КВМ [7,8]. Математичним описанням просторових поверхонь займалось багато науковців [2,3,6]. В даний час широко застосовуються NURBS-поверхні [1] для створення математичних моделей в програмному забезпеченні.

Багато праць сучасного наукового світу присвячена виробленню нових методів вимірювання [4], описом нових математичних моделей та їх системне використання для порівнянням з реальними вимірювальними деталями, створення оптимізаційних алгоритмів та розроблення нових стратегій вимірювання [5,9]

**Постановка задачі.** Метою даної роботи є аналіз методів вимірювань криволінійних поверхонь на КВМ, та підвищення швидкодії і точності вимірювання контактним методом з врахуванням похибок вимірювання та застосування програмного забезпечення.

**Вирішення поставленої задачі.** Найважливішим критерієм якості продукції є відповідність геометрії виробу вимогам конструкторської документації. Якщо геометрію простих деталей або збірок легко виміряти традиційними контактними механічними інструментами, то в разі складних за формою конструкцій це не завжди можливо.

Криволінійна поверхня – безперервна безліч точок, між координатами яких може бути встановлена залежність, яка визначається рівнянням виду  $F(x, y, z) = 0$ .

Звичайно криволінійні поверхні можна описати математично. Але складні просторові поверхні, які утворюють різальну кромку металорізального інструменту (модульні, фасонні, черв'ячні фрези, фасонні різці, спіральні свердла та інші) досить складно описати математично. А це необхідно для проведення вимірювання геометричних параметрів інструменту. Оскільки більшість сучасних методів вимірювань криволінійних поверхонь потребують створення математичної моделі вимірюваного об'єкту для порівняння. Тоді для побудови моделі координатних вимірювань необхідно математично описати вимірювані поверхні і відповідні їм CAD-моделі. У даній роботі використовується інструмент, який є стандартом для опису поверхонь довільної форми в програмах CAD – NURBS-поверхні [4], рівняння якої ступеня  $k$  в параметричному напрямку  $u$  і ступеня  $l$  в напрямку  $v$  в тривимірному просторі:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} P_{i,j} N_{i,k}(u) \cdot N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j} N_{i,k}(u) \cdot N_{j,l}(v)}, \quad u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, v_{\min} \leq v \leq v_{\max}. \quad (1)$$

де  $u$  – параметр для обчислення координат точок сплайна;  $w_{i,j}$  – однорідні координати контрольних точок;  $P_{i,j}$  – координати  $(x_i, y_i, z_i)$   $i$ -ї заданої точки в тривимірному просторі;  $k$  – ступінь часткового сплайна в напрямку параметра  $u$ ;  $v$  – параметр для обчислення координат точок сплайна,  $l$  – ступінь часткового сплайна в напрямку параметра  $v$ ,  $N_{i,k}(u)$ ,  $N_{j,l}(v)$  – нормовані базисні функції, визначені на вузлових векторах:

$$U = \{u_i\}_{i=0}^r = \{u_{\min}, \dots, u_{\min}, u_{k+1}, \dots, u_{r-k-1}, u_{\max}, \dots, u_{\max}\}, r = n + k + 1 \quad (2)$$

$$V = \{v_j\}_{j=0}^s = \{v_{\min}, \dots, v_{\min}, v_{l+1}, \dots, v_{s-l-1}, v_{\max}, \dots, v_{\max}\}, s = m + l + 1 \quad (3)$$

де  $s$  – вузлові значення параметра, у яких функції  $N_{j,l}(v)$  відрізняються від нуля;  $r$  – вузлові значення параметра, у яких функції  $N_{i,k}(u)$  відрізняються від нуля.

Виготовлені поверхні складної форми завжди відрізняються від їх CAD-моделей на величину відхилень форми і розташування [4]. Через ці відхилення координати точки на вимірювальному наконечнику, що розраховуються по нормалі до CAD-моделі з координати центру наконечника, розраховуються з похибкою.

У загальному вигляді похибка вимірювання можна представити у вигляді функціоналу, який залежить від наступних параметрів:

$$u = f(S, M, D), \quad (4)$$

де  $S$  – сукупність параметрів, що характеризують систематичну геометрію і варіацію вимірюваних поверхонь;  $M$  – використовуваний метод обробки результатів вимірювань (метод компенсації радіуса вимірювального наконечника);  $D$  – сукупність параметрів, що характеризує похибка засобу вимірювання (КВМ). Варіація вимірюваних профілів на просторі  $S$  є випадковою функцією, що має розподіл в двовірному просторі. Вона визначається номінальною геометрією і технологією виготовлення деталей [5].

У практиці зустрічаються дві складові відхилення форми деталей: систематична і випадкова  $\delta_y$  (для контактної КІМ не перевищує 2 мкм). Систематичні відхилення включають в себе макровідхилення форми  $\delta_m$  і хвилястість  $\delta_s$  (гармонічна складова). Таким чином, загальну величину відхилення форми в кожній точці можна записати у вигляді суми трьох складових:

$$dF = \delta_s + \delta_m + \delta_y \quad (5)$$

Способи вимірювань складних поверхонь на КВМ засновані на таких методах координатних вимірювань: диференціальному, нульовому та співставленню.

При диференціальному методі виконуючий орган КВМ, що несе вимірювальну головку, описує еталонну траєкторію, відповідну заданому контуру деталі. Відхилення розміру сприймаються

вимірювальною головкою і реєструються. Точність вимірювань залежить від похибки відтворення еталонної траєкторії, заданої програмою.

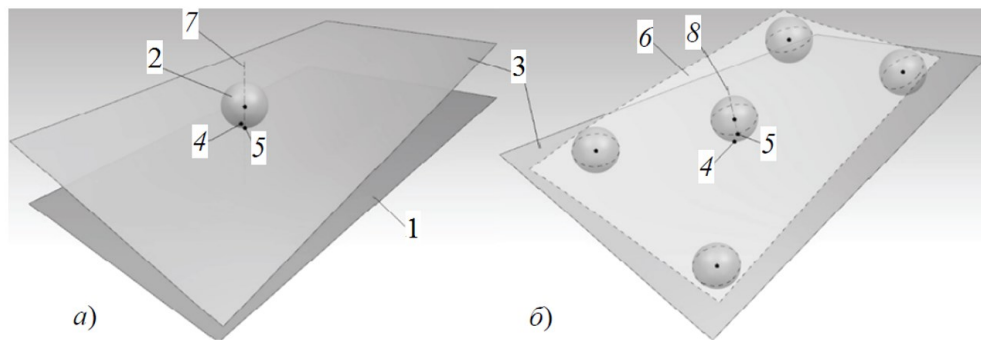
Нульовий метод і метод співставлення реалізуються з використанням системи стеження за вимірюваною поверхнею. При переміщенні вимірювальної головки або контрольованої деталі по одній з координат (ведучій), відстежується положення поверхні деталі за допомогою вимірювальної головки шляхом переміщення її або деталі по іншій координаті (веденій). Режим застосовують при контролі профілів деталей складної форми: черв'ячних фрез, кулачків, лопаток турбін, гвинтів, зубчатих коліс, штампів і ін. Метод стеження незамінний при вирішенні задачі отримання геометричної інформації про поверхні, форма яких підбирається експериментально (в авіа- та автомобілебудуванні).

Дискретне стеження за вимірюваною поверхнею передбачає управління рухом вимірювальної головки комбіноване (програмне та слідкуюче) і алгоритмічне, здійснюване методом елементарних пошукових траєкторій. При комбінованому управлінні вимірювальна головка програмно виводиться в задану точку, після чого здійснюється перемикання на режим стеження за поверхнею з управлінням приводами від сигналу вимірювальної головки. Після зупинки приводів зчитуються координати поверхні в точці вимірювання. Далі вимірювальна головка програмно переміщається в наступну контрольну точку і процес повторюється. Комбіноване управління дозволяє досягти високої точності контролю. При алгоритмічному управлінні рух здійснюється по повторюваним елементарним пошуковим траєкторіям та реалізується програмно.

Безперервний обхід вимірюваної поверхні забезпечує отримання більшого об'єму вимірювальної інформації з високою продуктивністю. Складні поверхні задаються набором плоских перетинів, тому основним режимом роботи при безперервному стеженні є режим двокоординатного стеження. Площина стеження може бути паралельною одній з площин КВМ або розташована довільно. В залежності від цього працюють приводи двох або трьох координат: по двох - від системи ЧПК, а по третій - від системи стеження.

Контактний метод вимірювання проводиться за допомогою дотику вимірювального наконечника, як правило сферичної форми, до поверхні зуба черв'ячної фрези. На проміжному етапі в програмне забезпечення КВМ зберігаються координати вимірюваних точок, утворюючи об'єм точок, за яким визначають поверхні, площини, лінії і точки деталі, необхідні для розрахунку геометричних параметрів черв'ячної фрези. При вимірюванні поверхонь, що мають складну просторову форму (черв'ячна фреза), профіль яких не описується геометричними рівняннями, точність контактних вимірювань на КВМ визначається як факторами зовнішнього середовища і конструкцією КВМ, так і особливостями вимірюваної деталі. Одними з ключових чинників, що впливають на точність вимірювання, є радіус вимірювального наконечника і кривизна поверхні самої деталі.

Чим вище кривизна вимірюваної поверхні і більше радіус вимірювального наконечника, тим більше виникає при вимірі похибка визначення фактичних координат точок деталі. Підходом, що дозволяє розрахувати величину виникає похибки, є математичне моделювання процесу вимірювання.



**Рис. 1. Похибка вимірювання поверхні 3 вимірювальним наконечником 2:**

а) - розбіжністю номінального напрямку нормалі 7 CAD-поверхні 1 і реального в точці поверхні; б) - розбіжністю вектору нормалі 8 еквідистантним поверхні 6 і вимірюваної поверхні 3 (4 - точка дотику, 5 - вимірювана точка)

Поверхні складної форми, що виготовляються завжди відрізняються від їх CAD-моделей на величину відхилень форми і розташування [1]. Через ці відхилення координати точки на вимірювальному наконечнику, що розраховуються по нормалі до CAD-моделі з координати центру наконечника, обчислюються з похибкою. На рисунку 1 а) представлена схема вимірювання криволінійної поверхні, що має відхилення форми і розташування. Найчастіше в практиці координатних вимірювань геометричних параметрів деталі відсутня еталон порівняння для вимірюваних елементів (CAD-модель) (Рис. 1, б). В цьому випадку компенсація радіуса вимірювального наконечника проводиться по нормалям до офсетного поверхні, заданої точками центрів вимірювального наконечника.

В даній роботі буде представлено дослідження похибки компенсації радіуса вимірювального наконечника при вимірюванні геометричних параметрів черв'ячної фрези (рис.2.).

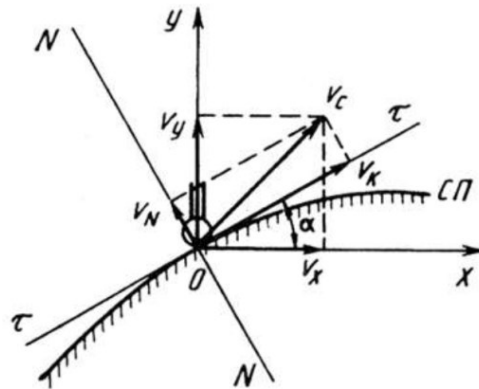


Рис. 2. Геометрія дотику сфери вимірювального наконечника до поверхні черв'ячної фрези

Для розв'язання задач вимірювання необхідно дослідити взаємовплив на точність вимірювання форми головки датчика, а також кривизни і напрямку нормалі поверхні об'єкту; розробити методику нанесення координат точок вимірювання; провести оцінку точності проведених вимірювань. Визначимо похибку точки дотику однозначної поверхні об'єкту сферичною або циліндричною головкою датчика. Якщо поверхня вигинається за достатньо гладкою функцією, тобто в границях радіуса вимірювального наконечника, то поверхню можна задати дотичною площиною. Тоді похибка визначення точки дотику може бути визначена з [2]:

$$\Delta_{\text{нак}} = R \cdot \frac{1 - \sin \alpha}{\sin \alpha} \quad (6)$$

де  $R$  – радіус наконечника,  $\alpha$  – кут між вектором швидкості та горизонтальною віссю.

Спеціальне програмне забезпечення дозволяє в реальному масштабі часу проводити обробку, відображення, реєстрацію результатів вимірювань, їх збереження в базі даних з подальшою передачею по комп'ютерній мережі. Одним з важливих видів обробки результатів вимірювань є відтворення фактичної тривимірної поверхні за вимірювальними даними. Для цього використовується метод сплайнової апроксимації, згідно якого будуються трикутники, що з'єднують суміжні найближчі точки поверхні (вершини трикутників). Потім застосовується сплайнова апроксимація сімплексним методом. Сплайн-функція при цьому визначається за формулою:

$$f(P) = \sum_{i=1}^N a_i g_i(P) + \sum_{k=1}^q b_k n_k(P),$$

де  $P$  – точка апроксимації;  $a_i$ ,  $b_k$  – постійні коефіцієнти сплайнової апроксимації;  $g_i(P)$ ,  $n_k(P)$  – квадратичні поліноми, які зв'язані з вершиною кута та з середньою точкою ребра відповідно;  $i$  – номер вершини симплексу;  $N$  – кількість вершин апроксимуючих трикутників;  $k$  – номер ребра симплексу;  $q$  – кількість ребер апроксимуючих трикутників.

Похибка контролю геометрії черв'ячної фрези визначається діапазоном і залежить від шорсткості й кутів нахилу точок поверхні. Для зменшення похибки використовуються спеціальні аналітичні апаратні алгоритмічні та програмні методи, включаючи комп'ютерне калібрування. Для цього використовуються програмні продукти компанії AUTODESK – Poverinspect. Даний продукт дозволяє негайно відображувати обчислені похибки і відхилення безпосередньо на теоретичній 3D-моделі у вигляді інтуїтивно зрозумілих текстово-колірних схем та дає можливість користувачеві виконувати вимірювання в інтерактивному режимі. Результати замірів документуються у вигляді автоматично генерованих звітів, які зрозумілі технічним фахівцям без спеціальних знань в метрології. Даний продукт дозволяє графічно представляти вимірювані похибки за допомогою колірних схем дозволяє користувачеві в реальному режимі часу приймати рішення про доцільність виконання подальших вимірів. Наявність зворотного зв'язку з користувачем відразу після вимірювання кожної окремої точки дозволяє запобігти втратам часу. Спеціальні функції CAD-системи дозволяють автоматизувати процес задання послідовності вимірювань для кожного конкретного типу конструктивного елементу 3D-моделі. Застосування теоретичної CAD-моделі дозволяє в інтерактивному режимі порівняти фактичні розміри із заданими і обчислити похибки і відхилення. Це дозволяє отримати похибку вимірювань черв'ячної фрези з точністю до 0,5 мкм.

**Висновки.** В даній роботі наведено рівняння довільної криволінійної просторової поверхні, показано, що вимірювання черв'ячних фрез на KBM можна проводити різними способами, які мають свої переваги і недоліки.

Встановлено, що підвищення швидкодії, точності вимірювань на КВМ контактним методом можливо при урахуванні похибки радіуса накінцевика, похибок відхилень форми, апроксимації отриманих даних та застосування програмного забезпечення Poverinspect. Дана CAD-система дозволяє отримати результати вимірювань та відхилень в зручних для кожного формі: цифровій, графічній (колірні схеми чи текстово-колірні схеми), табличній, та слідкувати за результатами вимірів у режимі реального часу.

### **Література**

1. Piegl L., Tiller W. *The NURBS Book*, Berlin: Springer-Verlag, 1997, 646 p.
2. Юнусов Ф.С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием.-М.: Машиностроение, 1987. – 248 с.
3. Дружинский И.А. Сложные поверхности. Математическое описание и технологическое обеспечение / И.А. Дружинский. — Л.: Машиностроение, 1985. — 263 с.
4. Savio, E. Metrology of freeform shaped parts, CIRP Annals / E.Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt // Manufacturing Technology. – 2007. – 56 (2). – Pp. 810-835.
5. Печенин, В. А. Оптимизация измерений геометрии деталей со сложными поверхностями / В. А. Печенин, М. А. Болотов, Н. В. Рузанов, М. В. Янюкина // Измерительная техника. – 2015. – №3. – С. 18-23.
6. Фокс А. Вычислительная геометрия / А. Фокс, М. Пратт. — М.: Мир, 1982. – 304 с.
7. Координатно измерительные машины и их применение / [В.-А. А. Гапшис, А. Ю. Каспарайтис, М. Б. Модестов, Н. А. Серков, В. А. Чудов]. – М.: Машиностроение, 1988 – 328с.
8. Пекарш А.И., Феоктистов С.И., Колыхалов Д.Г., Шпорт В.И. Координатно-измерительные машины и комплексы. Наука и технологии в промышленности. 2011. № 3. с. 36 – 48.
9. Rajamohan, G. Practical Measurement Strategies for Verification of Freeform Surfaces Using Coordinate Measuring Machines / G. Rajamohan, M. S. Shunmugam, G. L. Samuel // Metrology and Measurement Systems. – 2011. – No. 2. – P. 209 – 222.

### **References**

1. Piegl L., Tiller W. *The NURBS Book*, Berlin: Springer-Verlag, 1997, 646 p.
2. Yunusov F.S. Formoobrazovanie slozhnoprofilnykh poverhnostey shlifovaniem.-M.: Mashinostroenie, 1987. – 248 s.
3. Druzhinskij I.A. Slozhnye poverhnosti. Matematicheskoe opisanie i tehnologicheskoe obespechenie / I.A. Druzhinskij. — L.: Mashinostroenie, 1985. — 263 s.
4. Savio, E. Metrology of freeform shaped parts, CIRP Annals / E.Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt // Manufacturing Technology. – 2007. – 56 (2). – Pp. 810-835.
5. Pechenin, V. A. Optimizaciya izmerenij geometrii detalej so slozhnymi poverhnostyami / V. A. Pechenin, M. A. Bolotov, N. V. Ruzanov, M. V. Yanyukina // Izmeritelnaya tehnika. – 2015. – №3. – S. 18-23.
6. Foks A. Vychislitelnaya geometriya / A. Foks, M. Pratt. — M.: Mir, 1982. – 304 s.
7. Koordinatno izmeritelnye mashiny i ih primenenie / [V.-A. A. Gapshis, A. Yu. Kasparajtis, M. B. Modestov, N. A. Serkov, V. A. Chudov]. – M.: Mashinostroenie, 1988 – 328s.
8. Pekarsh A.I., Feoktistov S.I., Kolyhalov D.G., Shport V.I. Koordinatno-izmeritelnye mashiny i komplekсы. Nauka i tehnologii v promyshlennosti. 2011. № 3. s. 36 – 48.
9. Rajamohan, G. Practical Measurement Strategies for Verification of Freeform Surfaces Using Coordinate Measuring Machines / G. Rajamohan, M. S. Shunmugam, G. L. Samuel // Metrology and Measurement Systems. – 2011. – No. 2. – P. 209 – 222.

Рецензія/Peer review : 02.12.2019

Надрукована/Printed : 08.01.2020