

УДК 629.45.46.027.31

В.П. Квасніков, д.т.н.
Л.М. Покидько

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ПРЕЦИЗІЙНИХ ДЕТАЛЕЙ

Національний авіаційний університет, м. Київ, kvp@nau.edu.ua

У статті проаналізовано методи визначення геометричних параметрів об'єктів малих областях вимірювання. Обґрунтовано використання методу номінальних значень, оскільки він забезпечує контроль з високою точністю малих сегментів дуг кіл, еліпсів, циліндрів і т.п. Отримання високої точності досягається за рахунок покращення обумовленості задачі мінімізації шляхом включення в мінімізуючу функцію квадратів відхилень параметрів об'єктів від їх номінальних значень. Точність методу підтверджена результатами експериментальних досліджень. Реалізація методу здійснена вимірювальною програмою ГеоАРМ, що працює з координатно-вимірювальними машинами.

Ключові слова: контрольно-вимірювальна техніка, методи визначення геометричних параметрів, метод найменших квадратів, метод номінальних значень, похибки координатних вимірювань.

Вступ

Однією з важливих ознак сучасного розвитку української держави є спрямованість економіки на підвищення конкурентоспроможності підприємств, модернізацію виробництва, впровадження нових технологій та устаткування. Провідна роль у цих процесах належить галузі приладобудування, машинобудування, які виробляють засоби вимірювань, аналізу, обробки і надання інформації, обладнання регулювання, автоматичні й автоматизовані системи управління. За рівнем наукоємності дана галузь повинна залишатись провідною галуззю вітчизняного виробництва. Наукові ідеї, які народжувались у ній, забезпечували надійність роботи пристроїв у космонавтиці, радіоелектроніці, ракетобудуванні та літакобудуванні, в цілому відображали стан науково-технічного розвитку України. Виробництво сьогодні у сфері приладобудування, в загальному експорті виробництва сьогодні не перевищує 5%.

Важливу роль в забезпеченні якості та конкурентоздатності продукції практично всіх галузей промисловості відіграє контрольно-вимірювальна техніка, в якій особливе місце займають засоби вимірювання та контролю геометричних параметрів деталей, вузлів машин і механізмів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Підвищення точності вимірювань є однією з найважливіших проблем сучасної метрології. Один із шляхів рішення цієї проблеми – удосконалення методів обробки і оцінювання точності результатів вимірювань. Науковою основою оцінювання точності результатів вимірювань є теорії похибок і невизначеності, що мають один математичний апарат – теорію імовірності і математичної статистики, але дещо відрізняються як термінологією, так і підходами до рішення окремих статистичних задач.

Найбільший внесок у розвиток класичного підходу внесли російські та українські вчені: Є.Т. Володарський, Є.Ф. Долинський, М.А. Земельман, О.С. Клейман, Ж.Ф. Кудряшова, В.А. Кузнецов, М.Ф. Маліков, П.В. Новицький, П.П. Орнатський, В.І. Проненко, С.Г. Рабінович, В.Я. Розенберг, Л.З. Румшиський, Ю.М. Туз, В.М. Чинков, Л.М. Щербак та ін., завдяки плідній діяльності яких були розроблені наукові основи оцінювання похибок і впроваджені у практику нормативно-технічні документи, багато з яких використовуються у вітчизняній метрологічній практиці дотепер. Аналіз робіт вітчизняних та закордонних вчених свідчить про необхідність комплексного вирішення питань підвищення ефективності інформаційних технологій в сфері вимірювальної техніки та математичної обробки інформації.

Постановка завдання

При вимірюванні геометричних розмірів деталей за допомогою лазерних вимірювальних систем часто виникають такі ситуації, коли об'єкти вимірювання включають невеликі сегменти. Звичні методи визначення геометричних параметрів таких об'єктів на малих сегментах призводить до значних похибок. Тому питання підвищення точності цих методів для таких випадків є актуальним.

Вирішення поставленого завдання

Зазвичай, для визначення геометричних розмірів деталі за результатами вимірювань використовується метод найменших квадратів. При цьому розв'язується задача визначення значень параметрів об'єкту так, щоб сума квадратів відхилень вимірюваних точок від математичної моделі була мінімальною:

$$F(a) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $a = a_0, a_1, \dots, a_m$ - параметри математичної моделі;

$\delta_i = |P_i' - P_i|, (i = 1, 2, \dots, n)$ - відхилення вимірюваних точок;

$P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ - точка, виміряна на об'єкті;

$P_i' = (X_i', Y_i', Z_i')$ - точка математичної моделі, що відповідає вимірюваній на об'єкті.

Задача визначення параметрів математичної моделі, що апроксимує фізичний об'єкт результатами його вимірювань, розв'язується або шляхом мінімізації функції (1), або, для деяких об'єктів, через систему лінійних рівнянь, які отримують з (1). В обох випадках розв'язку явно чи неявно задіяні матриці, що обчислюються координатами вимірювань. Якщо область вимірювання доволі невелика, то погіршується обумовленість матриці. В [1] така методологічна ситуація названа «погано обумовленою вимірювальною задачею». Для такого випадку точка мінімуму функції (1) стає не чітко вираженою. Програма мінімізації перестає відчувати зменшення функції і фіксує мінімум у випадковій точці. Це спричиняє значну похибку при визначенні геометричних параметрів деталі та порівнянні їх з математичною моделлю.

Для випадку визначення параметрів через систему лінійних рівнянь виникає аналогічна ситуація. Під час розв'язку системи з погано обумовленою матрицею невеликі похибки вхідних даних призводить до суттєвих похибок результату.

З метою поліпшення обумовленості задачі функцію (1) модифікують за рахунок включення в неї квадратів відхилень параметрів математичної моделі від їх номінальних значень [2]:

$$\Phi(a) = F(a) + \sum_{j=1}^m w_j (a_j - a_{j_{nom}})^2, \quad (2)$$

де $w_j \geq 0, j = 0, 1, \dots, m$.

Найчастіше для вимірювань використовують два різних метода геометричного контролю деталей. Один з них ґрунтується на апроксимації точок вимірювання стандартними геометричними об'єктами: колами, циліндрами і т.п. Другий спосіб ґрунтується на порівнянні вимірювальної деталі та математичної моделі, тобто, на визначенні відхилень реальної деталі від ідеальної її геометрії.

Розглянемо комбінацію цих способів. Функція $F(a)$ в (2) забезпечує апроксимацію точок вимірювання, а сума квадратів відхилень параметрів від номінального значення підтримує зв'язок з ідеальною моделлю. Очевидно, що при $w_j = 0, j = 0, 1, \dots, m$, функція (2) призводить до апроксимації точок вимірювання стандартними геометричними об'єктами, тобто призводить до розв'язку задачі (1); якщо $w_j \rightarrow \infty, j = 0, 1, \dots, m$, то вплив функції $F(a)$ стає незначним, що призводить до побудови об'єкта з номінальними значеннями параметрів, відносно якого будуть визначені відхилення вимірюваних точок.

З математичної точки зору додавання до функції мінімізації додаткових доданків покращує обумовленість матриці задачі. Збільшення діагональних елементів матриці призводить до зменшення числа обумовленостей і до підвищення точності визначення параметрів. У зв'язку з використанням номінальних значень розглянутий метод дістав назву методу номінальних значень.

Як показують експериментальні дослідження [3] цей метод доцільно використовувати для вимірювання дуг на малих кутових секторах. При вимірюванні дуги кола потрібно визначити її

радіус R та координати центра a , b . В програмі ГеоАРМ, що працює з координатно-вимірними машинами [2], апроксимація вимірних точок здійснюється шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь.

Точність розв'язку залежить від обумовленості матриці системи рівнянь. Аналізуючи результати експериментальних досліджень, маємо, що при зменшенні кутового сектора дуги кола відбувається суттєве зростання чисел обумовленості матриць. Похибка розв'язку системи лінійних рівнянь напряму пов'язана зі значенням числа обумовленості. Коли ці значення досягають порядку 10^6 , похибка починає перевищувати похибку у вихідних даних.

Реалізація методу номінальних значень на малих секторах дозволить відмовитись від нестандартних прийомів і отримувати достовірні результати. Цей метод суттєво підвищує точність визначення параметрів дуги кола, не погіршує апроксимацію вимірних точок. Слід звернути увагу на те, що при вимірюванні дуги кола малого сектора похибка радіуса і положення центра компенсують одна одну, тобто відхилення радіуса компенсується зміщенням центру дуги.

В метрологічних службах для вимірювання дуг на малих секторах використовують різні нестандартні прийоми, методологічно близькі до методу номінальних значень. Наприклад, засобами вимірної програми створюється точка, що є номінальним центром дуги, потім вимірюються точки на дузі і контролюються відстані від вимірних точок до номінального центра.

Висновки

Аналіз розглянутих методів вимірювання геометричних параметрів об'єктів показує обмеженість їх застосування. Реалізація методу номінальних значень на малих секторах дозволить відмовитись від нестандартних прийомів і отримувати результати на вимірних машинах так само, як і для об'єктів на великих областях вимірювання. Цей метод показав стабільність результатів для різних вимірювань.

Отримана похибка для радіуса становить до 1 мкм, значення відхилення форми підтверджують знаходження розмірів у полях допусків.

Отримання високої точності досягається за рахунок поліпшення обумовленості задачі мінімізації шляхом включення в мінімізуючу функцію квадратів відхилення параметрів об'єктів від їх номінальних значень. Метод реалізований у вимірній програмі ГеоАРМ, що працює з координатно-вимірними машинами.

Проведені дослідження підтвердили можливість застосування методу номінальних значень при вимірюванні дуги кола на малих кутових секторах за допомогою лазерної вимірної системи. Метод номінальних значень доцільно використовувати для вимірювання об'єктів інших типів: еліпсів, циліндрів, конусів, сфер, торів. Похибка таких вимірювань не виходить за поле допуску і є малою в порівнянні з похибкою виготовлення (не більше 20 % при середній і низькій точності, та не більше 35 % для відповідних поверхонь деталей підвищеної точності).

Список літературних джерел

1. Кудрявцев М.Д. Оценивание погрешностей координатных измерений геометрических параметров в условиях плохо обусловленной измерительной задачи / М.Д. Кудрявцев, Н.Л. Яворская // VII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением», март, 2006 г., С.-Петербург, Россия, с. 138 -140.
2. Программы измерений и контроля деталей автомобильной техники / Суслин В.П., Макаров А.И., Джунковский А.В., Шутер М.Г. // Автомобильная промышленность – 2005, № 5, с. 39-40.
3. Суслин В.П. Новый метод определения геометрических параметров объектов при измерениях на малых областях / В.П. Суслин, А.В.Джунковский, М.Г. Шутер // Законодательная и прикладная метрология – 2008, № 6, с. 39-42.