

ГІПОТЕЗИ. НЕСТАНДАРТНІ МЕТОДИ РІШЕННЯ НАУКОВИХ ТА ІНЖЕНЕРНИХ ПРОБЛЕМ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

УДК 621.9.08 : 51-74

ВПЛИВ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ФАНТОМА ОБ'ЄКТА НА ЯКІСТЬ ВИГОТОВЛЕННЯ

Скицюк В. І., Клочко Т. Р.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: t.klochko@kpi.ua

У статті визначено актуальність моделювання з наступним аналізом особливостей перетворень технологічного фантома реального об'єкта, зокрема прецизійної приладобудівної продукції, що впливає на підтримку точності формотворення цього об'єкта в умовах автоматизованого виробництва.

Основною метою цього дослідження було обґрунтування аналітичних моделей перетворень технологічного фантома об'єкта з врахуванням типу координатних систем, за якими можна спостерігати перетворення одних координат у інші, які мають визначені особливості в зонах існування матеріального об'єкту. Особливості перетворень суттєво впливають на точність формотворення цього об'єкту.

Запропоновано основні аналітичні моделі, які визначають особливості формотворення технологічного фантому та необхідність поєднання технологічного фантома з масою об'єкту, що надає можливості врахування проблем виготовлення елементів поверхні об'єкту, визначення особливостей формотворення точності відтворення об'єктів, наприклад, деталей приладів.

З отриманих в роботі аналітичних моделей ми маємо можливість стверджувати, що для будь-якого об'єкта технологічний фантом має геометричну побудову, і форма цієї побудови є головним чинником впливу на точність формотворення об'єкту. Дослідження обґрунтовує аналітичну модель перетворень технологічного фантома об'єкта, що визначає залежності геометричних характеристик формотворення прецизійного об'єкта, який виготовлюють за допомогою визначених адитивних чи руйнівних (зі зменшенням маси об'єкта) технологічних процесів.

У подальших дослідженнях модель формотворення технологічних об'єктів у просторі потребує моделювання саме особливостей представлення маси з огляду на енергетичні зв'язки технологічного фантома об'єкта в певному об'ємі, який має задачі визначення та підвищення точності виготовлення.

Ключові слова: технологічний фантом; точність формотворення; об'єкт; перетворення; мікропанданна зона; лінії поверхні.

Вступ. Постановка проблеми

Сучасне виробництво деталей приладів вимагає підтримку точності процесу виготовлення, зокрема в умовах автоматизованого виробництва, що передбачає застосування відповідного автоматизованого обладнання [1, 2]. Вимірювання та діагностика продуктивності точного обробного виробничого обладнання є важливим чинником для встановлення відомого та повторюваного рівня можливостей процесу. Так, автоматизовані вимірвальні системи [3, 4] призначені для того, щоб оцінювати, контролювати статичні та динамічні характеристики верстатів, координатно-вимірвальних машин та інших технологічних систем рухів, які мають критичне значення при виготовленні прецизійної приладобудівної продукції.

Таким чином, актуальною проблемою є застосування аналітичних моделей технологічних

процесів, які визначають роботу обладнання при формотворенні реального матеріального об'єкта – прецизійної деталі [5]. Звісно тут виникають проблеми, пов'язані з забезпеченням точності формотворення цієї деталі. Як було показано авторськими дослідженнями [6, 7], було визначено зони існування матеріального абстрактного об'єкта, створення якого залежить від властивостей його технологічного фантома. Водночас, для будь-якого технологічного процесу обробки деталі існують аналітичні особливості, що можуть відобразити реальні рухи координатної системи обладнання, які відповідають за відтворення заданого формотворення об'єкта. Таким чином, забезпечення вимог до прецизійних процесів виготовлення реального об'єкта пов'язано зі створенням аналітичного апарату, який враховує не тільки наявність технологічного фантома, що є моделлю об'єкта, але й можливість

перетворень за різними властивостями фантома, зокрема до силових навантажень та взаємодій, просторово-часових характеристик тощо.

Отже, врахування особливостей такого підходу до визначення формотворення об'єкта з огляду на фантомні перетворення надає можливість визначити відповідність створеного реального об'єкта вимогам щодо точності його формотворення.

Постановка задачі

Основною метою саме цього дослідження було обґрунтування аналітичних моделей перетворень технологічного фантома об'єкта, які мають визначені особливості в зонах існування матеріального об'єкта. Ці особливості перетворень суттєво впливають на точність формотворення цього об'єкта.

Об'єднання технологічного фантома та маси об'єкту

Проаналізуємо, яким чином технологічна маса утримує в собі технологічний фантом. Для цього розглянемо не суто теоретичну модель, а реальний процес утворення абстрактного об'єкта за його технологічним фантомом, а також роль маси в цьому процесі. Наразі, для побудови реальної моделі розглянемо технологічний процес виготовлення та умови існування звичайної лінії АВ (рис. 1) поверхні об'єкта. Отже, цей простий виріб можна виготовити за наступними технологічними процесами, які є застосованими у реальному виробництві.

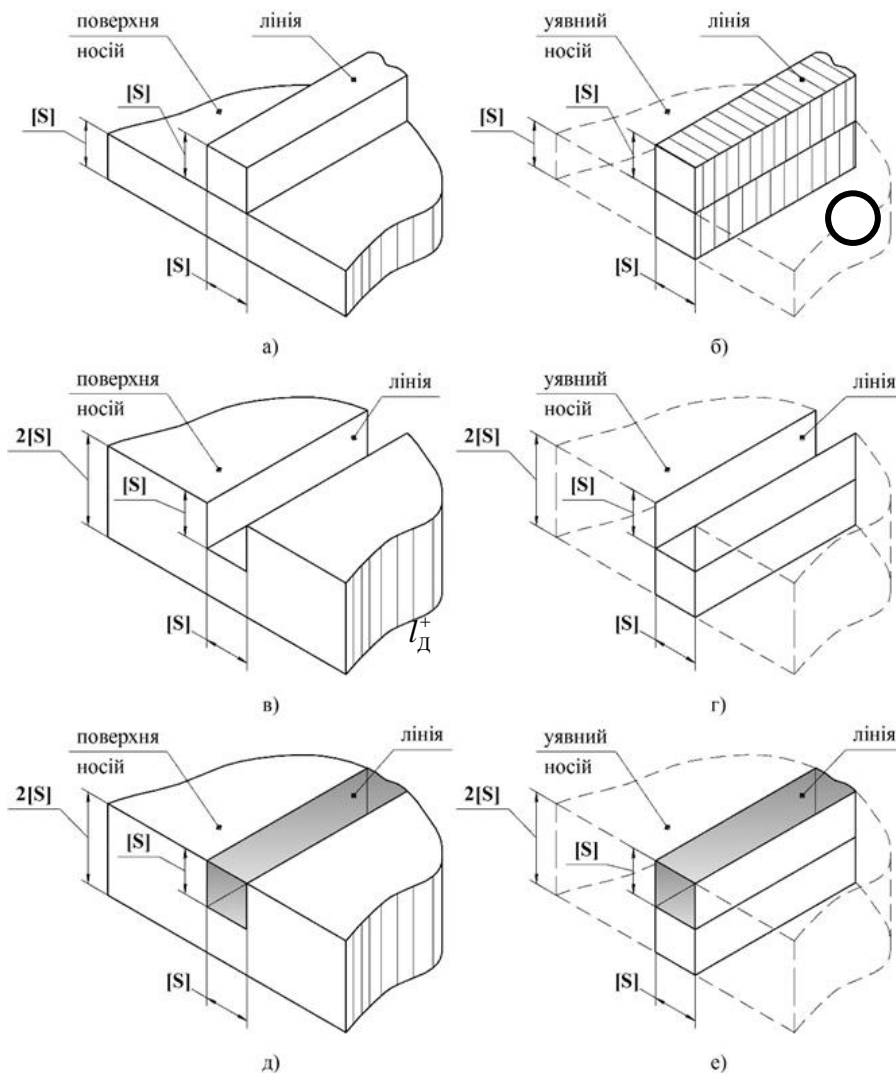


Рис. 1. Технологія виготовлення звичайної лінії, де: а) позитивна технологія; б) межовий випадок позитивної технології; в) негативна технологія; г) межовий випадок негативної технології; д) комбінований або позитивно-негативна технологія; е) межовий випадок позитивно-негативної технології



Рис. 2. Структура побудови лінії, де: а) загальна структура лінії; б) переріз через лінію

По-перше, це є звичайна позитивна технологія, коли лінія на поверхні утворюється внаслідок руху інструмента, наприклад, різального інструмента при механічній обробці деталі на верстаті, з одночасною подачею технологічної маси. Фантом лінії у цьому випадку повинен бути визначеної довжини та перерізом $[S] \times [S]$ (рис. 1, а). Носій лінії обов'язково не тонше за $[S]$. У супротивному випадку він просто не зможе виконувати свої функції. Для виконання лінії поверхні необхідно відтворювати траєкторію руху верхівки різального інструмента, яка є носієм фантомного напрямку. У цій технології існує поняття межового носія, коли розміри поверхні зменшуються до розмірів квадрату з довжиною лінії, на якій вона знаходиться (рис. 1, б). Водночас, реальний носій є дзеркальною копією реальної лінії.

За другим способом утворення лінії, це є негативна технологія, за якої лінія виготовляється у вигляді канавки прямокутного перерізу $[S] \times [S]$ (рис. 1, в). На відміну від позитивної технології товщина носія повинна бути $2[S]$, а не $[S]$, для того, щоб під лінією зберегти частину носія. При цьому лінію складають площини, які утворені інструментом при руйнуванні носія. Об'єм лінії заповнюється середовищем. За межового випадку ми отримуємо лінію, яка утворена уявними площинами, розташованими на залишку носія з перерізом $[S] \times [S]$ (рис. 1, г). Тобто, нібито і носій є, і лінія є, проте у цьому випадку вона існує суто теоретично (фантом лінії).

За третім способом виготовлення лінію утворюють у два етапи. Спочатку за негативною технологією утворюють канавку з перерізом $[S] \times [S]$ (рис. 1, д). Утворену таким чином канавку заливають іншою речовиною. Внаслідок цього утворюється лінійний об'єкт, який за своїми властивостями відрізняється від матеріалу носія. У межовому випадку ми отримуємо аналог межового випадку за позитивної технології. Достатньо порівняти ці випадки на рис. 1, б та рис. 1, е.

Цей приклад показує, який вплив має технологічний фантом на виготовлення звичайної лінії. Окрім того, це був спрощений аналіз з певною ідеалізацією технологічного процесу. У певному сенсі є можливість розглянути структуру побудови лінії без врахування товщини поверхні носія (рис. 2).

В основу такої структури покладено фантом лінії квадратного перерізу. Інструмент, який виконує цю форму на поверхні носія, намагається дотриматись цього фантому. Проте, точність замкнення технологічного кола є невеликою, і ми отримуємо реальну поверхню, відмінну від форми фантому лінії. Коливання цих відмінностей створює динамічну частину мікропанданної зони лінії [6, 7]. Ця зона визначається внутрішніми та зовнішніми прилеглими поверхнями. Отже, у підсумку маємо можливість сформулювати поняття про одну з властивостей технологічного фантому (ТФ), а саме існування баз даних фантомів як у первинному, так і вторинному вигляді, тобто ТФ I та ТФ II [8].

Одним з таких фантомів є інструмент та його реальна інтерпретація. Наразі, база фантомів інструментів стосовно виготовлення лінії досить велика, від досить простих до складних універсальних систем, пристроїв тощо. Велика кількість таких пристроїв має опис у спеціалізованих виданнях довідників. Інструмент, як і будь-який інший об'єкт, може бути уявленим як сума дійсної та уявної частин комплексної функції.

Таким чином, фантом технологічного інструменту Φ_I може бути уявлений як сума дійсної Φ_{DI} та уявної частин $i \cdot \Phi_{UI}$, тобто

$$\Phi_I = \Phi_{DI} + i\Phi_{UI} \quad (1)$$

Реальна частина інструменту I_R являє собою суму дійсної I_D та уявної I_U частин комплексної функції, тобто

$$I_R = I_D + iI_U \quad (2)$$

Наразі вираз (2) являє собою підсумкову формулу, до складу якої включено і вираз (1). Сам по собі інструмент не може виконати лінію у фантомному вигляді, а тому для виконання лінії необхідно застосовувати силову функцію руху. Інструмент, водночас, буде виконувати рух, який призводить до отримання реальної поверхні лінії (рис. 2).

Реальна поверхня може лише нескінченно наближатися до технологічного фантому, але ніколи не буде з ним однаковою. У цьому випадку ми маємо можливість спостерігати ще одну властивість, характерну для технологічного фантому, сутність якої полягає у просторово-часовому зсуві фантомів.

Отже, ми маємо перехід від вторинного фантому (ТФ II) до третинного (ТФ III). Тут необхідно відмітити, що ТФ II є породженням фантому ТФ I. Мало того, між реалізаціями фантомів існують інтервали часу між виникненням та реалізацією.

Модель формотворення технологічного фантому

Наразі існує кілька координатних систем, за якими можна спостерігати перетворення одних координат у інші. Серед них ми маємо можливість визначити варіанти 4D (конформні) та 6D (афінні), які мають свої властивості перетворень. Існує ще один варіант 5D, проміжний між 4D та 6D, який часом називають ортогональним. Наразі не можна забувати, що ми маємо перехід від уявної до

реальної системи координат. Отже, характерною рисою конформних координат є здійснення повороту системи координат на кут α , зсув по осях координат на величини λ_x, λ_y , та масштабування на величину η . При афінних перетвореннях, за яких виконується зсув по осях на величини λ_x, λ_y , та зміни масштабування на η_x, η_y . Водночас, поворот координатних осей системи на кути α_1 та $\alpha_2 = \alpha_1 + \Theta$, тобто з порушенням ортогональності уявної системи, рис. 3.

Ортогональна система (5D) на відміну від попередніх відрізняється тим, що виконується рівномірний розворот на кут α та зсув по осях на величини λ_x, λ_y , а зміни масштабу на величини η_x, η_y .

Аналізуючи всі можливі випадки перетворень, маємо можливість стверджувати, що системи 4D та 5D є не часто застосовуваними. Особливо це характерно за умови пристайності уявної та реальної координат за визначеними параметрами. У такому випадку нам залишається лише випадок узагальнення або локальної пристайності, як це відбувається для конформних або ортогональних координат. Проекція (перетворення) об'єкту з уявної системи координат на реальну у загальному випадку може бути описана через афінні перетворення.

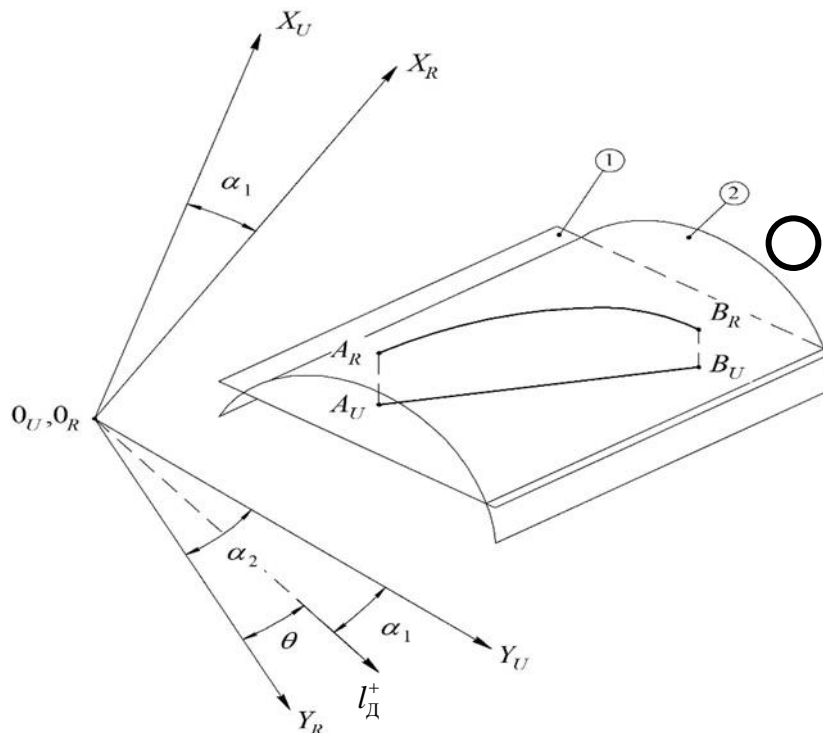


Рис. 3. Порушення ортогональності за умови афінних перетворень.

Для дослідження цього виду перетворення скористаємося виразом переходу від уявних до реальних координат у вигляді

$$\begin{aligned}x_R &= Ax_u + By_u + C, \\y_R &= Dx_u + Ey_u + F\end{aligned}\quad (3)$$

де, x_R, y_R – координати реальної системи, x_u, y_u – координати уявної системи, A, B, C, D, E, F – коефіцієнти лінійного перетворення.

Невідомі коефіцієнти перетворення можна знайти через систему з трьох точок. Надалі переведемо рівняння (3) у вигляді матриць для n точок, тобто

$$\begin{bmatrix}x_1, x_2, x_3 \dots x_n \\y_1, y_2, y_3 \dots y_n\end{bmatrix}_R = \begin{bmatrix}A & B & C \\D & E & F\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix}x_1, x_2, x_3 \dots x_n \\y_1, y_2, y_3 \dots y_n \\I, I, I \dots I\end{bmatrix}_U \quad (4)$$

або

$$\mathbf{M}_R = k \times \mathbf{M}_U,$$

де \mathbf{M}_U – матриця уявних координат доповнена одиничним вектором-рядком.

Система (4) вирішується на засадах методу найменших квадратів та множення лівої та правої частини на матрицю трансформація.

З [9, 10, 11] маємо модель афінних перетворень у наступному вигляді

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}x_R \\y_R\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\eta_x & 0 \\ 0 & \eta_y\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}1 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\theta\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}x_u \\y_u\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\lambda_x \\ \lambda_y\end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix}\eta_x \cos\alpha & -\eta_x \sin(\alpha + \theta) \\ \eta_x \sin\alpha & -\eta_x \cos(\alpha + \theta)\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}x_u \\y_u\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\lambda_x \\ \lambda_y\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}A & B \\ D & E\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}x_u \\y_u\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}C \\ F\end{bmatrix}\end{aligned}\quad (5)$$

$$\mathbf{M}_R = \Omega \cdot \mathbf{H} \cdot \Psi \mathbf{M}_U + \Lambda = \mathbf{M}_T \cdot \mathbf{M}_U + \Lambda \quad (6)$$

де

$$\Omega = \begin{bmatrix}\cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha\end{bmatrix} \quad - \text{ матриця обертання}$$

навколо центру координат,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix}\eta_x & 0 \\ 0 & \eta_y\end{bmatrix} \quad - \text{ матриця координатних масштабів,}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix}C \\ F\end{bmatrix} \quad - \text{ вектор зсуву,}$$

$$\Psi = \begin{bmatrix}1 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\theta\end{bmatrix} \quad - \text{ матриця порушення}$$

ортогональності.

Водночас, присутність матриці Ψ порушує ортогональність перетворення внаслідок додаткового повороту відносно горизонтальної осі.

Отже, оскільки нам відомо вирішення у вигляді матриці трансформації \mathbf{M}_T , ми маємо можливість визначитися з коефіцієнтами у рівнянні (5). До таких коефіцієнтів відносяться, по-перше, η_1, η_1 – як величини лінійної

деформації, α_1, α_2 – кути розвороту координатної системи та кут θ неортогональності.

Всі ці величини можуть бути визначені наступним чином

$$\begin{aligned}\eta_1 &= \sqrt{\lambda_{11}^2 + \lambda_{21}^2} = \sqrt{A^2 + D^2} \\ \eta_2 &= \sqrt{\lambda_{12}^2 + \lambda_{22}^2} = \sqrt{B^2 + E^2}\end{aligned}\quad (7)$$

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{\lambda_{21}}{\lambda_{11}}\right) = \arctg\left(\frac{D}{A}\right)$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 + \theta = \arctg\left(\frac{-\lambda_{12}}{\lambda_{22}}\right) = \arctg\left(\frac{-B}{E}\right)$$

$$\theta = \lambda_2 - \lambda_1$$

Вище наведена модель переходу від уявного до реального є досить спрощеною. Проте, вона надає варіант опису перетворення технологічного фантому другого роду ТФ II у третій ТФ III та третього у четвертий ТФ IV. У цьому вигляді це є основна модель перетворень.

Розглянемо низку зауважень стосовно цієї моделі.

По-перше, технологічний фантом третього роду (ТФ III) за своїми параметрами збігається з об'єктом. Єдина помітна різниця спостерігається між масами, тобто суто координатні перетворення у (3) можна розглядати, як

$$k = \begin{bmatrix}1 + [\mathbf{S}] & 1 + [\mathbf{S}] & 1 + [\mathbf{S}] \\ 1 + [\mathbf{S}] & 1 + [\mathbf{S}] & 1 + [\mathbf{S}]\end{bmatrix} \approx 1 \quad (8)$$

Фактично ця матриця (8) дає опис параметрів руху та геометрії інструменту під час виконання лінії у реальних координатах.

Водночас, в ідеальному випадку величина $[\mathbf{S}]$ діє аналогічно величині $\delta \mathbf{I}_1$, тобто це є відмінність просторів технологічного фантому та реального простору.

Окрім того, у процесі реалізації у реальному просторі виникає явище дуальності (\mathbf{D}) і тому вирази (5), (6) та (7) є основою для отримання виразу

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}x_R + \mathbf{D} \\y_R + \mathbf{D}\end{bmatrix} &= \begin{bmatrix}(\eta_x + [\mathbf{S}])\cos(\alpha + [\mathbf{S}]) - \\ (\eta_y + [\mathbf{S}])\cos(\alpha + [\mathbf{S}]) - \\ -(\eta_x + [\mathbf{S}])\cos(\alpha + [\mathbf{S}]) \\ -(\eta_y + [\mathbf{S}])\cos(\alpha + [\mathbf{S}])\end{bmatrix} \begin{bmatrix}x_u + [\mathbf{S}] \\y_u + [\mathbf{S}]\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\lambda_x + [\mathbf{S}] \\ \lambda_y + [\mathbf{S}]\end{bmatrix}\end{aligned}\quad (9)$$

або

$$\mathbf{M}_{rd} = \Omega_D \mathbf{H}_D \Psi_D \mathbf{M}_{U[S]} + \Lambda_D = \mathbf{M}_{TD} \mathbf{M}_{U[S]} + \Lambda_D \quad (10)$$

де

$$\Omega_D = \begin{bmatrix}\cos(\alpha + [\mathbf{S}]) & -\sin(\alpha + [\mathbf{S}]) \\ \sin(\alpha + [\mathbf{S}]) & \cos(\alpha + [\mathbf{S}])\end{bmatrix} \quad - \text{ матриця}$$

обертання навколо центру координат з врахуванням реальної похибки,

$$\mathbf{H}_D = \begin{bmatrix} \eta_x + [\mathbf{S}] & [\mathbf{S}] \\ [\mathbf{S}] & \eta_y + [\mathbf{S}] \end{bmatrix} - \text{матриця координатних}$$

масштабів з врахуванням неточності руху об'єкту,

$$\Lambda_D = \begin{bmatrix} C & [\mathbf{S}] \\ F & [\mathbf{S}] \end{bmatrix} - \text{вектор зсуву існує завжди,}$$

навіть, коли $C=F=0$,

$$\Psi_D = \begin{bmatrix} I & -\sin[\mathbf{S}] \\ [\mathbf{S}] & \cos[\mathbf{S}] \end{bmatrix} - \text{матриця порушення}$$

ортогональності, яка реалізується у випадку, коли $\Theta > [\mathbf{S}]$ або $\delta l_i > [\mathbf{S}]$.

З цих виразів добре видно, що ступінь масштабних та кутових спотворень цілком залежна від співвідношення коефіцієнтів A , B , C та D . Одночасно з (7) маємо залежність кутів обертання від тих же самих коефіцієнтів. Тобто, всі спотворення виникають через зміщення систем координат одна від одної, а коефіцієнти лише показують ступінь цих спотворень, які є наслідком властивостей реального простору.

Наступні параметри за виразом (7) ніколи не можуть мати похибку, розміром меншу за $[\mathbf{S}]$. Наразі, функції масштабу η та кута α можуть бути уявлені через кривизну реального простору, тобто як $\eta = \eta(r)$ та $\alpha = \alpha(r)$. Кривизна простору у нашому випадку є залежною від векторів зсуву λ_x та λ_y , загальна дія яких має опис через матрицю Λ , а радіус-вектор від початку координат.

У такому випадку ми отримуємо функціональні залежності у вигляді градієнтів зміни масштабів та кутів:

$$\text{grad}\eta(r) = \frac{\partial\eta(r)}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial\eta(r)}{\partial y} \mathbf{j}$$

та

$$\text{grad}\alpha(r) = \frac{\partial\alpha(r)}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial\alpha(r)}{\partial y} \mathbf{j}.$$

У векторному вигляді ми отримуємо наступний результат:

$$\frac{\partial\eta(\mathbf{r})}{\partial\lambda} = \lambda \text{grad}\eta(\mathbf{r})$$

та

$$\frac{\partial\alpha(\mathbf{r})}{\partial\lambda} = \lambda \text{grad}\alpha(\mathbf{r})$$

Якщо на нашій визначеній площині побудована сітка рівнів з інтервалом $[\mathbf{S}]$, то існує можливість графічно визначитися з модулем та напрямком градієнта. У цьому разі напрямком градієнта визначиться за нормаллю до лінії рівня у точці виміру. Величина $[\mathbf{S}]$ відома, а довжину лінії між точками λ ми маємо можливість виміряти.

Похідна градієнту за напрямком дорівнює його модулю. Тому отримуємо

$$|\text{grad}\eta(\mathbf{r})| = \frac{[\mathbf{S}]_\eta}{\lambda}$$

та

$$|\text{grad}\alpha(\mathbf{r})| = \frac{[\mathbf{S}]_\alpha}{\lambda}$$

Отже, з отриманих аналітичних моделей ми маємо можливість стверджувати, що для будь-якого об'єкта технологічний фантом має геометричну побудову, і форма цієї побудови є головним чинником впливу на точність формотворення об'єкту. Саме ця форма при виготовленні наповнена речовиною, яка має певну масу. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що суто з теоретичного погляду маса має дійсну частину та уявну.

Висновки

Дослідження обґрунтовує аналітичну модель перетворень технологічного фантома об'єкта, що визначає залежності геометричних характеристик формотворення прецизійного об'єкта, який виготовлюють за допомогою визначених адитивних чи руйнівних (зі зменшенням маси об'єкта) технологічних процесів.

Запропоновано основну аналітичну модель поєднання технологічного фантома та маси об'єкта, що надає можливості визначення особливостей формотворення точності відтворення об'єктів, наприклад, деталей приладів.

У подальших дослідженнях модель формотворення технологічних об'єктів у просторі потребує моделювання саме особливостей представлення маси з огляду на енергетичні зв'язки технологічного фантома об'єкта в певному об'ємі, який має задачі визначення та підвищення точності виготовлення.

Література

- [1] Tobias F. C. Berninger, Tomas Slimak, Tobias Weber, and Daniel J. Rixen, "An External Stabilization Unit for High-Precision Applications of Robot Manipulators" in 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 25-29, 2020, Las Vegas, NV, USA (Virtual). [Електронний ресурс]. Доступно: <http://ras.papercept.net/images/temp/IROS/files/0229.pdf>.
- [2] Guixiu Qiao and Brian A. Weiss, "Advancing Measurement Science to Assess Monitoring, Diagnostics, and Prognostics for Manufacturing Robotics", Int. J. Progn. Health Manag. Author manuscript; available in PMC 2017 Jan 3.
- [3] Renishaw apply innovation. Smart manufacturing technologies for process control. [Online]. Available: <https://www.renishaw.com/en/smart-manufacturing-technologies-for-process-control-45468>

- [4] Bailing Liu, Fumin Zhang, Xinghua Qu, “A Meth-od for Improving the Pose Accuracy of a Robot Manipulator Based on Multi-Sensor Combined Measurement and Data Fusion”, *Sensors*, 15(4), pp. 7933-7952, April 2015. DOI:10.3390/s150407933.
- [5] Т. Р. Ключко, “Моделювання динаміки технологічного процесу для контролю якості токарної обробки деталей типу “вал””, *Резание и инструмент в технологических системах*, № 57, с. 115 – 121, 2000.
- [6] В.И. Скицюк, Т.Р. Ключко, *Физика технологии ТОНТОР*. Саарбрюкен (Германия): ИД LAP Lambert Academic Publishing, 2015.
- [7] В.И. Скицюк, Т.Р. Ключко, “Теоретичні засади технологічного фантома абстрактного об’єкту”, *Bull. Kyiv Polytech. Inst. Ser. Instrum. Mak.*, Вип. 58(2), с. 79-86, 2019. DOI: [https://doi.org/10.20535/1970.58\(2\).2019.189435](https://doi.org/10.20535/1970.58(2).2019.189435)
- [8] В. І. Скицюк, М. В. Скицюк, “Технологічний фантом”, *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування*, Вип. 24, с.149-155, 2002.
- [9] И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. *Справочник по математике*. Москва, СССР: Наука, 1967.
- [10] Catoni, F.; et al. *Mathematics of Minkowski Space. Frontiers in Mathematics*. Basel: Birkhäuser Verlag, 2008. DOI:10.1007/978-3-7643-8614-6. ISBN 978-3-7643-8613-9. ISSN 1660-8046.
- [11] І. Р. Шафаревич, А. О. Ремизов, *Линейная алгебра и геометрия*. Москва: Физматлит, 2009.

УДК 621.9.08 : 51-74

В. И. Скицюк, Т. Р. Ключко*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина***ВЛИЯНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФАНТОМА ОБЪЕКТА НА КАЧЕСТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

В статье определена актуальность моделирования процессов с последующим анализом особенностей преобразований технологического фантома реального объекта, в частности, прецизионной приборостроительной продукции, что влияет на поддержание точности формообразования этого объекта в условиях автоматизированного производства.

Основной целью этого исследования было обоснование аналитических моделей преобразований технологического фантома объекта с учетом типа координатных систем, за которыми можно наблюдать преобразование одних координат в другие, которые имеют определенные особенности в зонах существования материального объекта. Эти особенности преобразований существенно влияют на точность формообразования этого объекта.

Предложены основные аналитические модели, которые определяют особенности формообразования технологического фантома и необходимость сочетания технологического фантома с массой объекта, что позволяет учитывать проблемы изготовления элементов поверхности объекта, определение особенностей формообразования точности воспроизведения объектов, например, деталей приборов.

Из полученных в работе аналитических моделей мы можем утверждать, что для любого объекта технологический фантом имеет геометрическое построение, и форма этого построения является главным фактором влияния на точность формообразования объекта. Исследование обосновывает аналитическую модель преобразований технологического фантома объекта, определяющую зависимости геометрических характеристик формообразования прецизионного объекта, который производится с помощью определенных аддитивных или разрушительных (с уменьшением массы объекта) технологических процессов.

В дальнейших исследованиях модель формообразования технологических объектов в пространстве требует моделирования именно особенностей представления массы с учетом энергетических связей технологического фантома объекта в определенном объеме, который имеет задачи определения и повышения точности изготовления.

Ключевые слова: технологический фантом; точность формообразования; объект; превращение; микропанданная зона; линии поверхности.

V. I. Skytsiouk, T. R. Klotchko*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine***INFLUENCE OF OBJECT TECHNOLOGICAL PHANTOM'S TRANSFORMATIONS OF THE PRODUCTION'S QUALITY**

The article states that the relevance of modeling processes, followed by analysis of the features of the transformation of the technological phantom of the real object, in particular precision instrumentation products, which affects the accuracy of shaping the formation of this object in automated production.

The main purpose of this study was to substantiate analytical models of transformations of the technological phantom of the object, taking into account the type of coordinate systems, which can be observed transformation of some coordinates into others. These features of the transformations significantly affect the accuracy of the formation of this object.

The main analytical models that determine the features of the formation of the technological phantom and the need to combine the technological phantom with the mass of the object, which provides opportunities to take into account the problems of manufacturing surface elements, determine the features of shaping the accuracy of reproduction of objects. From the analytical models obtained in our work, we have the opportunity to say that for any object the technological phantom has a geometric construction, and the shape of this construction is the main factor influencing the accuracy of object formation.

The research substantiates the analytical model of transformations of the technological phantom of the object, which determines the dependence of the geometric characteristics of the formation of the precision object, which is made using certain additive or destructive (with decreasing mass of the real object) technological processes.

In further research, the model of shaping technological objects in space requires modeling of the peculiarities of mass representation in view of the energy connections of the technological phantom of the object in a certain volume, which has the task of determining and improving manufacturing accuracy.

Keywords: technological phantom; accuracy of shaping; object; transformation; micropandane zone; surface lines.

*Надійшла до редакції
5 листопада 2021 року*

*Рецензовано
26 листопада 2021 року*