

УДК 621.91.01

Особливості створення віртуального двійника процесу токарного оброблення

Данильченко М.А.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація. Описано міждисциплінарний підхід MC-SUITE реалізації концепції Industry 4.0 та головні вимоги до цифрових моделей (віртуальних двійників) кіберфізичних систем щодо відповідності віртуальних процесів реальним та можливості функціонування в режимі реального часу. Сформульовано головну умову створення адекватної динамічної моделі взаємодії технологічної обробної системи (ТОС) з процесом різання та розроблено модель такої взаємодії для процесу поздовжнього точіння. На прикладі розробленої структурної схеми процесу точіння продемонстровано можливість опису взаємодії вхідних параметрів ТОС (глибини різання і поздовжньої подачі) з вихідними параметрами (деформаціями за відповідними напрямками) через зміну внутрішніх параметрів моделі, поданих у вигляді складових сили різання. Така форма моделі дозволяє корегувати віртуальний процес точіння шляхом уточнення показників жорсткості різання та функціональних залежностей для складових сил різання за результатами інтелектуального аналітичного оброблення результатів моніторингу функціонування ТОС.

Ключові слова: віртуальний процес точіння, кібер-фізична система, Industry 4.0, динамічна модель.

Відповідно до концепції Industry 4.0, розвиток сучасного автоматизованого виробництва базується на функціонуванні кіберфізичних систем (Cyber-Physical System (CPS)) – вбудованих комп'ютерних і мережевих технологій, що дозволяють спостерігати і керувати процесом фізичного виробництва [1]. Основу цих систем складають цифрові моделі (віртуальні двійники) виробничих процесів, головними вимогами до яких є максимально можлива відповідність віртуальних і реальних процесів та можливість функціонування в режимі реального часу. Перша вимога забезпечується на рівні корегування управляючих програм (control PLC level, рис. 1, а) із використанням цифрових моделей, близьких до технічних процесів, а друга – кіберпростором (рис. 1, б) шляхом аналітичного оброблення та інтелектуального управління даними із використанням технологій високопродуктивних обчислень.

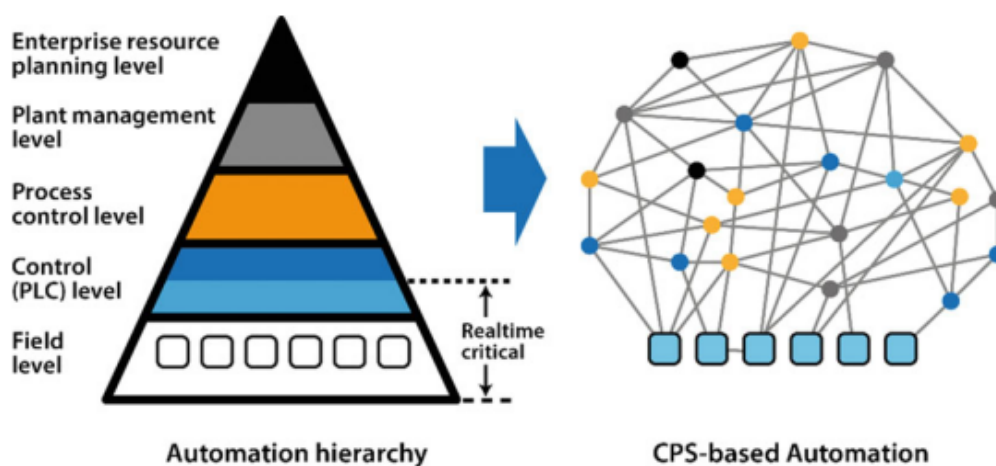


Рис. 1. Система кібер-фізичного виробництва (Cyber-Physical Production Systems), [1]:
а) традиційна піраміда автоматизації, б) організація функціонування кіберпростору

Загальний підхід до практичної реалізації концепції Industry 4.0 в європейській обробній галузі розроблено в проекті MC-SUITE [2], який пропонує нове покоління засобів

модельовання та оптимізації процесів із підтримкою інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), розширених за допомогою фізичних вимірювань та моніторингу, які можуть покращити процедуру корегування управляючих програм, зменшивши розрив між запрограмованим та реальним процесами оброблення.

Проект MC-SUITE складається з 11 робочих пакетів (рис.2), з яких 8 перших забезпечують узгодження віртуальних і реальних процесів в режимі реального часу.

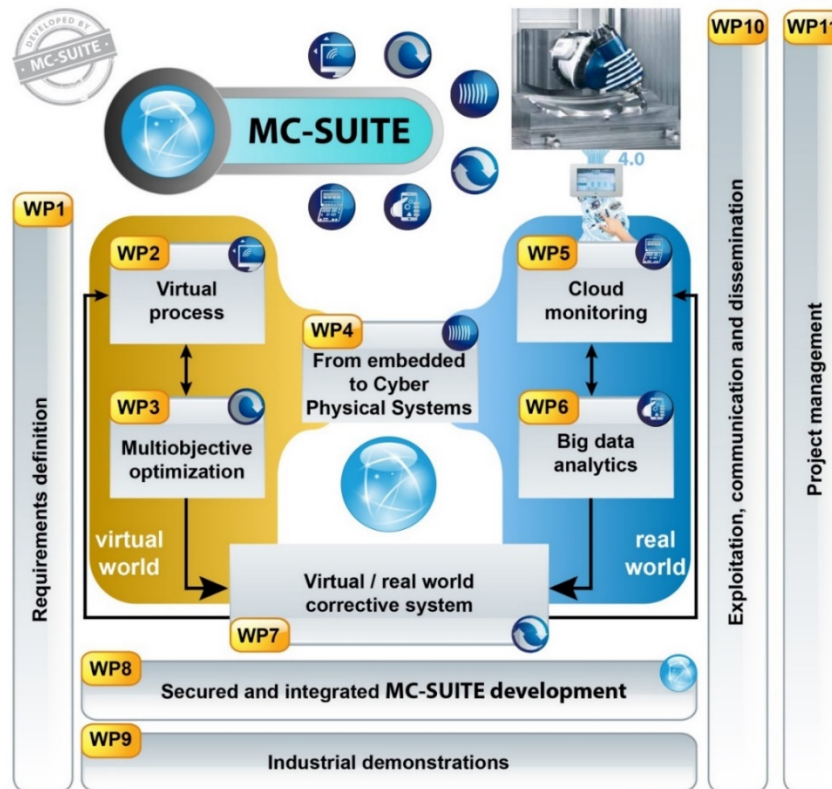


Рис. 2. Міждисциплінарний підхід MC-SUITE реалізації концепції Industry 4.0, [2]

Робочий пакет 1 (WP1) стосується відповідності вимогам як з точки зору інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), так і виробничих технологій.

Робочі пакети 2 і 3 призначені для розробки віртуальних модулів MC-SUITE для створення віртуального двійника процесу оброблення. Процес різання моделюється в WP2 за допомогою моделей сили, сталості і чистоти поверхні, заснованих на технологіях високопродуктивних обчислень. На основі цієї віртуальної моделі в WP3 реалізована багатоцільова оптимізація для підвищення продуктивності при одночасному зниженні витрат.

Робочий пакет 4 перетворює вбудовані системи, розроблені в попередніх європейських проектах, в кіберфізичні системи, пов'язані з кіберфізичним світом.

Робочі пакети 5 і 6 присвячені реальним модулям MC-SUITE. У WP5 фізична і віртуальна сенсоризація машин реалізована з урахуванням оброблення великих масивів інформації (Big Data). Завдяки розширеній аналітиці та візуалізації в WP6 створюються нові хмарні сервіси. Ці кроки дадуть імпульс ІКТ виробничому світу.

Робочий пакет 7 отримує входні дані як з віртуального, так і реального світу, щоб поліпшити можливості моделювання і поточний процес обробки. Коригування процесу здійснюються в режимі реального часу за допомогою інтелектуальної системи, що використовує стратегії самонавчання.

Робочий пакет 8 забезпечує функціональну сумісність модулів віртуального і реального світу при інтеграції всіх модулів MC-SUITE.

Власне ця вимога і визначила основне завдання при розробленні модуля прогнозування вібраційної стійкості при токарному обробленні - створення адекватної динамічної моделі взаємодії технологічної обробної системи (ТОС) з процесом різання.

З урахуванням основних причин нестійкості різання і підходу до їх урахування в моделі процесу різання [3], в основу динамічної моделі взаємодії ТОС з процесом різання покладено пружно-деформаційну модель зміни зрізуваного припуску, спричиненої відносними пружними зміщеннями інструмента і заготовки в процесі різання (рис. 3).

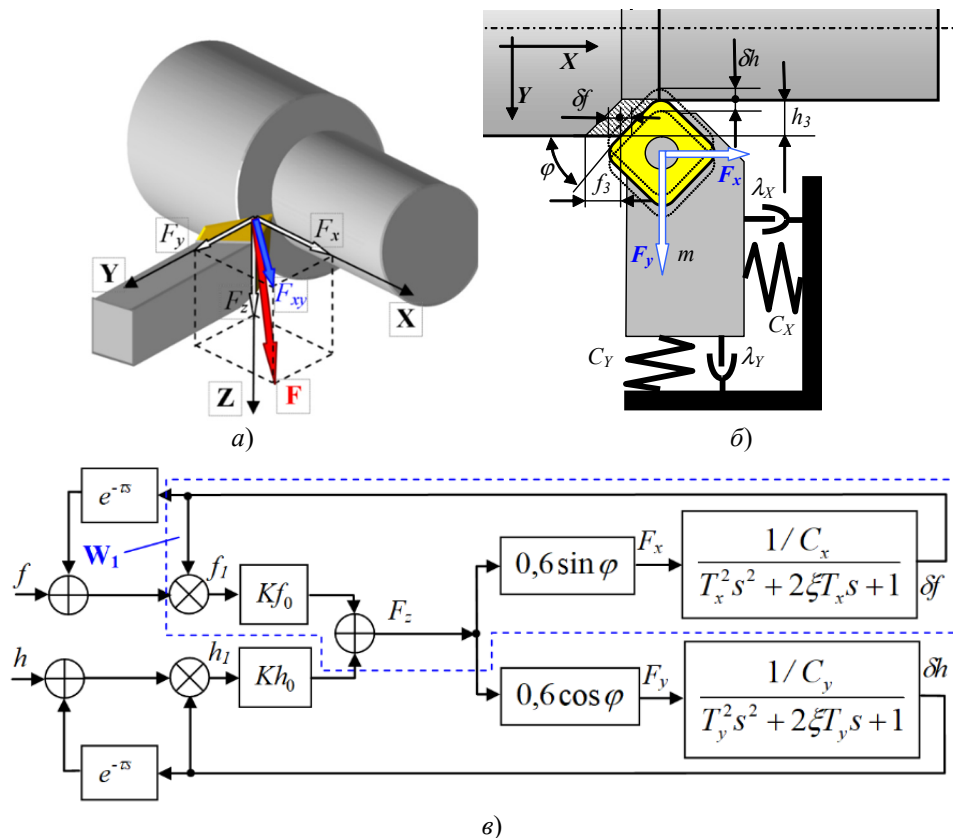


Рис. 3. Вплив пружних деформацій на зрізуваний припуск: а) схема розкладання сили різання; б) схема формування припуску; в) структурна схема процесу точіння

Схема розкладання сили різання представлена на рис. 3, а. Схема утворення пружних деформацій δh та δf при точінні, що призводять до змін глибини різання h_3 і ширини зрізу f_3 , і в результаті площі зрізаного шару припуску - представлена на рис. 3, б. Структурна схема, що описує цей процес представлена на рис. 3, в.

Пружна ТОС в цій моделі представлена у вигляді одномасової системи із зведеною масою m і двома ступенями рухливості за координатами X і Y . Маса приєднана до основи зв'язками, що мають пружні і демпфірувальні властивості і характеризуються жорсткістю C_x і C_y та в'язким тертям з коефіцієнтами пропорційності λ_x і λ_y (рис. 3, б).

Структурна схема процесу точіння (рис. 3, в) описує замкнену динамічну систему з двома входами за глибиною h та подачею f , відповідно, двома виходами - деформаціями δh та δf за цими напрямками. Передавальними функціями запізнювання $e^{-\tau s}$ (де τ - час одного оберту шпинделя, s - оператор Лапласа) враховується обробка за слідом за напрямком обидвох координат.

З огляду на відносно малі величини деформацій δh та δf порівняно із глибиною h та подачею f різання, показники жорсткості різання за координатами X і Y у вигляді залежностей складової сили різання F_Z від глибини h і подачі f можуть бути лінеаризованими:

$$Kh_0 = (\partial F_Z / \partial h)_0 = C_p x_p h_0^{x_p-1} f_0^{y_p} V_0^{n_p} k; \quad Kf_0 = (\partial F_Z / \partial f)_0 = C_p h_0^{x_p} y_p f_0^{y_p-1} V_0^{n_p} k \quad (1)$$

де $F_Z = C_{Pz} h^{x_{Pz}} f^{y_{Pz}} V^{n_{Pz}} k$, C_{Pz} – коефіцієнт, який залежить тільки від матеріалу заготовки; k – поправочний коефіцієнт; x_{Pz} , y_{Pz} , n_{Pz} – показники ступеня; h , f , V – складові режиму різання – глибина (мм), подача (мм/об) і швидкість різання (м/хв), h_0 , f_0 , V_0 – значення складових режиму різання в точці лінеаризації.

Складові F_x і F_y (рис. 3, а) є векторами розкладання горизонтальної складової сили різання F_{xy} , модуль якої визначається за спрощеною залежністю $F_{xy} = 0,6F_Z$, [4], отримуються з геометричних співвідношень:

$$F_y = 0,6F_Z \cos\varphi, \quad F_x = 0,6F_Z \sin\varphi \quad (2)$$

Складові сили різання F_x , F_y , F_z є вихідними параметрами моделі процесу різання [3], яка, в свою чергу, є складовою розробленої моделі взаємодії ТОС з процесом різання. Таким чином, параметри F_x , F_y , F_z і пов'язані з ними параметри Kh_0 і Kf_0 перетворюються у внутрішні параметри цієї моделі. Завдяки цьому виникає можливість через параметри процесу різання (F_x , F_y , F_z і Kh_0 , Kf_0) сформулювати перехресні зв'язки між вхідними (режими різання) і вихідними (пружні деформації механічної системи) параметрами ТОС. Це, в свою чергу, є підґрунтям для інтелектуального управління процесом токарного оброблення шляхом корегування режимів різання за рахунок уточнення показників жорсткості різання (Kh_0 , Kf_0) та функціональних залежностей для складових сил різання (F_x , F_y , F_z) за результатами аналітичного оброблення результатів вимірювання і моніторингу функціонування ТОС.

Література

1. Monostori L. (2018) Cyber-Physical Systems. In: The International Academy for Production, Chatti S., Tolio T. (eds) CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16790-1
2. Scientific Methodology and Work Packages /
3. http://www.mc-suite.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=39
4. Петраков Ю. В. Моделирование гашения колебаний при токарной обработке / Петраков Ю. В. // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. – 2016. – № 2(77). – С. 119 -124. <http://dx.doi.org/10.20535/2305 - 9001.2016.77.78960>
5. Петраков Ю.В., Драчев О.И. Автоматическое управление процессами резания / ТНТ-Press, 2014. – 408с

Features of virtual duplicate creation of the turning process

Danylchenko Marii

Abstract. *The interdisciplinary approach of MC-SUITE implementation of the Industry 4.0 concept and the main requirements for digital models (virtual duplicates) of cyber-physical systems regarding virtual processes compliance to the real ones and the possibility of real-time operation have been described. The main condition for creating an adequate dynamic model of technological processing system (TPS) interaction with the cutting process has been defined and a model for such interaction for the longitudinal turning has been developed. On example of developed turning process structural scheme the possibility of describing the interaction of the TPS input parameters (cutting depth and longitudinal feed) with the output parameters (deformations in the respective directions) due to changes in the model internal parameters in a form of cutting force components have been demonstrated. Such representation of the model allows virtual turning process adjusting by specifying the cutting stiffness and functional dependences for the cutting forces components based on the results of intelligent analytical processing of the monitoring results of the TPS operation.*

Keywords. *virtual turning process, cyber-physical system, Industry 4.0, dynamic model.*