

Секція 3

«Вдосконалення технологічних процесів в автомобілебудуванні»

УДК 004.94:681.5

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГІЇ МАШИННОГО КОНТРОЛЮ ЗІ ЗМІШАНОЮ РЕАЛЬНІСТЮ

І.Г. Пімонов, Ю.Л. Салій, Н.П. Пенкіна

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
igor_lena_p@ukr.net*

У роботі розроблено фізичну модель технології машинного контролю із застосуванням змішаної реальності (Mixed Reality, MR) у межах концепції Industry 4.0. Запропоновано структурно-функціональну схему кіберфізичної системи, що інтегрує фізичний об'єкт, цифровий двійник та просторовий інтерфейс візуалізації. Обґрунтовано математичний апарат моделювання стану машини, алгоритм просторової візуалізації параметрів та критерій технічної діагностики. Наведено результати експериментальної апробації на прикладі гідравлічного приводу. Показано, що використання MR-технологій дозволяє скоротити час виявлення дефектів на 40–60 % та зменшити ймовірність операторських помилок.

Сучасні виробничі системи характеризуються високою складністю та інтеграцією цифрових технологій. Традиційні екранні інтерфейси керування не забезпечують достатнього рівня контекстної візуалізації параметрів технічного стану машин. Актуальним є створення фізичних моделей машинного контролю, що поєднують реальний об'єкт та його цифрову репрезентацію у просторовому середовищі змішаної реальності.

Проблематика цифрових двійників та кіберфізичних систем широко досліджується у працях Grieves, Tao, Schwab. Концептуальні засади змішаної реальності викладені в роботах Azuma, Milgram. Разом із тим питання формалізації фізичної моделі машинного контролю з MR-інтерфейсом потребує подальшого наукового обґрунтування.

Метою роботи є розроблення фізичної моделі технології машинного контролю зі змішаною реальністю, що забезпечує інтеграцію вимірювальних, аналітичних та просторово-візуалізаційних компонентів у межах єдиної кіберфізичної системи.

Архітектура системи машинного контролю з MR складається з таких рівнів:

- рівень збору даних: датчики температури, тиску, вібрацій, навантаження;
- комунікаційний рівень: IoT-протоколи (MQTT, OPC UA);
- аналітичний рівень: алгоритми обробки сигналів та машинного навчання;

- візуалізаційний рівень: MR-інтерфейс із просторовим позиціонуванням.

Оператор, використовуючи гарнітуру змішаної реальності, бачить перед собою реальну машину, на яку накладаються:

- параметри роботи у режимі реального часу;
- попереджувальні сигнали;
- анімовані траєкторії потоків енергії чи рідини;
- інструкції з обслуговування.

Таким чином, екран монітора замінюється інтерактивним просторовим середовищем.

До переваг порівняно з традиційними інтерфейсами слід віднести: ергономічність - Оператор отримує інформацію без відриву від об'єкта контролю; зменшення когнітивного навантаження - інформація подається безпосередньо в контексті фізичного об'єкта; підвищення точності діагностики - візуалізація прихованих процесів (теплових полів, потоків, напружень); дистанційна експертиза - експерт може підключитися до системи та бачити той самий просторовий контент у режимі реального часу.

Особливо перспективним є використання MR у сервісному обслуговуванні мобільних машин, де традиційний доступ до комп'ютерних терміналів ускладнений умовами експлуатації.

У межах концепції Industry 4.0 та 5.0 (в якій стратегія цифрової трансформації промисловості, що передбачає інтеграцію кіберфізичних систем, інтернету речей та інтелектуальної аналітики у виробничі процеси) просторовий комп'ютинг стане інструментом гармонійної взаємодії людини і машини, де оператор виступає інтегрованим елементом кіберфізичної системи. При переході до Industry 5.0 сучасний етап розвитку передбачає еволюцію до людиноцентричної моделі, де технології доповнюють людину, а не замінюють її. Тут активно застосовуються просторовий комп'ютинг та змішана реальність.

Фізична модель включає три взаємопов'язані підсистеми:

- матеріальна підсистема – реальна машина (гідропривід, вузол мобільної техніки);
- інформаційно-вимірювальна підсистема – датчики, контролери, IoT-шлюз;
- MR-візуалізаційна підсистема – гарнітура змішаної реальності та програмний модуль.

Фізичну модель доцільно представити як багаторівневу систему.

Рівень об'єкта контролю - машина (наприклад, гідропривід мобільної техніки) характеризується параметрами:

- тиск P ;
- температура T ;
- витрата Q ;
- швидкість обертання ω ;
- вібрація v .

Рівень сенсорної інтеграції - датчики перетворюють фізичні величини у цифрові сигнали:

$$S_i = f(P, T, Q, \omega, \nu) \quad (1)$$

Рівень цифрового двійника - цьому рівні формується математична модель стану:

$$X(t) = F(X_0, U(t), S_i(t)) \quad (2)$$

де: $X(t)$ — вектор стану системи,

$U(t)$ — керуючі впливи,

$S_i(t)$ — дані сенсорів.

Рівень просторової візуалізації

$$V = \Phi(X(t), G) \quad (3)$$

де G — геометрична модель об'єкта.

Таким чином, фізична модель об'єднує реальні процеси та їх цифрову репрезентацію у єдиному просторовому середовищі.

До принципів побудови моделі відносять:

- принцип кіберфізичної відповідності - кожному фізичному параметру відповідає цифровий атрибут;
- принцип просторової синхронізації - цифровий контент жорстко прив'язаний до геометрії об'єкта;
- принцип мінімізації затримок - час оновлення даних $\Delta t \rightarrow 0$;
- принцип когнітивної оптимізації - візуалізація відображає лише критично важливі параметри.

Фізична модель може бути реалізована на лабораторному стенді з гідроприводом, де:

- встановлено датчики тиску та температури;
- створено CAD-модель вузла;
- налаштовано передачу даних через OPC UA;
- використано MR-платформу (наприклад, рішення від Microsoft).

У результаті оператор отримує голографічне відображення полів тиску, температурних градієнтів та індикаторів несправностей безпосередньо на фізичному об'єкті.

До переваг фізичної моделі слід віднести: підвищення наочності діагностики; скорочення часу локалізації несправностей; зниження ризику помилок оператора; інтеграція з системами предиктивного обслуговування.

До перспектив розвитку та подальших досліджень слід віднести: інтеграцію алгоритмів машинного навчання; використання 5G/6G-комунікацій; створення стандартизованих протоколів просторового моделювання; оцінку енергоефективності MR-систем.

Динаміка об'єкта описується рівнянням:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) + DW(t) \quad (4)$$

де $\dot{X}(t)$ — вектор стану;

$U(t)$ — керуючі впливи;

$W(t)$ — збурення;

A, B, D — матриці параметрів.

Модель вимірювання:

$$Y(t) = CX(t) + \varepsilon(t)$$

Критерій технічного стану:

$$J = \int_{t_0}^{t_1} (X(t) - X_{nom})^T Q (X(t) - X_{nom}) dt \quad (5)$$

При $J > J_{crit}$ формується сигнал аварійного попередження у MR-середовищі.

Інтенсивність візуалізації параметра:

$$V_i = k_i \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (6)$$

Параметри відображаються безпосередньо на геометрії об'єкта, що забезпечує контекстну діагностику.

Експеримент проведено на лабораторному стенді гідроприводу.

Таблиця 1 - Нормальний режим

| t, c | P, МПа | T, °C | v, мм/с |
|------|--------|-------|---------|
| 0 | 15.2 | 48 | 1.2 |
| 20 | 15.1 | 50 | 1.3 |

Таблиця 2 - Передаварійний режим

| t, c | P, МПа | T, °C | v, мм/с |
|------|--------|-------|---------|
| 0 | 17.8 | 63 | 3.0 |
| 20 | 18.4 | 69 | 4.6 |

Час виявлення дефекту:

- традиційний контроль — 6–8 хв;
- MR-контроль — 2–3 хв.

Результати експерименту підтверджують підвищення ефективності діагностики та зниження когнітивного навантаження на оператора. Інтеграція цифрового двійника з просторовою візуалізацією створює передумови переходу до безекранного виробничого середовища.

Висновки

1. Розроблено фізичну модель машинного контролю зі змішаною реальністю.
2. Запропоновано математичний апарат інтеграції сенсорних даних і цифрового двійника.

3. Доведено ефективність MR-контролю в умовах експериментальної апробації.
4. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію алгоритмів машинного навчання та оцінку економічної ефективності впровадження.

Література

1. Azuma R. A Survey of Augmented Reality // Presence. – 1997.
2. Milgram P., Kishino F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays // IEICE. – 1994.
3. Tao F., Zhang M. Digital Twin Driven Smart Manufacturing. – 2019.
4. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. – 2016.
5. Porter M., Heppelmann J. Smart, Connected Products // Harvard Business Review. – 2014.

УДК 681.5

ТОПОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КРОНШТЕЙНА ПІДВІСКИ БРОНЕАВТОМОБІЛЯ «НОВАТОР» ЗА ДОПОМОГОЮ AUTODESK INVENTOR

М.Д. Черкаський

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
kolyanich.337@gmail.com*

Однією з актуальних задач вдосконалення технологічних процесів у вітчизняному автомобілебудуванні є зниження маси несучих елементів при збереженні заданого рівня міцності та надійності. Особливої гостроти ця проблема набуває в контексті виробництва захищених автомобілів для Збройних сил України: надлишкова маса кузовних вузлів та елементів підвіски безпосередньо знижує рухливість, вантажопідйомність та паливну ефективність броневих автомобілів [1].

Сучасні CAD/CAE-інструменти – зокрема Autodesk Inventor – надають можливість проводити топологічну оптимізацію на етапі проектування, що дозволяє отримати конструктивно раціональну форму деталі без виготовлення дорогих фізичних прототипів. Метою роботи є демонстрація методики топологічної оптимізації несучого кронштейна підвіски броневих автомобіля «Новатор» (ТОВ «Укрбронетехніка», Черкаси) із застосуванням модулів Stress Analysis та Shape Generator Autodesk Inventor 2024.

Тривимірний модель кронштейна. Об'єктом дослідження є несучий кронштейн кріплення важеля підвіски броневих автомобіля «Новатор» масою 7,5