

жорсткість, рівномірний розподіл зусиль та зниження деформацій за рахунок роботи стрижневих елементів як просторової ґратки.

У роботах із підсилення будівель ключовими факторами визначено дефекти, спричинені нерівномірними осіданнями ґрунтів. Виявлені тріщини в стінах і перекриттях, а також випадки суфозії ґрунтів зумовили вибір залізобетонної “обойми”, яка відновлює просторову роботу будівлі. Метод посилення поздовжніми та поперечними поясами дозволяє перерозподілити зусилля та попередити подальші деформації. Проєкт надбудови автоцентру демонструє комплексний підхід до перерозподілу навантажень при збільшенні поверховості. Особливу увагу приділено перевірці несучої здатності існуючих фундаментів і простінків, що є типовим для об’єктів реконструкції, де важливо забезпечити сумісну роботу старих і нових елементів.

Висновок. Інтегроване дослідження показало, що незалежно від функціонального призначення будівель, основними факторами формування конструктивної системи є інженерно-геологічні умови, характер навантажень та необхідність забезпечення просторової жорсткості споруди. Найефективнішими є сталеві та змішані каркасні схеми, поєднані з жорсткими дисками перекриттів або монолітними ядрами. У випадках реконструкції— ключовим залишається підсилення елементів, здатних сприймати додаткові навантаження. Отримані результати дозволяють сформулювати цілісний підхід до проєктування, порівняння та аналізу конструктивних рішень різнотипних об’єктів сучасного будівництва.

Література

1. Йолтухівський, С., and Михайло Іванович Гудь. "Варіантне проєктування висотних будівель." *Праці конференції Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 70-річчю від дня народження член-кореспондента НАН України, проф. Яснія Петра Володимировича „Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій“* (2022): 155-157.
2. Крамар, Галина Михайлівна, Р. Я. Васирик, and К. В. Клименко. "Просторові великопролітні покриття." *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“* (2024): 23-23.
3. Ігнат'єва, В. Б., Паньків, В. О., Тимкович, В. М., Синюк, С. В., & Сокотов, Ю. В. (2024). Великопролітні арокні конструкції покриття. *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 20-21.
4. Ігнат'єва, В. Б. (2022). Аналіз роботи профільних виробів, армованих волокнами композитів у конструкції. *Праці конференції Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 70-річчю від дня народження член-кореспондента НАН України, проф. Яснія Петра Володимировича „Міцність і довговічність сучасних матеріалів та конструкцій“*, 60-61.

УДК 621.91

Ю.Б. Капаціла, к. т. н, М.С. Стефанчук, Кіт С.Б.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОГЛЯД ІННОВАЦІЙНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

Y.B. Kapatsila, Ph. D, M.S. Stefanchuk, Kit S.B.

OVERVIEW OF INNOVATIVE METHODS FOR RESEARCHING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF INDUSTRIAL ROBOTS

Сучасні промислові робототехнічні комплекси відіграють ключову роль у

забезпеченні високої продуктивності, гнучкості технологічних процесів та стабільної якості продукції. Для підвищення ефективності роботизованої автоматизації необхідно оптимізувати як конструктивні елементи робота, так і алгоритми керування ним. Одним із найважливіших аспектів у цьому контексті є дослідження динамічних характеристик промислових роботів, що визначають їх здатність виконувати точні та швидкі переміщення в умовах змінних навантажень, контактних взаємодій і зовнішніх впливів.

Класичні підходи – аналітичне моделювання, лінеаризація процесів, експериментальні вимірювання – нині вже не забезпечують необхідної точності, особливо для роботів нового покоління: високошвидкісних маніпуляторів, колаборативних роботів, платформ із гнучкими ланками та складними сервоприводами. Сучасні промислові роботи працюють у режимах, що супроводжуються значними динамічними навантаженнями, тепловими ефектами, нелінійністю електромеханічних елементів, деформаціями конструкцій при різких прискореннях. Тому традиційні моделі, які враховують лише механічну сторону динаміки, є неповними та не дозволяють адекватно прогнозувати поведінку системи.

Стрімкий розвиток обчислювальних технологій, інтелектуальних систем керування, високоточної сенсорики та спеціалізованих програмних комплексів сформував нове покоління методів дослідження динамічних характеристик. Ці методи дають змогу поєднувати реальні та віртуальні моделі, автоматизувати ідентифікацію параметрів та виконувати комплексний мультифізичний аналіз робототехнічних систем.

Мультифізичний аналіз (multiphysics analysis) – це комплексний підхід до моделювання, який враховує взаємодію кількох фізичних процесів у межах єдиної моделі. На відміну від класичного моделювання, орієнтованого переважно на механіку, мультифізичний підхід розглядає робота як повноцінну мехатронну систему, у якій механічні, електричні, теплові та магніто-механічні процеси тісно пов'язані між собою.

До основних фізичних підсистем, що враховуються в мультифізичному аналізі, належать механічні процеси: кінематика та динаміка ланок, сили інерції, тертя, жорсткість та демпфування, коливання й резонансні явища, гнучкість конструкцій; електромагнітні процеси: робота сервоприводів, електромагнітні гальма, втрати у двигунах, поведінка датчиків та енкодерів; теплові процеси: нагрівання двигунів і редукторів, вплив температури на точність позиціонування та стабільність характеристик; структурні деформації: пружні та пластичні деформації ланок під дією динамічних навантажень; гідравлічні та пневматичні процеси (за наявності відповідних приводів).

Застосування мультифізичного аналізу дозволяє значно підвищити точність прогнозу динамічної поведінки робота, оптимізувати конструкцію під реальні режими роботи, забезпечити стабільність і надійність системи.

Одним із провідних інноваційних методів є використання цифрових двійників (digital twins) – віртуальних копій роботизованих систем, що синхронізуються з відповідним фізичним об'єктом у реальному часі. Цифровий двійник дозволяє відстежувати стан системи у режимі онлайн; прогнозувати динамічну поведінку та можливі відмови; оптимізувати траєкторії руху та режими роботи; аналізувати взаємодію робота з навколишнім середовищем та змінним навантаженням.

Поєднання цифрових двійників із мультифізичними моделями дає можливість створювати інтегровані високоточно узгоджені моделі, що відтворюють поведінку робота з максимальною достовірністю. Такий підхід є ключовим для реалізації концепцій Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0.

Впродовж останніх років значного поширення набули методи машинного навчання, які застосовуються не лише для керування роботами, а й для моделювання та прогнозування їхніх динамічних характеристик.

Сучасні моделі глибинного навчання – нейронні мережі, рекурентні та згорткові мережі, трансформери – здатні апроксимувати складні нелінійні взаємозв'язки між кутами, швидкостями, прискореннями, навантаженнями та зовнішніми збуреннями. Це

дозволяє отримувати високоточні моделі навіть у випадках, коли аналітичний опис є надмірно складним або неможливим.

Сучасні вимірювальні комплекси дають змогу проводити експериментальний аналіз динаміки з високою точністю. До таких систем належать: лазерні трекери, високошвидкісні 3D-сканери, системи субміліметрового відеоаналізу руху, віброакустичні системи для виявлення мікроколивань і резонансів. Ці засоби дозволяють вимірювати траєкторії руху ланок у реальному часі, діагностувати стан приводів, виявляти дефекти конструкції та проводити верифікацію моделювання.

Використання графічних процесорів (GPU) забезпечує можливість паралельного виконання великої кількості обчислень, що в десятки разів прискорює симуляцію динаміки роботизованих систем. Це відкриває можливість опрацювання тисяч сценаріїв навантаження, виявлення критичних режимів, автоматизованої оптимізації конструкції та алгоритмів керування. GPU-обчислення особливо ефективні для складних нелінійних моделей з великою кількістю ступенів свободи.

В процесі дослідження динамічних характеристик роботів важливу роль відіграють методи ідентифікації параметрів динаміки робота. Ідентифікація параметрів – це процес визначення фізичних характеристик робота, таких як маса ланок, моменти інерції, коефіцієнти тертя, жорсткість і демпфування. Серед сучасних методів ідентифікації виділяють субпросторові методи, рекурсивні фільтри (наприклад, фільтр Калмана), еволюційні та генетичні алгоритми, байєсівські методи, градієнтні оптимізаційні методи.

Методи Hardware-in-the-Loop (HiL), Software-in-the-Loop (SiL) та Model-in-the-Loop (MiL) дозволяють проводити тестування систем керування та динамічних моделей в умовах, максимально наближених до реальних. Такі методи дають змогу скоротити час і вартість розробки, підвищити безпеку тестування, перевіряти поведінку системи в критичних режимах без ризику пошкодження реального обладнання.

Огляд показує, що сучасні дослідження динамічних характеристик промислових роботів активно переходять від традиційних лінійних моделей до комплексних інтегрованих підходів. Найбільш перспективними напрямками є мультифізичне моделювання, використання цифрових двійників, машинне навчання, високоточна сенсорика, GPU-паралельні обчислення, сучасні методи ідентифікації параметрів, HiL/SiL/MiL-тестування. Використання цих методів забезпечує точне моделювання, оптимізацію та аналіз роботизованих систем і є критично важливим для розвитку сучасної промислової автоматизації.

УДК 631. 331.85

І.В. Карп, аспірант

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОБОТИ ШНЕКОВОГО ТРАНСПОРТЕРА ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

I. Karp, graduate student

ANALYTICAL MODEL OF THE WORKING PROCESS OF A SCREW CONVEYOR OF GRAIN MATERIALS

Післязбиральна доробка урожаю зернових культур до необхідних кондицій потребує виконання транспортних операцій для переміщення зерна для його просушування, очищення, протруювання тощо [1]. На зернових токах багатогалузових фермерських господарств для виконання незначного обсягу таких робіт, найефективнішим способом є застосування малогабаритних шнекових транспортерів.