

## **Багатокритеріальний синтез ІІОТ- інтегрованих робототехнічних модулів пакувальних машин**

**Туфекчі В.І., Токарчук С.В., Кривопляс-Володіна Л.О., Гавва О.О.**  
*Національний університет харчових технологій (НУХТ), м. Київ, Україна*

**Вступ.** Комп’ютерне моделювання є ключовим інструментом для проєктування роботизованих маніпуляторів, особливо в пакувальних системах, де висок а швидкість роботи вимагає надзвичайної точності траєкторій. Оптимально спланована траєкторія дозволяє виконувати операції за мінімальний час, що підвищує продуктивність і знижує витрати. У сучасних виробничих лініях роботи-пакувальники забезпечують високу пропускну здатність та безперервність процесу, тому навіть незначні відхилення траєкторії можуть призвести до збоїв чи браку.

**Актуальність.** Швидкісні маніпулятори часто стикаються з проблемою вібрацій, що виникають через різкі прискорення та гальмування. Надмірний ривок (jerk) у русі збуджує коливання в механічній структурі та прискорює знос вузлів. Резонансні коливання, спричинені несталим рухом, можуть пошкоджувати приводи і приводити до значних похибок позиціонування. У важких умовах експлуатації конфлікт вимог високої швидкості і високої точності стає особливо гострим. Вібрації маніпулятора при високих швидкостях не лише знижують точність укладання продукції, але й можуть викликати передчасний вихід з ладу механізмів, що негативно впливає на ресурсоощадність системи. Відтак, необхідні ефективні методи згладжування траєкторій та демпфування коливань для забезпечення стабільної роботи роботизованих комплексів.

**Метою** дослідження є підвищення динамічної точності та надійності швидкісних роботизованих систем шляхом застосування методів LESR та CV. Зокрема, ставиться завдання знизити амплітуду коливань робочого органа під час циклу руху та оптимізувати профіль траєкторії таким чином, щоб забезпечити високу швидкість маніпуляцій без втрати точності та збільшення навантажень на механізми.

**Основна частина.** Для досягнення сформульованої наукової мети побудовано високоточну віртуальну модель роботизованого маніпулятора в середовищі CoppeliaSim, що забезпечило можливість проведення чисельних експериментів у повністю безпечному, відтворюваному та керованому симуляційному просторі. Оптимізація траєкторії руху виконувалася на основі алгоритму LESR (Least-Squares Policy Iteration with Experience Replay), який належить до класу методів навчання з підкріпленням і забезпечує ітеративне удосконалення стратегії керування шляхом багаторазового використання накопичених даних досвіду для прискорення збіжності до оптимального керувального закону. Верифікація точності моделі та підвищення статистичної надійності результатів здійснювалися із застосуванням підходу CV (Control Variates), що передбачає зменшення дисперсії оцінок моделювання шляхом урахування кореляційних зв’язків між модельованими параметрами та заздалегідь відомими референсними величинами. У ході симуляції координати кінцевого ефектора маніпулятора (TCP) реєструвалися як часові ряди  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$ . На кожному інтервалі траєкторії було застосовано локальну регресію із скользячим вікном (аналог LOESS-згладжування): всередині вікна будувалась квадратична модель, а дані зважувалися трикутною функцією, що надавала більшої ваги точкам, близьким до центру інтервалу. Оптимальний розмір вікна  $h$  для згладжування визначався емпірично за допомогою крос-валідації: надто мале  $h$  призводить до перенавчання (коливання не придушуються), тоді як надто велике – до надмірного згладжування і втрати точності. Крос-валідація підтвердила, що найменша середньоквадратична помилка (MSE) досягається при  $h$ , що становить  $\sim 10\text{--}15\%$  довжини вибірки траєкторії (рис.1).



Застосування запропонованого підходу дало змогу суттєво знизити рівень вібрацій маніпулятора. Зокрема, при швидкості руху маніпулятора понад 1,25 м/с початкові флуктуації положення ТСП досягали  $\pm 10$  мм протягом одного циклу, що проявлялося як різкі “провали” траєкторії у точках старту та зупинки руху. Після оптимізації траєкторії методами LESR і CV максимальний розкид відхилень не перевищував  $\pm 1,2$  мм, тобто був знижений до прийнятних меж для більшості пакувальних операцій.

Таким чином, згладжений профіль руху забезпечив значно більш точне дотримання траєкторії маніпулятором. Крім того, отримана еталонна траєкторія (структурний тренд руху) може бути використана для подальшого вдосконалення системи керування – зокрема, для налаштування ПІД-регуляторів або генетичних алгоритмів самокорекції, які б підтримували рух маніпулятора максимально близько до оптимізованого профілю. Порівняння показників MSE до і після застосування згладжування показало зменшення похибки приблизно на 78%, що підтверджує ефективність запропонованих алгоритмів. На рисунку представлено результати чисельного моделювання трьох типів траєкторій руху маніпулятора (синусоїдальної, експоненціальної та косинусоїдальної). Червоним позначено точки найбільших відхилень реальної траєкторії від заданої, що дозволяє оцінити характер коливань і похибки позиціонування. Аналіз демонструє, що при різних профілях руху виникають суттєві коливання, які потребують застосування методів згладжування (LESR, CV) для підвищення точності.

**Висновки.** Результати дослідження підтвердили, що застосування методів LESR та CV дозволяє успішно вирішити проблему коливань траєкторії швидкісних маніпуляторів. Запропонована методика забезпечила більш гладкі профілі руху, усунення різких флуктуацій та підвищення точності позиціонування робота. Зазначені результати безпосередньо забезпечують підвищення продуктивності пакувальних ліній за умови збереження експлуатаційної стабільності обладнання. Дієвість запропонованого підходу додатково верифікується даними інших дослідників: зокрема, експериментальні випробування демонструють одночасне зменшення амплітуди залишкових коливань виконавчих механізмів та скорочення тривалості робочого циклу під час використання оптимізованих траєкторій руху. У цілому інтеграція алгоритмів LESR і CV в процес проектування робототехнічних та мехатронних систем сприяє підвищенню їх функціональної надійності, енергоефективності та загальної ресурсощадності у сучасних виробничих комплексах.

## Література

1. Ariano A., Perna V., Senatore A. et al. (2020). Simulation and Experimental Validation of Novel Trajectory Planning Strategy to Reduce Vibrations and Improve Productivity of Robotic Manipulator. *Electronics*, 9(4), 581. DOI: 10.3390/electronics9040581
2. Zhao B., Wu Y., Wu C., Sun R. (2025). Deep reinforcement learning trajectory planning for robotic manipulator based on simulation-efficient training. *Scientific Reports*, 15(1). DOI: 10.1038/s41598-025-93175-2 nature.com
3. Liu Q., Zhou X., Zhu F. et al. (2014). Experience Replay for Least-Squares Policy Iteration. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 1(3), 274-281. DOI: 10.1109/JAS.2014.7005614.
4. Shan X., Li Y., Liu H., Huang T. (2022). Residual Vibration Reduction of High-Speed Pick-and-Place Parallel Robot Using Input Shaping. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35:16. DOI: 10.1186/s10033-022-00679-3
5. Запорожець О.В., Володін С.О. (2024) Параметричний синтез мехатронної системи пневмотранспортування сипких продуктів. *Наукові праці НУХТ 2024. Том 30, №4.* С.88-98. DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-4-8 <https://surl.li/tcitpr> <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/46764>
6. Володін С. О., Мирончук В. Г., Васильківський К. В., Запорожець О. В. (2025) Інженерний аналіз та оптимізація систем керування позиційними приводами в запірно-регулювальних системах продуктопроводів. *Наукові праці НУХТ. 2025. Т. 31, № 1.* С. 120–131. DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-10. URL: <https://surl.lt/rwsaah>
7. Володін С. О., Мирончук В. Г. (2025) Modelling of flow characteristics. *Future of science: innovations and perspectives : матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції, 16–18 червня 2025 р., Стокгольм, Швеція.* С. 41–45. URL: <https://surl.li/ahhtvh>