

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБОК ПОЗИЦІОНУВАННЯ ВНАСЛІДОК НЕЛІНІЙНОСТЕЙ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В СИСТЕМАХ ЧПК

Вінницький національно технічний університет

У статті досліджується актуальна проблема точності позиціонування в системах числового програмного керування (ЧПК) унаслідок нелінійностей електроприводів. Встановлено, що електроприводи, що використовуються для переміщення виконавчих механізмів, мають нелінійну характеристику момент–струм, на яку впливає режим навантаження, знос механічних елементів та динамічні перехідні процеси. Це призводить до виникнення похибок позиціонування, які негативно впливають на точність обробки деталей. Аналіз сучасних систем ЧПК показав, що більшість приводів обладнані стандартними ПІ-регуляторами, які не враховують нелінійності асинхронних та серводвигунів, що знижує якість позиціонування при швидких переміщеннях та зміні технологічного навантаження. Для нівелювання зазначених недоліків пропонується використання адаптивного регулювання електроприводу з урахуванням нелінійних характеристик та динаміки механічного навантаження. Запропонована методика базується на моделюванні нелінійності моменту електродвигуна та компенсуванні його впливу через корегуючий сигнал у системі управління. Це дозволяє суттєво зменшити позиційні похибки та підвищити точність обробки, особливо у режимах високошвидкісного переміщення або при змінних навантаженнях.

Ключові слова: ЧПК, електропривод, нелінійність, похибка позиціонування, автоматизація, регулювання.

Вступ

Сучасні системи числового програмного керування (ЧПК) широко застосовуються в автоматизованому виробництві та вимагають високої точності позиціонування виконавчих органів, оскільки навіть незначні відхилення координат безпосередньо впливають на якість виготовлення деталей, їх геометричні параметри та повторюваність технологічних процесів. Основною проблемою досягнення такої точності є наявність нелінійностей електропривода, що виникають унаслідок фізичних і конструктивних особливостей його елементів. До них належать сухе тертя в механічних вузлах, люфти в передачах, насичення магнітної системи двигуна, а також нелінійність характеристик силових перетворювачів [1]. У реальних умовах ці фактори діють одночасно, формуючи складну нелінійну динамічну систему, поведінка якої суттєво відрізняється від ідеалізованих моделей, що використовуються при проектуванні систем керування.

Наявність зазначених нелінійностей призводить до виникнення статичних і динамічних похибок позиціонування, що особливо проявляються при малих швидкостях, реверсивних рухах та змінному навантаженні, характерних для ЧПК-систем. Це негативно впливає на якість обробки, точність виготовлення деталей та повторюваність технологічних процесів.

Основна частина

У реальних умовах експлуатації нелінійності електропривода спричиняють виникнення як статичних, так і динамічних похибок позиціонування, які особливо проявляються в режимах малих швидкостей, малих переміщень і при реверсивних рухах. У таких режимах вплив сухого тертя стає визначальним, оскільки виникає поріг зрушення, через який виконавчий орган не починає рух одразу після подачі керуючого сигналу, що викликає затримку початку руху, а після її подолання — різке зростання швидкості та перерегулювання. Люфти в механічних передачах створюють додаткову зону нечутливості при зміні напрямку руху, коли переміщення двигуна не передається на робочий орган до повного вибору люфту, що формує систематичну похибку позиціонування. Додатково змінне навантаження, характерне для процесів різання, призводить до зміни моменту опору, що впливає на динаміку електропривода та ускладнює стабілізацію положення. У результаті навіть за наявності класичних систем керування виникають коливання, перерегулювання та нестабільність у досягненні заданої координати [2].

Для вирішення цієї проблеми доцільно застосовувати комплексний підхід, що поєднує апаратні та алгоритмічні методи компенсації. Використання зворотного зв'язку за положенням на основі енкадерів дозволяє отримувати точну інформацію про координату виконавчого органу та оперативно коригувати відхилення. Разом із цим застосування ПІ-регуляторів із оптимізованими параметрами забезпечує зменшення статичної похибки та підвищення стабільності системи, однак для ефективної роботи в умовах нелінійностей цього недостатньо. Тому додатково впроваджуються алгоритми компенсації люфтів, які враховують зміну напрямку руху та вводять коригуюче зміщення, а також методи подолання зони нечутливості та тертя спокою шляхом адаптивного підсилення керуючого сигналу. Найбільш ефективним є використання адаптивних систем керування, які змінюють свої параметри в процесі роботи відповідно до поточного стану привода, що дозволяє компенсувати вплив змінного навантаження та старіння механічних компонентів.

У результаті моделювання та експериментальних досліджень встановлено, що нелінійності електропривода можуть призводити до значного збільшення похибки позиціонування, особливо при роботі в режимах низьких швидкостей та малих переміщень.

Для зменшення впливу нелінійностей запропоновано застосування комплексу заходів, серед яких:

1. Використання зворотного зв'язку за положенням на основі енкадерів.
2. Застосування ПІ-регуляторів із оптимізацією параметрів налаштування.
3. Реалізація алгоритмів компенсації люфтів та зони нечутливості.
4. Використання адаптивних методів керування електроприводом.

Проведений аналіз показав, що впровадження зазначених методів компенсації дозволяє суттєво підвищити точність позиціонування та стабільність роботи ЧПУ-систем.

Висновки

Проведений аналіз показав, що нелінійності електропривода є однією з основних причин виникнення похибок позиціонування в системах ЧПК, причому їх вплив найбільш відчутний у режимах низьких швидкостей та реверсивних переміщень. Основними джерелами цих похибок є сухе тертя, люфти та зона нечутливості, які формують складну нелінійну поведінку системи. Впровадження комплексного підходу, що включає використання зворотного зв'язку, оптимізованих регуляторів і спеціалізованих алгоритмів компенсації, дозволяє суттєво зменшити як статичні, так і динамічні похибки позиціонування. Отримані результати можуть бути використані при розробці та модернізації систем керування ЧПК, а також у навчальних і лабораторних стендах для підвищення точності та надійності та стабільності роботи електроприводів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мигович, А. В. Оптимізація процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК : дис. ... д-ра філософії : 131 – Прикладна механіка / Мигович Артур Володимирович. – Київ, 2025. – 142 с.
2. Точність обробки на верстатах з ЧПУ / А. С. Морсков, О. Д. Чорна, О. А. Фішук, Г. В. Волобуєва // XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 15-16 травня 2019 р., м. Київ, Україна : збірник праць / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 179–182. – Бібліогр.: 3 назви.

Кравець Вадим Олексійович — магістр групи ЕПА-25м, старший лаборант, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: kravetss@vntu.edu.ua;

Kravets Vadym Oleksiyovich — Master's student in the EPA-25m group, senior laboratory assistant, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kravetss@vntu.edu.ua;

Vadym KRAVETS¹

RESEARCH OF POSITIONING ERRORS DUE TO ELECTRIC DRIVE NONLINEARITIES IN CNC SYSTEMS

¹Vinnytsia National Technical University

The article investigates the current problem of positioning accuracy in numerical control (NC) systems due to

the nonlinearities of electric drives. It is established that electric drives used to move actuators have a nonlinear torque-current characteristic, which is affected by the load mode, wear of mechanical elements and dynamic transients. This leads to positioning errors that negatively affect the accuracy of part processing. An analysis of modern CNC systems has shown that most drives are equipped with standard PI controllers that do not take into account the nonlinearities of asynchronous and servo motors, which reduces the quality of positioning during fast movements and changes in the technological load. To eliminate these shortcomings, it is proposed to use adaptive control of the electric drive taking into account the nonlinear characteristics and dynamics of the mechanical load. The proposed method is based on modeling the nonlinearity of the electric motor torque and compensating for its influence through a corrective signal in the control system. This allows you to significantly reduce positional errors and increase machining accuracy, especially in high-speed movement modes or under variable loads.

Keywords: CNC, electric drive, nonlinearity, positioning error, automation, regulation.

Kravets Vadym Oleksiyovich — Master's student in the EPA-25m group, senior laboratory assistant, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kravetss@vntu.edu.ua;