

УДК 621.9

Мельник М. С.

СИСТЕМА АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ РОЗТОЧУВАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ НА ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ

До інструментів зі зниженою жорсткістю, що застосовуються на важких токарних верстатах, належать розточувальні різці і оправки. Ці інструменти внаслідок конструктивних особливостей, що обумовлені їх службовим призначенням, мають жорсткість в кілька разів меншу, ніж жорсткість різців всіх інших типів. Найбільше застосування мають розточувальні різці, у яких відношення довжини консольної частини державки (вильоту державки) до її діаметру знаходиться в межах від 3 до 5. Однак нерідко зустрічаються технологічні завдання, в яких необхідно застосування різців з вильотом державки, що в 10 ... 12 разів перевищує її діаметр.

Відомо, що жорсткість державки зворотно пропорційна третьому ступеню довжини вильоту. Тому жорсткість розточувальних різців зі співвідношенням $L / d = 10 \dots 12$ в $100 \dots 300$ разів нижче, ніж жорсткість різців інших типів, у яких виліт зазвичай не перевищує висоту державки. Таке зниження жорсткості негативно позначається на вібростійкості процесу різання і на точності обробки. І якщо для придушення автоколивань при різанні різними авторами розроблено кілька досить ефективних методів [1, 2, 3] і проблему можна вважати вирішеною, то проблема точності залишається актуальною. Для забезпечення необхідної точності при роботі нежорсткими розточувальними різцями доводиться суттєво знижувати значення величин подачі і глибини різання, щоб знизити деформації інструменту від сил різання до прийняттого рівня.

У даній роботі пропонується здійснювати компенсацію пружних деформацій інструменту мехатронними засобами. Можливості сучасних вбудованих в систему ЧПК програмно реалізованих програмованих логічних контролерів (ПЛК) дозволяють вводити в розмірне налаштування інструменту динамічну корекцію, тобто корекцію, значення якої можна змінювати в процесі обробки в будь-який момент часу. Строго кажучи, ця корекція вводиться періодично. Але період дорівнює періоду запуску програми ПЛК і для більшості сучасних систем ЧПК становить 10 ... 100 мс, що для більшості технологічних завдань можна вважати безперервним процесом.

Для компенсації пружної деформації розточувального різця в більшості випадків досить ввести корекцію розмірного налаштування у напрямку поперечної подачі (вісь X) на величину, рівну пружній деформації інструменту з протилежним знаком. Складність полягає у визначенні величини цієї пружної деформації. Для цього можна використовувати два способи: прямого виміру і розрахунковий.

Вочевидь, що спосіб прямого виміру повинен забезпечити найкращий результат, проте для його реалізації необхідно застосування додаткових засобів вимірювання, і можливо, внесення змін у конструкцію інструменту і верстата для встановлення цих засобів вимірювання.

Другий спосіб вимагає менших додаткових витрат, але пов'язаний зі складністю або неможливістю отримання інформації про деякі фактори, що впливають на величину пружної деформації різця. Так власне пружна деформація державки простої конфігурації круглого або прямокутного перерізу визначається простим загальновідомим виразом:

$$y = \frac{pl^3}{3EI}, \quad (1)$$

де p – навантаження на вільний кінець державки, для розглянутого випадку – це сила різання;

l – виліт різця;

E – модуль Юнга матеріалу державки;

I – момент інерції поперечного перерізу державки.

У цьому виразі всі величини, крім сили різання, є постійними і легко визначених за конструктивними параметрами інструмента. А сила різання, навпаки, може змінюватися в широких межах, і крім основних параметрів режиму різання залежить від таких факторів як:

1 – мікрогеометрія ріжучої кромки (ступінь затуплення, наявність викришування, наросту, руйнувань покриття і т. п.);

2 – наявність МОР, інтенсивність її подачі і властивості;

3 – температура в зоні ріжучої кромки;

4 – нерівномірність властивостей оброблюваного матеріалу;

5 – процес формування і відведення стружки (додаткові навантаження на різець від тертя стружки об заготовку при її утрудненому відводі в обмеженому об'ємі отвору, що розточується);

6 – наявність або відсутність автоколивань.

Всі перераховані фактори практично не піддаються контролю прийнятними способами. Раціональним рішенням може бути вимір сили різання і розрахунок на її підставі величини розмірної корекції. Сила різання може бути виміряна за допомогою різних вимірювальних перетворювачів (тензометричних, магнітопружних, фотопружних і т. п.). Але найбільш економічним і конструктивно прийнятним є спосіб непрямого вимірювання сили різання через струми двигунів подач відповідних напрямків (в даному випадку – струм двигуна приводу поперечної подачі). Тим більше, що засоби вимірювання струмів приводів вже є в базових конфігураціях більшості сучасних систем ЧПК. Для застосування цього засобу необхідно оцінити його точність.

З теорії електричних машин відомо, що крутний момент електромагнітних сил пропорційний току двигуна відповідно до закону Ампера:

$$F = B \times I \times L \text{ або } M = (B \times I \times L)r,$$

де F – сила Ампера;

B – індукція поля збудження двигуна;

I – струм в обмотках двигуна (якоря);

L – сумарна довжина активної частини провідників обмоток двигуна (якоря);

M – крутний момент від сил Ампера;

r – радіус розташування обмоток двигуна відносно осі обертання.

Це твердження справедливо як для класичних високомоментних двигунів постійного струму, так і для сучасних приводів на основі вентильних і синхронних двигунів. Правда для синхронних двигунів в комплексі з перетворювачем частоти повна математична модель значно складніше, але, тим не менш, крутний момент може бути з високою точністю обчислений за співвідношенням миттєвих струмів фаз двигуна.

У вищерозглянутих виразах величини L і r визначаються конструкцією певної моделі двигуна і є постійними. Величина B в двигунах з постійними магнітами також є константою і визначається конструкцією двигуна, а в двигунах з електромагнітним збудженням може бути стабілізована простими засобами з точністю порядку десятих часток відсотка і краще.

З огляду на вищесказане, основним джерелом похибки при вимірюванні сили різання через струм двигуна є сила тертя в механічній частині приводу. Вона складається з сил тертя в підшипниках і щітково-колекторному вузлі двигуна, сил тертя в підшипниках і зубчастих

парах редуктора і тягового механізму, і, найбільшою мірою, з сили тертя в напрямних. У переважній більшості верстатів, і особливо у важких верстатах, величина сумарної сили тертя спокою може значно перевищувати величину сили різання на чистових режимах. Це унеможливило вимір сили різання через струм двигуна.

Для подолання цієї проблеми можна скористатися властивістю точної симетрії сили тертя при зміні напрямку руху подачі, застосувавши наступний алгоритм. В режимі зупинки приводу поперечної подачі, що відповідає процесу розточування циліндричної поверхні, цей привод виконує періодичні коливання з малою амплітудою (в межах поля допуску на обробку, але достатні, щоб салазки супорта верстата надійно зрушувалися з місця кожен період). Для більшості важких токарних верстатів з напрямними змішаного тертя прийнятна величина амплітуди таких вимушених коливань становить 0,005 ... 0,05 мм. Період коливань з одного боку повинен забезпечувати достатню швидкодію, а з іншого – гарантувати наявність ненульової ділянки переміщення з нульовим прискоренням, щоб виключити вплив на результати вимірювання сил інерції приводу. Практично для важких токарних верстатів це становить 0,2 ... 2 с.

При зміні напрямку руху сила тертя змінює свій знак, в той час як вимірювана сила різання діє в одному й тому ж напрямку. Таким чином, вимірюючи струм двигуна двічі за період примусових коливань при рівномірному русі в протилежних напрямках, по різниці результатів вимірів можна визначити величину сили різання.

Вимушені коливання приводу поперечної подачі можна забезпечити декількома способами.

1 – відповідною зміною програми обробки;

2 – відповідним налаштуванням параметрів приводу при встановленні датчика зворотного зв'язку положення на кінцевій ланці (салазки поперечної подачі) і наявності допустимого ненульового зазору в кінематичному ланцюзі приводу поперечної подачі;

3 – шляхом введення додаткового сигналу апаратним або програмним способом в контур швидкості або в контур положення приводу поперечної подачі.

Незалежно від способу створення примусових коливань, в програму ПЛК потрібно включити алгоритм, представлений на рис. 1. На блок-схемі використані такі позначення:

$I_{вим}$ – вимірне значення струму двигуна поперечної подачі;

$I_{пр}$ – значення струму двигуна при русі в прямому напрямку для поточного або попереднього півперіоду коливання;

$I_{звр}$ – значення струму двигуна при русі в зворотному напрямку для поточного або попереднього півперіоду коливання;

ΔX – розрахункове значення розмірної корекції в напрямку поперечної подачі;

k_n – коефіцієнт пропорційності між струмом двигуна і силою, що залежить від параметрів приводу і визначається експериментально;

$k_{жс}$ – коефіцієнт жорсткості різця, який визначається розрахунковим шляхом або експериментально і вводиться оператором верстата в додаткове поле таблиці інструменту як один з його параметрів.

Слід зазначити, що запропонований алгоритм придатний лише для обробки циліндричних отворів, оскільки створити періодичний реверс приводу поперечної подачі під час його формотворного руху при обробці конічних і фасонних поверхонь, по перше, технічно складно, а, по друге, на результати вимірювання в цьому випадку буде впливати сила в'язкого тертя, яка залежить від швидкості і буде різною для різних напрямків.

Спосіб компенсації з прямим вимірюванням величини пружної деформації інструменту стосовно важких верстатів також можна вважати виправданим, враховуючи вартість виробів оброблюваних на таких верстатах. Розміри поперечних перерізів державок розточувального інструменту для важких верстатів складають 50 ... 200 мм і дозволяють без особливих проблем вбудовувати в їх конструкцію датчики різних типів.

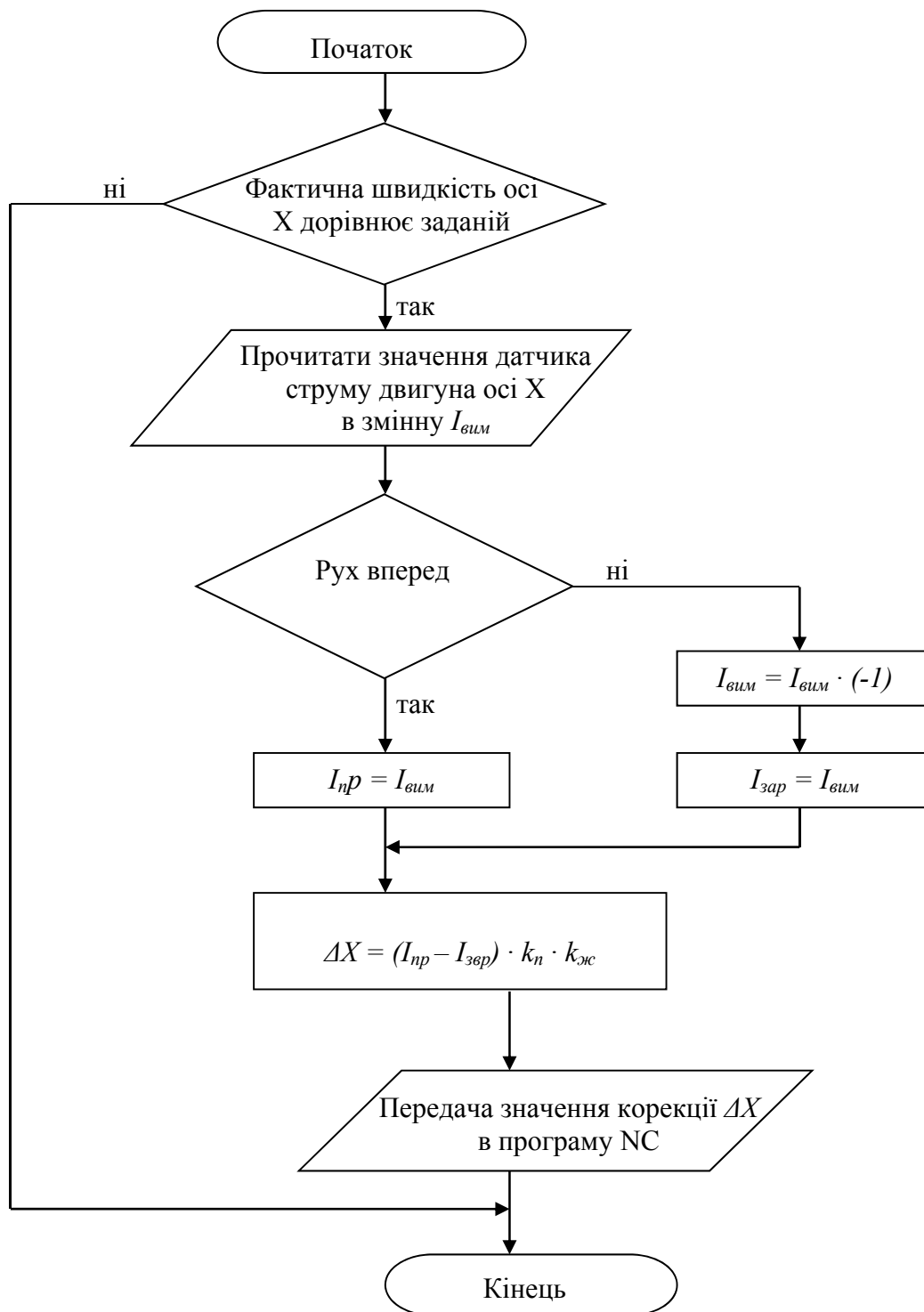


Рис. 1. Блок-схема алгоритму компенсації пружних деформацій інструменту

Крім того розточувальні різці для важких верстатів виконуються, як правило, блокової конструкції, що дозволяє використовувати одну державку, оснащену вимірювальним перетворювачем, спільно з набором різцевих блоків різної геометрії для різних розточувальних операцій. В якості вимірювальних перетворювачів для таких мехатронних оправок найбільш придатними за своїми характеристиками і конструктивними особливостями можна вважати індуктивні і лазерні фотоелектричні датчики відстані [4], [5]. Причому індуктивні щодо простоти конструкції і надійності при достатній точності будуть найбільш доцільними. Приклад конструкції такої оправки показаний на рис. 2.

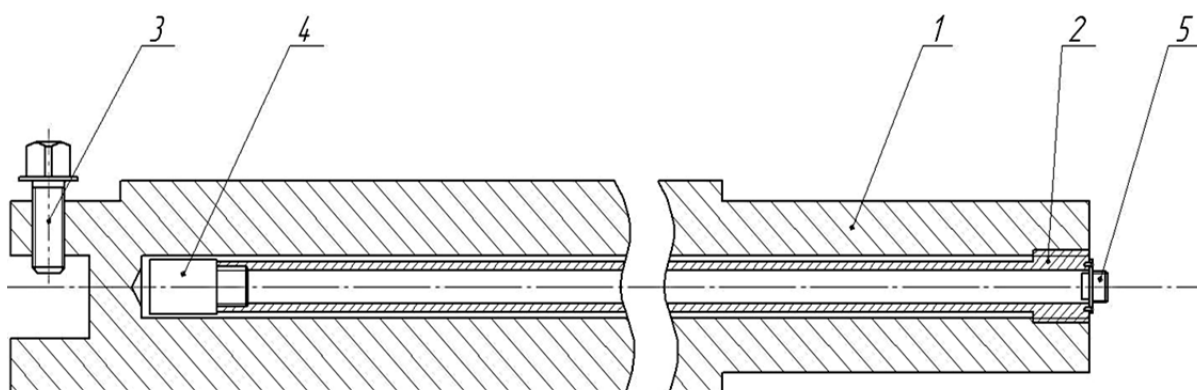


Рис. 2. Конструкція розточувальної оправки з вбудованим датчиком пружної деформації

Оправка являє собою суцільний сталевий корпус 1 з осьовим отвором. У цьому отворі за допомогою різьового сполучення встановлена труба 2, на вільному кінці якої в безпосередній близькості від елементів кріплення різцевого блоку 3 закріплений індуктивний вимірювальний перетворювач 4. На закріпленому кінці труби встановлений роз'єм для електричного кабелю 5.

При навантаженні оправки силами різання корпус 1 деформується, а труба 2 з датчиком 4 не змінює свого положення. В результаті змінюється відстань між датчиком 4 і стінками отвору в корпусі. Датчик 4 реагує на зміни цієї відстані. Для виключення коливань труби 2 з датчиком 4 на власній частоті при наявності вібрацій на верстаті, простір між трубою 4 і стінками отвору в корпусі доцільно заповнити в'язкою рідиною, наприклад мінеральним маслом. Конструкція індуктивного вимірювального перетворювача представлена на рис. 3.

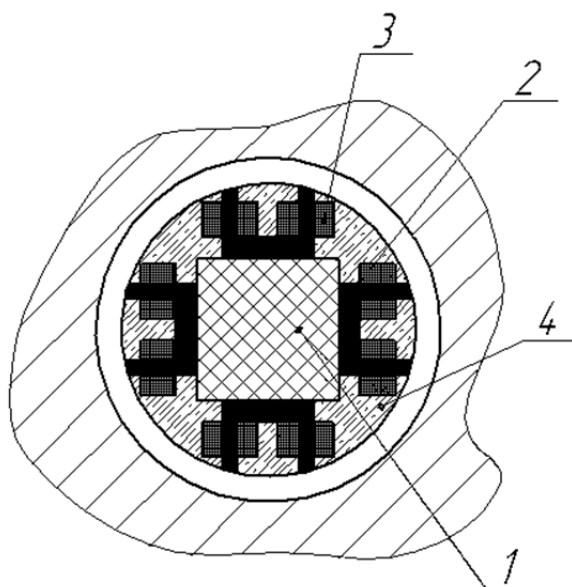


Рис. 3. Конструкція індуктивного вимірювального перетворювача

Він складається з діелектричної основи 1, на якій за допомогою клею встановлені чотири феромагнітних сердечника 2 з обмотками 3. Для підвищення надійності весь вільний простір навколо обмоток заповнюється епоксидним компаундом 4. При зміні положення вимірювального перетворювача в отворі змінюється величина немагнітних зазорів між полюсами сердечників і стінками отвору, в результаті змінюється індуктивність обмоток. Схема увімкнення датчика показана на рис. 4.

Діаметрально протилежні обмотки використовуються для вимірювання деформації в одному напрямку і вмикаються за диференціальною схемою. Наявність чотирьох обмоток дозволяє вимірювати вигини оправки в двох площинах.

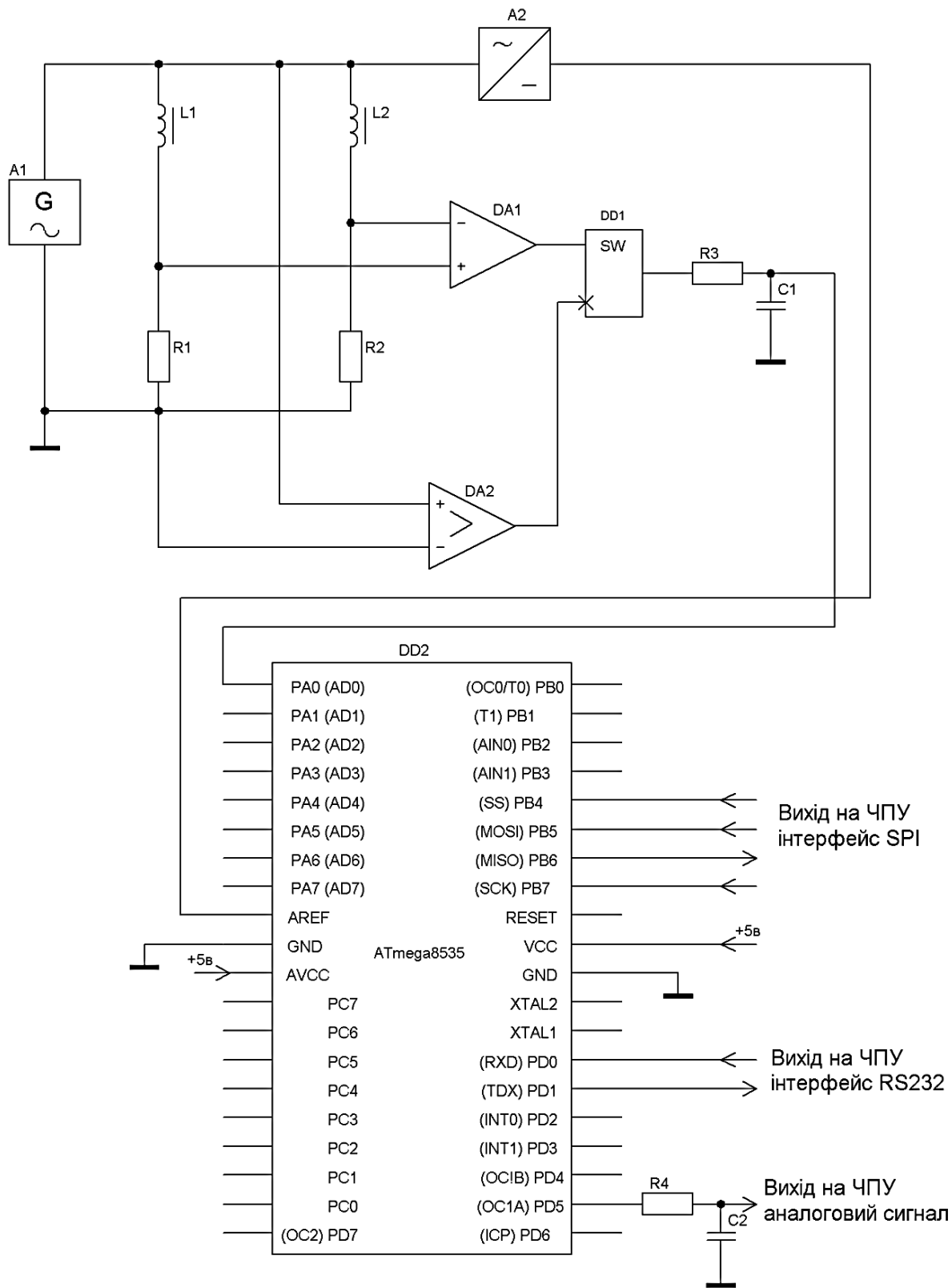


Рис. 4. Принципова електрична схема пристрою обробки сигналу індуктивного вимірювального перетворювача

На рис. 4 показана схема одного каналу вимірювання. Застосування диференціального ввімкнення індуктивних перетворювачів дозволяє підвищити точність перетворення, усунути вплив на точність вимірювання змін частоти, напруги живлення і температурного дрейфу параметрів сердечників і інших елементів схеми. Крім того, диференціальне ввімкнення дозволяє нелінійну статичну передатну функцію перетворювача зробити симетричною відносно середнього положення.

Для живлення вимірювального моста, що складається з обмоток датчика L1, L2 і резисторів R1 і R2 доцільно використовувати джерело змінного струму A1 низької частоти 20 ... 50 Гц, оскільки вихрові струми, що наводяться в тілі оправки магнітним полем високої частоти можуть істотно спотворити статичну передатну функцію перетворювача і навіть зробити її немонотонною. Напруга, що знімається з вимірювальної діагоналі моста, посилюється диференціальним підсилювачем DA1 і випрямляється синхронним детектором на основі аналогового ключа DD1. Випрямлена напруга згладжується фільтром низької частоти, що складається з елементів R3 і C1.

В принципі вихідну напругу фільтра можна використовувати як вихідний сигнал перетворювача, проте, як вказувалося вище, статична передатна функція індуктивного перетворювача є істотно нелінійною і має вигляд поліному другого – четвертого ступеню. Для зручності введення сигналу в систему ЧПК передатну функцію доцільно лінеаризувати і перевести в цифрову форму. Для цього в схемі передбачено мікроконтролер DD2 з вбудованим аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Опорна напруга для АЦП формується випрямлячем A2 зі змінної напруги живлення вимірювального моста, що дозволяє виключити вплив на точність вимірювання напруги живлення пристрою.

Цифрований сигнал лінеаризується табличним способом. Таблиця лінеаризації формується на підставі результатів експериментальних вимірювань і заноситься в пам'ять мікроконтролера при налаштуванні датчика. Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролера представлена на рис. 5.

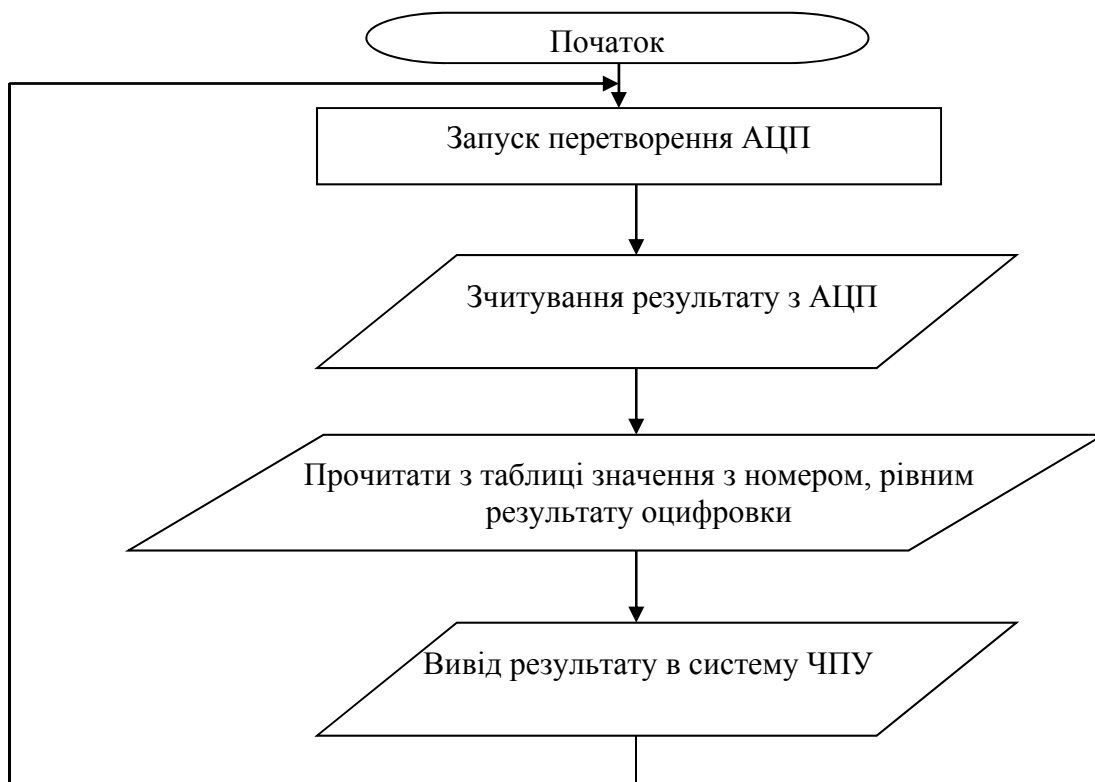


Рис. 5. Блок-схема алгоритму роботи мікроконтролера вбудованого датчика прогину

У цій блок-схемі останній блок «вивід результату в систему ЧПК» показаний укрупнено. Його деталізація залежить від обраного типу інтерфейсу і способу введення інформації в систему ЧПК. Для мікроконтролера, представленого на рис. 4, можливі три основних способи: 1 – у вигляді аналогового сигналу через аналоговий вхід ПЛК, 2 – через стандартний асинхронний інтерфейс RS232 або RS485, через синхронний інтерфейс SPI.

У всіх трьох випадках для використання отриманого сигналу в системі ЧПК для розмірної корекції потрібна розробка і установка спеціального системного програмного забезпечення для системи ЧПК. Однак ряд сучасних систем ЧПУ не надають можливості втручання в розмірну настройку ззовні. Для таких систем введення розмірної корекції може бути реалізоване шляхом втручання в сигнал датчика зворотного зв'язку приводу поперечної подачі. Таке втручання може бути виконано засобами окремого додаткового мікроконтролера, або засобами того ж мікроконтролера, який використовується для обробки сигналу датчика пружної деформації розточувальної оправки на рис. 4. Алгоритм введення корекції таким способом залежить від типу застосовуваного датчика зворотного зв'язку приводу поперечної подачі і типу його інтерфейсу.

ВИСНОВКИ

Запропоновані системи компенсації в комплексі із застосуванням вбудованих гідравлічних вібропоглиначів повинні забезпечити істотне підвищення продуктивності розточувальних операцій при забезпеченні необхідної точності. При цьому в ряді випадків для впровадження запропонованих систем потрібно тільки розробка додаткового програмного забезпечення. Завданнями подальших досліджень є розробка практичних програм і стендів, і експериментальна перевірка запропонованих технічних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Dynamic cutting for ce modeling and experimental study of industrial robotic boring.* Wang, Guifeng / Dong Huiyue, Guo Yingjie // *International journal of advanced manufacturing technology.* – Volume : 86 Issue: 1–4. – Pages: 179–190. – Published: SEP 2016.
2. *The use of carbide and particle-damped bar stoin crease tool over hangin the internalturning of hardened steel* / Suyama Daniellwao, Diniz Anselmo Eduardo, Pederiva Robson // *International journal of advanced manufacturing technology.* – Volume: 86 Issue: 5–8 Pages: 2083–2092. – Published: SEP 2016
3. *Experimental Investigation on Boring Tool Vibration Control Using MR Fluid Damper* / Mohan E, Natarajan U // *International journal of advanced manufacturing technology.* – Volume: 15 Issue: 1 Pages: 13–25. – Published: MAR 2016
4. *Optical device for the improvement of positioning accuracy inlarge machine tools* / Cocola L., Fedel M., Mocellin M. ; redacted: Lehmann PH., Osten W., Albertazzi A. // "Conference on Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII" Munich. – GERMANY Published: MAY 13-16, 2013.
5. *Optical measurement systems for industrial inspection VIII.* Серія книг: *Proceedings of SPIE.* Том : 8788 Номер статті: UNSP 87882D Оpubліковано діє до: 2013.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2018 р.