

УДК 681.33: 621.9

Майданюк С.В.; Плівак О.А.

НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського», м. Київ, Україна

МОДУЛЬ ВИМІРЮВАННЯ СИЛ РІЗАННЯ

Maidaniuk S., Plivak A.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (maysv3@gmail.com, aplivak@gmail.com)

MODULE THE MEASUREMENT OF FORCES CUTTING

***Мета.** Створення універсального комплексу по вимірюванню сил різання динамічних процесів в реальному часі.*

***Методика.** На базі аналізу датчиків для вимірювання сил різання, прийнято, для динамічних процесів, тензодатчик. Розглянуто та проаналізовано схеми підключення та живлення тензодатчиків, прийнято відповідні рішення для досягнення поставленої мети. Проаналізовано відповідність прийнятих рішень схемам в динамометрах. Проведено аналіз схем побудови систем збору даних на базі тензодатчиків. Враховуючи прийняті схеми живлення та підключення тензодатчиків, розроблено схему модуля по вимірюванню сил різання динамічних процесів.*

***Результати.** На основі розробленої схеми створено чотирьоканальний модуль по вимірюванню сил різання динамічних процесів, в реальному часі, з високими метрологічними характеристиками.*

***Наукова новизна.** Запропонована структурна схема модуля по вимірюванню сил різання на базі універсального динамометра.*

***Практична значимість.** Даний модуль можливо використовувати в лабораторних та науково-дослідних роботах для дослідження силових характеристик процесів різання.*

***Ключові слова:** структурна схема; датчик; тензорезистор; динамометр; вимірювання; сила різання.*

Вступ

Процес оброблення матеріалів різанням супроводжується великою кількістю фізико-хімічних явищ. До них відносяться явища, пов'язані із пластичним деформуванням та руйнуванням оброблюваного матеріалу в процесі зняття стружки, теплові, електромагнітні, хімічні, динамічні тощо. Ці явища взаємозалежні між собою та впливають один на одного. Той або інший характер протікання явищ залежить від змінних факторів, що визначають всю технологічну систему. Зміна одного з факторів будь-якої ланки технологічної системи приводить до зміни, в більшій або меншій мірі, кожного з явищ, супроводжуючих процес різання.

В процесі різання різальний клин інструменту, проникаючи в заготовку, деформує та відділяє шар матеріалу, перетворюючи його на стружку. При цьому, в процесі деформування матеріалу, виникають сили протидії. Стружка, переміщаючись по передній поверхні інструменту, призводить до виникнення сил тертя по передній поверхні. Між задньою поверхнею інструменту та оброблюваною деталлю також виникають сили тертя, в процесі переміщення інструменту вздовж оброблюваної деталі. Таким чином, на інструмент одночасно діє ряд сил, результуючу яких називають силою різання [1].

Сила різання є одним з найбільш значних показників процесу різання та використовується в процесі проектування інструменту, а також є одним з параметрів оптимізації при визначенні геометрії різальної частини інструментів, режимів різання та стійкості. Тому питання визначення сил різання є актуальним питанням.

Використання сил різання як комплексного показника роботи технологічної системи верстат-пристрій-інструмент-заготовка, викликає потребу в таких методах, які дозволяють проводити вимірювання сил різання з достатньою точністю та в режимі реального часу, з передачею результатів загальній системі керування.

Оскільки в сучасному машинобудуванні оброблення деталей проводиться з високими швидкостями різання та подачами, а також використовується багатозубий різальний інструмент, то, відповідно, виникає потреба у вимірюванні сил різання швидкоплинних, динамічних процесів, які характеризуються великою частотою змінювання характеристик процесу різання. При цьому виникає проблема вибору технічних засобів визначення сили різання.

Сучасний рівень наукових досліджень зобов'язує дослідників використовувати для визначення складових сили різання комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи різного призначення та конфігурації. Однак відомі пристрої використовують не завжди адаптовані до умов вимірювань, програмних та апаратних засобів. У зв'язку з цим розробка таких систем є актуальною задачею.

Мета роботи полягає в створенні універсального комплексу по вимірюванню сил різання динамічних процесів в реальному часі.

Дослідження

Сучасні силовимірювальні комплекси та системи збору даних використовують різноманітні методи визначення сил різання, але найбільшого поширення одержав метод безпосереднього вимірювання, а саме метод пружної деформації за допомогою силовимірювальних датчиків. Даний метод дозволяє визначити не тільки величину середнього значення сили, а й фіксувати її зміну в часі; одночасно вимірювати кілька складових сили різання; виконувати вимірювальні пристрої у вигляді компактних і зручних для обслуговування силовимірювальних датчиків.

Оскільки основним елементом, що сприймає сили є силовимірювальний датчик, то перш за все потрібно розглянути їх види та принцип дії.

Загальний принцип силовимірювальних датчиків полягає в тому, що вимірюване зусилля передається на чутливий пружний елемент, викликаючи його деформацію. За способом вимірювання деформації пружного елемента силовимірювальні датчики поділяються на наступні види [2, 3, 4]:

- тензорезисторні датчики - мають найбільшу область застосування та використовуються як для статичних, так і для динамічних вимірювань в діапазоні вимірювання сил від 5Н до 5МН, з високою точністю вимірювання, меншою 0,03%;

- індуктивні датчики - характеризуються великим вимірювальним сигналом, який повинен бути обмежений при динамічних і короткочасних статичних вимірюваннях, використовуються в діапазоні вимірювання сил від 200 кН до 10 МН;

- магнітопружні датчики – призначені, переважно, для грубих квазістатичних промислових вимірювань;

- п'єзоелектричні датчики - відрізняються великою жорсткістю та застосовуються для вимірювання динамічних і квазістатичних сил в діапазоні частот вище 100 кГц, та зовсім непридатні для вимірювання статичних сил.

Найчастіше, при визначенні сил різання, використовується динамометри на основі тензорезисторних датчиків – тензорезисторні динамометри, які придатні як для статичних, так і для динамічних вимірювань. Внаслідок великої жорсткості ці динамометри відрізняються досить високою власною частотою, яка може досягати декількох кілогерц. Слід, однак, мати на увазі, що приєднувальні маси значно знижують власну частоту f інерційної системи, що складається з пружного елемента та маси.

Чим вище частота в вимірювальній техніці, тим більш проблематичною та теоретичною стає задача вимірювання. Метод використання тензорезисторних датчиків добре підходить також у випадках з більш високою частотою та тривалому знакозмінному навантаженні, однак, якщо при динамічних вимірюваннях виникає невизначеність, то це викликано не недоліком датчиків, а власної складністю динаміки.

Одним з тензорезисторних динамометрів, який застосовується при дослідженнях процесів різання для вимірюванні сил різання є динамометр конструкції ВНДІ – універсальний динамометр УДМ [5]. Динамометр УДМ призначений для вимірювання сил різання при різних видах оброблення: точіння, свердління, фрезерування тощо. За допомогою динамометра УДМ можна одночасно вимірювати три взаємно перпендикулярні складові сили різання, а також крутний момент, при цьому, показання динамометра не залежать від того, в якій точці буде прикладена сила різання.

В якості чутливого елемента динамометра виступають тензометричні датчики (тензодатчики), принцип роботи яких заснований на зміні опору провідника при механічному впливі на нього. Конструктивно датчик динамометра УДМ, що сприймає силу, складається з наступних елементів [5]:

- пружний елемент – тіло що сприймає навантаження; конструктивно виконаний у вигляді кільця та виготовлений з легованої вуглецевої сталі, а для отримання стабільних характеристик попередньо термооброблений;

- тензорезистор - фольговий або дротяний резистор, приклеєний до пружного елемента, що змінює свій опір пропорційно деформації пружного елемента, яка, в свою чергу, пропорційна навантаженню;

- корпус датчика - призначений для захисту пружного елемента та тензорезистора від механічних пошкоджень і впливу навколишнього середовища.

Тензорезистори використовуються для вимірювання деформації в твердих тілах. Принцип дії тензорезистора заснований на зміні електричного опору твердого тіла при його деформації прикладеною силою. Конструктивно тензорезистор складається з дуже тонкого дроту або, більш часто, металеві фольги, сформованої у вигляді змійки та нанесеної на підкладку, яка безпосередньо приклеюється до пружного елемента або випробуваного тілу [3, 4].

Довжина чутливого елемента тензорезистора та довжина його підкладки змінюються в залежності від температури. Тому, незважаючи на спеціальні заходи, що вживаються при виготовленні тензодатчиків їх виробниками, існує проблема зниження температурної чутливості. Температурна чутливість визначається двома фізичними явищами: залежністю матеріалу провідника тензорезистора від температури та паразитним тензорезистивним ефектом, який виникає внаслідок неузгодженості температурних коефіцієнтів розширення тензорезистора та матеріалу об'єкта, на який наклеєний тензорезистор.

Вимірювання за допомогою тензодатчиків вимагають рестрації дуже малих змін опору. Щоб вимірювати мале змінювання опору та компенсувати температурні похибки, тензодатчики практично завжди

використовують в мостовій схемі – міст Уїтстона (рис. 1,а), підключеного до джерела напруги або струму, джерела живлення, збудження моста.

Загальноприйнятого стандарту для живлення моста не існує. Напруга живлення моста має бути якомога більшою, щоб збільшити відношення сигналу до шуму, і в той же час досить малою, щоб мінімізувати похибку, викликану самогріванням датчика. Особливі вимоги пред'являються до точності та стабільності напруги живлення моста.

У напівмостовій схемі (рис. 1,б) можна використовувати також два тензодатчики з некомпенсованою температурною похибкою, якщо один з них працює на розтяг, другий - на стиск. Таким чином можна підвищити чутливість схеми вимірювання в 2 рази та одночасно компенсувати температурну похибку.

Таким чином, виходячи з вище наведеного, доцільною схемою вимірювання за допомогою тензорезисторів є напівмостова схема (рис. 1,б).

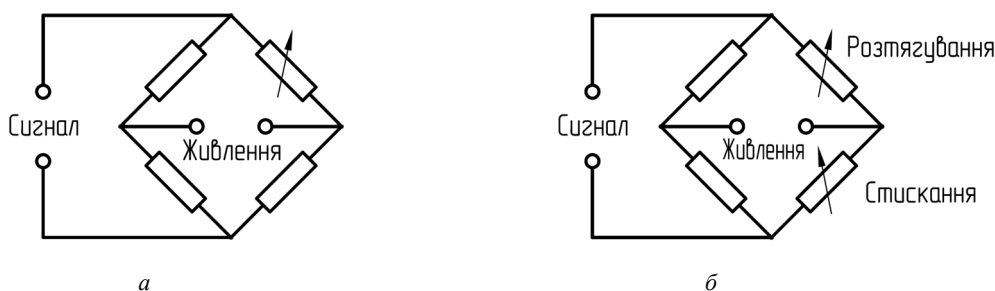


Рис. 1. Мостова схема з'єднання тензорезисторів:
а – міст Уїтстона з джерелом напруги, б – напівмостова схема під'єднання тензорезисторів для компенсації температурної похибки

В конструкції динамометра УДМ тензорезистори з'єднані за напівмостовою схемою (рис. 1,б), що не суперечить прийнятій схемі підключення та дає можливість підвищити чутливість схеми вимірювання та компенсувати температурну похибку тензорезисторів. Схеми розташування тензодатчиків в УДМ та їх з'єднання наведені на рис. 2 [5].

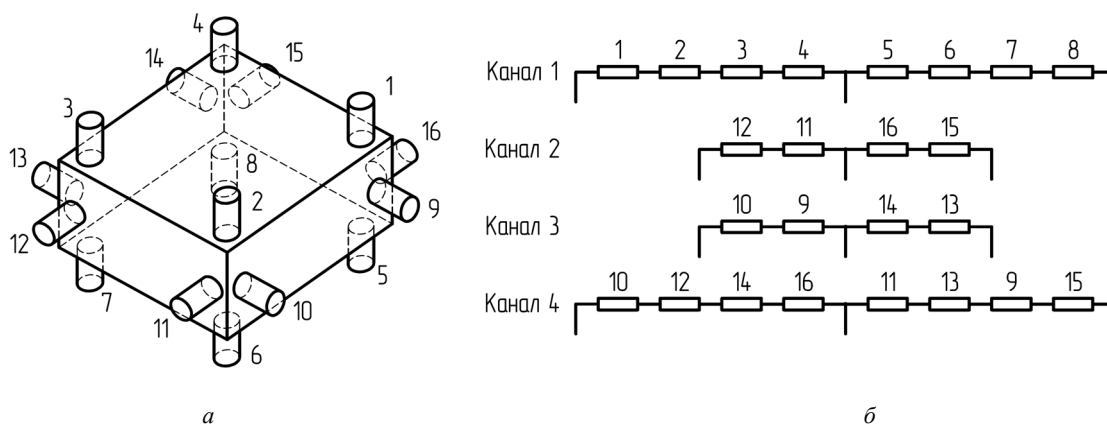


Рис. 2. Схеми: а – розташування тензодатчиків; б – з'єднання тензодатчиків в динамометрі УДМ

Для точних вимірювань дуже малих аналогових сигналів за допомогою систем збору даних, зазвичай потрібно щось більше, ніж просте підключення датчика до схеми підсилювача з подальшою подачею посиленого сигналу на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Щоб домогтися високої роздільної здатності та точності у вимірювальній системі, потрібно докласти зусиль при виборі джерела збудження перетворювача, а також при розробці схеми передачі дуже малого аналогового сигналу з виходу перетворювача на вхід АЦП. На рис. 3 показана узагальнена схема системи збору даних на базі тензодатчиків [6, 7].

Тензодатчики можуть збуджуватися за допомогою контрольованого струму або напруги. У системах збору даних, зазвичай, застосовується збудження постійною напругою, у промислових пристроях, там, де є багато перешкод, струмове збудження, в загальному випадку, є кращим, тому що дана схема менш сприйнятлива до перешкод [6, 8].

Крім того, збудження датчика може проводитися за допомогою сигналу або постійного, або змінного струму; кожен метод має свої переваги та недоліки. Постійний сигнал використовується більш широко, ніж змінний, так як система зі збудженням датчика постійним струмом дещо простіша та відрізняється простотою застосування та низькою вартістю; але їй притаманні значні недоліки – величина сигналу збудження датчика повинна бути достатньою, щоб зміни сигналу датчика були помітні на тлі шумів, постійного зміщення та

дрейфу зміщення. Також негативною стороною схеми постійного струму є труднощі поділу вимірюваного сигналу та паразитного сигналу зміщення підсилювача і сигналу паразитних термопар. Зміщення схильне до дрейфу; воно змінюється непередбачувано при зміні температури, а також під дією шуму виду $1/f$.

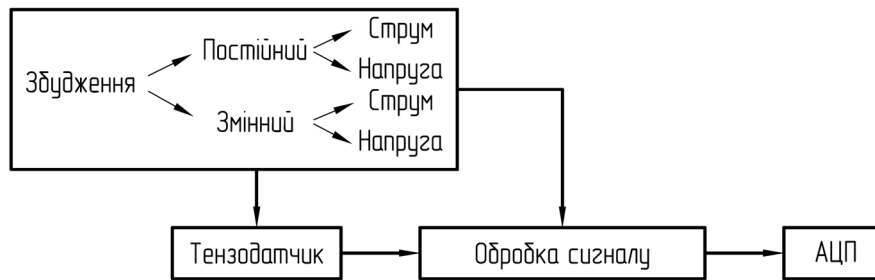


Рис. 3. Узагальнена схема системи збору даних на базі тензодатчиків

Якщо очікується значна похибка по постійному струму та низькочастотний шум, то більш ефективним буде збудження датчика змінним струмом. Джерело збудження датчика періодично перемикає полярність сигналу збудження, а амплітуда сигналу вимірюється і усереднюється для отримання результату. Таким чином, при збудженні змінним струмом пригнічується вплив шумів виду $1/f$ і сигналів паразитних термопар на вимірюваний сигнал. Це дозволяє значно зменшити амплітуду сигналу збудження, що, в свою чергу, зменшує похибки, пов'язані з саморозігрівом тензорезистора. Ці переваги зазвичай переважають недоліки, система стає трохи більш складною та дорогою; виникає необхідність враховувати час встановлення сигналу після перемикавання полярності збудження.

Таким чином, для збудження тензодатчиків, при динамічних вимірюваннях сил різання, більш доцільним буде збудження датчика змінним струмом [6, 7, 8, 9].

Схема підключення тензодатчика може бути різною, двох-, трьох- або чотирьох-, які відрізняються точністю передачі сигналу від тензодатчиків [3].

Двопровідна схема забезпечує найменшу точність з наведених варіантів підключення, так як опір виводів і зміна опору в залежності від температури призводить до появи значної похибки.

Трипровідна конфігурація володіє значними перевагами в порівнянні з двохпровідною схемою, однак опір виводів і температурний дрейф все одно впливають на точність, хоча похибка зменшується в два рази, в порівнянні з двопровідною системою.

Чотирипровідна конфігурація (рис. 4) забезпечує кращу точність, за рахунок усунення похибок, пов'язаних з опором і температурним дрейфом опору вимірювальних проводів. Система може бути спроектована з загальним джерелом збудження датчика та опорної напруги або з незалежними джерелами.

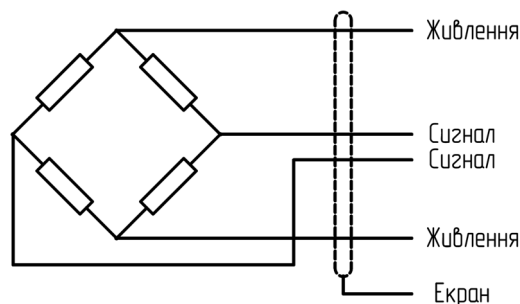


Рис. 4. Чотирипровідна схема підключення тензодатчика

Отже, скрізь, де можливо, найкращим рішенням для вимірювальної системи з високою роздільною здатністю буде застосування 4-провідної конфігурації підключення датчиків зі збудженням змінним струмом.

На основі вище наведеного була розроблена структурна схема модуля вимірювання сил різання з амплітудною модуляцією несучої частоти, на основі динамометра УДМ (рис. 5).

Принцип роботи модуля наступний. Вимірювальний міст (ВМ) являє собою напівмостову схему з'єднання тензодатчиків в міст Уїтсона, розташовану в динамометрі УДМ. Крім тензорезисторів, в схему моста Уїтсона входять додаткові схемні елементи, що використовуються для компенсації різних, залежних від температури, ефектів, таких, наприклад, як нестабільність нуля, зміна модуля пружності та теплового розширення матеріалу чутливого елемента, змінювання чутливості тензорезистора, а також, лінеаризації характеристики тензорезисторного силорезимірювального датчика.

Живлення, збудження датчиків та обробка сигналів датчиків виконується тензопідсилювачем ТП. Збудження тензодатчиків синусоїдальною напругою частотою f (несуча частота) здійснюється генератором I .

Для неспотвореного сприйняття та посилення сигналу сили різання, несуча частота генератора повинна в 5-8 разів перевищувати верхню складову частоти вимірюваного сигналу, тому генератор 1 має можливість змінювати несучу частоту f .

Диференціальний сигнал на виході вимірювального моста - його розмах становить десятки або сотні мілівольт - пропорційний силі різання та напрузі збудження, що прикладається до вимірювального моста та являє собою напругу тієї ж частоти, промодульовану по амплітуді вимірювальним процесом, датчиком, та, зазвичай, містить шум, а також похибки зсуву. Для того щоб з високою точністю виміряти цю невелику диференціальну напругу в присутності великої синфазної напруги, використовується первинний підсилювач 2 з властивою йому здатністю пригнічувати синфазних сигнал. Первинний підсилювач являє собою інструментальний підсилювач з коефіцієнтом підсилення 1 та фільтр, для вилучення шумів.

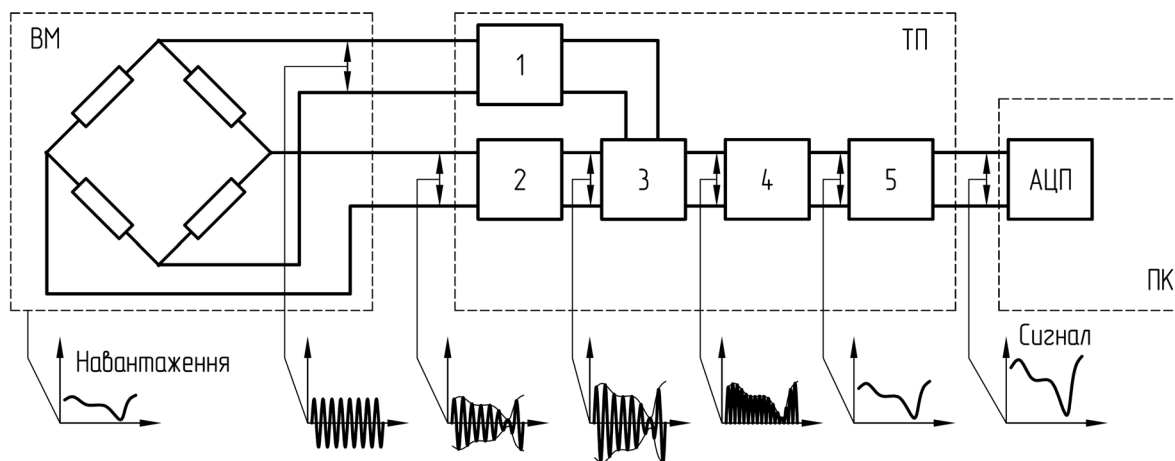


Рис. 5. Структурна схема модуля вимірювання сил різання:

ВМ – вимірювальний міст, ТП – тензопідсилювач, 1 – генератор, 2 – первинний підсилювач, 3 – демодулятор, 4 – фільтр, 5 – вихідний підсилювач, ПК – персональний комп'ютер, АЦП – аналого-цифровий перетворювач

Модульований сигнал підсилюється підсилювачем змінного струму та подається на фазочутливий демодулятор 3, в якості якого виступає суматор, та який виділяє не тільки огинаючу сигналу, але і його полярність, що необхідно при роботі датчиків в умовах знакозмінного навантаження.

В результаті демодуляції на виході фільтра 4 виникає струм, що змінюється за законом вимірюваного процесу, після чого він передається на вихідний підсилювач 5. Вихідний підсилювач виконаний у виді багатокаскадного інструментального підсилювача з поступовим підсиленням сигналу, що гарантує відсутність появи шкідливих шумів, а також дає можливість підсилити сигнал до величин придатних для реєстрації АЦП.

Сигнал з тензопідсилювача ТП передається на АЦП, розташовану в персональному комп'ютері, де відбувається перетворення аналогового сигналу в цифровий та обробка отриманого сигналу. Тензопідсилювач може бути сконструйований на операційних підсилювачах і дискретних елементах, однак застосування спеціалізованих інструментальних підсилювачів сприяє зниженню витрат та зменшенню розмірів пристрою.

Таким чином, на підставі розробленої структурної схеми (рис. 5) було сконструйовано чотириканальний модуль вимірювання сил різання (рис. 6, а), до якого під'єднується багатокомпонентний силосилувимірювальний динамометр конструкції УДМ (рис. 6, б), а сам він, через плату АЦП, під'єднується до IBM-сумісного комп'ютера. Модуль вимірювання сил різання (рис. 6, а) забезпечує вимірювання сил різання по чотирьох каналах силосилувимірювального датчика одночасно. Його побудовано за модульним принципом та складається з наступних конструктивних елементів: блок живлення 1, що виконує живлення всього модуля, чотири окремі вимірювальні модулі (канали) які складаються з генератора 2 для збудження тензодатчиків динамометра, багато каскадного підсилювача 3 з демодулятором, який дозволяє вибрати індивідуально коефіцієнт підсилення, за допомогою перемикачів 4, в широкому діапазоні.

Даний модуль було апробовано при виконанні науково-дослідних робіт [10 - 14]. В роботі [10] досліджувалися силові характеристики при нарізанні метричної різьби мітчиками в деталях з титанового сплаву на універсально-фрезерному верстаті (рис. 7, а), при цьому досліджувалося дві складові сили різання: осьова сила P_o , що відтискає інструмент та направлена вздовж осі інструменту та крутний момент $M_{кр}$, який призводить до розкручування інструменту. Випробування проводилися з частотою дискретизації (частота знімання інформації, що характеризує швидкість модуля) 100Гц.

В роботах [11 - 13] досліджувалися силові характеристики процесу фрезерування різними конструкціями фрез при обробленні різних матеріалів, при цьому досліджувалося три складові сили різання: сила подачі P_s , що навантажує механізм подачі верстата; вертикальна сила відтискання P_n , що направлена перпендикулярно до стола верстата та бокова сила P_a , що направлена вздовж осі інструменту.

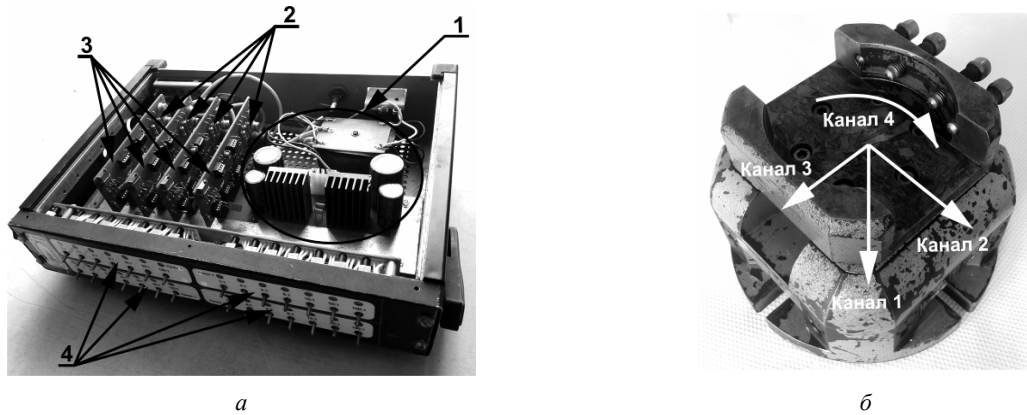


Рис. 6. Модуль вимірювання сил різання (чотириканальний):

а) фотографія модуля: 1 – блок живлення, 2 – генератори для збудження тензодатчиків, 3 – підсилювачі багатокаскадні з демодуляторами, 4 – встановлення коефіцієнта підсилення кожного каналу багатокаскадних підсилювачів 3; б) схема під’єднання каналів до динамометра УДМ

В роботі [11] досліджувалися параметри якості оброблення деталей із загартованих сталей сферичними кінцевими фрезами на верстаті з числовим програмним керуванням (рис. 7, б), частота дискретизації складала 1кГц; при дослідженні процесу фрезерування алюмінієвих деталей кінцевими фрезами на універсально-фрезерному верстаті [12] (рис. 7, в) частота дискретизації складала 100Гц; в роботі [13] досліджувався вплив мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ на процес фрезерування дисковими фрезами з різнонаправленими зубцями сталей аустенітного класу на універсально-фрезерному верстаті (рис. 7, г), частота дискретизації складала 200Гц.

В процесі дослідження стійкості прорізних фрез при обробленні конструкційних сталей [14] на універсально-фрезерному верстаті (рис. 7, д) досліджувалося дві складові сили різання: сила подачі P_s , що навантажує механізм подачі верстата та вертикальна сила відтискання P_n , що направлена перпендикулярно до стола верстата, частота дискретизації складала 1кГц.

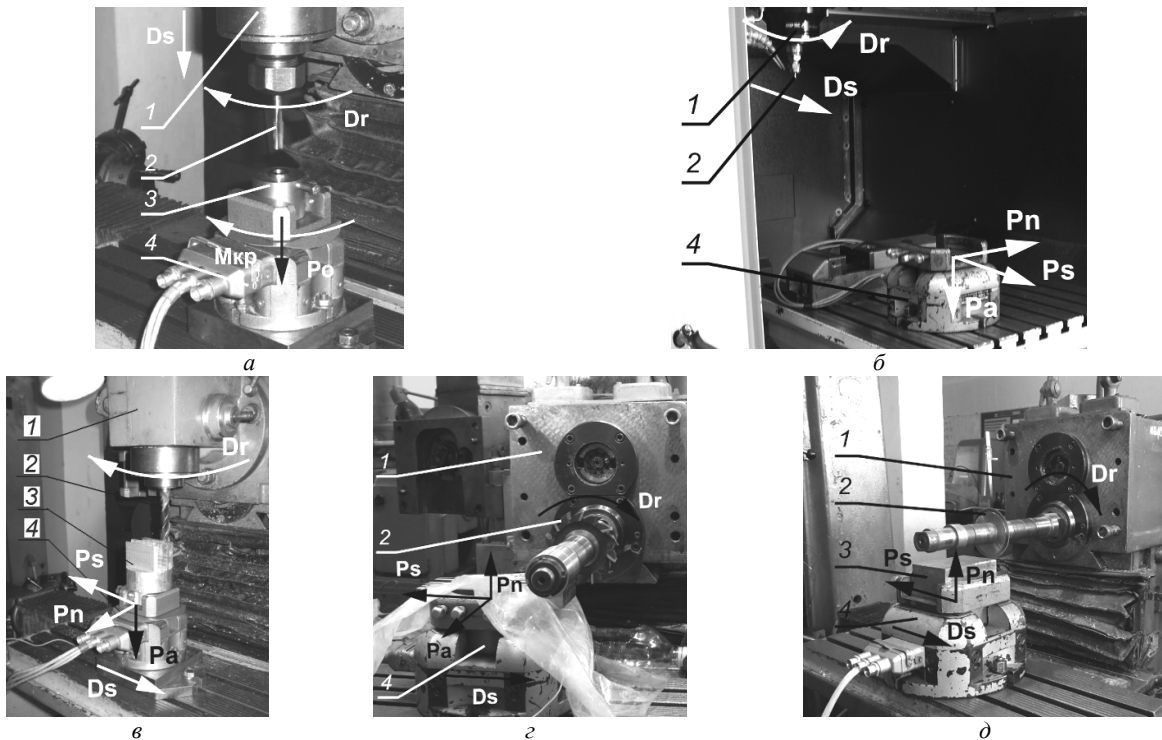


Рис. 7. Практичне застосування модуля вимірювання сил різання:

а) нарізання різьби мітчиками; б) фрезерування сферичними кінцевими фрезами; в) фрезерування кінцевими фрезами; г) фрезерування дисковими фрезами з різнонаправленими зубцями; д) фрезерування прорізними фрезами: 1 – шпиндель верстата, 2 – інструмент, 3 – заготовка, 4 – силовимірювальний датчик УДМ; D_r – головний рух різання; D_s – рух подачі; P_o , $M_{кр}$, P_n , P_s , P_a – складові сили різання

Модуль вимірювання сил різання спроектовано таким чином, що:

- за необхідності, є можливість змінювати несучу частоту генератора для збудження тензодатчиків, що, в свою чергу, дозволяє змінювати частоту дискретизації, тобто частоту знімання інформації, що характеризує швидкодію вимірювання;
- дозволяє під'єднувати до нього різноманітні тензорезисторні силовимірювальні датчики різних конструкцій та виконань,
- модуль можна під'єднувати до різноманітних аналого-цифрових перетворювачів.

Висновки

Таким чином, розроблено конструкцію та сконструйовано модуль вимірювання сил різання (рис. 6, а), який входить в систему визначення сил різання.

Модуль вимірювання сил різання побудовано за модульним принципом та розташовано в окремому зовнішньому корпусі. До модуля "на вхід" під'єднується силовимірювальний датчик, а "вихід" під'єднується до аналого-цифрового перетворювача.

Для забезпечення вимірювання сил різання по чотирьох незалежних каналах силовимірювального датчика одночасно його оснащено чотири незалежними аналогічними вимірювальними модулями, які складаються з джерела збудження тензомоста силовимірювального датчика – генератора, багато каскадного тензопідсилювача сигналу та демодулятора. Така схема побудови дозволяє індивідуально налаштовувати вимірювальні модулі для кожного окремого вимірювального каналу сил різання для різних умов роботи.

Таким чином, за рахунок розробленої раціональної структурної схеми та виконання за блочно-модульним принципом, взаємної ізоляції силової та інформаційної частин та окремих каналів вдалося досягти високих метрологічних характеристик— швидкодія.

Модуль можливо використовувати в лабораторних та науково-дослідних роботах для дослідження силових характеристик процесу різання.

Анотація.

Цель. Создание универсального комплекса по измерению сил резания динамических процессов в реальном времени.

Методика. На базе анализа датчиков для измерения сил резания принято, для динамических процессов, тензодатчик. Рассмотрены и проанализированы схемы подключения и питания тензодатчиков, приняты соответствующие решения для достижения поставленной цели. Проанализировано соответствие принятых решений схемам в динамометрах. Проведен анализ схем построения систем сбора данных на базе тензодатчиков. Учитывая принятые схемы питания и подключения тензодатчиков, разработана схема модуля по измерению сил резания динамических процессов.

Результаты. На основе разработанной схемы создан четырехканальный модуль по измерению сил резания динамических процессов, в реальном времени, с высокими метрологическими характеристиками.

Научная новизна. Предложенная структурная схема модуля по измерению сил резания на базе универсального динамометра.

Практическая значимость. Данный модуль можно использовать в лабораторных и научно-исследовательских работах для исследования силовых характеристик процессов резания.

Ключевые слова: структурная схема; датчик; тензорезистор; динамометр; измерения; сила резания.

Abstract.

Purpose. Creation of a universal complex on measurement of forces of cutting of dynamic processes in real time.

Methodology. On the basis of the analysis of sensors for measurement of forces of cutting it is accepted, for dynamic processes, the strain sensor. Schemes of connection and power supply of strain sensors are considered and analysed, the relevant decisions for achievement of a goal are made. correspondence of the made decisions to schemes in dynamometers is analysed. The analysis of schemes of creation of data collection systems on the basis of strain sensors is carried out. Considering the accepted power supply circuits and connections of strain sensors, the scheme of the module on measurement of cutting forces of dynamic processes is developed.

Results. On the basis of the developed scheme the four-channel module on measurement of cutting forces of dynamic processes, in real time, with high metrological characteristics is created.

Scientific novelty. The offered block sensor of the module on measurement of cutting forces on the basis of a universal dynamometer.

Practical importance. This module can be used in laboratory and research works for research of power characteristics of cutting processes.

Keywords: block sensor; sensor; resistive-strain sensor; dynamometer; measurements; cutting force.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Розенберг Ю.А. Силы резания и методы их определения : в 2 ч. / Ю.А. Розенберг, С.И. Тахман – Курган : КМИ, 1995. Ч. 1: Общие положения. – 1995. – 128 с.
2. Обзор силоизмерительных датчиков [електронний ресурс] // Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) GmbH. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://www.anwit.kiev.ua/article/24/t/page/4/>

3. *Тензорезисторы* [электронний ресурс] // Энциклопедия АСУ ТП. – Режим доступу до інтернет-сторінки: http://www.bookasutp.ru/Chapter6_3_5.aspx
4. Wang L., Tan K.C. *Modern Industrial Automation Software Design. Principles and Real-World Applications.* / L. Wang, K.C. Tan - John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2006. - 313 p.
5. *Руководство к универсальному динамометру УДМ конструкции ВНИИ.* / [сост. Мухин Б.И., Синельщикова Т.К.; ред. Мартынова А.Д.] – [2-е изд., перераб. и дополн.] – М.; ВНИИ, 1969. – 21с.
6. *ОГреди А. Методы возбуждения измерительных датчиков и применение ИС AD7711 и AD7730* [электронний ресурс] // Рынок микроэлектроники. – Режим доступу до інтернет-сторінки: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_03/stat_50.htm
7. *Динамические характеристики тензометрических измерительных систем для прочностных испытаний* [электронний ресурс] // Инженерное бюро авиационного института. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://inburo.com.ua/ru/pages/58/>
8. *Герштенхабер М. Схема возбуждения мостового тензодатчика переменным током* [электронний ресурс] / AN-683R *Руководство по применению* // Analog Devices, Inc. – 2003. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://www.analog.com/media/ru/technical-documentation/application-notes/38829122935342AN683R.pdf>
9. *Теория тензоизмерений, схемы подключения тензорезисторов* [электронний ресурс] // Zetlab. Простые решения сложных задач. – Режим доступу до інтернет-сторінки: <http://www.zetlab.ru/support/articles/tenzometriya/teoriya-tenzoizmereniy-skhemy-podklyucheniya-tenzorezistorov-k-zetsensor/>
10. *Красновид Д. О. Підвищення працездатності мітчиків для обробки титану та титанових сплавів: дис. ... кандидата техн. наук: 05.03.01 / Красновид Дмитро Олександрович. — Київ, 2010. — 159 с.*
11. *Інформаційна система проектування кінцевих фрез : звіт про НДР (заключ.) / НТУУ "КПІ" ; кер. роб. О. Охріменко. - К., 2010. - 245 л. + CD-ROM. - Д/б №2270-п.*
12. *Катрук О.В. Дослідження силових характеристик фрезерування деталей з алюмінію* [Текст] / О.В. Катрук, Ю.Й. Бесарабєць, О.А. Плівак // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ». – 2011. — № 62. — С.175-182.
13. *Ванієв Е. Р. Зміцнююча дія МОТС при фрезеруванні сталей аустенітного класу: дис. ... кандидата техн. наук: 05.03.01 / Ванієв Ельдар Рустемович. – Тернопіль, – 2014. – 171 с.*
14. *Балицька Н. О. Підвищення працездатності прорізних фрез: дис. ... кандидата техн. наук: 05.03.01 / Балицька Наталія Олександрівна. – Київ, – 2015. – 165 с.*

References

1. Rozenberg, Ju. A. and Tahman, S.I. (1995), "Part 1. Obshhie polozheniya", *Sily rezaniya i metody ih opredeleniya* [Forces of cutting and methods of their definition], KMI, Kurgan, Russia.
2. Review of tension sensors, "Obzor siloizmeritel'nyh datchikov", available at: <http://www.anwit.kiev.ua/article/24/t/page/4/>
3. Tensoresistors, "Tenzorezistory", available at: http://www.bookasutp.ru/Chapter6_3_5.aspx.
4. Wang, L. and Tan, K.C. (2006), *Modern Industrial Automation Software Design, Principles and Real-World Applications.* Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons Inc. . . .
5. Muhin, B.I. and Sinel'shnikova, T.K. (1969), *Rukovodstvo k universal'nomu dinamometru UDM konstrukcii VNII* [Manual for universal dynamometer of UDM of a design of all-union scientific research institute], VNII, Moscow, Russia.
6. O'Gredi, A., *Metody возбуждения izmeritel'nyh datchikov i primeneniye IS AD7711 i AD7730* [Methods of excitation of measuring sensors and application of IS AD7711 and AD7730], available at: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_03/stat_50.htm.
7. *Dinamicheskie harakteristiki tenzometricheskikh izmeritel'nyh sistem dlja prochnostnyh ispytaniy* [Dynamic characteristics of tensometric measuring systems for strength tests], available at: <http://inburo.com.ua/ru/pages/58/>
8. Gershtenhaber, M. (2003), *Shema возбуждения mostovogo tenzodatchika peremennym tokom* [Scheme of excitation of the bridge strain gage alternate current"], available at: <http://www.analog.com/media/ru/technical-documentation/application-notes/38829122935342AN683R.pdf>.
9. *Teoriya tenzoizmerenij, shemy podklyucheniya tenzorezistorov* [Theory of tenzoizmereniye, schemes of connection of tensoresistors] available at: <http://www.zetlab.ru/support/articles/tenzometriya/teoriya-tenzoizmereniy-skhemy-podklyucheniya-tenzorezistorov-k-zetsensor/>.
10. Krasnovyd, D.O. (2010), "Increase of operability of taps for processing of titanium and titanic alloys", dys. ... kand. tehn. nauk, Kyiv, Ukraina.
11. Ohrimenko, O. (2010), Information system of design of end mills: report on NIR [Informacijna systema proektuvannja kincevyh frez : zvit pro NDR], NTUU "KPI"; Kyiv, Ukraine.
12. Katruk, O.V., Besarabec', Ju.J. and Plivak, O.A. (2011), "Research of power characteristics of milling of details from aluminum", *Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, no. 62, pp.175-182.
13. Vanijev, E. R. (2014), The strengthening action of the environments MCTW when milling staly an austenitic class [Zmicnjujucha dija MOTS pry frezeruvanni stalej austenitnogo klasu: dys. ... kand. tehn. nauk], Ternopil', Ukraine.
14. Balyc'ka, N. O. (2015), Increase of operability of pro-carved mills [Pidvyshhennja pracezdatnosti proriznyh frez: dys. ... kand. tehn. nauk], Kyi'v, Ykraine.

Подана до редакції 13.04.2016