

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра Машинобудування та прикладної механіки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня *магістр*

спеціальності *133 галузеве машинобудування*

на тему «Підвищення точності роботи приводу подачі при високошвидкісній
токарній обробці»

Виконав: студент групи ГМ-20дм

Несмашний А.М.
(прізвище, та ініціали)

_____ (підпис)

Керівник Сергієнко О.В.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Завідувач кафедри Соколов В.І.
(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота за темою «Підвищення точності роботи приводу подачі при високошвидкісній токарній обробці»: 84 с., 3 табл., 29 рис., 31 джерело.

ТОКАРНИЙ ВЕРСТАТ, ВИСОКОШВИДКІСНА ОБРОБКА, ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ, ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.

Об'єкт дослідження – процес підвищення точності роботи приводу подачі при високошвидкісній токарній обробці.

Предмет дослідження – технічні засоби підвищення точності при високошвидкісному точінні.

Мета магістерської роботи полягає в розробці нових технічних засобів підвищення точності і швидкодії приводів подач металорізальних верстатів при високошвидкісному точінні.

Методи дослідження – теоретичні дослідження проведені з використанням законів металообробки, теорії різання, а також теорії ймовірностей та методів обчислювальної математики для обробки експериментальних даних. Достовірність результатів визначена на основі комп'ютерних та експериментальних досліджень на комп'ютерних моделях і лабораторних установках із застосуванням статистичних методів обробки даних.

У першому розділі проведено аналіз методів підвищення точності роботи приводу подачі при високошвидкісній токарній обробці

В другому розділі проаналізовано існуючі методи підвищення точності кінематичних ланцюгів приводу подачі.

У третьому розділі виконано аналіз похибок системи відліку переміщень робочого органу верстата та існуючі способи їх зменшення.

У четвертому розділі розроблено пристрої, які дають можливість зменшити похибки системи відліку переміщень робочого органу верстата.

В останньому розділі розглянуто вимоги охорони праці та техніки безпеки при проведенні науково-дослідних робіт.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	6
ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ	8
1.1 Високошвидкісне точіння і супутні йому похибки обробки	8
1.2 Похибки, що вносяться приводами подач верстатів для високошвидкісної обробки	15
2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КІНЕМАТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИВОДУ ПОДАЧІ.....	29
2.1 Огляд методів підвищення точності кінематичних ланцюгів	29
2.2 Способи усунення зазорів в з'єднаннях, опорах і передачах.....	33
3 ПОХИБКИ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВЕРСТАТА ТА СПОСОБИ ЇХ ЗМЕНШЕННЯ	38
3.1 Підвищення точності передавального механізму і пари гвинт-гайка	38
3.2 Пристрої для визначення похибки системи відліку переміщень	39
3.3 Методика оптимального юстирування кодового датчика положення	54
3.4 Система відліку переміщень робочого органу машини з компенсацією похибки.....	58
4 РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК СИСТЕМИ ВІДЛІКУ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВЕРСТАТА	61
4.1 Спосіб зменшення похибок системи відліку переміщень	61
4.2 Розрахунок сумарної похибки системи відліку переміщень	67
4.3 Методика налаштування системи відліку переміщень робочого органу верстата.....	71
4.4 Алгоритм налаштування компенсуючого ланцюга системи відліку переміщень робочого органу верстата.....	72

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО- ДОСЛІДНИХ РОБІТ	75
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	82

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВШО – високошвидкісна обробка

ПКП – пристрій керування приводу

ПП – привід подачі

ЕД – електродвигун

ПМ – передавальний механізм

КДП – кодовий датчик положення

СЗЗ – сигнал зворотного зв'язку

ВП – власний привід

ХГ – ходовий гвинт

СЗП – система звіту переміщень

ДШ – датчик швидкості

ДЗЗ – датчик зворотного зв'язку

СВП – система відліку переміщень робочого органу верстата

ЗВ – збурюючий вплив

КД – контролер двигуна

РО – робочий орган

ВСТУП

На продуктивність, точність, надійність і довговічність металорізального обладнання суттєво впливають динамічні процеси, що утворюються в зоні обробки, в механічних, електричних і гідравлічних системах, а також в системах управління і регулювання верстатів. У зв'язку з цим постійно зростають вимоги до показників якості обробки виробів на металорізальних верстатах. Особливо це пов'язано з використанням обладнання в режимах високошвидкісної обробки, що дозволяють отримати високу якість поверхні деталей і виключити операції фінішної обробки, що веде до зниження витрат на обробку.

В даній роботі в якості модернізованого об'єкта обрані верстати токарної групи, як найбільш поширені в машинобудуванні та металообробці, в порівнянні з металорізальними верстатами інших груп.

Для підвищення точності токарних верстатів в режимі швидкісної обробки будуть розглянуті методи зниження похибок приводу подачі. Зростання вимог до точності обробки значно збільшило кількість дорогих верстатів з числовим програмним керуванням, що використовуються на підприємствах, та які мають широкий спектр технологічних можливостей. Але можливість придбати таке обладнання не завжди є, в першу чергу, через високу ціну. Тому в роботі пропонується використовувати обладнання, яке вже є на підприємстві.

Таким чином, тема даної роботи, направлена на розробку нових технічних засобів підвищення точності і швидкодії приводів подач існуючих металорізальних верстатів при високошвидкісному точінні є актуальною.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ

1.1 Високошвидкісне точіння і супутні йому похибки обробки

Одним із шляхів вдосконалення обробки деталей на виробництві є використання спеціальних високошвидкісних технологій і високошвидкісного устаткування.

Методи високошвидкісної обробки (ВШО) своїм впровадженням зобов'язані розповсюдженню інтенсифікації виробництва, вимога якої - швидкість, підвищена точність і економічна ефективність в процесах виготовлення як елементів технологічної оснастки в період підготовки виробництва, так і самої продукції.

У токарних операціях обробки різанням ВШО можливо, як правило, при використанні ультрасучасних верстатів з ЧПУ, частота обертання шпинделя у яких перевищує 15000 хв^{-1} , може досягати 40000 , 60000 , 120000 хв^{-1} і більше. Робота при таких режимах має суттєві особливості, що визначають не тільки саму роботу, що використовується верстат і інструмент, а й підготовку процесу, розробку керуючої програми і технологічних процесів і багато іншого.

Переваги ВШО очевидні, так як високошвидкісні методи визначають:

- скорочення часу виробничого циклу на 50% і більше;
- максимальну продуктивність для даного виду обробки, наприклад, для точіння, і високу точність;
- шорсткість поверхні після ВШО не гірше, ніж після чистового шліфування;
- створена можливість продуктивної обробки деталей малих розмірів, включаючи вироби, доступні процесам нанотехнології.
- Уже сьогодні промисловість провідних країн світу досить широко використовує високошвидкісну обробку при швидкостях різання $500\text{-}1500 \text{ м/хв}$ і більше при обробці: елементів технологічної оснастки для отримання

виробів, широко застосовуються в автомобільній і аерокосмічній промисловості; сложнопрофільних виробів з жароміцних сталей, алюмінієвих сплавів, конструкційних оргпластиків, армованих скловолокном і інше;

- Виробів з високоміцних алюмінієвих сплавів в аерокосмічній і в автомобільній промисловості;
- Малорозмірних деталей в приладобудуванні і інше.

Ці швидкості для різних матеріалів досить суттєво відрізняються від швидкостей різання, властивих традиційним способам обробки.

При обробці алюмінію, наприклад, використовуються наступні діапазони швидкостей, м/хв:

- традиційний - 500-800;
- високопродуктивний - 1000-2500;
- високошвидкісний - 2500-6500;
- супершвидкісної - понад 7000

До недавнього часу широке застосування технології ВШО стримували ріжучий інструмент, обладнання та системи ЧПУ. Зараз ці проблеми вже багато в чому вирішені. Тому в даний час тенденція до розширення створення і використання технологій високошвидкісного точіння носить стійкий характер.

Теоретичним обґрунтуванням ВШО є так звані криві Соломона [16], які показують зниження сил різання в деякому діапазоні швидкостей. Герман Соломон доводив, що при досягненні певної швидкості різання відбувається істотне зниження сили в зоні різання (рис. 2).

Для кожного оброблюваного матеріалу характерні певні значення як максимальної сили різання, так і відповідної їй швидкості різання. Тому прийнято визначати ВШО як обробку з будь-якою швидкістю, що перевищує швидкість, відповідну пікової сили. При подальшому збільшенні швидкості різання сила різання починає знижуватися, тобто крутний момент, необхідний для виконання різання, також знижується. Таким чином, є робоча зона з піковим значенням крутного моменту при звичайних швидкостях, і зона, де інструмент нормально працює в якомусь діапазоні надвисоких швидкостей (ВШО).

На рисунку 1.1 зображені три криві 1, 2 і 3. Крива 1 представлена для конструкційної сталі, крива 2 - для чавуну, крива 3 характерна для кольорових металів. Видно, що при однаковій швидкості обробки значення сили різання (крутного моменту) убиває від кривої 1 до кривої 3, що справедливо для всіх діапазонів швидкостей обробки.

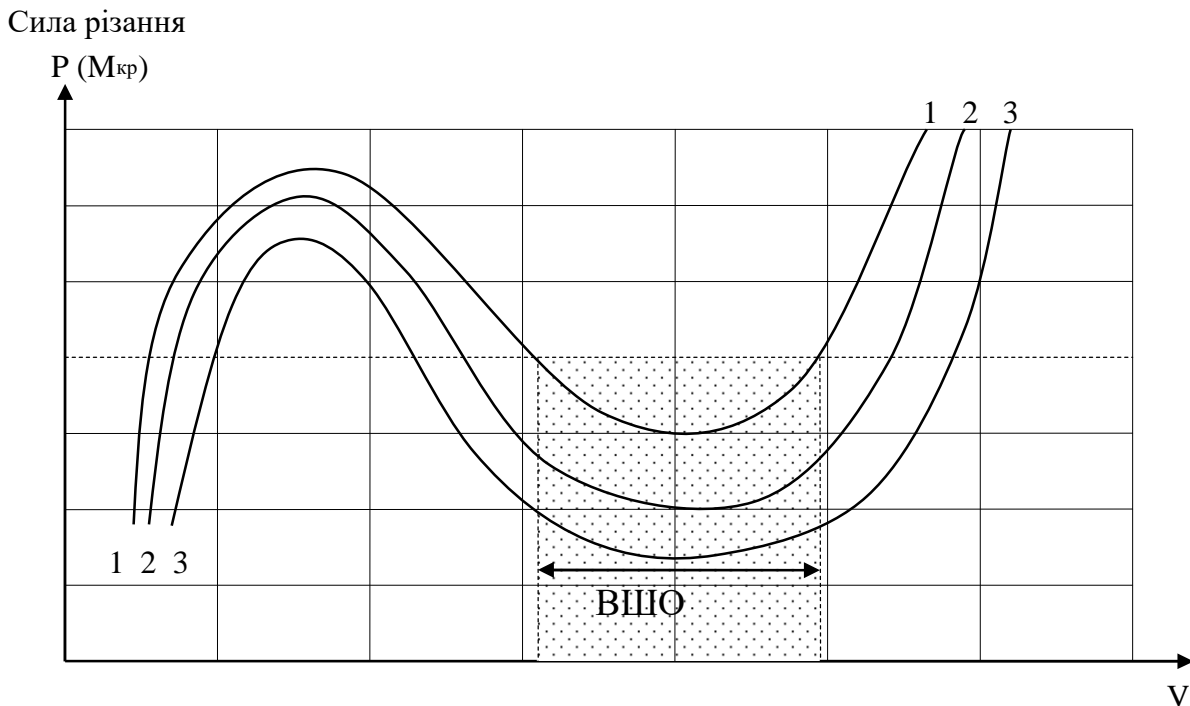


Рисунок 1.1 - Криві Соломона. Залежність сил різання (крутного моменту) від швидкості різання

Було визначено, що одним з найважливіших факторів при ВШО є не тільки зниження величини крутного моменту в зоні високих швидкостей, але і перерозподіл тепла в зоні різання. Деякі дослідники вважають цей момент в ВШО найголовнішим. При невеликих перетинах зрізу в даному діапазоні швидкостей основна маса тепла концентрується в стружці, не встигаючи переходити в заготовку. Тому вважається, що високошвидкісне точіння базується на різкому скороченні кількості тепла, що виникає при різанні, і різкому перерозподілі цього тепла між елементами технологічної системи - верстат, пристосування, інструмент, деталь - і видаляється стружкою.

При зростанні швидкості різання енергія, що витрачається на руйнування матеріалу, досягає високої щільності, тепла енергія, що генерується, сприяє знеміцненню і подальшого руйнування зрізаного шару при менших енерговитратах. При високошвидкісному точінні знижуються тертя і довжина контакту стружки з передньою поверхнею інструменту, що, при одночасному зниженні часу їх контактування, призводить до перерозподілу тепла і зниження нагрівання інструменту і заготовки при значно більшому відвіді тепла стружкою.

Причина ще й у тому, що швидкість різання перевищує швидкість теплопровідності оброблюваного матеріалу. Ріжучий інструмент випереджає поширення тепла. У підсумку, основна частка тепла, що утворюється в зоні контакту, відводиться стружкою, і в основний метал заготовки та інструменту практично не надходить (75% - виробленого тепла відводиться стружкою, 20% - через інструмент і 5% - через оброблювану деталь).

Перевага ВШО виходить також за рахунок обробки в надкритичному діапазоні коливань: при високих частотах обертання, які використовуються при ВШО, значно перевищуються частоти власних коливань деталей середніх і великих розмірів, інструменту та компонентів верстата. У поєднанні зі зменшенням сил різання це сприятливо позначається на точності обробки. Зведено до мінімуму, як уже було сказано, виділення тепла. Відсутність дроблення при різанні, можливість обробки тонкостінних виробів.

Високошвидкісне точіння в останні роки істотно змінило підхід до даного методу механічної обробки. Таку трансформацію фізичних процесів, що веде до сильних змін параметрів різання, можна представити таким чином:

- зменшується відносна робота пластичної деформації і відбувається перехід в зону крихкого руйнування матеріалу. Енергія, що витрачається на крихке руйнування, істотно менше, тому знижуються зусилля різання і сила тертя;
- зменшується час контактування стружки з передньою і задньою поверхнями інструменту, знижується сила тертя, зменшуються усадка стружки

і ступінь деформування в зоні зсуву, поліпшуються демпфуючі властивості процесу різання;

- через зростання контактної температури підвищується інтенсивність зносу інструменту.

В узагальненому вигляді явища в зоні різання наведені на схемі, зображеної на рис. 1.2 [11], а зміна показників якості процесу обробки від швидкості в графіках рис. 1.3.

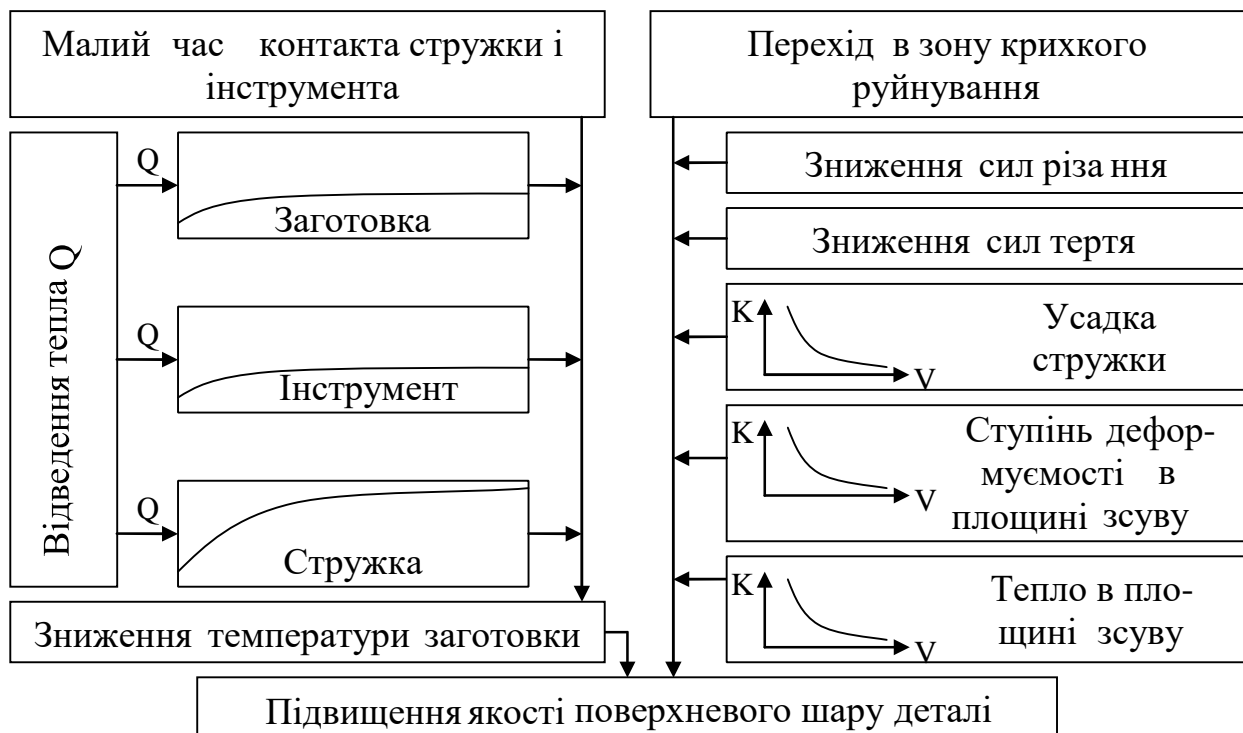


Рисунок 1.2 - Явища в зоні різання при високошвидкісному точінні

Разом з тим, як і при будь-якій механічній обробці, всі розглянуті процеси, що відбуваються при ВШО, супроводжуються похибками обробки.

По-перше, це теплові похибки. Вони найбільш виражені в шпиндельному вузлі, так як в шпиндельних вузлах 30 - 40% потужності приводу перетворюється в теплоту. Причина в тому, що досягнення необхідної швидкохідності реалізується найкращим чином при використанні моторшпинделей, у яких двигун і шпиндель вбудовані в єдиний конструктивний блок. Нагрівання опор шпиндельного вузла більше $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ призводить до зміни натяга в підшипниках, до теплового зміщення кінця шпинделя [3]. Високі

швидкості різання і невеликі глибини різання вимагають високої точності обертання заготовки. Вузол шпінделя в значній мірі визначає якість обробки. Тому необхідно вживати заходів для зменшення теплових похибок. Наприклад, використання швидкохідних гібридних радіально-упорних шарикопідшипників (зі сталевими кільцями і керамічними кульками) для зниження тертя і нових масло-повітряних методів змащування (масляний туман), здатних зменшити нагрів опор.

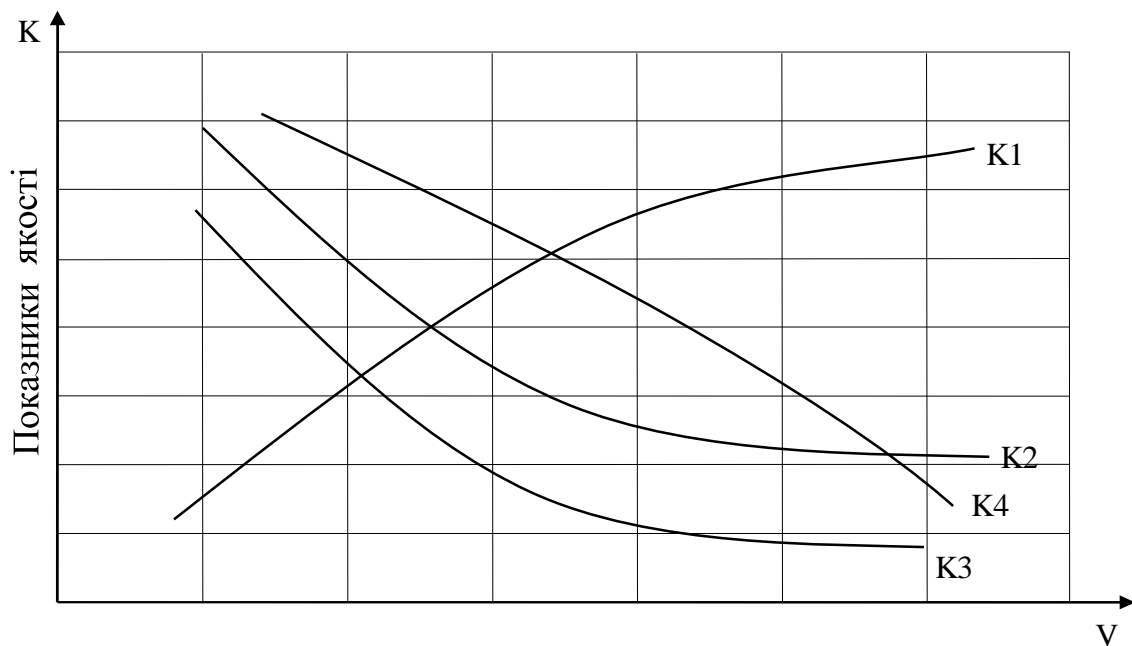


Рисунок 1.3 - Зміна показників якості процесу в залежності від швидкості різання при високошвидкісному точінні:
 K1 - продуктивність; K2 - сила різання;
 K3 - шорсткість поверхні; K4 - стійкість інструменту

По-друге, кінематична похибка. В основному за них відповідають все передавальні механізми, які є в верстаті, а особливо механізми подач.

По-третє, знос кінематичних ланцюгів і елементів верстата. Високошвидкісне різання ефективно при обробці заготовок, для яких переважають чистові операції (точна обробка). З одного боку, оскільки сили різання невеликі, то знос механічних передач буде не дуже значним, навіть при великих швидкостях різання. З іншого боку, високі вимоги пред'являються до

якості оброблюваних деталей, тому питання про погрішності від зносу кінематичних ланцюгів слід враховувати.

При ВШО значного зносу піддаються і напрямні верстата, причиною чого є високі швидкості робочого руху подачі. Крім цього у напрямних спочатку є нерівності. З огляду на те, що верстат ВШО призначений для обробки, в першу чергу, малорозмірних деталей, а не великогабаритних, навіть незначні відхилення напрямних від прямолінійності матимуть великий вплив на точності обробки.

З ростом швидкості обробки зростає знос ріжучого інструменту. Так як саме інструмент найбільш часто служить причиною обмеження швидкості різання і продуктивності, то до нього пропонується ряд вимог: висока стійкість інструменту, яка визначається часом його нормальної роботи; здатність чинити опір високим механічним і тепловим впливам; більш точна геометрія, ніж у звичайного ріжучого інструменту.

По-четверте, похибки, пов'язані з резонансними явищами. Як відомо, ВШО застосовується переважно для обробки малогабаритних деталей, що мають невелику масу. Одночасно з цим в верстатах для швидкісного точіння намагаються зробити закріплення деталі більш жорстким. В результаті виходить велике значення частоти власних коливань елементів технологічної системи. Через це при обертанні шпинделя на високих швидкостях можливі резонансні явища. У мотор-шпинделів перша власна частота шпинделя менше віддалена від максимальної частоти обертання, ніж у звичайних шпинделів, це також є причиною можливого резонансу.

По-п'яте, похибки пов'язані з нежорсткістю всієї технологічної системи. Пружна система верстат - деталь - пристосування - інструмент під дією прикладених сил знаходиться в напруженому стані. Хоча сили різання невеликі, але вимоги до точності високі (суперчистова обробка). Тому верстати для високошвидкісного точіння повинні володіти підвищеною жорсткістю і особливою міцністю конструкції. Конструкції ріжучого інструменту і пристосування теж повинні забезпечувати більшу жорсткість, а значить - мати

кращі характеристики опірності деформації і вібрації. Можливо, певні неточності при обробці може вносити нежесткість самої деталі.

Нарешті, при ВШО підвищується ймовірність похибок, викликаних неправильним підбором режимів різання, які можуть привести до виникнення резонансних явищ.

Теплові похибки, похибки зносу кінематичних ланцюгів і елементів верстата, похибки пов'язані з резонансними явищами, похибки пов'язані з нежорсткими технологічної системи в цілому і режими різання при ВШО далі розглядатися не будуть, так як є досить ємними питаннями, які слід вивчати окремо. Темою даної роботи будуть тільки питання зменшення похибок приводу подач при високошвидкісній токарній обробці.

1.2 Похибки, що вносяться приводами подач верстатів для високошвидкісної обробки

Привід подачі є найважливішою частиною верстата. Він має великий вплив на точність обробки, так як у верстатів ВШО значення подач дуже великі, привід подачі повинен забезпечувати часті і великі прискорення і уповільнення подачі.

Уявімо привід подачі з пристроєм управління у вигляді узагальненої схеми на рис. 1.4.

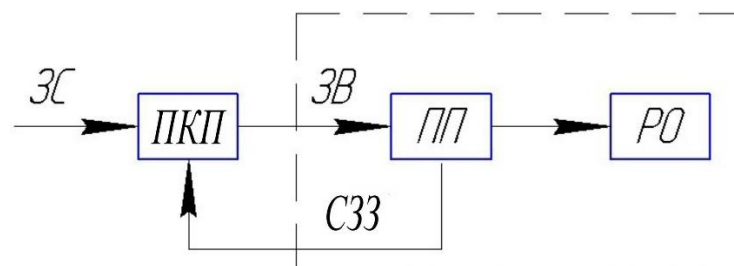


Рисунок 1.4 - Узагальнена схема приводу подачі зі зворотним зв'язком по переміщенню

Основним елементом схеми є привід подачі - ПП. Привід подачі забезпечує переміщення робочого органу - РО. Функції управління та автоматизації ПП здійснює пристрій керування приводу - ПКП. Воно призначене для формування впливу, що задається - ЗВ - надходить на привід подачі. При формуванні задає впливу пристроєм управління використовується пристрій, що задає сигнал ЗС і сигнал зворотного зв'язку - СЗЗ - а саме дані про переміщення робочого органу.

Дана схема замкнута по переміщенню. У ній два потоки інформації - задає сигнал по переміщенню і сигнал від датчика зворотного зв'язку. Завдяки зворотного зв'язку неузгодженість між заданими і дійсними величинами переміщення виконавчих органів усувається.

Тепер розглянемо безпосередньо привід подачі і робочий орган - блок, виділеного пунктирною лінією на рис. 1.4. Існує два типи приводів подачі, використовуваних в сучасних верстатах (рис. 1.5).

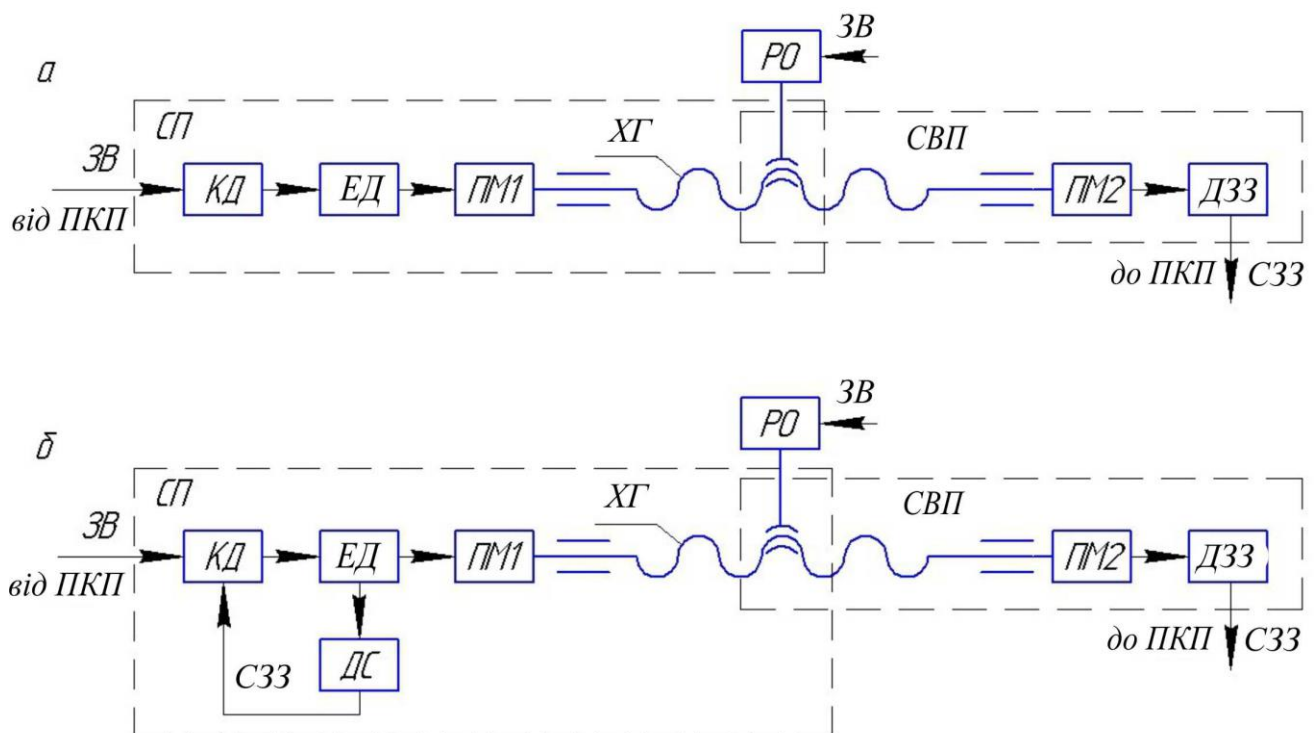


Рисунок 1.5 - Схеми приводу подачі

Звернемося до приводу подачі «а» (рисунок 1.5, а). Пристрій, що задає вплив - ЗВ - задає переміщення робочого органу і швидкість електродвигуна.

Воно надходить у власне привід - ВП, який включає в себе контролер двигуна КД, електродвигун ЕД, передавальний механізм ПМ1 і передачу гвинт-гайка. Задає вплив надходить безпосередньо в контролер двигуна. Він призначений для управління процесами, що протікають в приводі. З контролера двигуна керуючий сигнал приходить на електродвигун. Двигун - це пристрій, який забезпечує подолання сили опору різання. Після електродвигуна розташований передавальний механізм - ПМ1. Передавальний механізм виконується зазвичай у вигляді зубчастої передачі, яка забезпечує необхідний крутний момент. Далі обертання передається ходовому гвинту ХГ. Тим самим, через передачу в'їтгайка, досягається переміщення робочого органу. Робочий орган в процесі обробки знаходиться під збурюючим впливом - ЗВ. Це, зокрема, момент сили опору M_c , який змінюється в процесі обробки.

До складу приводу подачі обов'язково входить система відліку переміщень робочого органу верстата - СВП. Вона включає в себе датчик зворотного зв'язку ДЗЗ, передавальний механізм ПМ2 і передачу гвинт-гайка.

На кінці ходового гвинта, перед датчиком зворотного зв'язку, встановлений другий передавальний механізм, який забезпечує необхідну дискретність датчика і з цієї причини має велике передавальне відношення. Датчик необхідний для того, щоб відраховувати переміщення робочого органу, коли цей робочий орган здійснює або рух подачі, або установче переміщення. Сигнал зворотного зв'язку СЗЗ, а саме дані про переміщення, надходить з датчика в пристрій управління приводом.

Розглянутий власне привід є розімкненим, і управління ним здійснюється тільки по задає впливу. Система розімкнута за швидкістю. На таку систему істотно впливають зовнішні обурення, які позначаються на її роботі, і через це з її допомогою неможливо забезпечити високу якість регулювання швидкості.

Тепер звернемося до варіанту «б» приводу подач (рис. 1.5, б). Друга схема відрізняється від першої тим, що в ній встановлений датчик швидкості - ДШ, який у вигляді сигналу зворотного зв'язку передає дані про швидкість

електродвигуна контролера двигуна. Датчик швидкості зазвичай являє собою тахогенератор і входить до складу власне приводу.

Дана схема має замкнутий власне привід по швидкості, що характеризується двома потоками інформації - керуючий сигнал і сигнал від датчика зворотного зв'язку по швидкості. Завдяки зворотного зв'язку неузгодженість між заданими і дійсними величинами швидкості власне приводу зменшується. Таким чином, реалізується один із способів автоматичного управління - регулювання по відхиленню.

Як показано на рис. 1.5, привід подачі можна розбити на два блоки: власне привід і система відліку переміщень. Кожен з цих блоків вносить свої похибки в процес обробки на верстаті. Ці похибки можна розділити на групи (рис. 1.6).

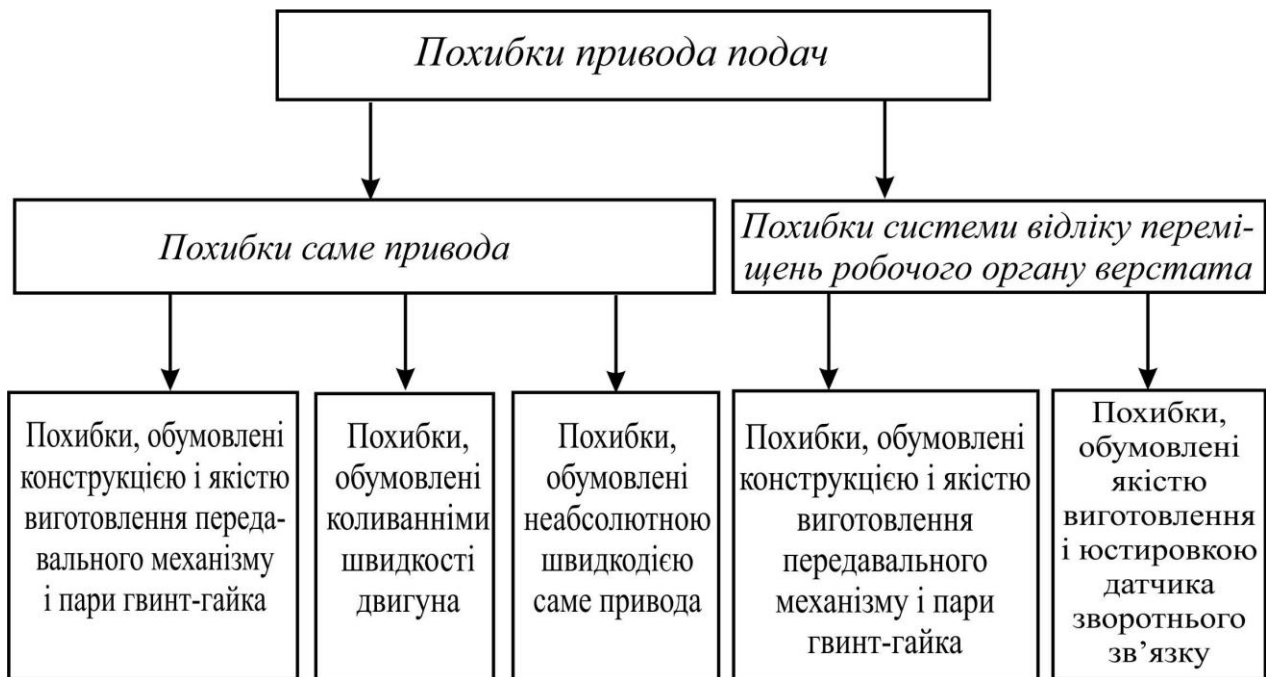


Рисунок 1.6 - Похибки привода подач

Спочатку розберемо похибки, що вносяться власне приводом.

Це похибки, обумовлені конструкцією і якістю виготовлення передавального механізму ПМ1 і пари гвинт-гайка. Всі вони призводять до похибок фактичного положення робочого органу, в порівнянні з заданим, що є причиною похибок обробки деталі.

До них відносяться похибки, викликані неточністю виготовлення

елементів передач: коліс в зубчастій передачі і ходового гвинта і гайки в передачі гвинт-гайка.

Також це похибки обумовлені допусками розташування отворів для установки в корпусі верстата. Це характерно, як для зубчастій передачі, так і для пари ходовий гвинт-гайка.

Ще сюди потрібно додати неспіввісність і люфти, викликані похибками збірки передач, в результаті отримуємо неточне взаємне рух елементів механічних передач [15].

Основні похибки розглянутих передач наведені в таблиці 1.1. Для зубчастій передачі дані взяті з ГОСТ 1643-81 [31] і для передачі гвинт-гайка з ОСТ 2-Р31-4-88 [32].

Таблиця 1.1 – Види похибок

Вид передачі	Види похибок
Зубчаста передача	Кінематична похибка передачі
	Кінематична похибка зубчастого колеса
	Накопичена похибка кроку зубчастого колеса
	Радіальне биття зубчастого вінця
	Похибка обкату
	Коливання довжини загальної нормалі
	Коливання вимірюваної міжосьової відстані
	Циклічна похибка передачі
	Відхилення кроку
	Відхилення кроку зачеплення
	Похибка профіля зуба
	Перекіс вісей
	Відхилення міжосьової відстані
Передача гвинт – гайка	Похибка максимальної довжини гвинта і різьблення
	Похибка точності переміщення
	Накопичена похибка кроку гвинта
	Похибка номінального діаметру гвинта
	Коливання моменту холостого ходу в межах одного оберту гвинта

	Похибка осьового зазору
	Радіальне биття різьблення гвинта відносно центрових отворів
	Недостатня осьова жорсткість

Тепер розглянемо похибки, що вносяться електродвигуном, на прикладі двох варіантів двигунів, використовуваних в приводах подачі.

Перший з них це двигун постійного струму. Електропривод з двигуном постійного струму забезпечує регулювання координат руху виконавчих органів робочих машин [13]. Робота електричного двигуна постійного струму заснована на явищі електромагнітної індукції: на провідник зі струмом (якір), поміщений в магнітне поле індуктора, діє сила, що змушує його (якір) обертатися, при цьому струм на якір надходить через ковзний контакт з колектором.

Механічна характеристика двигуна представляє собою залежність кутової швидкості від моменту: $\omega = f(M)$. Формула механічної характеристики даного приводу наступна:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R}{(k \cdot \Phi)^2} \quad (1.1)$$

де ω – кутова швидкість двигуна, M – момент опору, U – підводиться до якоря напруга, R - повний опір ланцюга якоря, сума опорів самого якоря і додаткового ($R = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$), k – конструктивний коефіцієнт двигуна, Φ - магнітний потік.

Включення резисторів в ланцюг якоря впливає на механічну характеристику і може використовуватися як для регулювання швидкості двигуна, так і для обмеження струму двигуна в перехідних процесах, наприклад при запуску. На рис. 1.7 наведено сімейство механічних характеристик електричного приводу з двигуном постійного струму $\omega = f(M)$. Кожна являє собою лінійну залежність. Характеристики мають спільну точку $\omega_{\text{х.х}}$ (кутова швидкість ідеального холостого ходу при струмі якоря $I_{\text{я}}=0$ и, відповідно, $M=0$).

Природна механічна характеристика, відповідає лінії 1, при додатковому опорі $R_{\text{д}}=0$. Лінії 2-4 - це штучні реостатні характеристики, отримані додаванням

резисторів в ланцюг якоря $R_{д1} < R_{д2} < R_{д3}$. Нахил характеристики збільшується при введенні додаткового опору, а жорсткість, відповідно, зменшується.

Чим менше жорсткість, тим більше змінюється частота обертання вихідного вала двигуна, при зміні моменту опору:

$$\beta = \frac{d\omega}{dM} = \frac{\Delta\omega}{\Delta M} \quad (1.2)$$

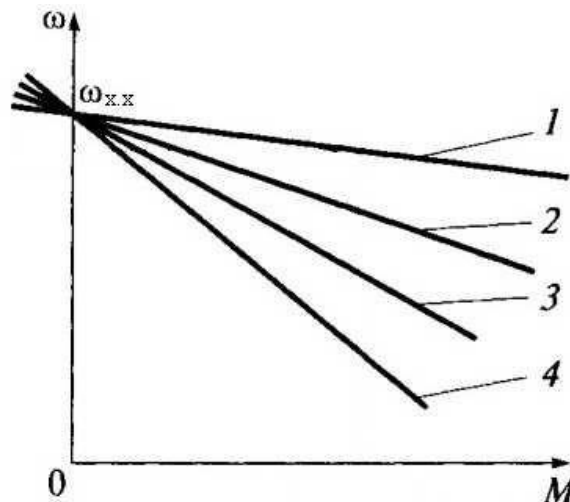


Рисунок 1.7 – Механічна характеристика електричного приводу з двигуном постійного струму

Тепер розглянемо часто використовуваний в приводах подач верстатів трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Він володіє простотою виготовлення і експлуатації, надійністю в роботі, а також має малу масу і габаритні розміри. При використанні напівпровідникових перетворювачів створюються частотно регульовані асинхронні електроприводи, мають хороші характеристики.

Принцип дії асинхронної машини заснований на електромагнітній взаємодії обертового магнітного поля статора з струмами, наведеними цим полем в роторі [2]. Через механічного навантаження на ротор кутові швидкості ротора ω і магнітного поля статора ω_0 ($\omega_0 = \frac{f_1}{p}$ де f_1 – частота напруги живлення, p - число пар полюсів) відрізняються один від одного і виникає ковзання):

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad (1.3)$$

Механічна характеристика такого двигуна має наступну формулу:

$$M = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 s \cdot \left(\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + x_k^2 \right)}$$

де U_{ϕ} - фазна напруга, x_k – індуктивне фазное опір короткого замикання, R_1 – активний опір сумарних фаз статора, R'_2 – активний опір, приведенне до обмотці статора сумарне фази ротора.

Якщо досліджувати цю залежність на екстремум, тобто знайти критичні точки моменту M_k і ковзання s_k , підставити їх в наявну формулу, потім знехтувати активним опором статора, то формула значно спроститься і буде більш зручна для побудови механічної характеристики [13]:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

$$M_k = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{2\omega_0 x_k} \text{ и } s_k = \frac{R'_2}{x_k}.$$

де

Якщо замість поточних значень моменту і ковзання підставити їх номінальні значення $M_{ном}$ и $s_{ном}$, і позначити кратність максимального моменту

$\lambda_m = \frac{M_k}{M_{ном}}$, то отримаємо формулу, яку можна використовувати для визначення

s_k за паспортними даними двигуна:

$$s_k = s_{ном} \left(\lambda_m \pm \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right)$$

Критичне ковзання перевищує номінальну в 3-4 рази. Тому для області малих ковзань, в якій ставленням s/s_k можна знехтувати, отримуємо:

$$M = \frac{2M_K s}{s_K}$$

Дана формула описує робочий, близький до лінійного, ділянка механічної характеристики, на якому розташована точка номінального режиму. З отриманої формули можна легко виразити залежність $\omega=f(M)$:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{M s_K}{2M_K}\right) \quad (1.4)$$

В результаті виходить

$$\omega = \frac{2\pi f_1}{p} \left(1 - \frac{M s_K}{2M_K}\right) \quad (1.5)$$

де $f_1=F_1(U)$. Тут, змінюючи частоту напруги живлення, можна змінити швидкість обертання валу двигуна.

На рис. 1.8 приведено сімейство механічних характеристик регульованого асинхронного електроприводу.

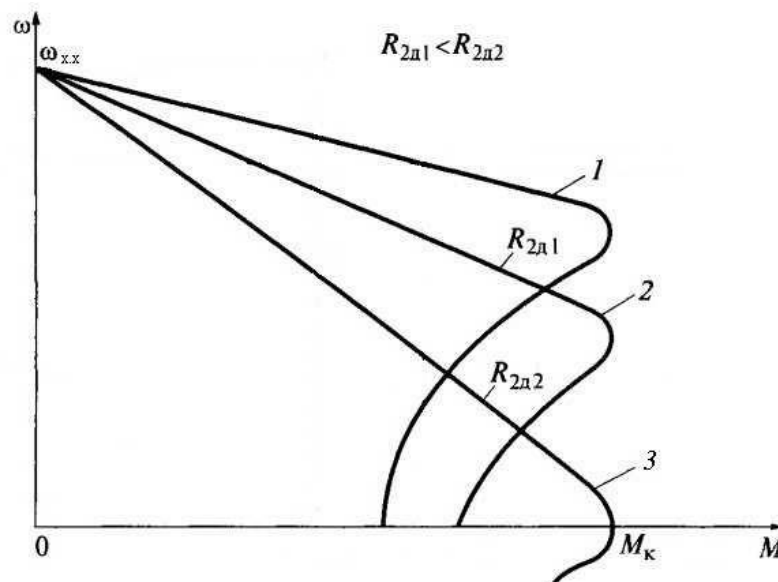


Рисунок 1.8 - Механічна характеристика електричного приводу з асинхронним двигуном

Кожна являє собою нелінійну залежність. Характеристики мають спільну точку $\omega_{x.x}$. (Кутова швидкість ідеального холостого ходу природної

характеристики), вона залишається незмінною у всіх характеристиках. Також максимальний (критичний) момент опору залишається незмінним.

Природна механічна характеристика відповідає верхній лінії, при додатковому опорі в ланцюзі ротора $R_d=0$. Лінії 1 та 2 - це штучні реостатні характеристики, отримані додаванням резисторів $R_{2d1} < R_{2d2}$. Нахил характеристики збільшується при введенні додаткового опору, а жорсткість, відповідно, зменшується.

Розглянувши два види двигунів, що застосовуються в приводах подач, можна зробити висновок, що обидва вони мають не абсолютно жорсткі характеристики $\omega=f(M)$. Чи не абсолютно жорсткі характеристики при зміні сили опору призводять до похибок швидкості. Похибки швидкості, в свою чергу, є причиною похибок форми оброблюваної деталі.

У приводах необхідно враховувати ще один важливий момент - це швидкодія. Швидкодія це здатність власне приводу досить швидко відпрацьовувати задає вплив. Наприклад, змінюється задає вплив, що надходить з пристрою управління, а система відпрацьовує його не відразу. Після обробки в контролері двигуна сигнал надходить на електродвигун, а в цей момент двигун вже працює з початковою швидкістю, заданої попереднім сигналом. Звичайно двигун починає поступово змінювати свою швидкість, а на це також витрачається час, тобто швидкість відстає від заданої. Звідси виникають похибки форми, пов'язані з неабсолютним швидкодією власне приводу (рис. 1.6). Причиною цього є інерційність механічних елементів приводу (передачі гвинт-гайка і передавального механізму) і низька швидкодія самого електродвигуна.

Похибки, що залежать від швидкості зміни величини оборотів вала двигуна, тобто від швидкодії приводу розглянуті в статті А.К. Тугенгольда [20]. При налагодженні верстатів момент перемикання робочого органу з швидкого переміщення на робочу подачу встановлюють так, щоб не сталося врізання інструменту в деталь зі швидкістю, що перевищує робочу подачу.

У процесі переходу на робочу подачу (рис. 1.9) швидкість руху швидкої подачі ω_1 за деякий час t (під дією сил опору) змінюється до швидкості ω_2 . Будемо вважати, що зміна швидкості відбувається за законом, близькому до лінійного.

Якщо в якості ланки приведення вибрати ходовий гвинт приводу подачі, то рівняння, що описує рух на даному етапі відповідно, має вигляд:

$$M + (J_d + J_n) \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Тут ω – кутова швидкість гвинта; M – момент сил опору (навантаження), що не залежить від швидкості; J_d и J_n – моменти інерції провідних і ведених мас; t - поточний час.

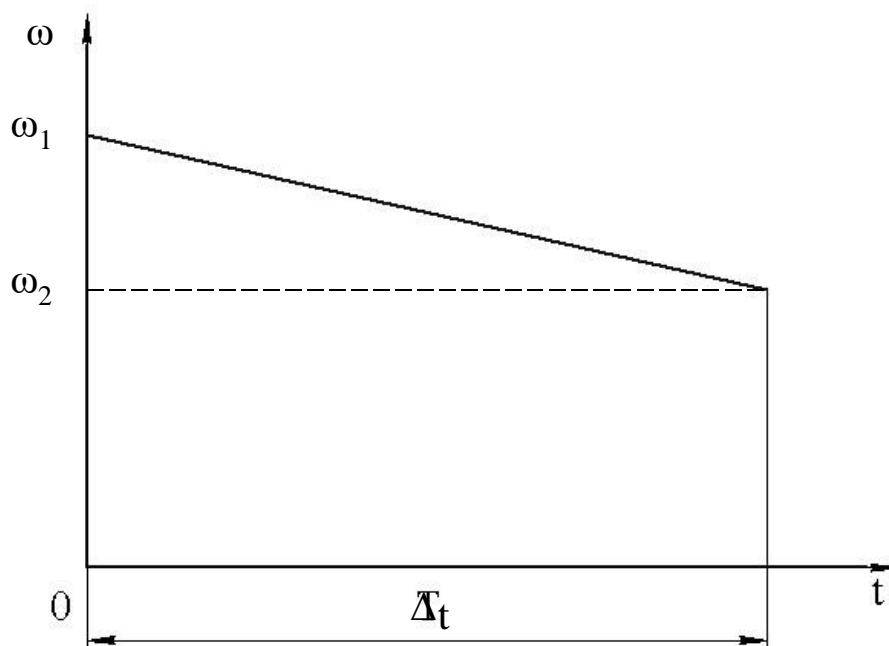


Рисунок 1.9 - Графік зміни швидкості в перехідному процесі

Після дворазового інтегрування було отримано рівняння для кутового шляху φ ходового гвинта:

$$\varphi = \omega_1 \cdot t - \frac{M}{2(J_d + J_n)} t^2$$

Якщо Δt – цей час відставання виконання команди, то вираз для кута повороту φ є не що інше, як похибка, що виникає через недостатнє швидкодії власне приводу:

$$\Delta\varphi = \omega_1 \cdot \Delta t - \frac{M}{2(J_d + J_n)} (\Delta t)$$

Причому, чим більше час відставання (менше швидкодія), тим більше похибка $\Delta\varphi$, тим більше похибка обробки профілю деталі. Графік наростання похибки кута повороту від часу затримки виконання задає обурення наведено на рис. 1.10. На першому етапі значення похибки наростає за лінійним законом. На другому етапі залежність $\Delta\varphi$ от Δt виражена в параболічеськом вигляді, причому з плином часу швидкість наростання похибки падає, так як значення швидкості наближається до заданого.

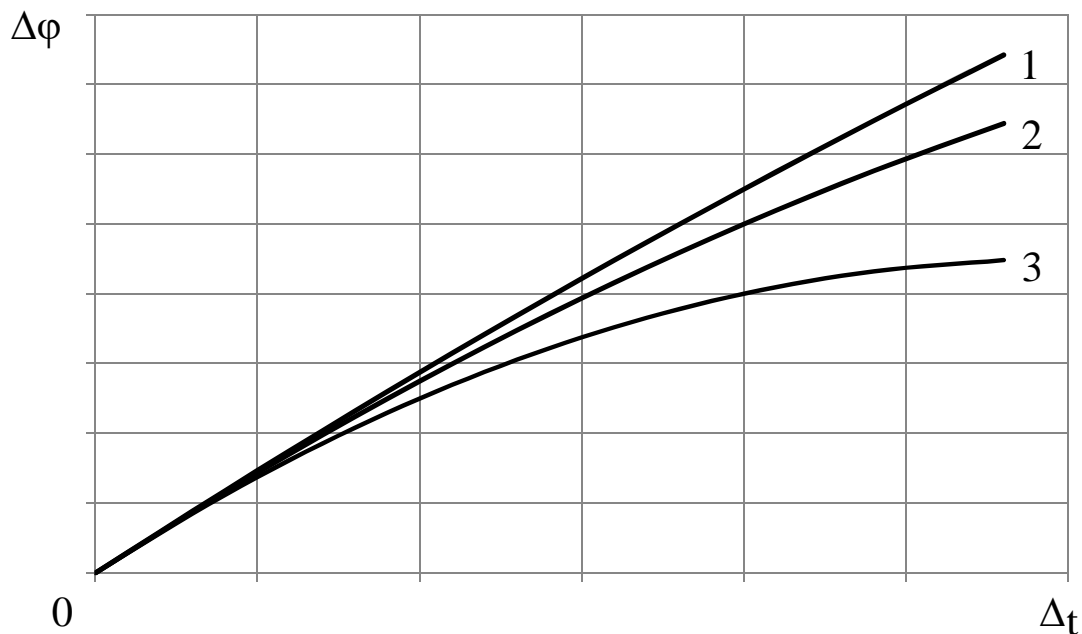


Рисунок 1.10 – Похибки кута повороту ходового гвинта

В отриманих залежностях на рис. 1.10 змінювався момент сил опору: момент опору кривої 2 в 2 рази більше, ніж у кривої 3, аналогічно, момент опору кривої 1 в 2 рази більше, ніж у кривої 2. Звідси зрозуміло, що чим більше момент опору, тим довше двигун змінює швидкість і тим більше стає похибка кута повороту вала двигуна.

Звернемося до характеристик двигуна постійного струму і асинхронного двигуна. У першого характеристика являє пряму лінію, що має постійну похідну швидкості на всьому робочому діапазоні, а отже, постійне швидкодію. Характеристика асинхронного двигуна нелінійна, тобто похідна швидкості змінюється на всій кривій. Тому даний двигун має різне швидкодію в кожній точці залежності, що також вносить похибки в обробку деталей.

Тепер розглянемо похибки системи зворотного зв'язку по переміщенню (рис. 1.6).

Система зворотного зв'язку включає похибки, обумовлені конструкцією і якістю виготовлення передавального механізму ПМ2, пари гвинт-гайка, і самого датчика зворотного зв'язку. Як і в будь-яких інших кінематичних ланцюгах, тут можуть бути присутніми люфти і зазори, які істотно знижують точність обробки. Ці похибки аналогічні погрішностей, розглянутим для передавального механізму ПМ1 і передачі гвинт-гайка власне приводу.

При використанні датчика зворотного зв'язку, як абсолютного енкодера, так і інкрементного кодового датчика, виникають похибки квантування, що включають в себе помилки, обумовлені похибками кінематичного ланцюга, в сукупності вони являють собою похибки квантування системи відліку переміщень. Ці похибки в межах кванта підкоряються закону рівномірного розподілу.

Однак похибки квантування системи відліку переміщень спотворюються похибками розташування кордонів квантів, пов'язаних з похибками виготовлення та складання датчика. Інструментальні похибки викликають відхилення реальних величин від геометричних і призводять до похибок розташування квантів.

Нехай шкала системи відліку має p квантів (рис. 1.11).

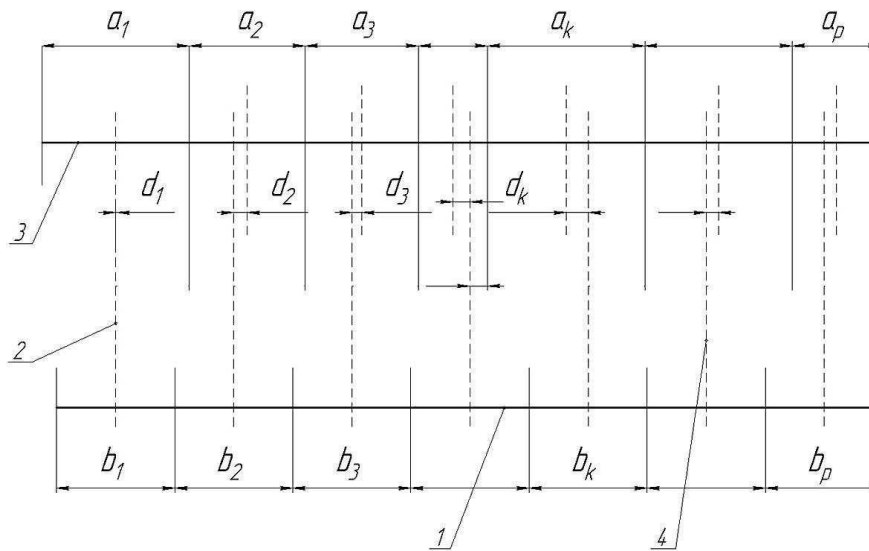


Рисунок 1.11 – Похибки квантування.

1 - шкала ідеальної системи відліку; 2 - центри квантів ідеальної шкали;

3 - шкала реальної системи відліку; 4 - центри квантів реальної шкали

Фактичні ціни кванті a $a_1, 2, 3, \dots, a_k, \dots, a_p$, а теоретичне – $b_1, b_2, b_3, \dots, b_k, \dots, b_p$.

Так як кордону реальних квантів не збігаються з теоретичними, то і центри реальних квантів не співпадуть з центрами теоретичних на величину d_k , яка буде різною для кожного кванта реальної шкали. Це веде до появи помилок в роботі системи відліку переміщень, і, відповідно, до збільшення похибок обробки.

У цьому розділі були розглянуті похибки приводу подачі, що представляють собою похибки, обумовлені конструкцією і якістю виготовлення передавальних механізмів власне приводу, похибки, обумовлені коливаннями швидкості двигуна, похибки, обумовлені неабсолютним швидкодією власне приводу, похибки, обумовлені конструкцією і якістю виготовлення передавальних механізмів системи відліку переміщень, і похибками, пов'язані з датчиком зворотного зв'язку. Далі будемо розглядати методи боротьби з перерахованими похибками приводу подач.

2 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КІНЕМАТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИВОДУ ПОДАЧІ

В кінематичних ланцюгах на базі механічних передач приводу подач верстатів ВШО можуть бути присутніми люфти і зазори. Тому розглянемо способи боротьби з ними для зменшення похибок обробки профілю деталі.

2.1 Огляд методів підвищення точності кінематичних ланцюгів

Розроблено досить багато методів підвищення точності кінематичних ланцюгів. Ці методи ми систематизували на основі даних В.В. Бушуєва [3]. Деякі можливості підвищення точності наведені в таблиці 2.1. Досить ефективним і простим способом є правильний вибір передатного відношення і розмірів передач. Чим більше діаметр веденої ланки, тим менше (за інших рівних умов) похибка передачі в зв'язку з тим, що кутова помилка кроку при обробці коліс великих розмірів, як правило, знижується.

Не байдужим є і характер розподілу передатного відношення між проміжними колесами кінематичного ланцюга. Наприклад, при розподілі передатного відношення (схема 1, а), де спочатку встановлені підвищуючі, а потім знижуючі передачі ($U = 4$) похибка вихідної ланки приблизно на 25% менше, ніж при передатних числах всіх передач, рівних 1. Підвищення відносної частоти обертання в середній частині кінематичного ланцюга сприяє підвищенню точності. Тому найважливішою вимогою є забезпечення максимально можливих передатних чисел на кінцевих ланках. Наприклад, в ланцюзі токарного верстата максимальні передатні числа $U_{\max 1}$ і $U_{\max 2}$ необхідно призначати в приводі подачі і шпинделя відповідно (схема 1, б).

При виборі передатного числа кожної окремої пари (схема 1, в) слід мати на увазі, що взаємодії окремих складових кінематичної похибки відбуваються за законом накладення. Результуюча похибка утворюється як результат підсумовування (у відповідному масштабі) похибок кожної ланки.

Таблиця 2.1 – Схеми підвищення точності кінематичних ланцюгів

Підвищення точності кінематичних ланцюгів	
Розподіл передатних відношень	
Надлишкові зв'язки	
Зменшення впливу несосності	
Раціональна установка	
Компенсація похибок	

Взаємодія складових не викликає появи нових гармонік похибок, яких немає серед окремих складових кінематичного ланцюга.

При кратному передатному відношенні передач або дорівнює 1 ($z_1: z_2 = 1$) взаємодія кінематичних похибок ланок зводиться до складання похибок з різними періодами і амплітудами. Результуюча амплітуда похибки залежить від амплітуди похибки кожного колеса і їх початкових фаз. Відбувається природна компенсація помилок (внаслідок розбіжності фаз максимальних похибок) і в загальному випадку сумарна похибка нижче, ніж при інших передатних відношеннях. Характер підсумовування похибок передач з некрatними передатним відношенням (типу $z_1 / (z_1 \pm 1)$) або $z_1 / (kz_1)$, де k - нескорочний дріб) залежить від поєднання частот і амплітуд. На схемах I і II (схема 1, в) наведені випадки підсумовування похибок двох коліс з близькими частотами при повороті на кут φ . У схемі I гармоніки відрізняються на одиницю, а сумарна похибка коливається від суми до різниці амплітуд похибок кожного з коліс. У схемі II гармоніка з вищим номером має велику амплітуду і підсумовування дає характер похибки, показаний на рисунку.

Таким чином, в загальному випадку передатні відношення з нерівним і некрatним числом утворюють велику похибку, тому що в процесі обертання завжди відбувається арифметичне підсумовування максимальних амплітуд і взаємної компенсації похибок не відбувається.

Сприятливо позначається на точності створення кінематичних ланцюгів з надлишковими зв'язками. Наприклад, застосування двочерв'ячного приводу з жорсткою кінематикою між черв'яками (схема 2, а, I) на відміну від одночерв'ячного дає можливість теоретично удвічі знизити накопичену похибку передачі, якщо похибка черв'ячного колеса 1 має характер правильної синусоїди. На схемі II похибок суцільною лінією показана похибка пари при одночерв'ячному, а штриховий - її зміна при двочерв'ячному приводі. На схемі II (схема 2, б) наведені графіки прояви кінематичних похибок 1 і 2 елементів диференціала (схема I) в похибці кута повороту φ вихідного вала 1. При наявності одного сателіта 2 на виході утворюється похибка величиною 2. Товстою лінією показаний характер зміни похибки 1 вихідного вала при двох сателітах. В даному випадку кожен сателіт створює похибки 3 і 4 однакового розміру. Створення сумарної похибки залежить від фази прояву похибок кожного колеса і в

загальному випадку вона менше приблизно на 25%, ніж при одному сателіті (1 < 2).

У багатоконтактних черв'ячних і гвинтових передачах (схема 2, в) відбувається фільтрація похибок за рахунок особливостей контакту. Збільшення висоти профілю H (схема I) відбувається до зростання фільтруючих властивостей. Зменшення кута профілю α (схема II) знижує роль радіального биття (ексцентриситету e) на результуючу помилку. Наприклад, зменшення кута профілю черв'яка ділільних передач з 20° до 15° і коефіцієнта висоти головки і ніжки в 1,2 рази знижує циклічну похибку на 25 - 30%.

Неспіввісність двох валів, з'єднаних муфтою (схема 3, а, I), призводить до похибки з частотою обертання валів. Аналогічний характер похибок дає неспіввісність в шпонкових з'єднаннях вала з колесом. Застосування пружних муфт (наприклад, сільфонних за схемою II) знижує вплив неспіввісності. При з'єднанні кінематичних ланцюгів двох механізмів (схема 3, б), якщо центрування їх відбувається на великому діаметрі можливе виникнення відчутної неспіввісності (рівній половині зазору в посадці по діаметру d). Для зменшення впливу неспіввісності краще використовувати схему II, де вона викличе лише коливання бічного зазору в зачепленні, але не призведе до появи вихідної похибки.

Великий вплив на точність може надати раціональна установка коліс. Похибка паразитних коліс (схема 4, а) може проявитися в похибці вихідної ланки величиною, збільшеною в два рази. Тому їх слід по можливості уникати. Впливає також місце установки паразитного колеса. Штриховою лінією показана краща (з позиції точності) схема установки паразитного колеса при заданому напрямку обертання (схема 4, а, I). Загальне правило установки вимагає, щоб передача обертання на паразитному колесі проходила на мінімальному куті γ між точками контакту 1 і 2. При реверсивній передачі вісі бажано розташовувати на одній лінії. Для зменшення впливу похибок проміжних передач кінематичного ланцюга на вихідну точність найменш точних передач, наприклад, конічні, (схема 4, б, II) необхідно розташовувати якомога далі від кінцевих ланок 2, щоб їх вплив було зменшено за рахунок редукації в проміжній передачі 1.

При необхідності отримання граничних технічно досяжних точностей використовують компенсацію похибок. Похибки циліндричних коліс 1 і 2 (схема 5, а) однієї частоти (наприклад, через неспіввісності e_1 і e_2) можна компенсувати за рахунок поєднання фаз похибок, (зачорнене коло). В цьому випадку сумарна похибка Σ буде дорівнює різниці амплітуд складових ланок. Похибка переміщення санчат при наявності похибок ходового гвинта 1 можливо виправити за схемою 5, б. У цьому випадку уздовж станини токарного верстата встановлюють корекційну лінійку 2 з профілем, що залежать від похибки, яка через важіль 3 повертає гайку, зменшуючи помилку переміщення.

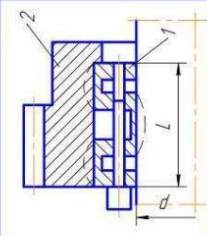
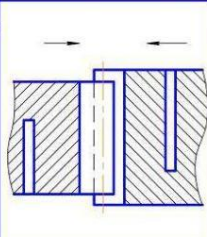
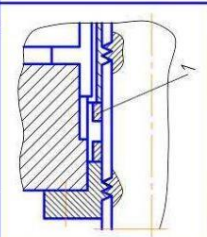
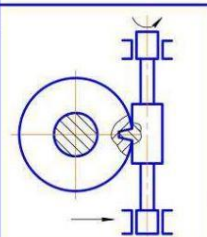
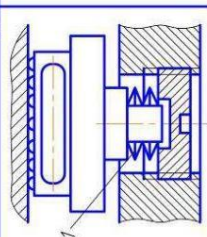
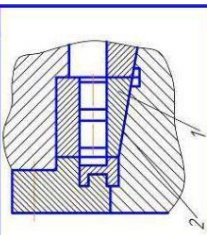
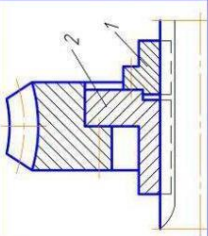
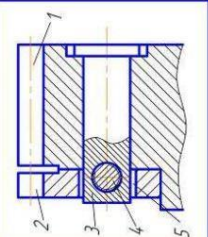
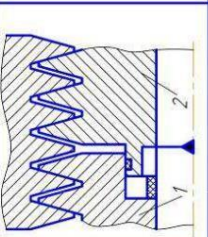
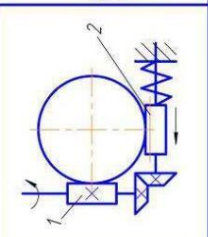
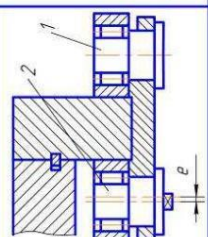
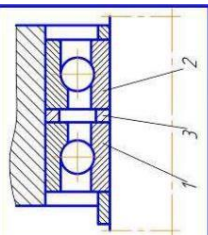
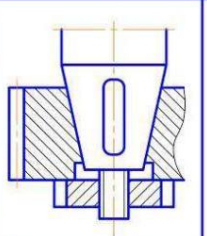
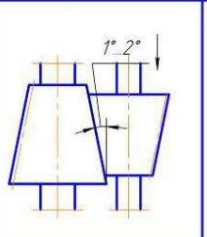
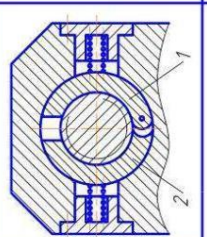
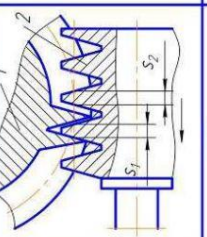
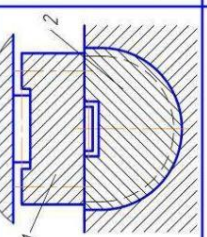
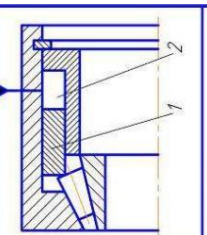
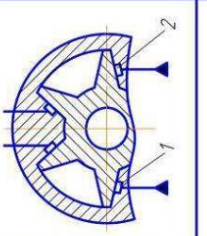

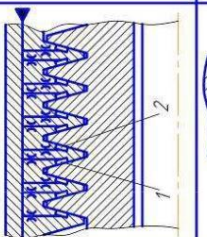
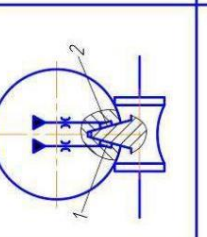
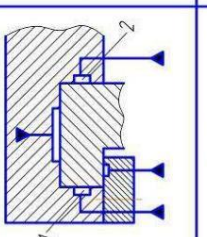
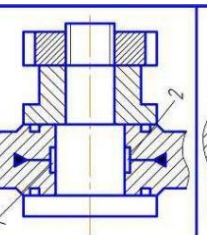
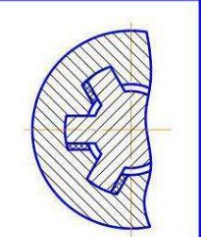
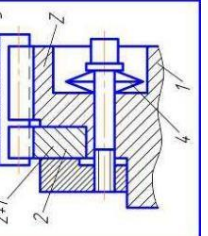
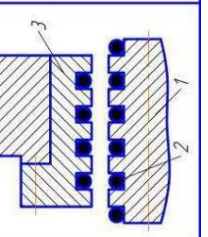
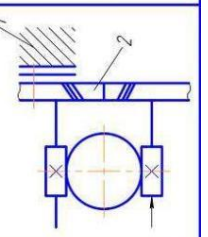
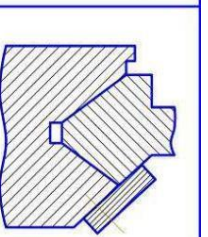
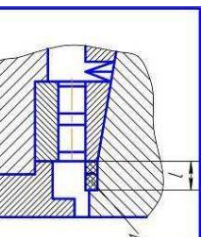
Так, наприклад, в зубофрезерних верстатах досягнення високої точності обертання ділільного колеса (схема 5, в) відбувається з використанням корекційного механізму, виконаного у вигляді копіра 1 (по колу стола), що дає додатковий доворот через важіль 2 водилу диференціала 3. Копір профілюють відповідно з кроковою похибкою колеса. Метод використання двох ланцюгів (ділення і диференціала) можна застосовувати і в приводі подач токарного верстата.

2.2 Способи усунення зазорів в з'єднаннях, опорах і передачах

Крім похибок кінематичних ланцюгів на працездатність і точність більшості механізмів верстатів в значній мірі впливають зазори в з'єднаннях, опорах і передачах. Найчастіше зазори негативно позначаються на експлуатаційних показниках, тому конструктори постійно зайняті пошуком ефективних рішень, що усувають зазори повністю або хоча б частково. Для верстатів ВСО ця проблема особливо актуальна, оскільки зазори впливають також на роботу приводу подач.

В основу пристроїв для вибірки зазорів покладено використання ряду фізико-технічних ефектів, найбільш поширені з яких наведені в таблиці 2.2. Найчастіше використовують пружні властивості матеріалу, відносні переміщення елементів, а також ефект клина. На схемі I, 1 з'єднання засноване на деформації (див. штрихові лінії) сільфонні втулки 1, що забезпечує як передачу моменту, так і точне центрування зубчастого колеса 2.

Таблиця 2.2 - Фізико-технічні ефекти, що призводять до усунення зазорів

Використовуваний ефект		Вид з'єднання, передачі, опори					
		Вали	Зубчата передача	Винт-гайка черв'як-рейка	Черв'ячні передачі	Направляючі	Підшипники
I	Пружні властивості матеріалу						
II	Відносні переміщення елементів						
III	Конічні і клинові з'єднання						
IV	Гідростатичне змазування						
V	Різні ефекти						

Робочі розміри: $d = 14 \div 100$ мм; $L = 20 \div 60$ мм. На схемах I, 2 і I, 4 зазор в зачепленні відповідно циліндричної і черв'ячної передач усувається в результаті

радіального зближення коліс пари (схема I, 2) або черв'яка з колесом (схема I, 4). При цьому через штучно збільшену податливість в радіальному напрямку жорсткість передачі невисока. Вибірка зазору в передачі гвинт-гайка ковзання (схема I, 3) і в направляючій кочення (схема I, 5) відбувається за допомогою пружини 1. Натяг в радіальному двухрядном підшипнику з циліндричними роликами (схема I, 6) регулюють, деформуючи внутрішнє кільце 1 при його осьовому переміщенні по конічній шийці 2.

На схемах II, 1 - II, 6 ілюстровано усунення зазору шляхом відносного переміщення або повороту деталей 1 і 2. Такі сполуки, як правило, відрізняються високою жорсткістю. На схемі II, 1 передбачений відносний поворот частин 1 і 2 збірної маточини черв'ячного колеса; на схемі II, 2 тангенціальне відносне зміщення (розвертання) зубчастих вінців 1 і 2 здійснюється гвинтом 4, що взаємодіє з пальцем 3 і з торцем паза 5, виконаного в вінці 2. Осьове зміщення черв'яків 1 і 2 черв'ячно-рейкової передачі (схема II, 3) і черв'яка 2 (схема II, 4) черв'ячної пари проводиться за допомогою гідроциліндра або пружини.

Натяг в напрямних кочення (схема II, 5) створюється поворотом ексцентрика 2 (див. e - ексцентриситет), а в радіально-упорних підшипниках (схема II, 6) - зближенням внутрішніх кілець 1 і 2 при підшліфовуванні компенсатора 3.

У пристроях на схемах III, 1 - III, 6 для усунення (або зменшення) зазору використовуються властивості конічних і клинових з'єднань. Так, в гвинтовій передачі приводів подачі (схема III, 3) зазор вибирається при автоматичному повороті півгайок 1 і 2 пружинами. Зазор в черв'ячній передачі (схема III, 4) зменшують періодично при зносі черв'ячного колеса 1 шляхом осьового переміщення (див. стрілку) черв'яка 2, що має різну товщину витка ($S_2 > S_1$) в осьовому перерізі (так звана різноходова передача). У цьому випадку після переміщення черв'яка в роботу вступає профіль з більшою товщиною витка. Вибірка зазору в роликових напрямних кочення (схема III, 5) здійснюється при осьовому переміщенні опори 1, встановленої на клині 2, що має конусоподібну поверхню. У цьому випадку досягається також самовстановлення опори 1. Постійний натяг в підшипнику з конічними роликами (схема III, 6) забезпечують

шляхом осьового навантаження роликів через втулку 1 при підводі масла під постійним тиском в порожнину 2.

У гідростатичних замкнутих опорах і передачах (схеми IV, 1 - IV, 6) зазори усуваються завдяки самому принципу дії, коли мастило під тиском надходить в протилежні кишені 1 і 2 та заповнює зазор між робочими поверхнями. (В передачах ковзання, що мають аналогічне призначення, для забезпечення їх працездатності передбачають зазор, який негативно позначається на функціонуванні механізму, наприклад під час реверсування). Ефект гідростатичного мастила використовується, наприклад, в напрямних 1 і 2 пінолі задньої бабки 3 (схема IV, 1) токарного верстата, призначених для здійснення зворотно-поступального переміщення, і в гідростатичній черв'ячно-рейковій передачі (схема IV, 3) з кишенями на рейці, що використовується у важких верстатах при великій довжині переміщення. Реалізація гідростатичного мастила в черв'ячній передачі (схема IV, 4) можлива тільки при спеціальних профілях черв'яка і колеса (наприклад в глобоїдних парах), що забезпечують малий і досить постійний зазор в зоні зачеплення, який грає роль ущільнення. Вибірка зазорів гарантує високу точність переміщення вузлів (схема IV, 5), в тому числі при їх реверсуванні, і високу геометричну і розмірну точність шпindelьних вузлів (схема IV, 6).

На схемах V, 1 - V, 6 для ліквідації зазору використовуються різні ефекти. Застосовуючи самотвердіючу пластмасу, яка впорскується в шліцьове з'єднання, усувають бічні зазори (схема V, 1). Для створення попереднього натягу в зачепленні зубчастих коліс (схема V, 2) використовується відносно проковзування коліс 1 і 2, числа зубів яких розрізняються на одиницю (z і $z + 1$). Обидва вони знаходяться в зачепленні з колесом 3, причому колесо 2 завжди відстає від колеса 1 і притискається до протилежної сторони профілю зуба колеса 3. Зусилля, з яким вибирається зазор, регулюється пружиною 4. В гвинтовій передачі (схема V), використані магнітні властивості: обертання від гвинта 1 до гайки 3 передається безконтактно завдяки взаємодії магнітних полів, що виникають у витках обмоток 2 гвинта і гайки. Передача руху при цьому здійснюється в обох напрямках без зазорів (у разі реверсування може виникати пружний зазор, величина якого

залежить від магнітних властивостей передачі). У конструкції черв'ячної передачі (схема V, 4), змінюючи момент гальма 1, пов'язаного з косозубим колесом 2, можна регулювати осьове зусилля, з яким відбувається вибірка зазору. На схемі V, 5 зазор у V-подібній напрямній при її зносі усувається автоматично під дією ваги вузла. Автоматичне регулювання натягу в підшипнику при його нагріванні (схема V, 6) здійснюється завдяки призначенню матеріалу кільця 1 з підвищеним коефіцієнтом лінійного розширення (наприклад, ебоніту). При нагріванні кільця його ширина L збільшується і натяг зменшується.

Аналіз показує, що розглянуті методи дозволяють вирішити поставлену нами завдання зменшення похибок кінематичних ланцюгів, тому займатися цими питаннями в подальшому ми не будемо. З представлених способів підвищення точності рекомендується у разі силової зубчастої передачі використовувати схему з відносним зсувом зубчастих вінців, а в гвинтовій передачі - схему з автоматичним поворотом півгайок.

3 ПОХИБКИ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВЕРСТАТА ТА СПОСОБИ ЇХ ЗМЕНШЕННЯ

3.1 Підвищення точності передавального механізму і пари гвинт-гайка

Система зворотного зв'язку включає похибки, обумовлені конструкцією і якістю виготовлення передавального механізму, пари гвинт-гайка, і самого датчика зворотного зв'язку. Як і в будь-яких інших кінематичних ланцюгах, тут можуть бути присутніми люфти і зазори, які істотно знижують точність обробки. Ці похибки аналогічні похибкам, розглянутим для передавального механізму і передачі гвинт-гайка власне приводу. Однак у приладовій передачі, яка і є передавальним механізмом системи відліку переміщень, є свої особливості. Наприклад, для зменшення похибки зубчастої передачі між ходовим гвинтом і датчиком зворотного зв'язку в якості передавального механізму в даній схемі використовують планетарні передачі з великим передавальним числом або хвильові передачі.

Розглянемо безлюфтну хвильову передачу. Вона має досить значне передавальне відношення і високу кінематичну точність, їй властиво співвісне розташування вхідного і вихідного валів, що знижує похибку частоти обертання валів. На рис. 3.1 показана безлюфтна хвильова зубчаста передача [24]. Усунення люфту в ній відбувається наступним чином. При обертанні вала 3 ролики 4, закріплені на пружинних пластинах з вушками 8, будуть переміщати хвилі деформації гнучкого колеса 2 і змушувати обертатися жорстке колесо.

1. Якщо при роботі передачі відбуватиметься знос зубчастого зачеплення і в ньому з'явиться зазор, то пружини 7, переміщаючи вліво конус 6, через штовхачі 5 усунуть ролики 4 і ліквідують зазор. Це станеться автоматично, без участі людини. Передавальний механізм у вигляді безлюфтної хвильової передачі має малу інерційність, і це його істотна перевага.

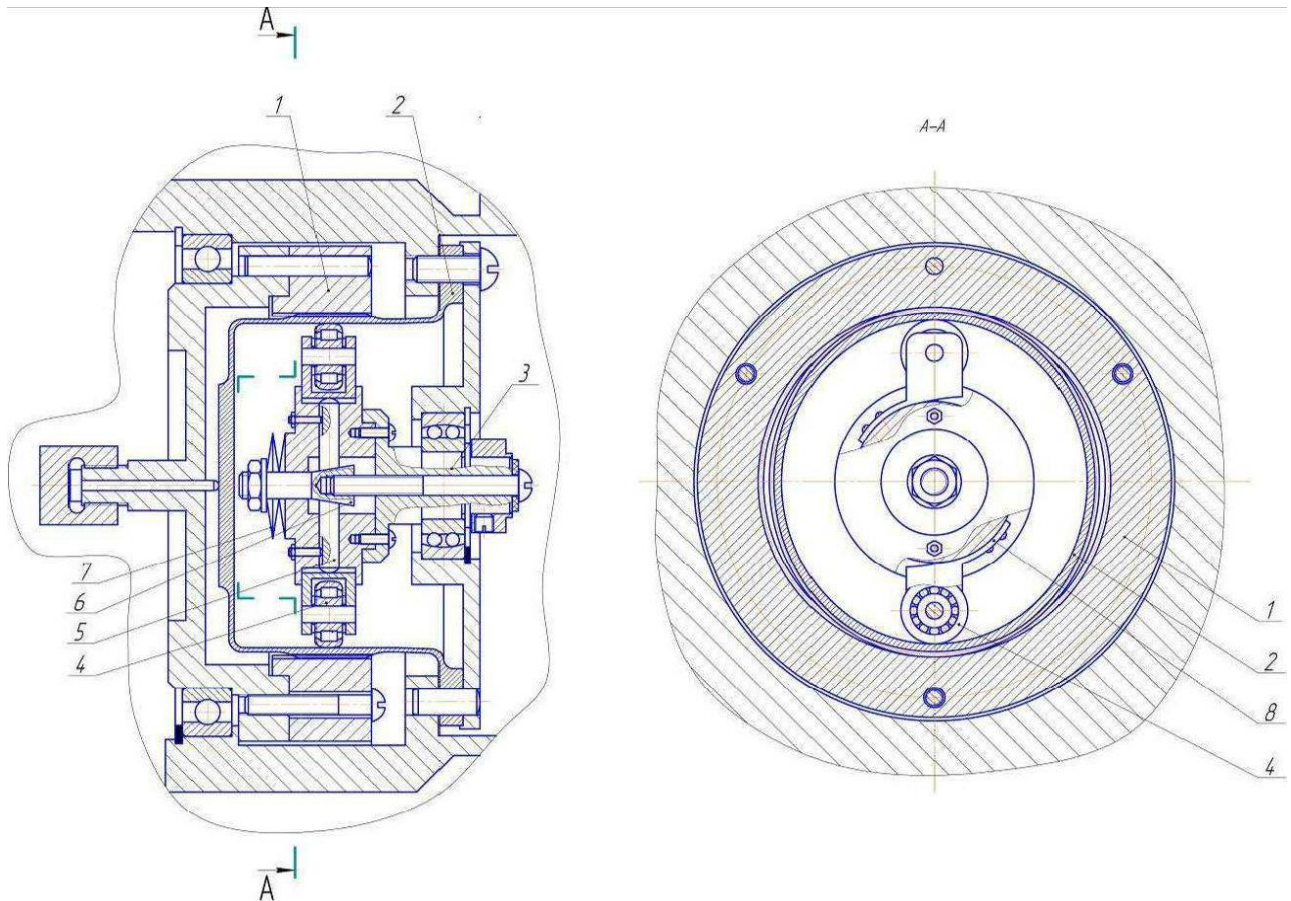


Рисунок 3.1 - Усунення люфту хвильової передачі

3.2 Пристрої для визначення похибки системи відліку переміщень

Для настройки системи відліку переміщень (рисунок 1.5) спочатку за допомогою вимірної апаратури визначають кінематичну похибку передавального механізму і енодера за допомогою пристрою визначення похибки.

Розглянемо пристрій для визначення похибки перетворювача «кут - код» [14], який наведений на рисунку 3.2.

Цей пристрій містить двигун 7, передає обертальний рух кодовому диску 3 перетворювача «кут - код», джерело світла 1, лінзу 2, щілину 4, світлопровід 5 і два фотоелементи 6, один з яких контролює зовнішню, найменш значущу кодову доріжку диска, а інший - перевіряється в даний момент. Фотоелементи з'єднані з осцилографом 8, по екрану якого візуально визначаються похибки квантування доріжки, що перевіряється. Кодові доріжки диска перевіряються послідовно,

шляхом порівняння кордонів сегментів кодових зон (квантів) кожної доріжки з межами квантів зовнішньої доріжки. Двигун з'єднаний з диском безпосередньо і обертається зі стабілізованою рівномірною швидкістю, що забезпечується відносно великим діаметром і великим моментом інерції його ротора.

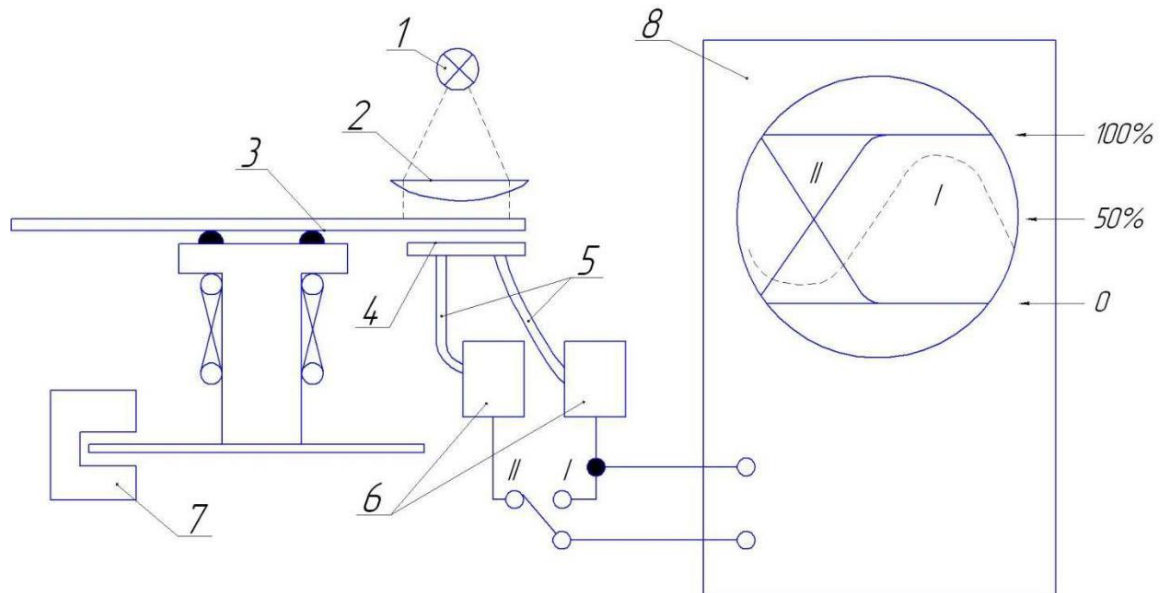


Рисунок 3.2 - Пристрій для визначення похибки перетворювача "кут - код»

Пристрій має просту конструкцію, однак недостатньо зручний в експлуатації. Він призначений для визначення похибок перетворювачів, що працюють в коді Грея, в яких кодові диски, як правило, багатодоріжкові. При використанні пристрою один з фотоелементів потрібно багаторазово перенастроювати з однієї доріжки на іншу, більш «старшу», а це вимагає часу і здійснюється не завжди з потрібною точністю. Крім того, при візуальному визначенні похибок по екрану осцилографа можливі помилки, обумовлені недостатньо високою якістю зору і втомою дослідника. Щоб підвищити точність визначення похибок перетворювача «кут - код» за допомогою такого пристрою, екран його осцилографа часто доводиться фотографувати, а потім фотознімки збільшувати і візуально працювати вже з ними. Точність при цьому підвищується, але продуктивність праці знижується, і процес істотно здорожує.

Більш продуктивним і зручним в експлуатації є пристрій для визначення похибки перетворювача "кут - код» [22], представлений на рис. 3.3.

Він містить привід 1, пов'язаний з досліджуваним перетворювачем «кут - код» 2 через тяговий барабан механізму протягування стрічки 3 і понижуючий редуктор 4; формувач сигналів на межах квантів кута 5, кодованого перетворювачем 2, і вузол 6 запису вихідних сигналів формувача на стрічку механізму протягування стрічки.

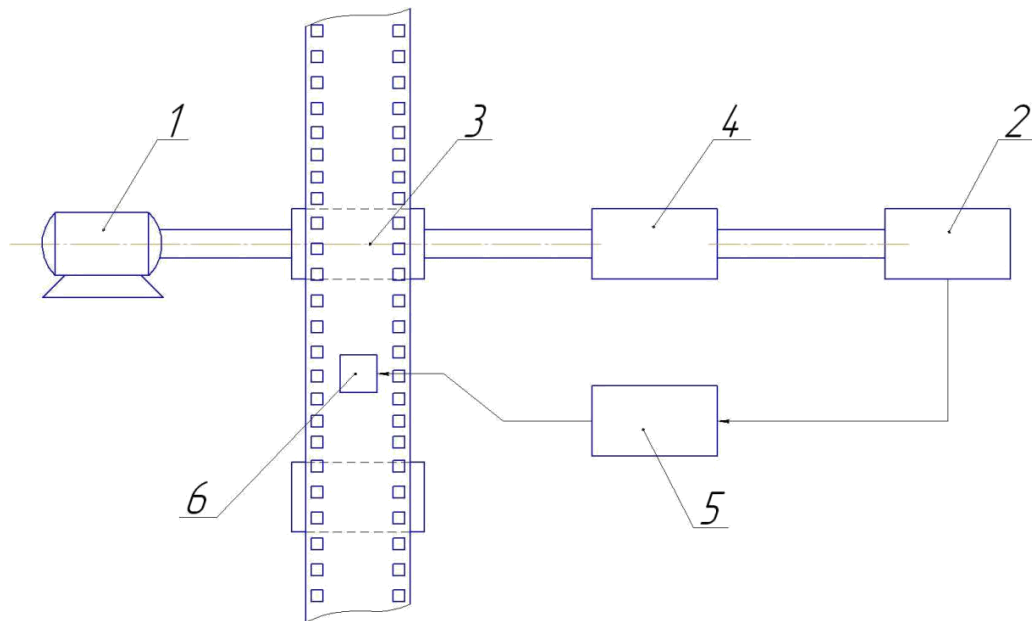


Рисунок 3.3 - Пристрій для визначення похибки перетворювача "кут - код»

Для роботи пристрою в механізм протягування стрічки вставляють мірну стрічку, а потім включають привід. Стрічка і кодовий диск перетворювача починають рухатися, причому швидкість руху стрічки V_1 перевищує окружну швидкість V_2 диска. За сигналами, який формується пристроєм формування сигналів на межах квантів, в процесі роботи перетворювача на стрічку наносяться

мітки. Відстань між мітками представляють собою збільшені в $i = \frac{V_1}{V_2}$ раз кванти диска. Знаючи це, шляхом зіставлення реальних положень міток на стрічці з їх теоретичними положеннями і обчисленням за формулою:

$$\Delta\alpha_k = \frac{l_{pk} - l_{Tk}}{R_i},$$

де l_{pk} и l_{Tk} – дійсна і теоретична відстань k -ої мітки від деякого початку відліку на стрічці, R - радіус кодового диска перетворювача, неважко визначити похибки

розташування кордонів квантів α к кута, що перетворюється, які і являють собою шукані інструментальні похибки перетворювача.

Пристрій значно зручніше в експлуатації і точніше. При його використанні виключений суб'єктивний фактор, його не потрібно перенастроювати з доріжки на доріжку. Проте, він також працює не дуже точно, що в значній мірі обумовлено використанням в ньому понижуючого редуктора. При високій роздільній здатності перетворювача (один квант дорівнює $1/2^{10} - 1/2^{11}$ частці кола) кінематична похибка редуктора може досягати ціни кванта. Разом з цим, пристрій неекономічний, тому що його робота супроводжується великою витратою мірної стрічки.

Розглянемо інший пристрій. Тут підвищення його точності і економічності, досягається за рахунок виключення понижуючого редуктора і механізму протягування стрічки. Схема пристрою наведена на рисунках 3.4 і 3.5. На рис. 3.5 показаний один з можливих варіантів формувача сигналів на межах квантів.

При використанні пристрою спочатку виконують його настройку.

Пристрій включає в себе досліджуваний перетворювач «кут - код» 1, з'єднаний з приводом 2 і з формувачем сигналів на кордонах квантів кута 3, Т - тригер 4, вхід якого з'єднаний з виходом формувача сигналів 3, перший логічний елемент І 5, перший вхід якого з'єднаний з першим виходом Т - триггера 4, другий логічний елемент 6, перший вхід якого з'єднаний з другим виходом Т - триггера 4, високочастотний генератор імпульсів 7 (~ 50 КГц), з'єднаний з іншими входами першого 5 і другого 6 елементів І, пристрій 8, перший лічильник імпульсів 9, вхід якого з'єднаний з виходом першого 5 елементу І, а вихід через першу ключову схему 10 і блок АБО 11 пов'язаний з запам'ятовуючим пристроєм 8, другий лічильник імпульсів 12, вхід якого з'єднаний з виходом другого елемента І 6, а вихід через другу ключову схему 13 і блок АБО 11 також пов'язаний з запам'ятовуючим пристроєм 8, причому перший вихід Т - триггера 4 через диференціюючий ланцюг 14 з'єднаний з керуючим виходом Z запам'ятовуючого пристрою 8, з шиною скидання другого лічильника 12 і керуючим входом другої ключової схеми 13, а другий вихід Т-триггера 4 через диференціюючий ланцюг 15

з'єднаний з керуючим входом Z запам'ятовуючого пристрою 8, з шиною скидання першого лічильника 9 і керуючим входом першої ключової схеми 10.

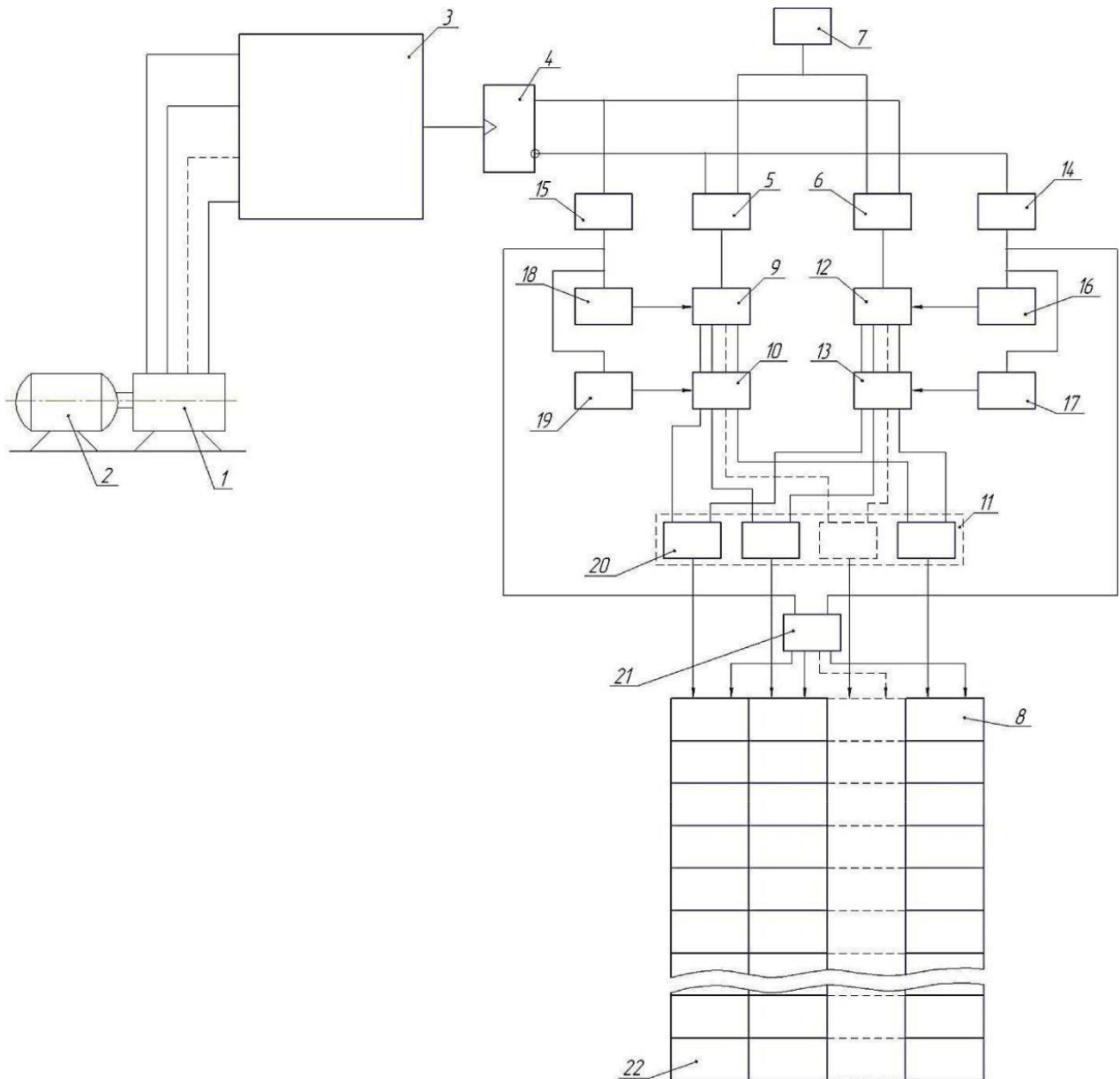


Рисунок 3.4 - Пристрій для визначення похибки перетворювача "кут - код»

Для підвищення надійності роботи пристрою дифланцюг 14 може бути з'єднаний з шиною скидання лічильника 12 через елемент затримки 16, а з керуючим входом ключової схеми 13 - через елемент затримки 17. Аналогічно, дифланцюг 15 може бути з'єднаний з шиною скидання лічильника 9 через елемент затримки 18, а з керуючим входом ключової схеми 10 - через елемент затримки 19. (Час затримки сигналу елементами 17 і 19 може становити ≈ 4 мкс, а елементами 16 - 18 ≈ 8 мкс).

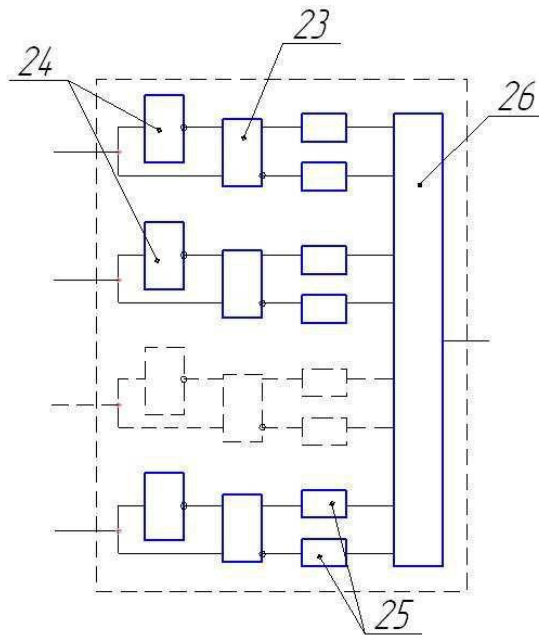


Рисунок 3.5 - Пристрій для формування сигналів на кордонах квантів

Блок 11 може бути виконаний з двоходових елементів АБО 20, перші входи яких підключені до виходів ключової схеми 10, а другі входи - до виходів ключової схеми 13. З'єднання дифланцюгів 14 і 15 з керуючим входом Z запам'ятовуючого пристрою 8, також для підвищення надійності роботи пристрою, може бути виконаний через розв'язуючий логічний елемент АБО 21. Саме ж пристрій 8 може бути виконано у вигляді стекової пам'яті на регістрах зсуву 22, а його керуючий вхід Z може являти собою шину, яка з'єднує шини зсуву регістрів. Що стосується формувача сигналів на кордонах квантів 3, показаного на рис. 3.5, то він може бути виконаний, наприклад, на основі RS - тригерів 23, інверторів 24, диференціюючих ланцюгів 25 і схеми АБО 26. Кожен вихід досліджуваного перетворювача 1 підключається до першого входу одного з RS - тригерів 23 безпосередньо, і до другого входу цього ж тригера - через інвертор 24. Дифланцюги 25 своїми входами підключені до виходів RS - тригерів (до кожного виходу один дифланцюг), а виходами - до входів схеми АБО 26, вихід якої є виходом формувача.

Привід 2 пристрою забезпечений схемою стабілізації швидкості (вона має загальновідому конструкцію і на рисунках не показана) і ротором, що має великий момент інерції (подібно маховика).

При використанні пристрою привод 2 запускають і чекають, поки швидкість його роботи встановиться постійною (її вибирають невеликою, близько 15 об/хв). Потім пристрій включають в роботу. На виходах перетворювача 1 (він так само, як зазвичай, перетворює кут повороту свого вхідного вала в код Грея чи інший однозмінний код) послідовно починають змінювати одна одну паралельні кодові комбінації, що складаються з нулів і одиниць. На кордонах квантів кодованого кута, коли в кодових комбінаціях відбувається зміна нуля на одиницю або навпаки, в формувачеві сигналів 3 відбувається наступне. Якщо на деякий вхід формувача приходять одиниця замість нуля, то на перший вхід відповідного RS - тригера 23 вона надходить без зміни, а на другий вхід - проходячи через інвертор 24 і перетворившись в нуль. В результаті RS - тригер 23 спрацює (переключиться), і один з дифланцюгів 25, підключених до його виходів, на початку цього перемикавання видає короткий імпульс. Цей імпульс, пройшовши через схему АБО 26, надійде на Т – тригер 4. Якщо на деякий вхід формувача 3 приходять нуль замість одиниці, то на перший вхід відповідного RS - тригера 23 він також надійде без зміни, а на другий вхід - пройшовши через інвертор 24 і перетворившись в одиницю. RS - тригер 23 знову переключиться, і в початковий момент перемикавання на виході одного з дифланцюгів 25, приєднаних до виходів RS - тригера, знову з'явиться короткий імпульс. Пройшовши через схему АБО 26, він також надійде на Т - тригер 4. Таким чином, при зміні кодових комбінацій, які видаються перетворювачем 1, тобто на кордонах квантів кодованого кута, формувач 3 подає імпульси на Т - тригер 4.

При надходженні кожного імпульсу на вхід Т - тригера 4 він перемикається, і виходить, що поки перетворювач 1 видає одну кодову комбінацію, Т - тригер 4 знаходиться в одному стані, а поки видає наступну комбінацію, то в протилежному стані. Тобто, поки перетворювач 1 видає одну кодову комбінацію, у Т - тригера 4 одиниця на одному виході (зокрема, на першому), а поки перетворювач 1 видає наступну комбінацію, у Т - тригера 4 одиниця на іншому виході (зокрема, на другому).

Генератор імпульсів 7 (він включається попередньо) в процесі роботи пристрою з високою частотою подає імпульси на другі входи логічних елементів

5 і 6. Якщо в даний момент одиниця знаходиться на першому виході Т - триггера 4, то імпульси від генератора проходять на вхід лічильника 9. Якщо одиниця знаходиться на другому виході Т - триггера 4, то ці імпульси проходять на вхід лічильника 12. Той чи інший лічильник імпульсів рахує і видає на виході послідовно зростаюче двоїчне число. Це число надходить на ключову схему 10 або 13, але не проходить через неї до тих пір, поки Т - тригер 4 не переключиться. У момент перемикання Т - триггера, коли на його першому або другому виході з'являється одиниця замість нуля, дифланцюг 14 або 15 «вирізає» з цієї одиниці передній фронт і через елемент АБО 21 подає імпульс на вхід Z запам'ятовуючого пристрою 8, зрушуючи інформацію на його регістрах 22 на один розряд і тим самим готуючи його до прийому числа, яке дещо пізніше буде прочитано з виходу лічильника 9 або 12. Через елемент затримки 19 або 17 цей імпульс короткочасно включає ключову схему 10 або 13, число з відповідного лічильника прочитується і, проходячи через елементи АБО 20 блоку АБО 11, записується в пам'ять пристрою 8. Якщо число прочитано з лічильника 9, то далі через елемент затримки 18 імпульс від дифланцюга 15 надходить на шину скидання лічильника 9 і встановлює його в початковий (нульовий) стан. Якщо число прочитано з лічильника 12, то далі через елемент затримки 16 імпульс від дифланцюга 14 через елемент затримки 16 надходить на шину скидання лічильника 12, і той аналогічно обнуляється. При обнуленні першого лічильника імпульси від генератора 7 рахує другий лічильник, при обнуленні другого лічильника імпульси від генератора 7 рахує перший лічильник. По черзі відбувається і прочитування чисел з виходів лічильників і запис їх в пристрій 8. Оскільки Т - тригер 4 перемикається на кордонах квантів кодованого кута, інтервали часу між його перемиканнями пропорційні реальним величинам квантів. А значить, числа, що записуються в пам'ять пристрою 8, також пропорційні реальним величинам квантів. Знаючи швидкість обертання приводу 2 і частоту імпульсів від генератора 7, неважко розрахувати теоретичну ціну (величину) одного кванта кодованого кута в імпульсах. Шляхом вирахування цієї величини з чисел, записаних в пам'ять пристрою 8, неважко далі визначити похибки всіх квантів кута, кодованого досліджуваним перетворювачем «кут - код». У зв'язку з тим, що в пристрої не

використовується понижуючий редуктор, а також виключений механізм протягування стрічки і не потрібна мірна стрічка, пропонований пристрій виявляється точніше і економічніше.

Разом з тим він має істотний недолік: він не дозволяє автоматично визначити середньоарифметичне значення похибки розташування кордонів квантів кута в досліджуваному кодовому датчику положення (КДП), знати яке необхідно для юстування КДП в системі цифрового вимірювання або керування з його застосуванням. З огляду на те, що число квантів КДП в сучасних системах зазначеного призначення може досягати декількох тисяч, середньоарифметичне значення похибки розташування кордонів квантів, навіть маючи дані про реальні величини квантів, записані в пам'яті пристрою - прототипу, «вручну» визначити не просто занадто багато роботи, а надзвичайно складно. Для цього потрібно часу в десятки разів більше, ніж для отримання самих даних.

Розглянемо ще один пристрій з автоматизацією визначення середньоарифметичного значення похибки розташування кордонів квантів КДП [25]. Він значно скорочує трудомісткість визначення згаданої похибки і знижує ймовірність помилок при обробці даних, записаних в пам'яті пристрою. Це забезпечить можливість більш точного юстирування КДП і, відповідно, підвищення точності систем цифрового вимірювання та управління з їх застосуванням. Схема наведена на рис. 3.6. На рис. 3.5 показаний один з можливих варіантів формувача сигналів на кордонах квантів. На рис. 3.7 показаний реверсивний реєстр зсуву.

Пристрій включає в себе досліджуваний КДП 1, з'єднаний з приводом 2 і з формувачем сигналів на межах квантів кута 3, Т - тригер 4, вхід якого з'єднаний з виходом формувача сигналів 3, перший логічний елемент І 5, перший вхід якого з'єднаний з першим виходом Т - триггера 4, другий логічний елемент 6, перший вхід якого з'єднаний з другим виходом Т - триггера 4, високочастотний генератор імпульсів 7 (~ 50 КГц), з'єднаний з другими входами першого 5 і другого 6 елементів І, пристрій 8, перший лічильник імпульсів 9, вхід якого з'єднаний з виходом першого 5 елементу І, а вихід через першу ключову схему 10 і блок АБО

11 пов'язаний з шинами введення даних в пристрій 8, другий лічильник імпульсів 12, вхід якого з'єднаний з виходом другого елемента І 6, а

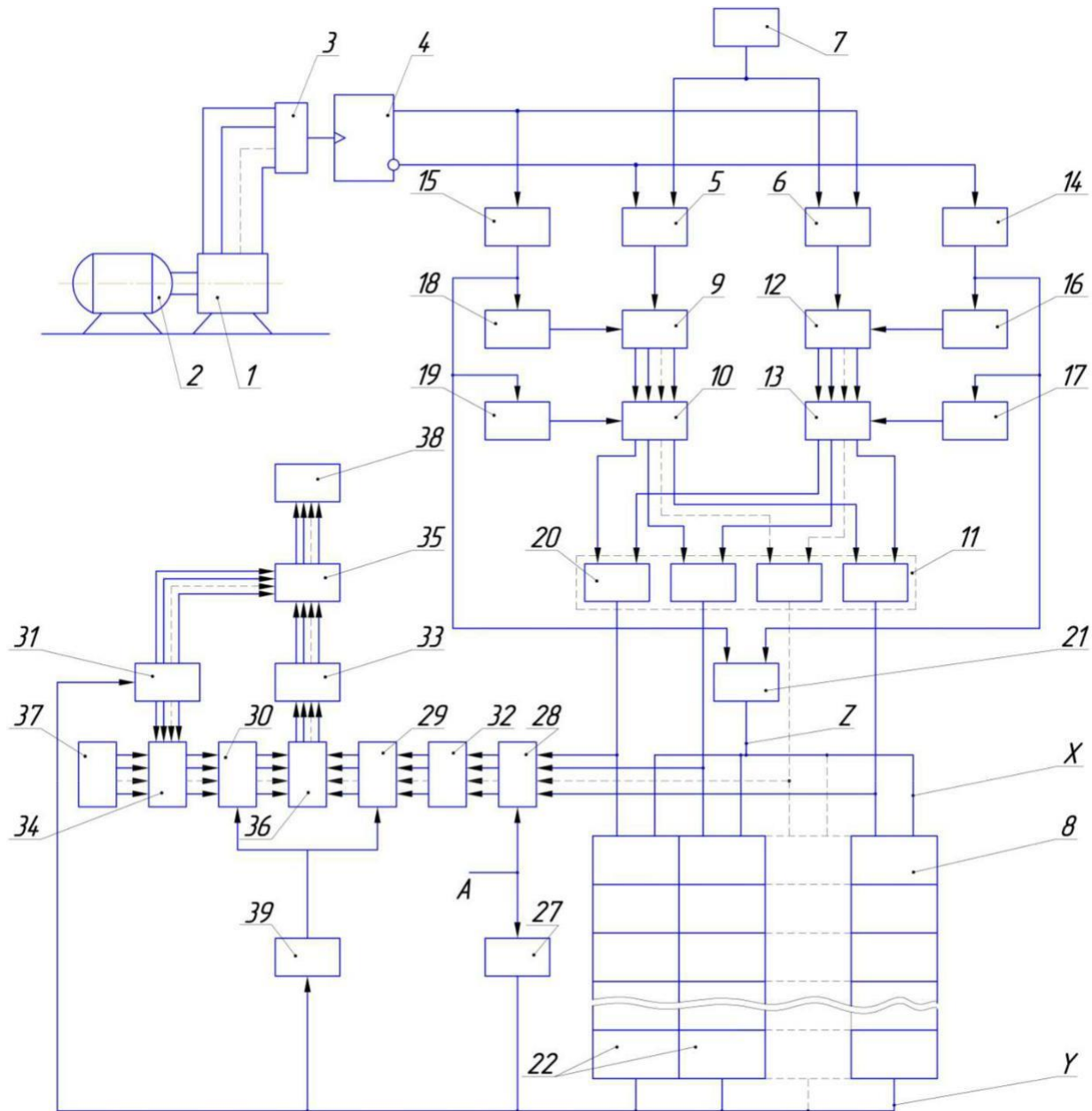


Рисунок 3.6 - Пристрій для визначення похибки КДП

вихід через другу ключову схему 13 і блок АБО 11 також пов'язаний з шинами введення даних в пристрій 8, причому перший вихід Т - тригера 4 через диференціюючий ланцюг 14 з'єднаний з керуючим входом Z запам'ятовуючого пристрою 8, з шиною скидання другого лічильника 12 і керуючим входом другої ключової схеми 13, а другий вихід Т - тригера 4 через диференціюючий ланцюг 15 з'єднаний з керуючим входом Z запам'ятовуючого пристрою 8, з шиною скидання першого лічильника 9 і керуючим входом першої ключової схеми 10.

Для підвищення надійності роботи пристрою дифланцюг 14 може бути з'єднаний з шиною скидання лічильника 12 через елемент затримки 16, а з керуючим входом ключової схеми 13 - через елемент затримки 17.

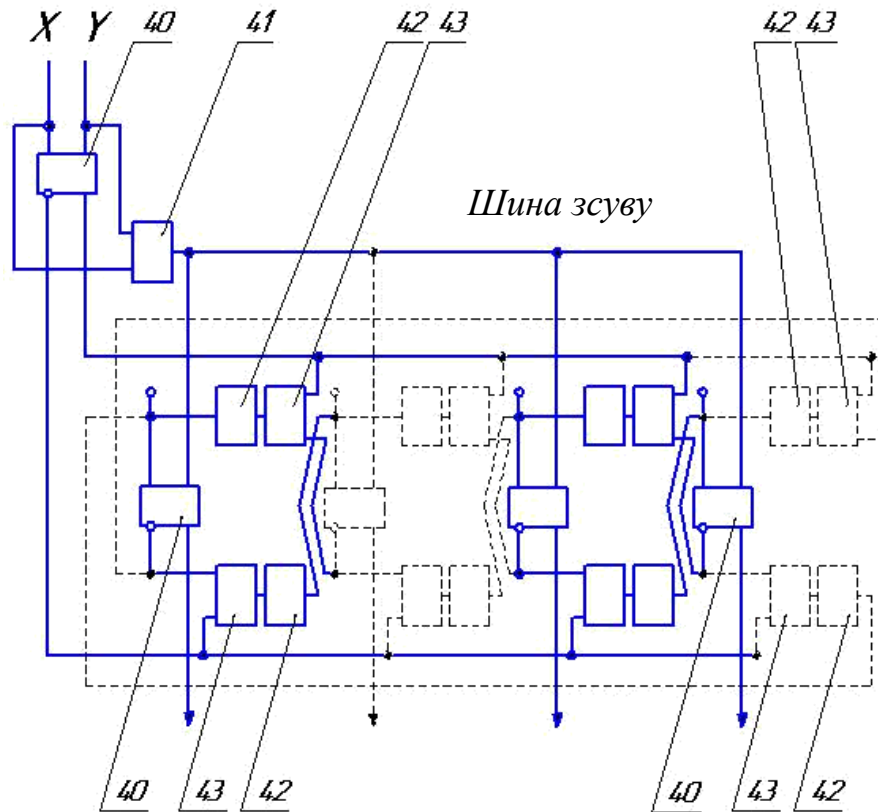


Рисунок 3.7 - Реверсивний регістр зсуву

Аналогічно, дифланцюг 15 може бути з'єднаний з шиною скидання лічильника 9 через елемент затримки 18, з керуючим входом ключової схеми 10 - через елемент затримки 19. (Час затримки сигналу елементами 17 і 19 може становити ≈ 4 мкс, а елементами 16 і 18 ≈ 8 мкс). Блок 11 може бути виконаний з двохвходових елементів АБО 20, перші входи яких підключені до виходів ключової схеми 10, а другі входи - до виходів ключової схеми 13. З'єднання дифланцюгів 14 і 15 з керуючим входом Z запам'ятовує 8, також для підвищення надійності роботи пристрою, може бути виконано через розв'язуючий логічний елемент АБО 21. Сам же пристрій 8 виконано у вигляді однакових реверсивних регістрів зсуву 22, шини X прямого зсуву яких з'єднані паралельно один з одним і послідовно з керуючим входом Z жорсткого диску, а шини Y зворотного зсуву які з'єднані паралельно між собою.

Що стосується формувача сигналів на межах квантів 3, то він може бути виконаний, наприклад, на основі RS - тригерів 23, інверторів 24, диференціюючих ланцюгів 25 і схеми АБО 26. Кожен вихід досліджуваного КДП 1 підключається до першого входу одного з RS - тригерів 23 безпосередньо, і до другого входу цього ж тригера - через інвертор 24. Дифланцюги 25 своїми входами підключені до виходів RS - тригерів (до кожного виходу один дифланцюг), а виходами - до входів схеми АБО 26, вихід якої є виходом формувача. А реверсивний регістр зсуву, виконаний таким чином: шини прямого X і зворотного зсуву Y з'єднані з RS - тригером 40, виходи від якого з'єднані з елементами І. Елемент АБО 41 знімає сигнали з шин X і Y і далі з'єднується з RS - тригерами 40, які в свою чергу з'єднані з елементами затримки 42, а ті з елементами І 43.

Наряду з перерахованим, пристрій містить наступні блоки: додатковий генератор імпульсів 27, третю 28, четверту 29 і п'яту 30 ключові схеми, додатковий лічильник імпульсів 31, перший 32 і другий 33 блоки інтегрування, блок множення 34, блок ділення 35, блок порівняння 36, задатчик еталонної величини кванта перетворюваного кута 37, цифрове табло 38 і блок затримки 39. Входи першого блоку інтегрування 32 через третю ключову схему 28 з'єднані з шинами введення даних в пристрій 8, виходи блоку інтегрування 32 через четверту ключову схему 29 з'єднані з шинами введення від'ємника в блок порівняння 36, виходи блоку множення 34 через п'яту ключову схему 30 з'єднані з шинами введення зменшуваного в блок порівняння 36, виходи блоку порівняння 36 з'єднані з входами другого блоку інтегрування 33, входи введення діленого в блок поділу 35 з'єднані з виходами блоку інтегрування 33 і входи введення дільника в блок поділу 35 з'єднані з виходами додаткового лічильника 31, виходи лічильника 31 і виходи задатчика 37 з'єднані з входами блоку множення 34, додатковий генератор імпульсів 27 підключений безпосередньо до рахункового входу додаткового лічильника 31 і до шин Y зворотного зсуву регістрів 22 запам'ятовує пристрій 8 і через блок затримки 39 - до керуючих входів четвертої 29 і п'ятої 30 ключових схем, а цифрове табло 38 підключено до виходу блоку поділу 35.

При використанні пристрою привід 2 запускають і чекають, поки швидкість його роботи встановиться постійної, порядку 15 об/хв (він забезпечений схемою стабілізації швидкості загальновідомої конструкції, на рисунку не показаної). Потім пристрій включають в роботу. На виходах КДП 1, (він так само, як зазвичай, перетворює кут повороту свого вхідного вала в код Грея чи інший однозмінний код) послідовно починають змінювати один одного паралельно кодові комбінації, що складаються з нулів і одиниць. На межах квантів кодованого кута, коли в кодових комбінаціях відбувається зміна нуля на одиницю або, навпаки, в формувач сигналів 3 відбувається наступне. Якщо на деякий вхід формувача приходять одиниця замість нуля, то на перший вхід відповідного RS - тригера 23 вона надходить без зміни, а другий вхід - проходячи через інвертор 24 і перетворившись в нуль. В результаті RS - тригер 23 - проходячи через інвертор 24 і перетворившись в нуль. В результаті RS - тригер 23 спрацює (переключиться), і один з дифланцюгів 25, підключених до його виходів, на початку цього перемикавання видає короткий імпульс. Цей імпульс, пройшовши через схему АБО 26, надійде на Т - тригер. Якщо на деякий вхід формувача 3 приходять нуль замість одиниці, то на перший вхід відповідного RS - тригера 23 він також надійде без зміни, а на другий вхід - пройшовши через інвертор 24 і перетворившись в одиницю. RS - тригер 23 знову переключиться, і в початковий момент перемикавання на виході одного з дифланцюгів 25, приєднаних до виходів RS - тригера, знову з'явиться короткий імпульс. Пройшовши через схему АБО 26, він також надійде на Т - тригер 4. Таким чином, при зміні кодових комбінацій, які видаються КДП 1, тобто на межах квантів кодованого кута, формувач 3 подає імпульси на Т - тригер 4.

При надходженні кожного імпульсу на вхід Т - тригера 4 він перемикається, і виходить, що поки КДП 1 видає одну кодову комбінацію, Т - тригер знаходиться в одному стані, а поки видає наступну комбінацію, то в протилежному стані. Тобто, поки КДП 1 видає кодову комбінацію, у Т - тригера 4 одиниця на одному виході (зокрема, на першому), а поки КДП 1 видає наступну комбінацію, у Т - тригера 4 одиниця на іншому виході (зокрема, на другому).

Генератор імпульсів 7 (він включається попередньо) в процесі роботи пристрою з високою частотою подає імпульси на другі входи логічних елементів 5 і 6. Якщо в даний момент одиниця знаходиться на першому виході Т - триггера 4, то імпульси від генератора проходять на вхід лічильника 9. Якщо одиниця знаходиться на другому виході Т - триггера 4, то ці імпульси проходять на вхід лічильника 12. Той чи інший лічильник імпульсів рахує і видає на виході послідовно зростаюче двійкове число. Це число надходить на ключову схему 10 або 13, але не проходить через неї до тих пір, поки Т - тригер 4 не перебере. У момент перемикавання Т - триггера, коли на його першому або другому виході з'являється одиниця замість нуля, дифланцюг 14 або 15 «вирізає» з цієї одиниці передній фронт і через елемент АБО 21 подає імпульс на вхід Z запам'ятовує пристрій 8 і далі на шини прямого зсуву X, зрушуючи інформацію в регістрах 22 на один розряд і тим самим готуючи їх до прийому числа, яке дещо пізніше буде прочитано з виходу лічильника 9 або 12. Через елемент затримки 19 або 17 цей імпульс короткочасно включає ключову схему 10 або 13, число з відповідного лічильника прочитується і, проходячи через елементи АБО 20 блоку АБО 11, записується в пам'ять пристрою 8. Якщо число прочитано з лічильника 9, то далі через елемент затримки 18 імпульс від дифланцюга 15 надходить на шину скидання лічильника 9 і встановлює його в початковий (нульовий) стан. Якщо число прочитано з лічильника 12, то далі через елемент затримки 16 імпульс від дифланцюга 14 через елемент затримки 16 надходить на шину скидання лічильника 12, і той аналогічно обнуляється. При обнуленні першого лічильника імпульси від генератора 7 рахує другий лічильник, при обнуленні другого лічильника імпульси від генератора 7 рахує перший лічильник. По черзі відбувається і прочитування чисел з виходів лічильників і запис їх в пристрій 8. Оскільки Т - тригер 4 перемикається на межах квантів кодованого кута, інтервали часу між його перемикаваннями пропорційні реальним величинам квантів. А значить, числа, що записуються в пам'ять пристрою 8, також пропорційні реальним величинам квантів.

Після того, як всі числа, що характеризують реальні величини квантів кута досліджуваного КДП, записані в пристрій 8, привід 2 перетворювача 1 зупиняють,

генератор 7 вимикають і зовнішнім сигналом А включають ключову схему 28 і генератор імпульсів 27. Генератор 27 починає подавати імпульси на шину У зворотного зсуву регістрів 22 запам'ятовує пристрій 8, на рахунковий вхід лічильника 31 і на блок затримки 39. Оперативна пам'ять через ключову схему 28 починає вводити в блок інтегрування 32 послідовно одне число за іншим. Блок 32 підсумовує кожне, що надійшло до нього, число з раніше наявних в ньому і видає число, що характеризує стан кожного реального і-го кордону кванта щодо нуля КДП.

Перед подачею на схему 28 і генератор 27 сигналу А, в блок множення 34 за допомогою датчика 37 вводиться двійкове число, що характеризує теоретичну величину кванта кута досліджуваного КДП. Після кожного імпульсу, що надійшов від генератора 27 на рахунковий вхід лічильника 31, цей лічильник видає число і, що відповідає кількості двійкових чисел, які надійшли з пам'яті пристрою 8 в блок інтегрування 32. Це ж число надходить в блок множення 34 і в блок поділу (на входи введення подільника) 35. При цьому на виходах блоку множення 34 виявляється число, що характеризує стан кожного теоретичного і-го кордону кванта. Кожен імпульс від генератора 27 далі проходить через блок затримки 39 і змушує спрацювати ключові схеми 29 і 30. Ці схеми пропускають на входи блоку порівняння 36 числа з виходів блоку множення 34 і блоку інтегрування 32. У блоці порівняння 36 з першого числа віднімається друге і на виході блоку 36 виявляється число, що характеризує відхилення положення реального кордону і-го кванта від положення теоретичної межі цього кванта. Отримане відхилення надходить в блок інтегрування 33, де підсумовується з раніше поданими в нього. Результат підсумовування з виходів блоку 33 надходить в блок поділу 35 на входи введення діленого. Оскільки в нього вже надійшло число і від лічильника 31, що є дільником, то на виході блоку 35 вийде число, відповідне середньоарифметичній величині відхилення реальних кордонів квантів від їх теоретичних положень в інтервалі квантів від нуля до і. Ця величина надійде на цифрове табло 38 і буде показана. Після того, як накопичувач пристрою 8 повністю видасть всі числа, що раніше були в ньому записані, показання з табло 38 можна прочитати. Вони і будуть показником шуканої середньоарифметичної

похибки всього КДП. Якщо цей показник дорівнює β (одиниця його виміру - 1 імпульс від генератора 7), то, знаючи частоту роботи цього генератора γ в імпульсах в секунду і швидкість обертання досліджуваного КДП ω в градусах в секунду, легко можна перевести β з імпульсів в α в градусах як:

$$\Delta\alpha = \frac{\omega}{\gamma} \cdot \Delta\beta \quad (3.1)$$

Зрозуміло, теоретичну величину кванта, що вводиться в пристрій за допомогою датчика 37, для цього потрібно представляти двійковим числом:

$$\beta = \frac{\gamma}{\omega} \cdot \alpha \quad (3.2)$$

де α - теоретична кутова дискретність досліджуваного КДП в градусах.

Знаючи величину α , її можна використовувати для корекції юстирування КДП при налаштуванні системи вимірювання або контролю за з його застосуванням. Оскільки шукана величина визначається автоматично, то при використанні запропонованого пристрою продуктивність визначення похибки досліджуваного КДП виявляється в кілька разів вище, ніж при використанні пристрою, приведенного на рис. 3.4. При цьому зменшується ймовірність помилки. Все це створює технічний ефект, завданням якого і була розробка пристрою.

3.3 Методика оптимального юстирування кодового датчика положення

Для того щоб будь-який пристрій працював правильно і без помилок, необхідно перед використанням провести його налаштування.

Розберемо методику оптимального юстирування кодового датчика положення для пристрою, описаного в розділі 3.2.

При використанні кодових датчиків положення в системах цифрової індикації і системах ПУ верстатів виникає похибка квантування за рівнем [10], оскільки перетворюються функція в межах квантів шкали датчика фіксується як постійна. Ця похибка в межах кванта підкоряється закону рівномірного розподілу і при ціні кванта λ характеризується математичним очікуванням

$$M(\Delta\lambda) = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\lambda} x dx \quad (3.3)$$

і дисперсією

$$D(\Delta\lambda) = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\lambda} \left(x - \frac{\lambda}{2}\right)^2 dx = \frac{\lambda^2}{12} \quad (3.4)$$

Якщо юстировку шкали датчика виконувати з урахуванням $M(\lambda)$ симетрично (при цьому центри юстирування збігаються з центрами симетрії квантів), то систематична складова похибки квантування може бути виключена. На підставі цього похибки квантування кодових датчиків положення зазвичай оцінюють за допомогою $D(\lambda)$ або $\pm\sqrt{D(\Delta\lambda)}$. Однак така оцінка ідеалізована, оскільки вона не враховує інструментальних похибок (похибок виготовлення і збірки) датчика [1] і закону розподілу перетворюваного параметра [17]. Нижче робиться спроба оцінити похибку квантування реального датчика положення з урахуванням зазначених факторів і пропонується метод мінімізації цієї похибки шляхом додаткового юстирування шкали.

Інструментальні похибки викликають відхилення реальних величин від геометричних і призводять до похибок їх розташування. В зв'язку з цим симетрична юстирування і виключення систематичної складової похибки квантування в реальному датчику можливі лише для одного кванта. Для всіх інших це практично нездійсненно.

Знайдемо систематичну складову похибки квантування для k -го кванта шкали, вважаючи, що остання юстірують по середині першого кванта. Нехай шкала датчика має p квантів, фактичні ціни яких $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k, \dots, a_p$, а теоретичні $b_1, b_2, b_3, \dots, b_k, \dots, b_p$.

Тоді відстані від центрів юстування до правих меж квантів на реальній шкалою (рисунок 3.8) дорівнюють:

для першого кванта

$$c_1 = \frac{a_1}{2} \quad (3.5)$$

для другого

$$c_2 = \frac{a_1}{2} + a_2 - \frac{b_1}{2} - \frac{b_2}{2} \quad (3.6)$$

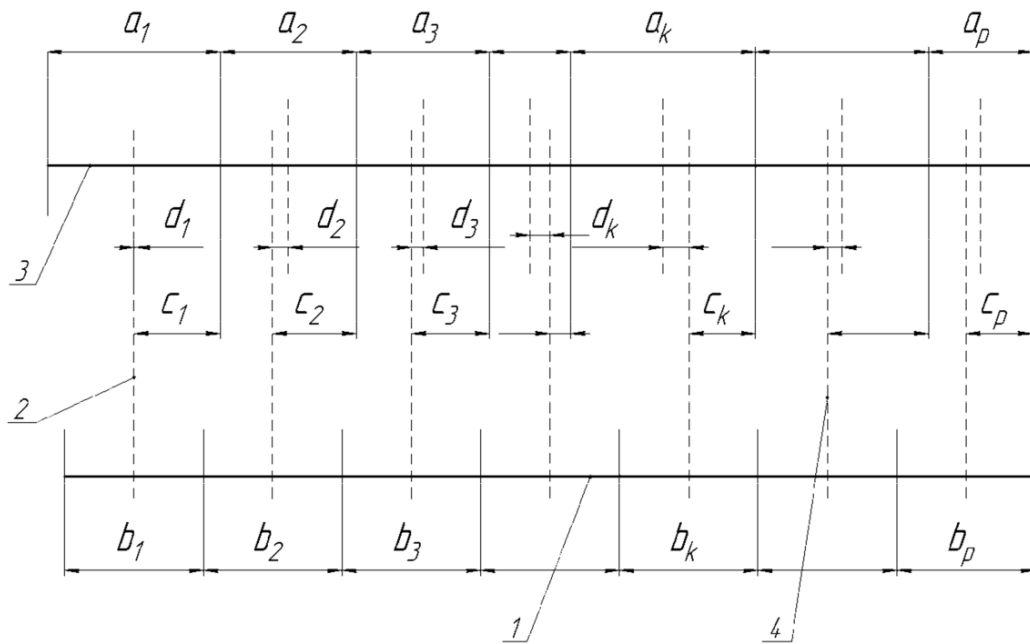


Рисунок 3.8 - Схема для визначення систематичної складової похибки квантування: 1 - шкала ідеального датчика; 2 - центри юстирування квантів; 3 - шкала реального датчика; 4 - центри симетрії квантів реальної шкали

для третього

$$c_3 = \frac{a_1}{2} + a_2 + a_3 - \frac{b_1}{2} - b_2 - \frac{b_3}{2} \quad (3.7)$$

для k-го кванта

$$c_k = \frac{a_1}{2} + a_2 + \frac{1}{2} [1 - \delta(x_k - x_1)] (2a_k - b_1 - b_k) + \sum_{i=2}^{k-1} (a_i - b_i) \quad (3.8)$$

де $\delta(x_k - x_1) = \begin{cases} 1, & x_k = x_1; \\ 0, & x_k \neq x_1; \end{cases}$ - дискретна функція [18].

З іншого боку, як видно з рисунка, $c_k = \frac{a_k}{2} - d_k$, де d_k - систематична складова похибки квантування в межах k-го кванта. Звідси:

$$d_k = \frac{1}{2} \{ a_k - a_1 - [1 - \delta(x_k - x_1)] (2a_k - b_1 - b_k) \} + \sum_{i=2}^{k-1} (a_i - b_i) \quad (3.9)$$

Знаючи d_k і дисперсію похибки квантування в межах k-го кванта

$D(\Delta a_k) = \frac{a_k^2}{12}$, неважко знайти найбільш ймовірні граничні значення сумарної

похибки квантування для k -го кванта шкали датчика:

$$f_k = \frac{1}{2} \{a_k - a_1 - [1 - \delta(x_k - x_1)](2a_k - b_1 - b_k)\} + \sum_{i=2}^{k-1} (a_i - b_i) \pm \frac{a_k}{2\sqrt{3}} \quad (3.10)$$

Якщо тепер врахувати, що f_k (при $k = 1, 2, \dots, p$) є випадкова величина, ймовірність появи якої дорівнює P_k (тобто ймовірності попадання квантуємого функції в k -й інтервал), то можна знайти математичне сподівання і дисперсію похибки квантування для всього датчика:

$$M(f) = \sum_{k=1}^p P_k f_k \quad (3.11)$$

і дисперсією

$$D(f) = \sum_{k=1}^p [f_k - M(f)]^2 P_k \quad (3.12)$$

Кожному значенню k відповідає два значення f_k - позитивне і негативне; тому розрахунок $M(f)$ і $D(f)$ слід вести окремо для тих і інших f_k , приймаючи далі величини, великі за абсолютною величиною (модулю), за шукані. Аналіз показує, що знайдену величину $M(f)$ можна мінімізувати, не збільшуючи $D(f)$. Для цього, крім юстирування шкали кодового датчика по середині одного з квантів, досить провести додаткову юстировку на величину:

$$M(d) = \sum_{k=1}^p P_k d_k \quad (3.13)$$

Після додаткового юстирування отримуємо $M(f) = M(f')$, $D(f) = D(f')$, де $f'_k = f_k - M(d)$. Оскільки

$$M(f') = \sum_{k=1}^p [f_k - M(d)] = \sum_{k=1}^p P_k d_k \pm \frac{1}{2\sqrt{3}} \sum_{k=1}^p P_k a_k - \sum_{k=1}^p P_k \sum_{k=1}^p P_k d_k \quad (3.14)$$

де $\sum_{k=1}^p P_k \sum_{k=1}^p P_k d_k = \sum_{k=1}^p P_k d_k \sum_{k=1}^p P_k = \sum_{k=1}^p P_k d_k$,

Рівність модулів позитивного і негативного значень $M(f')$ свідчить про те, що $|M(f)| = \min$, так як при додатковій юстирування шкали зменшення модуля

$$M(f') = \pm \frac{1}{2\sqrt{3}} \sum_{k=1}^p P_k a_k \quad (3.15)$$

негативного $M(f)$ можливо лише за рахунок збільшення модуля позитивного $M(f)$, і навпаки.

Переходячи до $D(f')$, можна показати, що:

$$D(f') = \sum_{k=1}^p [f_k - M(d) - M(f')]^2 = \sum_{k=1}^p P_k \left(d_k \pm \frac{a_k}{2\sqrt{3}} \sum_{k=1}^p P_k d_k \mp \frac{1}{2\sqrt{3}} \sum_{k=1}^p P_k a_k \right)^2 \quad (3.16)$$

Однак до додаткового юстирування:

$$D(f) = \sum_{k=1}^p [f_k - M(f)]^2 P_k = \sum_{k=1}^p P_k \left(d_k \pm \frac{a_k}{2\sqrt{3}} \sum_{k=1}^p P_k d_k \mp \frac{1}{2\sqrt{3}} \sum_{k=1}^p P_k a_k \right)^2 \quad (3.17)$$

Таким чином, $D(f') = D(f)$ до і після додаткового юстирування.

При рівномірному квантуванні (тобто при $a = \text{const}$) і абсолютно точному виготовленні датчика:

$$M(f') = \pm \frac{a}{2\sqrt{3}} \sum_{k=1}^p P_k = \pm \frac{a}{2\sqrt{3}} \quad (3.18)$$

$$D(f') = 0$$

Це цілком узгоджується з відомою ідеалізованою оцінкою похибок квантування.

Дані формули дозволяють досить просто оцінювати і мінімізувати статистичні характеристики похибок квантування в кодових датчиках положення; при цьому враховуються інструментальні похибки датчика і закон розподілу перетворюваного параметра.

3.4 Система відліку переміщень робочого органу машини з компенсацією похибки

Для усунення кінематичних похибок передачі, визначених за допомогою пристрою з п. 3.2, використовується система відліку переміщень (рис. 3.9).

На схемі зображено: 1 - датчик; 2 - передавальний механізм; 3 - робочий орган; 4 - власне привід; 5 - ходовий гвинт; 6,7 - зубчасті колеса; 9 - водило; 8,10 - шестерні; 11 - черв'ячне колесо; 12 - черв'як.

Дана система містить абсолютний енкодер і передавальний механізм, що включає в себе перетворювач лінійного переміщення в круговий, вхід якого з'єднаний з робочим органом. Її особливістю є те, що передавальний механізм забезпечений планетарним редуктором, вхід якого з'єднаний з виходами перетворювача лінійного переміщення з круговим, черв'ячним колесом, співвісним і жорстко з'єднаним з кінцевим центральним колесом редуктора, і

черв'яком, який взаємодіє з черв'ячним колесом. При цьому вихід планетарного редуктора з'єднаний з входом енкодера.

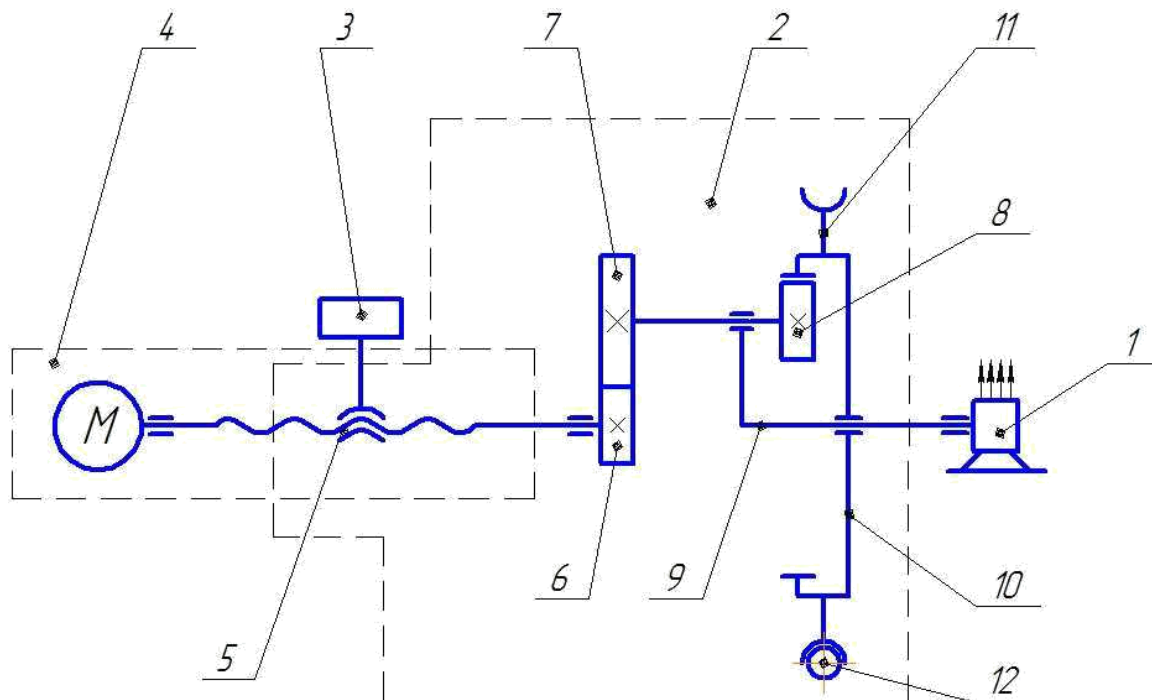


Рисунок 3.9 - Система цифрового відліку переміщень робочого органу машини

При роботі системи черв'як, кінцеве центральне і черв'ячне колеса нерухомі. Лінійне переміщення робочого органу машини перетворюється в круговий рух, передане через планетарний редуктор енкодер. Останній видає кодові комбінації, відповідні поточним положенням робочого органу машини.

У режимі установки «нуля» системи машина не працює, її робочий орган не переміщається. Рух від нього на енкодер не передається. Для того, щоб змістити «нуль» системи (встановити новий початок відліку енкодера), досить, обертаючи черв'як, змусити повертатися черв'ячне колесо і жорстко поєднане з ним кінцеве центральне колесо планетарного редуктора. Вихідний вал редуктора буде повертати вал енкодера, встановлюючи його в те «нульове» положення, яке потрібно. Після завершення «нуля», систему можна запускати в робочий режим. Оскільки передача «черв'ячне колесо - черв'як» самогальмуючі, настройка «нуля» при роботі системи буде зберігатися.

Тут вирішена задача підвищення точності системи відліку переміщень, що виражається в зменшенні саме кінематичних накопичених похибок, що вносяться

до системи передавальним механізмом (перетворювачем лінійного переміщення в кругове і планетарним редуктором), за допомогою використання черв'ячної передачі для підналагодження.

4 РОЗРОБКА ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК СИСТЕМИ ВІДЛІКУ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВЕРСТАТА

4.1 Спосіб зменшення похибок системи відліку переміщень

Пропонований спосіб усунення кінематичних похибок передачі пов'язаний з використанням компенсуючих ланцюгів (рис. 4.1). Такі ланцюги дозволяють усунути підсумовкову похибку кожної окремої ланки кінематичного ланцюга [3], в даному випадку компенсуються накопичені похибки, обумовлені застосуванням перетворювача лінійного переміщення в круговому і планетарному редукторі. Цей метод особливо важливий в тих випадках, коли, наприклад, в кінематичний ланцюг необхідно включити вимірювальний пристрій, наприклад, датчик зворотного зв'язку.

На рисунку 4.1 схема містить абсолютний енкодер 1 і передавальний механізм 2, вхід якого з'єднаний з робочим органом 3 машини 4. Передавальний механізм включає в себе пару «гвинт - гайка» 5 (вона виконує функцію перетворювача лінійного переміщення в кругове) і забезпечений планетарним редуктором, що складається з початкового центрального колеса 6, сполученого з гвинтом пари 5, сателітів 7 і 8, встановлених в водило 9, і кінцевого центрального колеса 10. Крім того, в передавальному механізмі 2 є черв'ячне колесо 11, співвісне з колесом 10 і жорстко поєднане з ним, і черв'як 12, який взаємодіє з черв'ячним колесом 11.

Сателіти 7 і 8 знаходяться в зачепленні відповідно з початковим 6 і кінцевим 10 центральними колесами. Виходом планетарного редуктора є вал водила 9, і він з'єднаний зі входом енкодера 1.

Наряду з перерахованим система включає в себе варіатор 13 і трензель 14. Вхід варіатора 13 паралельно планетарному редуктору з'єднаний з гвинтом передачі «гвинт-гайка» 5, його вихід з'єднаний з входом трензеля 14, а вихід трензеля через зубчасту пару коліс 15 і 16 кінематично пов'язаний з черв'яком 12.

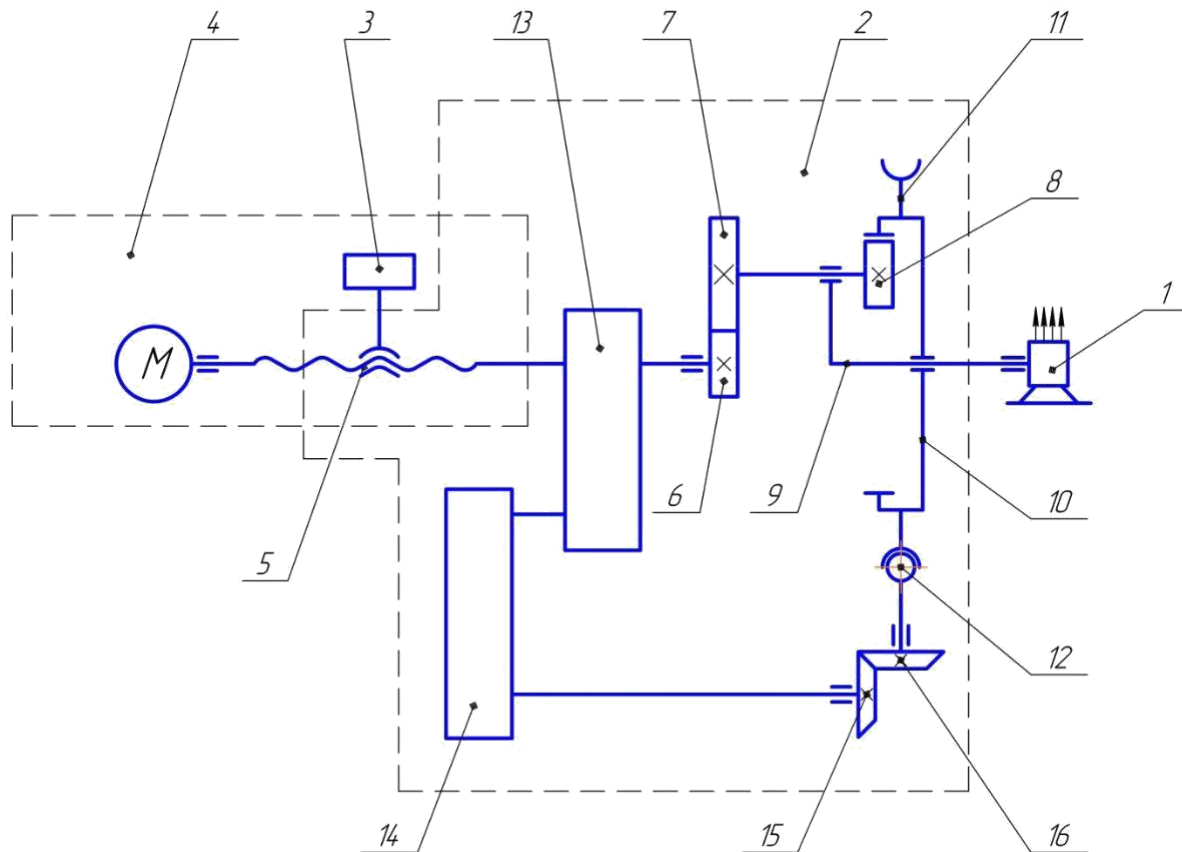


Рисунок 4.1 - Компенсація похибок передач

Перед використанням системи її налаштовують. Для цього спочатку за допомогою вимірювальної апаратури визначають кінематичну похибку передавального механізму 2 і енодера 1. Далі відповідно з величиною похибки, що накопичується при обертанні енодера, шляхом регулювання встановлюють потрібне передавальне відношення варіатора 13. Після цього в залежності від знака похибки («плюс» чи «мінус») включають трензель 14 «вперед» або «назад». Після цього система може функціонувати в робочому режимі. При її роботі через похибки передавального механізму 2 обертання енодера 1 могло б відбуватися з похибкою, що поступово накопичується. Однак, кінематичний ланцюг з варіатора 13, трензеля 14 і коліс 15 і 16 буде повертати черв'як 12 відповідно до настройки варіатора 13. Черв'як 12 буде обертати колеса 11 і 10, і похибка передавального механізму буде компенсуватися за рахунок підсумовування рухів водила 9 і колеса 10. Принципово при правильному налаштуванні варіатора ця компенсація може бути практично повною.

Слід зазначити, що система легко може встановлюватися на «нуль». Для цього достатньо трензель 14 встановити в нейтральне положення, а потім на потрібний кут повернути колеса 15 і 16.

У якості реверсивного механізму може бути використаний трензель, варіанти конструкцій якого запропоновані в книзі Н.С. Ачеркана [12].

Тепер зупинимося на варіаторі. Варіатор - це передача із змінним передавальним відношенням, керованим ззовні. Фрикційні варіатори виготовляються таким чином, що при роботі діаметри їхніх тіл кочення змінюються плавно. За рахунок цього вдається забезпечити безступінчасту зміну передавального відношення. У приводі подачі рисунка 4.1 фрикційний варіатор можна використовувати, так як передача є прикладеною, а не силовою.

Принцип їх роботи розглянемо на прикладі циліндричної фрикційної передачі (рис. 4.2). Передача складається з двох циліндричних катків - провідного 1 і веденого 2. При обертанні катка 1, притиснутого до катка 2 силою F_n , на лінії взаємодії виникає сила тертя F_t :

$$F_t = f \cdot F_n,$$

де f – коефіцієнт тертя ($f=0,04\dots0,05$ в мастилі, $f=0,15\dots0,2$ – в'язка сталь по сталі, $f=0,2\dots0,3$ – сталь по текстоліту).

Ця сила забезпечує обертання другого циліндричного катка. Таким чином, силовий потік у фрикційних передачах здійснюється за рахунок сил тертя, що виникають в контактній зоні [7].

Величина корисного переданої навантаження повинна бути менше, ніж сила тертя, тоді величина підтискання ковзанок визначається як:

$$F_n = \frac{2\beta T}{Df}$$

де β – запас зчеплення ($\beta=1,25\dots1,5$ в силових і $\beta=3$ – в кінематичних ланцюгах); D – діаметр катка; T – крутний момент.

За величиною підтискання F_n ведеться розрахунок тіл тертя, валів і опор на міцність

Передаточне відношення:

$$U = \frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1(1 - \varepsilon)}$$

де $\varepsilon = 0,005\dots0,05$ – коефіцієнт ковзання, який збільшується для передач, що

працюють в масляній ванні, через підвищені натискних сил F_n .

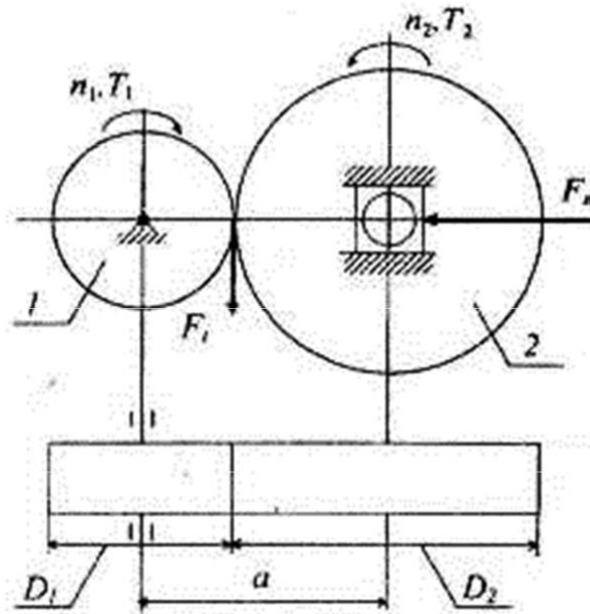


Рисунок 4.2 - Схема циліндричної фрикційної передачі

Найбільшого поширення набули фрикційні передачі зі змінним U . Такі передачі називають варіаторами.

Фрикційні варіатори виготовляються таким чином, що при роботі діаметри їхніх тіл кочення змінюються плавно. За рахунок цього вдається забезпечити безступінчасту зміну U .

У схемі для компенсації похибок передачі на рис. 4.1 можна було б використовувати варіатори, зображені на рис. 4.3. Варіатор а - лобовий, складається з фрикційного диска 1 і катка 2; каток переміщається по диску, змінюючи передавальне відношення. Варіатор б - конусний варіатор, на провідному і відомому валу встановлені катки 1 і 2 з робочими поверхнями конічної форми. Обертання від провідного катка до веденого передається проміжним диском 3 циліндричної форми, який, переміщаючись уздовж вісі, змінює передавальне відношення.

Варіатор в - торовий, по торовим поверхням фрикціонів 1 і 2 спеціальних погоджувачим пристроєм переміщаються ролики 3, за рахунок цього змінюється передавальне відношення.

У кожного з перерахованих варіаторів є хоча б один недолік - ковзання. Воно є причиною зносу, зменшення ККД і мінливості передавальних

відношень, що неприпустимо в ланцюзі компенсації.

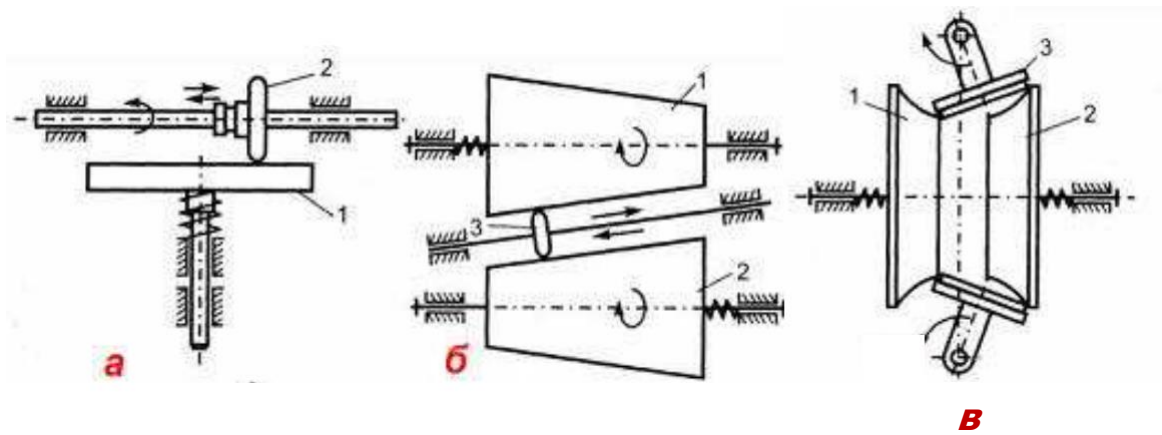


Рисунок 4.3 - Конструкції варівторів

Найбільш прості конструкції, які забезпечують роботу без прослизання і мають можливість регулювання є фрикційний варіатор, розроблений А.С. Космодаміанським і ін. [30].

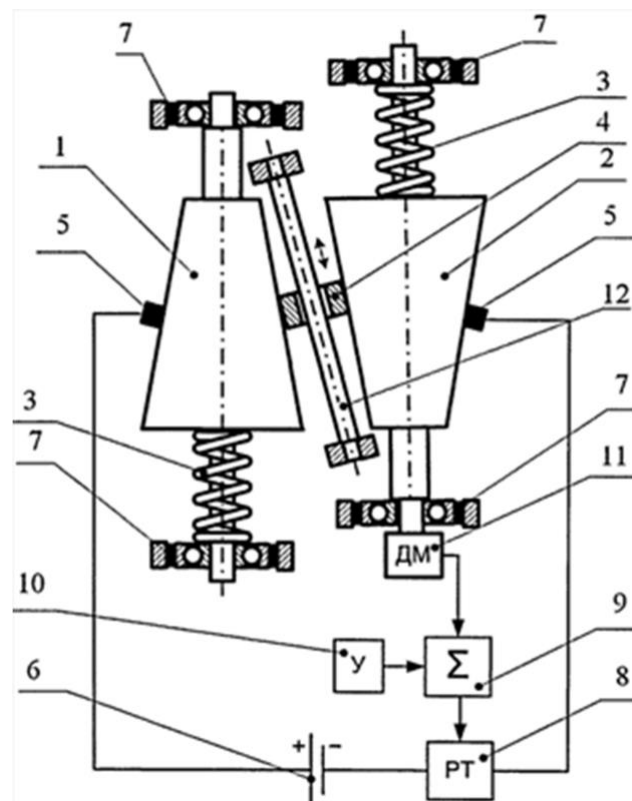


Рисунок 4.4 - Фрикційний варіатор

На рис. 4.4 показаний фрикційний варіатор, який містить ведучий 1 і ведений 2 металеві конуси, що притискаються пружинами 3 до металевого проміжного тіла 4, яке може переміщатися уздовж поверхонь конусів. До конуса 1 і 2 за допомогою струмознімальних пристроїв 5 підведена напруга від джерела

струму 6. Щоб уникнути короткого замикання через опори осей конусів, опори конусів ізолюються вставками 7, вал приводу 12 проміжного тіла 4 виконаний з діелектричного матеріалу. Підпорядкована система регулювання складається з регулятора струму 8, суматора 9, блоку вставки 10 і датчика крутного моменту 11.

При обертанні ведучого конуса 1 крутний момент за рахунок сили тертя між конусами 1 і 2 і проміжним тілом 4, створеної пружинами 3, передається на ведений вал 2. Вал 12 переміщає проміжне тіло 4, виконане з діелектричного матеріалу. Величина струму, що проходить через точки контакту конусів 1 і 2 та проміжного тіла 4, задається підпорядкованою системою регулювання. На регулятор струму 8 надходить сигнал з виходу суматора 9. На суматор 9 подається сигнал від блоку уставки 10, який пропорційний заданому обертальному моменту на вихідному валу варіатора, і сигнал з датчика крутного моменту ДМ, який, в свою чергу, пропорційний дійсному крутному моменту. Різниця цих сигналів, вступаючи на регулятор струму 8 з виходу суматора 9, в залежності від знака призводить до зменшення або збільшення струму, що проходить через точки контакту конусів 1 і 2 та проміжного тіла 4, що, в свою чергу, викликає значну зміну сили тертя. При цьому регулювання сили струму призводить до підтримки сили тертя на рівні, що забезпечує передачу заданого крутного моменту на ведений конус 2 без прослизання проміжного тіла 4 по конусам 1 і 2 при певній швидкості обертання веденого конуса. Плавна зміна коефіцієнта тертя між конусами і проміжним тілом, яке визначається величиною струму, що пропускається через контакт конусів і проміжного тіла, дозволяє зробити передачу заданого крутного моменту з ведучого конуса на ведений без прослизання проміжного тіла по конусу. Про це свідчить експериментально отримана залежність між коефіцієнтом тертя f і щільністю струму J_k через контакт [19], представлена на рис. 4.5. Коефіцієнт тертя - це відношення найбільшої сили тертя спокою двох тіл до нормальної відносно поверхонь тертя сили, яка притискає тіла один до одного.

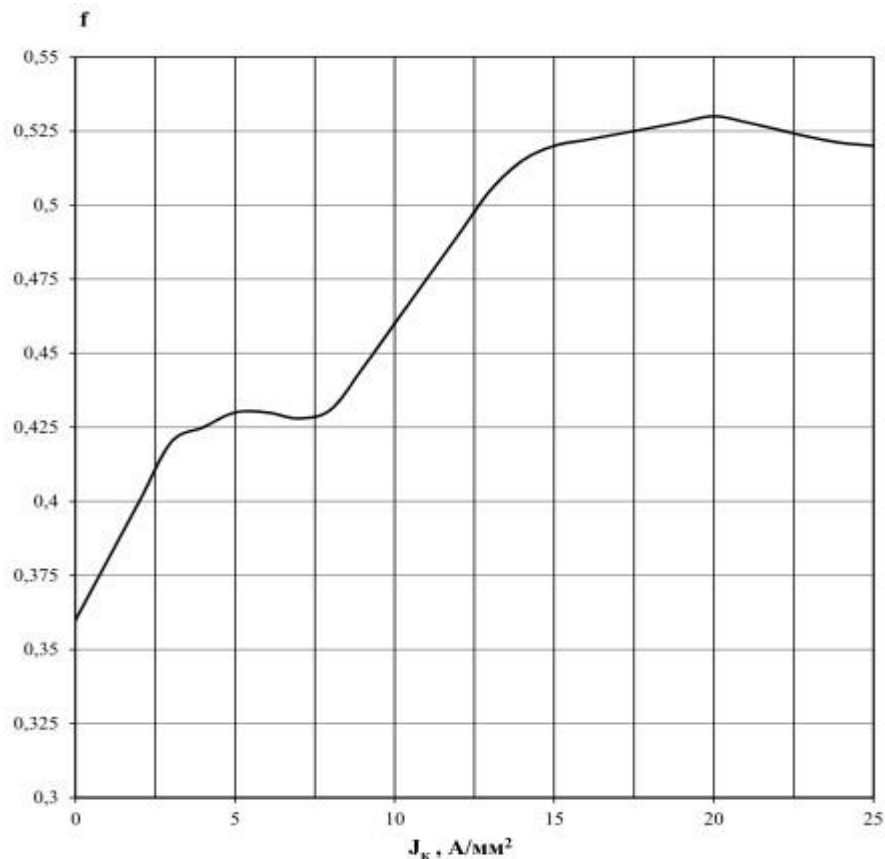


Рисунок 4.5 - Залежність коефіцієнта тертя від щільності струму через контакт (за даними Ткаченко В.П. [19])

З графіка видно, що значення коефіцієнта тертя максимальне при $J_k = 0,20$ А/мм² і дорівнює 0,53, що на 47% вище, ніж при відсутності струму. Це і дозволяє успішно застосовувати фрикційний варіатор для автоматичної корекції в поданому понижувальному диференціальному ланцюзі компенсації на рис. 4.1.

4.2 Розрахунок сумарної похибки системи відліку переміщень

Для того щоб запропонований пристрій працював без помилок, необхідно розробити спосіб розрахунку сумарної похибки пристрою, описаного в розділі 4.1.

При використанні кодових датчиків положення в системі відліку переміщень робочого органу верстата виникає похибка квантування за рівнем. Нехай шкала датчика має p квантів $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k, \dots, a_p$. Оскільки була проведена попередня юстирування системи відліку переміщень (пункт 3.3), то центри юстирування квантів збігаються з реальними центрами квантів. Це означає, що в центрі кванта похибка мінімальна (практично дорівнює нулю), а до кордону

кванта вона прямолінійно зростає до величини «+ 1», рівній половині реального кванта (рисунок 4.6, графік для $g1(x)$):

$$\Delta_I = \begin{cases} k - \frac{1}{2} - x, & \text{при } \sum_{n=1}^{k-1} a_n \leq x < \frac{a_k}{2} + \sum_{n=1}^{k-1} a_n, & k \in N; \\ x - k + \frac{1}{2}, & \text{при } \frac{a_k}{2} + \sum_{n=1}^{k-1} a_n \leq x < \sum_{n=1}^k a_n, & k \in N; \end{cases}$$

де x – переміщення робочого органу.

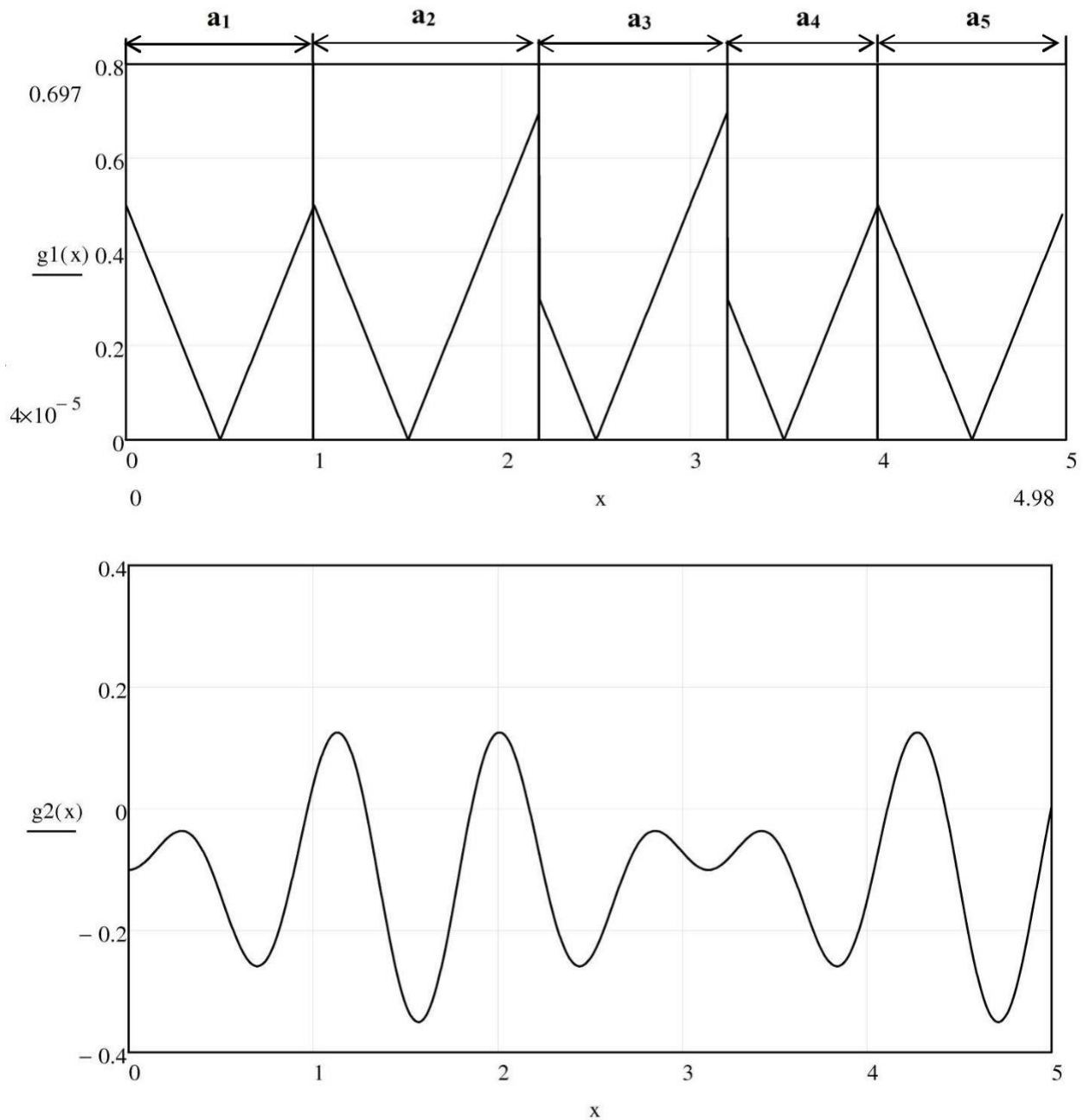


Рисунок 4.6 - Схема похибок основного ланцюга $g1(x)$
і компенсуючого ланцюга $g2(x)$

У той же час компенсуючий ланцюжок, що включає до свого складу варіатор, трензель, шестерні і черв'як (рисунок 4.1), має свою похибку, яку ми можемо виміряти заздалегідь. Так як похибка зубчастих передач змінюється циклічно, то можна припустити, що похибка змінюється як функція синуса, причому амплітуда коливань похибки також змінюється за законом синуса (рисунок 4.6, графік для $g_2(x)$). Також за рахунок похибки настройки варіатора виникає систематична похибка, яка або збільшує, або зменшує значення похибки на величину C (в даному випадку приймемо $C = -0,1$), в залежності від передавального відношення. Значення змінюється від мінімального « $-\Delta_2$ » до максимального « $+\Delta_2$ »:

$$\Delta_{II} = 0,25 \cdot \sin 7x \cdot \sin x - 0,1 \quad (4.2)$$

Отримані залежності для похибок двох ланцюжків накладаються один на одного. Графік загальної похибки $g(x)$ представлений на рис. 4.7:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_I + \Delta_{II},$$

Видно, що в певних точках переміщення робочого органу сумарна похибка має менші значення, ніж похибки Δ_I і Δ_{II} , а в деяких точках вона перевищує значення I і II . Сумарна похибка Δ_{Σ} буде змінюватися в межах Δ_{\max} і Δ_{\min} (максимальне і мінімальне значення):

$$\Delta_{\max} = \Delta_1 + \Delta_2,$$

$$\Delta_{\min} = -\Delta_2$$

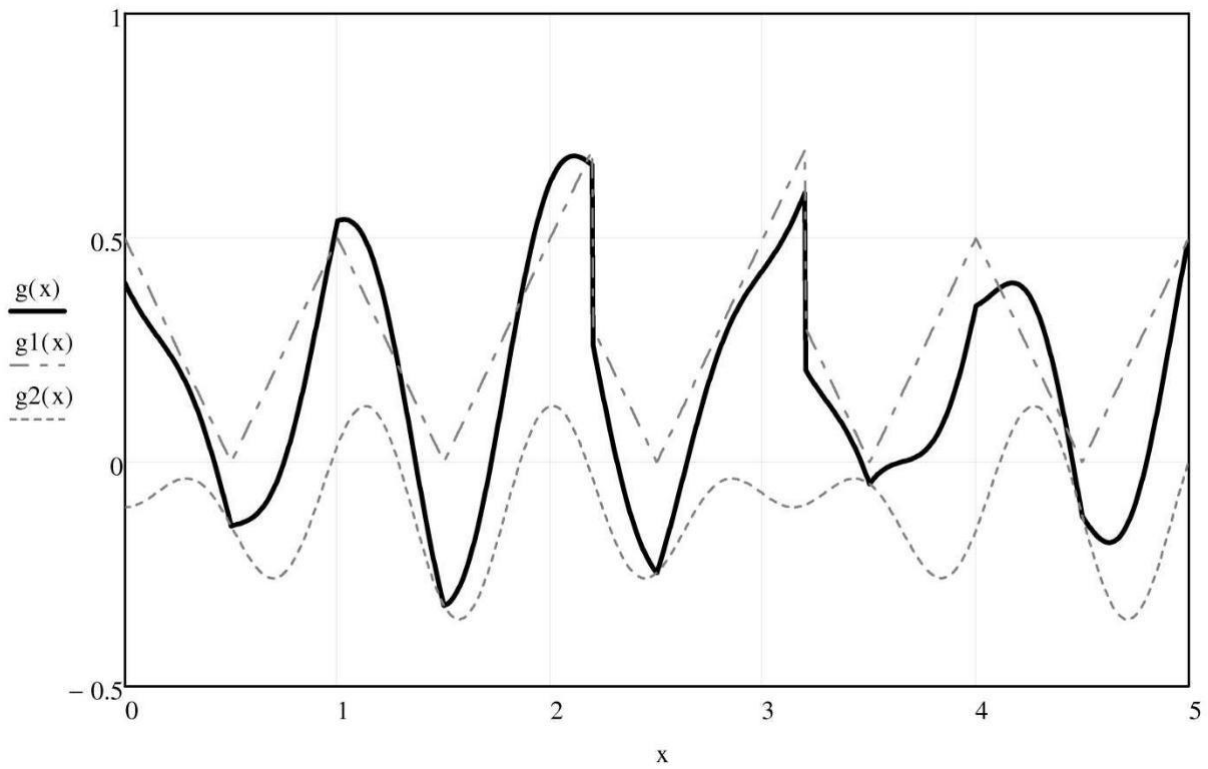
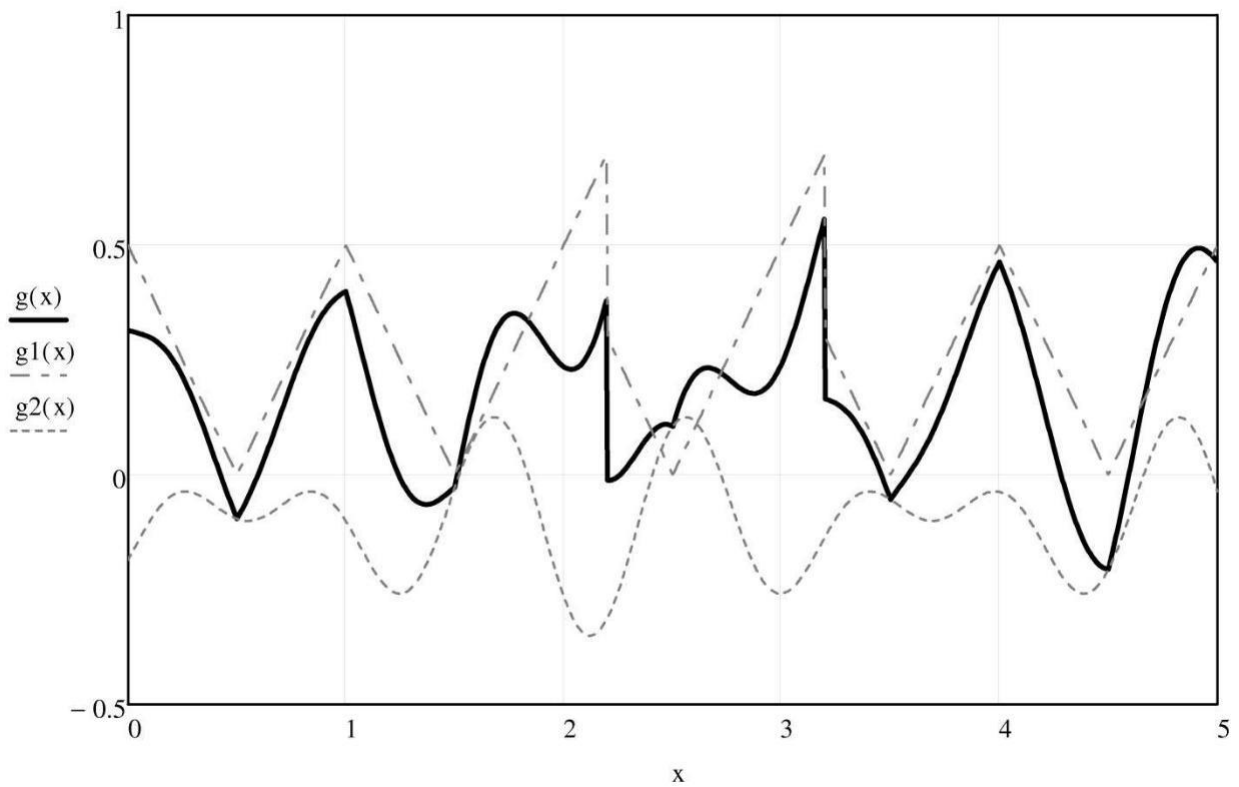
Максимум в точці (2,111; 0,683), мінімум в точці (1,5; -0,319).

Є можливість, змінюючи значення передавального відношення варіатора і змінюючи напрямок обертання трензеля, зміщувати значення компенсуючого ланцюга щодо основної так, щоб сумарна похибка системи відліку переміщень була мінімальна (Σ близька до нуля).

Наприклад, якщо зрушити Δ_{II} на 0,45 відн. од. переміщення (вправо по осі Ox), тобто:

$$\Delta_{II} = 0,25 \cdot \sin 7(x - 0,55) \cdot \sin(x - 0,55) - 0,1$$

то значення $|\Delta_{\max}|$ і $|\Delta_{\min}|$ будуть значно менше (рисунок 4.8), ніж в попередньому випадку.

Рисунок 4.7 - Схема сумарної похибки $g(x)$ Рисунок 4.8 - Схема сумарної похибки $g(x)$

Максимум в точці $(3,2; 0,565)$, мінімум в точці $(4,5; -0,206)$.

Таким чином, можна коригувати похибку компенсуючого ланцюга для мінімізації загальної похибки.

4.3 Методика налаштування системи відліку переміщень робочого органу верстата

Для того щоб запропонований в розділі 4.1 пристрій працював правильно і без помилок, необхідно виконати його налаштування. Розберемо методику оптимального налаштування даного пристрою.

По-перше, необхідно за допомогою пристрою для визначення похибки перетворювача "кут-код» автоматично визначити середньоарифметичне значення похибки розташування кордонів квантів кута в кодовому датчику положення (КДП).

По-друге, використовуючи отримані дані про значення похибки розташування кордонів квантів, необхідно провести юстування КДП в системі цифрового вимірювання або контролю за його застосуванням. Спосіб юстирування докладно описаний в п. 3.3 даної роботи. Формули дозволяють досить просто оцінювати і мінімізувати статистичні характеристики похибок квантування в кодових датчиках положення; при цьому враховуються інструментальні похибки датчика і закон розподілу перетворюваного параметра.

По-третє, визначимо похибку, що вноситься компенсуючим ланцюгом (рис. 4.6). Для цього необхідно вимірювати переміщення робочого органу і по ньому визначати положення черв'яка, використовуючи масштабний коефіцієнт, заздалегідь визначений за передавальним відношенням всього кінематичного ланцюга. Далі розраховане положення черв'яка слід порівнювати з фактичним станом черв'яка, яке визначає поворот черв'ячного колеса (рис. 4.1). Таким чином буде визначена похибка повороту черв'ячного колеса на всьому проміжку переміщення робочого органу. Використовуючи її, можна врахувати на скільки при цьому змінюється значення кута повороту водила планетарної передачі, тим самим визначимо похибку компенсуючого ланцюга на всьому проміжку переміщення робочого органу. При визначенні положення робочого органу і черв'яка рекомендується використовувати інструментальний мікроскоп

ІМЦЛ100х50. Мікроскоп може оснащуватися відеосистемою для виведення зображення на монітор комп'ютера і програмним забезпеченням для автоматизованої обробки результатів вимірювання.

Найбільш оптимальним способом автоматизації даного етапу налаштування СЗП буде використання візуального програмування LabVIEW з використанням бібліотеки засобів обробки і аналізу зображень IMAQ Vision [4]. За допомогою даної програми можна отримати залежність значення похибки корегуючого ланцюга від положення робочого органу.

Нарешті, знаючи залежність похибки корегуючого ланцюга від переміщення робочого органу, слід підсумувати його з похибкою квантування системи відліку переміщень. Можна, змінюючи значення передавального відношення варіатора і змінюючи напрямок обертання трензелем, зміщувати значення компенсуючого ланцюга щодо основної так, щоб сумарна похибка системи відліку переміщень була мінімальна. Алгоритм мінімізації похибок при налаштуванні компенсуючого ланцюга СЗП представлений в п. 4.4.

Таким чином, є можливість налаштування роботи пристрою (рис. 4.1) з мінімальним значенням загальної похибки.

4.4 Алгоритм налаштування компенсуючого ланцюга системи відліку переміщень робочого органу верстата

Тепер докладніше розглянемо один з етапів методики налаштування пристрою, а точніше безпосередньо настройку компенсуючого ланцюга.

Алгоритм налаштування наведено на рис. 4.9. З рисунка видно, що спочатку отримані значення функцій похибок основного і компенсуючого ланцюга вводяться в програмний модуль, потім в пам'яті зберігаються значення передавального відношення варіатора і напрямок обертання трензеля.

Далі змінюються передавальне відношення і знак заданим чином. Отримані значення максимуму і мінімуму сумарної функції для кожного варіанта порівнюються за абсолютним значенням зі значенням максимуму і мінімуму в пам'яті програми. Якщо отримані числа менше, то значення перезаписуються. При цьому передавальне відношення варіатора і напрямок обертання трензеля, що відповідають кращому варіанту, також зберігається в окремому комірку пам'яті.

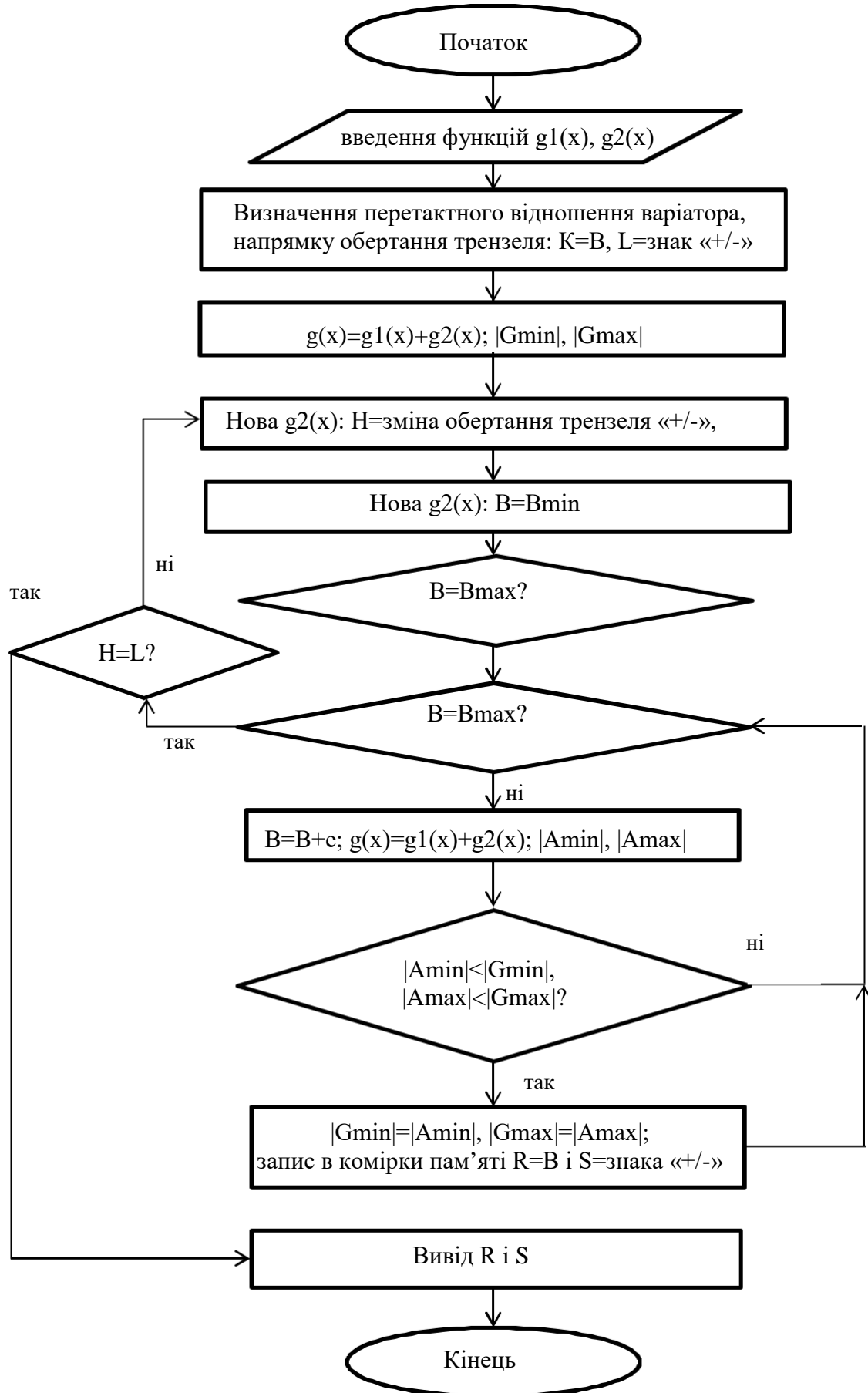


Рисунок 4.9 - Алгоритм налаштування компенсуючого ланцюга

В результаті будуть отримані оптимальні значення передавального відношення варіатора і напрямку обертання трензеля, які відповідають найменшій сумарній похибці. Ці дані слід використовувати для налаштування пристрою за запропонованою методикою (п.4.3).

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОВЕДЕННІ НАУКОВО-ДОСЛІДНИХ РОБІТ

Охорона праці при роботі на токарних верстатах

1. Загальні вимоги охорони праці

1.1 До самостійної роботи на токарних верстатах допускаються особи, що пройшли медичний огляд, вступний інструктаж, первинний інструктаж, навчання та стажування на робочому місці, перевірку знань вимог охорони праці, які мають групу з електробезпеки не нижче I і відповідну кваліфікацію згідно тарифно-кваліфікаційного довідника.

1.2 При роботі на токарних верстатах необхідно:

1.2.1 Виконувати тільки ту роботу, яка визначена робочою інструкцією.

1.2.2 Виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку.

1.2.3 Правильно застосовувати засоби індивідуального та колективного захисту.

1.2.4 Дотримуватися вимоги охорони праці.

1.2.5 Негайно сповіщати свого безпосереднього або вищестоящого керівника про будь-якій ситуації, яка загрожує життю і здоров'ю людей, про кожний нещасний випадок, що трапився на виробництві, або про погіршення стану свого здоров'я, у тому числі про прояв ознак гострого професійного захворювання (отруєння).

1.2.6 Проходити навчання безпечним методам і прийомам виконання робіт і надання першої допомоги потерпілим на виробництві, інструктаж з охорони праці, перевірку знань вимог охорони праці.

1.2.7 Проходити обов'язкові періодичні (протягом трудової діяльності) медичні огляди (обстеження), а також проходити позачергові медичні огляди (обстеження) за напрямком роботодавця у випадках, передбачених Трудовим кодексом та іншими федеральними законами.

1.2.8 Надавати першу допомогу постраждалим від електричного струму і при інших нещасних випадках.

1.2.9 Вміти застосовувати первинні засоби пожежогасіння.

1.3 При роботі на токарних верстатах, характерні і присутні такі небезпечні й шкідливі виробничі фактори:

-небезпека рівні напруги в електричних ланцюгах, замикання яких може пройти через тіло людини;

-Обертові деталі верстата;

-гострі леза ріжучого інструменту, гострі кромки і задирки вихідних матеріалів; недостатня освітленість робочої зони;

-небезпека виникнення пожежі;

1.4 Працівники, які працюють на токарних верстатах, повинні бути забезпечені спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту відповідно до типових галузевих норм безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту і колективним договором.

1.5 У випадках травмування або нездужання необхідно припинити роботу, повідомити про це керівника робіт і звернутися до медичного закладу.

1.6 За невиконання даної інструкції винні притягуються до відповідальності згідно законодавства.

2. Вимоги охорони праці перед початком роботи

2.1 Одягти і ретельно застебнути встановлену за діючими нормами спеціальний одяг і технологічну взуття відповідно до характеру майбутньої роботи.

2.2 Перевірити зовнішнім оглядом справність інструменту, верстата. На верстатах кожухи запобіжні в наявності, захисні пристрої справні, заземлення не порушено.

2.3 Приготувати гачок для видалення стружки, ключі та інший інструмент. Не можна застосовувати гачок у вигляді петлі.

2.4 Перевірити на холостому ході верстата:

-ісправність органів управління (механізмів головного руху подачі, пуску, зупинку руху та ін.);

-ісправність системи змащення й охолодження;

-ісправність фіксації важелів включення і виключення (переконатися в тому, що можливість мимовільного перемикавання з холостого ходу на робочий виключена).

2.5 Перевірити наявність і якість вихідних матеріалів необхідних для виконання виробничого завдання.

2.6 Про всі недоліки і несправності, виявлених при огляді на робочому місці, доповісти безпосередньому керівнику для вжиття заходів до їх повного усунення.

3. Вимоги охорони праці під час роботи

3.1 Перевірити правильність установки виробу до пуску верстата.

3.2 Оброблювану деталь необхідно надійно закріпити в патроні або центрах. Забороняється для прискорення зупинки верстата гальмувати патрон або планшайбу рукою.

3.3 При обробці деталі в центрах потрібно уважно стежити за станом центрів і своєчасно змащувати їх, якщо цього не робити, центри швидко спрацьовуються і деталь буде випадати з них.

3.4 Кріпильні пристосування (патрон, планшайба і т.п.) повинні бути встановлені на верстаті так, щоб виключити можливість самовідгвинчування або зриву їх зі шпинделя при роботі і при реверсному обертанні шпинделя.

3.5 Затискні пристрої (задній центр, патрон і т.п.) токарних верстатів повинні забезпечувати надійне закріплення деталі.

3.6 Кріпильні пристосування (патрон, планшайба) не повинні мати на зовнішніх утворюють поверхнях виступаючих частин або НЕ забитих відкритих заглиблень. У виняткових випадках патрон і планшайба з виступаючими частинами повинні бути огорожені.

3.7 Для обточування виробів великої довжини повинні застосовуватись люнети.

3.8 При обробці металів, що дають свівную стружку, повинні застосовуватись інструменти і пристосування для дроблення стружки (стружколомом) в процесі різання, а для металів, що дають при обробці стружку сколювання, повинні застосовуватись стружковідвідники.

3.9 При поліровці і обпилюванню виробів на верстатах повинні застосовуватись способи і пристрої, що забезпечують безпечне виконання цих операцій.

- 3.10 Зачищати оброблювані деталі на верстатах наждачним полотном необхідно тільки за допомогою відповідних пристосувань.
- 3.11 Встановлювати і знімати патрон або планшайбу дозволяється тільки після повної зупинки верстата.
- 3.12 Для установки різця дозволяється користуватися тільки спеціальними підкладками, по площі рівними всієї опорної частини різця.
- 3.13 У хомута для закріплення оброблюваного виробу в центрах повинен бути потайний притискної болт, який не може зачепити рукав робітника або поранити його руку.
- 3.14 Необхідно періодично перевіряти надійність кріплення задньої бабки і не допускати її зміщення або вібрацію. Якщо виріб обертається в бік свинчивання патрона, потрібно уважно спостерігати за положенням патрона і своєчасно його закріплювати.
- 3.15 При закріпленні виробу в патроні регульовальний гвинт повинен перебувати у вертикальному положенні, а не в похилому, при якому патрон може обернутися і ключем притиснути руки робочого до станини верстата.
- 3.16 При ручній обробці деталей напилком на токарному верстаті наявні на поверхні деталі вирізи або прорізи повинні бути закладені вставками.
- 3.17 При зачистці деталей наждачним шкіркою потрібно користуватися спеціальними притискними колодками, а при зачистці внутрішніх поверхонь - круглої оправкой.
- 3.18 При обробці пруткового металу кінець дроту, який виступає з шпинделя, необхідно захистити.
- 3.19 Не можна включати самохід до зіткнення різця з деталлю. Щоб уникнути поломки різця підводити його до оброблюваної деталі слід повільно і обережно.
- 3.20 Перед тим як приступити до ручної обробки деталі (шабровки, зачистці і шліфовці) на токарному верстаті, слід відвести супорт в сторону на безпечну відстань.
- 3.21 Перед тим як зупинити верстат, різець необхідно відвести від виробу.
- 3.22 Чищення, змащення і обтирає верстата, зміна деталей або ріжучого інструменту, прибирання стружки з-під верстата повинні проводитися тільки

після повної зупинки верстата, відходити від верстата дозволяється також тільки після повної його зупинки.

3.23 При пропажі електричної напруги видалити оброблювану деталь і вимкнути верстат.

3.24 При догляді з робочого місця (навіть короткочасного) токаря повинен відключити верстат від джерела живлення.

3.25 Не допускати в виробничі приміщення і не дозволяти роботу на верстатах стороннім особам.

4. Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях

4.1 При виникненні аварій і ситуацій, які можуть привести до аварій і нещасних випадків, необхідно:

4.1.1 негайно припинити роботи і сповістити керівника робіт.

4.1.2 Під керівництвом керівника робіт оперативно вжити заходів щодо усунення причин аварій або ситуацій, які можуть призвести до аварій або нещасних випадків.

4.2 При виникненні пожежі, задимлення:

4.2.1 негайно повідомити по телефону в пожежну охорону, сповістити працюючих, довести до відома керівника підрозділу, повідомити про пожежу на пост охорони.

4.2.2 Відкрити запасні виходи з будівлі, знеструмити електроживлення, закрити вікна і прикрити двері.

4.2.3 Приступити до гасіння пожежі первинними засобами пожежогасіння, якщо це не пов'язано з ризиком для життя.

4.2.4 Організувати зустріч пожежної команди.

4.2.5 Покинути будинок і знаходитися в зоні евакуації.

4.3 При нещасному випадку:

4.3.1 негайно організувати першу допомогу потерпілому і при необхідності доставку його в медичну організацію.

4.3.2 Вжити невідкладних заходів щодо запобігання розвитку аварійної або іншої надзвичайної ситуації та впливу травмуючих чинників на інших осіб.

4.3.3 Зберегти до початку розслідування нещасного випадку обстановку, якою вона була на момент події, якщо це не загрожує життю і здоров'ю інших осіб і не веде до катастрофи, аварії або виникнення інших надзвичайних обставин, а в разі неможливості її збереження - зафіксувати обстановку (скласти схеми, провести інші заходи).

5. Вимоги охорони праці після закінчення роботи

5.1 Вимкнути верстат, дочекатися його повної зупинки.

5.2 Привести в початковий стан верстат.

5.3 Інструмент та пристосування очистити з дотриманням запобіжних заходів, гострі кромки інструменту обмітати щіткою, скласти на місце зберігання, прибрати відходи в призначену для цього тару.

5.4 Зняти спецодяг, оглянути, вичистити і прибрати в спеціально відведене місце.

5.5 Необхідно ретельно вимити обличчя і руки теплою водою з милом.

5.6 Про закінчення роботи і всіх зауваженнях, недоліки доповісти безпосередньому керівнику для вжиття заходів щодо їх усунення.

ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської роботи було проведене дослідження спеціальних високошвидкісних технологій і високошвидкісного устаткування.

Крім того були розглянуті похибки приводу подачі, що представляють собою похибки, обумовлені конструкцією і якістю виготовлення передавальних механізмів саме приводу, похибки, обумовлені коливаннями швидкості двигуна, похибки, обумовлені неабсолютною швидкодією саме приводу, похибки, обумовлені конструкцією і якістю виготовлення передавальних механізмів системи відліку переміщень, і похибки, пов'язані з датчиком зворотного зв'язку.

За результатами аналізу похибок саме приводу і системи відліку переміщень було розроблено:

- стежачий привод подачі металорізального верстата, який має коригувальні зв'язки, що знаходяться в ланцюзі сигналу від контролера, в ланцюзі сигналу від датчика моменту опору і в ланцюзі сигналу від датчика швидкості обертання двигуна;

- система відліку переміщень робочого органу машини, в якій була виконана компенсація похибок передавального механізму СЗП;

- методика настройки системи відліку переміщень робочого органу верстата;

- алгоритм настройки компенсуючого ланцюга СЗП з використанням ПК.

Дані пристрої значно точніше вже існуючих.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Анисимов Б.В., Четвериков В.Н. Преобразование информации для ЭЦВМ. М., «Высшая школа», 1968.
2. Арменский Е.В. Фалк Г.Б. Электромеханические устройства автоматики. Учебное пособие. Московский государственный институт электроники и математики. М., 2002.
3. Бушуев В.В. Основы конструирования станков. М.: Станкин, 1992. 520 с.
4. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Князь В. А., Ходарев А. Н., Моржин А. В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. М.: ДМК Пресс, 2007. 464 с.
5. Городецкий М.С. и Веденский Д.Л. Контроль и диагностика в ГПС. М.: Высшая школа, 1989, С. 83–84.
6. Грановский Г.И. и Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985, С. 100–102, рис. 7.6 и 7.7.
7. Клековкин В.С., Фаттиев Ф.Ф., Севастьянов Б.В. Основы конструирования машин: Учеб.пособие для механических и электромеханических специальностей вузов. В 2-ч. Ч.1. Теоретические основы. 2-е изд., испр. И доп. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2003. 268 с.
8. Лещенко В.А. и др. Гибкие производственные комплексы. – М.: Машиностроение, 1984, С. 69–70, рис. 2.7.
9. Либерман Я.Л., Тимашев С.А. Состояние и перспективы развития средств контроля и диагностики в станках с ЧПУ. М.: ВНИИТЭМР, Вып.8, 1987. 40 с.
10. Либерман Я.Л. Уменьшение погрешности квантования в кодовых датчиках положения. // Станки и инструменты №8, 1973.
11. Металлорежущие станки: учебник. В 2 т. Т.2 / В.В. Бушуев, А.В. Еремин, А.А. Какойло и др.; под ред. В.В. Бушуева. Т.2. М.: Машиностроение, 2011. 594 с.
12. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунку деталей машин: Підруч. 2-ге вид.перероб. Львів: Афіша. 2003. 560 с.

13. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. Заведений / В.В. Москаленко. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 368 с.

14. Преснухин Л.Н. и др. Фотоэлектрические преобразователи информации - М.: Машиностроение, 1974.

15. Проников А.С. Расчет и конструирование металлорежущих станков. Изд. 2-ое. «Высшая школа», 1968 г., 431 с.

16. Серебrenицкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2013.

17. Солодов А.В. Теория информации и ее применение к задачам автоматического управления и контроля. М., «Наука», 1967.

18. Сосонкин В.Л. и др. Программное управление станками. – М.: Машиностроение, 1981, С. 119, рис. 2.11.

19. Тугенгольд А.К. Точность перехода рабочего органа станка с быстрого перемещения на рабочую подачу / Тугенгольд А.К. и др. // Станки и инструмент №6, 1978 г. С.14.

20. Устройства и элементы систем автоматического регулирования и управления. Книга 2. Усилительные устройства, корректирующие элементы и устройства. Колл. авторов. Под ред. засл. деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук проф. В. В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1975, 687 с.

22. Авторское свидетельство № 410444. Либерман Я.Л. Устройство для определения погрешности преобразователя «Угол-код».

23. Патент РФ №96511 от 10 августа 2010 года.

24. Патент РФ №99090, МПК F16H 1/00.

25. Патент РФ №105787 от 20.06.2011г. Либерман Я.Л. и Гордеева А.С. Устройство для определения погрешности преобразователя «угол-код».

26. Патент України № 63306 А. Ковальов В.Д, Бабін О.Ф., Мельник М.С., Владимиров А.Ю. Слідкуючий привід подачі металорізального верстата з компенсацією похибок напрямних.

27. Патент РФ №131331 от 20.08.2013г. Либерман Я.Л. и Коньшин Е.В. Система цифрового отсчета перемещений рабочего органа машины.

28. Патент РФ № 154592 от 05.08.2015 г. Либерман Я.Л., Кучин С.Г., Чепусова Е.Ю. Система отсчета перемещений рабочего органа машины.

29. Патент РФ №160849. Либерман Я.Л., Кучин С.Г., Чепусова Е.Ю. Следящий привод подачи металлорежущего станка.

30. Патент РФ №2526872. Космодамианский А.С. Фрикционный вариатор. ГОСТ 1643-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые.

31. ОСТ 2-Р31-4-88 Шариковые винтовые передачи. Нормы точности.