

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Пристрій для контролю вимірювання внутрішніх циліндричних
Отворів.

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи РН-41
спеціальності 153

«Мікро- та наносистемна техніка

(шифр і назва спеціальності)

_____ Дричак Д. В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Зелінський І. М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Апостол Ю. О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____ Паламар М. І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему: «Пристрій для контролю вимірювання внутрішніх циліндричних поверхонь».

Обсяг кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка - 65 аркушів А4, додатки - 9 аркушів А4, таблиць - 7, малюнки - 8.

Ключові слова: ІНДУКТИВНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, КЛИН-ШТОК, КРОКОВИЙ ДВИГУН, NEMA 17, AD598, LVDT, КОНТРОЛЬ ВНУТРІШНІХ РОЗМІРІВ, ЦИЛІНДРИЧНА ПОВЕРХНЯ, MATLAB SIMULINK, ГВИНТ-ГАЙКА, АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ, ПОХИБКА ВИМІРЮВАННЯ.

Актуальність теми: Традиційні ручні методи контролю є трудомісткими, суттєво залежать від кваліфікації оператора і не забезпечують повної оцінки циліндричності по всій поверхні отвору. З огляду на це, розробка автоматизованих засобів, які здатні здійснювати повне сканування поверхні з цифровою реєстрацією результатів, є надзвичайно актуальною задачею для серійного та масового виробництва.

Мета дослідження - модернізація пристрою для автоматизованого контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь на основі аналізу відомих технічних рішень із використанням сучасної елементної бази, деталей машинобудування з діаметром отвору 120-160 мм.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	5
2 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	21
2.1.1 Опис комбінованої схеми приладу	23
2.1.2 Точність пристрою	33
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	37
3.1 Опис роботи пристрою згідно комбінованої функціональної схеми	37
3.1.1 Вибір та розрахунок елементів управління виконавчими пристроями.....	39
3.1.2 Розрахунок частоти керуючих імпульсів для заданої швидкості сканування.....	42
3.1.3 Вибір захисних діодів.....	43
3.2 Наукові дослідження та математичне моделювання	45
3.2.1 Моделювання передавальної функції індуктивного перетворювача	45
3.2.2 Моделювання процесу перетворення сигналу в схемі узгодження AD598.....	48
3.2.3 Побудова S-моделі в середовищі MATLAB Simulink.....	49
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	55
4.1 Аналіз та захист оператора від впливу електромагнітного випромінювання при роботі з індуктивним перетворювачем	55
4.2 Електробезпека при експлуатації установки напругою до 1000 В	58
4.2.1 Основні технічні заходи забезпечення безпеки.....	58
4.3 Ергономічні вимоги до робочого місця оператора вимірювального пристрою.....	61
4.3.1 Мікроклімат та санітарні умови	62
ВИСНОВКИ.....	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	66
ДОДАТОК.....	70

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		2

ВСТУП

Підвищення якості продукції машинобудування є одним із пріоритетних завдань сучасного виробництва. Особливу роль у забезпеченні якості відіграє контроль геометричних параметрів деталей - точності розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь. Серед таких параметрів особливе місце займає контроль внутрішніх циліндричних поверхонь, що широко застосовуються у підшипникових вузлах, гідравлічних циліндрах, корпусах двигунів та інших відповідальних виробках. Навіть незначні відхилення радіуса або циліндричності таких поверхонь від номінальних значень призводять до порушення посадок, підвищеного зносу та передчасної відмови вузлів.

Традиційні ручні методи контролю внутрішніх розмірів - нутромірами, калібрами, мікрометричними головками - є трудомісткими, залежать від кваліфікації оператора і не забезпечують достатньої продуктивності в умовах серійного та масового виробництва. Крім того, ручні методи дозволяють вимірювати розміри лише в окремих точках і не забезпечують оцінки циліндричності по всій поверхні отвору. Тому актуальною є розробка автоматизованих засобів контролю, що забезпечують повне сканування внутрішньої поверхні з цифровою реєстрацією результатів.

Аналіз відомих технічних рішень - патентів US 4,447,959 А (механічний двощуповий), US 2008/0043252 А1 (лазерний), US 7,856,730 В2 (балонний) та US 2015/0007440 А1 (контактний обертовий) - показав, що жодне з них не поєднує одночасно автоматизованого кругового сканування, контактного методу вимірювання, цифрового виходу та помірної вартості. Як базова конструкція для розробки обрано пристрій за патентом № 376650 (Бритван В.Я.), що забезпечує контроль внутрішніх розмірів із введенням вимірювального вузла в отвір.

Метою дипломної роботи є розробка та модернізація автоматизованого пристрою для контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь деталей діаметром 120–160 мм на основі базової конструкції за патентом № 376650 із

застосуванням сучасної елементної бази –					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

-крокових двигунів NEMA 17, індуктивного перетворювача моделі 223, мікросхеми узгодження AD598.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

1. виконано літературний огляд і патентний пошук відомих технічних рішень у галузі контролю внутрішніх розмірів, обґрунтовано вибір базової конструкції;
2. розроблено і описано конструкцію модернізованого пристрою — механізм клин-штока, систему обертання поворотної осі та систему вертикального переміщення каретки;
3. виконано розрахунок передачі гвинт-гайка та зубчастого зачеплення приводу вертикального переміщення;
4. виконано вибір і розрахунок елементів електронного блоку керування — крокових двигунів NEMA 17, драйвера L298, схеми узгодження AD598;
5. виконано математичне моделювання вимірювального тракту в середовищі MATLAB Simulink та підтверджено лінійність передавальної характеристики;

Об'єкт дослідження - пристрій для автоматизованого контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь деталей машинобудування.

Предмет дослідження - методи і засоби вимірювання радіального відхилення внутрішніх циліндричних поверхонь із застосуванням індуктивних перетворювачів переміщення та крокових двигунів.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблений пристрій забезпечує повністю автоматизований контроль радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь з похибкою $\pm 0,010$ мм та продуктивністю 11 деталей/год при скануванні 20 000 точок поверхні за цикл вимірювання. Передача результатів через USB-інтерфейс на ПК дозволяє архівувати дані та будувати тривимірний профіль поверхні.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

1.1. Літературний огляд відомих теоретичних і практичних рішень за темою роботи

Контроль геометричних параметрів внутрішніх циліндричних поверхонь є однією з ключових задач технічних вимірювань у машинобудуванні. Внутрішні циліндричні поверхні широко використовуються в підшипникових вузлах, гідравлічних циліндрах, корпусах двигунів та інших відповідальних деталях. Відхилення радіуса або циліндричності таких поверхонь від номінальних значень призводить до порушення посадок, підвищеного зносу та відмови вузлів.

Науково-технічна проблема полягає у створенні автоматизованого засобу контролю, який забезпечував би: повне сканування внутрішньої циліндричної поверхні по всій довжині отвору; високу точність вимірювання радіального відхилення в мікронному діапазоні; можливість кількісного оцінювання циліндричності та передачі результатів на ПК для аналізу та архівування - при відносно невисокій вартості порівняно з координатно-вимірювальними машинами.

Об'єкт дослідження - пристрій для автоматизованого контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь деталей машинобудування.

Предмет дослідження - методи і засоби вимірювання радіального відхилення внутрішніх циліндричних поверхонь із застосуванням індуктивних перетворювачів переміщення та крокових двигунів.

Мета дослідження - модернізація пристрою для автоматизованого контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь на основі аналізу відомих технічних рішень із використанням сучасної елементної бази.

Аналіз відомих технічних рішень:

У процесі патентного пошуку та аналізу науково-технічної літератури

розглянуто ряд вітчизняних і зарубіжних технічних рішень у галузі контролю					Арк.
КРБ 468.00.00.000 ПЗ					5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

внутрішніх розмірів. Нижче наведено критичний аналіз найбільш характерних із них.

Патент 1. US 4,447,959 А - Механічний двощуповий прилад для вимірювання внутрішніх розмірів (1984)

Автори: Такао Goto, Shoichi Onishi. Патентовласник: Mitutoyo Mfg. Co. Ltd. (Японія). Дата публікації: 15 травня 1984 року. Клас МПК: G01В 5/12.

Суть технічного рішення:

Патент US 4,447,959 А описує прилад для вимірювання внутрішніх розмірів деталей методом абсолютного вимірювання відстані між двома вимірювальними елементами Рис.(1.1). Принципова особливість конструкції полягає у використанні конічного елемента позиціонування, який одночасно виконує функцію базування деталі та керування розкриттям вимірювальних щупів.

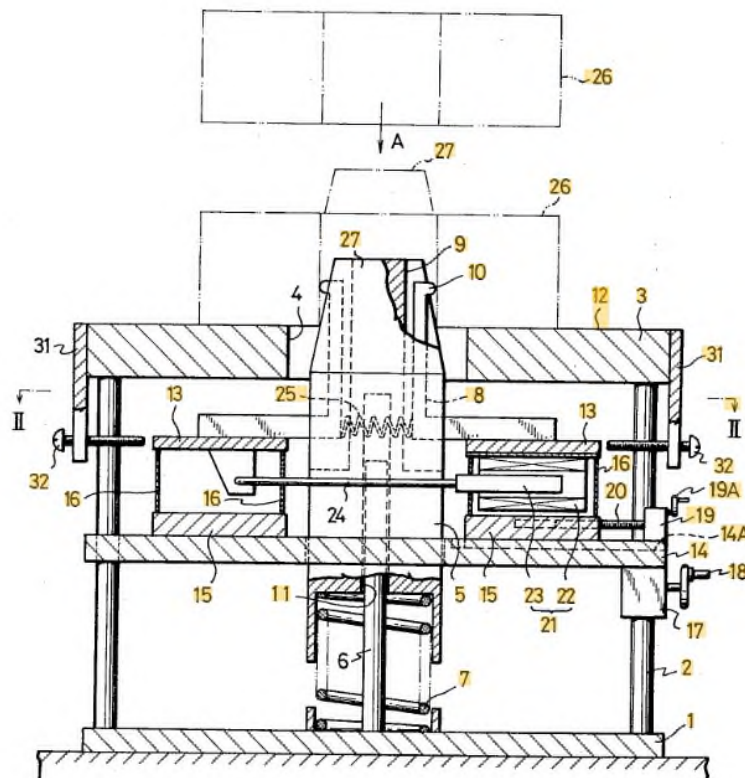


Рисунок. 1.1 - Схема приладу за патентом US 4,447,959 А

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

Прилад складається з таких основних вузлів: конічний позиціонуючий елемент (tapered positioning member) із зовнішньою конічною поверхнею, яка контактує з внутрішньою стінкою деталі та забезпечує її центрування; два вимірювальних елементи (measuring elements), розміщених діаметрально протилежно на зовнішній поверхні конічного елемента; два щупи (probes), які виступають радіально назовні і контактують із внутрішньою стінкою деталі; пристрій виявлення переміщення (displacement detecting device), який вимірює відстань між щупами.

Принцип роботи:

Деталь, що підлягає контролю, встановлюється на вимірювальний стіл (mount) торцем вниз. Конічний елемент вводиться в отвір деталі - конічна поверхня контактує з краєм отвору і центрує деталь відносно осі приладу. При осьовому переміщенні конічного елемента вглиб отвору конічна поверхня розсуває вимірювальні елементи в радіальному напрямку доти, доки обидва щупи не торкнуться внутрішньої стінки деталі з протилежних сторін.

У момент контакту пристрій виявлення переміщення фіксує поточне положення кожного щупа. Відстань між двома щупами у стані контакту з поверхнею дорівнює внутрішньому діаметру деталі в даному перерізі. Оскільки щупи розташовані діаметрально протилежно і рухаються симетрично відносно осі, вимірювання є абсолютним і не залежить від точності встановлення деталі.

Переваги та недоліки:

Переваги патенту US 4,447,959 А:

- абсолютне вимірювання внутрішнього діаметра без необхідності калібрування по еталонному кільцю;
- конічний елемент автоматично центрує деталь і забезпечує стабільне базування;
- проста і надійна конструкція без складних кінематичних ланцюгів;

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недоліки патенту US 4,447,959 А:

- вимірювання виконується лише в одному перерізі - неможливо оцінити циліндричність по всій довжині отвору;
- вимірювання лише в одному діаметральному напрямку - не виявляє овальність отвору;
- ручний принцип роботи - результат залежить від зусилля та швидкості введення кінчного елемента;
- відсутній цифровий інтерфейс для передачі даних на ПК;
- кінчний елемент має фіксований діапазон діаметрів - для іншого типорозміру потрібен окремий прилад.

Порівняно з розроблюваним пристроєм, рішення за патентом US 4,447,959 А є значно простішим конструктивно, однак не забезпечує автоматизованого сканування поверхні та контролю циліндричності. Розроблюваний пристрій усуває ці недоліки завдяки застосуванню двох крокових двигунів для гвинтового сканування та індуктивного перетворювача для безперервного вимірювання радіального відхилення.

Патент 2. US 2008/0043252 А1 - Лазерна система для контролю внутрішніх отворів (2008)

Автори: Daniel P. Getman, Kevin J. O'Brien. Патентовласник: Marposs S.p.A. (Італія). Дата публікації: 21 лютого 2008 року. Клас МПК: G01В 11/12.

Суть технічного рішення:

Патент US 2008/0043252 А1 описує вимірювальний пристрій для безконтактного контролю внутрішніх та зовнішніх розмірів деталей із застосуванням лазерного випромінювання Рис.(1.2). Ключовою особливістю є використання елемента перенаправлення лазерного променя (beam redirection member), який вводиться всередину вимірюваного отвору і направляє промінь радіально на внутрішню поверхню деталі.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

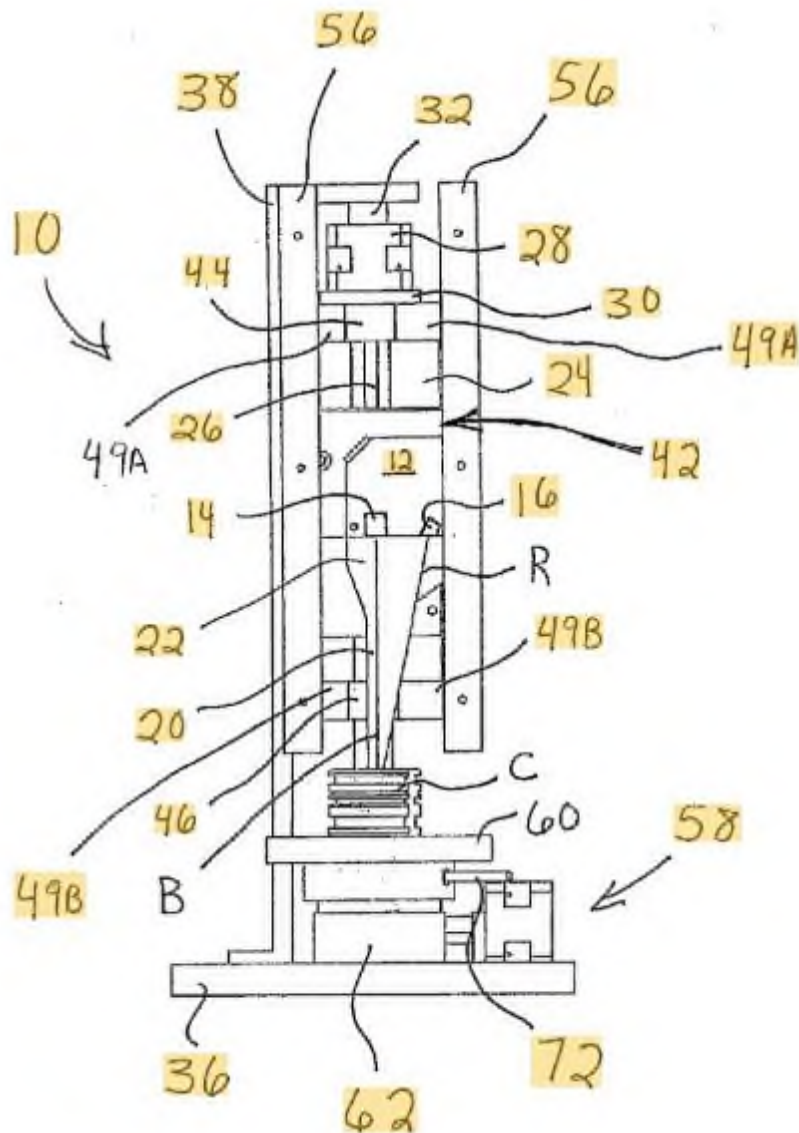


Рисунок. 1.2 - Схема лазерного вимірювального пристрою за патентом US 2008/0043252 A1

До складу пристрою входять: лазерна головка (laser head) із джерелом лазерного випромінювання (laser source) та приймачем відбитого сигналу (beam receptor); елемент перенаправлення променя (beam redirection member) - призматичний або дзеркальний відхилювач, змонтований на рухомій штанзі; система переміщення (movable laser assembly) для осьового позиціонування відхилювача всередині отвору; платформа (stage) для встановлення та

									Арк.
									9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРБ 468.00.00.000 ПЗ				

можливого обертання деталі; системний контролер (system controller) з мікропроцесором для обробки результатів.

Принцип роботи:

Деталь встановлюється на платформу (stage) і фіксується центруючою пробкою (locating plug). Рухома лазерна штанга з елементом перенаправлення вводиться в отвір деталі до рівня вимірюваної ділянки. Після позиціонування лазерне джерело генерує промінь, спрямований вздовж осі штанги вниз. Елемент перенаправлення перехоплює промінь і відхиляє його радіально назовні - перпендикулярно до осі отвору - на внутрішню поверхню деталі.

Промінь відбивається від поверхні деталі і повертається до елемента перенаправлення, який направляє відбитий сигнал назад до приймача лазерної головки. Системний контролер обробляє дані від приймача разом із відомими координатами джерела і приймача та обчислює відстань до поверхні деталі в точці вимірювання. Для отримання профілю поверхні платформа може обертати деталь навколо вертикальної осі (двовісна версія) або переміщати її вертикально - таким чином реалізується сканування по гвинтовій траєкторії.

Пристрій може бути реалізований в трьох варіантах: одновісний (тільки вертикальне переміщення деталі для контролю профілю по осі); двовісний (вертикальне переміщення та обертання деталі для контролю концентричності та циліндричності); тривісний (додатково бічне переміщення для контролю зовнішнього профілю). Результати відображаються у вигляді графіка або профілю на екрані ноутбука чи сенсорного дисплея, можуть зберігатися в табличній формі або передаватися для подальшої обробки.

Переваги та недоліки:

Переваги патенту US 2008/0043252 A1:

- безконтактний метод вимірювання - відсутній механічний знос вимірювального елемента і вплив вимірювального зусилля на результат;

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

- висока швидкість вимірювання - лазерний промінь не має інерції і забезпечує велику кількість вимірювань за секунду;
- можливість сканування по повному профілю отвору в одному циклі вимірювання;
- автоматична відбраковка деталей поза допуском з можливістю звукового або світлового сигналу;
- три варіанти виконання (одно-, дво- і тривісний) під різні задачі контролю.

Недоліки патенту US 2008/0043252 A1:

- висока вартість лазерної системи та оптичних компонентів порівняно з контактними методами;
- чутливість до забруднення оптики - пил, мастило або стружка на поверхні деталі або оптичних елементах призводять до похибок вимірювання;
- необхідність термостабілізованого середовища - теплові потоки повітря всередині отвору викликають флуктуації лазерного променя;
- складність калібрування системи - вимагає еталонних деталей з атестованими розмірами;
- обмежений діапазон застосування - не придатний для глибоких вузьких отворів через дифракційні обмеження лазерного променя;
- значні габарити лазерної головки обмежують застосування для малих діаметрів.

Порівняно з розробленим пристроєм, рішення за патентом US 2008/0043252 A1 забезпечує вищу швидкість вимірювання завдяки безконтактному методу, однак є значно дорожчим, складнішим в обслуговуванні та чутливішим до умов виробничого середовища. Розроблений пристрій з індуктивним перетворювачем є менш чутливим до забруднення, простішим у налагодженні та значно дешевшим при порівнянній точності вимірювання.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Патент 3. US 7,856,730 B2 - Пристрій для вимірювання внутрішнього діаметра з роздувним балоном (2010)

Автори: Masahiko Nakamura, Shuichi Kimura. Патентовласник: Olympus Medical Systems Corp. (Японія). Дата публікації: 28 грудня 2010 року. Клас МПК: А61В 5/107, G01В 7/12.

Суть технічного рішення:

Патент US 7,856,730 B2 описує пристрій для вимірювання внутрішнього діаметра порожнистих об'єктів - каналів, труб, біологічних порожнин - з використанням роздувного балона Рис.(1.3). Принципова особливість конструкції полягає у тому, що балон виступає одночасно як виконавчий елемент (розширюється до контакту зі стінкою) і як вимірювальний орган (ступінь розширення корелює з діаметром).

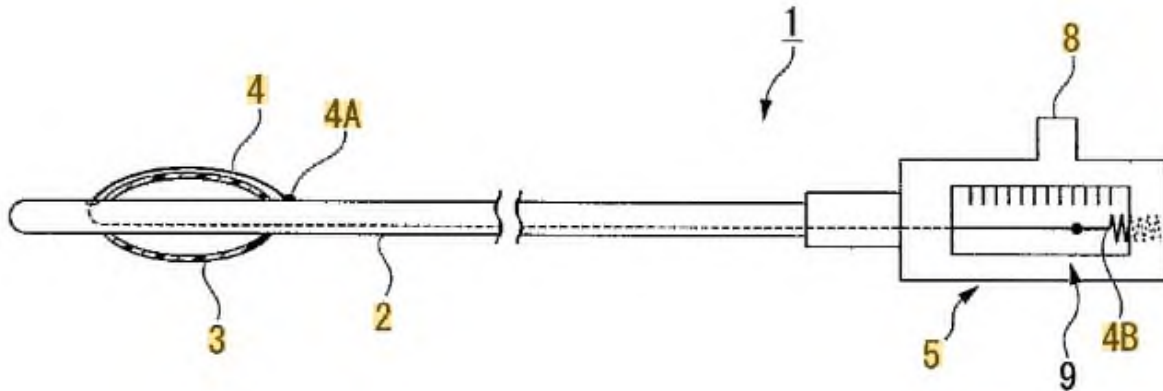


Рисунок. 1.3 - Схема пристрою з роздувним балоном за патентом US 7,856,730 B2

Пристрій складається з таких основних вузлів: гнучка трубка-оболонка (sheath) для введення в порожнину; роздувний балон (balloon), розміщений на дистальному кінці трубки; еталонний елемент (reference member) - гнучка

опора,					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

один кінець якої закріплено на зовнішній поверхні балона, а другий виведено до вимірювального вузла; канал подачі рідини (lumen) для роздування балона; вимірювальна частина (measuring portion) з прозорим вікном для відліку положення еталонного елемента; порт подачі рідини (supply port) для підключення шприца або насоса.

Принцип роботи:

Пристрій у складеному стані (балон здутий) вводиться в порожнину, що підлягає вимірюванню. Після позиціонування в зоні вимірювання через канал подачі рідини за допомогою шприца або насоса нагнітається рідина (або газ), яка роздуває балон. Балон розширюється радіально до моменту контакту з внутрішньою стінкою порожнини по всьому периметру.

У процесі розширення балона еталонний елемент (reference member), закріплений на його зовнішній поверхні, переміщується у проксимальному напрямку - до вимірювальної частини пристрою. Оскільки геометрія кріплення еталонного елемента визначена конструктивно, осьове переміщення його проксимального кінця однозначно корелює зі збільшенням радіуса балона. Оператор спостерігає через прозоре вікно вимірювальної частини поточне положення проксимального кінця еталонного елемента відносно нанесеної шкали і зчитує значення внутрішнього діаметра.

Після завершення вимірювання рідина витягується зі шприца - балон здувається і пристрій виймається з порожнини. Конструкція дозволяє виконувати вимірювання в зонах, недоступних для жорстких вимірювальних інструментів, зокрема у вигнутих каналах і біологічних порожнинах.

Переваги та недоліки:

Переваги патенту US 7,856,730 B2:

- можливість вимірювання у важкодоступних та вигнутих порожнинах завдяки гнучкій конструкції;

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- рівномірний розподіл вимірювального зусилля по всьому периметру - балон охоплює стінку по колу;
- проста конструкція без складних кінематичних ланцюгів і електронних вузлів;
- придатний для вимірювання в умовах, де неприпустиме застосування жорстких інструментів (медицина, харчова промисловість);
- малі габарити у складеному стані полегшують введення в отвір.

Недоліки патенту US 7,856,730 B2:

- ручний відлік результату через прозоре вікно - залежність від суб'єктивної оцінки оператора і неможливість автоматичної реєстрації даних;
- вимірювання тільки в одному перерізі - не забезпечує контроль циліндричності по довжині отвору;
- низька точність через пружну деформацію балона і залежність результату від тиску нагнітання;
- складність дозованої подачі рідини для точного контролю тиску роздування;
- необхідність промивки і стерилізації після кожного застосування в медичних умовах;
- обмежений ресурс балона - матеріал схильний до втомного руйнування при багаторазовому роздуванні;
- відсутній цифровий вихід для передачі даних та інтеграції в автоматизовану систему контролю.

Порівняно з розроблюваним пристроєм, рішення за патентом US 7,856,730 B2 орієнтоване на специфічні умови застосування - гнучкі та важкодоступні порожнини, переважно медичного призначення. Для задач промислового контролю циліндричних отворів у машинобудуванні цей

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

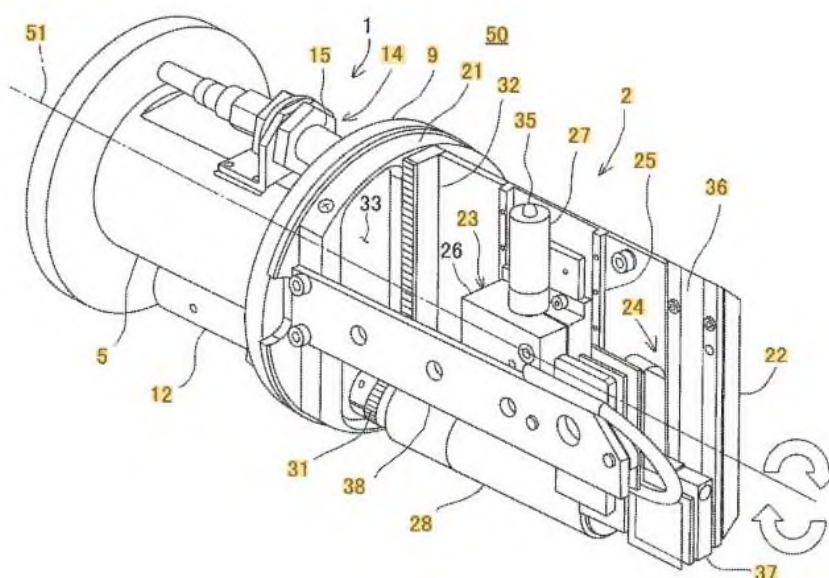
принцип є непридатним через низьку точність, ручний відлік і відсутність можливості автоматизованого сканування. Розроблюваний пристрій з індуктивним перетворювачем і кроковими двигунами забезпечує автоматизоване сканування, цифровий вихід і точність $\pm 0,010$ мм, що принципово відрізняє його від балонного методу.

Патент 4. US 2015/0007440 A1 - Контактний обертовий вимірювач внутрішнього діаметра (2015)

Автори: Yasuhiro Takahashi, Ryuichi Yoshida. Патентовласник: Токуо Seimitsu Co., Ltd. (Японія). Дата публікації: 8 січня 2015 року. Клас МПК: G01B 5/12, G01B 7/12.

Суть технічного рішення

Патент US 2015/0007440 A1 описує пристрій для вимірювання внутрішнього діаметра порожнистих об'єктів, що поєднує контактний метод вимірювання з обертанням вимірювальної головки навколо центральної осі пристрою Рис.(1.4). Це технічне рішення є найближчим за принципом дії до розроблюваного пристрою серед розглянутих аналогів.



					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Рисунок. 1.4 - Схема контактної обертового вимірювача за патентом US
2015/0007440 A1

Пристрій складається з таких основних вузлів: блок обертання (circulation unit) - забезпечує обертання вимірювальної головки навколо центральної осі пристрою; вимірювальна головка (measuring head) - містить контактний вимірювальний вузол і механізм радіального переміщення; контактний вимірювальний вузол (contact measuring unit) - щуп що безпосередньо контактує з внутрішньою поверхнею деталі; вузол радіального переміщення (advancing/retreating unit) - забезпечує висування щупа в радіальному напрямку і його повернення; шкальний вузол (scale unit) - лінійна шкала і датчик шкали для вимірювання радіального переміщення щупа.

Принцип роботи:

Пристрій вводиться всередину порожнистого об'єкта, що підлягає вимірюванню. Контактний вимірювальний вузол (щуп) висувається в радіальному напрямку за допомогою вузла радіального переміщення до контакту з внутрішньою поверхнею деталі. Після встановлення контакту блок обертання починає обертати вимірювальну головку навколо центральної осі пристрою.

У процесі обертання щуп ковзає по внутрішній поверхні деталі - при відхиленні поверхні від ідеального циліндра щуп переміщується в радіальному напрямку. Датчик шкали (scale sensor), жорстко пов'язаний з тримачем вимірювального вузла (measuring unit holder), фіксує радіальне положення щупа відносно лінійної шкали в кожній кутовій позиції. Таким чином, за один оберт вимірювальної головки отримується повний радіальний профіль внутрішньої поверхні в даному перерізі.

Результат вимірювання внутрішнього діаметра визначається на основі двох складових: величини радіального переміщення тримача вимірювального

вузла, зафіксованої датчиком шкали, та результату вимірювання контактним					Арк.
КРБ 468.00.00.000 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	16

вузлом. Поєднання цих двох сигналів дозволяє визначати як абсолютне значення діаметра, так і відхилення форми поперечного перерізу від ідеального кола. Для отримання повного профілю циліндра по довжині отвору пристрій переміщується вздовж осі між вимірюваннями в окремих перерізах.

Переваги та недоліки:

Переваги патенту US 2015/0007440 A1:

- повне охоплення внутрішнього периметра отвору за один оберт - виявлення овальності та інших відхилень від круглості;
- висока точність завдяки поєднанню контактного вимірювання з лінійною шкалою;
- можливість вимірювання як абсолютного значення діаметра так і відхилень форми;
- принцип обертання головки є близьким до оптимального для контролю циліндричних поверхонь;
- цифровий вихід сигналу з датчика шкали для передачі на обробний пристрій.

Недоліки патенту US 2015/0007440 A1:

- складна конструкція вузла радіального переміщення щупа - потребує точного виготовлення і налагодження;
- необхідність переміщення пристрою вздовж осі між вимірюваннями в окремих перерізах - відсутній автоматичний осьовий привод;
- можливий вплив сили тертя між щупом і поверхнею на точність вимірювання при обертанні;
- складність забезпечення постійного вимірювального зусилля щупа при зміні радіуса поверхні;
- відсутній опис автоматизованого осьового сканування - потребує ручного переміщення між перерізами.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняння з розроблюваним пристроєм. З усіх розглянутих аналогів патент US 2015/0007440 A1 є найближчим за принципом дії до розроблюваного пристрою-

-обидва використовують контактний щуп і обертання навколо осі отвору. Принципова відмінність полягає в тому, що розроблюваний пристрій додатково оснащений кроковим двигуном M2 для автоматичного осьового переміщення каретки, що забезпечує повністю автоматизоване гвинтове сканування без участі оператора. Крім того, застосування індуктивного перетворювача моделі 223 з мікросхемою AD598 забезпечує стабільне перетворення переміщення щупа в стандартний аналоговий сигнал ± 2 В з подальшою передачею на мікроконтролер та ПК через USB.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика розглянутих аналогів

№	Технічне рішення	Метод	Автоматизація	Точність, мм	Цифр. вихід	Контроль циліндричності
1	US 4,447,959 A	Контактний	Ні	$\pm 0,005$	Ні	Ні
2	US 2008/0043252 A1	Лазерний	Так	$\pm 0,002$	Так	Так
3	US 7,856,730 B2	Балонний	Ні	$\pm 0,050$	Ні	Ні
4	US 2015/0007440 A1	Контактний обертювий	Частково	$\pm 0,003$	Так	Частково
	Розроблюваний пристрій	Контактний	Так	$\pm 0,010$	Так	Так
Арк.						
КРБ 468.00.00.000 ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	18	

		обертовий				
--	--	-----------	--	--	--	--

Висновки до розділу 1

У першому розділі виконано літературний огляд відомих технічних рішень у галузі контролю внутрішніх циліндричних поверхонь та сформульовано науково-технічну проблему дипломної роботи.

Аналіз чотирьох патентів показав, що існуючі засоби контролю внутрішніх розмірів можна розділити на чотири групи за принципом дії: механічні контактні (US 4,447,959 A), лазерні безконтактні (US 2008/0043252 A1), пневматичні (US 7,856,730 B2) та контактні обертові (US 2015/0007440 A1)

Кожна група має характерні переваги і недоліки:

- механічні контактні прилади прості і надійні, але забезпечують вимірювання лише в одній точці без автоматизованого сканування;
- лазерні системи забезпечують найвищу швидкість і можливість повного сканування, однак мають високу вартість і чутливість до забруднення оптики;
- пневматичний балонний метод придатний для специфічних умов (гнучкі порожнини, медицина), але непридатний для точного промислового контролю;
- контактні обертові пристрої є найбільш близькими до оптимального рішення для задач промислового контролю циліндричних отворів - вони поєднують точність контактного методу з можливістю повного охоплення периметра отвору.

Встановлено, що пристрій за патентом № 376650 (Бритван В.Я.) є найближчою базовою конструкцією для розробки, оскільки вирішує задачу контролю внутрішніх розмірів отворів і має відпрацьовану механічну схему

вимірювального вузла.	Разом з тим, базова конструкція не забезпечує	Арк.
	КРБ 468.00.00.000 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.
	Підпис	Дата

автоматизованого сканування поверхні, не має цифрового виходу та не дозволяє оцінювати циліндричність по всій довжині отвору.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

2 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Опис конструкції та принципу роботи розроблюваного пристрою

За результатами аналізу відомих технічних рішень у галузі контролю внутрішніх розмірів (патенти US 4,447,959 A, US 2008/0043252 A1, US 7,856,730 B2, US 2015/0007440 A1) для подальшої розробки обрано конструкцію за патентом № 376650. Порівняно з іншими розглянутими рішеннями ця конструкція є найбільш придатною для автоматизованого контролю внутрішніх циліндричних поверхонь у промислових умовах: вона забезпечує контакт вимірювального наконечника з поверхнею отвору, не потребує складного оптичного обладнання як лазерний метод (US 2008/0043252 A1), не чутлива до забруднення як пневматичний метод (US 7,856,730 B2), і дозволяє реалізувати повне кругове сканування на відміну від простого двощупового методу (US 4,447,959 A).

Метою винаходу за патентом № 376650 є контроль середньої частини ступінчастого отвору Рис(2.1). Вузол орієнтації оснащено упорами, які обмежують поворот вимірювального вузла у заданому положенні. Завданням даної роботи є модернізація цього приладу та автоматизація процесу вимірювання для забезпечення контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь.

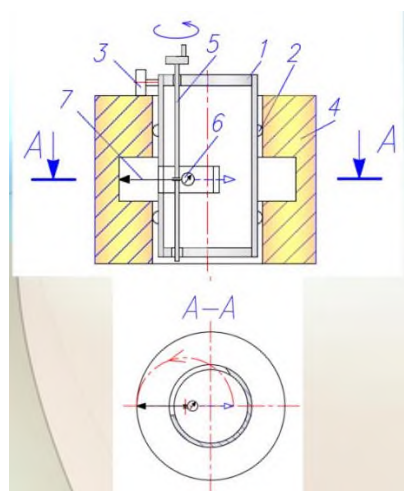


Рисунок 2.1 – Пристрій для контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Пристрій (1) для орієнтації вимірювального вузла з допомогою упорів (2) і (3) базується в контрольованій деталі (4). Перед початком вимірювання вимірювальний вузол (5) разом з вимірювальною головкою (6) повертають так, щоб наконечник (7) головки (6) перемістився в корпус (1) вузла орієнтації. Потім в контрольованому отворі вимірювальний вузол (5) повертають у зворотньому напрямку так, щоб вимірювальна головка (6) зайняла робоче положення. Тоді по її показах можна судити про контрольований діаметр.

Індуктивний перетворювач розміщено вздовж осі отвору, а його вимірювальний наконечник спирається на похилу площину клин-штока. При радіальному переміщенні штока похила площина клина передає рух на вимірювальний наконечник індуктивного перетворювача вздовж осі. Схему клин-штока наведено на рис. 2.2.

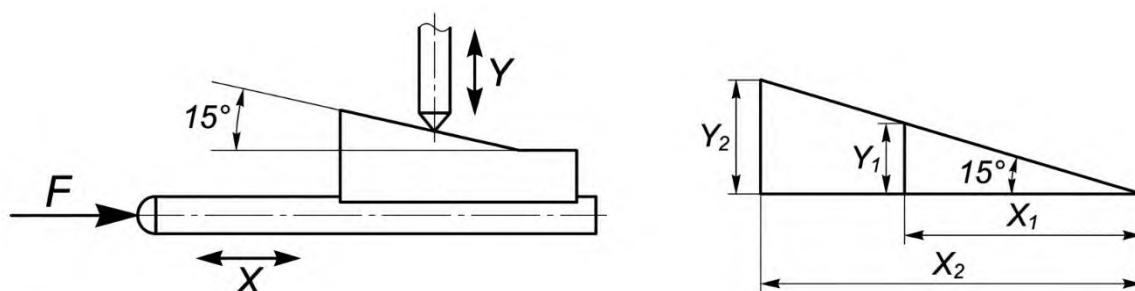


Рисунок. 2.2 - Схема клин-штока

Вимірювання виконується за законом $Y = X \cdot \text{tg}(15^\circ)$, де Y - осьове переміщення наконечника індуктивного перетворювача; X - радіальне переміщення клин-штока, що відповідає відхиленню внутрішньої циліндричної поверхні від номінального радіуса. Сигнал з індуктивного перетворювача надходить на блок керування, в якому виконується обчислення фактичного значення радіального відхилення з урахуванням коефіцієнта перетворення клина.

З метою автоматизації до поворотної осі прикріплено зубчасте колесо. Через зубчасту передачу від двигуна при обертанні вала двигуна відбувається поворот поворотної осі і, відповідно, вимірювального наконечника разом з нею. Це дозволяє реалізувати кругове сканування внутрішньої поверхні отвору по всьому периметру - що є принциповою перевагою над рішеннями з фіксованими щупами.

Пристрій для контролю внутрішніх розмірів разом із зубчастою передачею для повороту осі розміщено на каретці.

При встановленні досліджуваної деталі на плиту пристрій опускається в отвір. На плиті встановлено вертикальний стояк зі шпонковим пазом, по якому переміщується вгору і вниз каретка з приладом.

Переміщення каретки вгору і вниз забезпечується передачею гвинт-гайка. Гайку розміщено на каретці, гвинт розміщено вертикально. За допомогою другої зубчастої передачі, розміщеної у верхній частині стояка, здійснюється обертання гвинта, внаслідок чого каретка з приладом переміщується вгору або вниз. Поєднання кругового обертання поворотної осі та осьового переміщення каретки забезпечує гвинтове сканування всієї внутрішньої циліндричної поверхні деталі.

Даним пристроєм можна контролювати діаметри отворів у діапазоні 120-160 мм. Оскільки одним клин-штоком охопити весь діапазон діаметрів неможливо, для кожного типорозміру виготовляється окремий клин-шток, який замінюється залежно від величини контрольованого діаметра отвору.

2.1.1 Опис комбінованої схеми приладу

При встановленні контрольованої деталі на плиту (11) вмикається блок керування. Сигнал з блоку керування (3) надходить на мотор (1). За допомогою мотора (1) і зубчастої передачі гвинт-гайка (4) при обертанні гвинта відбувається поступальний рух каретки (5) з приладом вниз. Після

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

встановлення приладу в контрольовану деталь прилад впирається в плиту і обертання вала двигуна 1 припиняється.

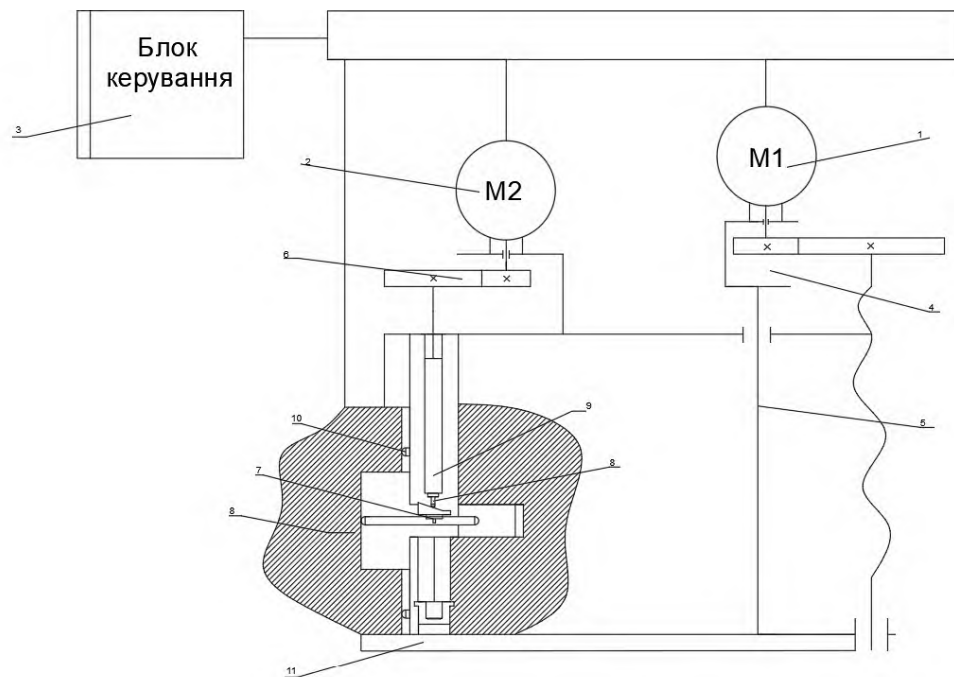


Рисунок 2.3 Опис комбінованої схеми приладу

Після вимкнення двигуна 1 блок керування подає сигнал на запуск двигуна 2. За допомогою двигуна 2 і зубчастої передачі здійснюється поворот поворотної осі разом із клин-штоком. При контакті з контрольованою деталлю клин-шток починає переміщуватися всередині поворотної осі і передає рух на вимірювальний наконечник індуктивного перетворювача. Блок керування запрограмований на максимально допустиме переміщення вимірювального наконечника індуктивного перетворювача. При програмуванні блока керування вносяться граничні відхилення контрольованого діаметра отвору - на індикаторі відображається результат контролю: деталь придатна або бракована. Переміщення вимірювального наконечника визначається за законом:

$$Y = X \cdot \text{tg}(15^\circ);$$

									Арк.
									24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

КРБ 468.00.00.000 ПЗ

Блок керування програмується за еталонною деталлю, і результат вимірювання Y порівнюється блоком керування з еталонним значенням.

Після повороту поворотної осі до крайнього положення блок керування вимикає двигун 2. Потім блок керування подає напругу зворотної полярності на двигун 2 - поворотна вісь повертається у зворотному напрямі і клин-шток ховається в корпусі приладу. Після цього блок керування вимикає двигун 2 і вмикає двигун 1 у зворотному напрямі. При обертанні гвинта передачі гвинт-гайка у зворотному напрямі каретка з приладом піднімається вгору. Після упирання каретки у верхній обмежувач блок керування вимикає двигун 1. Проконтрольована деталь знімається з плити і встановлюється наступна — цикл роботи пристрою повторюється.

Блок керування є центральною частиною схеми, що координує весь цикл: запуск приводу вертикального опускання, зупинка у крайньому положенні, запуск поворотного механізму, обробка сигналу від індуктивного перетворювача та підйом приладу. Він також виконує логічне порівняння результатів вимірювання з еталонними значеннями, забезпечуючи контроль на відповідність допуску.

Привід вертикального переміщення (гвинт-гайка) відповідає за поступальне опускання і підйом вимірювального вузла. Обертання гвинта від електродвигуна через зубчасту передачу змушує гайку, встановлену на каретці, переміщатися вздовж осі стояка. Це забезпечує точне опускання приладу до контрольованого отвору і підйом після завершення циклу. Рис (2.4)

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

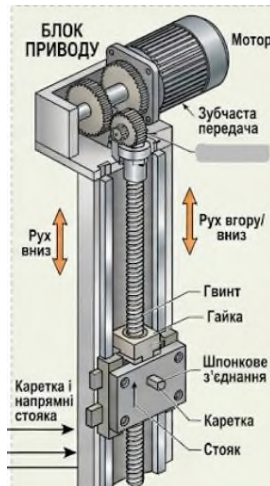


Рисунок 2.4 Привід вертикального переміщення (гвинт-гайка)

Поворотна вісь і клин-шток. Рис (2.5) Після досягнення нижнього положення вмикається другий електродвигун, який передає обертальний рух через зубчасту передачу на поворотну вісь. На осі закріплено клин-шток, що при обертанні входить у контакт з внутрішньою поверхнею контрольованого отвору. Завдяки похилій поверхні клина цей рух передається на вимірювальний наконечник індуктивного перетворювача.

Індуктивний вимірювальний вузол, розташований вздовж осі, фіксує переміщення наконечника, що відповідає відхиленню діаметра контрольованого отвору. Сигнал перетворюється в електричну напругу, яка надходить на блок керування для обробки та індикації результату.

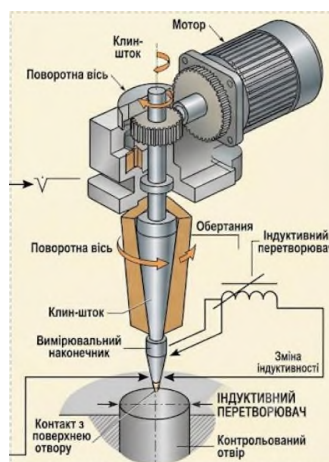


Рисунок 2.5 Поворотна вісь і клин-шток.

						КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			26

Каретка і напрямні стояка. Каретка з закріпленим приладом переміщується по стояку зі шпонковим пазом. Це забезпечує стабільність руху і відсутність бічного люфту. Шпонкове з'єднання між кареткою і стояком запобігає обертанню навколо осі. Після завершення вимірювання прилад автоматично повертається у вихідне положення і готовий до наступного циклу.

Таблиця 2.1 Технічні характеристики індуктивного перетворювача моделі

223

Параметр	Значення
Робочий діапазон характеристики	$\pm 0,100$ мм
Вільний хід вимірювального штока	не менше 2 мм
Вимірювальне зусилля	25 ± 5 сН
Частота напруги живлення	не більше 10 кГц
Напруга живлення	не більше 1,5 В
Габаритні розміри	70 × 75 мм
Маса	0,050 кг

Сучасний аналог індуктивного перетворювача - НВМ WA-T/2

В якості перспективи модернізації пристрою розглядається заміна індуктивного перетворювача моделі 223 на сучасний аналог виробництва компанії НВМ (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Німеччина) - індуктивний перетворювач переміщення серії WA-T/2. Цей перетворювач є промисловим стандартом для контактних вимірювань лінійних переміщень і широко застосовується у вимірювальних системах машинобудівних підприємств.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

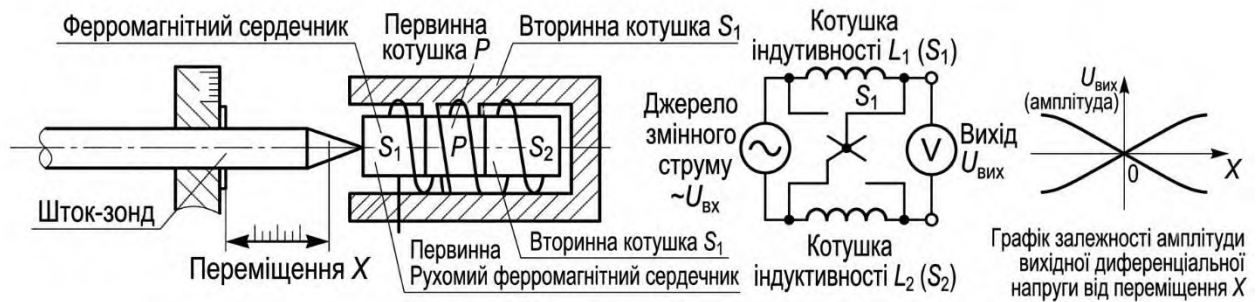


Рисунок. 2.6 - Схема індуктивного перетворювача переміщення НВМ WA-T/2



Рисунок 2.7 - Індуктивний перетворювач переміщення НВМ WA-T/2

Перетворювач НВМ WA-T/2 належить до класу індуктивних зондів (probe-type LVDT) з вбудованим диференціальним трансформаторним перетворювачем. Конструктивно являє собою компактний циліндричний корпус із висувним вимірювальним плунжером, підпружиненим для забезпечення постійного контакту з вимірюваною поверхнею. Принцип дії аналогічний до перетворювача моделі 223 - базується на зміні взаємної індуктивності між первинною і двома вторинними котушками при переміщенні ферромагнітного сердечника.

Перетворювач НВМ WA-T/2 розрахований на підключення до стандартних вимірювальних підсилювачів серії НВМ або до схем узгодження на базі мікросхеми AD598-

						КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			28

-що забезпечує його пряму сумісність з електронним блоком керування розроблюваного пристрою без зміни схемотехніки.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики індуктивного перетворювача НВМ WA-T/2

Параметр	Значення
Номінальний діапазон вимірювання	0...2 мм
Вихідний сигнал (чутливість)	80 мВ/В
Несуча частота	4,8 кГц
Нелінійність	не більше 0,1%
Ступінь захисту корпусу	IP67
Робочий температурний діапазон	-30°C ... +80°C
Ресурс роботи	понад 10 000 000 циклів

Порівняно з перетворювачем моделі 223 перетворювач НВМ WA-T/2 має такі переваги:

- нелінійність не більше 0,1% - вдвічі краща за типову нелінійність моделі 223 (до 0,2%);
- ступінь захисту IP67 - повна захищеність від пилу та короткочасного занурення у воду, що забезпечує надійну роботу в умовах виробничого середовища;
- ресурс понад 10 000 000 циклів - гарантована довговічність при інтенсивній експлуатації;

- діапазон 0...2 мм перебиває робочий діапазон клин-штока з запасом, що спрощує налагодження;
- наявність повного технічного дотаситу від виробника - спрощує розрахунок схеми узгодження AD598.

Заміна перетворювача моделі 223 на НВМ WA-T/2 не потребує змін у механічній конструкції пристрою - необхідна лише адаптація посадочного отвору під новий корпус перетворювача та перерахунок номіналів пасивних елементів схеми узгодження AD598 відповідно до характеристик нового перетворювача.

Індуктивні перетворювачі засновані на властивості котушки змінювати реактивний опір при зміні параметрів, що визначають індуктивність. У даному пристрої застосовано перетворювач, що являє собою дросель із змінним повітряним зазором. Вихідний параметр визначають за зміною індуктивності обмотки, одягненої на сердечник, при зміні зазору δ .



Рисунок. 2.8 - Принципова схема індуктивного перетворювача

Якір, переміщуючись відносно нерухомого магнітопроводу, змінює магнітний опір кола та індуктивність котушки. При постійній напрузі живлення $U = \text{const}$ індуктивність є функцією зазору: $L = f(\delta)$.

При невеликому зазорі δ індуктивність дроселя зі змінним зазором (без урахування активного опору) визначається виразом:

$$L = W^2 / (R_m + R_\delta) = W^2 / (l_m / (\mu \cdot S) + 2\delta / (\mu_0 \cdot S_0));$$

де W - кількість витків обмотки; l_m - середня довжина магнітної силової лінії в ярмі та якорі; S, S_0 - площі перерізу сердечника і повітряного зазору; μ, μ_0 - магнітні проникності матеріалу сердечника і повітря; δ - величина повітряного зазору.

Повний опір обмотки на кутовій частоті ω :

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2};$$

де R - активна складова опору обмотки; ω - кутова частота змінного струму.

Струм в обмотці при напрузі живлення U :

$$I = U / \sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2};$$

Індуктивні перетворювачі зі змінним зазором мають високу чутливість і реагують на зміну зазору порядку 0,1–0,5 мкм. Чутливість перетворювача:

$$KL = (W^2 \cdot \mu_0 \cdot S_0) / (2 \cdot \delta^2);$$

Діапазон вимірювання переміщень індуктивними перетворювачами зі змінним зазором становить 0,1-1 мм.

Для усунення нелінійності застосовують перетворювачі з двома котушками і спільним якорем. Зазор змінюється з однаковим абсолютним

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значенням, але різними знаками в обох котушках. Обмотки котушок включаються в сусідні плечі диференціальної мостової схеми. Таке включення забезпечує: збільшення чутливості вдвічі; компенсацію температурних похибок у нульовій точці; лінеаризацію вихідної характеристики.

Для перетворювачів зі змінним зазором відносна зміна індуктивності:

$$\Delta L / L_0 = -\Delta \delta / \delta_0;$$

де δ_0 - початкове значення зазору. Лінійна ділянка характеристики відповідає умові $\Delta \delta / \delta_0 = 0,15 \dots 0,20$.

Для індуктивних перетворювачів типу LVDT (Linear Variable Differential Transformer), що застосовуються у прецизійних вимірюваннях, характерна висока лінійність вихідного сигналу в межах робочого діапазону. Перевагою є відсутність механічного контакту між рухомим сердечником та обмотками, що підвищує довговічність і знижує похибку. У промислових умовах LVDT-перетворювачі використовуються для вимірювання невеликих переміщень з точністю до 1 мкм, а чутливість досягає 0,1...1 мкм у робочому діапазоні до 1–5 мм. Сучасні конструкції індуктивних диференціальних перетворювачів характеризуються нелінійністю, що не перевищує 1%, що дозволяє широко застосовувати їх у приладах для лінійних вимірювань, зокрема для контролю внутрішніх розмірів деталей.

Вертикальний стояк є несучим елементом пристрою і забезпечує точне лінійне направлення руху каретки з вимірювальним вузлом вздовж осі контрольованого отвору. Стояк виготовлено зі сталі 45 (ДСТУ 7809:2015), має зовнішній діаметр $\varnothing 40$ мм і робочу довжину 520 мм. По всій довжині стояка виконано шпонковий паз шириною 8 мм і глибиною 3,5 мм, який забезпечує лінійне направлення каретки та виключає її обертання навколо осі стояка.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Загальна висота пристрою зі стояком складає 680 мм, ширина опорної плити - 376 мм. Хід каретки вздовж стояка - до 100 мм, що забезпечує можливість сканування отворів відповідної глибини.

2.1.2 Точність пристрою

Похибка вимірювання радіуса внутрішньої циліндричної поверхні розроблюваним пристроєм складає $\pm 0,010$ мм. Ця точність досягається за рахунок сукупності таких факторів.

По-перше, індуктивний перетворювач моделі 223 має робочий діапазон $\pm 0,100$ мм і реагує на зміну положення наконечника порядку 0,1-0,5 мкм. Схема узгодження на мікросхемі AD598 забезпечує стабільне перетворення сигналу перетворювача в стандартну напругу ± 2 В з нелінійністю не більше 1% від діапазону вимірювання. АЦП мікроконтролера Arduino Mega 2560 (10 розрядів) забезпечує роздільну здатність оцифровки:

$$\Delta U_{\text{АЦП}} = 4 \text{ В} / 2^{10} = 3,9 \text{ мВ/відл.}, ;$$

Що відповідає роздільній здатності по переміщенню наконечника перетворювача:

$$\Delta d = 0,2 \text{ мм} \cdot (3,9 / 4000) \approx 0,0002 \text{ мм} = 0,2 \text{ мкм};$$

По-друге, механізм клин-штока з кутом нахилу 15° вносить коефіцієнт перетворення $\text{tg}(15^\circ) = 0,268$, що збільшує ефективну роздільну здатність вимірювання радіального відхилення:

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$\Delta X = \Delta d / \operatorname{tg}(15^\circ) = 0,0002 / 0,268 \approx 0,00075 \text{ мм} \approx 0,001 \text{ мм};$$

По-третє, кроковий двигун NEMA 17 з кутом кроку $1,8^\circ$ забезпечує 200 рівномірно розподілених точок вимірювання по колу отвору, що дозволяє виявляти відхилення від циліндричності навіть невеликої амплітуди. Рис.(2.6)



Рисунок 2.9 – Кроковий двигун NEMA 17, 17HS4401

Сумарна похибка пристрою складається з похибки перетворювача ($\pm 0,001$ мм), похибки механізму клин-штока ($\pm 0,003$ мм - залежить від точності виготовлення кута 15°), похибки оцифровки АЦП ($\pm 0,001$ мм) та похибки базування деталі на плиті ($\pm 0,005$ мм). Таким чином, сумарна похибка вимірювання не перевищує $\pm 0,010$ мм, що відповідає вимогам контролю деталей 7–8 квалітету точності.

Оскільки перетворення радіального переміщення X в осьове переміщення Y виконується за законом $Y = X \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$, де $\alpha = 15^\circ$ - кут нахилу похилої площини клина, точність виготовлення цього кута безпосередньо впливає на точність вимірювання радіуса контрольованого отвору.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При механічній обробці клин-штока кут нахилу площини виготовляється з допуском $\Delta\alpha$. Для деталей, що обробляються фрезеруванням з контролем кута за допомогою універсального кутоміра, приймаємо допуск на кут $\Delta\alpha = \pm 0,5^\circ$. Номінальне та граничні значення кута:

$$\alpha_{\text{ном}} = 15^\circ; \quad \alpha_{\text{min}} = 14,5^\circ; \quad \alpha_{\text{max}} = 15,5^\circ;$$

Похибка кута клина призводить до похибки коефіцієнта перетворення $k = \text{tg}(\alpha)$. Розрахуємо граничні значення коефіцієнта перетворення:

$$k_{\text{ном}} = \text{tg}(15^\circ) = 0,2679;$$

$$k_{\text{min}} = \text{tg}(14,5^\circ) = 0,2586;$$

$$k_{\text{max}} = \text{tg}(15,5^\circ) = 0,2773;$$

Абсолютна похибка коефіцієнта перетворення:

$$\Delta k = k_{\text{max}} - k_{\text{ном}} = 0,2773 - 0,2679 = 0,0094;$$

Відносна похибка коефіцієнта перетворення:

$$\delta k = \Delta k / k_{\text{ном}} \cdot 100\% = 0,0094 / 0,2679 \cdot 100\% \approx 3,5\%;$$

Похибка вимірювання радіального відхилення X , що виникає внаслідок похибки кута клина, при робочому діапазоні перетворювача $Y = 0,1$ мм:

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$$X_{\text{ном}} = Y / k_{\text{ном}} = 0,1 / 0,2679 = 0,3733 \text{ мм};$$

$$X_{\text{min}} = Y / k_{\text{max}} = 0,1 / 0,2773 = 0,3607 \text{ мм};$$

$$X_{\text{max}} = Y / k_{\text{min}} = 0,1 / 0,2586 = 0,3868 \text{ мм};$$

Абсолютна похибка вимірювання радіального відхилення, обумовлена допуском на кут клина:

$$\Delta X_{\alpha} = (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) / 2 = (0,3868 - 0,3607) / 2 \approx 0,013 \text{ мм};$$

Отримане значення похибки $\Delta X_{\alpha} \approx 0,013$ мм перевищує задану загальну похибку пристрою $\pm 0,010$ мм, що свідчить про необхідність більш точного виготовлення кута клин-штока. Для забезпечення необхідної точності пристрою допуск на кут клина повинен бути звужений. Визначимо необхідний допуск $\Delta\alpha$ з умови $\Delta X_{\alpha} \leq 0,003$ мм (частка похибки клина в загальному бюджеті похибок пристрою, визначеному раніше):

$$\Delta\alpha \leq \Delta\alpha(0,5^{\circ}) \cdot (0,003 / 0,013) \approx 0,5^{\circ} \cdot 0,23 \approx 0,12^{\circ};$$

Таким чином, для забезпечення похибки клин-штока не більше 0,003 мм у складі загальної похибки пристрою $\pm 0,010$ мм допуск на кут нахилу площини клина повинен становити $\Delta\alpha \leq \pm 0,12^{\circ}$. Така точність досягається при виготовленні клин-штока на верстатах з ЧПК з контролем кута на координатно-вимірювальній машині або шліфуванням профілю по копіру.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Опис роботи пристрою згідно комбінованої функціональної схеми

Комбінована функціональна схема пристрою для контролю внутрішніх розмірів наведена на рис. Схема 2 відображено взаємозв'язок між механічними виконавчими пристроями, вимірювальним перетворювачем та електронним блоком керування.



Рисунок 3.1 Функціональна схема

До складу пристрою входять такі основні вузли:

- індуктивний перетворювач переміщення моделі 223 - первинний вимірювальний елемент;
- кроковий двигун М1 (NEMA 17) - привод обертання вимірювальної головки по колу отвору;
- кроковий двигун М2 (NEMA 17) - привод переміщення каретки вздовж осі отвору;

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- мікроконтролер - центральний обчислювальний і керуючий вузол;
- схема узгодження AD598 - перетворення сигналу індуктивного перетворювача;
- АЦП - оцифровка аналогового сигналу з AD598;
- драйвер L298 - силове керування кроковими двигунами;
- LCD-дисплей - відображення результатів вимірювання;
- клавіатура - введення команд оператором;
- USB-інтерфейс - передача даних на ПК.

Принцип роботи пристрою полягає в наступному. Деталь встановлюється на базову поверхню пристрою так, щоб вісь контрольованого отвору збіглася з віссю вимірювального вузла. Оператор вводить номінальний діаметр і допуски через клавіатуру та натискає кнопку «Старт».

Мікроконтролер формує керуючі імпульси для драйвера L298, який вмикає кроковий двигун M2. Двигун M2 переміщує каретку з вимірювальною головкою у вихідне положення - верхній торець контрольованого отвору. Одночасно мікроконтролер активує схему узгодження AD598, яка починає збудження первинної обмотки індуктивного перетворювача моделі 223 синусоїдним сигналом.

Після позиціонування починається цикл сканування. Двигун M1 повільно обертає вимірювальну головку навколо осі отвору - перетворювач моделі 223 знімає сигнал, пропорційний радіальному відхиленню поверхні від номінального значення у кожній кутовій позиції. Після завершення одного оберту двигун M2 переміщує каретку на один крок вниз вздовж осі отвору, і цикл кругового сканування повторюється. Таким чином виконується повне гвинтове сканування всієї внутрішньої поверхні отвору.

Сигнал з індуктивного перетворювача через схему узгодження AD598 подається на АЦП мікроконтролера, де оцифровується і записується в пам'ять разом із поточними координатами вимірювальної точки. Мікроконтролер в

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реальному часі порівнює виміряні значення з допустимими і відображає поточний статус на LCD-дисплеї.

Після завершення сканування мікроконтролер обробляє масив отриманих даних, визначає максимальне та мінімальне значення радіуса, обчислює відхилення від циліндричності та порівнює з введеними допусками. Результат виводиться на LCD-дисплей та передається через USB на ПК для архівування.

Таким чином, запропонована схема пристрою забезпечує повністю автоматизований контроль внутрішнього діаметра та циліндричності отвору без участі оператора у процесі вимірювання, що виключає суб'єктивну похибку і підвищує продуктивність контролю порівняно з ручними методами.

Примітка. В якості перспективи модернізації пристрою розглядається заміна індуктивного перетворювача моделі 223 на сучасний аналог HBM WA-T/2 (нелінійність 0,1%, захист IP67), що дозволить підвищити точність вимірювання та надійність роботи в умовах виробництва.

3.1.1 Вибір та розрахунок елементів управління виконавчими пристроями

У приладі для контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь як виконавчі пристрої використовуються два крокових двигуни NEMA 17 (17HS4401). Двигун M1 забезпечує обертання вимірювальної головки з індуктивним перетворювачем по колу всередині контрольованого отвору, двигун M2 — переміщення каретки вздовж осі отвору. Обидва двигуни є біполярними кроковими двигунами і керуються від єдиного драйвера L298.

Опис роботи: центральний процесор (1) виробляє керуючі сигнали, які через порт виводу мікроконтролера (2) подаються на драйвер керування (3). Драйвер у свою чергу виробляє команди для керування виконавчим пристроєм (4) - кроковим двигуном NEMA 17. Оскільки кроковий двигун є позиційним пристроєм з фіксованим кутом кроку $1,8^\circ$, зворотний зв'язок не є обов'язковим -

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

мікроконтролер відслідковує кількість поданих імпульсів і знає поточне положення вала.

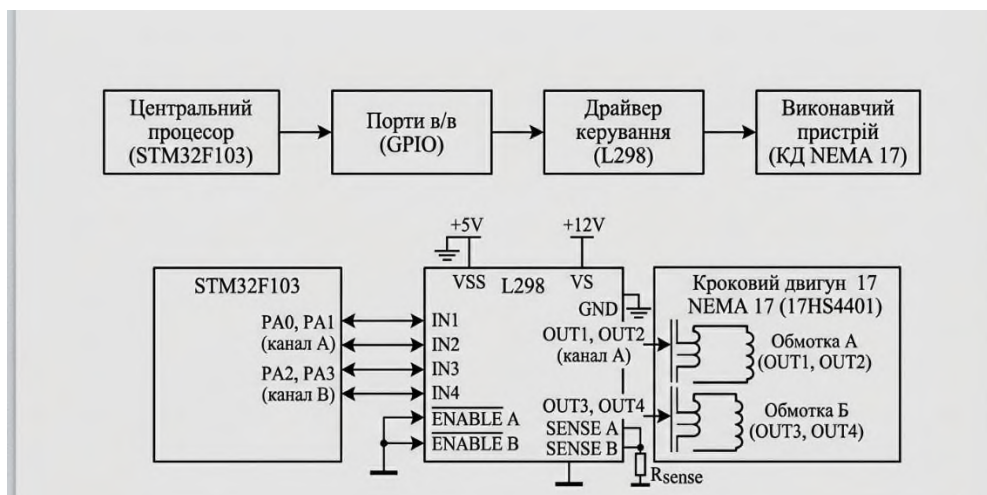


Рисунок. 3.2 - Функціональна схема керування біполярним кроковим двигуном NEMA 17

1 - центральний процесор, 2 - порти в/в, 3 – драйвер L298, 4 - кроковий двигун NEMA 17

Схема керування біполярним кроковим двигуном побудована за принципом повного Н-моста. Мікроконтролер через порти вводу/виводу подає керуючі імпульси на драйвер L298, який комутує струм в обмотках двигуна у визначеній послідовності, забезпечуючи обертання вала на задану кількість кроків у потрібному напрямку. Драйвер L298 містить два незалежних канали (А і В), що дозволяє керувати обома двигунами М1 і М2 одночасно від одного корпусу мікросхеми.

Перевірка відповідності струму двигуна допустимому струму драйвера:

Номінальний струм обмотки двигуна NEMA 17: $I_{дв} = 1,7 \text{ А}$. Номінальний струм драйвера L298 на канал: $I_{др} = 2 \text{ А}$. Умова вибору драйвера:

$$I_{дв} \leq I_{др};$$

$$1,7 \text{ А} \leq 2 \text{ А} - \text{ умова виконується};$$

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Споживана потужність двигуна визначається за формулою:

$$P = U \cdot I;$$

де U - напруга живлення двигуна, В; I - номінальний струм обмотки, А.

$$P = 12 \cdot 1,7 = 20,4 \text{ Вт};$$

Загальна споживана потужність двох двигунів:

$$P_{\text{заг}} = 2 \cdot P = 2 \cdot 20,4 = 40,8 \text{ Вт};$$

Крутний момент утримання двигуна NEMA 17: $M = 40 \text{ Н}\cdot\text{см} = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$. З урахуванням коефіцієнта запасу $k_3 = 1,5$ необхідний момент для переміщення вимірювального вузла:

$$M_{\text{необ}} = M_{\text{нав}} \cdot k_3;$$

де $M_{\text{нав}}$ - момент навантаження на валу двигуна. Для переміщення каретки масою $m = 0,3 \text{ кг}$ по вертикальному стояку з радіусом ходового гвинта $r = 5 \text{ мм}$:

$$M_{\text{нав}} = m \cdot g \cdot r = 0,3 \cdot 9,81 \cdot 0,005 = 0,015 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\text{необ}} = 0,015 \cdot 1,5 = 0,022 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Оскільки крутний момент двигуна $M = 0,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$ значно перевищує необхідний момент $M_{\text{необ}} = 0,022 \text{ Н}\cdot\text{м}$, двигун NEMA 17 забезпечує надійне переміщення з великим запасом по моменту.

3.1.2 Розрахунок частоти керуючих імпульсів для заданої швидкості сканування

Задана швидкість обертання вимірювальної головки: $n = 30 \text{ об/хв}$.
Кількість кроків на оберт для NEMA 17: $z = 200 \text{ кроків/оберт}$. Необхідна частота керуючих імпульсів:

$$f = n \cdot z / 60;$$

$$f = 30 \cdot 200 / 60 = 100 \text{ Гц};$$

Частота 100 Гц знаходиться в межах допустимої частоти керуючих сигналів мікроконтролера і драйвера L298, що підтверджує коректність вибору компонентів.

Кутова роздільна здатність при повнокроковому режимі:

$$\varphi = 360^\circ / z = 360^\circ / 200 = 1,8^\circ;$$

При використанні режиму напівкроку (драйвер L298 підтримує напівкроковий режим) роздільна здатність збільшується вдвічі:

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\varphi_{\text{HK}} = \varphi / 2 = 1,8^\circ / 2 = 0,9^\circ;$$

3.1.3 Вибір захисних діодів

Драйвер L298 потребує підключення 8 зовнішніх захисних діодів (по два на кожне плече моста). Діоди призначені для пригнічення напруги самоіндукції обмоток двигуна при перемиканні.

Максимальна ЕРС самоіндукції обмотки двигуна при відключенні:

$$E = L \cdot (\Delta I / \Delta t);$$

де L - індуктивність обмотки двигуна NEMA 17: L = 2,8 мГн; $\Delta I = 1,7$ А;
 Δt - час комутації транзистора L298: $\Delta t \approx 1$ мкс.

$$E = 0,0028 \cdot (1,7 / 0,000001) = 0,0028 \cdot 1700000 = 4760 \text{ В};$$

Отримане значення підтверджує необхідність захисних діодів з пробивною напругою значно вищою за напругу живлення. Обрано діоди 1N4007 з пробивною напругою 1000 В. Характеристики діода 1N4007:

- пікова зворотна напруга: 1000 В;
- напруга пробою: 1000 В;
- напруга фіксації: 1,1 В при піковому струмі 30 А;
- піковий імпульсний струм: 30 А;
- прямий середній струм: 1 А

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики крокового двигуна NEMA 17
(17HS4401)

Параметр	Значення
Тип двигуна	Біполярний кроковий
Кут кроку	1,8° (200 кроків/оберт)
Номінальний струм обмотки	1,7 А
Крутний момент утримання	40 Н·см (0,4 Н·м)
Індуктивність обмотки	2,8 мГн
Напруга живлення	1,5 Ом
Опір обмотки	0,050 кГ
Розмір фланця	42 × 42 мм
Довжина корпусу	40 мм
Маса	280 г

Таким чином, два однакових крокових двигуни NEMA 17 (17HS4401) у поєднанні з драйвером L298 та захисними діодами 1N4007 забезпечують точне двовісне сканування внутрішньої циліндричної поверхні деталі. Розрахунки підтверджують коректність вибору: струм двигуна не перевищує допустимий струм драйвера, крутний момент з великим запасом забезпечує переміщення вимірювального вузла, а частота керуючих імпульсів 100 Гц знаходиться в допустимих межах.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

3.2 Наукові дослідження та математичне моделювання

Об'єктом моделювання в даному розділі є вимірювальний тракт пристрою для контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь - від індуктивного перетворювача переміщення до виходу схеми узгодження AD598. Саме цей тракт визначає точність і достовірність вимірювання, оскільки будь-які нелінійності, шуми або нестабільності на цій ділянці безпосередньо впливають на кінцевий результат контролю.

Аналіз структурних особливостей об'єкта моделювання показує, що вимірювальний тракт включає два послідовних перетворення сигналу:

- механічне переміщення вимірювального наконечника зміна повітряного зазору в індуктивному перетворювачі зміна індуктивності котушок (нелінійне перетворення);
- сигнали вторинних котушок перетворювача схема узгодження AD598 стандартний аналоговий вихідний сигнал (лінійне перетворення з фільтрацією).

Від симулювання роботи даного об'єкта очікується отримати такі конкретні оцінки:

- підтвердження лінійності передавальної характеристики вимірювального тракту в робочому діапазоні переміщень $\pm 0,100$ мм;
- оцінка форми вихідного сигналу AD598 при різних значеннях повітряного зазору;
- підтвердження того, що схема AD598 ефективно усуває вплив нестабільності амплітуди збудження та коефіцієнта трансформації на точність вимірювання.

3.2.1 Моделювання передавальної функції індуктивного перетворювача

Зміна повітряного зазору δ при переміщенні феромагнітного якоря відносно нерухомого магнітопроводу призводить до зміни індуктивності

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмотки L , а отже і до зміни струму в обмотці. Схему вимірювання зазору індуктивним перетворювачем наведено на рис. 3.3.

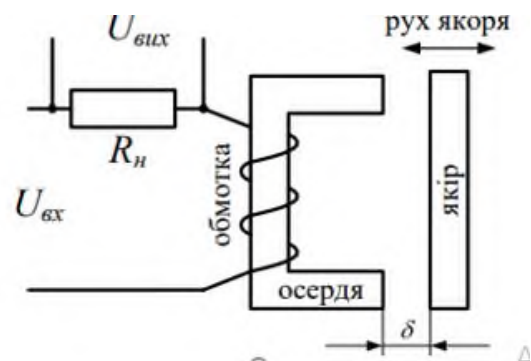


Рисунок. 3.3 - Схема вимірювання зазору індуктивним перетворювачем

Залежність індуктивності котушки від величини повітряного зазору δ описується виразом:

$$L = W^2 / (R_m + 2\delta / (\mu_0 \cdot S\delta))$$

де W - кількість витків котушки; R_m - повний магнітний опір магнітопроводу; $2\delta/(\mu_0 \cdot S\delta)$ - магнітний опір повітряного проміжку; μ_0 - магнітна проникність повітря; $S\delta$ - площа перерізу повітряного зазору.

Графік залежності індуктивності від величини повітряного зазору наведено на рис. 3.4.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

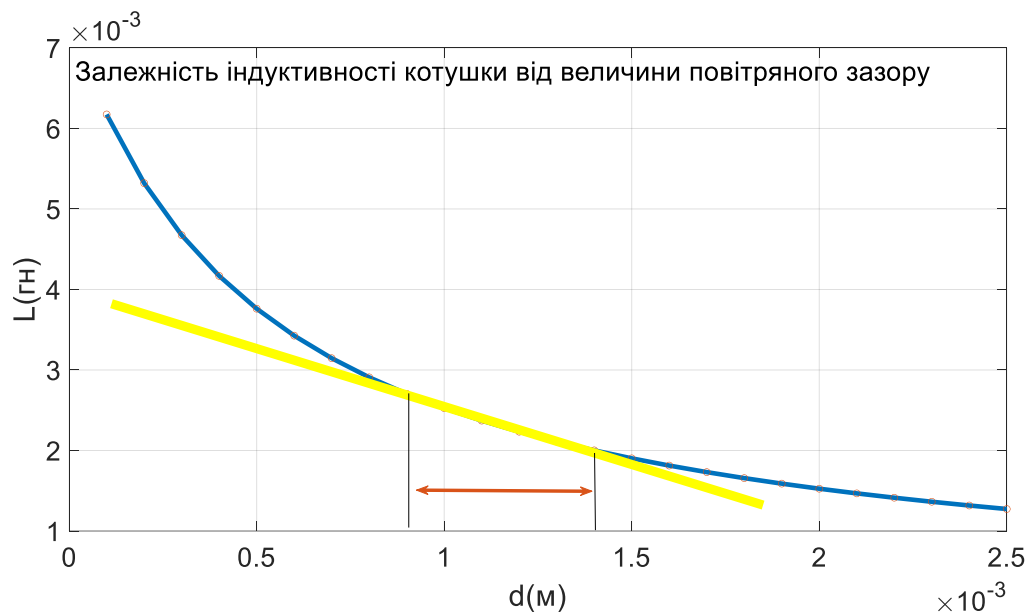


Рисунок. 3.4 – Залежність індуктивності котушки від величини повітряного зазору

З виразу випливає, що величина індуктивності змінюється із величиною повітряного зазору за гіперболічним законом. Це означає нелінійність передавальної характеристики перетворювача — при великих зазорах чутливість падає, при малих — зростає. Однак у невеликих межах зміни δ (приблизно 0,1–0,15 від початкового зазору δ_0) передавальну характеристику можна вважати лінійною з достатньою для практики точністю. Саме в цій лінійній зоні і працює перетворювач моделі 223 з робочим діапазоном $\pm 0,100$ мм.

Для послаблення впливу нелінійності застосовують диференціальний індуктивний перетворювач, схему якого наведено на рис. 3.5. У диференціальному перетворювачі якір переміщується між двома котушками - зазор в одній котушці збільшується на $\Delta\delta$, а в іншій - зменшується на $\Delta\delta$. Вихідний сигнал є різницею сигналів двох котушок, що дозволяє:

- збільшити чутливість вдвічі порівняно з одиночним перетворювачем;
- лінеаризувати передавальну характеристику в межах робочого діапазону;
- компенсувати вплив температурних змін та нестабільності живлення.

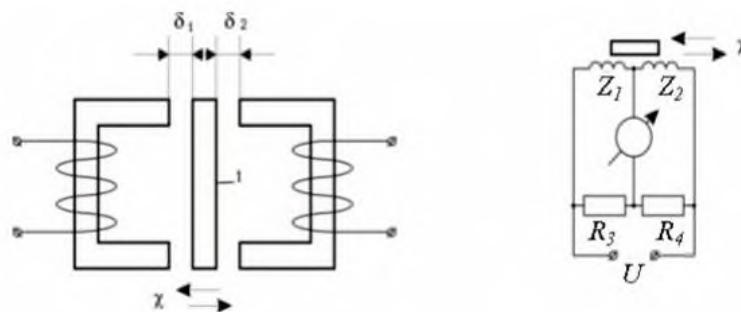


Рисунок. 3.5 - Диференціальний індуктивний перетворювач

Для подальшого перетворення сигналу індуктивного перетворювача до інформативного формату використано інтегральну мікросхему AD598, яка реалізує оптимальну схему обробки сигналів LVDT-типу.

3.2.2 Моделювання процесу перетворення сигналу в схемі узгодження AD598

Мікросхема AD598 є спеціалізованою інтегральною схемою для обробки сигналів лінійних диференціальних трансформаторів (LVDT). Вона включає кілька функціональних блоків, що послідовно виконують обробку сигналу від індуктивного перетворювача. Структурну схему AD598 наведено на рис. 3.6.

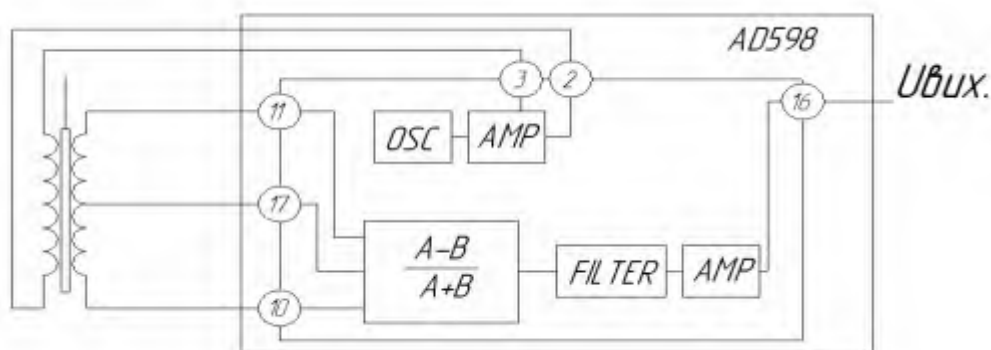


Рисунок. 3.6 - Структурна схема мікросхеми AD598

- OSC-AMP - генератор і підсилювач синусоїдного сигналу стабільної амплітуди (2-20 В) і частоти (20 Гц-20 кГц) для збудження первинної обмотки індуктивного перетворювача;
- (A-B)/(A+B) - декодер, що обчислює відношення різниці отриманих сигналів вторинних котушок до їх суми - це і є раціометричне перетворення;
- FILTER-AMP - фільтр нижніх частот для відфільтрування завад несучої частоти і подальшого підсилення інформативної частини сигналу до стандартного рівня.

Функція мікросхеми полягає у перетворенні вхідної інформації про положення осердя у реєстрований вихідний сигнал за передавальною функцією:

$$U_{\text{вих}} = k \cdot (U_A - U_B) / (U_A + U_B)$$

де U_A і U_B - амплітуди сигналів вторинних котушок перетворювача; k - коефіцієнт підсилення, що визначається зовнішнім резистором R_2 .

Принципова перевага раціометричного перетворення полягає в тому, що результат не залежить від абсолютних значень U_A і U_B , а лише від їх співвідношення. Завдяки цьому використання LVDT і AD598 дозволяє нейтралізувати вплив робочих параметрів вимірювальної схеми - амплітуди збудження, затухання та коефіцієнта трансформації - на точність вимірювання.

3.2.3 Побудова S-моделі в середовищі MATLAB Simulink

Для симулювання етапів опрацювання сигналу від індуктивного перетворювача в AD598 побудовано S-модель в середовищі MATLAB Simulink.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

S-модель відтворює функціональну схему мікросхеми AD598 на блоковому рівні - кожному функціональному блоку мікросхеми відповідає блок у Simulink. S-модель наведено на рис. 3.7.

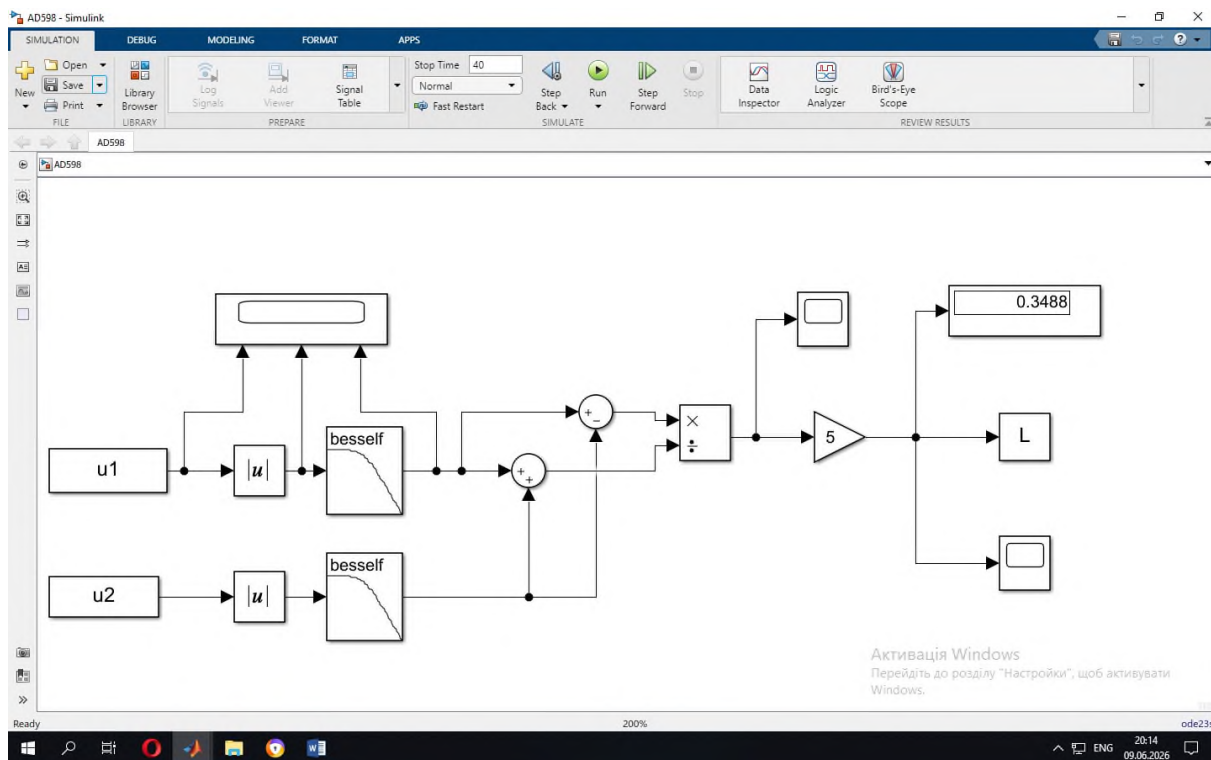


Рисунок. 3.7 - S-модель для симулювання процесу проходження сигналу в AD598

Вхідні сигнали від вторинних обмоток трансформатора u_1 і u_2 моделюються в середовищі MATLAB за допомогою наступного коду та передаються на S-модель:

```

clear all

a0=.01;
i=1;
f1=0;
f2=pi/24;
da=[.003 .0025 .0051 .004 .0015]
na=[0:2*pi/5:2*pi];
%da=sin(na).*sin(10*na);
n=length(da)
for w=1:n
a2=a0;
a1=a0+da(i);
t=0:.005:.5;
u11=a1*sin(60*t+f1);
u22=a2*sin(60*t+f2);
end
plot(t,u11,t,u22),grid
for k=1:40
u1(k,2)=u11(k);
u2(k,2)=u22(k);
u1(k,1)=k;
u2(k,1)=k;
end
for w=1:n
a2=a0;
a1=a0+da(i);
t=0:.01:1;
u11=a1*sin(60*t+f1);
u22=a2*sin(60*t+f2);
for k=1:40
u1(k,2)=u11(k);
u2(k,2)=u22(k);
u1(k,1)=k;
u2(k,1)=k;
end
simOut=sim('AD598');

```

Пояснення до коду. Змінна $a_0 = 0.01$ задає базову амплітуду сигналу (в умовних одиницях). Масив $da = [0.003, 0.0025, 0.0051, 0.004, 0.0015]$ Рис(10) містить п'ять різних значень відхилення зазору від номінального — вони відповідають різним радіальним відхиленням поверхні контрольованого отвору. Змінні $f_1 = 0$ і $f_2 = \pi/24$ задають початкові фази сигналів двох вторинних обмоток. Частота несучого сигналу задається коефіцієнтом 60 у виразах $\sin(60 \cdot t)$ і відповідає кутовій частоті $\omega \approx 60$ рад/с при частоті збудження близько 9,5 Гц.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Функція `sim('AD598')` запускає симуляцію S-моделі Simulink і повертає результати в змінну `simOut`.

За результатами виконання коду отримано графіки вхідних і вихідних сигналів на різних етапах обробки в AD598.

На рис. 3.8 наведено вихідні сигнали вторинних обмоток трансформатора u_1 і u_2 при вимірюванні зазору. Сигнали є синусоїдами однакової частоти, але різної амплітуди - різниця амплітуд пропорційна відхиленню зазору від номінального значення δ_0 .

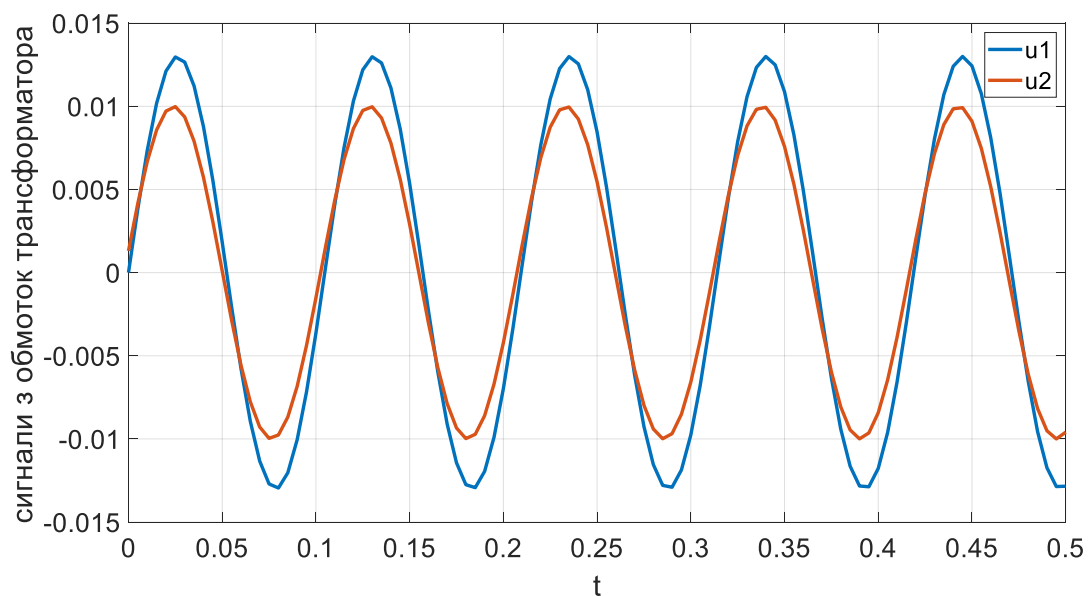


Рисунок. 3.8 - Вихідні сигнали з обмоток трансформатора при вимірюванні зазору

На рис. 3.9 наведено симульований сигнал в AD598 на виході блоку FILTER. Після раціометричного перетворення та фільтрації несучої частоти сигнал набуває постійної складової, пропорційної відхиленню зазору. Форма сигналу підтверджує ефективну роботу фільтра нижніх частот. Вісь X(горизонтальна) – час у секундах(від 0 до 20с). Вісь Y(вертикальна) – вихідна напруга AD598 у вольтах.

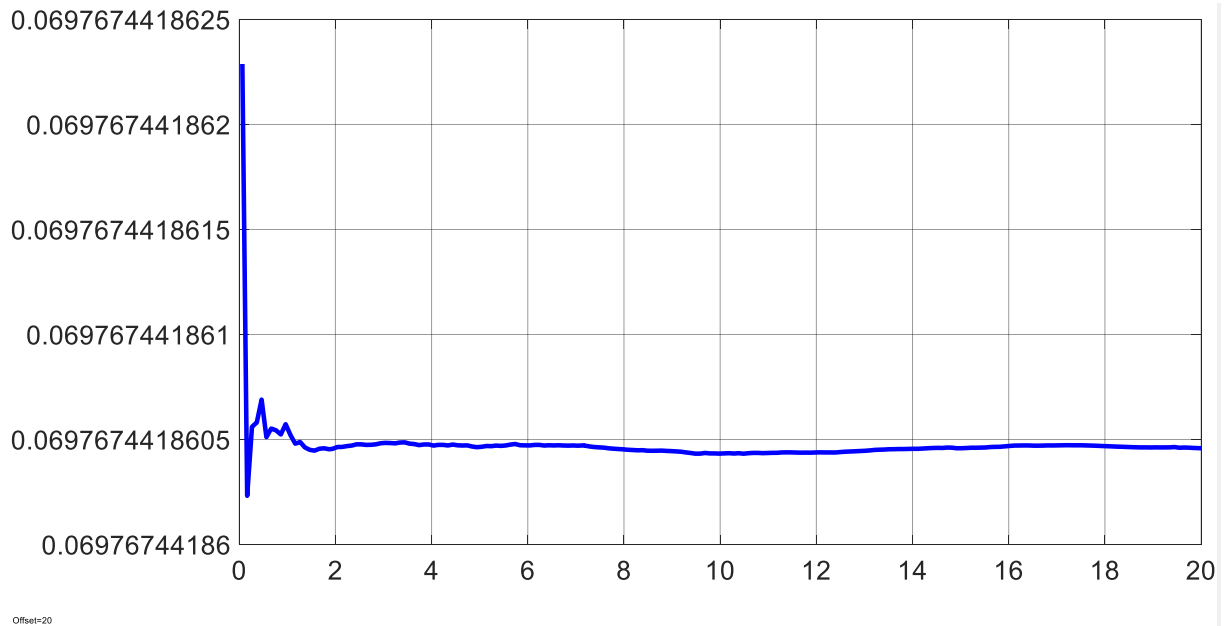


Рисунок. 3.9 - Симульований сигнал в AD598 на виході блоку FILTER

На рис. 3.10 наведено симульовані вихідні сигнали після опрацювання в AD598 для п'яти значень зазору $da = [0.003, 0.0025, 0.0051, 0.004, 0.0015]$, отримані на S-моделі. Кожне значення зазору відповідає окремому рівню вихідної напруги - залежність є лінійною, що підтверджує коректність роботи схеми узгодження. Вісь X(горизонтальна) – номер кроку (від 0 до 250). Вісь Y(вертикальна) – вихідна напруга AD598 у вольтах.

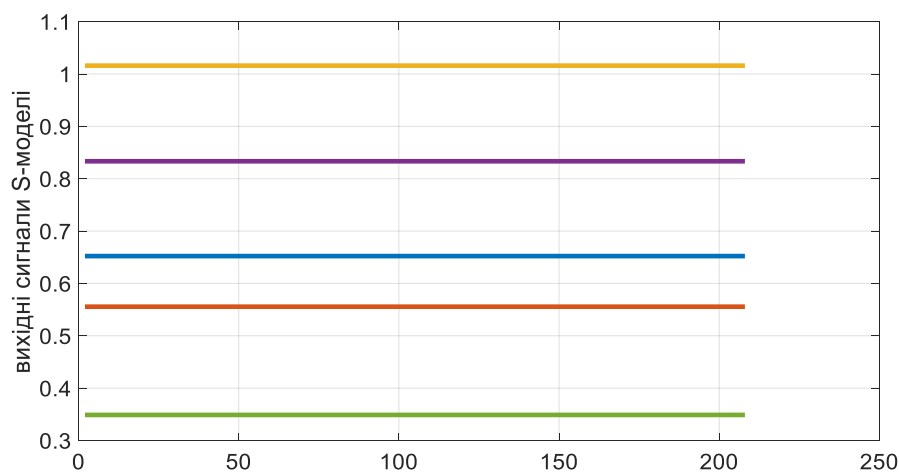


Рисунок. 3.10 - Симульовані вихідні сигнали AD598 для різних значень зазору $da = [0.003, 0.0025, 0.0051, 0.004, 0.0015]$.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі виконано математичне моделювання вимірювального тракту пристрою для контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь - від індуктивного перетворювача до виходу схеми узгодження AD598.

За результатами моделювання отримані такі висновки:

- Передавальна характеристика індуктивного перетворювача є гіперболічною залежністю індуктивності від зазору. В межах робочого діапазону $\pm 0,100$ мм (що відповідає 0,1-0,15 від початкового зазору δ_0) характеристика є лінійною з достатньою для практики точністю. Застосування диференціального включення котушок додатково лінеаризує характеристику і підвищує чутливість вдвічі.
- Схема узгодження AD598 реалізує раціометричне перетворення $U_{\text{вих}} = k \cdot (U_A - U_B) / (U_A + U_B)$, яке ефективно нейтралізує вплив нестабільності амплітуди збудження, затухання та коефіцієнта трансформації на точність вимірювання. Це підтверджено симулюванням в MATLAB Simulink.
- Симульовані вихідні сигнали AD598 для п'яти різних значень зазору $d_a = [0.003, 0.0025, 0.0051, 0.004, 0.0015]$ демонструють лінійну залежність вихідної напруги від величини зазору, що підтверджує придатність схеми AD598 для точного вимірювання переміщень у складі розроблюваного пристрою.
- Отримані результати підтверджують правильність вибору індуктивного перетворювача і схеми узгодження AD598 для вимірювального тракту пристрою контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Аналіз та захист оператора від впливу електромагнітного випромінювання при роботі з індуктивним перетворювачем

При експлуатації розробленого автоматизованого пристрою для контролю внутрішніх розмірів одним із основних факторів впливу на оператора є електромагнітне випромінювання (ЕМВ). Джерелом випромінювання у системі є індуктивний перетворювач (модель 223), що працює у парі зі спеціалізованою мікросхемою AD598. Генератор збудження системи працює на частоті до 10 кГц, що згідно з класифікацією ДСН 3.3.6.096-2002, відноситься до низькочастотного діапазону.

Характеристика впливу та нормативні вимоги:

Електромагнітні поля такого діапазону при тривалому впливі можуть впливати на функціональний стан центральної нервової та серцево-судинної систем оператора. Основним завданням при проектуванні пристрою було зниження напруженості електричної та магнітної складових поля до рівнів, що не перевищують гранично допустимі значення, встановлені державними санітарними нормами України.

Інженерно-технічні заходи захисту:

Для забезпечення безпеки праці та електромагнітної сумісності (ЕМС) у конструкції пристрою реалізовано наступні технічні рішення:

Конструкційне екранування джерела:

Електронний вузол, що містить генератор високої частоти, розміщується у закритому металевому корпусі. Матеріал корпусу (алюмінієвий або сталевий сплав) має високу електропровідність, що дозволяє ефективно поглинати та відбивати електромагнітну енергію. Екран діє за принципом клітки Фарадея, локалізуючи основну частину випромінювання всередині блоку.

Використання екранованих кабелів зв'язку:

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Зв'язок між індуктивним перетворювачем та основним блоком обробки здійснюється за допомогою кабелю типу «вита пара» із зовнішнім екранувальним обплетенням. Скручування провідників дозволяє взаємно компенсувати магнітні потоки від струмів, що протікають у протилежних напрямках. Металевий екран кабелю заземлюється з боку вимірювального блоку, що перешкоджає поширенню завад та ЕМВ у навколишнє середовище.

Метод «захисту відстанню»:

Враховуючи фізичну властивість електромагнітного поля стрімко затухати при віддаленні від джерела, конструкція установки спроектована таким чином, щоб робоча зона оператора (пульт керування, дисплей) була віддалена від зони безпосереднього вимірювання (де розташований датчик 223) на відстань не менше 500–600 мм. На такій відстані інтенсивність поля стає мінімальною і не перевищує природний фон.

Використання мікросхеми AD598 дозволяє суворо контролювати амплітуду струму збудження. Це запобігає виникненню неконтрольованих викидів напруги та струму в обмотках датчика, що автоматично стабілізує електромагнітну обстановку навколо приладу.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Таблиця 4.1 - Заходи щодо забезпечення електромагнітної безпеки

Об'єкт контролю	Джерело поля	Метод захисту	Технічна реалізація
Електронний блок	Генератор AD598 (10 кГц)	Пасивне екранування	Використання металевого корпусу із заземленням.
Лінії передачі	Струми в кабелях	Електромагнітне екранування	Застосування екранованої витої пари з мідним обплетенням.
Зона вимірювання	Котушки датчика 223	Просторова ізоляція	Розміщення датчика всередині механічного вузла сканування.
Робоче місце	Сукупне поле пристрою	Захист відстанню	Винесення інтерфейсної частини за межі активної зони випромінювання.

Таким чином, завдяки комплексному поєднанню методів екранування, правильного вибору кабельної продукції та раціонального компонування вузлів, рівень впливу ЕМВ на оператора зведений до безпечного мінімуму, що повністю відповідає нормам ДСН 3.3.6.096-2002.

4.2 Електробезпека при експлуатації установки напругою до 1000 В

Вимірювальний комплекс живиться від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В із частотою 50 Гц. Згідно з «Правилами улаштування електроустановок» (ПУЕ-2017), за ступенем небезпеки ураження електричним струмом приміщення, у якому проводиться контроль розмірів, класифікується як приміщення з підвищеною небезпекою. Це обумовлено наявністю заземлених металевих конструкцій, складного електронного обладнання та можливістю контакту оператора з корпусом приладу.

Аналіз ризиків та концепція захисту: Найбільшу небезпеку становить ділянка первинного живлення (від розетки до блока живлення). У разі порушення цілісності ізоляції фазного провідника на металевому корпусі пристрою може виникнути небезпечний потенціал. Для виключення ризику електротравматизму в даній розробці реалізовано багаторівневу систему захисту.

4.2.1 Основні технічні заходи забезпечення безпеки

Використання системи безпечної наднизької напруги (БНН): Найефективнішим заходом безпеки в даному пристрої є те, що всі внутрішні вузли, з якими безпосередньо взаємодіє оператор (індуктивний датчик 223, кроковий двигун NEMA 17, мікроконтролерний блок), працюють на напрузі 12 В постійного струму. Відповідно до ДСТУ 3135.0-95, напруга 12 В є безпечною для людини, оскільки навіть за умови прямого дотику вона не здатна подолати електричний опір шкіри та спричинити проходження небезпечного для життя струму через внутрішні органи:

- Захисне заземлення та занурення (РЕ): Корпус блоку живлення та всі струмовідні частини, що можуть опинитися під напругою внаслідок аварії, підключені до захисного провідника РЕ загальної трипровідної мережі.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

- Зниження різниці потенціалів між металевим корпусом та землею до безпечного рівня.
- спрацювання захисної автоматики (запобіжників або автоматів) у разі короткого замикання на корпус.
- Опір заземлювального пристрою згідно з нормами не перевищує 4 Ом
- Застосування пристрою захисного відключення (ПЗВ): Мережа живлення установки обладнується ПЗВ (або диференційним автоматом) із номінальним струмом спрацьовування 30 мА. Цей пристрій постійно порівнює струми у фазному та нульовому провідниках. Якщо оператор випадково торкнеться пошкодженої ділянки під напругою, ПЗВ зафіксує витік струму «на землю» і миттєво (за час менше 0.1 с) розірве електричний ланцюг.
- Конструкційна ізоляція та захист оболонок: Всі високовольтні компоненти розміщені всередині закритих ізольованих корпусів зі ступенем захисту не нижче IP20. Це унеможливорює випадкове торкання пальцями до відкритих контактів під напругою 220 В під час штатної експлуатації.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 - Порівняльна характеристика рівнів електричної напруги в пристрої

Вузол системи	Робоча напруга	Ступінь небезпеки	Застосований захист
Мережевий шнур та вхід БЖ	220 В (змінна)	Високий	Подвійна ізоляція, ПЗВ, заземлення корпусу.
Силова частина (двигуни)	12 В (постійна)	Безпечний	Гальванічна розв'язка від мережі 220 В.
Вимірювальний блок (AD598)	±12 В (постійна)	Безпечний	Використання екранованих слабкострумівих ліній.
Датчик та контролер	5 В / 12 В	Безпечний	Розміщення в діелектричних або заземлених корпусах.

Вимоги до персоналу: До роботи з вимірювальним комплексом допускаються особи, які пройшли інструктаж із техніки безпеки та мають групу з електробезпеки не нижче II. Перед кожним використанням пристрою оператор зобов'язаний проводити візуальний огляд цілісності ізоляції кабелів живлення та перевіряти надійність заземлювальних з'єднань.

4.3 Ергономічні вимоги до робочого місця оператора вимірювального пристрою

Робота оператора з автоматизованим комплексом гвинтового сканування передбачає поєднання інтелектуального навантаження (аналіз даних на дисплеї) та фізичних маніпуляцій з вимірюваними деталями. Організація робочого місця базується на принципах ергономіки, викладених у ДСТУ EN ISO 9241 та ДСанПіН 3.3.2.007-98, з метою мінімізації стомлюваності та запобігання виникненню професійних захворювань (порушення зору, опорно-рухового апарату).

Для забезпечення зручності та високої точності вимірювань робоча зона розділена на декілька сегментів:

- Зона основного обладнання: Механічний вузол із кроковим двигуном NEMA 17 та індуктивним датчиком розміщується безпосередньо перед оператором на висоті 850–950 мм від підлоги. Така висота є оптимальною для маніпуляцій деталями в положенні сидячи або стоячи.
- Інформаційна зона: LCD-дисплей пристрою встановлюється так, щоб лінія зору оператора була спрямована вниз під кутом 15–30° відносно горизонту. Це положення мінімізує навантаження на м'язи шиї. Відстань від очей до екрана становить 600-700 мм.
- Зона керування: Кнопки та регулятори налаштування розміщені в радіусі легкої досяжності кистей рук (близько 300-400 мм від центру робочої поверхні), що виключає необхідність зайвих нахилів тулуба.

Робота з вимірювальними приладами високої точності відноситься до розряду III-в зорової роботи. Для забезпечення комфортних умов у приміщенні реалізовано комбіноване освітлення:

- Загальне: Рівномірне освітлення всього приміщення за допомогою світлодіодних панелей із нейтральною колірною температурою (4000 К).

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

- Місцеве: Додаткове підсвічування вимірювальної зони безпосередньо біля індуктивного перетворювача. Це дозволяє оператору чітко бачити положення наконечника датчика відносно поверхні деталі.

Сумарна освітленість на робочому столі має бути в межах 400–500 лк. Світильники обладнуються розсіювачами для усунення відблисків на екрані дисплея та металевих деталях.

4.3.1 Мікроклімат та санітарні умови

Оскільки оператор проводить за робочим місцем значну частину зміни, параметри повітряного середовища повинні відповідати нормам ДСН 3.3.6.042-99:

- Температура повітря: у межах 20-23 °С (в теплий період) та 18-21 °С (в холодний період).
- Відносна вологість: 40-60%.
- Швидкість руху повітря: не більше 0.1 м/с, що виключає виникнення протягів.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Таблиця 4.3 - Зведена таблиця ергономічних та санітарних параметрів

Параметр	Нормативне значення (згідно ДСТУ/ДСН)	Фактичне значення проекту
Освітленість робочої зони	300–500 лк	450 лк
Рівень шуму (робота двигунів)	не більше 50 дБА	38 дБА
Висота робочої поверхні столу	750–1000 мм	900 мм
Відстань від очей до дисплея	600–800 мм	650 мм
Робоча поза	Вільна, з можливістю зміни	Сидячи (ергономічне крісло)

З огляду на зорову напруженість процесу вимірювання, оператору рекомендується дотримуватися наступного режиму:

Запропонована організація робочого місця дозволяє не лише забезпечити безпеку праці, а й підвищити продуктивність оператора за рахунок зменшення втомлюваності та підвищення концентрації під час виконання контрольних операцій.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОКИ

У дипломній роботі розроблено та модернізовано автоматизований пристрій для контролю радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь деталей машинобудування з діаметром отвору 120-160 мм. За результатами виконання роботи зроблено такі висновки.

1. За результатами літературного огляду та патентного пошуку проаналізовано п'ять відомих технічних рішень у галузі контролю внутрішніх розмірів. Встановлено, що найближчим за принципом дії до розроблюваного є контактний обертовий пристрій за патентом US 2015/0007440 A1. Як базову конструкцію для модернізації обрано пристрій за патентом № 376650, що забезпечує введення вимірювального вузла в ступінчастий отвір і має відпрацьовану механічну схему.

2. Розроблено конструкцію модернізованого пристрою. Ключовим вузлом є механізм клин-штока з кутом нахилу похилої площини 15° , що перетворює радіальне переміщення вимірювального наконечника X в осьове переміщення індуктивного перетворювача Y за законом $Y = X \cdot \operatorname{tg}(15^\circ)$. Система обертання (двигун M2 і зубчаста передача) та система вертикального переміщення каретки (двигун M1 і передача гвинт-гайка) забезпечують автоматичне гвинтове сканування всієї внутрішньої поверхні отвору.

3. Виконано розрахунок передачі гвинт-гайка: осьова сила $F_a = 150$ Н, крок різьби $P = 2$ мм, матеріал гвинта - Сталь 45 (ДСТУ 7809:2015), матеріал гайки - СЧ 20 (ДСТУ 3925-99), трапецеїдальна різьба $d = 16$ мм (ISO 2901:1993). Умова самогальмування виконується: $\varphi' = 3,30^\circ > \psi = 2,43^\circ$. Розраховано параметри зубчастої передачі: модуль $m = 1$ мм, $z_1 = 10$, $z_2 = 100$, передаточне число $U = 10$.

4. Виконано вибір і розрахунок елементів електронного блоку. Обрано два крокових двигуни NEMA 17 (17HS4401) з крутним моментом $0,4$ Н·м та драйвер L298 з номінальним струмом 2 А. Для обробки сигналу індуктивного

перетворювача моделі 223	обрано мікросхему AD598 з розрахованими	Арк.			
	КРБ 468.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	64

елементами: $C1 = 33$ нФ, $R1 = 20$ кОм, $R2 = 47$ кОм, $C3 = C4 = 1,0$ мкФ.
Похибка вимірювання пристрою складає $\pm 0,010$ мм.

5. Виконано математичне моделювання вимірювального тракту в середовищі MATLAB Simulink. Побудовано S-модель мікросхеми AD598. Симулювання для п'яти значень зазору $da = [0.003, 0.0025, 0.0051, 0.004, 0.0015]$ підтвердило лінійну залежність вихідного сигналу від переміщення та ефективність раціометричного перетворення для усунення впливу нестабільності живлення на точність вимірювання.

6. Побудовано схему проходження сигналу з п'яти стадій перетворення - від механічного контакту наконечника з поверхнею деталі до цифрового результату на LCD і ПК. Розраховано циклограму роботи: час одного кроку - 15,5 мс, час повного сканування отвору глибиною 50 мм - 316 с (5,3 хв), продуктивність - 11 деталей/год.

7. Розроблено заходи з безпеки життєдіяльності та охорони праці: захист від електромагнітного випромінювання (екранований корпус, коаксіальний кабель, відстань від оператора не менше 500 мм), електробезпека (система БНН 12 В, захисне заземлення, ПЗВ 30 мА), ергономічна організація робочого місця (висота 900 мм, освітленість 450 лк, рівень шуму 38 дБА).

Таким чином, усі поставлені завдання дипломної роботи виконано в повному обсязі. Розроблений пристрій забезпечує повністю автоматизований контроль радіуса внутрішніх циліндричних поверхонь з похибкою $\pm 0,010$ мм, скануванням 20 000 точок поверхні за цикл та передачею результатів на ПК через USB. В якості перспективи подальшої модернізації розглядається заміна індуктивного перетворювача моделі 223 на сучасний аналог НВМ WA-T/2 з нелінійністю 0,1% та ступенем захисту IP67, що дозволить підвищити точність і надійність пристрою в умовах виробництва.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бритван В.Я. Пристрій для контролю внутрішніх розмірів : пат. № 376650 ; заявл. 23.03.1970 ; опубл. 05.04.1973, Бюл. № 17.
2. Goto T., Onishi S. Inside Diameter Measuring Tool : pat. US 4,447,959 A ; Mitutoyo Mfg. Co. Ltd. (Japan) ; filed 07.01.1982 ; publ. 15.05.1984. IPC G01B 5/12.
3. Getman D.P., O'Brien K.J. Gauge for Measuring Large Diameter : pat. US 2008/0043252 A1 ; Marposs S.p.A. (Italy) ; filed 19.10.2006 ; publ. 21.02.2008. IPC G01B 11/12.
4. Nakamura M., Kimura S. Diameter Measuring Device : pat. US 7,856,730 B2 ; Olympus Medical Systems Corp. (Japan) ; filed 13.07.2006 ; publ. 28.12.2010. IPC A61B 5/107, G01B 7/12.
5. Takahashi Y., Yoshida R. Inner Diameter Measuring Device : pat. US 2015/0007440 A1 ; Tokyo Seimitsu Co., Ltd. (Japan) ; filed 14.03.2013 ; publ. 08.01.2015. IPC G01B 5/12, G01B 7/12.
6. Štěpán P., Marková I., Dvořáček J. Scanning and Measuring Device for Diagnostic of Barrel Bore // Lecture Notes in Electrical Engineering. — Springer, 2022. — P. 28–35. DOI: 10.1007/978-3-642-17641-8_4.
7. Analog Devices. AD598 LVDT Signal Conditioner : datasheet. Rev. C. — Norwood : Analog Devices, 2011. — 16 p. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD598.pdf> (дата звернення: 01.04.2025).
8. Паламар М.І. Системи автоматизованого проектування вимірювальних систем: конспект лекцій / М.І. Паламар. — Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2023. — 67 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/42848/1/> (дата звернення: 01.04.2025).
9. Дичковський М.Г., Сіправська М.Д. Контрольні пристрої та розрахунок їх точності : методичні вказівки до лабораторних робіт. — Тернопіль :

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ТНТУ ім. І. Пулюя, 2021. — 45 с. URL:
<https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/35164/1/метод.2021.pdf>

10. Яцків В.В. Методи і засоби вимірювань. Вимірювальна техніка : навчальний посібник / В.В. Яцків. — Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. - 67 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/44636/1/Lab_M1_IVS.pdf (дата звернення: 01.04.2025).
11. STMicroelectronics. L298 Dual Full-Bridge Driver : datasheet. Rev. 9. - Geneva : STMicroelectronics, 2000. - 15 р. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf> (дата звернення: 01.04.2025).
12. ISO 2901:1993. ISO Metric Trapezoidal Screw Threads. Basic Profile and Maximum Material Profiles. — Geneva : ISO, 1993. — 6 р.
13. ДСТУ ISO 1207:2003. Гвинти з циліндричною головкою і прямим шліцом. Клас точності А. — Київ : Держстандарт України, 2003. — 8 с.
14. ДСТУ ISO 4014:2003. Болти із шестигранною головкою. Продукція класів А і В. — Київ : Держстандарт України, 2003. — 10 с.
15. ДСТУ ISO 7090:2003. Шайби нормальні з фаскою. Клас точності А. — Київ : Держстандарт України, 2003. — 6 с.
16. Цейтлін Й.М. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник. — Київ : Вища школа, 1993. — 335 с.
17. Тищенко О.І., Лобанов В.А. Засоби автоматизованого контролю в машинобудуванні. — Харків : НТУ «ХПІ», 2015. — 248 с.

					КРБ 468.00.00.000 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

Керівник: Зелінський І. М. _____

Консультант: Зелінський І. М. _____

Консультант: Яворська М. І. _____

Консультант: Стрембіцький М. О. _____

Нормоконтроль: Апостол Ю. О. _____

Затвердив: Паламар М. І. _____

Рецензент: _____

Форма	Зона.	Поз.	Найменування	Найменування	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A1			КРБ 468.00.00.000.СК	Складальне креслення	1	
				<u>Складальні одиниці</u>		
		1	КРБ 468.01.00.000	Вісь поворотна	1	
		2	КРБ 468.02.00.000	Клин шток	1	
				<u>Деталі</u>		
		3	КРБ 468.00.00.001	Втулка	1	
		4	КРБ 468.00.00.002	Втулка	1	
		5	КРБ 468.00.00.003	Втулка	1	
		6	КРБ 468.00.00.004	Втулка текстолітова	1	
		7	КРБ 468.00.00.005	Втулка	1	
		8	КРБ 468.00.00.006	Колесо зубчасте	1	
		9	КРБ 468.00.00.007	Колесо зубчасте	1	
		10	КРБ 468.00.00.008	Колесо зубчасте	1	
		11	КРБ 468.00.00.009	Колесо зубчасте	1	
		12	КРБ 468.00.00.010	Фланець	2	
		13	КРБ 468.00.00.011	Гайка прижимна	2	
				M8x0,75		
		14	КРБ 468.00.00.012	Гайка прижимна	1	
				M98x0,75		
		15	КРБ 468.00.00.013	Гайка прижимна	1	
				M12x0,75		
		16	КРБ 468.00.00.014	Каретка	1	
		17	КРБ 468.00.00.015	Тримач	1	
		18	КРБ 468.00.00.016	Стояк	1	
		19	КРБ 468.00.00.017	Обхват	1	
				КРБ .00.00.000		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		
Розроб.		Дричак Д. В.			Лім.	Арк.
Перевір.		Зелінський І. М.				Аркушіє
Н. Контр.		Апостол Ю.О.				1
Затверд.		Паламар М.І.				3
Рецензент					ФПТ, гр. РН-41	
				Прилад для вимірювання Внутрішніх циліндричних поверхонь		

