

## РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНОЇ ЗАДАЧІ ВИМІРЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ВІДНОВЛЮВАЛЬНОМУ ПОКРИТТІ МЕТОДОМ КОМП'ЮТЕРНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕНЗОДАТЧИКА ОПОРУ

\*Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

**Анотація.** У статті запропонований спосіб комп'ютерної обробки результатів вимірювання залишкових напружень у покриттях відновлених колінчастих валів автомобілів моделі ЗІЛ-162. Отримана порівняльна характеристика значень залишкових напружень у відновлених і нових колінчастих валах автомобілів моделі ЗІЛ-162.

**Ключові слова:** відновлювальне покриття, колінчастий вал, плазмове напилювання, залишкові напруження, тензодатчики, аналого-цифровий перетворювач, архітектура суперкомп'ютерів, нелінійні крайові задачі.

**Аннотация.** В статье предложен способ компьютерной обработки результатов измерения остаточных напряжений в покрытиях восстановленных коленчатых валов автомобилей модели ЗИЛ-162. Получена сравнительная характеристика значений остаточных напряжений в восстановленных и новых коленчатых валах автомобилей модели ЗИЛ-162.

**Ключевые слова:** восстановительное покрытие, коленчатый вал, плазменное напыление, остаточные напряжения, тензодатчики, аналого-цифровой преобразователь, архитектура суперкомпьютеров, нелинейные краевые задачи.

**Abstract.** A method of computer processing of the results of measurement of residual stresses in the covers of reduced automobile crankshafts of ZIL-162 models is suggested in the paper. The comparative characteristic of residual stresses in the reduced and new automobile crankshafts of ZIL-162 models is obtained.

**Keywords:** reductive cover, crankshaft, plasma spraying, residual stresses, strain gauges, analog-to-digital converter, architecture of supercomputers, nonlinear boundary value problems.

### 1. Вступ

Експлуатація автомобілів включає в себе надійну роботу усіх їх вузлів та елементів. Серед основних вузлів автомобілів на першому місці стоять ходова частина та двигун. Тривалість експлуатації відновлених колінчастих валів автомобілів залежить у першу чергу від величини залишкових напружень у тих частинах валів, які піддаються найбільшому зношенню у процесі їх роботи (мова йде про шатунні і корінні шийки колінчастого валу).

Механізм вимірювання залишкових напружень у відновлювальних покриттях – складний процес, точність експериментальних даних досить суттєво може впливати на правильність кінцевого аналітичного розрахунку. У літературі [1, 2] наведені приклади вимірювання залишкових напружень безпосередньо у самому матеріалі шатунної шийки. Це процес вимірювання характеристик деталей автомобіля у спеціальній заводській лабораторії. В автомобільній промисловості, зокрема, на автотранспортних підприємствах, а також на окремих станціях технічного обслуговування проводять відновлення робочих характеристик колінчастого валу до певної технологічної норми (так звана металізація поверхневого зношеного шару частин колінчастого валу). Крім того, після процесу відновлення шатунну шийку колінчастого валу піддають процесу шліфування (до так званого капітального ремонтного розміру №1 або №2). На фоні цих двох процесів – відновлення і подальшого шліфування – проходить складний механізм утворення залишкових напружень у відновлювальному покритті. Проте літературні дані [1, 2] про збереження цілісності нанесеного покриття, його експлуатаційну характеристику на протязі певного терміну обмежуються лише поняттям ”число гарантованого кілометро-пробігу” і не пояснюють суті фізи-

чного процесу впливу залишкових напружень на тривалість експлуатації колінчастого валу.

Першочергове значення у процесі визначення залишкових напружень у відновлювальному покритті має ефективна комп'ютерна обробка результатів експерименту. Для прискорення отримання якісних результатів технологічних та математичних експериментів доцільне застосування суперкомп'ютерів.

Зараз відбулась зміна підходу до архітектури суперкомп'ютерів, які можна виготовляти в Україні в обхід будь-яких обмежень. Це мають бути кластери, тобто комп'ютери із паралельними обчисленнями на масивах обчислювальних вузлів, кожен з яких збирається з мікропроцесорів масового виробництва, а вузли зв'язуються один з одним високопродуктивними каналами зв'язку. Це дає змогу розв'язувати принципово нові надскладні задачі великої розмірності в галузі науки, економіки, екології, сільського господарства, техніки, безпеки, в космічній галузі та ін. Скорочення часу постановки, дослідження та розв'язання задач досягається не тільки за рахунок організації паралельних обчислень, але й за рахунок інтелектуального програмування, що враховує адаптивну настройку алгоритму і синтезовані програми на властивості задачі з урахуванням технічних і математичних можливостей суперкомп'ютера [1].

Дуже важливим є визначення структури складних систем [2–4]. Можна умовно визначити деякі ознаки складних систем. Складна система складається із взаємно залежних підсистем, які можна представити у вигляді ієрархії. При цьому буде вибір низьких рівнів. Будуть внутрішні елементні зв'язки більш сильними, ніж міжелементні. Всі ієрархії систем складаються за деякими підсистемами різних типів.

Програмному забезпеченню складних систем властива певного рівня складність. Можна визначити такі головні ознаки. Це, зокрема, складність самої проблеми, керування процесом обробки, гнучкість програмного продукту та поведінка окремих підсистем.

Функціональні простори, в яких розглядатимуться крайові задачі. Неоднорідні і нелінійні задачі запропонованих нами систем настільки складні, що у більшості випадків методів їх теоретичного математичного дослідження зовсім не достатньо. З іншого боку, більшість дослідників, які високопрофесійно володіють засобами комп'ютерного моделювання, часто зовсім не поінформовані щодо можливостей попереднього математичного дослідження модельованих нами задач. А це дуже важливо, наприклад, для нелінійних задач. Адже можливість отримання в цих випадках лише наближених розв'язків конче потребує оцінки точності та швидкості збіжності методів, що застосовуються.

Урахування загальності підходу до розгляду нелінійних крайових задач неоднорідних середовищ ставить необхідною умовою розгляд та дослідження їх у функціональних просторах типу Банаха.

Одним із використань таких просторів є крайові задачі для операторних рівнянь. Розглянемо нелінійні, неоднорідні початково-крайові задачі для кусково-неоднорідної області  $\Omega_T = U \Omega_i * [0, T]$ , де  $\Omega_i$  – код двовимірної (тривимірної) області,  $[0, T]$  – проміжок зміни часу коливань  $t$ . Такі області  $\Omega_i$  трактуватимуться у подальшому як представницькі елементи деякої композитної системи, яка складається з армуючої компоненти  $F^{(i)}$ , що з'єднується з метричним матеріалом  $M^{(i)}$  за допомогою міжфазного перехідного прошарку  $S^{(i)}_{FM}$ . Зазначимо, що для кожної області задаватимуться умови спряження, наприклад, армуючої компоненти  $F^{(i)}$  з міжфазним утворенням  $S^{(i)}_{FM}$  та утворення з елементом матричного матеріалу  $M^{(j)}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ).

Слід зазначити, що внаслідок  $\Omega$  на окремі підобласті  $\Omega_i$  матимуть місце крайові умови. Це стосується, зокрема, підобластей, що розташовуються вздовж межі  $\partial\Omega$  області  $\Omega$ . Що стосується підобластей, розташованих в середині області, то на їх межах  $\partial\Omega_i$  ціл-

ком природно задати крайові умови жорсткого зчеплення. Окрім того, виконане розбиття може містити ті області, які не мають включення армуючого компонента  $F$ . Тому приймається, що кількість підобластей  $\Omega^{(i)}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) не співпадає з числом міжфазних прошарків  $S^{(j)}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ).

Пропонується така операторна форма крайових та початково-крайових задач:

$$L\varphi = (P^{(2)}\varphi + \rho\varphi_u, l_1\varphi, l_2\varphi, S\varphi, T_1\varphi, T_2\varphi) = (f, \theta\psi, w, \varphi_{01}, \varphi_{11}). \quad (1)$$

Відповідно для розрахунку елемента пластини (оболонки)

$$P\varphi = (P^{(4)}\varphi + \rho h\varphi_u, q_1\varphi, q_2\varphi, S\varphi, T_1\varphi, T_2\varphi) = (N\varphi, m_1\varphi, m_2\varphi, \psi, \varphi_{01}, \varphi_{11}). \quad (2)$$

У наведених операторних рівняннях  $P^{(2)}$  і  $P^{(4)}$  – відповідно диференціально-оператори 2-го і 4-го порядків;  $l_1, l_2$  – оператори крайових умов;  $S$  – оператор умов спряження;  $T_1, T_2$  оператори початкових умов по змінній часу  $t$ . Крім того,  $f, \theta\psi, w, \varphi_{01}, \varphi_{11}$  – праві частини операторних рівнянь, що відповідають названим вище операторам. Відповідно для рівняння (2):  $h$  – товщина елемента пластини (оболонки);  $q_1, q_2$  – оператори зовнішніх зусиль;  $N\varphi, m_1\varphi, m_2\varphi$  – праві частини рівняння коливань та зовнішніх навантажень. Зрозуміло, що при відсутності складової з  $\varphi_u$  та  $T_1$  і  $T_2$  операторні рівняння відповідають стаціонарним крайовим задачам з урахуванням умов спряження [4].

## 2. Обладнання, матеріали та методика досліджень

Запропонований метод вимірювання внутрішніх напружень, на думку авторів даної роботи, пропонується як оціночний критерій щодо експлуатації відновленого колінчастого валу автомобіля. Етапи процесу (від нанесення відновлювального покриття до вимірювання залишкових напружень у ньому) представлені на рис. 1–3.

У даній роботі розглядається метод вимірювання залишкових напружень у системі "відновлювальне покриття – матеріал основи (власне колінчастий вал)" після остаточної обробки (шліфування) шийки колінчастого валу двигуна пожежного автомобіля ЗІЛ-130 під ремонтний розмір №1.

Суть даного методу полягає у використанні тензодатчиків як головних реєстраторів залишкових напружень у шарі відновлювального покриття з подальшою комп'ютерною обробкою даних у режимі реального часу. Залишкові напруження у відновлювальному покритті вимірювали як на шатунній, так і на корінній шийці колінчастого валу.

Залишкові напруження у відновлювальному покритті, нанесеному на шатунну шийку колінчастого валу, знаходили за емпіричними формулами [3, 4]:

$$\sigma_{3H} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{d_3}{d_1} \cdot \Delta\varepsilon \cdot \left( \frac{\frac{\delta^2}{6(d_2-d_1)} - \frac{\delta}{2}}{\frac{d_2-d_1}{2}} \right), \quad (3)$$

де  $\sigma_{3H}$  – залишкові напруження у відновлювальному покритті, нанесеному на шатунну шийку колінчастого валу, МПа;  $E$  – модуль повздовжньої пружності у відновлювальному покритті і основі, МПа;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу відновлювального покриття і основи, ум. од.;

$d_1$  – діаметр шийки колінчастого валу до напилювання відновлювального покриття, м;

$d_2$  – діаметр шийки колінчастого валу після напилювання відновлювального покриття,

м;

$d_3$  – діаметр шийки колінчастого валу після процесу шліфування напиленого відновлювального покриття, м;

$\delta$  – товщина покриття на діаметр шийки колінчастого валу, м.

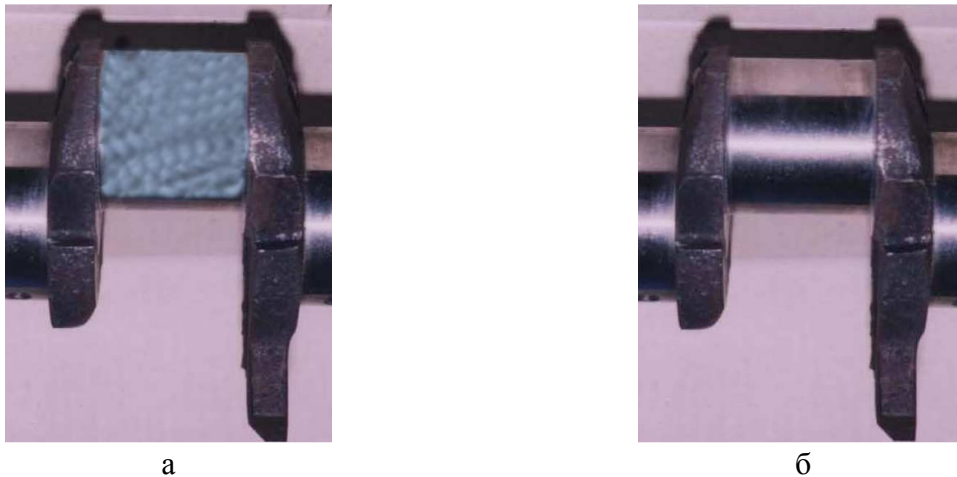


Рис. 1. Фрагмент колінчастого валу: а – після напилювання відновлювального покриття; б – після процесу шліфування

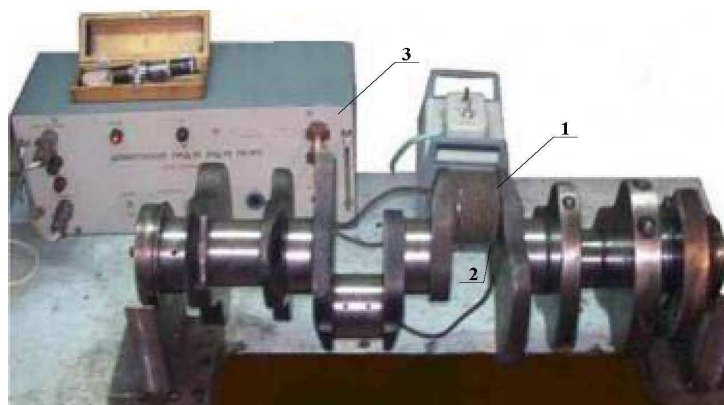


Рис. 2. Схема процесу вимірювання тензодатчиками величини відносної деформації зовнішньої циліндричної поверхні у відновлювальному покритті: 1 – об'єкт дослідження (шатунна шийка колінчастого валу із нанесеним відновлювальним покриттям); 2 – тензодатчики; 3 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП) сигналів

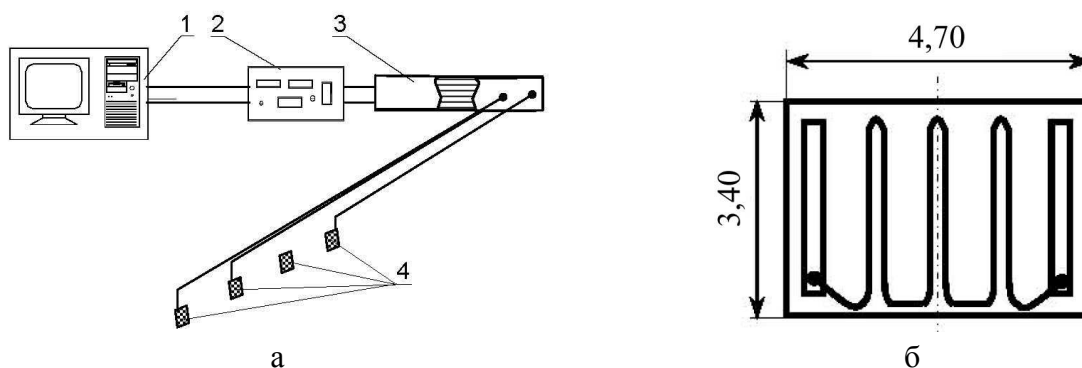


Рис. 3. Компонувачна схема процесу вимірювання тензодатчиками величини відносної деформації зовнішньої циліндричної поверхні у захисному покритті: а – (1 – ПЕОМ; 2 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП) сигналів; 3 – загальна шина приймання сигналів; 4 – тензодатчики); б – загальний вигляд тензодатчика (збільшено)

При цьому передбачалась осьова симетрія розподілу залишкових напружень, а також їх постійність по довжині зразка та лінійний розподіл по товщині. Зчитування сигналів, які надходили з тензодатчиків, здійснювалося за допомогою аналого-цифрового перетворювача з подальшою обробкою результатів на ПЕОМ. Покази з тензодатчиків знімалися у два етапи (на нанесеному шарі відновлювального покриття після процесу шліфування і на новому колінчастому валу). Величина  $\Delta\varepsilon$  була розрахована за такими формулами:

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{K} \ln(\xi(\varepsilon) + 1), \quad (4)$$

де  $\xi(\varepsilon)$  – функція перетворення деформації при нормальних умовах;

$$\xi(\varepsilon) = \frac{\Delta R}{R_{\Pi}}, \quad (5)$$

де  $\Delta R = R_K - R_{\Pi}$ ;

$R_{\Pi}$  – початкове значення опору тензодатчика, Ом;

$R_K$  – опір тензодатчика після деформації, Ом;

$K$  – чутливість тензодатчика при нормальних умовах.

Величину похибки при вимірюванні величин  $R_K$  і  $R_{\Pi}$  визначали як функцію інерційності (повзучості) тензодатчиків за формулою

$$P_{ТД} = 1,5 \cdot \left( e^{\frac{\tau}{1,7} \cdot 10^{-3}} - 1 \right) + \left( e^{\frac{\tau}{2,8} \cdot 10^{-6}} - 1 \right), \quad (6)$$

де  $\tau$  – час випробування матеріалу колінчастого валу на залишкову деформацію, с.

Значення коефіцієнтів  $\mu$  та  $E$  були визначені інтегрально для всіх досліджених зразків у цілому (для кожного типу відновлювального покриття) у лабораторно-заводських умовах із використанням комплексних методик [5].

### 3. Розробка універсальної системи вимірювання значень опорів тензодатчиків

Питання вибору системи і способу вимірювання значень опорів тензодатчиків для визначення залишкових напружень у відновлювальному покритті було вирішене за допомогою створеного модуля обробки і подальшої трансляції аналогових сигналів аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) на пристрій для остаточної обробки отриманої інформації (персональну ЕОМ).

З цією метою було висунуто такі технологічні вимоги до проектного модуля АЦП:

1. Можливість отримувати цифрову інформацію в реальному масштабі часу з урахуванням усіх можливих технологічних параметрів, що характеризують якісні і кількісні аспекти досліджуваного процесу.

2. Можливість проводити відповідну коректуру процесу вимірювання, максимально локалізуючи апаратно і програмно ймовірність виникнення різного типу похибок вимірювання і обробки отриманої інформації.

3. Можливість створення універсальної системи АЦП – ПЕОМ для вимірювання і обробки двох типів сигналів: опір – напруження.

На основі вищенаведених технологічних вимог була спроектована і конструктивно виготовлена універсальна система (рис. 4) з такими функціональними можливостями:

1. Видача обробленої інформації у вигляді цифрових масивів, які являють собою набір очікуваних даних у реальному масштабі часу.
2. Можливість отримання результатів.
3. Прокалібрований модуль АЦП на спеціальному стенді (згідно з ГОСТ 8974-93) дає змогу отримувати якісну інформацію для подальшої обробки.
4. Можливість отримання на ПЕОМ графічних залежностей вимірюваних параметрів у реальному масштабі часу.
5. Автоматичне (програмно вдосконалене) визначення загальної похибки експерименту.

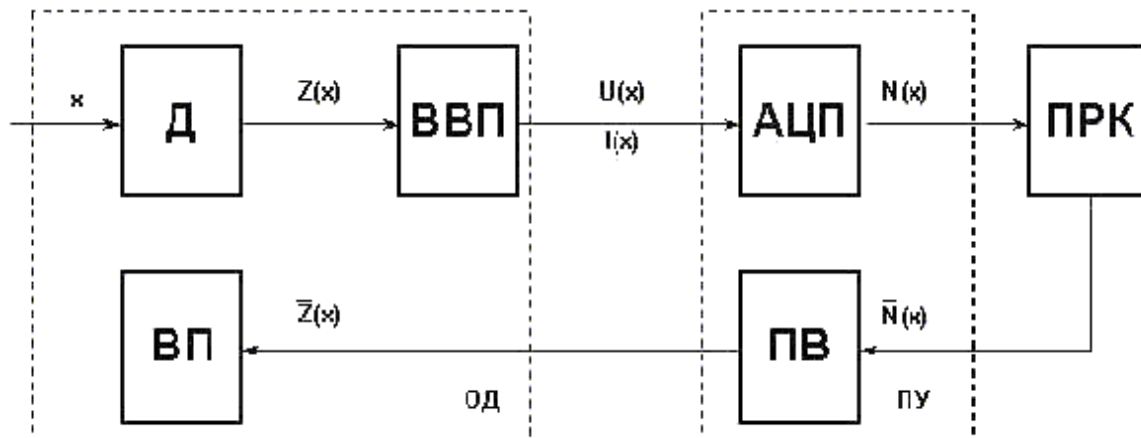


Рис. 4. Структурна схема системи контролю і управління: Д – первинний перетворювач (датчик); ВВП – вторинний вимірювальний перетворювач; ВП – виконавчий пристрій; ОД – об’єкт дослідження; ПУ – пристрій узгодження з об’єктом дослідження; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ПВ – пристрій виводу; ПРК – пристрій реєстрації і контролю

В автоматичній системі контролю і управління можна виділити об’єкт дослідження з первинними перетворювачами (датчиками), повторними вимірювальними перетворювачами і виконавчими пристроями, пристрій узгодження з об’єктом і пристрій реєстрації й контролю [8, 9].

У функції датчиків входять отримання інформації про стан об’єкта дослідження і при необхідності перетворення неелектричного параметра "x" в електричний сигнал "Z(x)", як правило, аналогового характеру, тому що з електричними сигналами найбільш просто і зручно працювати.

Пристрій реєстрації й контролю записує інформацію, що надходить з АЦП, аналізує її і при необхідності видає керуючий вплив "N(x)".

Звичайно пристрій узгодження з об’єктом і сам пристрій реєстрації виконують на аналоговій елементній базі, що пояснюється найбільшою швидкістю і простотою схематичних рішень. Але останнім часом у подібних пристроях стали широко застосовувати аналого-цифрові системи. Відносно чисто аналогових систем, аналого-цифрові системи характеризуються більш високою точністю і стабільністю, простотою програмування, зручністю сполучення з цифровими і аналого-цифровими обчислювальними системами і пристроями.

Міру універсальності такої системи було збільшено завдяки використанню ПЕОМ класу IBM. На базі ПЕОМ було розроблено програму (програмне середовище "Assembler"), що реалізує алгоритм управління та аналізу поведінки об’єкта дослідження.

Технічні характеристики розробленої системи реєстрації й аналізу аналогових сиг-

налів на базі ПЕОМ:

- кількість програмованих каналів реєстрації – від 1 до 12;
- амплітуда вхідного сигналу:  $\pm 100\text{В}$ ,  $\pm 50\text{В}$ ,  $\pm 25\text{В}$ ,  $\pm 12,5\text{В}$ ,  $\pm 5\text{В}$ ,  $\pm 2,5\text{В}$ ,  $\pm 1,25\text{В}$ ,  $\pm 0,625\text{В}$  (вибирається програмно перед початком реєстрації і може динамічно змінюватися під час запису);
- розрядність АЦП: 2 канали по 16 біт;
- максимальна частота дискретизації – 44 кГц;
- режими роботи: реєстрація аналогових сигналів двох типів (первинний датчик реєстрації “Д” тензорезистор (рис. 3 б)) або калібрування системи;
- запуск процесу реєстрації: програмний, зовнішній або від внутрішнього кварцевого генератора з частотою, що програмується.

#### 4. Аналіз структурної схеми реєстрації аналогових сигналів на базі ПЕОМ

Для дискретної зміни коефіцієнта підсилення каналу передачі аналогових даних у блоці застосований вхідний дільник напруги. Для зчитування малих сигналів, припустимо, декількох мілівольт (наприклад, із виходів термопар), і досить великих до вихідного дільника напруги можна підключати потрібні вхідні резистори (тензодатчики для вимірювання внутрішніх напружень у досліджуваних матеріалах), що забезпечують зміну коефіцієнта підсилення в діапазоні від 1 до 250.

Система забезпечує 12 диференціальних вхідних каналів, які можуть бути вибрані під впливом керуючих послідовностей сигналів, які отримують із ПЕОМ. Система має структуру введення вхідних сигналів, що можуть перебудовуватися за бажанням користувача. Вибір необхідних діапазонів вхідних сигналів здійснюється користувачем програмно. Одночасно на кожний із 12 диференціальних вхідних каналів можна підібрати два різні коефіцієнти передачі вхідного дільника напруги чи опору (для термопари або тензодатчика), вибір яких здійснюється за бажанням користувача шляхом подачі відповідного керуючого впливу на потрібний вхідний дільник.

Структурна схема системи складається з блоку попередньої обробки аналогових сигналів (блоки "ОД" і "ПУ") і ПЕОМ. Блок попередньої обробки включає модуль аналогового введення, формувача каліброваної напруги, вузла вводу / виводу дискретних керуючих сигналів і модуля управління [6–8].

Структуру системи реєстрації й аналізу аналогових сигналів на базі ПЕОМ будемо розглядати в порядку проходження сигналів, починаючи з входів. Вхідний дільник (який слід розглядати на схемі (рис. 4) як блок "ОД") являє собою програмно-керований резистивний дільник із коефіцієнтом розподілу 1:1 і 1:20, на входи якого надходять диференціальні вхідні сигнали.

Керування вхідним дільником, вибір каналу введення, встановлення необхідних коефіцієнтів підсилення, а також керування формувачем каліброваної напруги здійснюється програмним шляхом через вузол керування.

Відразу після вхідного дільника напруги аналоговий сигнал надходить на вузол захисту від перенапруги, завданням якого є захист усієї схеми від випадкової спроби виходу із ладу системи шляхом подачі на вхід заблокованих рівнів вхідних аналогових сигналів, що реєструються, та імпульсних перешкод.

Можливість програмної зміни коефіцієнта підсилення у процесі реєстрації збільшує динамічний діапазон вхідних сигналів, що забезпечує велику точність реєстрації вхідних сигналів і, відповідно, зменшує похибку експерименту.

Кожна пара вхідних сигналів надходить на вхід диференціального підсилювача (рис. 5), де відфільтровуються синфазні перешкоди, наведені на шляху проходження сигналів, що реєструються. Таким чином підвищується точність реєстрації сигналів, що дос-

ліджуються.

З виходу диференціального підсилювача сигнал, що реєструється, надходить на вхід

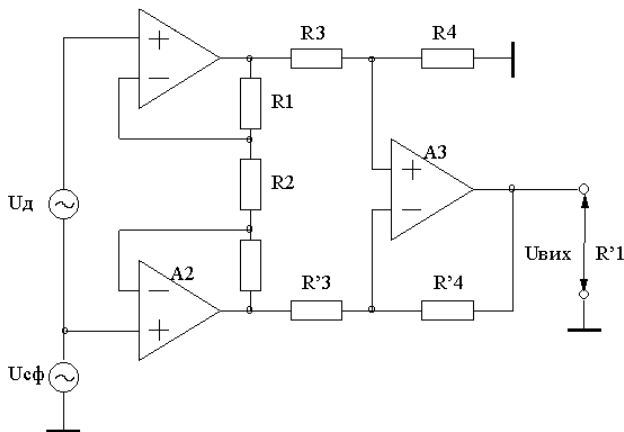


Рис. 5. Електрична схема диференційного вимірювального підсилювача

вузла гальванічної розв'язки. Функцією даного вузла є запобігання можливому виходу з ладу вузлів ПЕОМ та виключення збоїв електронної системи в цілому, викликаних специфічними особливостями промислової мережі живлення. Підсилювальний тракт визначає якість виділення основних сигналів датчика (серії датчиків) на фоні перешкод промислової частоти, а також похибку експерименту, пов'язану із шумами, температурною і довгостроковою нестабільністю окремих елементів тракту. Симетрування контуру датчик – лінія, пов'язаного з вихідним пристроєм, дає

зможу перетворювати сигнал перешкоди в синфазний і локалізувати його підсилювачем із диференціальним входом.

Диференціальний вимірювальний підсилювач складається з парафазного каскаду (A1, A2), що підсилює диференціальний сигнал датчика ( $U_d$ ) у  $K_n$  разів ( $K_n = (R1 + R1' + R2)/R2$ ), який передає синфазний сигнал перешкоди без посилення (підвищуючи відношення “сигнал / перешкода” на своєму виході). Ефективність локалізації сигналу-перешкоди при  $K_n = 1$  визначається точністю підбору резисторів  $R3 = R4$ . При збільшенні  $K_n$  підвищується вплив парафазного підсилювача стосовно зменшення синфазної складової сигналу. Парафазний підсилювач визначає якість підсилювального тракту в цілому і повинен відповідати таким вимогам:

- $R_{вх}$  повинно бути максимальним (виключається необхідність симетрування зовнішнього ланцюга з боку генератора синфазної перешкоди  $U_{сф}$ );
- значення коефіцієнта ослаблення синфазного сигналу максимальне;
- значення довгострокового і температурного дрейфів напруги і токи зсуву мінімальні.

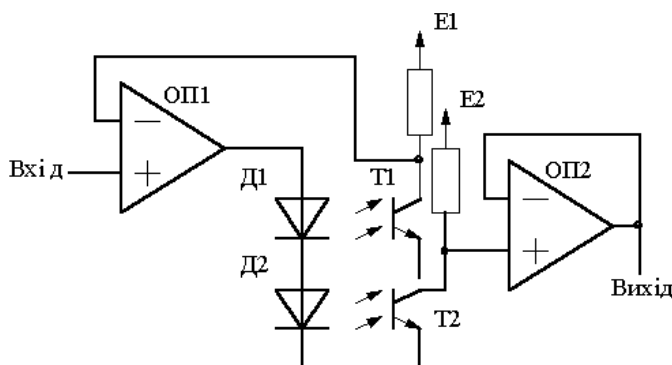


Рис. 6. Схема гальванічної розв'язки з диференціальними оптронами

Вихід диференціального підсилювача підключений до входу вузла гальванічної розв'язки, виконаний на здвоєному транзисторному оптроні (рис. 6).

На рис. 6 оптронна пара Д1–Т1 включена у зворотний зв'язок з операційним підсилювачем (ОП1), тому струм через світлодіод Д1 є таким, що колекторний струм фототранзистора Т1 компенсує дія вхідного сигналу. При цьому струм

колектора фототранзистора Т2, протікаючи у вхідному ланцюзі ОП2, створює на виході ОП2 напругу, яка дорівнює її вхідному значенню, при високоякісній ізоляції та ідентичності елементів оптронів, що досягається завдяки інтегральному виконанню. В конкретному випадку була використана двоканальна оптопара АОТ101АС, яка за своїми характеристиками повністю відповідає своєму функціональному призначенню у схемі. Оптопара



складається з випромінюючого і фотоприймального елементів, між якими існує оптичний зв'язок і забезпечена електрична ізоляція. Випромінювальний діод конструктивно розташований так, що велика частина світла спрямовується на базову область фототранзистора. Живлення вихідного ОП здійснюється від джерела живлення ПЕОМ. Це забезпечує захист від можливого виходу з ладу вузлів ПЕОМ і виключає появу збоїв, викликаних специфічними особливостями промислової мережі живлення. Проблема мінімізації впливу наведення електронних перешкод від системних модулів і власної цифрової частини пристрою вирішується на стадії конструкторського пророблення топології друкованої плати пристрою завдяки скороченню довжини сполучних ліній в аналоговій частині пристрою, поділу контуру аналогової і цифрової загальної шини (<землі>), а також завдяки просторовому поділу цифрової й аналогової частин пристрою. Тому модуль керування виконаний на окремій платі.

Керуючі сигнали з рівнобіжного порту надходять на вузол гальванічної розв'язки, виконаної на оптоелектронних інтегральних мікросхемах типу К293ЛП1А, призначених для використання як елементи гальванічної розв'язки вузлів і блоків і передачі логічних сигналів. В оптоелектронній інтегральній мікросхемі реалізований оптичний зв'язок між окремими вузлами або компонентами з метою ізоляції їх одне від одного (гальванічної розв'язки). У ній, крім випромінювача і фотоприймача, утримується елемент підсилення сигналу, одержуваного від фотоприймача.

Аналогові сигнали схеми попередньої обробки надходять на лінійний вхід звукової карти. Беручи до уваги той факт, що звукова карта забезпечує введення двох аналогових сигналів (режим стерео), описану структуру необхідно застосувати для двох каналів (датчики термопар зовні та всередині досліджуваної труби). Таким чином, кожний з модулів аналогового введення може обслуговувати до дванадцяти диференціальних сигналів, що реєструються (12 пар датчиків для вимірювання).

Для підвищення якості функціонування системи до складу структури блоку попередньої обробки включений вузол формувача каліброваної напруги. Для виявлення всіх нелінійностей блоку попередньої обробки, викликаних наявністю активних елементів (підсилювачі і елементи гальванічної розв'язки) та інших дестабілізуючих чинників, на входи підсилювачів з коефіцієнтом підсилення, що програмно задається, подаються явно відомі рівні аналогових сигналів, які надходять зі схеми формувача каліброваної напруги. Ці сигнали, пройшовши активний тракт модуля аналогового введення, зазнають тих же спотворень, що й сигнали, які реєструються. Це дає змогу визначити поправочні коефіцієнти для всього діапазону вхідних сигналів, після чого похибку перетворення аналогових сигналів у цифровий код можна значно знизити програмним способом.

Вузол введення / виведення дискретних керуючих сигналів призначений для введення сигналів початку і кінця реєстрації аналогових сигналів і виведення на зовнішні пристрої дискретних керуючих сигналів, наприклад, включення і вимкнення обладнання у разі виходу параметрів (сигналів, що реєструються) за межі заданого діапазону і видачі звукової і світлової сигналізації.

Динамічний діапазон забезпечує 12-розрядний вихід із точною апроксимацією в АЦП. Для біполярних входів (від  $-5$  до  $+5$  В) забезпечується 12-розрядний вихід зі знаковим розрядом.

Швидкодія АЦП становить 35 мкс (вибірка з частотою 28 кГц). Разом з часом вибірки і запису і часом очікування максимальна пропускна спроможність через шину в пам'ять 54 мкс на вибірку або 18 тисяч вибірок у секунду для одного каналу при випадковому або послідовному перегляді каналів. Робота АЦП контролюється через багатомодульний блок ISBX-311 програмною командою з базового вузла ISBC-311 (аналогові багатомодульні блоки обробки сигналів ISBC-311 і конвертації їх у цифрові – це представники зростаючого сімейства розширювальних блоків фірми Intel, розроблені з метою швидкого,

зручного і дешевого розширення каналів обробки даних для одноблочних комп'ютерів Intel). Необхідність введення контролю-керування АЦП з усіма периферійними пристроями, які увійшли до складу системи обробки і передачі інформації аналогового типу, обумовлювалась в отриманні точних і перевірених стандартним електронним обладнанням результатів експериментів із мінімальними апаратними похибками.

Висока якість електронних елементів, які використовуються в розробленому блоці, забезпечує 12-розрядний динамічний діапазон і дає похибку не вище за 0,035 % від номінальної величини сигналу. Вибором напруги зміщення досягається мінімальна похибка до 0,024 % від номінальної величини сигналу при температурі навколишнього середовища 18 – 30 °С.

## **5. Структура програмного забезпечення для обробки теплофізичних параметрів**

Програмне забезпечення (ПЗ), яке було розроблене для керування процесами реєстрації й обробки аналогових сигналів, отриманих у результаті проведення експериментів з визначення залишкових напружень та коефіцієнта теплопровідності ЗМКП, повинне забезпечувати функціонування всієї системи АЦП (з периферійними допоміжними пристроями) – ПЕОМ. ПЗ ініціює систему, регулює її роботу відповідно до задач щодо забезпечення процесу реєстрації та аналізу аналогових сигналів, фіксує заданий час проведеного експерименту і його коректне завершення. Керування процесом реєстрації проходить під впливом керуючої програми за командами із ПЕОМ або від об'єкта дослідження.

Розроблене ПЗ, що функціонує у складі системи реєстрації й аналізу аналогових сигналів на базі ПЕОМ, умовно можна поділити на дві частини, які складаються із:

1. ПЗ, яке реалізує алгоритми введення, стиснення і зберігання інформації, що реєструється, а також алгоритм проведення калібрування системи.

2. ПЗ, що реалізує алгоритми відображення на екрані дисплея інформації автоматичного аналізу, яка надходить, або інформації, що вводиться в реальному масштабі часу (якщо аналіз не потребує значних витрат часу і ресурсів комп'ютера, то він може бути виконаний в реальному масштабі часу).

## **6. Калібрування системи АЦП – ПЕОМ**

Оскільки у структурі системи реєстрації аналогових сигналів присутні елементи з нелінійною характеристикою, то інформація, яка реєструється, може бути значно спотворена, що в більшості випадків є неприйнятним. Схема формування каліброваної напруги та опору дає змогу виявити цю нелінійність і врахувати її при записуванні інформації. Для цього керуюча програма, подаючи явно відоме значення напруги та опору на вхід підсилювача, що програмується, прочитує перетворений сигнал і вираховує поправочні коефіцієнти.

Калібрування системи можна також виконувати після деякого часу роботи системи, щоб урахувати зміну характеристик елементів (смугу їх "прогрівання").

Введення в структуру системи реєстрації й аналізу аналогових сигналів на базі ПЕОМ блоку формувача каліброваної напруги значно знижує вимоги до якості елементної бази і до налаштування модулів системи.

Поправочні коефіцієнти можна враховувати безпосередньо при введенні інформації, а можна записувати в файл разом з інформацією, що реєструється, і проводити корекцію в післяекспериментальний час.

З метою зменшення часових витрат на калібрування системи реєстрації аналогових сигналів було використано паралельний інтерфейс типу CENTRONIKS (виробництва Швеції).

## 7. Результати роботи

Результати роботи наведені в табл. 1, 2. Значення залишкових напружень для відновленого колінчастого валу автомобіля ЗІЛ-162 склало 1,04 МПа, що на 7 % менше значення залишкових напружень у поверхневому шарі нового колінчастого валу (1,36 МПа). Результати чисельного експерименту по встановленню оптимальної товщини покриття (на діаметр корінної шийки) представлені на рис. 7.

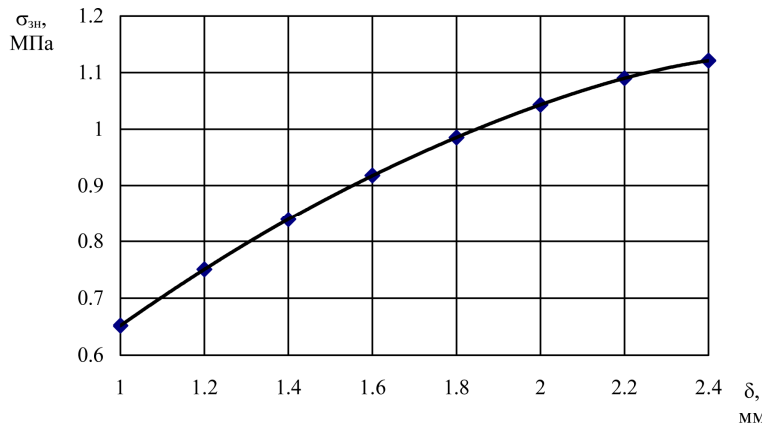


Рис. 7. Залежність значень залишкових напружень від товщини напиленого шару відновлювального покриття

Із рис. 7 видно, що крива значень залишкових напружень має постійно зростаючий вигляд. Для вибору оптимальної (мінімально допустимої) товщини покриття виберемо, згідно з нормативною документацією [9, 10], значення 2 мм. Це значення включає в себе адекватне узгодження мінімальної, але в той же час достатньої товщини відновлювального покриття (включаючи усі його функції – силу адгезійного та когезійного зчеплення,

пористість) із витратами напилуваного матеріалу (параметр КВМ – коефіцієнт використання матеріалу).

Таблиця 1. Технологічні параметри відновлювальної частини колінчастого валу та тензодатчика опору

Діаметр корінної шийки, мм			Одноосьовий тензодатчик опору (ГОСТ 21616-76) [9]			
зношеного колінчастого валу	напиленого колінчастого валу	відшліфованого колінчастого валу	марка	чутливість до деформацій, ум. од.	габарити, мм	
					гратка	підложка
64,12	66,12	66,00	КФ4П1-10-200-АГ-12	4,15	1,50 × 1,20	4,70 × 3,40

Таблиця 2. Результати вимірювання залишкових напружень у відновленому колінчастому валі

Модуль Юнга E, МПа	Коефіцієнт Пуассона $\mu$ , відн. од.	Значення опору тензодатчика		Значення залишкових напружень, МПа
		початкове $R_{п}$ , Ом	кінцеве $R_{к}$ , Ом	
120	0,22	410	384	1,36 (для нового колінчастого валу)
122	0,21		390	1,04 (для відновленого колінчастого валу)

## 8. Висновки

1. Встановлено мінімально допустиме значення товщини напиленого шару відновлювального покриття 2 мм на корінній шийці колінчастого валу.
  2. Значення залишкових напружень у системі "матеріал основи – відновлювальне покриття" відновленого колінчастого валу у порівнянні з новим зменшилося на 7 % в результаті компенсації напруженого стану у системі "матеріал основи-відновлювальне покриття".
- Випробування серії (14 шт.) відновлених колінчастих валів, які були встановлені на автомобілях ЗІЛ-160, розпочато в Черкаській області.
- Економічну доцільність від запропонованої технології щодо її можливого впровадження в ряді підприємств автори статті планують опублікувати в наступній науковій праці.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клименко В.П. Интеллектуализация разв'язання складних прикладних задач методами комп'ютерної алгебри / В.П. Клименко, О.Л. Ляхов. – К.: Логос, 2009. – 293 с.
2. Шрюдгер И. Обработка сигналов: цифровая обработка дискретизированных сигналов / Шрюдгер И.; пер. с нем. – К.: Лыбидь, 1995. – 320 с.
3. Цуканов И.Г. Структурные и компьютерные модели тепловых процессов в анизотропных средах с разрывными коэффициентами теплопроводности: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 04.12.06 / Цуканов И.Г. – Х., 1997. – 175 с.
4. Перевозчикова О.Л. Основы системного аналізу об'єктів і процесів комп'ютеризації / Перевозчикова О.Л. – К.: Вид. дім «КМ Академія», 2003. – 247 с.
5. Харламов Ю.А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ю.А. Харламов, Н.А. Будагянц. – Луганск: Изд-во Восточно-укр. национ. ун-та им. В. Даля, 2003. – 389 с.
6. Орлов В.И. Газотермическое напыление коррозионностойких и износостойких материалов / Орлов В.И. – Л.: ЛДНТП, 1986. – 142 с.
7. Процессы плазменного нанесения покрытий: теория и практика / [Ильюшенко А.Ф., Кундас С.П., Достанко А.П. и др.]. – Минск: Научный центр исследований политики и бизнеса "Арнита – Маркетинг, Менеджмент", 1999. – 544 с.
8. Рево С.Л. Исследование плотности дислокаций и энергии активации диффузионных процессов методом термо-ЭДС в многослойных материалах / С.Л. Рево, В.С. Копань, А.И. Майборода // Порошковая металлургия. – 1981. – № 4. – С. 61 – 65.
9. Голуб Н.В. Термоусталостное разрушение защитных покрытий в зависимости от физико-механических свойств системы покрытие-подложка / Н.В. Голуб // Труды науч.-практ. конф. – Минск: МПИ, 1990. – С. 24 – 29.
10. ГОСТ 21616-76 Тензорезисторный преобразователь модели КФ4П1-10-200-АГ-12. Техническая характеристика.

*Стаття надійшла до редакції 29.10.2013*