

Узунов О. В.

Ночніченко І. В.

Національний технічний
університет України
"Київський
політехнічний
інститут"

УДК 62-525:629.113

ДОСЛІДЖЕННЯ БІМЕТАЛЕВОГО ПРИВОДУ ГІДРАВЛІЧНОГО ДРОСЕЛЮ АМОРТИЗАТОРА ВІБРАЦІЙНИХ КОЛИВАНЬ

Работа посвящена определению статических характеристик биметаллического привода гидравлического дросселя. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить статические характеристики биметаллических приводов, изготовленных из нескольких типов материалов в разных комбинациях. Предложена функциональная схема биметаллического привода, которая детализирует процесс его работы. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая выбрать параметры биметаллического привода в зависимости от заданного диапазона изменения температуры и величины нагрузки. Приведенные результаты могут быть применены при разработке автоматически управляемых гидравлических дросселей амортизаторов для стабилизации их характеристик.

The aim is to determine the static characteristics of the bimetallic actuator of hydraulic throttle for given operating conditions. The experimental studies have established the static characteristics of bimetallic actuators made of different material types and their combinations. The functional scheme of the bimetallic actuator, which details the process of his work, was proposed. Obtained empirical relationship allows to choose the parameters of the bimetallic actuator according to a specified range of temperature and value of load. The results can be applied to the development of automatical controlled hydraulic throttles of the shock absorbers to stabilize their characteristics.

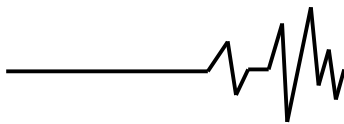
Актуальність

Для зменшення вібраційних навантажень, підвищення ресурсу, покращення функціональних характеристик, комфорту та безпеки автомобілів в їх ходовій частині використовують гідравлічні амортизатори. Однак характеристики амортизаторів суттєво залежать від дорожніх та температурних умов, зміни яких призводять до погіршення експлуатаційних властивостей автомобілів [1, 2, 3]. Одним з шляхів вдосконалення конструкції гідравлічного амортизатора є забезпечення його адаптації до змінних умов експлуатації [3].

Постановка проблеми

Вплив умов на роботу амортизатора є наслідком температурних змін властивості робочої рідини, яка використовується в його складі. Це суттєво змінює зусилля на штоку амортизатора [1, 4]. Для компенсації

температурного впливу використовують автоматичну корекцію витрати крізь дросель [2, 3, 4, 5, 6]. Одним з технічних рішень для автоматичного керування площею дроселів є використання біметалічних приводів [3, 7]. Такий привод складається з зафіксованих між собою пластин, які виготовлені з різних матеріалів. Різниця між коефіцієнтами температурного розширення пластин при зміні температури призводить до згинання приводу у бік пластини з матеріалу з меншим значенням коефіцієнта. При фіксації одного кінця приводу, переміщення другого – активного кінця використовують для регулювання дроселя (рис. 1). Відомо також, що найбільший вплив на характеристики гідравлічного амортизатора спостерігається в діапазоні температур 30...50°C [4]. При цьому експериментальним шляхом визначено, що для забезпечення потрібної стабільності



характеристик амортизатору ступінь регулювання дроселю, з врахуванням режиму роботи, становить для "відбою" 20 %, а для "стиснення" - 40 % [4].

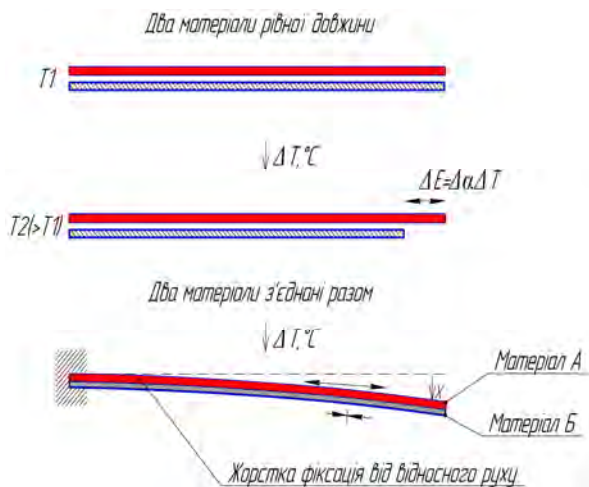


Рис. 1. Пояснення принципу дії біметалевого приводу

В той же час створення гідравлічного дроселю з біметалевим приводом потребує узгодження його характеристик з: робочою температурою та діапазоном її змін, характером залежності властивостей робочої рідини від температури, типом і характеристиками дроселю, розмірами робочої зони в конструкції гідравлічного амортизатора.

З інформаційних джерел визначено характер змін кінематичної в'язкості від температури. Ця залежність для багатьох мінеральних мастил у робочому температурному діапазоні (-30...+50)° С є лінійною [3]. З'ясовано також, що існуючі математичні залежності для визначення параметрів біметалевого приводу не враховують навантаження на нього [9]. Тому актуальною є потреба експериментального дослідження характеристик біметалевого приводу та визначення розрахункових математичних залежностей для його проектування.

Метою роботи є визначення статичних характеристик біметалевого приводу гідравлічного дроселю для заданих умов експлуатації.

Мета роботи

В роботі вирішувались наступні задачі:

- визначення умов функціонування біметалевого приводу у складі гідравлічного амортизатора;
- створення експериментальної установки та дослідження статичних характеристик біметалевих приводів;

- визначення математичної залежності для розрахунку параметрів біметалевого приводу, який працює в заданому температурному режимі під дією навантаження.

Результати досліджень

При створенні пристрою для автоматичної корекції потоку робочої рідини між порожнинами амортизатора використано плоский золотник з біметалевим приводом (рис. 2). Такий вибір враховує обмеження на габаритні розміри, що обумовлені конструкцією поршня амортизатора. Пристрій автоматичної корекції працює наступним чином. При зміні температури активний кінець біметалевого приводу повертається і, за допомогою жорстко закріпленого до нього плоского золотника 4, регулює витрату рідини через дросель. Це приводить до відновлення попереднього значення зусилля на штоку амортизатора.

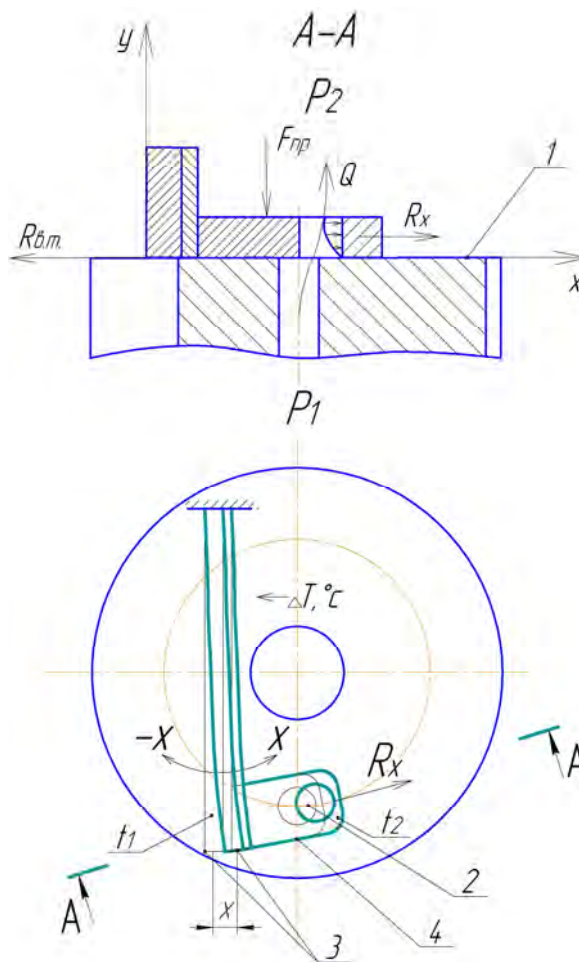
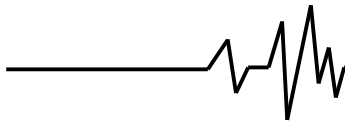


Рис. 2. Розрахункова схема дроселя з біметалевим приводом: 1 – поршень амортизатора; 2 – гідравлічний дросель; 3 – біметалевий привод; 4 – плоский золотник

**Визначення сил навантаження на біметалевий привод**

На основі аналізу встановлено, що для вибору параметрів біметалевого приводу необхідно враховувати гідродинамічну силу R_x та силу тертя, які виникають на плоскому золотнику. При цьому при врахуванні сил тертя можна обмежитись лише складовою контактної тертя не враховуючи тертя в'язке у зв'язку з тим, що швидкість руху плоского золотника є малою.

Силою, що притискує плоский золотник перепадом тиску на поршні, також можна знехтувати. Це обумовлено зміною знаку цієї сили при зміні напрямку руху поршня.

Величина гідродинамічної сили визначається за формулою [6]:

$$R_x = \frac{\gamma \cdot f_{op} \cdot v \cdot Q}{g \cdot f_0},$$

де γ – об'ємна вага робочої рідини, Q – витрата робочої рідини крізь дроселі, f_{op} – загальна площа робочих дроселів відповідно до режиму роботи амортизатора, v – швидкість руху рідини через дроселі, g – прискорення вільного падіння, f_0 – стиснений перетин робочої рідини. При цьому витрата Q робочої рідини крізь дроселі визначається для заданої частоти та амплітуди коливань штоку амортизатору.

Сила контактної тертя $R_{кт}$ визначається за формулою [8]

$$R_{кт} = K \cdot S \cdot F_{np} \cdot f_m,$$

де K – коефіцієнт, який характеризує точність виготовлення пари тертя і значення якого приймається в межах $K = 0.15 \dots 0.3$, S – площа контактної поверхні, F_{np} – сила від дії пружини, $f_m = 0.05$ – коефіцієнт тертя.

Для розрахунку навантаження на біметалевий привод вибирається максимальне значення сумарної сили з врахуванням режиму роботи амортизатора і вибраного коефіцієнту запасу K_3

$$R_{m \max} = K_3 \cdot (R_{zd} + R_{кт}).$$

Встановлена величина сили навантаження визначає вимоги до характеристик біметалевого приводу.

Дослідження статичних характеристик біметалевого приводу

Для дослідження характеристик приводу, розроблено блок-схему та виготовлено експериментальну установку (рис. 3, 4). Установка складається з інформаційного та

керуючого блоків, що поєднані в модуль 1, який забезпечує можливість регулювання в заданому діапазоні та автоматичну підтримку встановленої температури. При цьому похибка становить $\Delta = 0.1$ °С. До модуля входять: термopapa «Oвен 2TPM1», що керує нагрівачем 4 та датчик вимірювання температури 3. Установка забезпечує можливість встановлення температури від $-50 \dots +200$ °С. Для вимірювання температури застосовано датчик типу ТСМ – 1388 з похибкою вимірювань 0.25 %. Період опитування входу становив 0.1 сек. Для фіксування приводного елемента 5 використовувалась штатив 6.

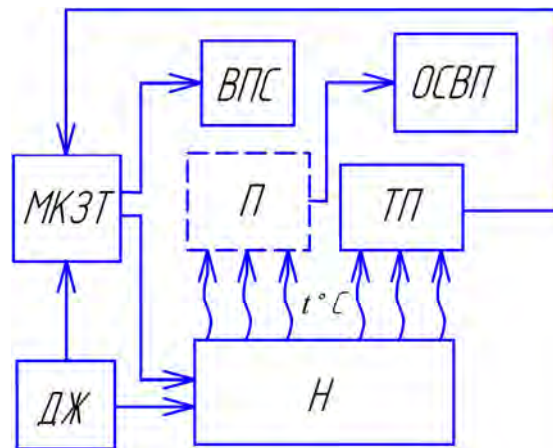


Рис. 3. Блок-схема експериментальної установки: ДЖ – джерело живлення; МКЗТ – модуль контролю та завдання температури; ВПС – внутрішнє освітлення стенду; ТП – термopapa; Н – нагрівач; П – біметалевий привод; ОСВП – оптична система вимірювання переміщень

Для вимірювання переміщення активного кінця біметалевого приводу в експериментальній установці було застосовано оптичний метод (рис. 5). Метод забезпечив потрібну точність, при цьому відносна похибка не перевищувала 0.2 %. Система вимірювань складалась з лазера 2, дзеркала 3, лінійки 4. Працює система наступним чином. Промінь від лазера 2 спрямовано під кутом на дзеркало, що закріплено перпендикулярно до активного кінця приводу 1. Віддзеркалений промінь контролювався на площині, що розташована на заданій відстані від дзеркала. Переміщення активного кінця приводу розраховувалось по залежності:

$$X = \frac{X_1 \cdot l}{l_1},$$

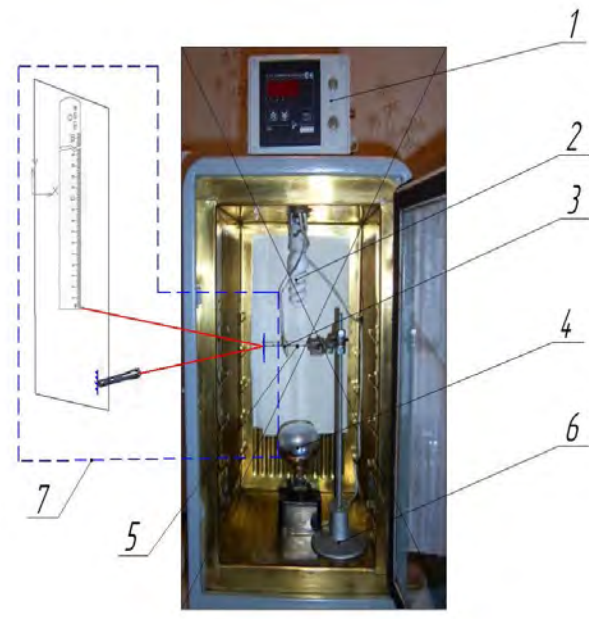
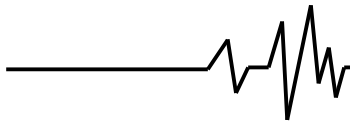


Рис. 4. Загальний вигляд експериментальної установки:
1 – модуль контролю та завдання температури; 2 – внутрішня підсвітка стенду; 3 – термопара; 4 – нагрівач; 5 – біметалевий привід; 6 – штатив; 7 – оптична система вимірювання переміщень

де, X_1 – відхилення зайчику, l_1 – відстань від дзеркала до координати вимірювання, l – довжина зразка біметалевого приводу.

Визначення статичних характеристик біметалевого приводу виконувалось за методикою: обирався масштаб вимірювання, задавалось потрібне навантаження біметалевого приводу, встановлювалася потрібна температура з вибраного діапазону 30...50°C, контролювалось переміщення зайчику по відношенню до нульової відмітки. Проведено планування експериментів. Кожний експеримент повторювався декілька разів, максимальні та мінімальні значення результату не враховувались, за значеннями які залишались розраховувались середні, які були використані при побудові графіків.

В результаті досліджень встановлено залежність величини переміщення активного кінця біметалевого приводу від температури та заданих навантажень. Експериментальні залежності отримані для приводів з декількох типів матеріалів, які вибирались з умови забезпечення найбільшого переміщення.

Отримані результати свідчать про лінійність характеристик біметалевого приводу та дають кількісні співвідношення впливу навантаження на величину переміщення активного кінця біметалевого приводу при зміні температури в заданому діапазоні (рис. 6). Встановлена також залежність переміщення активного кінця біметалевого приводу від сили навантаження (початкова температура $t=30^\circ\text{C}$, кінцева температура $t=50^\circ\text{C}$) для приводів з матеріалів: тантал + берилієва бронза, інвар + берилієва бронза, тантал + латунь (рис. 7).

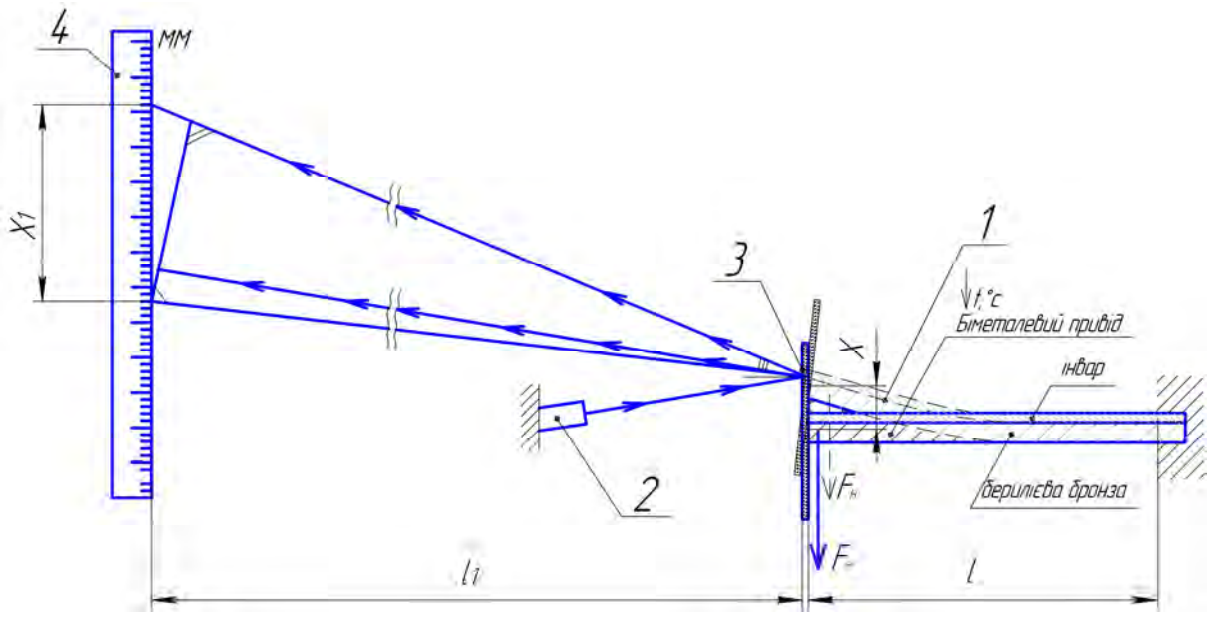


Рис. 5. Схема вимірювань переміщення активного кінця біметалевого приводу

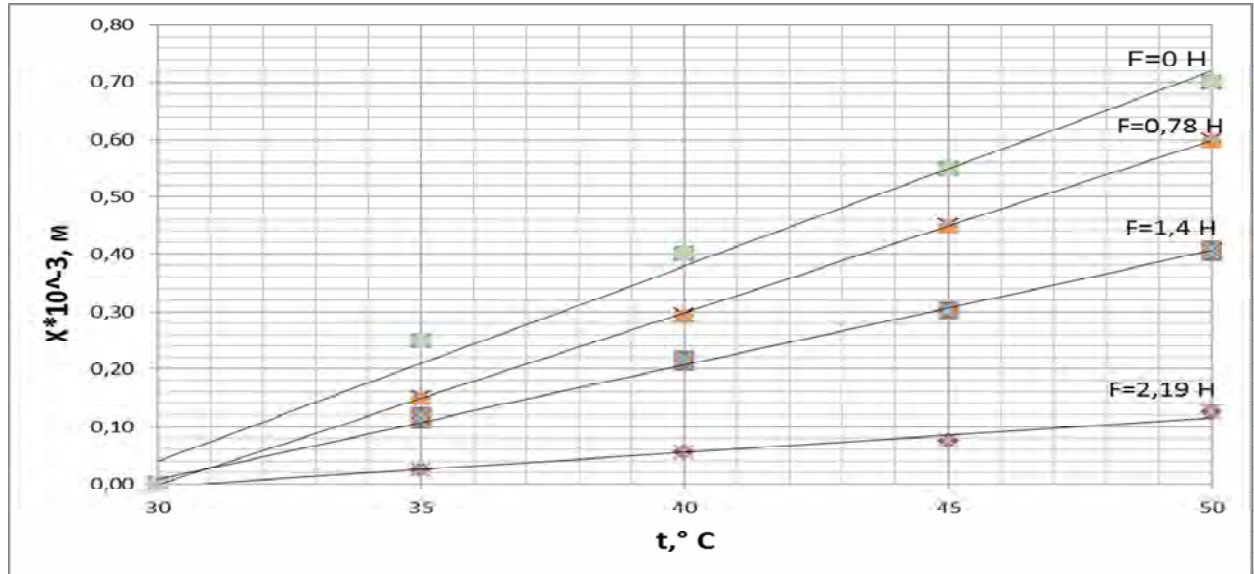
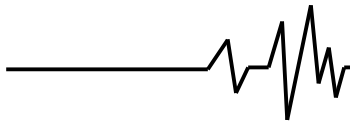


Рис. 6. Експериментальні данні та апроксимація залежності переміщення біметалевого приводу від температури при заданих значеннях навантаження для поєднання матеріалів інвар + берилієва бронза

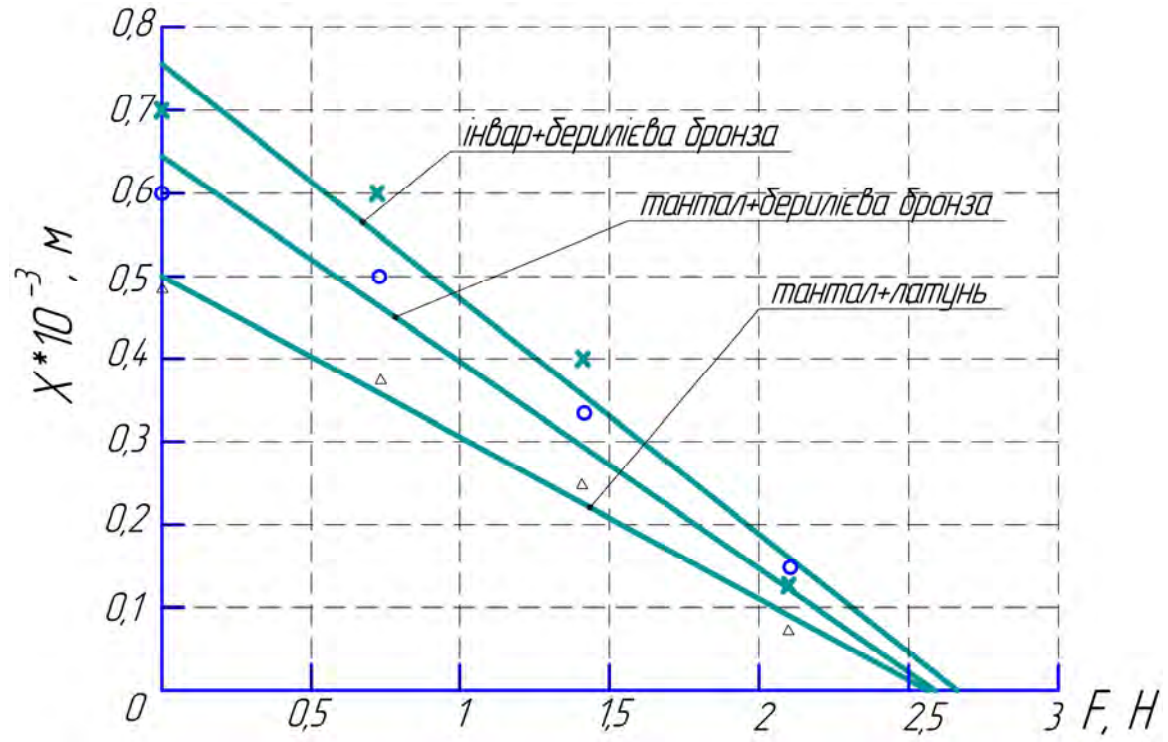
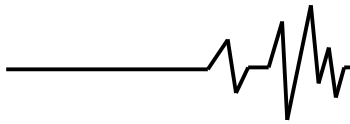


Рис. 7. Експериментальні данні та апроксимація залежності переміщення активного кінця біметалевого приводу від сил навантаження (розміри пластин: - 40*4,3 мм, товщина пластин з інвару та танталу - 0,14 мм, берилієвої бронзи та латуні - 0,3 мм)

Відзначено, що вплив навантаження на переміщення активного кінця біметалевого приводу суттєво залежить від типів застосованих матеріалів і що найбільше переміщення забезпечує привід, виготовлений

з матеріалів інвар + берилієва бронза. Це обумовлено більшим значенням співвідношення коефіцієнтів лінійного розширення вказаних матеріалів.



В результаті аналізу експериментальних даних та принципу дії біметалевого приводу вдалося деталізувати процес його функціонування (рис. 8). Цей процес є наступним. Вхідним сигналом є зміна температури оточуючого середовища ΔT . Біметалевий привод сприймає зміну температури своєю поверхнею, що відповідає одиничній ширині, при цьому виникає температурне напруження в матеріалах $\Delta\sigma_{темн.}$. Теплове напруження $\Delta\sigma_{темн.}$ призводить до виникнення різниці теплових напружень $\Delta\sigma_{рез.}$ на границях контакту пластин і її перетворенню у різницю у зміні лінійних розмірів ΔE пластин приводу одиничної ширини. Різниця в лінійних розмірах з'єднаних пластин одиничної ширини призводить до їх сумісного згинання, величина якого залежить від товщини $h_{1,2}$, модуля Юнга $E_{1,2}$, коефіцієнта теплового розширення матеріалів $\alpha_{1,2}$. При цьому зміна лінійних розмірів ΔE перетворюється у механічний рух активного кінця приводу з забезпеченням можливості виконання роботи силою, яку розвиває привід одиничної ширини.

Далі відбувається підсилення, що забезпечується за рахунок дійсної ширини приводу, яка складається з n – одиничних ширин і відповідно більшої поверхні сприйняття зміни температури ΔT . Згинання пластин біметалевого приводу за рахунок різної зміни їх лінійних розмірів з врахуванням підсилення забезпечує виконання механічної роботи, при цьому привід долає силу навантаження F . В результаті переміщення активного кінця приводу в пластинах з'являються протидіючі внутрішні напруження $\Delta\sigma_{внутр.}$. Ці напруження

$\Delta\sigma_{внутр.}$ через зворотній зв'язок взаємодіють з температурним напруженням $\Delta\sigma_{темн.}$ в наслідок чого формується результуючий сигнал $\Delta\sigma_{рез.}$. Повна компенсація $\Delta\sigma_{темн.}$ призводить до зменшення $\Delta\sigma_{рез.}$ до 0, що відповідає зупинці активного кінця приводу в положенні, яке є пропорційним зміні вхідної температури.

Визначення математичних залежностей для розрахунку параметрів біметалевого приводу

Для визначення параметрів біметалевого приводу, який забезпечує потрібну величину переміщення плоского золотника в заданому температурному діапазоні з врахуванням навантаження запропонована емпірична математична залежність. В її основу покладена відома залежність (1), яка дозволяє розрахувати переміщення активного кінця біметалевого приводу при відсутності навантаження [9]:

$$X = R \left[1 - \cos\left(180 \cdot \frac{L}{\pi \cdot R}\right) \right], \quad (1)$$

де L – довжина зразка біметалевого приводу, R – величина, що визначається за формулою (2)

$$R = \frac{(E_1)^2 \cdot (h_1)^4 + 4 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (h_1)^3 \cdot h_2}{6 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (h_1 + h_2) \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T} + \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot (h_1)^2 \cdot (h_2)^2}{E_1 \cdot E_2 \cdot (h_1 + h_2) \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T} + \frac{4 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (h_2)^3 \cdot h_1 + (E_2)^2 \cdot (h_2)^4}{6 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (h_1 + h_2) \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T} \quad (2)$$

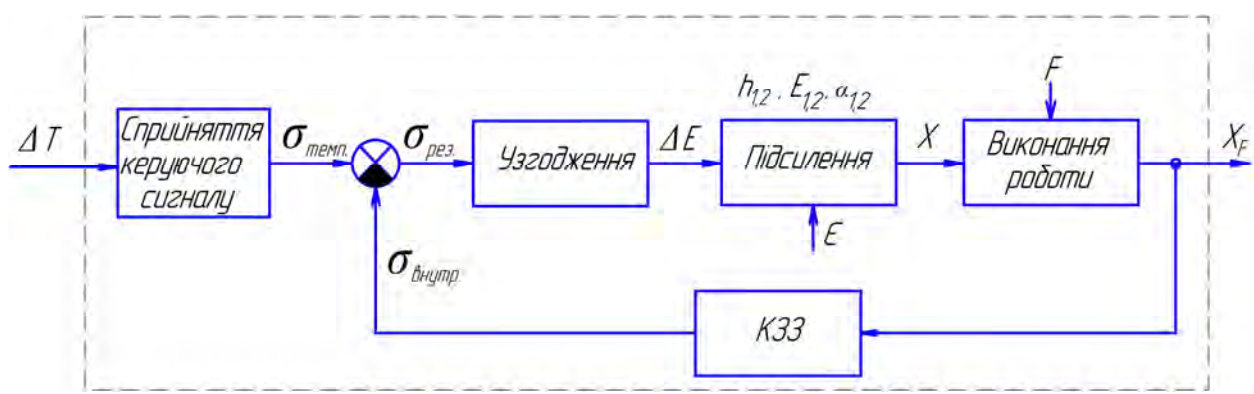
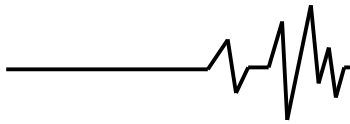


Рис. 8. Функціональна схема біметалевого приводу



де $E_{1,2}$ – модуль Юнга матеріалу (індекси «1» і «2» відповідають матеріалам «першого» і «другого» шару біметалевого приводу); $h_{1,2}$ – товщина шару пластини з відповідного матеріалу; $\alpha_{1,2}$ – температурний коефіцієнт теплового розширення шару пластини з відповідного матеріалу; ΔT – різниця між температурами до і після нагріву біметалевого приводу.

Далі на основі аналізу процесу функціонування (рис.8), залежності (1) та результатів експериментальних досліджень (рис.7) визначено залежність для розрахунку переміщення активного кінця біметалевого приводу при заданому навантаженні. Для постійного значення модуля Юнга залежність має вигляд:

$$X_F = R \left[1 - \cos\left(180 \cdot \frac{L}{\pi \cdot R}\right) \right] - \frac{1}{F^*} \times \times R \left[1 - \cos\left(180 \cdot \frac{L}{\pi \cdot R}\right) \right] \cdot \frac{F \cdot L}{h_{nl} \cdot h_m}, \quad (3)$$

де F – задана величина навантаження, h_{nl} – ширина біметалевого приводу, h_m – товщина

біметалевого приводу, F^* – питома сила, що розвивається зразком біметалевого приводу (сила, що розвивається біметалевим приводом одиничної ширини, одиничної товщини, та одиничної довжини), яка розраховується на основі експериментальних даних за формулою

$$F^* = \frac{F_{\max} \cdot L_0}{h_0 \cdot h_{m0}}, \quad \text{де } F_{\max} - \text{максимальна сила}$$

навантаження при якому активний кінець приводу при заданому перепаді температур вже не переміщується, L_0, h_0, h_{m0} – довжина, ширина та товщина відповідного зразка біметалевого приводу. Залежність (3) отримана при співвідношенні товщин поєднаних пластин $h^1_{m0} = (1/2) \cdot h^{11}_{m0}$, де h^1_{m0}, h^{11}_{m0} товщина пластин виготовлених відповідно з матеріалів з більшим та меншим коефіцієнтом лінійного теплового розширення. Експериментально встановлено, що при зміні температури від 30°C до 50°C питома сила для біметалевих приводів з матеріалів: інвар + берилієва бронза, тантал + берилієва бронза, тантал + латунь, що виготовлені з вказаним співвідношенням товщин пластин, становить $F^* = 50 \dots 60$ Н/м.

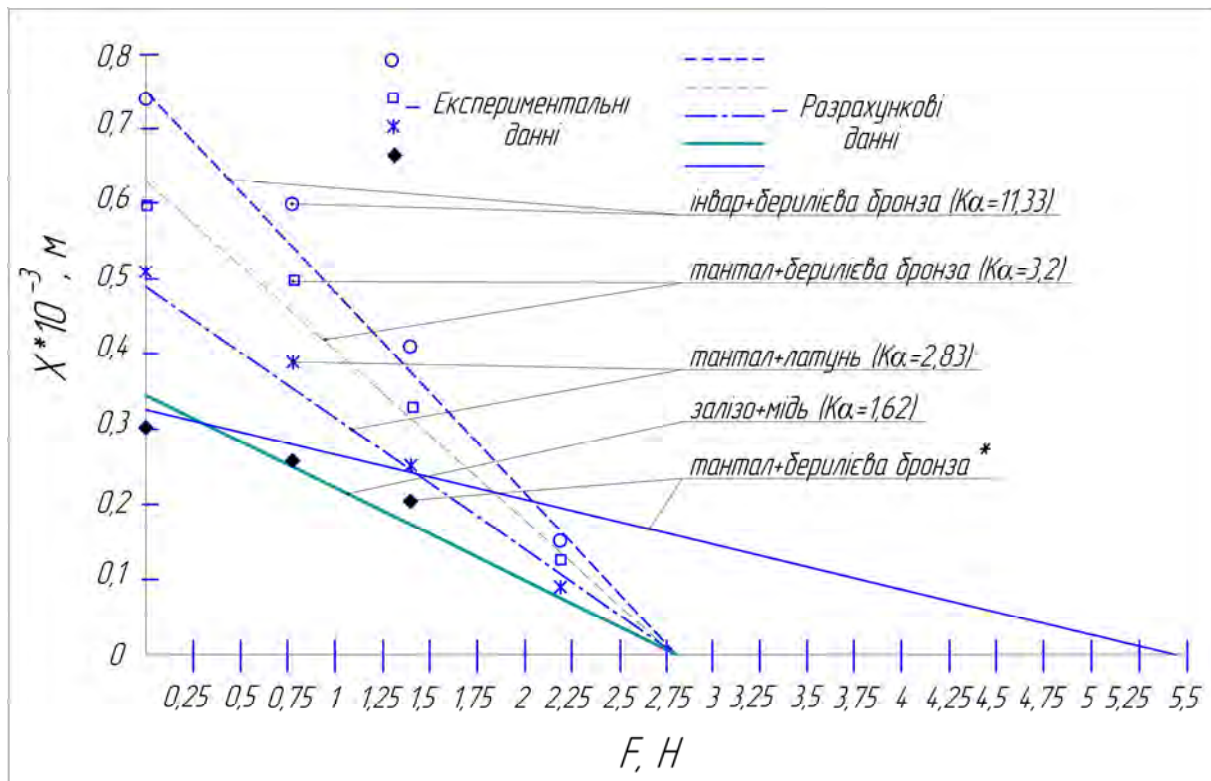
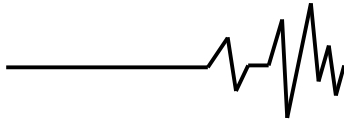


Рис. 9. Порівняння розрахункових та експериментальними даних для залежностей переміщення активного кінця біметалевого приводу від сил навантаження



Коректність застосування математичної залежності (3) для проектування біметалевого приводу підтверджена шляхом співставлення результатів розрахунку з експериментальними даними. Порівняння виконано для змін температури від 30 до 50°C. Відзначено, що експериментальні характеристики приводів, які виготовлені з матеріалів: інвар + берилієва бронза, тантал + берилієва бронза, тантал + латунь співпадають з результатами розрахунків з задовільною точністю (рис.9). Виконано також порівняння вказаних експериментальних характеристик з розрахованими характеристиками для приводу з матеріалів залізо + мідь. При цьому отримана характеристика розташувалась на графіках відповідно до значення коефіцієнту $K\alpha$ (рис.9), що підтверджує коректність розрахункової залежності (3). Проведено також порівняння результатів розрахунку приводу, який було виготовлено з матеріалів тантал + берилієва бронза з збільшенням в два рази товщини пластин. При цьому отримано задовільне співпадіння з результатами експериментів (рис.9).

Висновки

1. Отримані для заданого діапазону змін температури статичні характеристики біметалевого приводу показують кількісну залежність величини переміщення активного кінця приводу від типів використаних матеріалів, варіантів їх поєднань та навантаження.
2. Запропонована структурна схема дії біметалевого приводу, що представляє його функціонування як процес в автоматичній системі, яка реагує на зміну оточуючої температури і живиться зовнішньою тепловою енергією, пояснює механізм позиціонування активного кінця приводу з врахуванням зовнішнього навантаження.
3. Отримана математична залежність дозволяє вибрати параметри біметалевого приводу в залежності від діапазону змін температур і навантаження та забезпечити потрібну ступінь регулювання дроселів для стабілізації характеристик гідравлічного амортизатора.

Література

1. Узунов А. В. Эксплуатационные изменения динамических характеристик гидравлических демпфирующих устройств. / В. Л. Чадова, А. А. Балагугин А. В. Узунов // Промислова гідравліка і пневматика Всеукраїнський науково-технічний вісник. – Вінниця. – 2005. – № 4 (10). – С. 83-88.
2. Дербаремдикер А. Д. Амортизаторы транспортных машин. А. Д. Дербаремдикер – М.: Машиностроение, 1985. – 199 с.
3. Болштянский, А. П. Гидравлический тракт переменного сопротивления в устройствах амортизаторов / П. Д. Балакин., А. П. Болштянский // Омский научный вестник. – Омск. – 2007. – № 3 (60). – С. 44-45.
4. Узунов О. В. Вплив температурних змін характеристик дроселів на роботу гідравлічного амортизатора, / І. В. Ночніченко, О. С. Галецький, О. В. Узунов // Вісник НТУ "КПІ". – Київ. – 2009. – № 57. – С. 157-163.
5. Пат. 90180 Україна, МПК F 16 F 5/00, F 16 F 9/34 Клапанно-дросельний вузол амортизатора. Патент на винахід / Узунов О. С., Ночніченко І. В., Галецький О. С.; заявник і патентовласник Механіко-машинобудівний інститут НТУУ "КПІ" заявл. 14.05.2008 ; опубл. 12.04.2010. Бюл. № 7.
6. Радин С. Ю. Влияние изменения сопротивления дросселей на демпфирующие свойства гидромеханических амортизаторов транспортных средств: автореф. дис. на получение науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.02 "Машиноведение, системы приводов и детали машин"/ С. Ю. Радин. — Орел, 2009. — 17с.
7. Пат. 2313013 Российская Федерация, МПК F 16 F 5/00, F 16 F 9/48, B 60 G 11/26. Гидравлический амортизатор / Калинин С. Н.; заявитель и патентообладатель Калинин С. Н. – № 2006108281/11 ; заявл. 16.03.06 ; опубл. 20.12.07.
8. Лещенко В. А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением/ В. А. Лещенко. - Москва. : Машиностроение, 1975. - 288с.
9. Clyne, TW. "Residual stresses in surface coatings and their effects on interfacial debonding." Key Engineering Materials (Switzerland). Vol. 116-117, pp. 307-330. 1996.