

ЛЕКЦІЯ 5. ПРИНЦИПИ І МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

План лекції:

1. Вимірювання зусиль, напружень та крутних моментів.
2. Вимірювання лінійних і кутових переміщень.
3. Вимірювання лінійних та кутових швидкостей і прискорень.

5.1 Вимірювання зусиль, напружень та крутних моментів

Для отримання точної інформації про механічні параметри металургійного обладнання необхідна достовірна оцінка його роботи в умовах експлуатації. Визначення цих параметрів може бути проведено і розрахунковим шляхом, однак найбільш достовірними слід вважати дані, отримані експериментально на натурних зразках машин, бо при розрахунках неможливо врахувати все різноманіття факторів, що впливають на точність, а, отже, достовірність кінцевого результату.

Достовірне знання механічних параметрів обладнання дозволяє уявити картину його роботи, виявити його резерви, правильно вибрати режим роботи і навантаження, прогнозувати терміни служби і час можливих поломок.

Для визначення та оцінки механічних властивостей металургійного обладнання сьогодні використовується спеціальна апаратура, яка працює з високою точністю.

Нижче розглянуті принципи і методи експериментального визначення механічних параметрів металургійного обладнання.

Для вимірювання зусиль і напружень використовують електротензометричний метод, який дає можливість реєструвати зазначені параметри у часі, що дуже важливо при дослідженні динамічних процесів. Сутність даного методу описана в попередньому розділі.

У тих випадках, коли тензодатчики неможливо або важко наклеїти безпосередньо на деталь (канат, гвинт, деталі складної конфігурації), або деформація деталі, яку досліджують, мала та необхідно збільшити напруження, вживають спеціальні силівимірювачі. На рис. 5.1 показано спеціальний силівимірювач, призначений для випробування зусиль при розтягненні.

Робочі тензодатчики 1, наклеєні на розтягнуту тонкостінну сталеву трубку 2, компенсаційні датчики 3 – на ненавантажені пластини 4. Кульові шарніри 5 попереджують вигин та скручування трубки, в наслідок чого вона отримує чисті напруження розтягнення. Трубка кріпиться за допомогою гвинтів. Такі силівимірювачі використовуються для вимірювань невеликих зусиль ($1 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^3 \text{ Н}$). Для вимірювань більш значних зусиль пружний елемент силівимірювача використовують у вигляді стержня із фланцями під кріплення кулькових шарнірів. Зусилля стиску досліджують силівимірювачами – мездозами, виконаних у вигляді стаканів, циліндрів і мембран, на поверхні яких наклеюють тензодатчики.

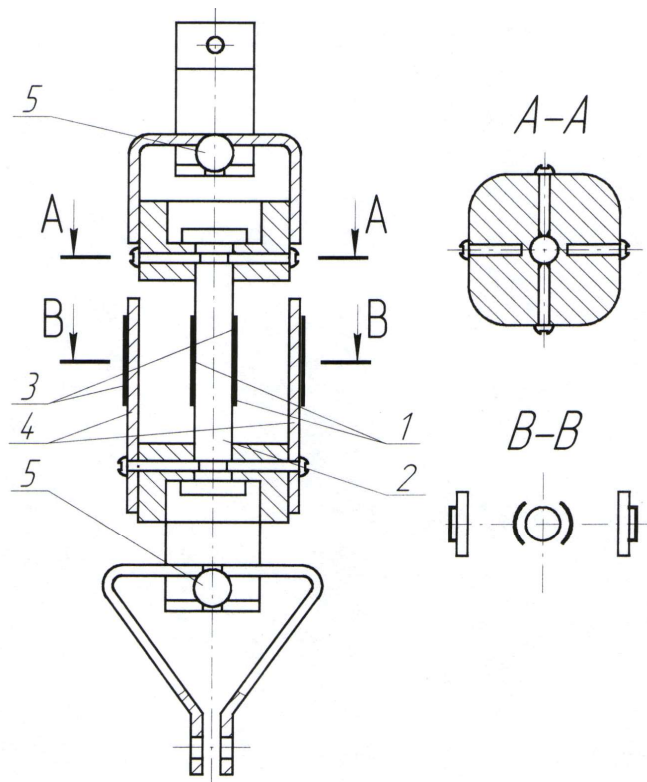


Рисунок 5.1 – Силівимірвач для дослідження зусиль при розтягненні

У мездозі мембранного типу (рис.5.2) два робочих датчика 1, наклеєно на внутрішню поверхню мембрани 2, виконаної за одне ціле з корпусом 3. Знизу мездоза зачинена кришкою 4. Компенсаційні датчики 5 наклеєні на не навантажену пластину 6, розміщену у корпусі мездози. Сферичні укладки 7 забезпечують центральне навантаження до мездози.

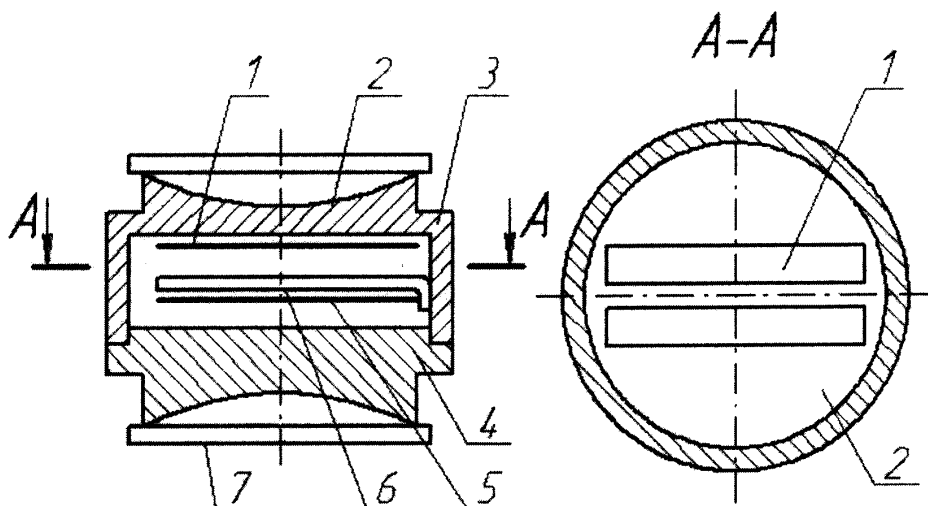


Рисунок 5.2 – Мездоза для дослідження зусиль

Для вимірювань крутних моментів на валах деталей дуже часто використовують принцип дротяної тензометрії, заснований на вимірюванні деформації вала, що передає крутний момент.

Відомо, що при передачі валом крутного моменту, найбільше нормальне напруження виникає в його перерізі, розташованому під кутом 45° до поздовжньої осі [14]. Найбільші деформації матеріалу будуть виникати на його

поверхні і також розташовані щодо його осі під кутом 45° . Тому для використання максимальних деформацій дротові датчики також наклеюють на вал під кутом 45° до його осі. При вимірюванні крутних моментів за допомогою дротяних перетворювачів останні з'єднують так, щоб утворився рівноплечовий міст. Міст може бути складений з двох або чотирьох робочих датчиків (рис.5.1 а, в). Схема розміщення тензодатчиків на валу показана на рис.5.3.

Для точного наклеювання тензодатчиків на вал по осям найбільших деформацій використовують трафарети з паперу або картону, котрі наклеюють на підготовлену поверхню.

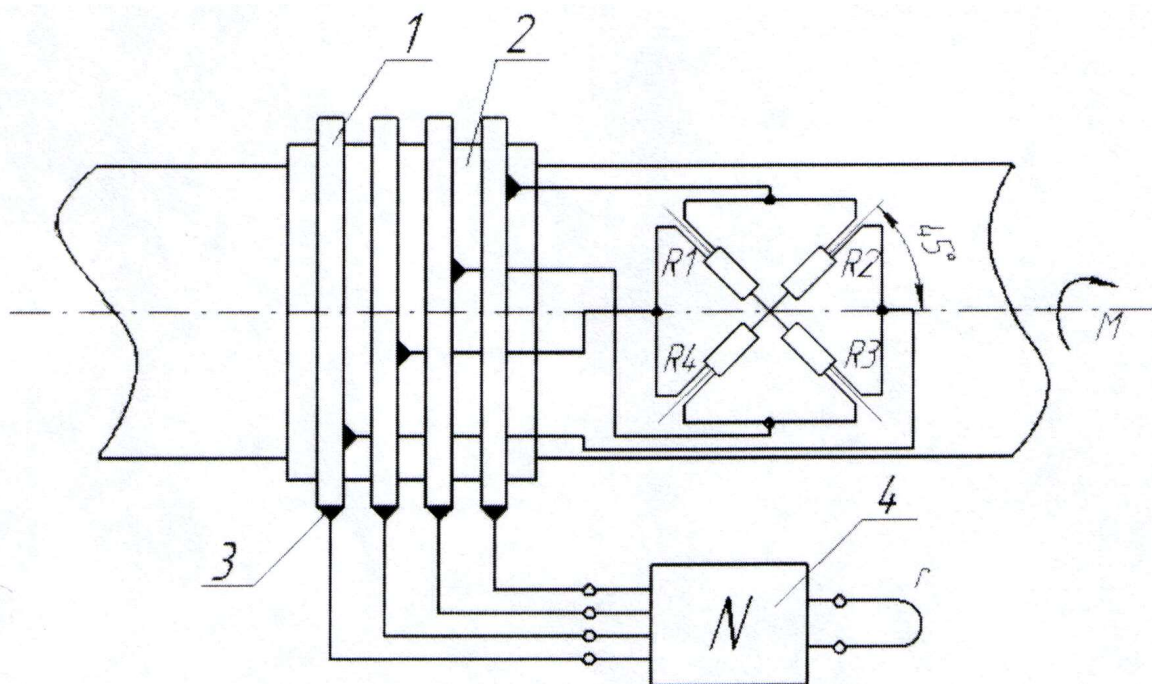


Рисунок 5.3 - Схема розташування тензодатчиків на валу: 1 – струмоз'ємні кільця; 2 – ізолююча втулка; 3 – контактні щітки; 4 – тензопідсилювач

З'єднання дротяних датчиків, наклеєних на досліджуваному валу, з підсилювачем і реєструючим приладом здійснюють за допомогою струмознімальних пристроїв. Вони бувають двох типів: контактного і безконтактного.

Струмознімальний пристрій контактного типу являє собою ізолятор, на якому закріплюються латунні кільця. Кільця знаходяться в контакті зі щіткою, нерухомо закріпленою на обертовому валі на будь-яких основах. В місці контакту щітки і кільця можуть виникати змінні у часі перехідні контактні опори, які повинні бути значно менше найменших змін опору датчика. Ці опори залежать від матеріалів кільця і щітки, від величини контактних напружень, від термо ЕРС, що виникає за рахунок тепла тертя, від зміни омичного опору ізоляції між кільцями, від швидкості ковзання та інших факторів. Це небажане явище можна в значній мірі зменшувати застосуванням спеціальної схеми, хоча в цьому випадку ускладнюється сама конструкція струмоз'ємного пристрою (додається ще одне кільце і щітки).

Безконтактне струмознімання може здійснюватись за допомогою,

наприклад, трансформаторів, що обертаються або обертового радіо-передавального пристрою. У першому випадку два трансформатора розміщуються на валу струмоз'ємника, причому, перший трансформатор є живильним, а другий - вимірювальним. На випробуваний вал наклеюють чотири тензодатчики, які утворюють повний міст і обертаються разом з валом. До відповідних діагоналей моста підключають вторинні обмотки трансформаторів. Первинні обмотки розташовуються з невеликим зазором щодо вторинних і знаходяться в нерухомому стані. Виходи первинних обмоток підключають до тензоапаратури. Від генератора несучої частоти на вхід тензомоста за допомогою першого трансформатора подається напруження живлення. Напруження розбалансу, викликаних вимірюваною деформацією і виходу тензомоста за допомогою другого трансформатора подають на вхід тензопідсилювача.

Для встановлення взаємного впливу трансформаторів (вони розташовані в безпосередній близькості) їх ретельно екранують, розміщуючи в окремі кожухи зі сталі. Для збільшення зв'язку між первинною і вторинною обмотками зазор між ними роблять мінімальним (2-3 мм) [14].

Для вимірювання чисто динамічних деформацій використовують безконтактні струмозійомники з обертовими радіопередавальними пристроями [33].

Напруження у деталях машин і механізмів знаходять за допомогою виміру деформацій, залежність між якими визначається законами Гука. При цьому в області пружних деформацій напруження σ та лінійні деформації ε зв'язані залежністю :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (5.1)$$

де E - модуль пружності (модуль Юнга).

З врахуванням чутливості тензодатчика, сприймаючого разом з деталлю деформацію, вираз (5.1) буде мати вигляд :

$$\sigma = E \frac{\Delta R/R}{K_0}, \quad (5.2)$$

де ΔR - прирощення опору тензодатчика внаслідок деформації деталі;

R - опір тензодатчика;

$$K_0 = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} - \text{чутливість тензодатчика до продольної деформації.}$$

Таким чином, вимірюючи відносний опір $\Delta R/R$ тензодатчиків, викликаний деформацією, за виразом (5.2) розраховують напруження при одноосьовому напруженому стані.

При плоскому двохосьовому напруженому стані, коли відомим є напрям головних напружень, для визначення напружень в даній точці використовують два тензодатчики (рис.5.4, а).

Наклеївши один робочий датчик у напрямі головної деформації ε_1 , а

другий – у напрямі головної деформації ε_2 і вимірюючи їх значення, знаходять головні напруження по відомим з теорії пружних деформацій формулам:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2); \quad \sigma_2 = \frac{\varepsilon}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2),$$

де ν - коефіцієнт Пуассона.

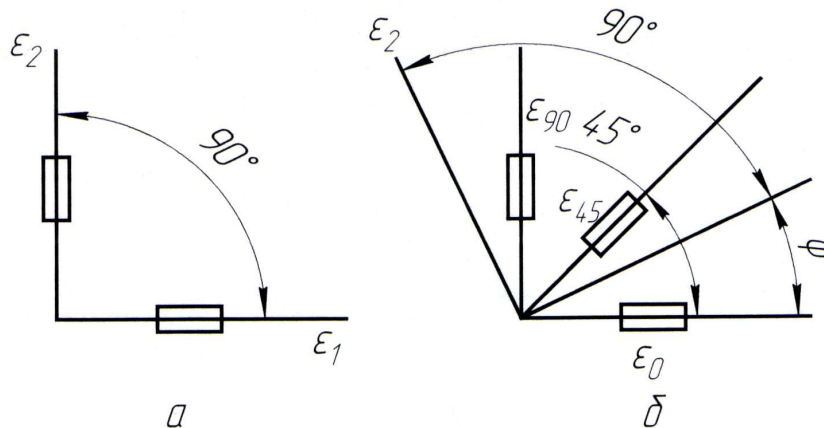


Рис. 5.4– Розташування тензодатчиків при вимірі деформацій в випадку плоско-напруженого стану: а – напрямки головних деформацій відомий; б – невідомий

Якщо напрямки головних деформацій невідомі, то для визначення напружень в даній точці деталі використовують схему наклейки, що показана на рис.1.6, б (прямокутна розетка). Головні деформації ε_1 та ε_2 розраховують на основі замірних деформацій ε_0 , ε_{45} , ε_{90} по формулам :

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2};$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_{90}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(\varepsilon_0 - \varepsilon_{45})^2 + (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{90})^2},$$

а напрямки головних деформацій визначаються кутом ϕ згідно з формулою

$$\operatorname{tg} 2\phi = \frac{2 \cdot \varepsilon_{45} - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{90})}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{90}}.$$

5.2 Вимірювання лінійних і кутових переміщень

При дослідженні роботи металургійних машин і механізмів часто виникає необхідність в отриманні функціональної залежності досліджуваного параметра від зусилля або напруження в будь-якій деталі від здійснюваних нею лінійних переміщень. Зустрічаються випадки, коли потрібно визначити залежність переміщень досліджуваних деталей від часу.

Величини переміщень, здійснюваних досліджуваними деталями, можуть бути великими і малими. Переміщення можуть вимірюватися долями міліметра або доходити до значень в кілька метрів.

Методи вимірювання переміщень в залежності від їх величин різні.

Перетворення великих лінійних переміщень в електричні пропорційні їм величини засновано на лінійному вимірі опору провідника постійного перетину при зміні його довжини. Якщо переміщення досліджуваної деталі будь-якого механізму пов'язано зі зміною довжини провідника, то заміряючи при цьому зміни в його провідникові, можна отримувати величини, пропорційні переміщення деталі.

Як правило, для вимірювання лінійних переміщень використовують мост постійного струму, одним з плечей якого (в деяких випадках обома плечима) служить дровий опір (реохорд), за яким може переміщатися контакт (повзун), пов'язаний з переміщається деталлю досліджуваної машини.

Одна з можливих схем перетворювачів і принцип вимірювання переміщень представлені на рис. 8.4. У цій схемі опір нитки $-\Delta R + \Delta R$ розділений ковзаючим повзуном на дві частини, які в сумі з опорами R_1 і R_2 утворюють напівміст. Другий напівміст утворений опорами R . При переміщенні контакту (повзуна "0") вздовж нитки провідника з високим питомим опором один з опорів зменшується на ΔR , а інший на стільки ж збільшується.

Якщо до початку переміщень повзуна вимірювальний міст за допомогою змінного опору R був урівноважений, то при русі повзуна рівновага його порушиться на величину, пропорційну величині переміщення. При цьому між контактом змінного опору R виникає напруга, пропорційна величині переміщення повзуна. Ця напруга буде викликати в ланцюзі прилади "mA" або в ланцюзі шлейфу осцилографа відповідної величини струм. Якщо $R_1 = R$, то струм в діагоналі моста при опорі приладу або шлейфа $R |||$ буде

$$J_g = J_n \frac{\Delta R}{2(R_{ш} + R) - \frac{\Delta R^2}{2R}} \quad (5.3)$$

де J_n — струм плеча моста.

Як видно, з цього виразу, залежність між струмом приладу та ΔR не лінійна. Щоб знехтувати цією нелінійністю, необхідно виконання співвідношення:

$$\frac{(\Delta R)^2}{2R} \ll 2(R_{ш} + R) \quad (5.4)$$

Зазвичай вибирають відношення цих величин таким чином, щоб $R \gg 10\Delta R$. В цьому випадку похибка не перевищує 1%.

У тих випадках, коли потрібна підвищена чутливість, застосовують перетворювач з двома робочими опорами. Перевагою такого перетворювача є пряма пропорційність між рухом повзуна і струмом у вимірювачі (шлейфі осцилографа), що призводить до підвищеної чутливості.

Для вимірювання малих переміщень, які виражаються частками міліметра

зазвичай застосовують метод, заснований на пропорційності між прогином консольної балки і напруженням в її крайніх волокнах.

Відомо, що зв'язок між прогином вільного кінця балки f і відносною деформацією E має вигляд [39].

$$f = \frac{2}{3} \cdot \frac{l^2}{h} \cdot E \quad (5.5)$$

де l — довжина балки від вільного кінця до місця вимірювання відносного подовження;

h — товщина балки.

Пов'язуючи вільний кінець спеціально сконструйованої балки з випробуваної деталлю, що здійснює малі переміщення f , і визначаючи, наприклад, за допомогою дротяних датчиків відносні подовження E в будь-якому обраному її перетині, а також маючи на увазі лінійну залежність між f і E , після відповідної тарировки можна отримати за допомогою приладів, істинні значення переміщень досліджуваної деталі. Тарировки зазвичай виконують за допомогою мікрометрів. Конструктивне оформлення балки може бути різним і залежить перш за все від об'єкта випробувань.

При дослідженні навантажень в обертових деталях металургійних машин або в деталях, які виконують коливання біля нерухомої осі, виникає необхідність в реєстрації кутових переміщень. Ці переміщення зазвичай є незалежними змінними в шуканій залежності – «навантаження-кутове переміщення».

Залежно від величини кутових переміщень розрізняють перетворювачі для реєстрації кутів повороту до 2π і понад 2π радіан, а також перетворювачі для реєстрації кутів повороту \sim до 1^0 .

В якості перетворювача кутових переміщень понад 2π радіан може застосовуватись кільцевий реохорд, включений за схемою рівноплечового моста.

Перетворювач включає в себе кільцевий реохорд, закріплений на барабані, вісь якого за допомогою муфти з'єднується з випробуваною деталлю, що здійснює кутове переміщення, струмознімальних кілець і струмознімачів, що контактують з реохордами і струмознімальними кільцями, балансування опору з повзуном, дротяними опорам, що утворюють робочі і неробочі плечі рівноважного вимірювального моста.

Перетворювач живиться від джерела постійного струму (акумуляторна батарея) напругою 6 вольт, що забезпечує при підібраних величинах опорів самих реохордів і опорів максимальний струм виходу.

Для реєстрації малих кутів повороту досліджуваної деталі, а також для виміру малих прямолінійних переміщень в якості перетворювачів цих механічних параметрів в електричній застосовують сельсини. Сельсин складається з статора з трьома обмотками, розташованими під кутом 120^0 , з'єднаними між собою у вигляді зірки (в деяких випадках у вигляді трикутника). Виходи обмоток розташовані на корпусі. Усередині статора може вільно обертатися ротор, який має одну обмотку. Виходи обмотки ротора через струмозійомники з'єднані з клемми на корпусі сельсина.

З метою збільшення амплітуди ЕРС, що виникає на затискачах ротора C_1

(сельсина-датчика) застосовують електронний підсилювач (ЕУ), вхід якого з'єднують з зажимами ротора сельсина C_1 . Вихід електронного підсилювача (ЕУ) з'єднують з реєструючим приладом, наприклад, міліамперметром (mA).

5.3. Вимірювання лінійних та кутових швидкостей і прискорень

Для реєстрації кутових нелінійних швидкостей поступально рухомих і обертових деталей металургійного обладнання використовують зручний і надійний спосіб перетворення цих механічних параметрів в прямопропорційні їм електричні величини. Спосіб перетворення лінійної або кутової швидкості в електричну величину заснований на явищі електромагнітної індукції. Сутність цього методу полягає в наступному.

Якщо в постійному магнітному полі перпендикулярно до спрямованості силових ліній переміщається провідник зі швидкістю $V=dS/dt$, то в ньому індуктується ЕРС, яка дорівнює:

$$E = B \cdot l \cdot dS/dt, \quad (5.6)$$

де B — складова магнітної індукції у напрямі, перпендикулярному до спрямованості швидкості переміщення;

v, l — довжина провідника.

З виразу (5.6) видно, що ЕРС E пропорційна швидкості переміщення провідника у магнітному силовому полі. В експериментальній практиці часто застосовують застосований на вказаному явищі перетворювач - тахогенератор.

Тахогенератор являє собою малогабаритну малопотужну динамо-машину, ротор якої повинен мати по можливості, найменшу величину махового моменту. Тахогенератор складається зі статора і ротора. У статорі закладена обмотка, що створює магнітне силове поле при пропусканні через неї струму. Обертовий ротор має кілька обмоток (до 10 і більше), кінці яких виведені на панелі колектора, закріпленого на валу ротора.

При обертанні ротора з певною кутовою швидкістю в його обмотках наводиться пропорційна швидкості ЕРС, що знімається з панелей колектора спеціальними щітками. Щітки з'єднані провідниками з клеймами на корпусі тахогенератора.

Існують тахогенератори, в яких магнітне силове поле створюється постійними магнітами. У таких тахогенераторах обмотка статора (обмотка збудження) відсутня. При цьому відпадає необхідність в живленні цієї обмотки від джерела постійного струму, що в умовах проведення експериментальних досліджень значно спрощує процес виміру.

Електричні схеми при замірах швидкостей за допомогою зазначених варіантів по суті однакові. Затискачі тахогенератора, вал якого з'єднаний з випробуваною обертовою деталлю, послідовно з'єднують з опором R_g , що гасить, шлейфом осцилографа $R_{ш}$ і вимикачем K . Для тахогенератора з обмотками збудження додають ще ланцюг, що складається з джерела постійного струму B і вимикача K_1 . У разі використання тахогенератора для вимірювання швидкостей деталі, що рухається поступально, на вал останнього закріплюють шків, на який

намотують нитку, з'єднану з випробуваною деталлю. Тоді при русі деталі зі швидкістю v таку ж швидкість буде мати і шків.

$$v = r_{\text{ш}} \cdot \omega - r_{\text{ш}} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (5.7)$$

де n — число обертів тахогенератора;

Z_m — радіус шкива;

ω — кутова швидкість ротора тахогенератора.

Для розшифровки вимірів, зроблених за допомогою тахогенератора, останній необхідно протарувати. Тарування повинне бути проведена обов'язково з тим же навантаженням в ланцюзі ротора генератора, що і при замірах. Зокрема, якщо експериментальні виміри передбачається вести за допомогою магнітоелектричного осцилографа, то тарировки слід вести з тим же шлейфом, що і при дійсних вимірів, і з тим же додатковим опором R_g . Сам процес тарировки полягає в тому, що ротор тахогенератора обертають з певною кутовою швидкістю і при цьому фіксують відхилення реєструючого приладу. З метою побудови тарувального графіка зазвичай для заданої послідовності відомих чисел оборотів фіксують відхилення приладу, за якими будують графік залежності чисел оборотів ротора від відхилень світлового променя на екрані осцилографа.

При зміні опору в ланцюзі ротора R_y на R_{y1} будують таку ж тарувального криву і т. д. для декількох значень R_{gi} .

Залежно від характеру руху деталі металургійного обладнання набувають лінійних і кутових прискорень. Всі прилади для їх вимірювання можна розділити на дві групи.

У приладах першої групи принцип вимірювання прискорень заснований на вимірюванні сили інерції деякої маси, закріпленої на пружному елементі в приладі.

У приладах другої групи для вимірювання прискорення використовуються диференційні електричні схеми, які дозволяють записати прискорення від датчиків для вимірювання переміщень шляхом двократного диференціювання або від датчиків для вимірювання швидкості шляхом одноразового диференціювання їх вихідних сигналів. Однією з характеристик такого датчика є частотою його власних коливань, визначається виразом:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{f}} \quad (5.8)$$

де g — прискорення вільного падіння;

f — максимальний прогин балки під дією сили $P = m \cdot a$,

a — пришвидшення балки.

Максимальний прогин f залежить від розмірів і матеріалу балки, може для будь-яких випадків вимірювань варіюватися в досить великих межах, отже, частотна характеристика датчика також може змінюватися в великих межах. З виразу (5.8) видно, що чим більше частота ω , тим менше величина прогину f , тобто тим менше чутливість датчика і вимірюється прискоренням. Тому для вибору параметрів датчика для конкретного випадку необхідно мати залежність

відхилення вантажу, відповідного прискоренню в lg , від частоти власних коливань для якогось датчика. Якщо при цьому виявиться, що відхилення вантажу забезпечать необхідну чутливість, то датчик придатний для випробувань, в іншому випадку необхідний вибір нових параметрів датчика (довжина балки, її матеріал, товщина балки, маса вантажу).

Так як відхилення реєструвального приладу від сигналу вимірювального моста на датчику пропорційно прогину балки датчика, то визначення перед початком вимірів відхилення приладу, відповідного прискоренню в lg , отримаємо масштаб при обробці результатів вимірів.

Реєстрацію прискорень, особливо кутових, можна проводити також за допомогою приладів, які містять диференційні ланцюги і датчик кутових швидкостей (прилади другої групи).

Принцип роботи таких приладів полягає в наступному. Датчиком приладу зазвичай є тахогенератор постійного струму, ротор якого з'єднаний з досліджуваною деталлю. До зажимів генератора підключається ланцюг з індуктивністю L , ємністю C і активним опором.

Для такого ланцюга вираз ЕРС генератора E має вигляд

$$E = L \frac{dJ}{dt} + R + \frac{1}{C} \int J dt, \quad (5.9)$$

де J — струм ланцюга.

Якщо $L \approx 0$, а C — достатньо більше за величиною, то при диференціюванні виразу (5.9) отримуємо:

$$\frac{dE}{dt} = R \frac{dJ}{dt} + \frac{1}{C} J \quad (5.10)$$

Так як ЕРС генератора E пропорційна кутовій швидкості його ротора $U = k \cdot \omega$, де k — коефіцієнт, то

$$E = \frac{d\omega}{dt} = \frac{R}{K} \cdot \frac{dJ}{dt} + \frac{J}{KC} \quad (5.11)$$

де E — кутове прискорення.

Розв'язок отриманої залежності має вигляд:

$$E = \frac{J}{KC(1 - e^{-t/KC})} \quad (5.12)$$

Можливі і інші варіанти вихідної схеми приладу.

Питання для самоперевірки

1. Типи датчиків що застосовуються для вимірювання переміщень.
2. Призначення та галузь застосування реохордного датчика.
3. Типи датчиків що застосовуються при вимірюванні швидкості.

4. Призначення тахогенераторів та сельсінів.
5. Датчики що застосовуються для вимірювання прискорень.
6. Основні елементи реохордного датчика та схема його підключення.
7. Визначення шляху що пройшов робочий орган при вимірюванні за допомогою реохордного датчика.
8. Методика графічного перетворення графіка переміщення в графік швидкості.
9. Методика побудови діаграм зміни прискорення.
- 10.Схеми тахогенераторів з незалежним збудженням та з постійним магнітом.