

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПЕРЕТВОРЮВАЧІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

Навчальний посібник

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології*

Укладачі: Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, Т.Р. Ключко

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензенти: *Яненко О. П., д-р техн.наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського*
Півторак Д.О., канд.техн.наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор: *Антонюк В.С., д-р техн.наук, професор*

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради Приладобудівного факультету
(протокол № 6/22 від 20.06.2022 р.)

Запропоновано основні принципи класифікації перетворювачів, які призначені для автоматизованих систем контролю технологічного процесу виробництва приладів. Розглянуто низку перетворювачів різних фізичних явищ в інформаційні сигнали для автоматизованих інтегрованих систем контролю та керування виробничими процесами.

Призначено для освітніх установ, які зорієнтовані на підготовку фахівців у галузі автоматизації інтегрованих засобів та систем, для спеціальних курсів підвищення кваліфікації фахівців на виробництві галузі надточного приладобудування.

Для здобувачів ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні» спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології з навчальної дисципліни «Технічні засоби автоматизації».

Реєстр. № НП 21/22-679. Обсяг 3,5 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП	5
1. КЛАСИФІКАЦІЙНІ ОЗНАКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ	6
1.1. Векторна модель принципів дії перетворювачів автоматичних систем	7
1.2. Контур з періодично змінними параметрами	11
1.3. Електричні властивості перетворювачів підкласу $f(RLC) + f(r, m, k)$	15
Контрольні питання	22
2. ОСНОВНІ ТИПИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ	23
2.1. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КЛАСУ E ПІДКЛАСУ R	23
2.2.1. Загальні засади роботи перетворювачів підкласу R	23
2.2. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПІДКЛАСУ C	26
2.2.1. Загальні засади перетворювачів підкласу C	26
2.3. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПІДКЛАСУ L	29
2.3.1. Загальні властивості перетворювачів підкласу L	29
2.4. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПІДКЛАСУ RLC	33
2.4.1. Перетворювачі підкласу RLC	33
2.4.2. Індукційні властивості перетворювачів підкласу RLC	35
2.5. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ	37
2.6. ЗАСАДИ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПІДКЛАСУ RLC	39
Контрольні питання	44

3. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ПІДКЛАСУ RLC	46
3.1. ПРИНЦИПИ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПІДКЛАСУ RLC	46
3.2. ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ <i>RLC</i> В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	51
Контрольні питання	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	67

ВСТУП

Створення будь-якого сучасного автоматизованого технічного пристрою, приладу або автоматизованої виробничої лінії не може бути реалізоване без широкої гами перетворювачів, які виконують дуже специфічну роль у їх роботі. Сутність функцій, які вони виконують, є пов'язаною з ланцюгами постачання необхідної інформації та у замкненні ланцюгів автоматичного керування. Ця функція є досить вагомою у загальному результаті досягнення високої точності, як автоматизованими системами керування, так і системами контролю якості кінцевого продукту виробництва, з функціями вимірювання його технічних параметрів, тобто отримання інтегрованих систем з високоякісними показниками. Тому є необхідність розглядати систему перетворювача як таке явище, що притаманне переважній кількості приладів, механічних систем, радіоелектронних, оптично-електронних тощо. Різноманітність фізичних явищ, котрі виникають у технологічному процесі виготовлення деталей приладів, потребують технічних засобів їх реєстрації, обробки та аналізу для подальшого застосування в автоматичних системах керування технологічними процесами.

Найбільшим чином подібні перетворювачі доцільно використовувати при автоматизації виробництва, коли нагальними проблемами є контроль поточного стану технологічного, контрольно-вимірювального обладнання, технічних модулів живлення та забезпечення рухового складу, що складають загальну систему виготовлення надточної продукції приладобудівного виробництва.

1. КЛАСИФІКАЦІЙНІ ОЗНАКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ

Аналіз існуючих методів перетворення сигналів, які визначають корисну інформацію від технологічного середовища, технологічного об'єкта керування при створенні автоматичних систем [1 - 13], доводить, що практично будь-який прилад є можливість розглядати як ланцюг перетворювачів, що утворюють інформаційні перетворення енергетичних потоків. Так, наприклад, будь-який радіоелектронний пристрій може розглядатися, як ланцюг перетворювачів, що перетворюють сигнал-подразник за потужністю, формою, спектром, фазою тощо. Таким чином, утворюється послідовність в обробці сигналу, тобто: фізико-хімічний подразник – чутливий елемент (ЧЕ) – інформаційний фільтр. Аналізуючи ці перетворення, є можливість визначити узагальнені класифікаційні ознаки перетворювачів автоматичних систем. Ця класифікаційна система утворена на засадах того, що існує в сучасній техніці цього класу приладів [14 - 18]. Так, наприклад, якщо горизонтальна класифікація за принципом: фізико-хімічне явище, перетворювач-фільтр тощо, є задовільною, то класифікація по вертикалі не витримує ніякої критики. У зв'язку з чим авторами досліджено проблему побудови єдиного базового елементу [19] перетворювачів. Аналіз всіх відомих фізико-хімічних процесів, які виникають під час технологічних процесів виготовлення деталей, доводить те, що всі ці явища можна поділити на дві великі групи, тобто механічні та електромагнітні. Але, навіть, тут необхідно зробити зауваження, бо всі електромагнітні явища є наслідком механічного руху електричних зарядів, хвиль тощо.

Окрім того, переважна більшість механічних перетворювачів має на меті утворення інформаційного електричного сигналу, але це є вторинне явище за своєю сутністю. Стосовно хімічних, біологічних процесів та реакції на них перетворювачів необхідно зауважити теж саме, тобто їхню електромеханічну сутність. Розглядаючи весь процес відчуття перетворень, котрі відбуваються у

перетворювачі, як у приладі або системі, нам необхідно проаналізувати принцип дії ЧЕ і модулю фільтра, тому що ці дві частини перетворювача є керованими.

Виходячи з цього, можна узагальнити класифікаційні ознаки перетворювачів, які застосовують в автоматизованих системах промислового виробництва.

1.1. Векторна модель принципів дії перетворювачів автоматичних систем

Якщо розглянути сучасні класифікації принципів дії перетворювачів та їх конструкцій [20-21], то однозначно можна стверджувати те, що вони є незадовільні. Причиною такої неузгодженості є те, що всі вони побудовані за конструкційно-фізичними засадами, які до того ж досить слабо поєднуються в одне цілісне поняття.

Так, наприклад, можна розглянути два типи чутливих елементів перетворювачів як пружний елемент (тензоелемент), а другий - електромагнітний перетворювач. Відомий ще і третій, де виконує ту ж саму задачу перетворення фізичного явища в електричний сигнал. Тим не менш, якщо необхідно знайти чутливий до силових навантажень елемент, то його можна знайти у всіх трьох варіантах, але всі вони мають різну назву, тому що вона будується на конструктивно-фізичних засадах. Це не дає можливості правильно зорієнтуватися у величезній кількості конструкцій. Дослідження цього питання показує, що в основі класифікації повинен бути застосований фізико-математичний принцип, який надає можливість чітко розрізняти перетворювачі за їх чутливістю до зовнішніх чинників, на які повинна бути налаштована їх дія. В основі такої взаємодії повинно бути покладено чутливість матеріалу перетворювача до діючого фізичного чинника, потім конструкційні особливості, які визначають очікуваний результат. Так, наприклад, для виконання тензорезистора, який є чутливим до деформацій, необхідний

матеріал, який має залежність за двома параметрами, тобто електропровідність та її залежність від деформацій. На другому етапі реалізації стоїть конструкція, тобто суто геометрична форма.

П'єзоелектричні елементи мають чутливість до деформацій матеріалу з наступним виробленням електричного сигналу і тільки потім з'ясовуються конструкційні особливості. Магнітопружні елементи вимагають феромагнітного матеріалу, у якого магнітна проникність є залежною від силового навантаження на осердя. І тільки потім вирішується питання про конструкційні особливості. Таких прикладів можна наводити безліч, але дуже чітко проглядається тенденція, коли чутливістю повинен володіти, у першу чергу, матеріал, і вже потім вона як чинник впливу дозволяє отримати довершену конструкцію ЧЕ.

Оскільки роботу ЧЕ можна описати диференціальним рівнянням вільних коливань, коефіцієнти якого вміщують в собі і властивості матеріалів, і конструкційні особливості, то існує можливість, прирівнюючи нулю той чи інший параметр, отримати математичний опис його властивостей від заданих вимог.

Користуючись вище обумовленим, було запропоновано до використання векторну конструкцію ЧЕ, зображеного на рис. 1.1 [2].

В основі цієї векторної конструкції є трирівнева шестикутна призма, побудована на засадах електромеханічних аналогій (щоб не робити малюнок громіздким для розуміння внутрішні зв'язки не відображено). При такому розгляді зовнішня призма (а) розглядається як контур фізичної взаємодії зовнішнього чинника (який підлягає вимірюванню) з фізичними властивостями матеріалу, який повинен бути використаний при побудові чутливого елементу перетворювача.

Наступна призма (б) повинна розглядатися як контур визначення геометрії ЧЕ перетворювача. Внутрішній контур (в) визначає конкретні конструкційні особливості перетворювача. По центральній осі розташовано

ідеалізовані перетворювачі, параметри яких є недосяжними через вади, які притаманні використаним матеріалам та їх конструкціям. Верхня площина (електричних властивостей) дає опис всіх процесів, які стосуються виключно електричних явищ. Нижня площина (механічних властивостей) дає опис виключно механічних явищ. У середині площина (межа дуальності), яка має подвійний характер (дуальність), де повинні сходитися два фізичних явища, тобто електричні та механічні коливальні процеси зливаються у одне ціле. Саме у цій точці призми перетворювача ми маємо опис тієї конструкції, яка відчуває усі зовнішні чинники.

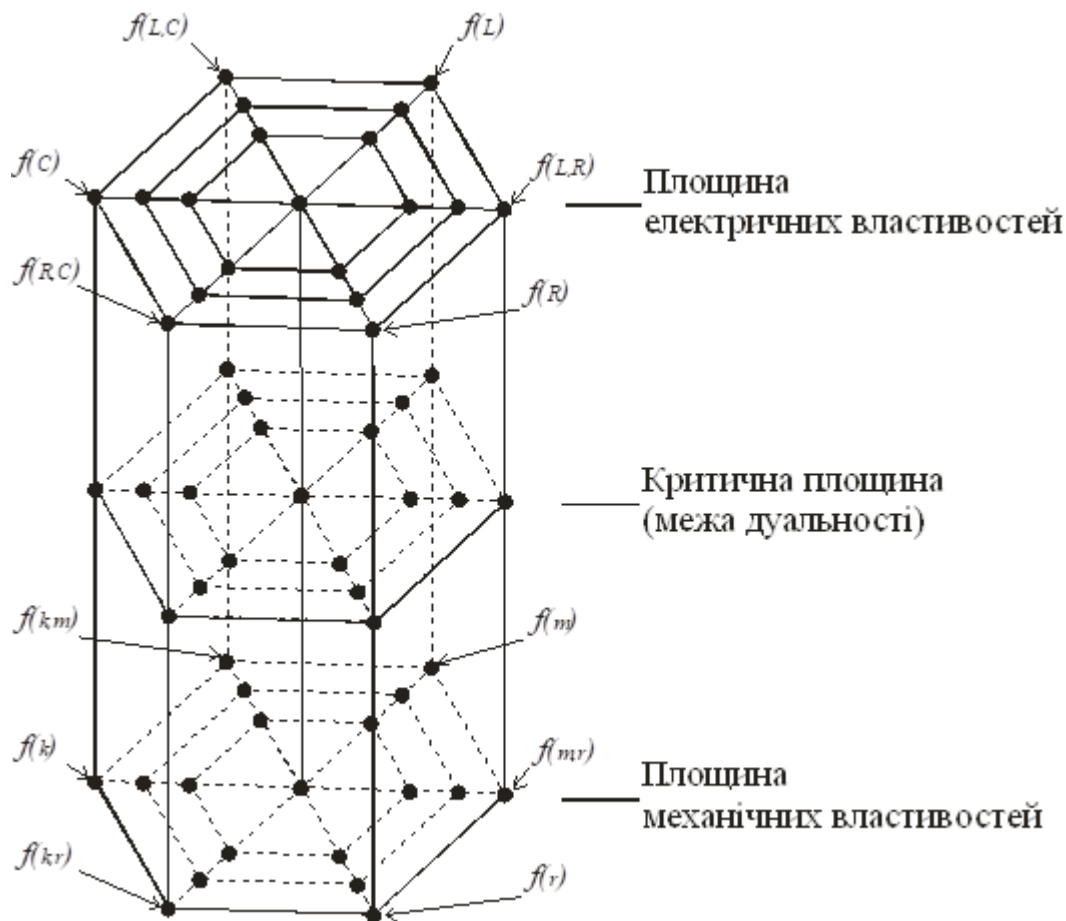


Рис.1.1. Узагальнена векторна модель побудови перетворювача автоматичної системи: L - індуктивність; C - ємність; R - опір; m - маса; k - жорсткість; r - в'язке тертя

По діагоналях ($f(L,C) - f(R)$, $f(L) - f(R,C)$, $f(C) - f(L,R)$, тощо) фігурують фізичні закони, на які повинен реагувати майбутній перетворювач (наприклад, електричний). До того ж вони, хоч і виходять з одного спільного коливального процесу, проте мають негативний характер один до одного. Так, наприклад, якщо необхідно мати чутливий елемент на засадах функції $f(L,C)$, то споріднена функція (діагонально протилежна) – $f(R)$ матиме негативний характер щодо досягнення необхідної мети. Відповідно перетворювач, побудований на засадах функції $f(R)$, матиме негативний вплив від функції $f(L,C)$.

Доволі простий випадок подібної ситуації виникає, коли при налагодженні роботи тензометричних перетворювачів великою проблемою є наявність ємності монтажу. Отже, як наслідок, виникає необхідність у спеціальних схемних рішеннях та компенсаторах ємності [43, 44]. Аналогічних прикладів безліч.

Автори вважають, що подібне вирішення проблеми дає можливість повністю класифікувати всі чутливі елементи, оскільки:

- всі існуючі прилади розподіляються на три великих класи:
 - 1) класичні електричні з загальним математичним описом у вигляді функції – $f(R, L, C)$ (Е-клас);
 - 2) класичні механічні з загальним математичним описом у вигляді функції – $f(r, m, k)$ (М-клас);
 - 3) класичні електромеханічні з загальним математичним описом у вигляді функції – $f(R, L, C) + f(r, m, k)$ (ЕМ-клас).
- кожний з цих класів розподіляється на шість підкласів:
 - 1) $[f(L, C)], [f(L)], [f(L, R)], [f(R)], [f(R, C)], [f(C)]$;
 - 2) $[f(k, m)], [f(m)], [f(m, r)], [f(r)], [f(k, r)], [f(k)]$;
 - 3) $[f(L, C), f(k, m)], [f(L), f(m)], [f(L, R), f(m, r)], [f(R), f(r)],$

$$[f(R, C), f(k, r)], [f(C), f(k)].$$

- подібна класифікація надає можливість визначитися, яких саме перетворювачів автоматичних систем не існує на цей час.

Користуючись цією методикою є можливість ідентифікувати та маркувати будь-який ЧЕ. Наведемо прості приклади:

- перетворювач типу $E-R$ є чутливим до електрофізичних властивостей електричного опору матеріалу;
- перетворювач типу $M-m$ є чутливим до фізико-механічних властивостей маси матеріалу;
- перетворювач типу $EM-Ck$ є чутливим до фізико-механічних властивостей матеріалу демпфуванням та електрофізичних властивостей цього ж матеріалу при створенні електричної ємності.

Отже, добре видно, що під цю класифікацію підпадають усі відомі перетворювачі.

З усіх можливих варіантів побудови перетворювачів нас цікавлять виключно ті, які мають можливість бути вбудованими в автоматизовані системи, зокрема в систему керування технологічними процесами, в автоматизовані контрольно-вимірювальні засоби, що застосовані як окремі модулі загальної автоматичної системи виробництва. Таким чином, доцільно розглядати саме перетворювачі, що є побудованими на засадах електричних та споріднених інтегрованих ланцюгів. Отже, автоматизовані системи мають навіть комплекси перетворювачів, в основі яких покладено різні принципи реєстрації, перетворення інформаційних сигналів від об'єкту керування.

1.2. Контур з періодично змінними параметрами

Для того, щоб зрозуміти, які саме фізичні параметри необхідно враховувати при виборі перетворювача, розглянемо математичне підґрунтя побудови його конструкції, використовуючи моделі електричного контуру.

Розглянемо різні випадки щодо контуру, в якому тільки:

- а) опір у контурі;
- б) індуктивність та опір;
- в) опір та ємність;
- г) індуктивність та ємність.

Розглянемо

$$\text{Нехай } R = R_0 + r(t), L = L_0 + L(t), C = C_0 + C(t), \quad (1.1)$$

де $r(t)$, $l(t)$, $c(t)$ – змінні, а L_0 , C_0 , R_0 – постійні величини.

Припустимо, що постійні величини більше змінних величин, тобто

$$R_0 > |r|, C_0 > |C|, L_0 > |L|. \quad (1.2)$$

Розглянемо перший випадок, який стосується виключно резисторних перетворювачів. У такому випадку рівняння контуру приймає наступний вигляд

$$\begin{aligned} R_0 + \frac{dr}{dt} = 0 &\Rightarrow \frac{dr}{dt} = -R_0 \Rightarrow dr = -R_0 dt \Rightarrow \int dr = \int -R_0 dt \Rightarrow \\ &\Rightarrow r = -R_0 t + C_1 \end{aligned} \quad (1.3)$$

де $C_1 = \text{const}$.

Розглянемо другий випадок, який стосується індуктивно-резисторних перетворювачів.

Тоді рівняння контуру набуває вигляду

$$L_0 + \frac{dl}{dt} + R_0 + \frac{dr}{dt} = 0. \quad (1.4)$$

Якщо прийняти $\frac{dl}{dt} = 0$ (індуктивність вважаємо занадто малою величиною

для врахування), то маємо $L_0 + R_0 + \frac{dr}{dt} = 0$, з цього рівняння отримаємо

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} = -L_0 - R_0 &\Rightarrow dr = (-L_0 - R_0)dt \Rightarrow \int dr = \int (-L_0 - R_0)dt \Rightarrow , \\ &\Rightarrow r = (-L_0 - R_0)t + C_2 \end{aligned} \quad (1.5)$$

де $C_2 = \text{const.}$

Аналогічно, якщо не звертати увагу на мале значення $\frac{dr}{dt} = 0$, то рівняння набуває вигляду $L_0 + R_0 + \frac{dl}{dt} = 0$, звідкіля маємо наступне:

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dt} = -L_0 - R_0 &\Rightarrow dl = (-L_0 - R_0)dt \Rightarrow \int dl = \int (-L_0 - R_0)dt \Rightarrow, \\ &\Rightarrow l = (-L_0 - R_0)t + C_3 \end{aligned} \quad (1.6)$$

де $C_3 = \text{const.}$

Розглянемо третій випадок, який стосується ємнісно-резисторних перетворювачів.

Тоді рівняння контуру приймає вигляд

$$C_0 + \frac{dc}{dt} + R_0 + \frac{dr}{dt} = 0. \quad (1.7)$$

Якщо знехтувати $r(t)$ ($\frac{dr}{dt} = 0$), то отримуємо

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dt} = -C_0 - R_0 &\Rightarrow dc = (-C_0 - R_0)dt \Rightarrow \int dc = \int (-C_0 - R_0)dt \Rightarrow, \\ &\Rightarrow c = (-C_0 - R_0)t + C_4 \end{aligned} \quad (1.8)$$

де $C_4 = \text{const.}$

Якщо ж знехтувати ємністю $c(t)$ ($\frac{dc}{dt} = 0$), то отримуємо:

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} = -C_0 - R_0 &\Rightarrow dr = (-C_0 - R_0)dt \Rightarrow \int dr = \int (-C_0 - R_0)dt \Rightarrow, \\ &\Rightarrow r = (-C_0 - R_0)t + C_5 \end{aligned} \quad (1.9)$$

де $C_5 = \text{const.}$

І нарешті, якщо в контурі з індуктивністю та ємністю, то рівняння приймає вигляд: $L_0 + \frac{dl}{dt} + C_0 + \frac{dc}{dt} = 0$ звідкіля отримуємо.

При $\frac{dl}{dt} = 0$

$$L_0 + C_0 + \frac{dc}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dc}{dt} = -C_0 - L_0 \Rightarrow dc = (-C_0 - L_0)dt \Rightarrow , \quad (1.10)$$

$$\Rightarrow \int dc = \int (-C_0 - L_0)dt \Rightarrow c = (-C_0 - L_0)t + C_6$$

де $C_6 = \text{const.}$

Якщо зважити, що $\frac{dc}{dt} = 0$ (змінна $c(t) \rightarrow 0$), то рівняння набуває наступного вигляду:

$$L_0 + C_0 + \frac{dl}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dl}{dt} = -C_0 - L_0 \Rightarrow dl = (-C_0 - L_0)dt \Rightarrow , \quad (1.11)$$

$$\Rightarrow \int dl = \int (-C_0 - L_0)dt \Rightarrow l = (-C_0 - L_0)t + C_7$$

де $C_7 = \text{const.}$

Отже, на підставі проведеного аналізу існуючих систем перетворювачів та створених математичних досліджень, можна зробити висновок, що

1. Реальним є існування виключно таких різновидів принципів дії перетворювачів, як механічний та електромагнітний.

2. Математичні моделі функціонування цих перетворювачів доводять існування об'єднаного базового елементу перетворювачів [].

3. Користуючись властивостями об'єднаного базового елементу, є можливість створювати формалізовані аналітичні моделі інтегрованих перетворювачів та використовувати у реальних приладах автоматичних систем контролю та вимірювання параметрів.

4. Модель об'єднаного базового елементу перетворювача вказує на те, що навіть ідеалізований перетворювач не повністю використовує можливості свого об'єму з погляду ефективності використання при реєстрації інформаційних потоків.

5. Існує залежність між геометрією ЄЕВ та його зовнішнім полем чутливості.

Якщо підсумувати усе вищесказане, то можна констатувати той факт, що будь-який ідеалізований перетворювач можна побудувати за простою схемою,

коли підсумок елементарних часток за визначеним законом створює конкретну конструкцію чутливої частини перетворювача. У такому випадку опис дискретних елементів матиме вигляд:

$$\Gamma'_B = \sum_{i=a}^{i=B} \Gamma_B(p), \quad (1.12)$$

де Γ_B – є геометрична функція перетворювача,

$\Gamma_B(p)$ – функція елементарного перетворювача, тобто ЄЕВ.

Продовжуючи цю тезу необхідно констатувати, що вираз (1.12) у своєму переході є інтегралом, якщо перетворювач є лінійним, то:

$$\Gamma'_B = \int_a^b \Gamma_B(p) dp \quad (1.13)$$

і функція є обмежена на відтинку ab . Якщо перетворювач є геометрично замкненим у коло, то він обчислюється за виразами:

$$\Gamma_B = \oint \Gamma_B(p) dp \quad (1.14)$$

$$\Gamma_B = \oint\!\!\!\oint_{(V)} \Gamma_B(p) dp \quad (1.15)$$

Наведемо прості приклади, як це використовується. Так, наприклад, звичайний тензометричний перетворювач реалізується за виразом (1.13), оскільки має лінійну конструкцію.

Індукційний перетворювач реалізується за виразом (1.14), оскільки має форму кільця.

Вібраційні перетворювачі на засадах п'єзокераміки реалізуються на основі виразу (1.15). Тобто це доводить, що за подібною схемою є можливість побудувати будь-яку конструкцію перетворювача.

1.3. Електричні властивості перетворювачів підкласу $f(RLC) + f(r, m, k)$

Оскільки найбільшого розповсюдження набули в перетворювачі моноблочної конструкції, то розглянемо саме їх електричні властивості.

Поліблочні більш складні за своєю конструкцією, але у кінцевому випадку їх фізика роботи зводиться до імітації роботи моноблочного.

Моноблочний ЧЕ являє собою кристалічну масу визначеної форми. В основі роботи такого елемента покладено прямий п'єзоелектричний ефект, а саме утворення електричних зарядів на гранях кристалів деяких діелектриків за їх механічної деформації. Такі властивості мають кварц (кришталь), сегнетова сіль, титанат барію тощо.

П'єзоелектричні властивості у кристалах є пов'язаними з орієнтуванням їх осей. Розрізняють головну або оптичну вісь Z та перпендикулярні до неї електричну вісь X та механічну вісь Y .

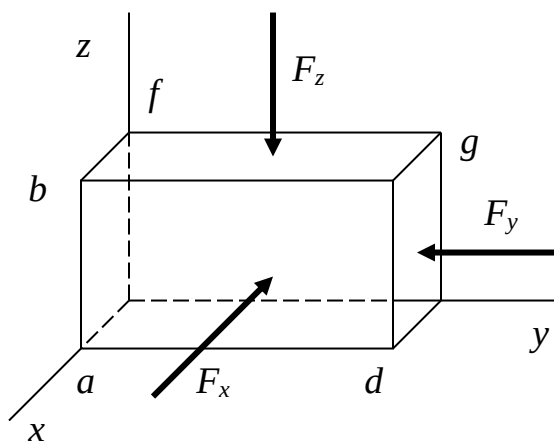


Рис. 1.2. Осі п'єзоелектричного чутливого елемента

Електрична вісь з'єднує симетричні точки кристалу, де заряд набуває максимальної величини. У загальному випадку в елементі може бути кілька механічних та електричних осей. Найбільш вживана форма перетворювача - це прямокутна або кругла пластинка. Під дією сили F_x вздовж осі x , на гранях f_x перпендикулярних до осі x , виникають різнополярні заряди q_x (поздовжній п'єзоефект). Величина цих зарядів у межах пружних деформацій є лінійно залежною від діючої сили.

$$q_x = k_n F_x, \quad (1.16)$$

де $q_x = k_n F_x$ – п'єзомодуль матеріалу.

При дії сили вздовж осі F_y на тих же гранях f_x виникають різнополярні заряди q'_x (поперечний п'єзоефект). Величина цих зарядів є залежною не тільки від сили дії, але і від розміру граней [22, 23]:

$$q'_x = -k_n \frac{f_x}{f_y} F_y, \quad (1.17)$$

де f_x та f_y – площа граней.

Заряди на протилежних гранях f_x рівні між собою, але мають різні знаки. Знаки визначаються напрямком сили, тобто стискання або розтягування.

Напруга між обкладинками по гранях f_x при відсутності навантаження:

$$E = q_x / C_n, \quad (1.18)$$

де ємність ЧЕ становить:

$$C_n = \frac{\varepsilon f_x}{d}, \quad (1.19)$$

а ε – діелектрична стала;

f_x – площа грані;

d – товщина чутливого елемента.

Як приклад наведемо наступні технічні характеристики деяких класичних п'єзоелементів.

- п'єзомодуль кварца $k_n = 2,3 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н; діелектрична проникність $\varepsilon = 40 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, модуль пружності $E_y = (7 \div 10)^{10}$ Па, залишкові деформації не знаходяться аж до навантажень $(6 \div 10)^7$ Па, критична температура становить 573°C , коли п'єзомодуль $k_n = 0$;

- сегнетова сіль має п'єзомодуль $k_n = 300 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, вузький температурний діапазон від -15°C до $+22,5^\circ\text{C}$, сильна гігроскопічність та малий температурний діапазон сильно обмежують використання цього типу матеріалу;

- титанат барія має п'єзомодуль $k_n = 107 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н за діелектричної проникності $\varepsilon = 124 \cdot 10^{-10}$ Ф/м та модулю пружності $E_y = 1,1 \cdot 10^{11}$ Па. П'єзомодуль досить стабільний у межах від 0°C до $+80^\circ\text{C}$, але додаток з деяких розширює діапазон від -50°C до $+200^\circ\text{C}$.

Оберненість п'єзоелектричного ефекту дозволяє виконувати п'єзореzonатор у вигляді двополюсника, який об'єднує системи електричного збудження механічних коливань та створення електричного сигналу. Чутливість п'єзореzonатора є безпосередньо залежною від властивостей матеріалу ЧЕ та його геометричних розмірів, тобто, частота коливань, при яких за товщиною h укладається одна півхвиля, є основною частотою і визначається як:

$$f_k = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}}, \quad (1.20)$$

де E_{ij} - константа пружності, а ρ - щільність матеріалу.

При частотах, значно менших f_k , струм у ланцюзі збуджуючих електродів (рис. 1.3, а) малий і визначається в основному міжелектродною ємністю C_0 та опором ізоляції між електродами R_0 .

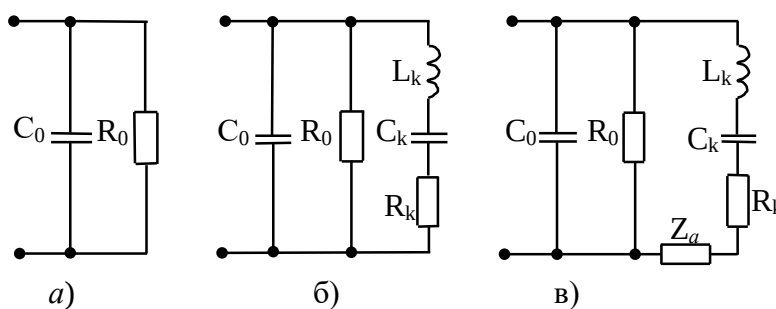


Рис. 1.3. Еквівалентні схеми п'єзоелемента у різних режимах роботи

При наближенні частоти напруги збудження до частоти f_k амплітуда механічних коливань зростає. Пропорційно амплітуді коливань збільшується

заряд на електродах, і в ланцюзі зростає складова змінного струму, що викликається деформаціями п'єзoeлемента.

На рис. 1.3,б відображена еквівалентна схема п'єзорезонатора. У цій схемі введені еквівалентні параметри: індуктивність $L_k = m/k_{em}^2$, ємність $C_k = nk_{em}^2$, і опір R_k , які створюють динамічний контур еквівалентної схеми.

Схема (рис. 1.3,б) відповідає випадку вільних коливань, тобто механічно не навантаженому п'єзорезонатора (режим короткого замикання, при якому зусилля на поверхнях п'єзoeлемента від зовнішніх сил дорівнюють нулю). Схема (рис. 1.3,в) враховує вплив зовнішніх навантажень у вигляді включеного опору Z_a , який може мати як чисто активний (наприклад, якщо існують втрати), наприклад, акустичне випромінювання в зовнішнє середовище, так і реактивний характер (наприклад, при приєднанні до п'єзoeлемента додаткової маси). У загальмованому стані, коли швидкості зсувів поверхонь п'єзoeлемента дорівнюють нулю, опір Z_a , прирівнюється нескінченності (режим ялового ходу). У режимі, близькому до холостого ходу, працюють п'єзoeлектричні елементи тиску та прискорень, в яких використовується прямий п'єзoeфект, звідкіля в еквівалентній схемі цих перетворювачів динамічна гілка зазвичай не враховується.

Провідність еквівалентної схеми (рис. 1.3, б) визначається залежністю:

$$Y = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 + \frac{j\omega C_k}{1 - \omega^2 L_k C_k + j\omega C_k R_k} = \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 + \frac{\omega^2 C_k^2 R_k + j(1 - \omega^2 L_k C_k)\omega C_k}{(1 - \omega^2 L_k C_k)^2 + \omega^2 C_k^2 R_k} \quad (1.21)$$

Для ідеального п'єзорезонатора $R_0 = \infty, R_k = 0$ провідність нескінченно зростає за умови $1 - \omega^2 L_k C_k = 0$, тобто при частоті $\omega_k = 1/\sqrt{L_k C_k}$, яка є частотою послідовного резонансу. Ця частота визначається виключно параметрами введеного динамічного контуру і тому співпадає з визначеною (1.20) раніше як:

$$\omega_k = 2\pi f_k + \frac{\pi}{h} \sqrt{\frac{E_{ij}}{\rho}} \quad (1.22)$$

або частотою механічного резонансу.

Провідність ідеального п'єзореzonатора нескінченно падає за умови

$$j\omega C_0 + \frac{j\omega C_k}{1 - \omega^2 L_k C_k} = 0, \quad (1.23)$$

тобто при частоті, $\omega_p = \sqrt{\frac{1 - C_k / C_0}{L_k C_k}}$ або частотою паралельного резонансу

(іноді її називають частотою антирезонансу). Відносна різниця між частотами послідовного і паралельного резонансів складає $(\omega_p - \omega_k) / \omega_k = C_k / (2C_0)$.

У реальному п'єзореzonаторі при частотах ω_k і ω_p провідності контуру не рівні відповідно нескінченності та нулю і мають деяке кінцеве значення, що включає, окрім активної невелику реактивну складову. Тому для характеристики п'єзореzonатора вводяться ще дві частоти, при яких провідність чисто активна. Одна з цих частот ω_p , називається частотою резонансу і виявляється трохи більше за частоту ω_k , друга ω_a називається частотою антирезонансу і виявляється трохи нижчою за частоту ω_p .

Основою п'єзореzonансного частотного перетворювача є п'єзореzonатор, частота якого змінюється під дією вимірюваної величини. Зміна частоти може відбуватися:

а) при дії температури, яка впливає на геометричні розміри, щільності і, головним чином, на пружні властивості матеріалу елемента;

б) під дією механічних напруг у ЧЕ перетворювача або його деформації, що також викликає зміну h, ρ, i н;

в) при приєднанні додаткової маси елемента, що змінює його товщину h і середню щільність ρ . Відповідно розрізняють термочутливі, тензочутливі і масочутливі п'єзоелементи. Окрім цього, використовуються п'єзореzonансні перетворювачі з амплітудним виходом. У цих приладах, що працюють на

частоті, близькій до резонансної, при зміні акустичних втрат змінюється амплітуда коливань.

При побудові п'єзореzonансного елемента є вочевидь вимоги: висока добротність, висока чутливість до вимірюваної величини, мала чутливість до чинників, що дестабілізують, та можливість збудження коливань тільки на одній частоті, тобто моночастотність. Ці вимоги забезпечуються в першу чергу вибором типу матеріалу п'єзоелемента.

Загальний модуль комплексної чутливості $|S(j\omega)|$ визначає АЧХ, тобто залежністю чутливості від частоти

$$S(\lambda) = \frac{\lambda^2}{\sqrt{(\lambda^2 - 1)^2 + 4\lambda^2\beta^2}}, \quad (1.24)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{\omega}{\omega_0}, \text{ а } \beta = \frac{k}{2\omega_0 m}.$$

При цьому ω – є плинна частота, а ω_0 – частота резонансу. Коефіцієнт k – є коефіцієнтом демпфірування, а m – інерційною масою (додатковою).

Фаза сигналу ЧЕ визначається як:

$$\varphi = \arctg \frac{2\lambda\beta}{\lambda^2 - 1}. \quad (1.25)$$

Навантаження, на яке працює ЧЕ перетворювача, тобто опір R_n та ємність C_n призводить до того, що вихідна напруга $U_{вих}$ отримує наступну залежність:

$$U_{вих} = E \frac{pR_e C_n}{1 + pR_e (C_n + C_e)}, \quad (1.26)$$

якщо врахувати (1.18) та (1.16), то:

$$U_{вих} = k_n F_x \frac{pR_e}{R_n + R_n}; \quad (1.27)$$

а R_n – опір елемента.

З (1.27) видно, що при $t = 0$ або при $p = \infty$ напруга на навантаженні:

$$U_{вих} = \frac{k_n F_x}{C_n + C_n}. \quad (1.28)$$

Якщо сила F_x стала, то з плином часу ($t = 0$ або при $p = \infty$) напруга знижується до нуля. Тому цей тип перетворювачів використовується для виміру, частота коливань яких сягає 200 кГц.

Чутливість:

$$S' = \frac{dU_{вих}}{dF_x} = \frac{k_n}{C_n + C_n}. \quad (1.29)$$

Часом з метою підвищення чутливості пластини ЧЕ перетворювача збирають стовпчиком. У цьому разі вихідна напруга:

$$U_{вих} = \frac{nq_x}{nC_n + C_n} = \frac{k_n F_x}{C_n + C_n / n};$$

$$U_{вих} = S' F_x, \quad \text{де } S' = \frac{k_n}{C_n + C_n / n} > S. \quad (1.30)$$

Перевагами цього типу перетворювачів є досить широкий діапазон частот та вимірювальних величин, малі розміри та нескладність побудови. До недоліків необхідно віднести слабку чутливість до статичних навантажень.

Контрольні запитання

1. Наведіть основні проблеми створення автоматизованих систем обробки інформаційних сигналів на виробництві
2. Якими є основні ознаки загальної класифікації перетворювачів ?
3. Накресліть графічну векторну модель побудови перетворювача за ознаками його характеристик перетворення та поясніть основні інформаційні площини
4. Що таке контур зі змінними параметрами
5. Як використати контур зі змінними параметрами при побудові перетворювача ?
6. В чому полягають електричні властивості перетворювача RLC ?

2. ОСНОВНІ ТИПИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

Виходячи із запропонованої класифікації, розглянемо деякі класи перетворювачів, котрі доцільно використовувати саме в автоматизованих та автоматичних системах з різними функціями вимірювання та контролю параметрів.

2.1. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ КЛАСУ E ПІДКЛАСУ R

Вхідною величиною такого перетворювача є лінійне або кутове переміщення рухомого механічного елемента, деформації тощо, а вихідною – змінюваний опір. Для перетворення вимірюваної механічної величини в переміщення сувка реостатного перетворювача використовують різні перетворювачі механічного сигналу. Наприклад, при зміні тиску можуть бути використані механічні та інші перетворювачі як, наприклад, мембрани, сильфони, трубки Бурдона, спіральні та гвинтові трубки з внутрішнім тиском тощо. Широко застосовують різного роду допоміжні елементи, наприклад важелі, редуктори для масштабування переміщення.

2.1.1. Загальні засади роботи перетворювачів підкласу R

Загальна математична модель перетворювача підкласу R (користуючись тезами розділу 2) та його реакція на зовнішні чинники матиме вигляд:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial x_e} dx_e + \frac{\partial R}{\partial x_m} + \frac{\partial R}{\partial x_{em}} dx_{em} + \frac{\partial R}{\partial x_c} dx_c, \quad (2.1)$$

де x_e – комплекс електрофізичного впливу;

x_m – комплекс механічного впливу;

x_{em} – комплекс електромагнітного впливу;

x_c – комплекс світлового впливу;

Часткові похідні у правій частині рівняння (2.1) є залежностями, які показують чутливість перетворювача підкласу R до різних зовнішніх чинників впливу. Функціональні залежності до зовнішнього чиннику впливу надають можливість побудови відповідних конструкцій перетворювачів з чутливістю до відповідної компоненти зовнішньої дії. Зазвичай це є комплексна проблема, яка призводить до певної втрати точності. Тому у цих випадках використовують різні схемотехнічні рішення, які дозволяють звести нанівець вплив небажаного стороннього фізичного впливу.

Найбільш небажаним чинником фізичного впливу на точність систем типу R є температура. Оскільки для побудови цих перетворювачів використовують матеріали, які мають властивості електропровідності (метали, напівпровідники, електроліти тощо) і, як наслідок, велику залежність від температури зовнішнього середовища. Приблизно це можна описати виразом:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_\theta(\theta_2 - \theta_1)], \quad (2.2)$$

де R_2 та R_1 – опір при температурі θ_2 та θ_1 ;

α_θ – температурний коефіцієнт опору (ТКО), який для більшості металів станове $0,004\text{K}^{-1}$.

Виключення з цього ряду мають лише спеціальні термостабільні сплави для яких $\alpha_0 = (1 \div 1.5) \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$.

Наступний випадок стосується процесів, які відбуваються під дією механічних навантажень, що викликають відносну деформацію:

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E}, \quad (2.3)$$

де σ – нормальна напруга, а E – модуль Юнга, яка, в свою чергу, зв'язана з коефіцієнтом тензочутливості:

$$K_T = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}. \quad (2.4)$$

Металеві опори мають $K_T = 2 \div 2.5$, а для напівпровідників ця величина станове $K_T = 100 \div 200$.

Чутливість до тиску визначається барічним коефіцієнтом:

$$K_p = \frac{\Delta R / R}{\Delta P}. \quad (2.5)$$

Цей коефіцієнт для металів починає працювати лише при надвисоких тисках близько 10^8 Па. Так, наприклад, для виміру надвисокого тиску (до $30 \cdot 10^8$ Па) використовують манганін, барічний коефіцієнт якого станове $(2,5 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1})$. Для роботи в агресивному середовищі використовують стоп золота з хромом, для якого $K_p = 1,05 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$.

Вплив магнітного поля є помітним лише у матеріалах, виконаних з спеціальних топів, тому для більшості матеріалів це явище просто не враховується. Назва таких елементів – магніторезистор, а чутливість до магнітного поля визначається коефіцієнтом

$$K_m = \frac{\Delta R / R}{B}. \quad (2.6)$$

Величина K_m для сильних магнітних полів ($B = 1$ Тл) може сягати величини $20 \div 50 \text{ Тл}^{-1}$.

Освітленість теж впливає на опір матеріалу. Особливо це стосується напівпровідникових матеріалів, де різниця «пітьма – світло» може мати перепад у $10 \div 1000$ разів.

Якщо не розбиратися достеменно у конструкційних особливостях цього підкласу перетворювачів, то їх можна розділити на дві великі групи. Перша група найбільш простіша, оскільки вона вирішує просте питання різниці у опорі за принципом $R = 0$ та $R = x$.

Друга група є більш складна, оскільки вирішує питання про зміну функції вихідного сигналу залежно від вхідної дії, тобто у цьому випадку маємо залежність та $R = f(F)$, де F є функція вхідної дії.

2.2. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПІДКЛАСУ C

Перетворювачі підкласу C побудовані на властивостях електричної ємності зберігати на своїх обкладинках електричний заряд. Будь-який перетворювач підкласу C у своїй конструкції має два металеві електроди площею S . Ці електроди розташовані паралельно один від одного на відстані Δ у середовищі з діелектричним проникненням ϵ .

2.2.1. Загальні засади перетворювачів підкласу C

Якщо на пластині є заряд q , то в цьому випадку кажуть, що $q = UC$, де C – ємність, а U – напруга між пластинами. За плоскопаралельного розташування пластин (без урахування крайового ефекту):

$$C = \frac{\epsilon S}{\Delta}. \quad (2.7)$$

Енергія електричного поля у цьому випадку:

$$W_e = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}. \quad (2.8)$$

Як видно з (2.7) функція ємності є чисто геометрична, на величину якої впливає діелектричний коефіцієнт ϵ , тобто зміну ємності можна уявити як функцію:

$$dC = \frac{\partial C}{\partial x_r} dx_r + \frac{\partial C}{\partial x_\epsilon} dx_\epsilon + \dots + \frac{\partial C}{\partial x_b} dx_b, \quad (2.9)$$

де x_r – змінна геометричних параметрів;

x_ϵ – змінна параметрів діелектрика;

x_b – змінна параметрів вологості.

У випадку, коли одна з пластин має можливість пересуватися (або діелектрик між ними), то з погляду механіки перетворювач характеризується

жорсткістю підвіски рухомої частини ω , зміщенням x , швидкістю переміщення

$$V = \frac{dx}{dt}, \text{ та електростатичною силою притягання } f_{el} = \frac{dW_e}{dx}.$$

Такий взаємозв'язок можна описати наступними рівняннями.

$$dF = \omega x + E_0 C_0 u; \quad dq = E_0 C_0 x + C_0 u. \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) надані у лінеаризованому вигляді, тобто зроблено припущення, що величини U та x досить малі у порівнянні з початковою напругою та щільною, і, як наслідок, ємність C_0 та напруженість поля E_0 вважаються постійними.

З наведених рівнянь добре видно, що будь яка механічна дія призводить до зміни електричних параметрів перетворювачів і, навпаки, будь-який електричний вплив призводить до змін механічних параметрів. Для характеристики цієї взаємодії слугує коефіцієнт електромеханічного зв'язку $k_{em} = E_0 C_0$. Цей взаємозв'язок повинен враховуватися при будь-яких застосуваннях перетворювачів C – підкласу. Так наприклад, якщо з першого рівняння є залежність напруги U від зміщення, то еквівалентна жорсткість увімкненого у ланцюг перетворювача відрізняється від жорсткості підвіски. З другого рівняння є висновок, що струм через перетворювач визначається не тільки складовою $i_1 = (dq/dt)_1 = C_0 dU/dt$, але і не завжди враховуємою складовою зміщення електродів, тобто:

$$i_2 = (dq/dt)_2 = E_0 C_0 dx/dt. \quad (2.11)$$

З практичного погляду перетворювачі підкласу C оцінюються тим, як їм піддається контроль у технологічних процесах металообробки. Для цього необхідно орієнтуватися на можливий вихідний сигнал, який залежить від:

- а) зміни ємності – C ;
- б) зміни електростатичної сили – f_{el} ;
- в) ЕРС, яка генерується ємністю, яка перебуває у електричному полі;
- с) зміна площі – S ;

д) зміна величини щілини – δ ;

е) зміна величини діелектричної проникності – ϵ .

Звісно, що вище названі параметри є функціонально залежними від зовнішнього впливу, що і є конструктивною задачею при побудові перетворювачів подібної дії. Тому, орієнтуючись на обраний параметр, необхідно зводити нанівець можливості впливу всіх інших.

Необхідно зауважити, що перетворювачі підкласу C розподіляють на дві великі групи, хоча там і відсутній чіткий перехід, а саме: електростатичні та ємнісні. Так, наприклад, для перетворювачів, чутливих до напруженості поля, вихідною є силова характеристика. Для ємності, яка примусово працює за відомим законом, як наприклад, $C = C_0 + \Delta C \sin \omega t$, перетворювач працює у модуляторах та вимірювачах поверхневого заряду, тобто генераторному режимі.

Перетворювачі такого типу залежно від сталої часу RC – ланцюгу (рис. 2.1) можуть працювати у стані заданого заряду при $\omega RC \gg 1$ та заданої напруги при $\omega RC \ll 1$.

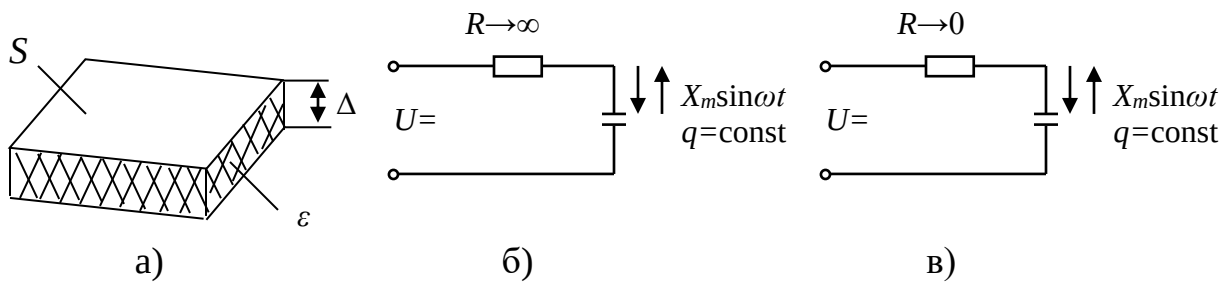


Рис. 2.1. Робота перетворювача а підкласу C при $\omega RC \gg 1$ (а) та при $\omega RC \ll 1$ (б)

Для першого випадку це:

$$q = CU_C = \text{const}; U_C = \frac{q}{C} = \frac{C_0 U_x}{C_0 + \Delta C \sin \omega t} = U_x \left(1 - \frac{\Delta C}{C} \sin \omega t \right), \quad (2.12)$$

тобто вихідною величиною є змінна складова напруги U_C (або U_R).

Для другого випадку це:

$$U_C = U_x = \text{const}; q = (C_0 + \Delta C \sin \omega t) U_x, \quad (2.13)$$

тобто вихідною величиною пропорційною постійній напрузі U_x є струм

$$i = dq / dt = U_x \omega \Delta C \cos \omega t. \quad (2.14)$$

Основне застосування генераторного режиму при контролі процесів металообробки є побудова перетворювачів вібрацій.

2.3. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПІДКЛАСУ L

Чутливими елементами перетворювача підкласу L є котушки з дроту, виконані за будь-якою технологією. З огляду на конструктивні особливості - це закінчена геометрична фігура довільної форми виконана з дроту, основним параметром якої є її геометрія та кількість витків, тобто перетворювач підкласу L являє собою один або декілька контурів, що знаходяться в магнітному полі, яке може бути створене як струмами, що протікають по контурам, так і зовнішнім джерелом.

2.3.1. Загальні властивості перетворювачів підкласу L

У випадку, коли у цьому просторі (катушки) є присутнім деяке фізичне тіло, яке має кінцеві магнітні властивості, то вона (катушка) змінює свою індуктивність, тобто її властивості змінюються. Звичайно більша якість характерна для катушок з регулярною намоткою ніж хаотичною. Звертаючись до розділу 3 загальна математична модель перетворювача підкласу L або його реакція на зовнішні чинники матиме вигляд:

$$dL = \frac{\partial L}{\partial x_r} dx_r + \frac{\partial L}{\partial x_m} dx_m + \dots + \frac{\partial L}{\partial x_\mu} dx_\mu, \quad (2.15)$$

де x_r – комплекс геометричного впливу на загальну форму; x_m – комплекс, зв'язаний з магнітним полем, у якому знаходиться котушка; x_μ – характер впливу осердя котушки, якщо такий є.

Основний зв'язок індуктивності з електричними параметрами має залежність у вигляді:

$$e = -L \frac{di}{dt}. \quad (2.16)$$

З цього виразу видно, що перетворювачі підкласу L можуть працювати лише у випадку, коли $di/dt \neq 0$. У всіх інших випадках індуктивність працює як звичайний опір або утворювач постійного магнітного поля.

Одноконтурний перетворювач (рис. 2.2) характеризується струмом i через контур, потокозчепленням $\psi = Li$, протиЕРС $e = -d\psi/dt$, енергією електромагнітного поля $W_m = \psi i / 2 = Li^2 / 2$, індуктивністю L . Вихідною величиною одноконтурного перетворювача може бути: індуктивність L , електромагнітна сила F_{em} та індукована в контурі ЕРС e_{ind} .

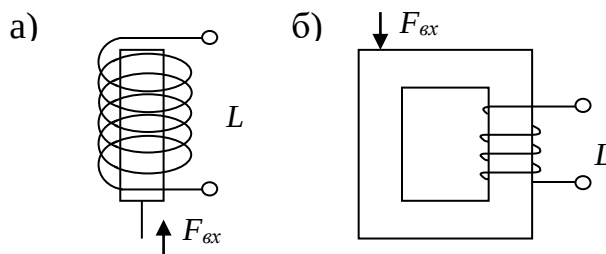


Рис. 2.2. Одноконтурний перетворювач: а – зміна індуктивності під дією рухомого магнітного осердя, б - зміна індуктивності під дією магнітострикційного ефекту [20]

Індуктивність перетворювача у загальному вигляді $L = w^2 (R_e Z_m / z_m^m)$, де w – число витків контуру; $R_e Z_m$ і z_m – дійсна частина і модуль повного магнітного опору $Z_m = \oint dl_m / \mu S_m$ шляху l_m , по якому замикається потік; S_m – поперечний переріз потоку; μ – магнітна проникність середовища, по якому

замикається потік. Індуктивність перетворювача збільшується, якщо в магнітне поле контуру вводиться феромагнітний матеріал.

Перетворювач з феромагнітним осердям, показаний на рис. 2.3. Зміна його індуктивності проходить при зміні положення осердя. Отже, входною величиною перетворювача є переміщення. Вимірювання індуктивності відбувається також при зміні магнітної проникності осердя.

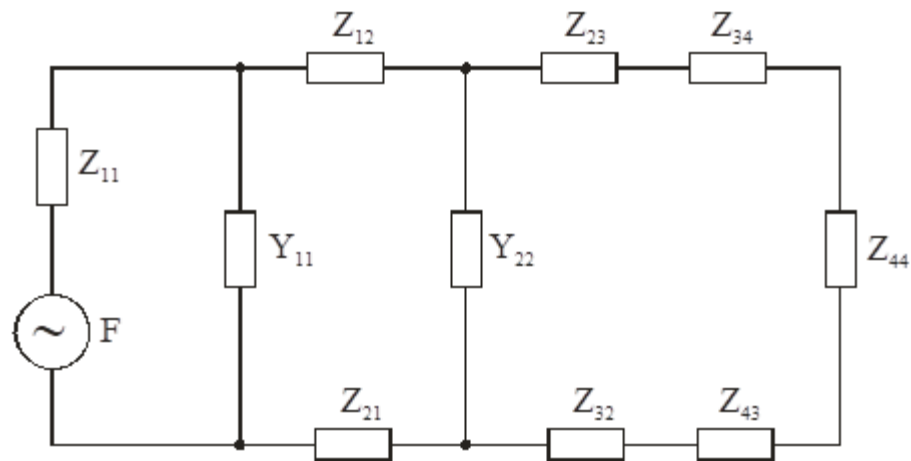


Рис. 2.3. Перетворювач з феромагнітним осердям, еквівалентна магнітна схема

На рис. 2.3 зображено магнітне коло електромагнітного перетворювача з обмоткою $W1$, число витків котрої дорівнює $W1$. Повний опір обмотки $W1$, нехтуючи втратами магнітного потоку, можна записати у вигляді

$$Z = R_0 + j\omega \frac{\omega_1^2}{Z_M} = R_0 + j\omega \frac{\omega_1^2}{Z_{MFe} + R_\delta} = R_0 + j\omega \frac{\omega \omega_1^2 X_M}{(R_\delta + R_M)^2 + X_M^2} + j\omega \frac{\omega_1^2 (R_\delta + R_M)^2}{(R_\delta + R_M)^2 + X_M^2} = R_{\text{екв}} + j\omega L, \quad (2.17)$$

де R_0 – опір обмотки постійному струму; Z_{MFe} – магнітний опір феромагнітної частини магнітного кола, котру при роботі перетворювача на змінному струмі слід вважати комплексним: $Z_{MFe} = R_M + jX_M$ (X_M – відображає втрати у феромагнітику на гістерезис та вихрові струми); $R_\delta = 2\delta/(\mu_0 S)$ – опір

повітряної щілини, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнітна проникність повітря; δ і S щілина і площа зазору.

Розрахунок магнітного ланцюгу електромагнітного перетворювача з урахуванням опору витоків проводиться на основі еквівалентної схеми магнітного ланцюгу (рис. 2.3,б). Для спрощення розрахунку здебільшого можна припустити зосередженими комплексні магнітні опори окремих ділянок ланцюгу $Z_1 - Z_2$, магнітні опори повітряних щілин R_{δ_1} і R_{δ_2} і провідності шляхів витоків Y_{11} і Y_{22} .

Розрахунок опору кожної із ділянок залежить від значення індукції в матеріалі, що визначає значення μ (рис. 2.4), і від ступеня прояву поверхневого ефекту в матеріалі.

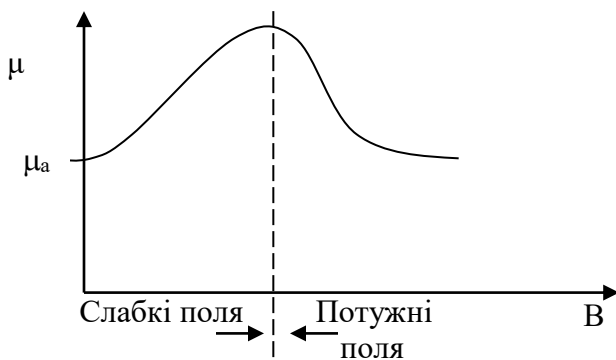


Рис. 2.4. Залежність значення магнітної проникності від індукції в матеріалі

Поверхневий ефект необхідно враховувати, якщо товщина листа або суцільного магнітопровода $a > z_{0.05}$, де $z_{0.05}$ – глибина проникнення електромагнітної хвилі в матеріал (тобто глибина загасання її на 95%); $z_{0.05}$ зменшується із збільшенням частоти як $z_{0.05} = k / \sqrt{\omega}$. Для сталі, наприклад, при частоті 50 Гц $z_{0.05} = 1 \div 2$ мм.

У постійному магнітному полі магнітний опір кожної ділянки розраховується як $R_{mi} = l_i / (\mu_i S_i)$, де l_i , μ_i і S – довжина, магнітна проникність і площа поперечного розрізу i -ї ділянки відповідно.

У змінному магнітному полі за відсутності або слабкому прояві поверхневого ефекту (коли напруженість поля зменшується по перерізу від периферії до центру, але потоком заповнений ще весь переріз сталі) активна R_{mi} і реактивна X_{mi} складові опору кожної ділянки ланцюгу розраховуються по формулах:

$$R_{mi} = l_i / (\mu_i S_i); X_{mi} = P_{ct} / (\omega \Phi_i^2), \quad (2.18)$$

де Φ_i – діючий потік; P_{ct} – напруженість втрат на гістерезис і вихрові струми.

При сильному прояві поверхневого ефекту магнітні опори визначаються не по площам S_i , а по периметрам u_i перетинів феромагнітних ділянок:

$$R_{mi} = \rho l_i / u_i; X_{mi} = \chi l_i / u_i, \quad (2.19)$$

де ρ і χ – віддалені поверхневі опори, що залежать від властивостей матеріалу, частоти і лінійної щільності магнітного потоку Φ_i / u_i .

2.4. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ПІДКЛАСУ *RLC*

Перетворювачі підкласу *RLC* являють собою конструкцію електричного ланцюгу, який об'єднує у собі риси основних електричних компоненти, а саме:

- елемент електричного опору (R);
- елемент електричної ємності (C);
- елемент електричної котушки (індуктивності) (L).

Необхідно розглянути саме ті властивості, які ми можемо отримати внаслідок з'єднання цих елементів у одне ціле, і які саме властивості притаманні цим з'єднанням можна застосувати при контролі процесів металообробки.

2.4.1. Перетворювачі підкласу RLC

З'єднання у єдиний електричний ланцюг цих електричних елементів RLC називається електричним коливальним контуром. Варіантів такого з'єднання існує лише два (рис. 2.5). Усі інші варіанти з'єднань зводяться саме до них і нічого іншого. Саме ці два варіанти є засадними при побудові перетворювачів підкласу RLC .

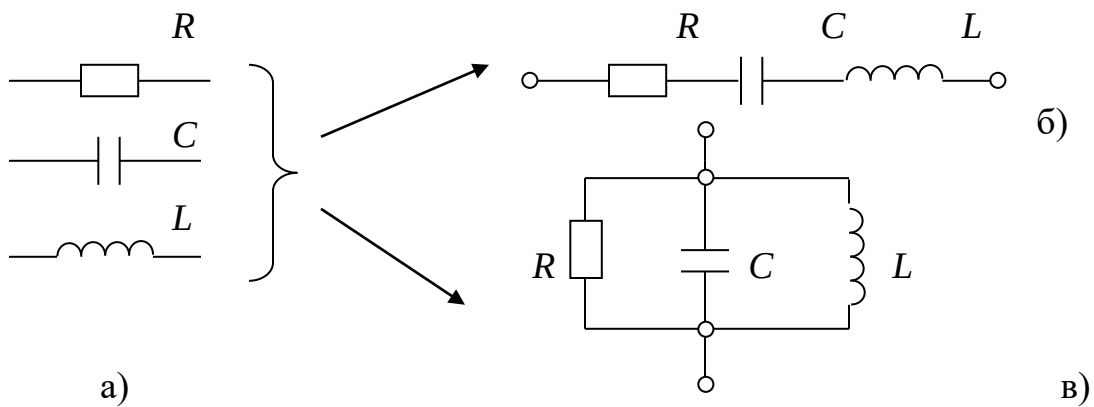


Рис. 2.5. Варіанти побудови чутливого елементу перетворювачів RLC :
а) основні електричні компоненти; б) послідовний електричний контур RLC ; в) паралельний електричний контур RLC

Рівняння, яке дає опис роботи коливального контуру є наслідком рівнянь Максвела, яке дає опис електромагнітної індукції. Згідно теорії Максвела чинником виникнення індукційного струму в провіднику є змінене магнітне поле $\mathbf{B}$, яке викликає появу електричного поля $\mathbf{E}$.

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} d\mathbf{S} \quad (2.20)$$

звідкіля

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{s} = - \frac{\partial \Phi_m}{\partial t}, \quad (2.21)$$

де Φ_m – магнітний потік крізь контур;

S – поверхня, яка обмежена контуром L ;

dl – елемент контуру L ;

ds – елемент контуру L .

Вигляд такого рівняння:

$$\frac{d}{dt} \left(L \frac{dq}{dt} \right) + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = E, \quad (2.22)$$

де L – індуктивність контура;

C – ємність контура;

R – опір контура;

q – заряд на ємності C ;

E – ЕРС джерела струму.

Якщо розділити ліву і праву частину рівняння (2.22) на L , то отримуємо більш спрощений вираз, а саме:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = F_3, \quad (2.23)$$

$$\text{де } \omega_0^2 = \frac{1}{LC}; 2\beta = \frac{R}{L}; F_3 = \frac{E}{L}.$$

Тут величина ω_0 є частота коливань у контурі, β – коефіцієнт згасання; F_3 – збурююча сила.

Як видно з цього спрощеного розгляду цьому підкласу перетворювачів притаманна низка властивостей, які є можливість застосувати для різних випадків контрольно- вимірювальних процесів, зокрема у металообробці.

2.4.2. Індукційні властивості перетворювачів підкласу RLC

Індукційні властивості перетворювачів підкласу RLC [56, 57] засновані на використанні явища електромагнітної індукції. Згідно закону електромагнітної індукції, ЕРС у контурі визначається формулою $e = -d\psi/dt$, де ψ – потокозчеплення з контуром. Отже, вихідною величиною індукційного

ЧЕ перетворювача підкласу RLC є ЕРС, а входною швидкість зміни потокозчеплення.

У загальному випадку індукційний перетворювач являє собою котушку з осердям, яка характеризується деяким загальним параметром Y і ЕРС, в якій може індукуватися, як наслідок зміни в часі зовнішнього магнітного поля, так і внаслідок зміни в часі параметра Y перетворювача. Якщо перетворювач знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією B , то в його обмотці, що має w витків, наводиться ЕРС

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -w \frac{d\Phi}{dt} = -w \left(Y \frac{\partial B}{\partial t} + B \frac{\partial Y}{\partial t} \right). \quad (2.24)$$

Узагальнений параметр перетворювача $Y = \frac{S\dot{\mu}}{1 + N(\dot{\mu} - 1)} \cos \alpha$ є функцією чотирьох часткових параметрів α , S , $\dot{\mu}$ і N , де α – кут між магнітною віссю перетворювача, співпадаючою з нормаллю до площини обмотки, і вектором магнітної індукції; S – площа поперечного перерізу котушки; μ – магнітна проникність середовища в одиницях μ_0 ; N – коефіцієнт розмагнічування осердя, який визначається формою і співвідношенням розмірів осердя.

Звичайно у перетворювачу змінюється один з параметрів при постійних значеннях інших, з рівняння (2.24) можна одержати п'ять часткових рівнянь перетворення індукційних перетворювачів.

При $Y = \text{const}$

$$e[B(t)] = -wS \frac{\dot{\mu}}{1 + N(\dot{\mu} - 1)} \cos \alpha \frac{dB}{dt} \quad (2.25)$$

При $B = \text{const}$

$$e[\alpha(t)] = wS \frac{\dot{\mu}}{1 + N(\dot{\mu} - 1)} \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt} \quad (2.26)$$

$$e[S(t)] = -w \frac{\dot{\mu}}{1 + N(\dot{\mu} - 1)} \cos \alpha \frac{dS}{dt} \quad (2.27)$$

$$e[N(t)] = -wSB \frac{\dot{\mu}}{[1 + N(\dot{\mu} - 1)]^2} \frac{dN}{dt} \quad (2.28)$$

$$e[\dot{\mu}(t)] = -wS \cos \alpha \frac{1 - N}{[1 + N(\dot{\mu} - 1)]^2} \frac{d\dot{\mu}}{dt}. \quad (2.29)$$

Для ЧЕ перетворювачів без осердя рівняння перетворення істотно спрощуються і для основних видів зводяться до наступних:

а) для нерухомого перетворювача в змінному магнітному полі ($B = B_m \cos \omega t$, $\alpha = 0$)

$$e = \omega wSB_m \sin \omega t, \quad (2.30)$$

б) перетворювач, що обертається з частотою Ω у постійному магнітному полі з індукцією B_0

$$e = \Omega wSB_0 \sin \Omega t; \quad (2.31)$$

в) для контуру, окремі ділянки якого лінійно переміщуються у магнітному полі, змінюючи площу потоку зчеплення з ним,

$$e = \oint_l [vB] dl; \quad (2.32)$$

г) для відрізка довжиною l , що рухається однорідному магнітному полі зі швидкістю v так, що напрями векторів $\mathbf{I}$, $\mathbf{B}$ і $\mathbf{v}$ взаємно перпендикулярні,

$$e = vBl. \quad (2.33)$$

Індукційні перетворювачі широко застосовуються для вимірювання параметрів магнітних полів, частоти обертання, параметрів вібрації, витрат рідких речовин тощо.

2.5. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

Для вимірювання магнітної індукції змінного магнітного поля

застосовуються перетворювачі із стаціонарними (нерухомими) обмотками. Функція перетворення перетворювача відповідає рівнянню (2.25). Коефіцієнт перетворення, що пов'язує діюче значення індукованій ЕРС з амплітудним значенням індукції періодично симетрично змінного магнітного поля, визначається виразом

$$K_B = E / B_m = 4k_\Phi f w S \cos \alpha \dot{\mu} / [1 + N(\dot{\mu} - 1)], \quad (2.34)$$

де k_Φ – коефіцієнт форми кривої; f – частота змінного магнітного поля.

При спотвореній формі кривої звичайно вимірюють середнє значення індукованої ЕРС $E_{cp} = E / k_\Phi$.

Для вимірювання індукції постійного магнітного поля можуть бути використані і перетворювачі з умовно стаціонарною обмоткою, і перетворювачі з примусовим рухом обмотки.

У перетворювачах із стаціонарною обмоткою зміна магнітного потоку, що зчеплюється з витками обмотки, може відбуватися в наслідок зміни самого вимірюваного поля, наприклад при вимірюваннях магнітного поля, що викликається включенням деякого агрегату, або в наслідок одноразової зміни положення самого перетворювача - видалення перетворювача з магнітного поля або повороту в полі на 90^0 або 180^0 .

Вихідним сигналом такого перетворювача є імпульс струму чи імпульс ЕРС, які виникають при зміні повного магнітного потоку. Зміна потоку $\Delta\psi$ пов'язана з ЕРС і струмом, як

$$\Delta\psi = \int_{t_1}^{t_2} e dt = r \int_{t_1}^{t_2} i dt = rQ, \quad (2.35)$$

де r – повний опір вимірювального ланцюга з урахуванням опору перетворювача;

Q – кількість електрики.

Як інтегратор здебільшого використовується балістичний гальванометр (при інтеграції струму) або магнітоелектричні, фотогальванометричні і

електронні веберметри з операційними підсилювачами, що застосовуються для інтеграції ЕРС.

Індукційні перетворювачі для вимірювання магнітних полів у повітряному просторі здебільшого виконуються у вигляді вимірювальних котушок різної форми, початок і кінець обмотки яких знаходяться в одному місці, щоб не створювалися додаткові контури підведеними дротами.

Для вимірювання напруженості магнітного поля при дослідженні феромагнітних матеріалів використовуються плоскі вимірювальні котушки, які розташовуються на поверхні досліджуваного зразка; при цьому вимірює у повітрі напруженість поля приймається рівною напруженості поля на поверхні зразка.

Для вимірювання магнітної індукції та напруженості неоднорідних магнітних полів доцільно використовувати кульові індукційні перетворювачі. Магнітний потік, що зчіплюється з такою котушкою, має опис $\Phi = 4\pi r^3 w B_0 / 3$, де B_0 – індукція в центрі ЧЕ перетворювача; r – радіус сфери; w – число витків на одиницю довжини осі zz' , яка повинна співпадати з вектором B_0 .

Для вимірювання МРС використовуються індукційні перетворювачі, що називаються магнітними потенціалометрами і зазвичай виконуються у вигляді рівномірної обмотки на гнучкому ізоляційному каркасі. Обмотка виконується з парним числом шарів так, щоб виходи знаходилися у середині обмотки. Магнітний потенціалометр розміщується у магнітному полі таким чином, щоб його кінці знаходилися в точках А і В, між якими вимірюється ЕРС.

Магнітний потік, що зчіплюється з витками потенціалометра, рівний

$$\psi = Sw\mu_0 \int_A^B H_x dl = Sw\mu_0 F_x. \quad (2.36)$$

Поріг чутливості засобів вимірювань із стаціонарними індукційними перетворювачами визначається головним чином механічними перешкодами (вібрації, деформації та акустичні дії), які призводять до коливань перетворювача і

наведенню додаткової ЕРС, а також дрейфом інтегруючого вихідного каналу фільтра.

2.6. ЗАСАДИ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПІДКЛАСУ *RLC*

З вище наведених формул маємо те, що для підвищення чутливості необхідно збільшення τ_L . Для цього існують наступні засоби:

1. Обрання матеріалу осердя з більшою початковою магнітною проникністю – μ_a та малими магнітними втратами:

2. Збільшення співвідношення $\frac{S}{2\pi r} \left(\begin{array}{c} b \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \\ \text{або} \frac{d_2}{d_1} \end{array} \right)$.

3. Збільшення числа витків w .

4. Збільшення опору навантаження R_a .

Однак практичні можливості збільшення τ_L обмежені з низки причин:

1. Доволі обмежений вибір матеріалу осердя, оскільки необхідні матеріали з великою початковою магнітною проникністю у частині високочастотних коливань (до 10^7 Гц). Найбільш зручними є магнітом'які матеріали з ферокераміки на засадах марганцю, нікелю, цинку та заліза, у яких $\mu_{max} = 3000 \dots 4000$ [2, 21]. Використовувати для цих цілей холоднокатані електротехнічні сталі не вигідно з огляду не стільки на втрати на гістерезис, скільки через зниження робочої частоти. До ферокерамічних матеріалів додаються умови високої вологостійкості та стабільності μ_a у досить широкому діапазоні температур ($0 \dots 60^\circ\text{C}$). Водночас необхідно брати матеріали з досить високою механічною міцністю, оскільки деякі осердя відносно тонкі за товщиною у порівнянні із загальною геометрією

$$2. \text{ На розмір співвідношення } \frac{S}{2\pi r} \left(\text{або } \frac{b \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi} \right) \text{ накладаються}$$

обмеження конструкційного характеру, оскільки збільшення перерізу осердя призведе до збільшення габаритів перетворювача. Практично внутрішній діаметр перетворювача обмежений діаметром шпинделя верстата або геометрією різального інструмента. Зовнішні розміри перетворювачів обмежені конструкційними особливостями технологічного обладнання та зручністю користування.

Особливо жорстокі вимоги висуваються до товщини осердя, максимальне значення якої не повинно перевищувати 3÷5 мм. Ця вимога виникає з тих обставин, що узагальнена товщина перетворювача обмежує реальні розміри обробного інструмента, тобто його проникності в масу деталі. Всі ці вимоги висувають необхідність використання ферокерамічних матеріалів з досить високою міцністю.

3. Збільшення кількості витків обмотки, нанесеної на осердя, обмежено умовою одноповерховості, і, як наслідок, кількість витків є залежна від діаметру використовуваного дроту.

4. Наступною засадою підвищення якості перетворювача є зменшення τ_c . Зменшення τ_c , яка зв'язана з ємністю навантаження C_n , обмежене паразитною ємністю $C_{пар}$, яка у свою чергу складається з поміжвиткової ємності C_{nv} та ємності на корпус та землю C_z і вхідної ємності вимірювальної схеми $C_{вх}$. Окрім того для перетворювачів, встановлюємих на токарні верстати, додається ще ємність кабелю C_k .

Збільшення кількості витків w обмотки обмежується зростанням поміжвиткової ємності C_{nv} , що, як наслідок, призводить до зниження робочої частоти перетворювача і умовного зниження чутливості. На C_{nv} дуже впливає діелектрична проникність матеріалу герметичного захисту ЧЕ перетворювача.

До такого матеріалу висуваються вимоги малого значення діелектричної проникності та високої вологостійкості. Як показала практична робота у цьому напрямку максимально ефективними є ЧЕ, частота яких після складання перетворювачів витримується у межах на 5...10% більшою за робочу частоту системи торкання. Така розбіжність пояснюється температурним дрейфом μ_a – матеріалу осердя та розмірами робочої частоти. Так для робочої частоти у 100 кГц необхідно необхідно обирати ЧЕ перетворювача з резонансною частотою у 110 кГц, а для частоти 1 МГц частота перетворювача повинна становити близько 1,05 МГц. Після підключення цих перетворювачів до реєструючого пристрою (додається C_{ex}) максимальна чутливість підвищується, хоча робоча частота зменшується на 5÷10 % відповідно.

Так, наприклад, вплив розмірів щілини між перетворювачем та масою обладнання утворює ємність, яка є найбільшою складовою у складі C_3 і стабілізується після розміру у 2 мм. Але використання прошарку таких розмірів призводить до невиправданого зростання розмірів ЧЕ перетворювача.

5. На якість роботи перетворювача впливає також і якість обраних матеріалів, радіоелектронних компонентів та технологія збирання. Між сталою часу перетворювача τ_q , його якістю Q_q та резонансною частотою f_0 існує залежність:

$$\tau_q = \frac{Q_q}{\pi f_0}, \quad (2.37)$$

де якість перетворювача Q_q є величина, яка складається з трьох основних компонент:

$$Q_q = \left(\frac{1}{Q_k} + \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \right)^{-1}, \quad (2.38)$$

де $Q_k = \frac{\omega L}{R_0}$ – добротність котушки;

$Q_c = \frac{R_c}{\omega L}$ – добротність магнітопроводу;

$Q_d = \frac{R_d}{\omega L}$ – добротність електричної ізоляції;

R_c – опір втрат у магнітопроводі;

R_d – опір втрат у ізоляції.

З (2.38) маємо те, що на якість перетворювача суттєвим чином впливає якість застосованих радіотехнічних матеріалів. Тому для підвищення якості перетворювача необхідно обирати матеріали з якомога нижчими значеннями втрат, одночасно звертаючи увагу на робочу частоту перетворювача.

Діелектрик, який заповнює поміжвитковий простір, може мати суттєві домішки повітря. Тому еквівалентна діелектрична проникність $\varepsilon_{\text{екв}}$ повинна враховувати конкретні об'єми самого діелектрика V та повітря V_0 :

$$\varepsilon_{\text{екв}} = \varepsilon \left(1 + 2 \frac{V_0}{V} \frac{1 - \varepsilon}{1 + \varepsilon} \right); \quad (2.39)$$

та задовольняти умові:

$$\frac{V_0 + V}{V_0 + \frac{V}{\varepsilon}} \leq \varepsilon_{\text{екв}} \leq \frac{V_0 + \varepsilon V}{V_0 + V}, \quad (2.40)$$

де ε - відносна діелектрична проникність матеріалу ізоляції [2].

Ця еквівалентна діелектрична проникність впливає на величину ємності між обмоткою та магнітопроводом, яка має опис:

$$C_{\text{екв}} = \frac{8\varepsilon_{\text{екв}} \cdot \varepsilon_0 \cdot r \cdot n \cdot p}{4a - \pi r}, \quad (2.41)$$

де ε_0 - діелектрична стала, $\varepsilon_0 = (4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11})^{-1} = 8,85 \times 10^{-14} \text{ Ф/ст}$,

r - радіус дроту обмотки;

p - периметр одного кола обмотки;

n - кількість кіл обмотки;

a - довжина обмотки (для тороїда $a_t = \pi D_{cp}$).

6. Для конкретних розрахунків індуктивності ЧЕ перетворювача користуватись залежністю [20] для магнітопроводу круглого перерізу:

$$L_q = \frac{\mu_a \mu_0}{4} \omega^2 \cdot D \cdot \ln \frac{D_3}{D_6}, \quad (2.42)$$

де D_3 та D_6 – відповідно зовнішній та внутрішній діаметри тору,

D – діаметр перерізу.

Для магнітопроводів прямокутного перерізу

$$L_q = \mu_a \mu_0 \omega^2 \cdot h \cdot \ln \frac{D_3}{D_B}, \quad (2.43)$$

або

$$L_q = \frac{\mu_a \mu_0 \omega^2 h t}{\pi D_{cp}} \quad (2.44)$$

де h, t - вісевий та радіальний розміри поперечного перерізу магнітопровода;

D_{cp} - середній діаметр кільця магнітопроводу.

При використанні магнітопроводів різного перерізу перевагу слід віддавати магнітопроводам з прямокутною формою. Такий вибір пояснюється можливістю отримання більш тонкого за перерізом осердя, яке займає менше місця у інструментальному просторі, хоча й існують втрати внаслідок підвищення паразитної ємності на масу технологічного обладнання автоматичної системи.

Контрольні питання

1. Які існують найбільш застосовані класи перетворювачів автоматизованих систем ?
2. В чому полягають загальні засади роботи перетворювачів підкласу R ?
3. В чому полягають загальні засади роботи перетворювачів підкласу C ?
4. В чому полягають загальні засади роботи перетворювачів підкласу L ?
5. В чому полягають загальні засади роботи перетворювачів підкласу RLC ?
6. Як можна застосовувати індукційні властивості перетворювачів підкласу RLC ?
7. Опишіть особливості перетворювачів систем автоматичного вимірювання параметрів магнітних полів

3. ОСНОВНІ ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ КОНТРОЛЮ ПІДКЛАСУ RLC

На сьогодні існує три основних різновиди побудови схем контролю торкання інструмента до деталі на засадах властивостей перетворювачів підкласу RLC . Всі ці варіанти використовують, у першу чергу, властивості індуктивного елемента реагувати на зміну магнітного поля, у середовищі якого він знаходиться.

Ще однією особливістю застосування перетворювачів RLC є те, що їх розташування тісно пов'язано з електричним контуром, який виникає при торканні інструмента до деталі. Для отримання високоякісного сигналу необхідно, щоб цей контур був охоплений осердям.

3.1. ПРИНЦИПИ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПІДКЛАСУ RLC

До найбільш простого конструкційного рішення відноситься СКТ, яка використовує принцип короткозамкненого трансформатора (рис.3.1).

Принцип дії подібної конструкції наступний. Генератор змінного струму виробляє синусоїдальний сигнал, який надходить до індуктивності (ЧЕ перетворювача) через опір R_6 . при відсутності контакту між інструментом та деталлю встановлюється якийсь обмежений струм i_0 . при цьому на баластному опорі R_6 встановлюється напруга U_B^0 , яка є крапкою відліку між торканням та неторканням. Ця напруга (U_B^0) є опорною при визначенні процесу торкання та неторкання. При торканні інструмента до деталі утворюється короткозамкнений виток, який внаслідок свого малого опору починає споживати значний струм. Це призводить до значного зростання струму живлення від генератора Г.

Збільшення струму живлення до величини i_T вважається за реалізоване торкання. Тобто система реагує на ситуацію, коли є

$$U_0 = i_0 R_b \rightarrow \text{неторкання}$$

$$U_T = i_T R_b \rightarrow \text{торкання.}$$

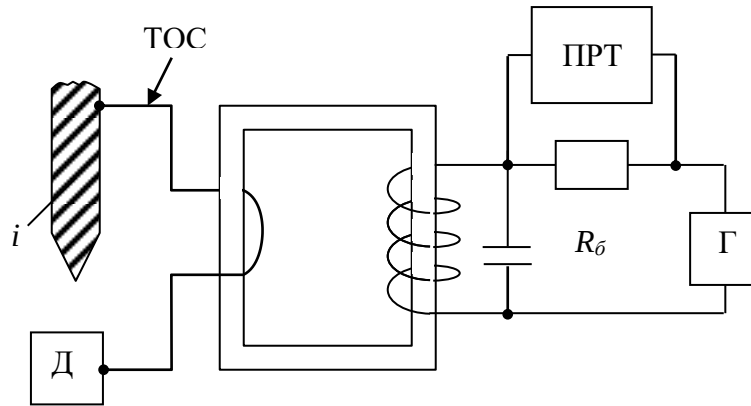


Рис. 3.1. Принцип дії перетворювача RLC при використанні ефекту короткозамкненого трансформатора: ПРТ – прилад реєстрації торкання; Г – генератор змінного струму; R_b – баластний опір; ТОС – технологічна обробна система (верстат); i – інструмент; Д – деталь

Звісно, що за цієї ситуації завжди повинен бути опорний рівень, тобто $U_0 = i_0 R_b$. Досить простого погляду на цей принцип роботи, щоб зрозуміти, що в основі його роботи полягає стрибкоподібна зміна магнітного поля.

Наступний принцип дії полягає у передачі інформації від генератора поля до його приймача. У цьому випадку реєстрація моменту торкання відбувається за подібним принципом, а саме зміни магнітного поля у системі ТОС. Але на відміну від попереднього замість резистора R_b використовують приймач підкласу RLC (рис. 3.2).

Недоліки попередньої конструкції, а саме співвідношення сигнал/шум призвели до подальшого її удосконалення. З цією метою було введено додаткове феромагнітне осердя, навантажене на ПРТ. Це надало можливість значно знизити шумову компоненту. У цьому випадку в мить контакту між

інструментом та деталлю виникає струм, який утворює навколо себе електромагнітне поле. Це поле реєструється приймальною частиною приладу. Тобто знов передача інформації відбувається за рахунок стрибкоподібної зміни магнітного поля.

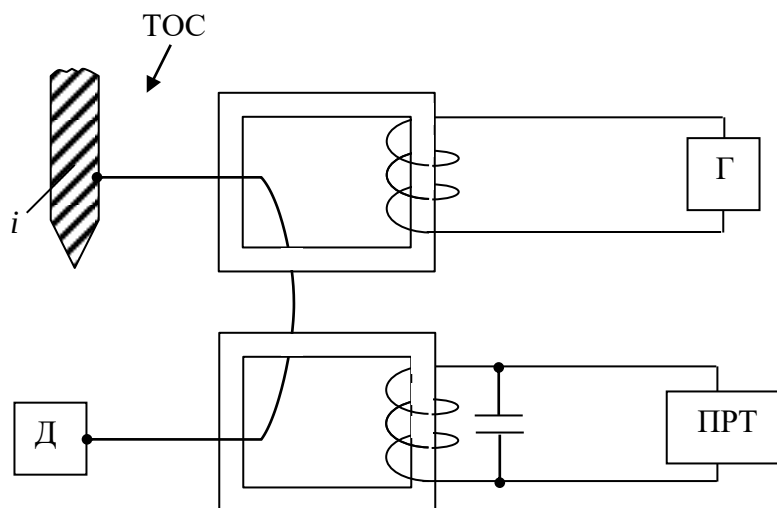


Рис. 3.2. Принцип дії перетворювача підкласу RLC при передачі електромагнітного поля, де: ПРТ – прилад реєстрації торкання; $Г$ – генератор змінного струму; $R_δ$ – баластний опір; $ТОС$ – технологічна обробна система (верстат); i – інструмент; $Д$ – деталь

Аналізуючи роботу цих приладів необхідно помітити, що за їх технічних даних вони реагують на струм у контурі $ТОС$ величиною 17 мкА і більш.

Реєстрація моменту торкання у цих приладах відбувається за однією типовою схемою (рис. 3.3). Сигнал, який надходить з чутливого елемента (опір або $ЧЕ$ перетворювача RLC) необхідно підсилити, а потім виділити постійну сталу. Наразі отримуємо сигнал у вигляді напівсинусоїди.

Для того, щоб здійснити згладжування напівсинусоїдального сигналу, використовують інтегруючий ланцюг або інтегратор на ОП. Отриманий сигнал надходить до компаратора. Для того, щоб врівноважити схему необхідно у

компараторі встановити опорний рівень, відносно якого вирішується питання торкання – неторкання. Для цього існує задавач опорного рівня. Компаратор навантажений на вхідні пристрої CNC.

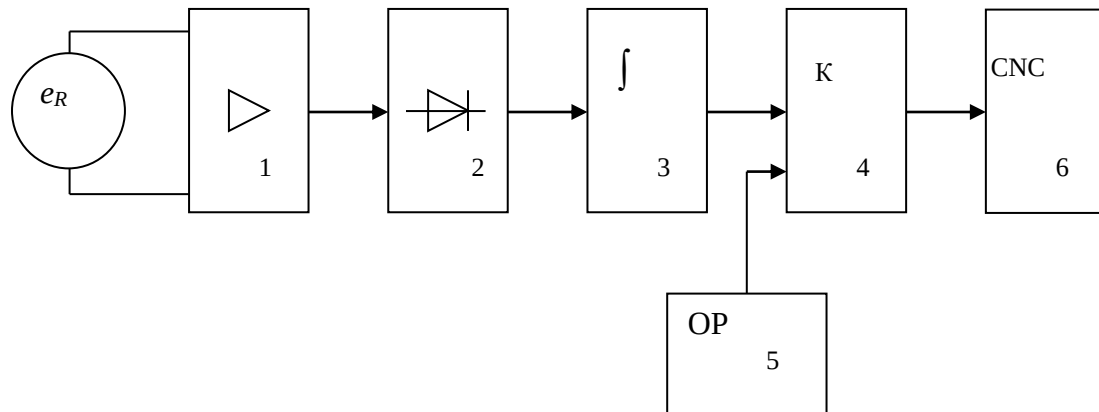


Рис. 3.3. Блок-схема каналу фільтрації інформації про торкання: e_R – ЕРС перетворювача, 1 – попередній підсилювач, 2 – випрямляч, 3 – інтегратор, 4 – компаратор, 5 – задавач опорного рівня, 6 - система CNC

Оскільки обидва принципи побудовані за приблизно однаковою системою, то і мають вони приблизно однакові характеристики щодо своїх переваг та недоліків.

Перший недолік – це низька чутливість до моменту торкання. За технічних даних це становить 17 мкА у технологічній системі обладнання (ТОС).

По-друге, низька робоча частота (32625 Гц), яку може використовувати подібна система. Ця вада пояснюється тим, що джерелом магнітного поля є феромагнітне кільце, яке охоплює масу шпинделя, інструмента тощо. При таких частотах втрати на перемагнічування, гістерезис та інше призводить до

того, що необхідно значно збільшувати потужність генератора, тому цей принцип знаходиться на межі своїх можливостей, занадто низька частота.

По-третє, пристрій реєстрації торкання має суттєву ваду, а саме у ланцюгу обробки присутній інтегратор, що не дає з відповідною точністю визначити час аналізу на торкання (це буде розглянуто далі).

По-четверте, відносно низьке співвідношення сигнал/шум, який станове порядку 15–20 дБ.

Наступний варіант побудови системи реєстрації торкання на засадах перетворювача підкласу RLC , заснований на природньо-технічних умовах, які виникають у масі верстата. На відміну від попередніх принципів роботи цей принцип заснований на засадах того, що у масі верстата, а це є велика електромагнітна маса, виникають струми під дією зовнішніх та внутрішніх електромагнітних полів. У цьому випадку електромагнітна система верстата може бути уявлена як сукупність контурів RLC , у кожному з яких реалізується певний електромагнітний спектр $S(\omega)$.

Принцип роботи такої системи відображено на рис. 3.4.

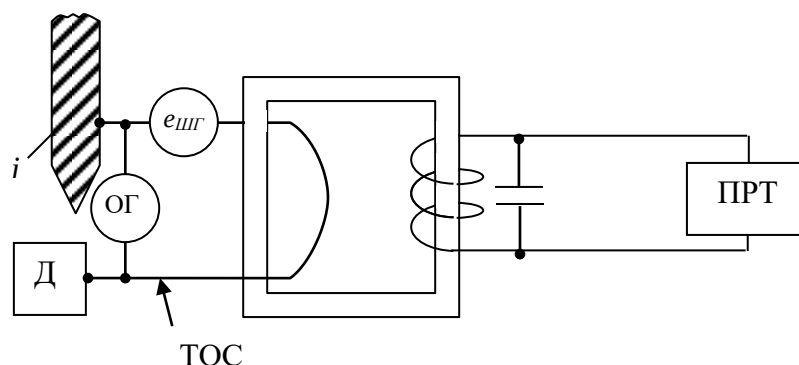


Рис. 3.4. Принцип дії перетворювача підкласу RLC при роботі у зоні шумового тла: $e_{шг}$ – генератор природнього шуму; ОГ – опорний генератор.

У цьому випадку перетворювач RLC налагоджується на конкретну гармоніку з спектру $S(\omega)$. Оскільки спектр $S(\omega)$ є досить рівномірним у межах

резонансної частоти це надає можливість створювати перетворювачі, які мають властивості до чутливості свого розташування у електромагнітному полі. Широкий спектр $S(\omega)$ дозволяє налагоджуватися на досить високі частоти, оскільки приповерхнєве магнітне поле визначається скін-ефектом [56, 57].

Генератор природного шуму ($e_{\text{шг}}$) забезпечує надійну сталу роботу використовуваного принципу. Але існує проблема стабільності шумового тла, оскільки воно впливає на стабільність зони присутності. Для цього у систему необхідно вводити спеціальний генератор підтримки фізичного принципу роботи [2]. При цьому генератор створює відповідні струми у масі технологічного обладнання і, як наслідок, стабілізацію польової структури деталі. На відміну від попередніх принципів роботи при відсутності торкання шумова компонента дуже мала, фактично це шумове тло верстата. При контакті різального інструмента з деталлю виникає стрибок струму, який реєструється перетворювачем. На відміну від попередніх принципів роботи цей принцип відчуває стрибки у $1 \div 3$ мкА. Окрім того, частота роботи такого перетворювача може сягати 1 МГц, що значно вище за попередні показники.

Розташований в системі ТОС перетворювач магнітного поля дозволяє вимірювати надслабкі зміни магнітних полів пов'язані з рухливою частиною ТОС. Тобто, реєструючи сигнал перетворювача і, водночас, оцінюючи його амплітуду, є можливість орієнтовно оцінювати відстань між інструментом та деталлю і на основі цього заздалегідь приготуватись до моменту торкання, а велика швидкість розповсюдження електромагнітного поля дозволяє отримати велику швидкодію у порівнянні з іншими системами.

3.2. ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ RLC В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Окремий тип застосування перетворювачів підкласу RLC полягає в тому, що створюється інтегрований тип, що містить у собі перехресні зв'язки перетворювачів, заснованих на використанні електромагнітних полів,

механічних полів, електричних полів, тобто в даному перетворювачі застосовують оптичні, акустичні (механічні), п'єзоелектричні, та електромагнітні явища. Таким прикладом є створення та застосування в автоматичних та автоматизованих системах моніторингу та контролю стану обладнання інтегрованих перетворювачів типу акустооптичного модулятора (АОМ). На основі їх застосування можна створювати різні оптично-електронні схеми спектрально-кореляційного аналізу вібраційних, електромагнітних явищ, що виникають в технологічному обладнанні при його функціонуванні.

Можна навести декілька прикладів побудови автоматизованих систем на основі таких інтегрованих перетворювачів підкласу RLC .

Лазерний оптико-електронний пристрій (рис.3.5) здійснює паралельний контроль також по силовим параметрам різання з урахуванням жорсткості системи ТО для підвищення достовірності керування металорізальним верстатом [24, 25].

Відомі некогерентні волоконно-оптичний перетворювачі вібрацій, що використовують зміни інтенсивності відображеного світлового потоку, є фільтром високих частот досліджуваного сигналу. Тому лазерний аналізатор призначений для контролю якості технологічного процесу різання тільки за низькочастотними складовими близько $(5 \div 10)$ кГц спектра сигналів вібрацій у зоні різання.

Крім того, для точності реєстрації механічних переміщень на поверхні РІ в період обробки, необхідно, як і при застосуванні прямих оптичних методів, спеціальні умови обробки: обдув зони різання від стружки, відсутність МОТС, масляних туманів тощо, що значно ускладнює процес контролю стану інструмента в реальних виробничих умовах.

Оскільки електричні сигнали, що характеризують динаміку процесу механообробки, звичайно інформативні в деяких частотних діапазонах (5 – 10 кГц, 20-300 кГц, 1-10 Гц), необхідно для підвищення точності аналізу та

діагностики якості плинного процесу паралельний аналіз вузьких смуг широкосмугового сигналу.

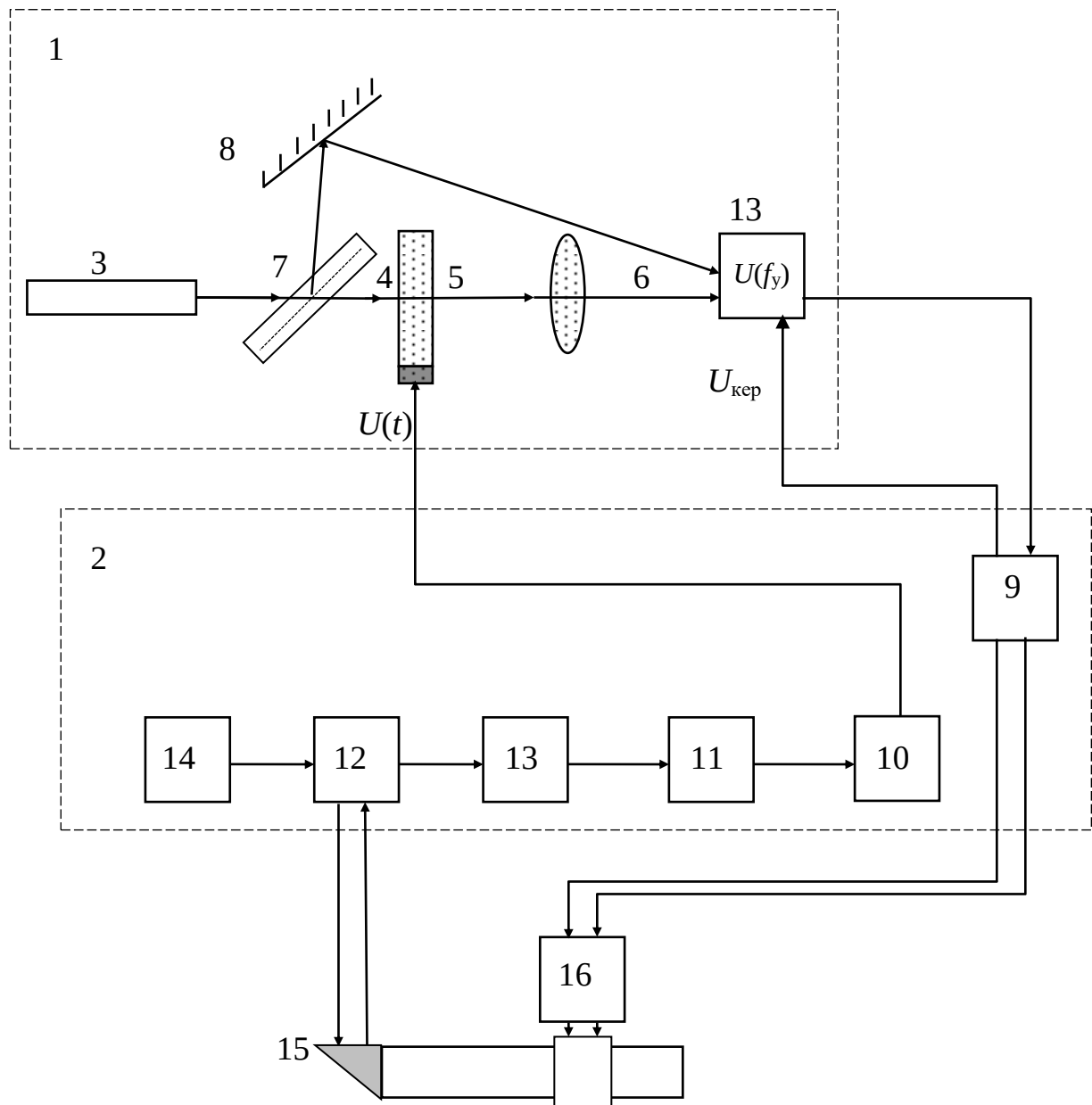


Рис. 3.5. Схема керування: 1 – когерентний спектроаналізатор, 2 – електронна система формування команд, 3 – лазер, 4 – АОМ, 5 – Фур'є-об'єктив, 6 – телевізійна трубка, 7 – напівпрозоре дзеркало, 8 – дзеркало, 9 – блок обробки інформації, 10 – фільтр, 11 – підсилювач, 12 – оптоволоконний перетворювач вібрацій, 13 – фотоприймачі, 14 – джерело світла, 15 – різальний інструмент, що контролюється, 16 – рушії верстата

Підвищення розділювальної здатності досліджуваних сигналів забезпечує оптична система спектроаналізатора, що містить дифракційний АОМ у вигляді напівсфери (рис. 3.6), лазер з перестроюваними частотами резонатора. АОСА містить електронну систему перетворення вхідного електричного сигналу у вигляді БМ коливання для зниження енергоємності системи та підвищення розділювальної здатності вихідного відеосигналу оптичної системи обробки інформації.

Багатоканальний електронний блок містить передчасний підсилювач, систему смугових фільтрів, генератор опорних напруг, підключений до каналів балансних модуляторів, підсилювачі потужності. Канали підсилювача потужності містять пристрій узгодження з п'єзоперетворювачами багатоканального АОМ.

П'єзоперетворювачі нанесені на сферичну поверхню АОМ по твірній на рівній відстані, що дозволяє фокусувати акустичні пучки в центрі напівсфери, що розташована на оптичній осі АОСА.

Сферично-опукла поверхня п'єзоперетворювачів АОМ коригує розширення смуги пропускання системи по частоті досліджуваного сигналу. При цьому весь широкосмуговий сигнал з електричного входу оптичної системи реєструють в різних ділянках частотного діапазону Δf_i ($i = 1, \dots, N$) паралельно.

Пучок вихідного випромінювання лазера розширюється коліматором та направляється на поверхню АОМ так, щоб його вісь проходила через центр півсфери, але не перетинала твірну, на якій нанесені п'єзоперетворювачі. За вихідним вікном АОМ на протилежній точці діаметра АОМ фокусують світловий пучок випромінювання, що представляє собою дифракційне зображення світлового сигналу, промодульованого по фазі сукупністю балансно-модульованих акустичних коливань $U_i(t)$ у дифракційних решітках звукопроводу АОМ. Для збільшення масштабу зображення за вихідним вікном

АОМ на оптичній осі розташована короткофокусна лінза, що дозволяє зменшити габарити оптичної системи.

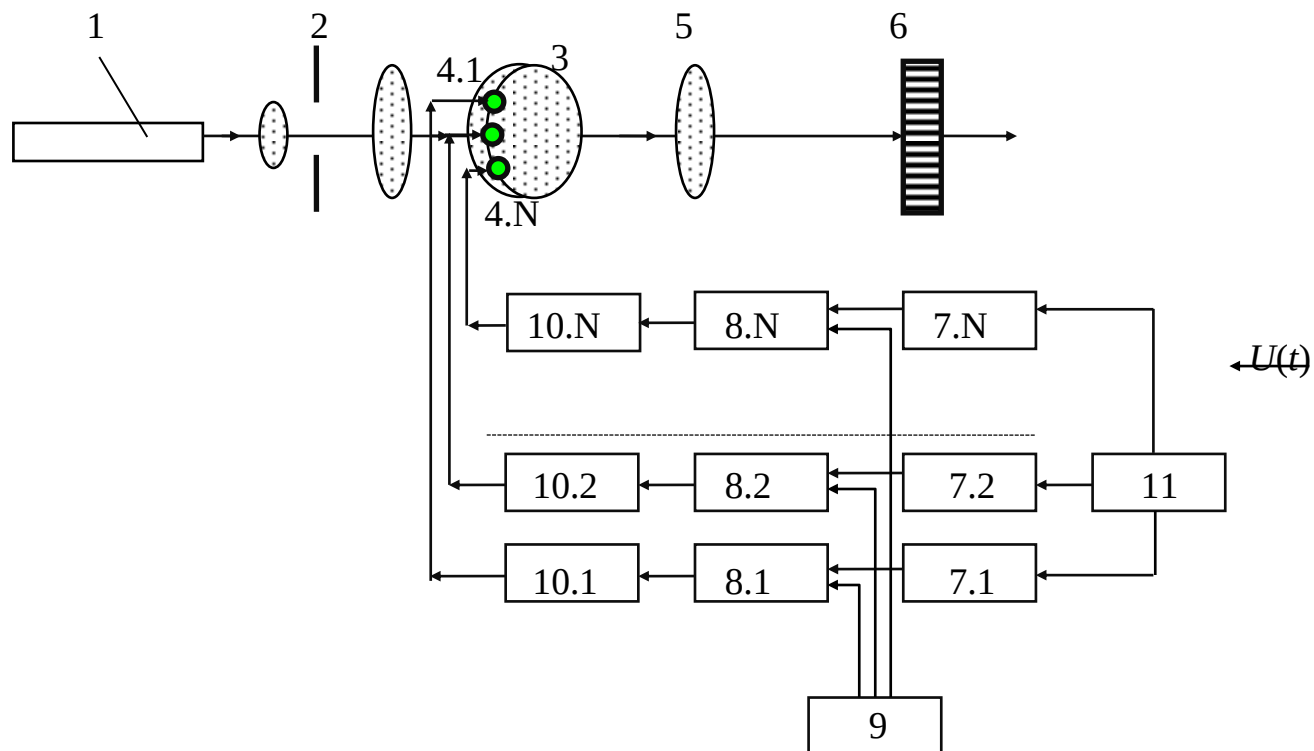


Рис. 3.6. Структурна схема АОСА аналізу широкосмугових сигналів: 1 – лазер, 2 – коліматор, 3 – АОМ, 4 – п'єзоперетворювачі, 5 – масштабуюча лінза, 6 – блок реєстрації оптичного зображення, 7 – блок смугових фільтрів, 8 – багатоканальний балансний модулятор, 9 – генератор опорних напруг, 10 – підсилювачі потужності, 11 – попередній підсилювач сигналів перетворювача

Енергетичний спектр досліджуваного сигналу реєструється фотоприймним пристроєм, розташованим у вихідній площині оптичної системи. Для підвищення розділювальної здатності оптичної системи АОСА вхідне випромінювання лазера містить вищі поперечні моди Гауса-Ерміта. Підвищення точності аналізу спектральних характеристик електричних

сигналів здійснюється в оптичній системі АОСА введенням двох додаткових фазових дифракційних решіток (рис. 3.7), збільшенням кутової апертури оптичної системи.

Світловий потік випромінювання лазера з плоским фронтом, сформований системою лінз коліматора надходить на оптичний вхід АОМ, у світлозвукопроводі якого формуються фазові дифракційні решітки під впливом досліджуваного електричного сигналу, що надходить на вхід п'єзоперетворювача.

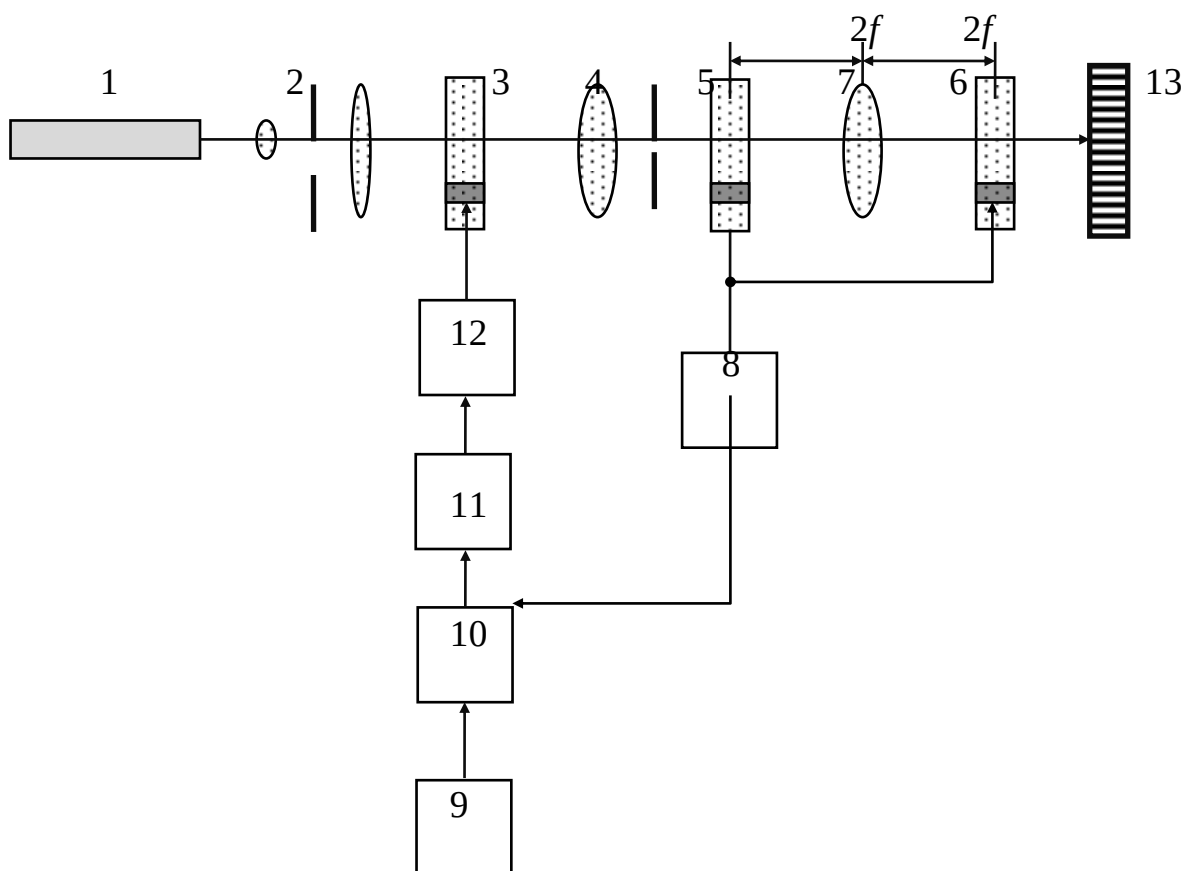


Рис. 3.7. Структурна схема АОСА електричних сигналів: 1 - лазер, 2 - коліматор, 3, 5, 6 - АОМ, 4 - Фур'є-об'єктив, 7 - об'єктив, 8 - генератор опорних сигналів, 9 - модуль реєстрації сигналів, 10 - балансовий модулятор, 11 - перемножувач частот, 12 - підсилювач потужності, 13 - блок фотореєстрації

Електронна система формування вхідного досліджуваного електричного сигналу так само, як і в попередньому лазерному пристрої, містить балансовий модулятор із підключеними до нього генератора опорного сигналу і пристроєм реєстрації сигналу, що досліджується. Спектр сигналу балансового модулятора містить тільки гармоніки спектра сигналу, що досліджується з подавленою несучою. Помножувач частот здійснює помноження частот вихідного сигналу балансового модулятора для того, щоб збільшити відстань між дифракційними максимумами світлового потоку на виході оптичної системи АОСА. Вихід підсилювача потужності сигналу, встановленого на виході помножувача частот, містить узгоджуюче навантаження для підключення каналу електронного блоку до п'єзоперетворювача АОМ.

Просторовий амплітудно-частотний спектр світлового сигналу формується в задній фокальній площині фур'є-об'єктива. Додаткові оптично сполучені дифракційні АОМ, електричні входи яких підключені до генератора опорних сигналів, встановлені за задньою фокальною площиною фур'є-об'єктива. Між модуляторами розташований об'єктив так, щоб відстань між поверхнями першого АОМ і об'єктива та від об'єктива до другого АОМ попереднього дорівнювали подвійній фокусній відстані об'єктива. Введення першого АОМ в оптичну систему АОСА еквівалентно появі декількох точкових джерел, зрушених один щодо іншого, ідентичних першому джерелу в задній фокальній площині Фур'є-об'єктива. Другий додатковий АОМ формує в площині зображень дифракційні максимуми на відстанях, що перевищують первісні. Це відбувається внаслідок дифракції світлових хвиль, що виходять із точкових джерел, що формує дифракційні решітки першого АОМ, на дифракційних решітках світлозвукопроводу другого АОМ.

У вихідній площині оптичної системи АОСА, розташований блок фотоприймального модуля, що реєструє енергетичний спектр досліджуваних сигналів з підвищеним розділенням завдяки збільшенню кутової апертури оптичної системи аналізатора, що підвищує точність аналізу електричних

досліджуваних сигналів і діагностики плинного стану динамічного процесу.

Автоматизована система керування процесом різання (рис. 3.8) здійснює рівнобіжний аналіз на основі аналізу сигналу віброакустичної емісії (BAE) та термоЕРС у зоні обробки. Оптиволоконний перетворювач термоЕРС виконаний з магнітооптичного матеріалу. Отже, таким чином, повністю застосовані інтегровані властивості перетворювачів підкласу RLC з використанням оптичних ефектів.

Світловий потік випромінювання лазера надходить через світловід. Під дією змінної складової термоЕРС, що виникає в зоні різання, змінюється показник заломлення оптичного світловода, що забезпечує амплітудну модуляцію світлової хвилі.

Вихід світловоду сполучений з анаморфотною оптичною системою, що містить розташовані на одній оптичній осі сферичну і дві циліндричні лінзи. Обидві циліндричні лінзи мають взаємно перпендикулярні утворюючі циліндричних поверхонь. Кривина поверхні першої лінзи рівнобіжна напрямку поширення акустичних коливальних процесів у звукопроводі АОМ, що встановлений між лінзами.

На електричний вхід інтегрованого перетворювача АОМ надходить сигнал BAE. У площині фокусування розташований ПЗЗ-фотоприймач, вихід якого з'єднаний через АЦП до входу обчислювального пристрою. На ПЗЗ-приймачі зображення сформоване взаємним енергетичним спектром сигналів термоЕРС і віброакустичної емісії, що являє собою розподіл світлового потоку по вхідній апертурі фотоприймача і змінюється в часі відповідно до модуляції світлового потоку на вихідному торці світловоду. При досягненні просторовими та енергетичними параметрами спектра заданих критичних значень формуються керуючі команди на корекцію режимів різання з урахуванням фізико-хімічних параметрів пари "інструмент-деталь".

Отже, відбувається автоматизоване керування системою плинного процесу механообробки деталі, наприклад, різанням. Подібні типи побудови

автоматизованих систем з використанням таких інтегрованих перетворювачів можна застосовувати для інших типів виготовлення точних деталей приладів.

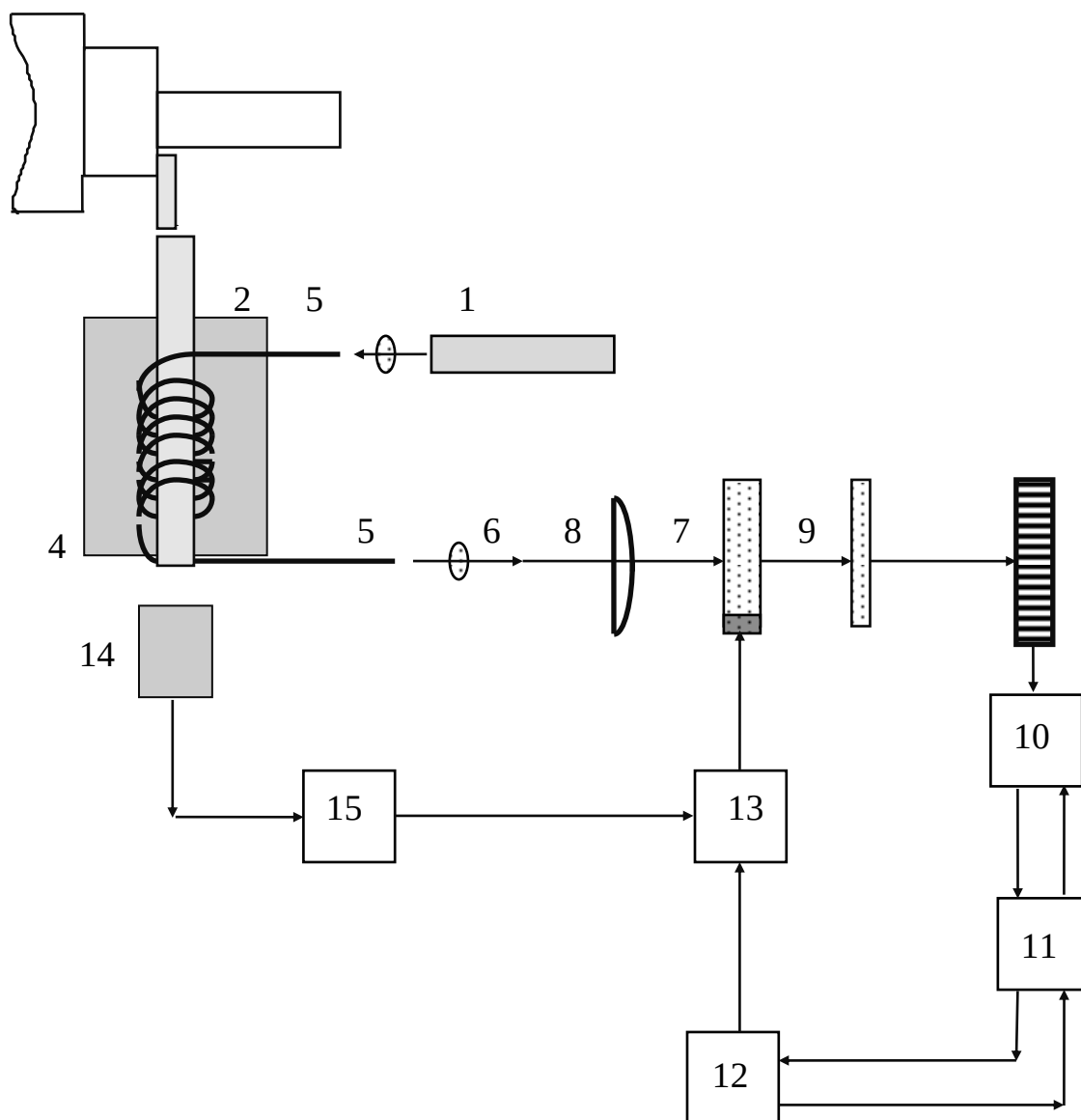


Рис. 3.8. Структурна схема пристрою керування процесом різання: 1 – лазер, 2 – магнітооптичний перетворювач, 3 – різальний інструмент, 4 – супорт, 5 – сферичні лінзи, 6, 7 – циліндричні лінзи, 8 – АОМ, 9 – фотоприймач, 10 – блок живлення, 11 – АЦП, 12 – обчислювальний пристрій, 13 – генератор, що задає, 14 – перетворювач віброакустичної емісії, 15 – підсилювач

Можливість керування групою металорізальних верстатів може досягатися за допомогою адаптивних багатоканальних пристроїв керування, які дозволяють аналізувати кореляційні характеристики сигналу ВАЕ. Оптична система АОСА електричних сигналів містить лазер з довжиною хвилі, що перебудовується, світлоподілюючий елемент, оптичні затвори, що керуються від основного блоку керування системою, багатоканальні дифракційні АОМ, на виході яких утворюються світлові поля, що залежать від параметрів вхідного електричного сигналу.

Принцип роботи системи полягає в наступному. Пучок випромінювання лазера (з довжиною хвилі λ_1) розділений на три пучки світлоподілюючою призмою. При відкритому затворі світловий пучок надходить на елемент реєстрації зображення, наприклад, фототермопластичної. Другий пучок випромінювання надходить через другий оптичний затвор на оптичні входи блоку АОМ. На електричні входи блоку АОМ надходять сигнали від перетворювачів ВАЕ. У вихідній площині оптичної частини формується просторовий спектр, параметри якого характеризують параметри ВАЕ в початковий період процесу різання. Після цього оптичний затвір закривається, і світловий пучок через фазообертач надходить на елемент фотореєстрації з фазовим зрушенням $\pi/2$. Виходячи з характеристик оброблюваності матеріалу заготовки, визначається інтервал часу, через який спрацьовує електронний канал реєстрації ВАЕ. Інша частина пучка випромінювання (з довжиною хвилі λ_2) надходить на другий блок АОМ, що формує Фур'є-образ сигналів ВАЕ.

На рис. 5.15 наведено структурну схему узагальненого лазерного багатоканального АО аналізатора для застосування у діагностиці та контролі стану процесу механічної обробки різанням на верстатах з ЧПК.

Оскільки спектри динамічних сигналів, що реєструються на початку та кінці періоду стійкості РІ, зрушені по фазі на $\pi/2$, то на елементі реєстрації зображення реєструється сигнал порівняння спектрів, що характеризує ступінь

зносу різальної крайки інструмента.

Автокореляційна функція енергетичного різницевого спектра зношеного інструмента формується в задній фокальній площині Фур'є-лінзи, зчитується блоком фотореєстрації (на основі ПЗЗ-приймача).

Вихідний сигнал фотоприймального пристрою, що відповідає величині автокореляційної функції, надходить на входи блоку керування і формування керуючих команд для виконавчих органів верстата.

Перетворювачі встановлені на різальному інструменті та заготовці. Наприклад, при контролі якості обробки деталей свердлінням (або фрезеруванням) перетворювач встановлюється в шпинделі із закріпленням у ньому інструментом. Виходи перетворювачів 1 і 2 підключені до входів каналів електронної системи реєстрації. Канал електронної системи містить попередній підсилювач, блок смугових фільтрів, з'єднаний з перемикачем каналів, модуль формування вхідних електричних сигналів для наступної його обробки в оптичній системі аналізатора спектру. Кожен перемикач складається з аналогового комутатора та двійкового лічильника. Вибір каналу обумовлюють кодом, що подають на вхід формувачів. Код забезпечує двійковий лічильник, три виходи якого підключені до аналогового комутатора. Модулі формування вхідних сигналів представляють собою балансовий модулятор, що необхідний для операції перетворення та узгодження частотних характеристик досліджуваних сигналів та перетворювачів оптичної системи обробки сигналів. Вхідний світлоподілюючий куб інтерферометра розщеплює падаючий на нього світловий пучок випромінювання лазера, що проходить через телескопічну систему Кеплера, на два пучки, що ортогонально розповсюджуються у просторі. На виході інтерферометра встановлений світлоподілювальний куб з фотохромним покриттям граней. Обидва пучки направляють відбивними дзеркалами через АОМ на Фур'є-об'єктиви, що їх перетворюють.

Розподілення амплітуд і фаз світлових полів у дифракційних зображеннях світлових сигналів на виході являють собою залежність від

параметрів балансно-модульованих сигналів $U_{12}(t)$ і $U_{13}(t)$ відповідно $U_1(f_y, f_z, t)$ $U_2(f_y, f_z, t)$. Розподіл $U(f_y, f_z, t)$ описано виразом

$$U(f_y, f_z, t) = F \left\{ A_0 e^{-j\omega_0 t} \cdot \tau(x, y) * T(x, y, U_m(y)) \right\}, \quad (3.1)$$

де f_z, f_y - просторові частоти двовимірного зображення фазомодульованого світлового сигналу,

A_0, ω - амплітуда і частота хвилі світлового пучка, що надходить до інтерферометру,

$\tau(z, y)$ - функція пропущення апертури оптичної системи АОСА,

$T(x, y, U_m(t))$ - комплексний коефіцієнт пропущення АОМ,

z, y - координати в предметній площині оптичної системи,

$U_m(t)$ - вхідний електричний сигнал.

На виході оптична система аналізатора утворюється різниця логарифмів амплітуд світлових хвиль у потоках обох плечей інтерферометра:

$$W(f_z, f_y, t) = U(f_z, f_y, t) \cdot U^*(f_z, f_y, t). \quad (3.2)$$

Отже, на виході оптичної системи інтерферометра інтенсивність світлового потоку дорівнює відношенню інтенсивностей світлових полів, що характеризують параметри сигналів вібрацій та акустичної емісії деталі та різального інструмента і відображають стан плинного процесу обробки.

Далі світловий сигнал надходить через Фур'є-об'єктив та масштабуючий об'єктив на світлочутливі елементи блоку фотореєстрації, що розташований у вихідній площині зображень оптичної системи. У площині формується автокореляційна функція $R(f_y, f_z, t)$, що може бути описана виразом:

$$R(f_z, f_y, t) = \iiint_0 W_2(f_z, f_y, t) \cdot \exp[j2\pi(f_z z + f_y y)] dz dy d\tau. \quad (3.3)$$

Зміни функції $R(f_y, f_z, t)$ характеризують динаміку різання, стан інструмента і деталі в процесі різання (защемлення свердла, досягнення критичного зносу) і є інформацією для формування керуючих команд системою технологічного обладнання.

Блок фотореєстрації, виконаний, наприклад, на основі ПЗЗ-приймача зображень, складається з лінійного або матричного ПЗЗ-елемента, блоку керування і живлення. Вихідний сигнал блоку фотореєстрації надходить через АЦП та модулю узгодження до обчислювального пристрою, виходи якого підключені до виконавчих механізмів металообробного верстата.

Лазерний пристрій дозволяє з високою точністю визначати передаварійну ситуацію, що виникає в процесі різання. При защемленні різального інструмента у заготовці утворюється єдина динамічна система "інструмент-заготовка", що має свій власний частотний спектр, щільність якого відрізняється від спектральної щільності кожної підсистеми інструмента, що досліджується, та деталі.

Досліджуючи різницю між значеннями еталонної автокореляційної функції та плинним її значенням, можна визначити момент защемлення і виконати корекцію режимів різання. Збільшення значення різниці свідчить про підвищення зносу інструмента.

Досягнення критичного зносу визначається обчислювальним пристроєм, і відпрацьовуються команди на зміну різального інструмента дозволяє підвищувати достовірність контролю якості процесу механообробки в умовах автоматизованого виробництва.

Математичні моделі, що визначають засади дії подібного лазерного АО аналізатора динамічних сигналів плинного стану системи ТО в наближенні стаціонарності випадкових процесів, базуються на аналізі спектральних складових здійснюється в режимі реального часу. Тому ці системи найбільш вигідні для здійснення контролю динамічних процесів. Це зумовлено тим, що на тлі достатньо повільного часу механічного процесу різання здійснюється реєстрація окремих реалізацій надшвидкого електричного нестационарного випадкового сигналу. Вікно часу реєстрації обумовлено часом реалізації алгоритму миттєвого спектру Фур'є, що є необхідним при визначенні параметрів високочастотних сигналів вібрацій.

Отже, контроль якості плинного процесу механічної обробки здійснюється лазерним аналізатором в широкому діапазоні спектральної густини сигналів, що ідентифікують динаміку стану системи ТО. Це дозволяє підвищувати якість продукції та автоматизувати процес контролю в гнучкому автоматизованому виробництві. Для створення систем контролю якості процесу механообробки перспективними є автоматизовані гібридні системи з цифровим постпроцесором, що дозволяє здійснювати багатопараметричну обробку сигналів динаміки процесу різання, здійснювати групове керування металообробними верстатами з ЧПК.

Збільшення зносу різальної частини інструмента визначає збільшення дисперсії випадкового процесу, що характеризує динамічні явища в ТО, при решті постійних параметрів системи ТО та лазерного контроллера.

Визначення параметрів сигналів динаміки процесу різання за допомогою лазерного акустооптичного автоматизованого аналізатора дозволяє проводити багатопараметричну обробку в масштабі реального часу. Крім того, метод є універсальним та може застосовуватися для різних типів автоматизованого процесу механічної обробки точних деталей.

Отже, застосовуючи інтегровані перетворювачі підкласу RLC , можна створювати різні варіанти автоматизованих систем контролю та вимірювання певних параметрів процесу виготовлення деталей, моніторингу зміни параметрів плинних процесів.

Контрольні питання

1. Які є можливі варіанти застосування перетворювачі підкласу RLC в автоматизованих системах ?
2. Якими перетворювачами здійснюють реєстрацію динамічних сигналів вібрацій від обладнання ?
3. Які перетворювачі застосовують для реєстрації електромагнітних явищ в обладнанні ?
4. Яким чином можна формувати принципи дії автоматичної системи моніторингу стану обладнання ?

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Внаслідок проведеного аналізу існуючих та найбільш застосованих методів та засобів контролю та вимірювання технічних параметрів запропоновано для вивчення нову класифікацію перетворювачів реєстрації фізичних явищ для подальшого застосування в автоматизованих системах
2. Запропоновано та обгрунтовано класифікаційні ознаки способів побудови перетворювачів різних підкласів, що дозволило створити їх аналітичні моделі для різних способів застосування в автоматизованих та автоматичних системах керування, наприклад, технологічними процесами виготовлення точних деталей.
3. Запропоновано основні інтегровані схеми створення автоматизованих систем аналізу та визначення стану технологічного процесу на підставі аналізу електромагнітних полів технологічного обладнання, поверхневих та об'ємних акустичних коливань, які виникають під час обробки.
4. Завдяки запропонованій методології визначення типу перетворювачів є можливим розробити новий клас приладів і систем контролю та вирішити актуальні проблеми нанотехнології в металообробці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. G. S. Tymchyk & V. I. Skytsiuk & T. R. Klotchko, P. Komada, S. Smailova, A. Kozbakova, Modelling of the technological objects movement in metal processing on machine tools, Mechatronic Systems II. Applications in Material Handling Processes and Robotics, _Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book (2021), Boca Raton, London, New York, Leiden, _PP. 267-278.
2. Відчутники контрольно-вимірювальних систем : монографія / Г.С. Тимчик, В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб, Т.Р. Клочко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – 240 с., іл..
3. Засоби контролю процесів механообробки надточних деталей: монографія / Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Вайнтрауб М.А., Клочко Т.Р. - Київ: НТУУ «КПІ», 2011. – 516 с., іл.
4. H.S.Chang, V.I.Skitsiuk, H.S.Kim, H.Ono, K.H.Cha, N.I.Cho. In-process Monitoring of Machine Tool Statement using Magnetic Sensor. Proceeding of the 6th Advanced Manufacturing System. Workshop, Seoul, 1998. 1998. №6, pp. 223-228.
5. Y Hasegawa, M Shikida, H Sasaki, K Itoigawa and K Sato. An active tactile sensor for detecting mechanical characteristics of contacted objects. Journal of Micromechanics and Microengineering, Volume 16, Number 8 (2006), IOP Publishing Ltd.
6. Yoshihiro Tanaka; Ryohei Sugimura ; Akihito Sano; Hideo Fujimoto. An active tactile sensor using fluid for body tissue. Intelligent Robots and Systems, (22-26 Sept., 2008). IROS 2008. IEEE Xplore, IEEE/RSJ International Conference. DOI: 10.1109/IROS.2008.4651136
7. A. Johnen, J.-F. Remacle and C. Geuzaine, Geometrical Validity of Curvilinear Finite Elements, Journal of Computational Physics, 2013 – Elsevier.
http://gmsh.info/doc/preprints/gmsh_curved_preprint.pdf

8. Jan Krejciáz, Zuzana Sajdlovaa, Vilem Nedelab, Eva Flodrovab, Romana Sejnohovaa, Hana Vranovaa and Robert Plicka. Effective Surface Area of Electrochemical Sensors. *J. Electrochem. Soc.*, vol. 161, issue 6, (2014), B147-B150. doi: 10.1149/2.091406jes
9. Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, Jr., John T. DeWolf, David F. Mazurek, Sanjeev Sanghi. *Mechanics of Materials*. ISBN: 9789339217624. Publisher: New Delhi: McGraw-Hill Education (India) Private Limited, (2017).
10. Gregory S Tymchyk, Volodymyr I Skytsiuk, Tatiana R Klotchko, Tomasz Ławicki, Natalia Demsova. Distortion of geometric elements in the transition from the imaginary to the real coordinate system of technological equipment, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2018*, Volume 10808, pp. 108085C, Publisher International Society for Optics and Photonics, 2018/10/1.
11. G. S. Tymchyk, V. I. Skytsiuk, T. R. Klotchko, W. Wójcik, Y. Amirgaliyev & M. Kalimoldayev, *Physical bases of aggression of abstract objects existence, Mechatronic Systems II. Applications in Material Handling Processes and Robotics*, _Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book (2021), Boca Raton, London, New York, Leiden, _PP. 279-290
12. Ch. W. Misner, K. S. Thorne and J. A. Wheeler, *Gravitation* (Freeman, San Francisco, 1973), p 386.
13. Gregory S Tymchik, Volodymyr I Skytsiuk, Tatiana R Klotchko, Piotr Popiel, Kalamkas Begaliyeva. The active surface of the sensor at a contact to the technological object, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2018*, Volume 10808, pp. 108085G, Publisher International Society for Optics and Photonics, 2018/10/1.
14. Gregory S Tymchyk, Volodymyr I Skytsiuk, Tatiana R Klotchko, Tomasz Zyska, Saule Rakhmetullina. Two parameter active measuring probe for objects setting detection on CNC machines workspace. *Photonics Applications*

- in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2018, Volume 10808, pp. 108086A, Publisher International Society for Optics and Photonics, 2018/10/1
15. Vasilevskiy, O.M., Yakovlev, M.Y., Kulakov, P.I. Spectral method to evaluate the uncertainty of dynamic measurements, Technical Electrodynamics, 2017, (4), pp. 72-78.
16. І Луцина, Т Ключко, В Скицюк. Моделювання багатокритеріальної системи контролю роботи металообробного CNC-обладнання, Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування, Вип. 61 (1), с. 52-60, 2021/6/30.
17. Volodymyr Skytsiouk, Tatiana Klotchko, Myhailo Bulyk, Specifics of influence of the chemical composition of abstract object's presence zone on accuracy of determination of surface's coordinates, Вісник КПІ. Серія Приладобудування, 57(1), 2019.
18. Скицюк В.І., Ключко Т.Р. Физика технологии ТОНТОР: монография, Саарбрюкен, ФРН: ИД LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 332 с.
19. В.І. Скицюк, М.А. Вайнтрауб. Об'єднаний базовий елемент відчутника. Вісник технологічного університету «Поділля», 5 (36), с. 164-172, 2001.
20. Інтелектуальні виробничі технології для контролю технологічних процесів. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.renishaw.com/en/smart-manufacturing-technologies-for-process-control--45468>.
21. Tobias F. C. Berninger, Tomas Slimak, Tobias Weber, and Daniel J. Rixen, “An External Stabilization Unit for High-Precision Applications of Robot Manipulators” in 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), October 25-29, 2020, Las Vegas, NV, USA (Virtual). [Електронний ресурс]. Доступно: <http://ras.papercept.net/images/temp/IROS/files/0229.pdf>.

22. Richard Feynman. The character of physical law, A series of lectures recorded by the BBC at Cornell University USA, Cox and Wyman LTD London, (1965).
23. Charles Kittel. Introduction to Solid State Physics, 8th Edition. Wiley; (November 11, 2004), 704.
24. Gr.S. Tymchik, T.R. Klotchko, “The resolution increase of acoustooptic spectrum analyser”, XIV IMEKO World Congress, TC 2, Tampere, Finland, 1997.
25. Тимчик Г.С., Скицюк В.І., Клочко Т.Р. Оптичні вимірювання для механічної обробки деталей: монографія. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. – 332 с., іл.