

# МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

УДК 621.317

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

© Величко О. М., 1999  
Держстандарт України

У статті розглянуті питання застосування різноманітних вимірювальних перетворювачів у автоматизованих контрольно-вимірювальних системах та засобах неруйнівного контролю.

Безліч вимірюваних параметрів, їх просторове розподілення, необхідність автоматизації керування промисловими процесами шляхом централізованого одержання вимірювальної інформації, її обробки і вироблення керуючих сигналів сприяє переважному використанню електричних методів вимірювання неелектричних величин, так як електричні сигнали найбільш придатні для вимірювання, передачі та обробки. Велика різноманітність ВП ускладнює їх вибір і уніфікацію виробничих процесів, створює труднощі при їх розробленні та впровадженні. В таких умовах необхідна уніфікація електронних трактів ВП, розроблення загальних принципів їх побудови, аналіз і систематизація вихідних сигналів ВП, уніфікація алгоритмів корекції похибок ВП.

Вимірювальним перетворенням є відображення розміру однієї фізичної величини (ФВ) розміром іншої ФВ, яка функціонально пов'язана з нею. Його застосування - єдиний метод практичної побудови всіх вимірювальних перетворювачів - засобів вимірювального перетворення, при якому

вхідна ФВ перетворюється у вихідну, функціонально пов'язану з вхідною. В закордонній літературі ВП (transducer) іноді визначають як прилад, що перетворює неелектричну величину в електричну чи навпаки.

ВП з неелектричним виходом застосовуються як чутливий елемент (sensor) перетворювачів чи застосовуються для перетворення неелектричного сигналу у електричний. Всі функції перетворювачів є аналоговими, тому в загальному випадку їх сигнали теж аналогові. Широко застосовуються також ВП чисто електричних величин.

На рис. 1 зображена узагальнена структурна схема ВП, на якій ПВП, ВВП - відповідно первинний і вторинний вимірювальний перетворювач; ЕП - електронний пристрій (підсилювач); ВВП - вимірювальний функціональний перетворювач; ВихП - вихідний пристрій;  $X(t)$ ,  $U(t)$ ,  $Y(t)$  - відповідно вимірювальна фізична величина, вихідна напруга ПВП і вихідна електрична величина;  $Z_1(t), \dots, Z_n(t)$  - дестабілізуючі фактори.

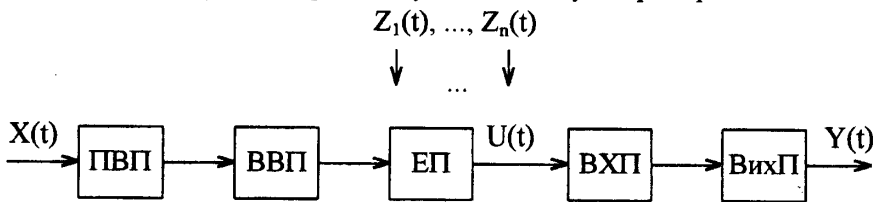


Рис. 1. Узагальнена структурна схема ВП.

Питання загальної теорії, теорії похибок та динаміки ВП, а також фізичні основи, теорія, методи розрахунків та проектування основних видів ВП викладені в [1].

Удосконалення технічних характеристик електронних ВП має два основних напрямки: побудова ВП на основі створення ПВП, які мають високу швидкодію, чутливість до перетворюваної величини

і стабільність характеристик (технологічно-конструктивний напрям) і розробка структурних схем ВП, які забезпечують високі технічні і метрологічні характеристики (швидкодію, точність і чутливість) навіть при використанні інерційних ПВП з нестабільними в часі характеристиками, які змінюються також при впливі параметрів оточуючого середовища (структурно-кібернетичний). Оби-

два ці напрями мають актуальність і взаємно доповнюють один одного.

Вимірювання неелектричних величин (НЕВ) електричними засобами стає можливим завдяки ПВП і електричному ВВП, а також пристроям для їх об'єднання. Кількість неелектричних величин, які необхідно вимірювати в промислових процесах, значно перевищує кількість вимірюваних електричних і магнітних величин. Тому необхідно виділити наступні основні групи неелектричних величин, які наведені у табл. 1.

Всі методи вимірювання НЕВ розділяються на контактні та безконтактні. При контактному методі ПВП знаходиться у безпосередньому контакті з досліджувальним об'єктом. Ці методи відносно прості в реалізації та забезпечують високу чутливість, а також можливість локалізації точки вимірювання в тому місці технологічного процесу, яке є найбільш інформативним. В той же час при контактному методі має місце зворотній вплив ПВП на параметри досліджуваного об'єкту, що може привести до спотворення результату вимірювання. Крім того, в частині випадків неможливо здійснити безпосередній контакт ПВП з досліджувальним об'єктом внаслідок, наприклад, несприятливих умов вимірювання (вологість, вібрації, небезпека механічного руйнування, хімічна та радіаційна агресивність тощо). При безконтактному методі ПВП не знаходиться у безпосередньому контакті з досліджуваним об'єктом і не спотворює його параметрів, але на результат вимірювання у великому ступені впливає оточуюче середовище, яке відділяє об'єкт від перетворювача.

Таблиця 1 - Основні групи неелектричних величин

Рід величини	Назва величини
Механічні величини	Сила, тиск, деформація, моменти, лінійні розміри, рівень, вібрація, витрати, швидкості потоків тощо
Теплові величини	Температура, кількість теплоти, теплові потоки, тепломісткість тощо
Оптичні величини	Освітленість, сила світла і її розподілення, якість, колір тощо
Величини, які характеризують властивості та склад речовин	Концентрація, вологість, хімічний склад, зміст речовин тощо

В залежності від енергетичних властивостей вихідного сигналу і способу його подальшого використання ПВП (табл. 2) розділяють на дві великі групи: параметричні та генераторні [1]. В параметричних ПВП вхідна величина призводить до зміни його параметра (наприклад, електричних опорів  $R$ , ємності  $C$ , індуктивності  $L$ ) і особливості їх роботи - це потреба у додатковому джерелі живлення для подальшої обробки інформації. В генераторних ПВП вхідна величина перетворюється у вихідний сигнал, який має енергетичні властивості (наприклад, з вихідні величини  $e=f(x)$  - електрична напруга чи  $i=f(x)$  - електричний струм з внутрішнім опором джерела  $Z_{вн}=const$ ).

У вимірювальній техніці часто використовуються такі ВВП, частотні характеристики яких визначаються частково електричними, а частково механічними (чи акустичними) параметрами. В таких випадках краще всі параметри звести до єдиного (краще електричного) виду і весь перетворювач відобразити у вигляді деякого еквівалентного, тобто такого, що має ті ж самі частотні характеристики електричного кола, яке мало б як електричні, так і механічні елементи. Це досягається за допомогою методу еквівалентних схем.

У табл. 2 відображені основні види параметричних і генераторних ВВП.

Таблиця 2 - Основні типи параметричних і генераторних ВВП

Вид ВВП	Типи ПВП
Пара-метричні	Резистивний, індуктивний, ємнісний, тензорезистивний, терморезистивний, фоторезистивний, магніторезистивний, магнітотомуляційний, магнітопротекти, іонізаційні, радіоактивні
Генераторні	П'єзоелектричний, термоелектричний, фотоелектричний, піроелектричний, гальванічний, гальваноманітний, електрохімічний, на ефекті Холла, магнітострикційний, електромагнітний, електромагнітний, електростатичний, електрокінетичний, індукційний, феродинамічний, на ефекті Гауса

Функцією перетворення ПВП є функціональна залежність вихідної величини від вхідної, яка викладається аналітичним виразом чи графіком. Найбільш оптимальна лінійна характеристика перетворення, тобто пряму пропорційність між зміною вхідної величини і відповідного збільшення вихідної величини перетворювача. Для опису лінійної характеристики перетворення достатньо двох параметрів: початкового значення вихідної величини (нульового рівня), яке відповідає нульовому чи якомусь характерному значенню вхідної величини, і показника

відносного нахилу цієї характеристики  $S$ , який називається чутливістю перетворювача. Чутливість перетворювача  $\epsilon$ , як правило, іменованою величиною з різними одиницями фізичних величин, які залежать від природи вхідної та вихідної величин (наприклад, мК/К, Ом/мм, Гц/В, мкА/лм тощо).

ПВП, в тому числі перетворювачі неелектричних величин в електричні вихідні сигнали, мають, як правило, нелінійну функцію перетворення. Тому при їх сполученні з електричними ВВП виникає проблема лінеаризації первинного перетворювача, тобто формування лінійної залежності вихідного сигналу від вимірюваної фізичної величини. В окремих випадках досягнення лінійної функції перетворення (ЛФП) можливе за допомогою конструктивно-технологічних методів, наприклад за допомогою використання спеціальних матеріалів, застосування відповідної технології виготовлення чи відповідного конструктивного виконання елементів перетворювачів. Однак такі методи в багатьох випадках не дозволяють досягти необхідного рівня точності ЛФП, тому необхідні інші методи досягнення мети.

Велике значення мають структурні методи лінеаризації, які базуються на використанні корегуючих пристроїв (КП) шляхом включення їх відповідним чином у вимірювальне коло. Вони універсальні та відносно прості у реалізації при одночасному забезпеченні високого степеня наближення скоригованої ФП до необхідної. Результуюча похибка  $\sigma$  скоригованого ВП у першому наближенні оцінюється сумою відносних похибок ПВП, що коригується, та корегуючого пристрою:  $\sigma = \sigma_{\text{пвп}} + \sigma_{\text{кп}}$ , де  $\sigma_{\text{пвп}}$  і  $\sigma_{\text{кп}}$  - похибки відповідно ПВП та КП.

Існує нагальна необхідність створення, удосконалення та впровадження високоточних ВФП - КП, що реалізують необхідну функцію перетворення. ВФП застосовуються для лінеаризації характеристики ПВП неелектричних величин, реалізації необхідних функцій вимірювання електричних величин тощо. Теоретично майже кожну функцію можна реалізувати багатьма методами, однак найбільш доцільно застосовувати методи, які дозволяють використовувати природні фізичні явища та пристрої, що мають найбільше розповсюдження.

Використовується три основних методи реалізації заданих функцій для ВФП: метод зворотніх функцій, метод неявних функцій та метод апроксимації функцій.

*Метод зворотніх функцій* реалізується за допомогою компенсаційного ВП. Якщо у ланці зворотнього зв'язку такого перетворювача встановлений ВФП  $x_k = \phi(Y)$ , то в цій схемі  $X = x_k$ ,  $X = \phi(Y)$ ,  $Y = \phi(X)$ , тобто реалізується зворотня функція. Прикладом такого ВФП є всі аналогові електронні логарифма-

тори на підсилювачах, в ланку зворотнього зв'язку яких увімкнено природній експоненціальний перетворювач на основі  $p-n$  переходу, а також пристрої з квадратичними термоперетворювачами в ланці зворотного зв'язку підсилювача.

*Метод зворотного зв'язку* широко використовується у вимірювальній техніці, однак має ряд суттєвих недоліків: реалізація тільки однозначних і монотонних функцій; порушення умов стійкості та зникнення степеня зменшення похибки від нестабільності коефіцієнта підсилення прямої ланки, так як коефіцієнт перетворення зворотної ланки змінюється в широкому діапазоні значень; при відтворенні функцій добування квадратного кореня не усувається необхідність зниження чутливості та підвищення нижньої границі вимірювання вхідної величини зважаючи на квадратичне розширення динамічного діапазону на виході квадратора тощо.

*Метод неявної функції* базується на реалізації рівняння, в якому вихідна величина ФП входить у ліву і праву його частини  $y = F(x, y)$ , при цьому вихідна величина  $y$  використовується і для відтворення самої себе, тобто вихідної величини  $y$ . Прикладами використання неявних функцій є: добування квадратного кореня за допомогою аналогового подільника напруги; визначення середньоквадратичного значення (СКЗ) напруги за допомогою аналогових помножувача та подільника напруги; визначення векторної суми (різниці) декількох величин за допомогою помножувачів, подільників і підсумовувачів напруги тощо. Метод неявної функції має такі позитивні моменти: спрощення структурної схеми ВФП і можливість відтворення монотонних та немонотонних функцій.

За деякими оцінками [2] більшість ВП (70 %) використовується у промислових роботах, в авіаційному та автомобільному приладобудуванні, а інші застосовуються в системах охорони оточуючого середовища, біомедичних вимірюваннях та наукових дослідженнях. Найбільше ВП використовується при вимірюванні потоків рідин та газів, потім - ВП тиску, швидкості, прискорення, зусиль, температури, хімічного складу тощо.

Сьогодні ВП - це надсучасні прилади, в яких використовуються останні досягнення мікроелектроніки, мікромеханіки, інтегральної оптики, молекулярної електроніки, оптичних волокон, обчислювальної техніки тощо [2, 3]. Основною тенденцією розвитку ВП є розроблення інтегральних ВП, які містять сенсорні елементи, з наступним мікропроцесорним обробленням сигналів з метою автоматичного калібрування і (чи) компенсації систематичних похибок.

Для створення мініатюрних ВП механічних ве-

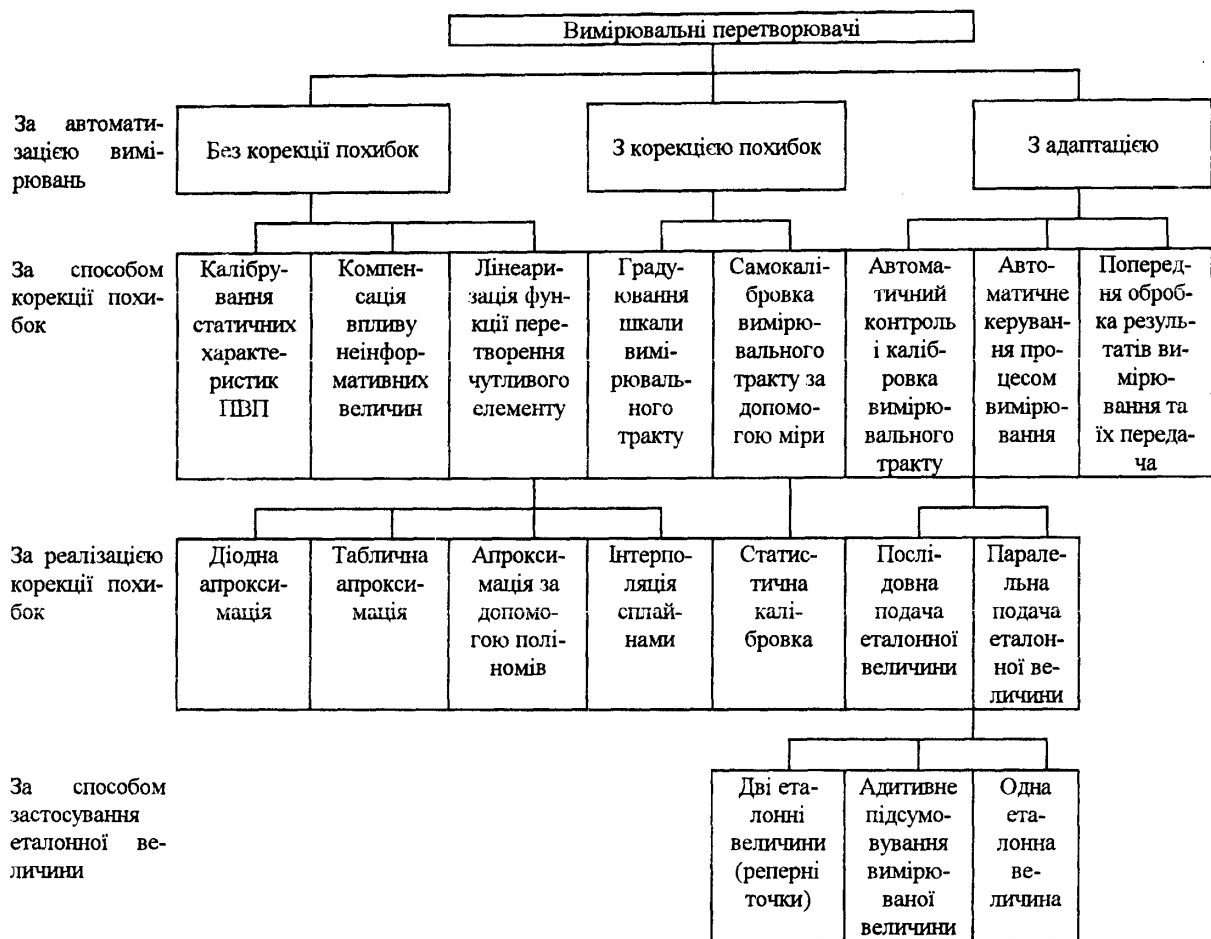


Рис. 2. Класифікація вимірювальних перетворювачів.

личин застосовуються мембранні сенсори резистивного та ємнісного типів, п'єзоелектричні, оптичні та магнітні сенсори, елементи на поверхнево-акустичних хвилях. Наприклад, сучасний однокристальний інтегральний кремнієвий ВП тиску виготовляється по сучасній мікроелектронній технології і містить п'єзорезистивний міст Уйтсона, інструментальний підсилювач зі схемою компенсації температурної похибки та підстроювання чутливості.

Механічні та електричні резонансні структури – основа багатьох типів сучасних ВП для вимірювання механічних і теплових величин. Матеріалами для них слугує в основному кремній та кварц. Крім високої чутливості резонансні ВП відрізняються підвищеною заводсьтійкістю, можливістю спрягання з радіотехнічними каналами передавання інформації та використанням цифрових пристроїв оброблення даних, так як їх вихідний сигнал має частотну чи часо-імпульсну модуляцію. Для ВП температури широко використовуються монокристалеві та тонкоплівкові структури. Розширяється сфера застосування ВП на основі оптичних волокон. Волоконно-

оптичний ВП використовує принцип модуляції інтенсивності відбитого світла для вимірювання переміщення.

На рис. 2 наведена класифікація сучасних ВП за автоматизацією вимірювання, способом корекції похибок, реалізацією корекції похибок і способом застосування еталонної величини.

Для вихідних сигналів ПВП, які є складними періодичними сигналами, використовуються наступні коефіцієнти зв'язку між різними значеннями змінної напруги: коефіцієнт форми (form-factor) -  $K_f = U_{окз}/U_{св}$ ; коефіцієнт амплітуди (pick-factor) -  $K_a = U_{max}/U_{окз}$ ; коефіцієнт усереднення -  $K_y = U_{max}/U_{св}$  де  $U_{max}$ ,  $U_{св}$ ,  $U_{окз}$  - відповідно амплітудне, середньовипрямлене та середньоквадратичне значення напруги сигналу (табл. 3). Зв'язок між цими коефіцієнтами має вигляд  $K_y = K_f K_a$ , а також справедлива нерівність  $1 = K_f = K_a = K_y$ .

Таблиця 3 - Чисельні співвідношення між зазначеними коефіцієнтами для найбільш поширених сигналів

Форма сигналу	$K_{\Phi}$	$K_{\alpha}$	$K_{\gamma}$
Синусоїдальна	1,1	1,414	1,56
Трикутна	1,155	1,733	2
Прямокутна ( $Q=2$ )	1	1	1
Прямокутна ( $Q=var$ )	$1/[2d(1-d)]$	$1/(Q-1)$	$Q/2$
Примітка: $Q$ - скважність імпульсів; $d = 1/Q$			

1. Левшина Е. С., Новицкий П. В. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи). – Л.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Подлепецкий Б. И. Состояние разработок датчиков в Европе // Измерит. техника, 1991, № 5, С. 65-70.
3. Тарбеев Ю. В., Слаев В. А. Современное состояние метрологического обеспечения и сертификации датчиков // Измерит. техника, 1993, № 11, С. 3-8.