

УДК 531.7.08

В.Т. Михалевич¹, Б.І.Тарас²¹ Луцький національний технічний університет² Національний університет водного господарства та природокористування

ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДАТЧИКІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Розглядаються основи аналізу ефективності створення та застосування засобів первинного отримання та передачі вимірювальної інформації. Приводиться один з методів практичної оцінки енергетичної ефективності генераторних та параметричних вимірювальних перетворювачів. Подано рекомендації щодо реалізації можливостей теоретичного та статистичного аналізу датчиків.

Ключові слова: *вимірювальне перетворення, параметр, передача інформації, енергія.*

Сучасні технічні засоби для вимірювання електричних і, особливо, неелектричних величин стають дедалі складнішими та науково ємкими. Під час проектування нових вимірювальних систем та приладів висувуються все зростаючі вимоги у відношенні їх діапазону вимірювання, точності, чутливості, швидкодії, споживання та надійності не тільки у нормальних, але й у особливо складних експлуатаційних умовах. В результаті цього вимірювальна техніка як галузь наукових знань все більше диференціюється як за галузями застосування, так і за використаними методами та засобами. Ця диференціація дозволяє створити більш глибоку та виважену теорію у кожній із областей знань, але, з іншої сторони, може привести до різкої розрізненості цих областей із-за відсутності загальних теоретичних основ, що охоплюють розвиток всієї вимірювальної техніки.

Використання в науці поняття енергії та законів її збереження й перетворення дозволяє розглядати різні та складні фізичні явища з єдиної – енергетичної точки зору. Спроби чисто енергетичного підходу до аналізу вимірювальних пристроїв, у раніше проведених роботах дослідників, не привели до позитивного результату, бо прямого кількісного зв'язку між енергетичними та точнісними показниками приладів та їх вартістю, складністю й надійністю встановлено не було.

У цих умовах є очевидним, що більш загальні теоретичні основи можуть бути створені шляхом використання й розвитку загальних законів перетворення інформації стосовно до специфіки засобів вимірювань, тобто на основі загальної інформаційної теорії засобів вимірювання.

З практичного досвіду беззаперечно випливає, що енергія, яка затрачається у вимірювальному пристрої, і його точність тісно взаємопов'язані, але отримати аналітичне співвідношення між цими параметрами чисто енергетичними методами малоімовірно. Зате співвідношення між енергією та інформацією приводять до суттєво важливих співвідношень в теорії вимірювальних пристроїв і можуть служити важливим підґрунтям для аналізу їх досконалості та ефективності.

З цих позицій всі показники якості будь-якого вимірювального засобу можна розділити на дві групи: критерії корисного ефекту, отриманого в результаті його створення, та критерії затрат на досягнення цього корисного ефекту.

Корисний ефект, отриманий в результаті створення виробу, може оцінюватись одним показником, наприклад, клас точності приладу, або декількома показниками, коли окрім класу точності, враховується чутливість, швидкодія, надійність тощо. У другому випадку окремі показники корисного ефекту можна назвати одиничними показниками. Оцінка корисного ефекту тільки одиничними показниками, якщо їх багато, є не зовсім зручною, а тому вводиться поняття узагальненого показника. Одиничні та узагальнені показники використовуються і для оцінки затрат.

Структура показників якості, як правило, включає як одиничні, так і узагальнені показники (рис.1).

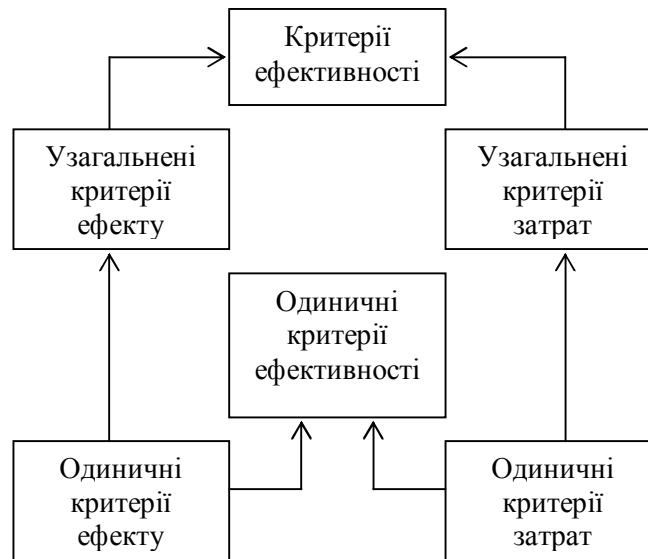


Рис. 1. Структура утворення критеріїв якості

Будь-який вимірювальний пристрій або канал інформаційно-вимірювальної системи можна розглядати як послідовність окремих вимірювальних перетворювачів. Ця послідовність являє собою не схему електричних з'єднань, а послідовне поєднання перетворювачів, що утворюють канал прийому, передачі та перетворення інформації. Перетворювачі, що утворюють цей канал можуть бути різними: механічними, електричними, оптичними, хімічними тощо.

Носієм вимірювальної інформації є енергія. Щоб створити на вході вимірювального каналу або окремого вимірювального перетворювача інформацію, яка могла б потім передаватись далі, необхідно затратити енергію. Тому без споживання енергії від об'єкта вимірювання неможливе і саме вимірювання.

Загальний принцип побудови найбільш ефективного каналу передачі інформації – принцип енергетичного аналізу кожної із ланок цього каналу та узгодження їх між собою.

Враховуючи, що інформація в колі перетворювачів передається потоком енергії, першим і найбільш загальним принципом конструювання вимірювальних перетворювачів є принцип забезпечення найбільш ефективною передачею енергії. Цей принцип, загальний для всіх енергетичних або параметричних перетворювачів, витікає з теорії чотирьохполосників і полягає в узгодженні вхідних та вихідних опорів. Але результати такого аналізу виявляються дещо відмінними для генераторних та параметричних вимірювальних перетворювачів.

Для визначення відношень, що характеризують передачу енергії в колі вимірювальних перетворювачів, достатньо проаналізувати таку передачу між двома, довільно взятими, послідовно розміщеними перетворювачами.

Якщо попередній перетворювач (або об'єкт вимірювання) характеризується вихідним внутрішнім опором R_i і енергією, що розвивається на холостому ходу е.р.с. E , а наступний за ним перетворювач, який є навантаженням попереднього, має вхідний опір R_n , то потужність сигналу, що поступає в R_n ,

$$P_n = I^2 R_n = \frac{E^2}{(R_i + R_n)^2} R_n = \frac{E^2}{R_i} \cdot \frac{R_i R_n}{(R_i + R_n)^2}. \quad (1)$$

У випадку генераторного перетворювача його внутрішній опір R_i не несе інформації і може вважатись постійним. Носієм же інформації є $E = f(x)$, де x – вимірювана величина. У випадку ж параметричного перетворювача, навпаки, носієм інформації служить внутрішній опір перетворювача $R_i = f(x)$, що є функцією вимірюваної величини x , тоді як $E = const$ є напругою живлення, яка отримується від стороннього джерела. Тому аналіз цих двох випадків необхідно вести роздільно.

Для аналізу енергетичної ефективності генераторних датчиків достатньо приведеного відношення (1), у якому перший співмножник E^2 / R_i містить в собі лише параметри самого датчика, а другий

$$\xi = \frac{R_i R_n}{(R_i + R_n)^2}$$

залежить від узгодження опору навантаження R_n з внутрішнім опором R_i датчика і є безрозмірним. Якщо внести поняття ступеня узгодженості $a = R_n / R_i$, то легко показати, що ξ не залежить від абсолютних значень R_n і R_i , а є функцією тільки їх відношення, рівного a . Дійсно:

$$\xi = \frac{R_i R_n}{(R_i + R_n)^2} = \frac{R_n / R_i}{1 + 2(R_n / R_i) + (R_n / R_i)^2} = \frac{a}{(1 + a)^2}. \quad (2)$$

Максимум потужності, яку можна отримати у навантаженні генераторного датчика, досягається для $a = 1$, тобто для $R_n = R_i$, і складає $P_{n, \max} = 0,25 E^2 / R_i$.

Таким чином, показником енергетичної ефективності генераторних датчиків є значення $E^2 / R_i = R_{к.з.}$, яке можна сприймати як вираз потужності короткого замикання датчика, тобто максимальної потужності, яку може розвинути датчик у власному внутрішньому опорі R_i , в режимі короткого замикання його виходу. Корисна потужність сигналу датчика на зовнішньому навантаженні R_n завжди складає деяку частину від $P_{к.з.}$, але не може бути більшою $0,25 P_{к.з.}$.

Енергетичну ефективність параметричних перетворювачів можна проаналізувати для найбільш поширеного випадку використання цього перетворювача в колі неврівноваженого моста. Міст перед вимірюванням знаходиться у стані врівноваження коли $x = 0$. Основна ідея використання неврівноважених мостів полягає у компенсації початкового значення опору параметричного перетворювача R_0 (для $x = 0$), яке не несе інформації про вимірювану величину, і виділенні сигналу лише від приросту $\pm \Delta R$ опору перетворювача при відхиленні вимірюваної величини x від нульового до початкового значення. Чутливість по напрузі мостової схеми у загальному випадку залежить від величини відхилення, тобто за більшої кратності зміни опору пліч моста функція перетворення є нелінійною, але для невеликих відхилень від точки рівноваги її можна вважати приблизно лінійною.

Так як неврівноважені мости найчастіше, з метою забезпечення невеликої похибки лінійності, використовують в режимі малих відносних змін опору параметричних перетворювачів $\varepsilon = \Delta R / R_0$, доцільно визначати їх чутливість у цьому режимі, коли її практично можна вважати постійною. Якщо у цьому випадку всі чотири пліч моста є параметричними перетворювачами, а під дією вимірюваної величини x отримані малі відносні зміни, рівні відповідно $+\varepsilon_1, -\varepsilon_2, +\varepsilon_3, -\varepsilon_4$, то вихідні напруги моста

$$U_n = E \frac{K}{(K+1)^2} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4), \quad (3)$$

де $K = R_1 / R_2 = R_3 / R_4$ – коефіцієнт відношення пліч (коефіцієнт симетрії) моста. Для рівноплечого моста ($K = 1$) це приводить до відношення $U_n = 0,25 E (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4)$. Якщо використовується диференціальний перетворювач, тобто для одночасної зміни опору двох пліч моста $R_1 + \Delta R, R_2 - \Delta R$ і $R_n = \infty$

$$U_n = E \frac{\Delta R}{R_1 + R_2}, \quad (4)$$

а для $R_1 + R_2$ і $\Delta R_1 / R_1 = \Delta R_2 / R_2 = \varepsilon$

$$U_n = \varepsilon E / 2. \quad (5)$$

Це значення чутливості для $R_n = \infty$ залишається справедливим у випадку зміни на величину ε і двох протилежних пліч ($R_1 + \Delta R, R_3 + \Delta R$). У випадку зміни опору лише одного будь-якого плеча моста чутливість буде вдвоє меншою і складе $U_n = (\varepsilon E) / 4$, а у випадку одночасної зміни опору всіх чотирьох пліч ($R_1 + \Delta R, R_4 + \Delta R, R_2 - \Delta R, R_3 - \Delta R$) вдвоє більшою, тобто $U_n = \varepsilon E$.

Всі наведені співвідношення отримані для роботи моста на навантаження нескінченно великого опору, тобто для $R_n = \infty$. Під час роботи моста на навантаження з певним значенням опору потужність вихідного сигналу рівноплечого моста залежить як від потужності, чутливості і кількості використаних перетворювачів, так і від ступеня узгодження навантаження з вихідним опором моста.

Рівноплечий міст, у якого за умови, що вхідна величина $x = 0, R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, має вихідний опір R_i теж рівний R . Тому максимальна потужність сигналу у навантаженні досягається

за умови узгодження її опору з вихідним опором моста, тобто $R_n = R_i = R$. Чутливість по напрузі для малих $\varepsilon = \Delta R/R$ у цьому випадку буде у 2 рази меншою, ніж для $R = \infty$, тобто $U_{n1} = 0,125(\varepsilon E)$ для одного робочого плеча, $U_{n2} = 0,25(\varepsilon E)$ – для двох і $U_{n4} = 0,5(\varepsilon E)$ – для чотирьох. Потужність $P_n = U_n^2 / R_n$, що розвивається на навантаженні, буде відповідно рівною: $P_{n1} = \varepsilon^2 E^2 / 64R$; $P_{n2} = \varepsilon^2 E^2 / 16R$ і $P_{n4} = \varepsilon^2 E^2 / 4R$.

З отриманих виразів для U_n і P_n видно, що чутливість моста зростає як зі збільшенням числа робочих пліч, так і від збільшення напруги E джерела живлення. Але підвищення напруги живлення обмежене гранично допустимим значенням потужності розсіювання використовуваних перетворювачів. Якщо врахувати, що потужність у кожному плечі рівноплечого моста рівна $P_i = E^2 / (4R)$, то вирази для P_n через сумарну потужність P_Σ одного, двох або чотирьох робочих перетворювачів мають вигляд: $P_{n1} = 1/16(\varepsilon^2 P_\Sigma)$; $P_{n2} = 1/8(\varepsilon^2 P_\Sigma)$ і $P_{n4} = 1/4(\varepsilon^2 P_\Sigma)$.

Таким чином, за однієї і тієї ж сумарної потужності використовуваних робочих перетворювачів оптимальним є рівномірний розподіл їх у всі чотири плечі моста.

У випадку використання параметричних перетворювачів в несиметричних, паралельно-симетричних або послідовно-симетричних мостах вирази для вихідної потужності P_n при навантаженні моста мають такий же вигляд, з тією лише різницею, що коефіцієнт перед добутком $\varepsilon^2 P_\Sigma$ приймає дещо інші значення: 1/16, 1/8, 1/4.

Отже, підводячи підсумок проведеного аналізу, можна заключити, що найбільш важливим параметром, який визначає потужність вихідного сигналу вимірювального кола з параметричними перетворювачами, є їх відносна чутливість $\varepsilon = \Delta R/R$ – подвоєння ε у чотири рази збільшує P_n ; другою за важливістю є потужність розсіювання перетворювача P_Σ .

Добуток цих показників $P_{ef} = \varepsilon^2 P_\Sigma$ – ефективна потужність параметричного перетворювача – сукупний показник потужності та чутливості датчика, аналогічний показнику потужності короткого замикання $P_{к.з.}$ генераторних датчиків.

Розглянуті теоретичні положення проведеного інформаційно-енергетичного аналізу стосуються аналітичного опису вихідної потужності електричного сигналу, що отримується від генераторних та параметричних датчиків. Але для приведення в дію і створення вихідного сигналу датчик повинен отримувати енергію від об'єкта вимірювання. Тому ефективність дії датчика визначається не просто потужністю вихідного сигналу, а відношенням цієї потужності з енергією, відібраною від об'єкта вимірювання. Електрична енергія вихідного сигналу генераторних датчиків отримується тільки шляхом перетворення енергії, що сприймається від об'єкта вимірювання. Якщо поступлення енергії від об'єкта припиняється, то зникає і вихідний сигнал. Тому ефективність дії генераторних датчиків може характеризуватись значенням їх коефіцієнта корисної дії як відношення потужності вихідного сигналу до потужності потоку енергії, що відбирається від об'єкта вимірювання, і виражається у безрозмірних одиницях.

Для параметричних датчиків подібне відношення є дещо складнішим. Джерелом енергії вихідного електричного сигналу у цьому випадку є стороннє джерело живлення. Енергія ж, яка відбирається від об'єкта вимірювання, служить лише для регулювання потужності вихідного електричного сигналу. Вона витрачається, наприклад, на деформацію тензорезистора, на переміщення якоря індуктивного перетворювача тощо.

У цьому випадку споживання енергії від об'єкта вимірювання відбувається тільки під час зміни вимірюваної величини. Якщо ж зміна вимірюваної величини припинилась і вона залишилась на досягнутому рівні, то припиняється і споживання енергії від об'єкта вимірювання, а вихідний сигнал датчика буде неперервно у часі нести енергію.

Отже, ефективність дії генераторних датчиків може характеризуватись значенням їх коефіцієнта корисної дії, а ефективність параметричних датчиків – відношенням потужності сигналу на виході до затрат енергії на вході.

У ряді випадків доцільно провести детальне дослідження енергетичних співвідношень у датчиках, яке може виявити внутрішні можливості вдосконалення. У цьому випадку, за аналогією з послідовністю вимірювальних перетворювачів, складається коло послідовних перетворень енергії (потужності) вихідного сигналу датчика.

Послідовність енергетичного аналізу можна розглянути на прикладі тензорезистивного датчика лінійних прискорень (рис. 2).

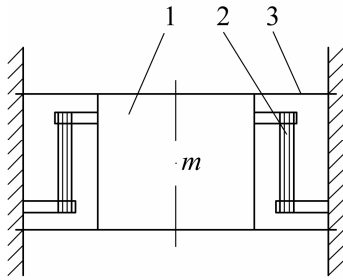


Рис. 2. Тензорезистивний датчик лінійних прискорень:
1 – інерційна маса; 2 – тензорезистори; 3 – мембрани

Якщо інерційну систему відліку зв'язати з об'єктом вимірювання, то при рівномірному русі перетворювач акселерометра буде знаходитись у спокої, на нього не будуть діяти сили і він не буде отримувати енергію.

Під час прискорення або сповільнення руху на інерційну масу датчика буде діяти сила $F = ma$, де m – інерційна маса, a – прискорення. Під дією цієї сили пружна система датчика запасе енергію:

$$W_{ex} = F^2 / 2C = m^2 a^2 / 2C, \quad (6)$$

де C – штивність пружної системи.

Враховуючи, що для системи з одним ступенем вільності $C/m_0 = \omega_0^2$, де ω_0 – власна частота коливань, отримаємо

$$W_{ex} = ma^2 / 2\omega_0^2. \quad (7)$$

Для $a = const$ датчик, отримавши енергію W_{ex} , створює на виході вимірювального кола неперервний потік потужності

$$P = \varepsilon_R^2 E^2 / 4R, \quad (8)$$

де ε_R – відносна зміна опору; E – напруга джерела живлення; R – опір тензорезисторів мостової схеми.

Енергетична ефективність датчика виразиться відношенням

$$\eta = \frac{P}{W_{ex}} = \frac{E^2 \varepsilon_R^2 \omega_0^2}{2Rma^2}. \quad (9)$$

Замінивши

$$E^2 \varepsilon_R^2 / a^2 = U_{eux}^2 / a^2 = S^2, \quad (10)$$

де S – чутливість датчика, отримаємо

$$\eta = \frac{S^2 \omega_0^2}{2Rm}. \quad (11)$$

Для виявлення шляхів підвищення енергетичної ефективності, тобто для вирішення задач синтезу датчика, доцільно розглянути енергетичні ефективності проміжних етапів перетворення енергії. Можна виділити два етапи: перетворення енергії, яка запасється пружною системою датчика, в енергію деформації тензорезисторів і перетворення енергії деформацій тензорезисторів у вихідну електричну потужність датчика. Енергія, яка передається тензорезисторам, визначається виразом

$$W_{mp} = F_{mp}^2 / 2C_{mp}, \quad (12)$$

де F_{mp} – сила, що діє на терморезистори; C_{mp} – штивність терморезисторів.

Враховуючи, що переміщення інерційної маси і деформації терморезисторів рівні $F/C = F_{mp}/C_{mp}$, отримаємо $W_{mp} = F^2 C_{mp} / 2C^2$.

Тоді енергетична ефективність першого етапу перетворення визначиться як

$$\eta_1 = W_{mp} / W_{ex} = C_{mp} / C. \quad (13)$$

Оскільки загальна штивність пружної системи складається з штивності тензорезисторів C_{mp} і штивності мембран C_m , то $\eta_1 = C_{mp} / (C_{mp} + C_m)$.

Звідси висновок, що для підвищення енергетичної ефективності на першому етапі перетворення необхідно зменшити штивність мембран у напрямку осі датчика. Але це зменшення

не повинне супроводжуватись зменшенням штивності у поперечному напрямі, оскільки може привести до збільшення поперечної чутливості датчика.

Енергетична ефективність другого етапу перетворення енергії визначається відношенням

$$\eta_2 = \frac{P}{W_{mp}} = \frac{E^2 k^2}{2RE_{mp}V_{mp}}, \quad (14)$$

де k – коефіцієнт тензочутливості; V_{mp} – об'єм тензорезистора; E_{mp} – модуль пружності матеріалу тензорезистора.

Звідси висновок, що для підвищення ефективності перетворення енергії на другому етапі необхідно застосовувати матеріали з більшим коефіцієнтом тензочутливості, меншим модулем пружності і виготовляти тензорезистори так, щоб потужність розсіювання, що припадає на одиницю об'єму тензочутливого матеріалу $E^2 / 2RV_{mp}$, була більшою.

Загальна енергетична ефективність датчика визначається добутком енергетичних ефективностей всіх етапів перетворення, у даному випадку $\eta = \eta_1 \eta_2$. Якщо датчик включає n етапів енергетичних перетворень, то $\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n$.

Таким чином, аналіз енергетичної ефективності дозволяє об'єднати ряд основних технічних параметрів тензорезистивного акселерометра у відповідності з (11), а також сформулювати конкретні практичні рекомендації в процесі проектування первинного вимірювального перетворювача.

1. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника: Учеб. пособие для техн. вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – С. 384.
2. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – С. 480.
3. Тарас Б.І., Михалевич В.Т., Денисюк В.Ю. Передача інформації у вимірювальних трактах первинного перетворення тиску в системах автоматизації // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство») – Луцьк: Луцький національний технічний університет, – 2011. Випуск 30 (березень, 2011). – С. 175 – 179.