

ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ

УДК 53.08; 621.317.7; 621.38

ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЯКОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

© Яцук Василь, 2008

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна,

vyatsuk@polynet.lviv.ua

Виконано теоретичні дослідження інформаційно-енергетичного коефіцієнта якості засобів вимірювальної техніки. Розглянуто шляхи збільшення його значення на основі певних методів автоматичного коригування похибок, а також зменшення їхніх у часових змін в реальних умовах експлуатації з використанням кодокерованих мір. Показано можливість практичного використання запропонованого способу оперативного контролю процесів вимірювань з малогабаритними та переносними кодокерованими мірами електричних величин, виготовленими на основі сучасних досягнень мікроелектронних та інформаційних технологій.

Выполнены теоретические исследования информационно-энергетического коэффициента качества средств измерительной техники. Рассмотрены пути повышения его значения на основе определённых методов автоматической коррекции погрешностей, а также уменьшения его временных изменений в реальных условиях эксплуатации с использованием кодоуправляемых мер электрических величин. Показана возможность практического использования предложенного способа оперативного контроля процессов измерений на базе малогабаритных и переносных кодоуправляемых мер электрических величин, изготовленных на основе современных достижений информационных и микроэлектронных технологий.

There are described the theoretical investigations of quality information-energetic coefficient for measuring devices. This coefficient increasing possibilities by some methods of error automatic correction and timing changing errors at exploitation conditions are proved in this article. The practical possibilities of measurement process operative control proposed method based on a electric code-control measure with small mass and dimension values, which used up-to-day information and microelectronic technology are considered too.

Постановка задачі досліджень. Відомо, що за допомогою енергетичного коефіцієнта якості засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) можна врахувати лише вплив еквівалентних шумів, зведених до входу, а також енергетичну взаємодію ЗВТ з об'єктом вимірювання [1, 2]. Одним із основних показників ЗВТ є кількість отримуваної з його допомогою вимірювальної інформації q або ж кількість N розрізняваних приладом градацій вимірюваної величини. Важливим моментом при визначенні кількості вимірювальної інформації q або ж кількості N розрізняваних приладом градацій вимірюваної величини є використання поняття гарантійної похибки, яка відповідає вимогам сучасних нормативних документів стосовно зони невизначеності результату вимірювання [3, 4]. Тому доцільним є встановлення інформаційного коефіцієнта якості ЗВТ, при встановленні значення якого, на нашу

думку, бажано використовувати поняття кількості N розрізняваних приладом градацій вимірюваної величини. Обидва поняття – кількості N розрізняваних приладом градацій вимірюваної величини та кількості вимірювальної інформації q – відображають суть вимірювальних процесів і пов'язані між собою через логарифмічну функцію. Тому, при встановленні значення інформаційного коефіцієнта якості ЗВТ пропонуємо використовувати поняття кількості N розрізняваних приладом градацій вимірюваної величини, оскільки це дає більшу крутість його залежності від параметрів ЗВТ. Кількісно значення цього коефіцієнта k_{if} дорівнюватиме кількості N розрізняваних приладом градацій вимірюваної величини. Очевидно, що кількісно значення енергетичного коефіцієнту якості k_{en} ЗВТ є набагато меншим від одиниці [1, 2], а інформаційного – набагато більшим від одиниці, то в

ідеальному випадку відсутності похибок ЗВТ значення їхнього добутку буде лежати в околі одиничних значень.

Інформаційний коефіцієнт якості засобів вимірювальної техніки. В загальному випадку при використанні многочленної моделі похибок вираз для інформаційного коефіцієнта якості κ_{if} ЗВТ подамо як

$$\kappa_{if} = \frac{(X_2 - X_1) / \Delta_p(x) = (X_2 - X_1)}{\left[\bar{\Delta}_0 \pm k_{0p} s_0 + \left(\bar{\delta}_s \pm k_{sp} s_d \right) x + \left(\bar{\varepsilon} \pm k_{ep} s_e \right) x^2 + \dots + \Delta_{py} \right]}, \quad (1)$$

де $\bar{\Delta}_0 = \Delta_d + \Delta_{0A} + \Delta_{лз}$ – адитивна складова похибки (АСП) результату вимірювання у нормальних умовах експлуатації; Δ_d – похибка дискретності подання результату вимірювання; Δ_{0A} – АСП ЗВТ у нормальних умовах експлуатації; $\Delta_{лз}$ – АСП, зумовлена лініями зв'язку між ЗВТ та об'єктом вимірювання у робочих умовах експлуатації; $\sigma_0 = \sigma_3 + \sigma_{ш}$, k_{0p} – відповідно, середньоквадратичне відхилення випадкової складової АСП та її довірчий коефіцієнт у нормальних умовах експлуатації; σ_3 , $\sigma_{ш}$ – відповідно, середньоквадратичні відхилення випадкової складової АСП, зумовлені зовнішніми завадами та еквівалентними шумами ЗВТ; $\bar{\delta}_s$, σ_{δ} , k_{sp} – відповідно, систематична і випадкова складова мультиплікативної складової похибки (МСП) та її довірчий коефіцієнт у нормальних умовах експлуатації; $\bar{\varepsilon}$, σ_{ε} , k_{ep} – відповідно, систематична і випадкова складова квадратичної складової похибки (КСП) та її довірчий коефіцієнт у нормальних умовах експлуатації;

$$\Delta_{py} = \sum_{i=1}^m \left[\Delta_{0i} + \left(\bar{\delta}_{si} \pm k_{spi} \sigma_{\delta i} \right) x + \left(\bar{\varepsilon}_i \pm k_{epi} \sigma_{\varepsilon i} \right) x^2 + \dots \right] \quad (1)$$

додаткова складова похибки ЗВТ у робочих умовах експлуатації за умови відсутності кореляції між складовими; $i=1, 2, \dots, m$ – кількість нормованих для ЗВТ факторів додаткових похибок; Δ_{0i} – додаткова АСП ЗВТ у робочих умовах експлуатації, спричинена i -м фактором похибки; $\bar{\delta}_{si}$, $\sigma_{\delta i}$, k_{spi} – додаткові, відповідно, систематична та випадкові складові МСП ЗВТ та її довірчий коефіцієнт у робочих умовах експлуатації, спричинені i -м фактором похибки; $\bar{\varepsilon}_i$, $\sigma_{\varepsilon i}$, k_{epi} – додаткові, відповідно, систематична та

випадкові складові КСП ЗВТ та її довірчий коефіцієнт у робочих умовах експлуатації, спричинені i -тим фактором похибки.

Способи збільшення інформаційного коефіцієнта якості засобів вимірювальної техніки. Аналіз співвідношення (1) показує, що інформаційний коефіцієнт якості κ_{if} ЗВТ (кількість N розрізняваних приладом градацій вимірюваної величини) в робочих умовах експлуатації та за відсутності корекції похибок матиме невеликі значення. Якщо в цьому співвідношенні (1) врахувати ще й часові зміни параметрів елементів ЗВТ, то на практиці доволі проблематично науково строго, а не на основі “інженерної інтуїції”, оцінювати якість ЗВТ. Тому пропонуємо виконувати періодичне калібрування ЗВТ: для ЗВТ, що вже експлуатуються – з використанням переносних калібраторів електричних величин, а для розроблюваних ЗВТ – з автоматичною корекцією АСП та використанням переносних кодокерованих мір. Зазначимо, що традиційне здійснення автоматичної корекції АСП безпосередньо на вході ЗВТ не дасть можливості скоригувати АСП $\Delta_{лз}$, зумовлену лініями зв'язку між ЗВТ та об'єктом вимірювання у робочих умовах експлуатації.

За умови виконання автоматичної корекції АСП безпосередньо на вході ЗВТ вираз для інформаційного коефіцієнта якості κ_{if1} ЗВТ зміниться так

$$\kappa_{if1} = (X_2 - X_1) / \left(\bar{\Delta}_{01AK} \pm k_{0p} \sigma_{01AK} + x \Delta_{xx} + \Delta_{pyAK1} \right), \quad (2)$$

де $\bar{\Delta}_{01AK} = \Delta_d + \Delta_{01AK} + \Delta_{лз}$ – АСП результату вимірювання у нормальних умовах експлуатації з автоматичною корекцією АСП безпосередньо на вході ЗВТ; $\sigma_{01AK} = \sigma_3 + \sigma_{шAK}$, k_{0p} – відповідно, середньоквадратичне відхилення випадкової складової АСП та її довірчий коефіцієнт у нормальних умовах експлуатації з автоматичною корекцією АСП безпосередньо на вході ЗВТ; $\sigma_{шAK}$ – середньоквадратичне відхилення випадкової складової АСП, зумовлене еквівалентними шумами ЗВТ, з автоматичною корекцією АСП безпосередньо на його вході;

$$\Delta_{xx} = \left(\bar{\delta}_s \pm k_{sp} \sigma_{\delta} \right) + \left(\bar{\varepsilon} \pm k_{ep} \sigma_{\varepsilon} \right) x + \dots -$$

МСП та НСП ЗВТ у нормальних умовах експлуатації;

$$\Delta_{pyAK1} = \sum_{i=1}^m \left[\Delta_{01AKi} + \left(\bar{\delta}_{si} \pm k_{spi} \sigma_{\delta i} \right) x + \left(\bar{\varepsilon}_i \pm k_{epi} \sigma_{\varepsilon i} \right) x^2 + \dots \right] -$$

додаткова складова похибки ЗВТ у робочих умовах експлуатації з автоматичною корекцією АСП безпосередньо на вході ЗВТ; Δ_{01AKi} – додаткова АСП ЗВТ в робочих умовах експлуатації, спричинена i -м фактором похибки, з автоматичною корекцією АСП безпосередньо на його вході.

Якщо автоматична корекція АСП здійснюється безпосередньо на виході первинного вимірювального перетворювача (ПВП), то вираз для інформаційного коефіцієнта якості $K_{i\phi 2}$ ЗВТ зміниться як

$$K_{i\phi 2} = (X_2 - X_1) / \left(\Delta_{02AK} \pm k_{0p} \sigma_{02AK} + x \Delta_{xx} + \Delta_{pyAK} \right), \quad (3)$$

де $\Delta_{02AK} = \Delta_d + \Delta_{02AK}$ – АСП результату вимірювання в нормальних умовах експлуатації з автоматичною корекцією АСП безпосередньо на виході ПВП; $\sigma_{02AK} = \sigma_3 + \sigma_{2шAK}$, k_{0p} – відповідно, середньоквадратичне відхилення випадкової складової АСП та її довірчий коефіцієнт у нормальних умовах експлуатації з автоматичною корекцією АСП безпосередньо на виході ПВП; $\sigma_{2шAK}$ – середньоквадратичне відхилення випадкової складової АСП, зумовлене еквівалентними шумами ЗВТ, з автоматичною корекцією АСП безпосередньо на виході ПВП.

З аналізу виразів (2) та (3) робимо висновок, що автоматична корекція АСП дає змогу істотно підвищити інформаційний коефіцієнт якості ЗВТ завдяки значному зменшенню значення АСП. Мінімальне нескореговане значення АСП може бути досягнуте з використанням методу інвертування вимірюваного сигналу, який уможливує перетворення без втрат вимірювальної інформації [5]. Простота технічної реалізації методу інвертування вимірюваного сигналу дає принципову можливість і автоматичної корекції АСП, зумовленої лініями зв'язку між ЗВТ та об'єктом вимірювання в робочих умовах експлуатації (технічна реалізація полягає в конструктивній можливості винесення вхідного перемикача полярності поза межі ЗВТ безпосередньо до виходу ПВП, при цьому кількість дротів ліній зв'язку зростає (для передавання сигналів керування цим перемикачем)).

Зменшення часових змін похибок засобів вимірювальної техніки. Однак тільки автоматична корекція АСП не дає можливості визначення інформаційного коефіцієнта якості ЗВТ з певною ймовірністю через можливі непрогнозовані зміни робочих умов експлуатації, а також поступові деградаційні

зміни параметрів елементів всього вимірювального кола. Як було показано [1, 5], за умов використання диференційного методу вимірювання та кодокерованої міри з лінійною функцією перетворення та автоматичною корекцією систематичних складових, похибку $\Delta_x(X, \dot{Q}, \dot{\zeta}, t)$ ЗВТ можна подати виразом

$$\Delta_x(X, \dot{Q}, \dot{\zeta}, t) = 2\Delta_d + \Delta_{кл0x} + \Delta_{шмм} + \Delta_{0m}(\dot{Q}, \dot{\zeta}, t) + [\delta_{Sm}(\dot{Q}, \dot{\zeta}, t) \pm k_p \sigma_m] \cdot X, \quad (4)$$

де $\Delta_d = \Delta_x / 2$ – похибка дискретності подання результату вимірювання; $\Delta_{кл0x}$ – нескореговане значення при автоматичній корекції АСП ЗВТ; $\Delta_{шмм}$ – максимальне ентропійне значення похибки, зумовленої еквівалентною шумовою напругою на вході ЗВТ; $\Delta_{0m}(\dot{Q}, \dot{\zeta}, t)$ – АСП кодокерованої міри; $\delta_{Sm}(\dot{Q}, \dot{\zeta}, t)$ – мультиплікативний коефіцієнт похибки кодокерованої міри; k_p – ентропійний коефіцієнт випадкової складової похибки кодокерованої міри, середньоквадратичне відхилення якої становить σ_m .

З аналізу виразу (4) можна зробити висновок, що з метою забезпечення близького до нуля значення математичного сподівання похибки ЗВТ в робочих умовах експлуатації необхідно використовувати кодокеровані міри з автоматичною корекцією їхньої АСП або ж використовувати в ЗВТ алгоритми вимірювань з корекцією АСП і кодокерованих мір. У такому разі АСП ЗВТ при використанні методу інверсії, як було показано вище, може бути зменшена до значень, що визначаються тільки розкидом параметрів ключів перемикачів полярності. Якщо перемикачі полярності реалізуються на основі сучасних інтегральних мікросхем, типові значення розкиду параметрів в яких не перевищує десятих часток процента [5, 6], то нескореговане значення АСП ЗВТ методом інвертування вхідного сигналу практично може бути зменшене до значень, співмірних із значеннями випадкової складової похибки, зумовленої еквівалентними вхідними шумами. Відомо, що часові зміни похибки будь-яких ЗВТ – складний, достатньо широкосмуговий (особливо в області дуже низьких частот), неергодичний і нестационарний випадковий процес, параметри якого до того ж залежать від значення вимірюваної величини [7, 8]. В результаті значної кількості експериментальних досліджень було показано, що основними факторами прогресуючих похибок ЗВТ будь-якого типу та принципу дії є [8]:

– поступове вивільнення внесених при виготовленні ЗВТ запасів енергії, зумовлених технологією їхнього виробництва;

– процеси взаємодії речовин елементів ЗВТ з довкіллям (в загальному випадку є непрогнозованими і важко піддаються урахуванню);

– процеси, викликані коливаннями температури довкілля та іншими потоками енергії (різні випромінювання, зміни параметрів природного та штучних електромагнітних полів тощо).

Експериментально встановлено також, що для всіх аналогових та цифрових приладів поточне значення $\gamma(t)$ зведеної похибки описується співвідношенням

$$\gamma(t) = \gamma_0 + v_0 \tau (1 - e^{-t/\tau}), \quad (5)$$

де γ_0 – значення зведеної похибки у момент випуску ЗВТ з виробництва; t – вік ЗВТ з моменту його випуску; τ – стала часу метрологічної стабілізації ЗВТ; v_0 – початкова швидкість зростання зведеного значення прогресуючої похибки.

Для встановлення числових значень коефіцієнтів залежності (5) експериментальні спостереження повинні вестися для багатьох зразків приладів упродовж всього терміну їхньої експлуатації, тобто протягом 10–20 років. Водночас номенклатура серійних ЗВТ приблизно за 5–10 років практично повністю оновлюються [8] і, тому вказані дослідження можуть слугувати тільки для побудови тих чи інших моделей старіння, тобто мають у результаті практично тільки теоретичну науково-технічну цінність. Оскільки швидкість зміни прогресуючих в часі похибок має випадковий характер, то єдиним методом виявлення їхніх накопичених значень є перевірка ЗВТ за зразковими сигналами [7]. Ця корекція може виконуватись як автоматично, так і вручну, причому, за відсутності нелінійної складової похибки достатньо виконати дві операції – корекції в околі нульових та максимальних значень вимірюваного сигналу [7]. Тому для підтримання похибок ЗВТ в певних заданих межах операція корекції повинна повторюватись періодично і саме з цією метою здійснюються щорічні метрологічні перевірки всіх ЗВТ. Одразу після корекції відбуваються повторні накопичення похибок, однак якщо періодичність корекцій збільшувати (до одного дня, години, хвилини, секунди тощо), то точність можна істотно підвищити, але для цього весь процес корекції повинен бути повністю автоматизований [7]. Прак-

тичним обмеженням, яке унеможливило реалізацію цієї ідеї, є необхідність корекції в нормальних умовах експлуатації, що потребує демонтажу ЗВТ з місць експлуатації, транспортування їх до спеціальних метрологічних лабораторій, здійснення метрологічної перевірки та повторного транспортування і монтажу ЗВТ на місці експлуатації. У результаті вартість таких корекцій істотно зростає і може перевищити вартість перевірюваного ЗВТ, або й навіть продукції, що виготовляється з його участю, тобто стає економічно не вигідною. Тому й пропонуємо для корекції похибок ЗВТ використовувати диференційний метод вимірювання з використанням кодокерованих мір та автоматичною корекцією АСП. У такому разі, при лінійній функції перетворення кодокерованої міри коригується і НСП ЗВТ. Очевидно, що в робочих умовах експлуатації МСП кодокерованих мір змінюватиметься, однак при забезпеченні малих їхніх масогабаритних показників (виготовлення кодокерованих мір як інтегральних мікросхем) економічно доцільно використовувати арсенал добре практично освоєних в приладобудуванні конструктивно-технологічних методів зменшення впливу їхніх додаткових похибок. Отже, за допомогою таких методів можна корегувати вплив практично всіх дестабілізуючих факторів, за винятком змін температури довкілля. Аналіз показав, що для корекції додаткової температурної похибки кодокерованих мір найдоцільніше використовувати метод допоміжних вимірювань із конструктивно влаштованим в міру температурним каналом [9, 10]. Частоту ж метрологічних перевірок таких кодокерованих мір можна встановити експериментально для кожного окремого їхнього типу. На основі цих експериментальних досліджень, передбачивши у малогабаритних кодокерованих мірах коригувальні пристрої, у межах міжперевірювального інтервалу доцільно використовувати лінійну апроксимацію часових змін МСП кодокерованих мір. Із урахуванням наведених вище обґрунтувань похибку $\Delta_{\text{ісп}}(X, \dot{Q}, \dot{\zeta}, t)$ ЗВТ можна подати виразом

$$\Delta_{\text{ісп}}(X, \dot{Q}, \dot{\zeta}, t) = 2\Delta_{\text{д}} + \Delta_{\text{кліох}} + \Delta_{\text{шм}} + \Delta_{\text{кліом}} + [\delta_{\text{ісм}}(1 + k_{\text{іот}}t) \pm k_{\text{р}}\sigma_{\text{ім}}(1 + k_{\text{іот}}t)] \cdot X, \quad (6)$$

де $\delta_{\text{ісм}}$, $\sigma_{\text{ім}}$ – відповідно, коефіцієнт МСП та середньоквадратичне відхилення кодокерованих мір, встановлені при i -й перевірці; $k_{\text{іот}}$, $k_{\text{іот}}$ – коефіцієнти часових змін відповідно, МСП та середньоквадратичне

відхилення кодокерованих мір, встановлені при і-й перевірці.

Очевидно, що максимальне значення абсолютної похибки ЗВТ буде при максимальному значенні вимірюваної величини $X=X_k$. Тоді, із урахуванням максимального значення шумової напруги $\Delta_{шм}$ [1], вираз для похибки $\Delta_{іхп}(X, Q, \zeta, t)$ ЗВТ подамо як

$$\Delta_{іхп}(X, Q, \zeta, t) = 2\Delta_d + \Delta_{кл} + \sqrt{(\pi e/2)[S_{0e}(f_{вч} - f_{кл}) + S_{fe} f_{fe} \ln(f_{вч}/f_{кл})]} + (\delta_{іSM} \pm k_p \sigma_{іM})X_k + (\delta_{іSM} k_{іdt} \pm k_p k_{іct})X_k t, \quad (7)$$

де $\Delta_{кл} = \Delta_{кл0x} + \Delta_{кл0m}$ – нескориговане значення похибки при автоматичній корекції АСП ЗВТ.

З урахуванням (7) вираз інформаційного коефіцієнта якості $k_{іфм}$ ЗВТ з використанням кодокерованих мір остаточно запишеться як

$$k_{іфм} = \frac{X_2 - X_1}{\Delta_{іхп}(X, Q, \zeta, t)} = (X_2 - X_1) \left/ \left[2\Delta_d + \Delta_{кл} + \sqrt{\frac{\pi e}{2} D_{ш}} + (\delta_{іSM} \pm k_p \sigma_{іM})X_k + (\delta_{іSM} k_{іdt} \pm k_p k_{іct})X_k t \right] \right. \quad (8)$$

Добуток енергетичного $k_{ен}$ та інформаційного $k_{іфм}$ коефіцієнтів якості і може використовуватись як основний параметр, що характеризує якість використаного ЗВТ. Відзначимо, що результати вимірювання, отримані цим ЗВТ, будуть із заданою гарантійною ймовірністю P накривати істинне значення вимірюваної величини.

Висновки. Дослідження є теоретичною підставою для розроблення нового покоління ЗВТ електричних величин, в яких практично можна забезпечити оперативний контроль вимірювань. Роль “чорної скриньки” за термінологією ДСТУ 3921 виконуватимуть кодокеровані міри електричних величин. Для забезпечення практичного використання цього способу оперативного контролю доцільно реалізовувати кодокеровані міри малогабаритними та переносними з використанням сучасних досягнень мікроелектронних та інформаційних технологій. При виникненні сумнівів в правдивості результатів вимірювань, отриманих з цього ЗВТ, його влаштовану “чорну скриньку” необхідно демонтувати з приладу та відправити на метрологічну перевірку, а на її місце під’єднати перевірену “чорну скриньку”. Отже, процедура оперативного контролю здійснюватиметься

практично безперервно, за винятком проміжків часу, потрібних для заміни “чорної скриньки”. Якщо і після заміни “чорної скриньки” із ЗВТ отримуються сумнівні результати, то необхідно детальніше проаналізувати реальні умови експлуатації щодо виявлення неврахованих факторів похибок або ж, у разі отримання негативного результату, демонтувати ЗВТ і відправити його на метрологічну перевірку. За умови здійснення автоматичної корекції АСП вхідного вимірювального кола перехідні опори та залишкові контактні ЕРС комутаційних елементів (роз’ємів) “чорних скриньок” не впливатимуть на результат вимірювання.

1. Яцук В. Аналіз впливу шумів на коефіцієнт якості засобів вимірювальної техніки // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – №65. – 2005. – С. 33–38.
2. Методи підвищення якості засобів вимірювальної техніки з використанням кодокерованих мір // *Відбір і обробка інформації*. – №23(99). – 2005. – С. 63–68.
3. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition*. – ISO, Switzerland, 1993. – 101 с.
4. *Применение “Руководства по выражению неопределённости измерений”*: РМГ 43-2001: Приняты Межгосуд. советом по станд., метрологии и сертиф. 02.11.2001 / ИПК Изд-во стандартов. – М., 2003. – 20 с.
5. Яцук В. Підвищення метрологічної надійності засобів вимірювань у робочих умовах експлуатації // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2002. – №60. – С. 98–102.
6. Яцук В. Покращення характеристик дельта-сигма АЦП у робочих умовах експлуатації // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2002. – №61. – С. 101–105.
7. Новицкий П.В., Зограф И.А. *Оценка погрешностей результатов измерений*. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
8. Новицкий П.В., Зограф И.А., Лабунец В.С. *Динамика погрешностей средств измерений*. 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
9. Яцук В., Яцук Ю. *Метод покращення характеристик напівпровідникових сенсорів на основі р-п-переходу* // *Вимірювальна техніка та метрологія*. – 2002. – №59. – С. 90 – 96.
10. Яцук В.О., Яцук Ю.В. *Підвищення точності та метрологічної надійності засобів вимірювання температури з напівпровідниковими сенсорами* // *Вісник Націон. ун-ту “Львівська політехніка”; Автоматика, вимірювання та керування*. – 2003. – Вип. 475. – С. 88–93.