

## КАЛІБРУВАННЯ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ НА МІСЦІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

© Яцук В.О., Здеб В.Б., 2011

**Проаналізовано можливість автоматичного калібрування багатоканальних засобів вимірювання напруги на місці експлуатації. Запропоновано структуру і алгоритм усунення адитивних та мультиплікативних складових похибок. Проаналізовано вираз нескоригованої похибки після автокалібрування.**

**Ключові слова:** автокалібрування, багатоканальні засоби, адитивна похибка, мультиплікативна похибка.

**The multichanal measuring device autocalibration possibolitis for voltmeter errors decreasing at working conditions are proposed in this paper. The structural schema and algorithm for additive and multiplicative errors decreasing are designed also. The noncorrection error expression after autocalibration analysis is done.**

**Key words:** autocalibration, multichanal device, additive error, multiplicative error.

### Вступ

В умовах сучасного виробництва на передньому плані постають проблеми із забезпеченням конкурентоспроможності виготовлюваної продукції. Очевидно, що для цього потрібно безперервно контролювати параметри технологічних процесів з використанням, якщо це можливо, переносних робочих еталонів [1]. Необхідність контролювання в багатьох точках призводить до доцільності застосування багатоканальних засобів збору, передавання та опрацювання вимірювальної інформації (БЗВ), яке зазвичай здійснюється в єдиному контролері. Для багатьох виробництв, наприклад, в енергетиці, нафтогазовій і хімічній промисловостях тощо, необхідно забезпечувати іскро- та вибухобезпеку з гальванічним розділенням вимірювальних каналів.

### Огляд науково-літературних джерел

У багатоканальних системах автоматичного управління технологічними процесами низки виробництв виникає завдання збору вимірювальної інформації із сенсорів, які мають різні потенціали точок заземлення, наприклад, металургійні, машинобудівні, нафтогазові і хімічні виробництва, теплові та атомні електростанції тощо [2]. Оскільки міжканальні завади можуть сягати значень десятків і сотень вольт, то немає альтернативи використанню релейних комутаторів каналів, або перетворювачів з гальванічним розділенням. Релейні комутатори призводять до виникнення істотної адитивної складової похибки (АСП), зумовленої часовими та температурними змінами їх залишкових напруг та струмів витоку керування. Окрім того, у такому разі комутатор вимірювальних сигналів, зазвичай, реалізується як єдине конструктивне ціле, до якого джерела вимірювальних сигналів під'єднуються окремими лініями зв'язку, довжина яких може сягати декількох сотень метрів і в місцях під'єднання можуть виникати контактні ЕРС, що спричиняє появу додаткової АСП вимірювального тракту.

Перетворювачі з гальванічним розділенням не дають змоги коригування власних АСП, мають достатньо високу вартість та необхідність використання якісних гальванічно розділених блоків живлення для кожного з вимірювальних каналів [1–5]. Очевидно, що в цьому разі істотно зменшуються вимоги до комутатора вимірювальних каналів (КМТ), оскільки він комутуватиме сигнали порівняно невисокого рівня і може бути практично будь-якого типу, наприклад, на основі КМДН-транзисторів [6].

Відомо, що з метою зменшення завад спільного виду потрібно використовувати еквіпотенціальний захист вимірювального кола [6], до того ж у БЗВ потрібно окремо комутувати й лінію екрана, оскільки потенціали заземлення кожного із джерел сигналів у загальному випадку можуть бути різними.

Найменших апаратних затрат під час забезпечення іскро- або вибухозахисту в БЗВ можна досягти розміщенням бар'єру іскро- або вибухозахисту (БІ) на виходах комутаторів каналів КМТ. До джерел вимірювальних сигналів в будь-яких аварійних ситуаціях не зможуть потрапити електричні сигнали, що можуть спричинити появу іскри або вибуху.

Як показав аналіз літературних джерел, принциповим недоліком відомих методів і засобів побудови БЗВ є практична відсутність можливостей їх калібрування на місці експлуатації із врахуванням впливу залишкових параметрів власне ліній зв'язку (ЛЗ) між сенсорами та вторинним приладом.

**Метою статті** є аналіз можливостей автоматичного калібрування багатоканальних засобів вимірювання напруги на місці експлуатації.

### Вибір методу калібрування

У цифрових засобах вимірювальної техніки домінуючою є адитивна складова похибки (АСП), меншою, зазвичай, в декілька (або й кільканадцять) разів, є мультиплікативна складова (МСП) і нехтовно малою порівняно з ними є нелінійна складова похибки (НСП). Для автоматичного коригування АСП та парних ступенів НСП можна використати метод комутаційного інвертування [6], до того ж ускладнювати його реалізацію в БЗВ, використовуючи додаткові комутатори для інвертування сигналу, не є доцільним [7]. Завдяки використанню корекції АСП методом комутаційного інвертування, а також відносно прецизійної елементної бази для стабілізації загальної функції перетворення можна досягнути комплексу метрологічних характеристик, задовільних для промислових приладів [6]. Так, для універсальних цифрових приладів постійного струму типу ЦР7701 границя допустимих значень основної відносної похибки вимірювання не перевищує  $\pm(0,1-0,2)\%$ , одиниця молодшого розряду становить десяті частинки мікрвольт, робочі температури експлуатації від  $+5$  до  $+50$  °С, межа допустимих значень додаткової відносної похибки вимірювання не перевищує третини класу точності, час роботи приладів без підстроювань не менший 5000 год. Практичні переваги методу комутаційного інвертування оцінили і провідні світові виробники, наприклад, фірма Analog Devices вже певний час виготовляє інтегральні мікросхеми дельта-сигма АЦП типу AD7719 [9]. Така мікросхема має добрі для виробничих умов технічні та економічні характеристики і може виконувати функцію аналогової частини універсального цифрового приладу.

Однак, як прилади типу ЦР7701, так і прилади, побудовані з використанням інтегральних мікро-схем АЦП, мають загальний недолік, який полягає в охопленні тільки частини вимірювального кола корекцією АСП. Очевидно, що йдеться тільки про корекцію АСП власне вторинного приладу ВП. На практиці, здебільшого промислові вторинні прилади під'єднуються до сенсорів доволі довгими з'єднувальними лініями, в яких через контактні явища та градієнти температур можуть виникати ЕРС, а також спадки напруг, зумовлені струмами витоку через ізоляцію від сусідніх потужних електроджерел. Ці похибки спричиняються і контактними ЕРС, що можуть виникати в місцях з'єднань дротів, і зміною їх опору, і через завади нормального і спільного виду, особливо у разі проходження ліній біля силового електричного обладнання та погіршенню опору їх ізоляції тощо. Попередній аналіз показує, що здебільшого похибки, зумовлені з'єднувальними лініями, є низькочастотними та повільно змінними в часі, тому їх вплив на результат вимірювання в першому наближенні можна вважати адитивним і для їх корекції можна використати метод комутаційного інвертування з розміщенням перемикача полярності (ПП) якомога ближче до виходу первинного вимірювального перетворювача.

Оскільки в ключах на основі інтегральних КМДН-транзисторів принципово не виникає контактних ЕРС, температурний діапазон використання сучасних серійних мікросхем доволі широкий (від  $-60$  до  $+85$  °С) [10] і для керування ними використовуються стандартні електричні сигнали малої потужності, то нині доцільно їх застосовувати в промислових БЗВ. Для корекції похибок всього тракту перетворення вимірювального сигналу перемикач полярності  $j$ -го каналу

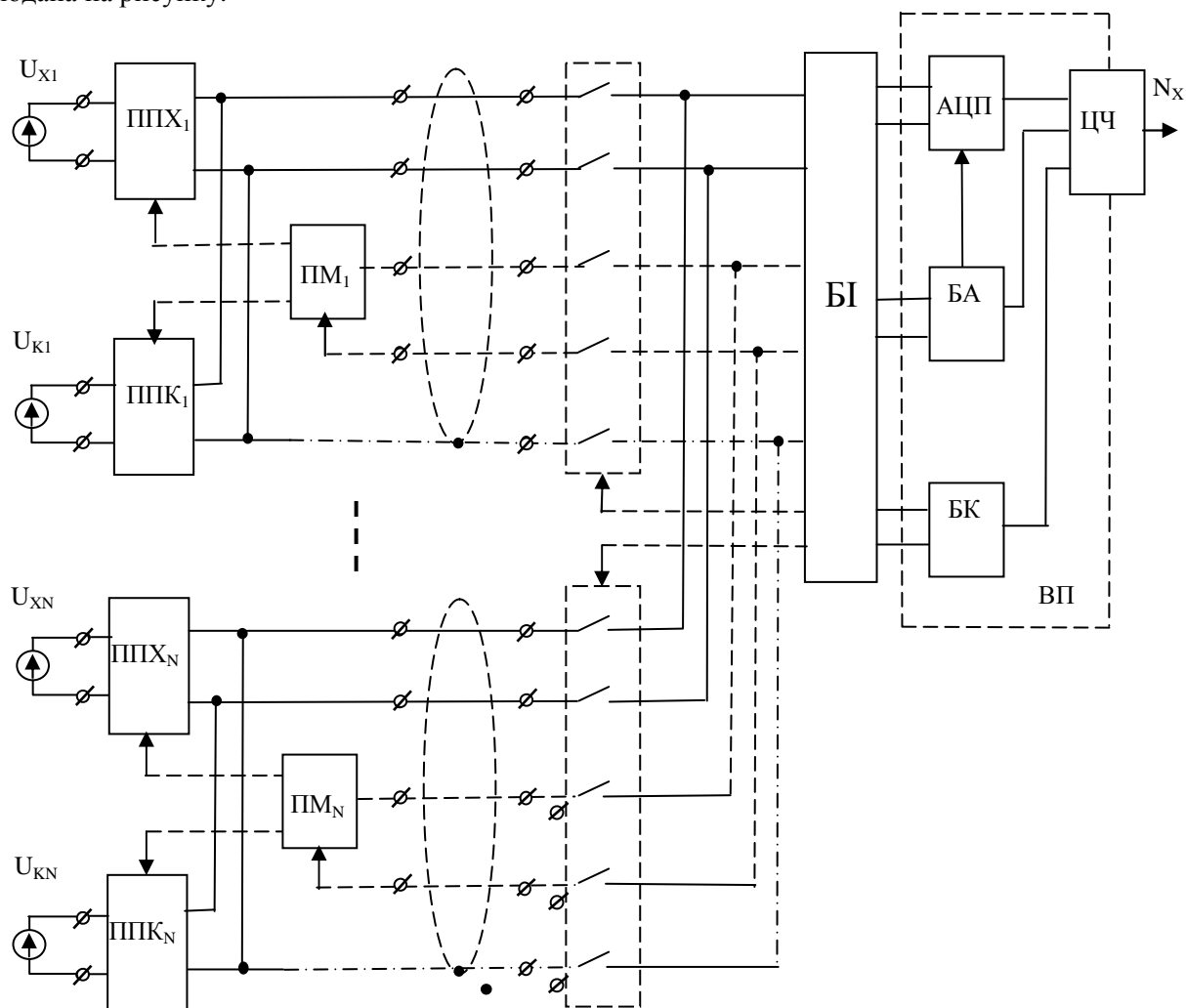
ППХ<sub>j</sub> розміщується якомога ближче до виходу сенсора. Для організації живлення мікросхем перемикачів полярності ППХ<sub>j</sub> можна або додати пару проводів, які необхідно комутувати в кожному *j*-му каналі, або використати автономне батарейне живлення, враховуючи мале споживання ним енергії [10].

Для коригування МСП доцільно використати в кожному з вимірювальних каналів прецизійні джерела опорної напруги з резистивними подільниками [11,12].

Такі технічні рішення істотно збільшують метрологічну надійність БЗВ, оскільки джерело калібрувальної напруги кожного з *j*-х вимірювальних каналів можна виконати знімним та переносним, отже, й легко каліброваним в метрологічних лабораторіях.

### Структура багатоканального засобу вимірювань напруги з автокалібруванням

Функціональна схема багатоканального засобу вимірювань напруги з автокалібруванням подана на рисунку.



Функціональна схема багатоканального засобу вимірювань напруги з автокалібруванням

Особливістю цієї структури є паралельно під'єднані до входу вторинного приладу два перемикачі полярності: ППХ<sub>j</sub> вхідної напруги  $U_{xj}$  та ППК<sub>j</sub> – калібрувальної напруги  $U_{kj}$  *j*-го сигналу. На ці перемикачі полярності через перемикач ПМ<sub>j</sub> подаються сигнали керування ними, а перемикач ПМ<sub>j</sub> своєю чергою, керується сигналом “вимірювання–керування”. В одному з його положень сигнали керування подаються на перемикач полярності ППХ<sub>j</sub>, перемикач полярності ППК<sub>j</sub> на цей час відімкнений і, відповідно, вимірюється вхідна напруга  $U_{xj}$ ; в іншому положенні сигнали керування подаються на перемикач полярності ППК<sub>j</sub> (у цей час перемикач ППХ<sub>j</sub> є

відімкненим) і вимірюється калібрувальна напруга  $U_{Kj}$ . Тут потрібно зазначити, що в перемикачах полярності потрібно передбачити інвертори з малим споживанням, наприклад, КМДН-типу.

Під час знаходження результату вимірювання потрібно врахувати додаткову АСП, що спричинена протіканням струмів керування перемикачем ППХ<sub>j</sub> через його опори ізоляції  $R_{i31j}$ ,  $R_{i32j}$  та опір одного із дротів чотирипровідної лінії зв'язку ЛЗ  $R_{ЛЗj}$ . Результат вимірювання знаходять за методом комутаційного інвертування як різниця кодів  $N_{1j}$  та  $N_{2j}$

$$N_{1j} = k_{АЦП} \left[ \begin{aligned} &U_{Xj} + e_{ВП} + e_{ЛЗj} + I_{ВХ} (R_{БІ} + R_{K1j} + R_{ЛЗj} + R_{Xj}) + I_{C1j} (R_{Xj} + R_{K2j}) + \\ &+ I_{C2j} R_{K2j} + I_{i31j} (R_{ЛЗj} + R_{БІ}) \end{aligned} \right], \quad (1)$$

$$N_{2j} = k_{АЦП} \left[ \begin{aligned} &-U_{Xj} + e_{ВП} + e_{ЛЗj} + I_{ВХ} (R_{БІ} + R_{K3j} + R_{ЛЗj} + R_{Xj}) + I_{C3j} (R_{Xj} + R_{K3j}) + \\ &+ I_{C4j} R_{K4j} + I_{i32j} (R_{ЛЗj} + R_{БІ}) \end{aligned} \right], \quad (2)$$

$$N_{Xj} = N_{1j} - N_{2j} = 2k_{АЦП} [U_{Xj} + I_{ВХ} \Delta R_{K1j} + R_{Xj} \Delta I_{C1j} + I_{C1j} \Delta R_{K1j} + \Delta I_{i31j} (R_{ЛЗj} + R_{БІ})] = 2k_{АЦП} (U_{Xj} + \Delta_{Xj}), \quad (3)$$

де  $k_{АЦП}$  – коефіцієнт перетворення АЦП;  $e_{ВП}$ ,  $e_{ЛЗj}$  – ЕРС на вході ВП та лініях зв'язку  $j$ -го каналу;  $I_{ВХ}$ ,  $I_{C1j}$ ,  $I_{C2j}$ ,  $I_{C3j}$ ,  $I_{C4j}$  – відповідно вхідний струм ВП та зворотні струми від першого до четвертого ключів  $j$ -го перемикача полярності;  $I_{i31j}$ ,  $I_{i32j}$  – відповідно струми витоку через ізоляцію електродів керування першої та другої пар ключів ППХ<sub>j</sub>;  $R_{K1j}$ ,  $R_{K2j}$ ,  $R_{K3j}$ ,  $R_{K4j}$  – опори замкнених ключів ППХ<sub>j</sub>;  $R_{ЛЗj}$ ,  $R_{БІ}$  – опір ліній зв'язку  $j$ -го каналу та блока іскрозахисту;  $\Delta R_{K1j} = R_{K1j} - R_{K2j}$ ;  $\Delta I_{C1j} = I_{C1j} - I_{C2j}$ ;  $\Delta I_{i31j} = I_{i31j} - I_{i32j}$ ;  $\Delta_{Xj}$  – нескориговане значення АСП.

Як показує аналіз співвідношення (3), нескориговане значення  $\Delta_{Xj}$  АСП визначатиметься різницею струмів витоку електродів керування вхідного перемикача ППХ<sub>j</sub>, струмів витоків ключів та різницями опорів ключів. Для зменшення нескоригованого значення АСП потрібно забезпечувати високий опір ізоляції кола керування вхідного перемикача полярності. Оскільки вторинні прилади можуть працювати в агресивних умовах та при високій відносній вологості, то для забезпечення високого значення опору ізоляції найдоцільніше використовувати конструктивно-технологічні методи. Необхідно враховувати і той факт, що на нескориговане значення АСП впливатиме різниця струмів витоку, значення якої, за умови використання інтегральних мікросхем для реалізації власне перемикача полярності та його кола керування, не перевищуватиме  $\pm 20\%$  від значення струмів витоку [10]. Наприклад, при типових мінімальному значенні опору ізоляції в цифрових приладах 40 МОм, значенні напруги керування 12 В та максимальному значенні опору  $R_{ЛЗj}$  лінії зв'язку 200 Ом, нескориговане значення  $\Delta_{Xj}$  АСП не перевищуватиме значення декількох мікрвольт, що здебільшого є цілком задовільним. Для подальшого зменшення її значення потрібно використовувати якісніші та, відповідно, дорожчі в реалізації конструктивно-технологічні заходи.

Як показує аналіз співвідношення (3), МСП визначатиметься переважно похибкою АЦП, значення якої в робочих умовах експлуатації може змінюватись в широких межах. Тому для її зменшення пропонуємо використати окремий блок калібрування, який розміщується в кожному з вимірювальних каналів. Такий блок калібрування може бути реалізований на основі прецизійних джерел з резисторними подільниками напруги [11,12]. Результат вимірювання калібрувальної напруги  $U_{Kj}$  в кожному  $j$ -му вимірювальному каналі знаходиться як різниця кодів  $N_{1kj}$  та  $N_{2kj}$

за співвідношеннями, подібними до (1)–(3)

$$N_{1Kj} = k_{АЦП} \left[ \begin{aligned} &U_{Kj} + e_{ВП} + e_{ЛЗj} + I_{ВХ} (R_{БІ} + R_{K5j} + R_{ЛЗj} + R_{Kj}) + I_{C5j} (R_{Kj} + R_{K6j}) + \\ &+ I_{C7j} R_{K7j} + I_{i33j} (R_{ЛЗj} + R_{БІ}) \end{aligned} \right], \quad (4)$$

$$N_{2Kj} = k_{АЦП} \left[ \begin{aligned} &-U_{Kj} + e_{ВП} + e_{ЛЗj} + I_{ВХ} (R_{БІ} + R_{K8j} + R_{ЛЗj} + R_{Kj}) + I_{C7j} (R_{Kj} + R_{K7j}) + \\ &+ I_{C8j} R_{K8j} + I_{i34j} (R_{ЛЗj} + R_{БІ}) \end{aligned} \right], \quad (5)$$

$$N_{Xj} = N_{1Kj} - N_{2Kj} = 2k_{АЦП} [U_{Kj} + I_{ВХ} \Delta R_{K5j} + R_{Kj} \Delta I_{C5j} + I_{C5j} \Delta R_{K5j} + \Delta I_{i33j} (R_{ЛЗj} + R_{БІ})] = 2k_{АЦП} (U_{Kj} + \Delta_{Kj}), \quad (6)$$

де  $I_{C5j}$ ,  $I_{C6j}$ ,  $I_{C7j}$ ,  $I_{C8j}$  – зворотні струми від першого до четвертого ключів  $j$ -го перемикача ППХ<sub>j</sub>;  $I_{i33j}$ ,  $I_{i34j}$  – струми витоку через ізоляцію електродів керування першої та другої пар ключів ППХ<sub>j</sub>;

$R_{K5j}, R_{K6j}, R_{K7j}, R_{K8j}$  – опори замкнених ключів ППК<sub>j</sub>;  $R_{Kj}$  – вихідний опір джерела калібрувальної напруги;  $\Delta R_{K5j} = R_{K5j} - R_{K6j}$ ;  $\Delta I_{C5j} = I_{C5j} - I_{C6j}$ ;  $\Delta I_{I33j} = I_{I33j} - I_{I34j}$ ;  $\Delta K_j = I_{BX} \cdot \Delta R_{K5j} + R_{Kj} \cdot \Delta I_{C5j} + I_{C5j} \cdot \Delta R_{K5j} + \Delta I_{I33j}(R_{Л3j} + R_{БI})$  – нескориговане під час калібрування значення АСП.

Розділивши рівняння (3) на (6), отримаємо

$$U_{Xj} = \frac{N_{Xj}}{N_{Kj}}(U_{Kj} + \Delta_{Kj}) - \Delta_{Xj}. \quad (7)$$

Аналіз співвідношення (7) показує, що результат вимірювання напруги БЗВ практично визначатиметься МСП джерела калібрувальної напруги та нескоригованими значеннями похибок  $\Delta_{Kj}$ , та  $\Delta_{Xj}$ .

Під час реалізації джерела калібрувальної напруги немає необхідності в точному заданні значень як власне джерела калібрувальної напруги, так і резистивного подільника, оскільки під час калібрування буде необхідно точно виміряти значення вихідної напруги  $U_{Kj}$  та ввести в пам'ять контролера БЗВ значення кодів  $N_{Kj}$ , що відповідатимуть напругам  $U_{Kj}$  кожного з вимірювальних каналів. Під час калібрування похибка вимірювання по кожному із вимірювальних каналів визначатиметься тільки часовою та температурною нестабільністю джерел калібрувальної напруги. Сучасна елементна база дає можливість забезпечити температурну стабільність цих джерел на рівні, що визначатиметься тільки часовою та температурною нестабільністю джерела калібрувальної напруги  $\pm(5 \cdot 10^{-6} \dots 5 \cdot 10^{-5}) 1/^\circ\text{C}$  [11,12], що в діапазоні зміни температури доквілля на  $30^\circ\text{C}$  може призводити до зміни МСП БЗВ всього на  $\pm(0,015 \dots 0,15)\%$ .

Окрім зменшення АСП та МСП, калібрування в кожному з вимірювальних каналів також дає можливість зменшення методичних похибок, зумовлених обмеженістю вхідних опорів  $R_{BX}$  ВП та опорів розімкнених ключів перемикачів полярності ППХ<sub>j</sub>  $R_{Xj}$  та ППК<sub>j</sub>  $R_{Kj}$ . Детальніший аналіз показує, що вираз для значення результату вимірювання в кожному з вимірювальних каналів можна подати як

$$U_{Xj} = U_{Kj} \frac{N_{Xj}}{N_{Kj}} \left[ 1 + \frac{R_{Xj} - R_{Kj} - \Delta R_{KЛj}}{\frac{R_{3Bj}(R_{Л3j} + R_{БI} + R_{BX})}{R_{3Bj} + R_{Л3j} + R_{БI} + R_{BX}}} + \delta_{3Bj} \left( 1 - \frac{R_{3Bj}}{R_{3Bj} + R_{Л3j} + R_{БI} + R_{BX}} \right) \right]; \quad (8)$$

де  $\Delta R_{KЛj}$  – максимальне значення розкиду опорів ключів ППХ<sub>j</sub> та ППК<sub>j</sub>;  $\delta_{3Bj} = \frac{R_K - R_X}{R_X}$ ;  $R_K, R_X$  – опори розімкнених ключів відповідно ППХ<sub>j</sub> та ППК<sub>j</sub>.

### Висновки

1. Для зменшення адитивної складової похибки усього вимірювального каналу в багатоканальних засобах вимірювання з гальванічним розділенням доцільно використати метод комутаційного інвертування з розміщенням перемикачів полярності якомога ближче до виходу сенсора.
2. Комутатор каналів у цьому разі доцільно реалізувати на базі релейних ключів з комутацією ліній керування та живлення перемикача полярності і сигнальних входів з функцією перемикачання “виключення перед включенням”.
3. Блок гальванічного розділення потрібно розміщувати безпосередньо на вході вторинного приладу після комутатора каналів.
4. Для зменшення мультиплікативної та методичної складових похибки в кожному з вимірювальних каналів доцільно використати блок калібрувальної напруги.

1. ДСТУ ISO 10012: 2005. Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання (ISO 10012: 2003, IDT). – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 19 с. 2. Дорожжовець М.М. Уніфікуючі перетворювачі інформаційного забезпечення механотронних систем: навч. посібник / М.М. Дорожжовець, О.В. Івахів, В.О. Мокрицький. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2009. – 304 с. 3. Yatsuk V., Stolyarchuk P., Mikhaleva M.,

Barylo G. Intelligent Data Acquisition System Error Correction in Working External Conditions / Proceedings of the Third IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications IDAACS'2005 – Sofia, Bulgaria, Sept. 5–7, 2005. – P. 51–54.

4. Пейтон А.Дж. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А. Дж. Пейтон, В. Воли. – М.: БИНОМ, 1994. – 352 с.

5. Wzmacniacze izolujące typów ISO122, ISO124 / интернет ресурс: WWW. Elfaelektronika.pl: ELFA, Catalog 59, 2011. – 2850 s.

6. Яцук В.О., Малачівський П.С. Методи підвищення точності вимірювань. – Львів: Бескид-біт, 2008. – 368 с.

7. А.с. №1072259, СССР, МКИ G01K7/00. Многоканальный измерительный преобразователь / В.Н. Диденко, В.П. Федотов, Н.Б. Мелихов. – Оpubл. БИ, № 5. – 1984. – 4 с.

8. А.с. №1200141, СССР, МКИ G017 / 16. Многоканальное устройство для измерения температуры / В.К. Астрахан, В.М. Матенков, Ю.А. Ноткин.- Оpubл. БИ, № 47. – 1985. – 4 с.

9. Internet: <http://www.analog.com//AD7719>. Low Voltage, Low Power, Factory-Calibrated 16/24-bit Dual  $\Sigma$ - $\Delta$  ADC // Analog Devices, Inc, 2001. – pp. 1–42.

10. Przelącznik analogowy niskonapięciowy ISL8454. Przelączniki analogowy CMOS/ интернет-ресурс: WWW. Elfaelektronika.pl: ELFA, Catalog 59, 2011. – 2850 s.

11. Diody odniecienia LM336Z, LM4040 / интернет-ресурс: WWW. Elfaelektronika.pl: ELFA, Catalog 59, 2011. – 2850 s.

12. Metalizovane rezystory foliowe 0,01%. Rezystory precyzyjne SMD 0805/ интернет-ресурс: WWW. Elfaelektronika.pl: ELFA, Catalog 59, 2011. – 2850 s.