

УДК 681.317.39

Ю. В. Шабатура, д. т. н., доц.; І. М. Штельмах; М. Ю. Шабатура
ВИМІРЮВАЛЬНІ КАНАЛИ НА ОСНОВІ НОВИХ ПРИНЦИПІВ
ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

У статті розглянуто процеси формування вимірювальної інформації про значення вимірюваних величин різної фізичної природи. Запропоновано нові принципи проведення вимірювальних перетворень, їх математичне забезпечення, а також структури відповідних вимірювальних каналів.

Ключові слова: вимірювальний канал, імпульсний сигнал, тривалість імпульсу, довжина огинаючої імпульсного сигналу.

Вступ

Інтенсивний розвиток наукових досліджень, створення технічних систем і застосування нових технологій вимагають відповідного зростання показників метрологічних та експлуатаційних характеристик інформаційно-вимірювальних систем (ІВС), призначених для вирішення задач вимірювання і контролю значень великої кількості фізичних величин. Розвиток впродовж останніх років комп'ютерних та мікроконтролерних технологій призвів до створення необхідної бази для проведення радикальних змін у концепціях побудови інформаційно-вимірювальних систем у цілому та в проведенні процедур отримання, обробки, збереження й відображення вимірювальної інформації зокрема. Підсумком цього процесу стала практично повна трансформація технічних рішень в галузі вимірювальних технологій: від різноманітних розрізаних і несумісних вимірювальних приладів до високоінтегрованих, багатоканальних автоматизованих вимірювальних систем, здатних працювати з використанням глобальних комп'ютерних мереж.

Аналіз попередніх досліджень та публікацій

На основі проведеного аналізу відомих публікацій [1, 2, 3] потрібно зауважити, що поряд із загальним зростанням можливостей ІВС останнім часом почали виявлятися й певні неузгодженості в цьому процесі. Серед інших, основною причиною стало помітне відставання технологій формування вимірювальної інформації про значення вимірюваних фізичних величин від можливостей технологій обробки, зберігання, відображення та передачі вимірювальної інформації. Отже, задачі розроблення нових принципів, на яких базуватимуться технології отримання вимірювальної інформації є актуальними в науковому відношенні і корисними в практичному застосуванні.

Постановка задачі дослідження

Виконати дослідження вимірювальних каналів, які функціонують на основі представлення вимірювальної інформації у формі значень тривалості імпульсних сигналів, або довжини їх огинаючої. Розробити математичне і метрологічне забезпечення для процесу перетворення форми представлення вимірювальної інформації, який проводиться шляхом перенесення значень вимірюваних фізичних величин, виражених фізичними сигналами відповідної природи, у зміну значень тривалості, або довжини огинаючої електричних імпульсних сигналів, які є носіями вимірювальної інформації в сучасних ІВС.

Застосування нових форм представлення вимірювальної інформації у вимірювальних каналах ІВС

Сьогодні практично загальноприйнятим стандартом є те, що в сучасних ІВС основним носієм вимірювальної інформації слугує електричний сигнал. Причому, у структурі Наукові праці ВНТУ, 2008, № 4

вимірювальних каналів ІВС, на ділянці від первинних вимірювальних перетворювачів і до аналого-цифрових перетворювачів, саме електричний сигнал забезпечує перенесення вимірювальної інформації, яка зосереджується в значеннях його параметрів. Традиційно найбільшого поширення набула передача вимірювальної інформації через зміну амплітуди напруги або струму. У цьому випадку вимірювальний канал має структуру, яка показана на рисунку 1.

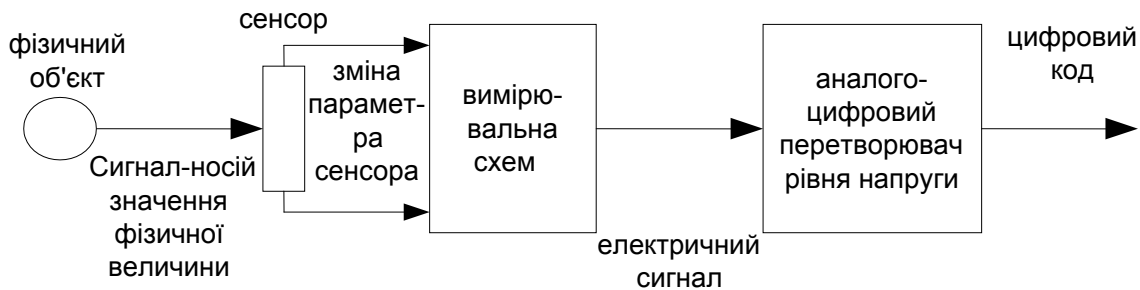


Рис. 1. Структура вимірювального каналу, в якому використовується процес перенесення значень вимірюваних фізичних величин у зміну амплітуди електричного сигналу

Основною перевагою такого вимірювального каналу є ретельна відпрацьованість його технічного і метрологічного забезпечення. Проте він має й чимало недоліків. До основних з них можна віднести обмежену точність вимірювань, чутливість до дії завад і значне енергоспоживання.

Відомі й інші структури вимірювальних каналів [1, 3], у яких інформація про значення вимірюваних фізичних величин представляється через зміну інших параметрів електричних сигналів, таких як фаза і частота. Вони теж мають недоліки. Так, вимірювання фази потребує високостабільного опорного сигналу, а використання частоти вимагає складного технічного забезпечення і супроводжується підвищеним енергоспоживанням.

Суттєве зменшення енергоспоживання досягається в ІВС, які працюють у імпульсному режимі. Використання відомих методів формування вимірювальної інформації в такому режимі є малоефективним. Тому запропоновані в роботах [4, 5] нові методи перетворення вимірювальної інформації в поєднанні з імпульсним режимом роботи вимірювальних каналів дозволяють отримати суттєве покращення як метрологічних, так і експлуатаційних характеристик ІВС.

Суть запропонованих принципів полягає в ідеях використання представлення вимірювальної інформації у формі змін тривалості імпульсних сигналів спеціальної форми, що визначається на заданому рівні, а також у формі змін довжини огинаючої імпульсних сигналів. Перехід від необхідності вимірювання амплітуди до вимірювання часових інтервалів дозволяє радикально збільшити роздільну здатність вимірювань (застосування серійно виготовлюваних часо-цифрових перетворювачів (TDC) фірми Acam mess electronic GmbH забезпечує вимірювання тривалості імпульсів з точністю до 14 пікосекунд, що в діапазоні вимірювань відповідає роздільній здатності в 30 біт), а застосування вимірювання довжини огинаючої, попри певну складність технічної реалізації, дозволяє враховувати комплексний характер значної кількості фізичних величин і потенційно здатне лінеаризувати квадратичний характер взаємодії фізичного впливу вимірюваних величин на зміну параметрів сенсорів.

Узагальнена структура, яка відображає запропоновані принципи проведення вимірювальних перетворень показана на рисунку 2.

Згідно запропонованої структури роль своєрідного модулятора тривалості, або довжини огинаючої імпульсного сигналу спеціальної форми, виконує резистивна

вимірювальна схема. Це пов'язано з тим, що при проходженні імпульсного сигналу через таку схему не відбувається нелінійних спотворень форми цього сигналу. Тому в математичному відношенні задача моделювання є коректною і дозволяє отримувати аналітичні рішення для всіх форм сигналів, які описуються аналітичними і диференційованими в області їх існування функціями.

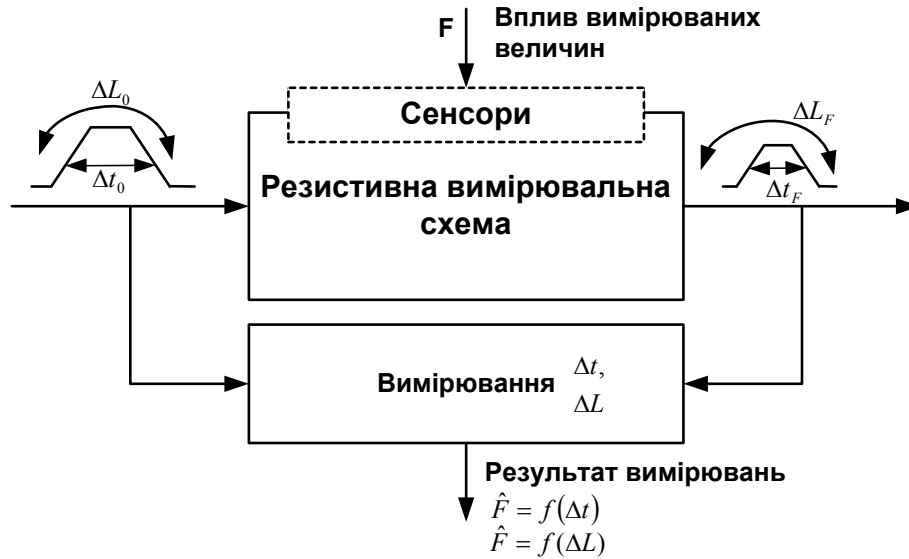


Рис. 2. Структурна схема проведення вимірювань за запропонованими принципами

Можливі види математичних моделей опису розроблених вимірювальних перетворень подані в класифікаційній таблиці 1.

Таблиця 1

Класифікаційна таблиця моделей

Вербальна форма моделі вимірювального перетворювача $S / \Delta T$ та $S / \Delta L$	Математична форма моделі функціонального перетворення $\Delta T(t) = M[S(t)]$, $\Delta L(t) = W[S(t)]$
Лінійний, однопараметричний, стаціонарний	$T(t) = kS(t)$, $L(t) = kS(t)$ k - const
Лінійний, однопараметричний, нестаціонарний	$T(t) = kS(t)$, $L(t) = kS(t)$ k - var
Лінійний, однопараметричний, із затримкою	$T(t) = k(t - \tau)S(\tau)d\tau$, $L(t) = k(t - \tau)S(\tau)d\tau$
Нелінійний, однопараметричний	$T(t) = f[S(\tau)]$, $L(t) = f[S(\tau)]$
Нелінійний, однопараметричний, із затримкою	$T(t) = k(t, \tau, S(\tau))S(\tau)$, $L(t) = k(t, \tau, S(\tau))S(\tau)$
Лінійний, багатопараметричний	$T(t) = KS(t)$, $L(t) = KS(t)$ K -вектор-ст. ($n \times 1$)
Лінійний, багатопараметричний, із затримкою	$T(t) = K(t - \tau)S(\tau)d\tau$, $L(t) = K(t - \tau)S(\tau)d\tau$
Нелінійний, багатопараметричний	$T(t) = F[S(t)]$, $L(t) = F[S(t)]$
Нелінійний, багатопараметричний, із затримкою	$T(t) = K[t, \tau, S(\tau)]S(\tau)d\tau$, $L(t) = K[t, \tau, S(\tau)]S(\tau)d\tau$

У результаті проведених досліджень було встановлено математичні моделі імпульсних сигналів (ІС) та види функцій залежності їх тривалості від зміни амплітуди, якої вони зазнають у вимірювальній схемі, а також вид функцій чутливості отриманих залежностей. Ці результати представлені в таблиці 2.

Подібні дослідження були проведені і для встановлення залежностей зміни довжини

огиноючої імпульсних сигналів, а також визначення чутливості таких змін. Результати виконаних досліджень відображені в таблиці 3.

Зручність практичного застосування запропонованих принципів проведення вимірювальних перетворень полягає ще й у тому, що вони можуть виконуватися на основі давно відомих потенціометричних та мостових вимірювальних схем. Отже, це дозволяє без особливих витрат модернізувати застарілі вимірювальні системи, які використовують такі вимірювальні схеми, що призведе до суттєвого покращення їх метрологічних та експлуатаційних характеристик.

Таблиця 2

Математичні моделі імпульсних сигналів, вимірювальних перетворень та функцій чутливості

№ п/п	Вид форми ІС	Математична модель ІС	Функція залежності Δt від амплітуди ІС	Функція чутливості отриманої залежності
1	Пилкоподібна	$\begin{cases} U(t) = U_{\max} \frac{t}{t_i}, \forall t \in [0, t_i] \\ U(t) = 0; 0 > t > t_i \end{cases}$	$\Delta t = t_i \left(1 - \frac{L}{U_m}\right)$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{t_i L}{U_m^2}$
2	Трикутна (симетрична)	$U(t) = \frac{U_m}{t_e} (t - 2(t - t_e)) \cdot 1(t - t_e) + (t - t_i) \cdot 1(t - t_i)$	$\Delta t = 2\Delta t_{\text{милк.}} = 2t_e \left(1 - \frac{L}{U_m}\right)$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = 2 \frac{t_e L}{U_m^2}$
3	Трапеціє-подібна	$U(t) = k \cdot t - k \cdot (t - t_{f1}) \cdot 1(t - t_{f1}) - c \cdot (t - t_{f2}) \cdot 1(t - t_{f2}) + c \cdot (t - t_i) \cdot 1(t - t_i)$ <p style="text-align: center;">(загальна)</p>	$\Delta t = (t_{f1} + t_{f2}) \left(1 - \frac{L}{U_m}\right) + t_{f2} - t_{f1}$ <p style="text-align: center;">(симетрична)</p>	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{L}{U_m^2} (t_{f1} + t_{f2})$
4	Дзвоно-подібна	$U(t) = U_m e^{\frac{-(t-t_v)^2}{2a^2}}$	$\Delta t = 2a \sqrt{2 \ln\left(\frac{U_m}{L}\right)}$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{a\sqrt{2}}{U_m \sqrt{\ln\left(\frac{U_m}{L}\right)}}$
5	Експоненційна форма фронтів	$U(t) = U_m e^{-g t_0-t }$	$\Delta t = \frac{2}{g} \ln\left(\frac{U_m}{L}\right)$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{2}{g U_m}$
6	Гіперболічна форма фронтів	$\begin{cases} U(t) = U_m \frac{b}{ t - t_0 } \\ U(t) \leq U_{\max} \forall t \in [0; +\infty] \end{cases}$	$\Delta t = \frac{2b U_m}{L}$	$S_m = \frac{\partial \Delta t}{\partial U_m} = \frac{2b}{L} = const$

Приклади можливих варіантів функціональних схем розроблених вимірювальних каналів на основі використання представлення вимірювальної інформації у формі зміни тривалості імпульсних сигналів спеціальної форми при застосуванні потенціометричної та мостової резистивних вимірювальних схем показані на рисунку 3.

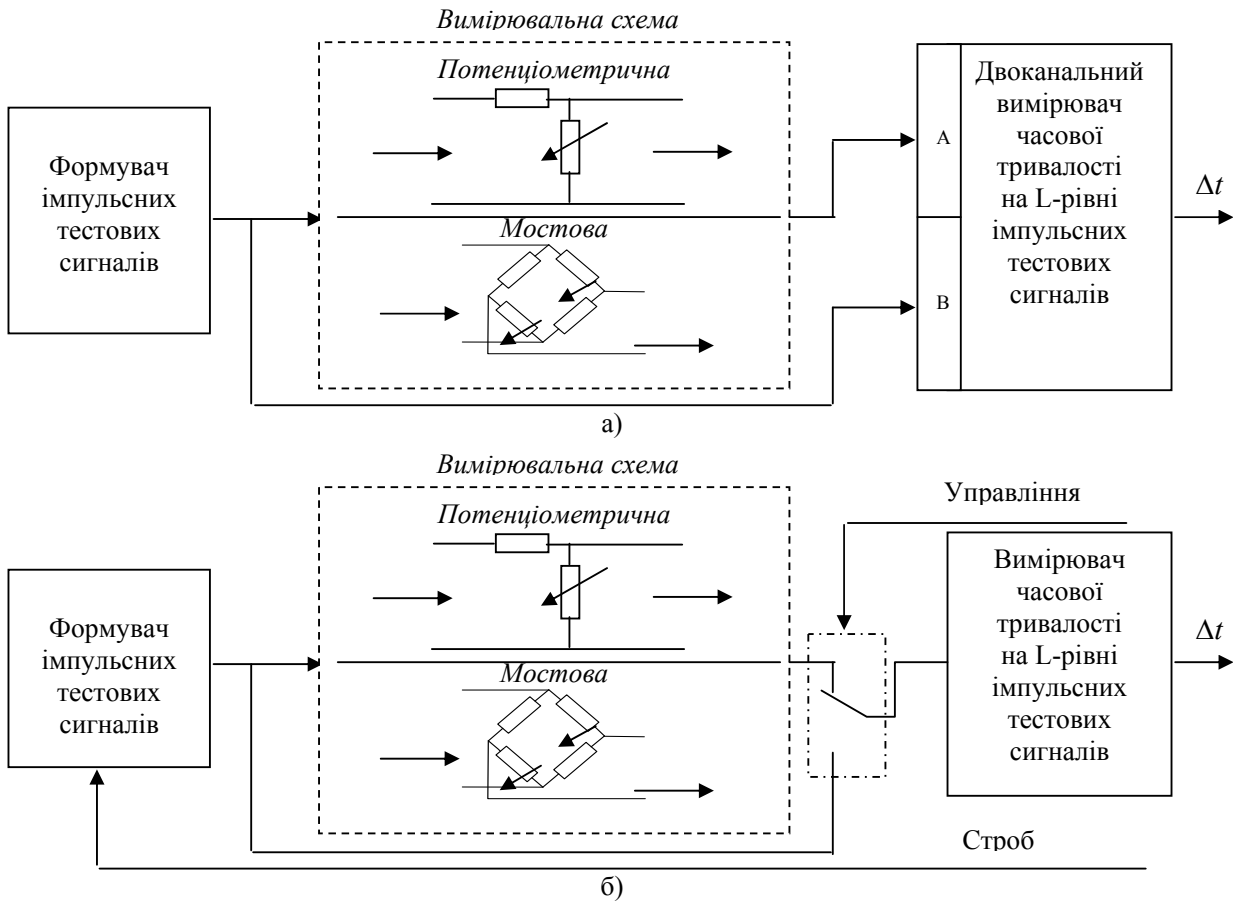
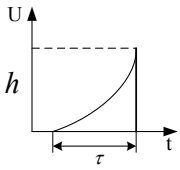


Рис. 3. Функціональна схема вимірювального каналу з: а) одноктактним; б) двотактним режимом вимірювань

Таблиця 3

Ідеалізовані форми імпульсних сигналів, моделі вимірювальних перетворень і функцій чутливості

Форма сигналу	$L = f(h, \tau)$	$s = \partial L / \partial h$
	$L = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{\tau}{2}\right)^2 + h^2}$	$s = \frac{4h}{\sqrt{\tau^2 + 4h^2}}$
	$L = h + \sqrt{h^2 + \tau^2}$	$s = 1 + \frac{h}{\sqrt{h^2 + \tau^2}}$
	$L = 2 \cdot h + \tau$	$s = 2$
	$L = 2 \cdot \sqrt{h^2 + \left(\frac{\tau - b}{2}\right)^2} + b$	$s = 4 \frac{h}{\sqrt{4h^2 + \tau^2 - 2tb + b^2}}$

	$L = 0,3662684 + 1,9999117h$ <p>модель наближеної апроксимації</p>	$s = 0,3662684$
---	--	-----------------

Аналіз результатів досліджень, зведених у таблиці 2 і 3, дозволяє зробити висновки, що оптимальною формою імпульсного сигналу при використанні принципу перетворення вимірювальної інформації у часову тривалість є імпульс з гіперболічною формою фронтів і обмеженим значенням амплітуди, а при використанні принципу перетворення в довжину огинаючої імпульсного сигналу доцільно використовувати імпульс, форма якого описується досить складною, на перший погляд, моделлю, яка разом з тим дозволяє отримати просту апроксимацію:

$$f(t) = \frac{1}{2} \left(t\sqrt{k^2 t^2 - 1} - \frac{1}{k} \ln \left(tk + \sqrt{k^2 t^2 - 1} \right) \right) - \left(\frac{1}{2} \left(t\sqrt{k^2 (t - \tau)^2 - 1} + \frac{1}{k} \ln \left((t - \tau)k + \sqrt{k^2 (t - \tau)^2 - 1} + h \right) \right) \right) 1(t - \tau), \quad (1)$$

де k – коефіцієнт передачі вимірювальної схеми, τ – тривалість імпульсу.

Використання таких імпульсів дозволяє отримати в обох випадках лінійну шкалу вимірювань з постійним значенням чутливості.

На відміну від відомих і широковикористовуваних технологій отримання вимірювальної інформації, які базуються на вимірюваннях амплітуди, фази або частоти, запропоновані принципи перетворення вимірювальної інформації при їх використанні у вимірювальних каналах дозволяють отримати ряд суттєвих переваг. Зокрема: значно підвищується точність вимірювань, підвищується завадостійкість, оскільки робота вимірювальних каналів здійснюється в імпульсному режимі, а сам процес вимірювання триває на протязі часу, що відповідає тривалості вимірювального імпульсу. Крім того, за рахунок переходу в імпульсний режим роботи, який може бути доведений до вимірювання в режимі одиночного імпульсу значно зменшується енергоспоживання.

Формально розглянутий принцип перетворення значення вимірюваних фізичних величин у тривалість певного імпульсного сигналу відображає здійснення дискретного представлення аналогового сигналу $s(t) \in S(t)$ в межах інтервалу зміни поточного часу $t \in T$ у вигляді послідовності координат часової осі $\{\Delta T_i, i = 0, 1, 2, \dots, N_k\}$, за значеннями яких можна отримати оцінку $s^*(t) \in S^*(t)$ початкового значення вимірюваної фізичної величини. Таке представлення і зворотне до нього відновлення можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} (\Delta T_0, \Delta T_1, \Delta T_2, \dots, \Delta T_{N_k}) &= \mathfrak{Z}(s(t)); t \in T, \\ s^*(t) &= \mathfrak{R}(\Delta T_0^*, \Delta T_1^*, \Delta T_2^*, \dots, \Delta T_{N_k}^*); t \in T, \end{aligned} \quad (2)$$

де \mathfrak{Z} – оператор представлення, \mathfrak{R} – оператор відновлення, ΔT_i^* – результати вимірювань часових інтервалів, за якими виконується відновлення значення вимірюваної фізичної величини. Потенційно така технологія отримання вимірювальної інформації здатна забезпечити точність вимірювань значень фізичних величин, наближену до точності вимірювань часу.

Висновки

У цій роботі розроблені нові принципи перетворення вимірювальної інформації.

Запропонований принцип перетворення вимірювальної інформації на основі використання Наукові праці ВНТУ, 2008, № 4

методу модуляції часової тривалості імпульсних сигналів дозволяє порівняно з іншими відомими підходами суттєво збільшити точність вимірювань, зменшити енергоспоживання вимірювальних каналів і збільшити термін експлуатації вимірювальних засобів.

У вимірювальних каналах, які використовують принцип перетворення вимірювальної інформації на основі використання модуляції довжини огинаючої імпульсного сигналу, є можливість враховувати комплексний характер вимірюваних фізичних величин, а також використовувати в якості сенсорів первинні вимірювальні перетворювачі з реактивними параметрами і лінеаризувати квадратичний характер взаємодії фізичного впливу вимірюваних величин на зміну параметрів сенсорів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Новоселов О. Н. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем / О. Н. Новоселов, А. Ф. Фомин. – М. : Машиностроение, 2-е изд., 1991. – 336 с.
2. Асадов Х. Г. Синтез одного подкласса ИИС по принципу уменьшения размерности / Х. Г. Асадов // Измерительная техника. – 2001. – № 3. – С. 14 – 16.
3. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв / [Вуйцік В., Голяка Р., Каліта В. та ін.]; за ред. З. Готри. – Львів: Видавн. „Львівська політехніка”, 1999. – 364 с.
4. Шабатура Ю. В. Основы теории і практики інтервальних вимірювань / Шабатура Ю. В. М – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2003. – 167 с.
5. Шабатура Ю. В. Структурно-математичні основи синтезу інформаційно-вимірювальних систем з часовим поданням інформації / Ю. В. Шабатура // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2006. – № 66. – С. 164–173.

Шабатура Юрій Васильович – д. т. н., професор кафедри метрології та промислової автоматики, тел.: 80977672270.

Штельмах Ігор Миколайович – аспірант кафедри метрології та промислової автоматики, тел.: 80936305650.

Шабатура Максим Юрійович – студент, тел.: 80977535830.
Вінницький національний технічний університет.