

1. Перевозніков С.І. Емпіричні та стійкі чисельні методи для прогнозування фізичного стану вантажу потяга / С. І. Перевозніков, А. В. Козачук // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – №1(17). – Вінниця: Універсум. – 2010. – 102 с.

2. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев // Энергия. – Москва. – 1977. – 343 с.

3. US Coast Guard Office of Research and Development. Fire testing of independent fiberglass fuel tanks with and without protective coating of fire retardant paint, May 8, 1972. Report AD 740783. Washington, DC

4. Хабибулин Р.Ш. Валидность компьютерной модели теплового воздействия очага пожара на резервуар с горючей жидкостью [электронный ресурс] / Р.Ш. Хабибулин // <http://narod.yandex.ru/100.xhtml?agps-2006.narod.ru/ttb/2008-1/06-01-08.ttb.pdf>

Надійшла 18.1.2011 р.

УДК 631.321

І.В. ТРОЦІШИН

Хмельницький національний університет

## НАПРЯМКИ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ ЄДИНОЇ ДРОБОВО-РАЦІОНАЛЬНОЇ ШКАЛИ ВИМІРЮВАНЬ

*Стаття присвячена детальному розгляду принципів особливостей Квантової теорії вимірювань на прикладі АЦП. Показано суттєві переваги і більш високі технічні параметри АЦП коінциденції, і особливо супер-АЦП у порівнянні із класичними. Приведено характеристики перетворення та структурну схему АЦП.*

*Article is devoted to detailed consideration of the key features of the quantum theory of measurement for example ADC. Shown significant advantages and higher technical parameters coincidence ADC, and especially the super-ADC compared to classical. The characteristics of transformation and block diagram of ADC.*

Ключові слова квантова теорія, АЦП, метод коінциденції, шкала вимірювального перетворення.

### Вступ

Сучасна вимірювальна техніка, метрологія та приладобудування мають принципове обмеження і в рамках сучасних уявлень принципово не допускають одночасного підвищення і точності і швидкодії вимірювального цифрового перетворення. В рамках теорії ФЧВ і ПР авторами проекту вдалося довести і практично досягнути значного збільшення (в 10-100 разів), і покращити суперечливий параметр ТОЧНІСТЬ×ШВИДКОДІЯ ВИМІРЮВАНЬ саме для фазочастотних параметрів радіосигналів [1-3].

Враховуючи, що в основі досягнутих унікальних результатів є заміна у використанні самої “ідеології” до процедури вимірювального перетворення та поняття шкали вимірювання, як із цілими так і дробовими поділками, які опираються на квантовані значення матриці можливих вимірювальних значень. Тому, очевидно є можливість створення єдиної теорії вимірювального цифрового перетворення фізичних величин для вирішення принципової проблеми одночасного підвищення параметру ТОЧНІСТЬ×ШВИДКОДІЯ ВИМІРЮВАНЬ.

*Об'єкт дослідження:* процеси та процедури здійснення аналого-цифрового перетворення реальних значень фізичних (електричних та неелектричних) у вимірювальних приладах;

*Предмет дослідження:* теорія та практика і метрологічні аспекти вимірювальних перетворень фізичних (електричних та неелектричних) величин.

Загальною проблемою приладобудування є наявність принципового обмеження і неможливості (в рамках існуючих класичних концепцій та методів) одночасного підвищення точності (роздільної здатності) і швидкодії вимірювальних операцій, тобто знаходження числового значення невідомої величини.

Конкретна фундаментальна задача полягає у розробці єдиної теорії та методології і її широкого впровадження, яка базується на використанні понять реперних точок матриці можливих станів для збільшення роздільної здатності вимірювальної шкали аналогово-цифрового перетворення, шляхом використання не лише цілочисельної частини позначок шкали (класичні методи), а також і всіх можливих дробових значень (Квантова теорія).

Метою наукової розробки – є створення єдиної теорії та методологічної системи нових, саме “ідеологічних”, підходів до розв'язання головної проблеми вимірювальної техніки і метрології: – одночасного підвищення і точності і швидкодії вимірювальних приладів різних фізичних величин (електричних та неелектричних).

Основними завданнями в процесі розробки і створення Квантової теорії вимірювань (КТВ) є:

- створення та розробка математичних моделей вимірювальних процедур різних фізичних величин, адекватних до реальних а не ідеалізованих параметрів;
- перегляд та встановлення ієрархічної залежності існуючих та розроблених нових методів вимірювань із врахуванням причинно-наслідкових та метрологічних аспектів процедури вимірювальних АЦП;

- дослідження принципів та особливостей утворення дробової частини поділок на єдиній цілочисельній шкалі вимірюваних значень;
- дослідження метрологічних характеристик нової вимірювальної шкали, визначення важливих метрологічних характеристик (лінійності, нерівномірностей, статистичних параметрів та характеристик шкал);
- дослідження динаміки утворення матриці можливих значень вимірювальних шкал в рамках нової теорії та концепції реперних точок;
- розробка методології та методик використання результатів розробленої нової теорії та практики для одночасного підвищення і точності і швидкодії вимірювального цифрового перетворення в різних галузях приладобудування;
- написання та видання монографії за результатами та досягненнями досліджень з детальним описом КТВ.

### 1. Суть проблеми

Головна проблема вимірювальної техніки – потенційна неможливість одночасного підвищення як точності так і швидкості вимірювань та вимірювальних приладів існує з тих часів коли почали вимірювати фізичні величини. Суттєвим проривом в цьому напрямку стали поява електричних сигналів та вимірювання їх характеристик і параметрів, а інші фізичні величини почали перетворювати в електричні сигнали.

Теоретичною квантовою межею є відома межа невизначеності Гейзенберга та теорема дуальності ( $df \cdot df < 1$  в галузі частотних вимірювань). Вказані принципи обмеження внесені та закріплені у ДСТУ, викладено у монографіях і підручниках. Проте, є окремі прояви явищ, методів та приладів у яких спостерігається можливість подолання вказаних обмежень, а найбільш характерними є різновиди так званих методів одно та двосторонніх ноніусів, і особливо метод коінциденції [4-5].

Але ні у вітчизняних ні у зарубіжних вчених немає єдиної чіткої теорії, яка б мала єдині принципи та методологію, що пояснюють отримані локальні результати. Нам же вдалося не лише отримати їх, а і пояснити, створивши теорію Фазочастотних вимірювань і перетворень радіосигналів (ФЧВ і ПР), для найбільш характерного класу вимірювальних сигналів (радіосигналів), досягши покращення проблематичного параметру ТОЧНІСТЬ × ШВИДКОДІЯ ВИМІРЮВАНЬ в 10-100разів!!!, без ускладнення, а навіть навпаки за рахунок спрощення структури приладів [1-5].

Розроблена концепція саме фазочастотного підходу, (замість класичного – частотного), дозволила пояснити та прорахувати метрологічні характеристики під час вимірювання частоти сигналів із обмеженим часом доступу. Точність в 1Гц було досягнуто за час вимірювання ~ одиниць мілісекунд в діапазоні одиниць МГц. Вказані результати опубліковано в монографії, докторській та 8 кандидатських дисертаціях, майже 60 статтях, та 10 патентах, сотні доповідей, а також практично реалізовані у реальних приладах, які пройшли неодноразове випробування [2-4]. В основі успішної реалізації нової концепції КТВ лежить гіпотеза, про те, що картина реального світу, як правило, суттєво відрізняється від тих існуючих математичних моделей якими прийнято користуватися, і які у багатьох випадках були уведено не з позицій метрології і вимірювальної техніки, а для зручності та простоти представлення і використання вже напрацьованих математичних методів.

Тому критичний перегляд саме теоретичних основ введення математичних моделей із дотриманням причинно-наслідкових зв'язків та вже доведеного фазочастотного підходу і ідеї утворення і використання вимірювальної шкали не лише із цілочисельними значеннями, а також і дробовими квантованими значеннями поділок між цілочисельними значеннями, на єдиній шкалі вимірювання. Використання як найвищого ступеню ієрархії побудови вимірювального перетворення фізичних величин саме на основі методу коінциденції, який вже проявив себе в деяких галузях вимірювань, але не лише не має конкретної теорії в світі, а і не має наукового обґрунтування досягнутих результатів, окрім теорії ФЧВ і ПР (для фазочастотних параметрів радіосигналів) [1, 2].

В результаті планується отримати глибоке наукове і філософське обґрунтування принципово нових знань та встановлення закономірностей утворення Повної вимірювальної шкали, концептуальних засад наявності у природі квантованих значень матриці можливих числових станів вимірюваних параметрів при визначеному алгоритмі аналого-цифрового перетворення. Квантова теорія вимірювань, яка спирається на поняття природних реперних точок, і розробка в її межах нових методів вимірювання фізичних величин, та побудови приладів і суттєвим покращенням параметру ТОЧНІСТЬ × ШВИДКОДІЯ ВИМІРЮВАНЬ та інших метрологічних характеристик, у порівнянні із тими, що є тепер, є проривом у науковому пізнанні саме реальної а не ідеалізованої картини Світу. Будь яка інформація про аналогічні досягнення в Україні або за кордоном відсутні, і є принципово неможливими без переходу на нові принципи теорії ФЧВ і ПР [1].

### 2. SUPER ADC – особливості та характеристики

Для прикладу приведемо розгляд створення АЦП нового виду із використанням принципів Квантової теорії вимірювань, які наглядно доводять значне покращення характеристик АЦП у порівнянні із класичними та відкривають принципово нові можливості самого аналогово-цифрового перетворення.

Спочатку розглянемо загальний випадок коли використовується повний інформаційний обсяг параметричного перетворення амплітудних значень в цифровий код із використанням принципу

коінциденції для утворення повної шкали перетворення. Наприклад, для АЦП (паралельного типу Flesh) для 8R роздільна здатність і шкала мають  $2^N$  и  $2^N - 1$ , що складе  $8-1 = 7$  значень шкали, і 7 компараторів. Разове використання методу коінциденції шляхом додавання ще одного набору 8R-резисторів і 15 компараторів, ми отримаємо повну шкалу з 22 значеннями, що дає збільшення кількості відліків шкали в діапазоні 0-1,0 з 7 до 22.

Повна шкала всіх можливих значень такого перетворення лежить в діапазоні значень  $\frac{1}{2^N} \div 2^N$ , і загальна кількість точок відліку (поділок шкали) дорівнює 43!

Повторне застосування принципу коінциденції і перехід до тривимірної (просторової) інтерпретації перетворення (при збільшенні загальної кількості резисторів до 53R, отримаємо Повну шкалу в діапазоні  $\frac{1}{2^N} \div 2^N$ ,  $\frac{1}{64} \div 64$ , з 331 значенням поділок, при цьому 166 значень лежить в діапазоні 0-1,0.

За цих же умов класичний Flesh ADC, навіть з 64 R (замість 53R) забезпечує тільки 63 значення шкали (в діапазоні 0-1,0), а шкали вище 1,0 взагалі не існує.

У логарифмічному масштабі це будуть такі співвідношення діапазонів, щодо класичного:

$$B_{coin} = \frac{43}{7} (48 \text{ Дб}), B_{super} = \frac{331}{64} (72 \text{ Дб}).$$

У таблиці 1 наведено характерні параметри для шкал при інших значення кількості R, а також співвідношення числових значень на класичній, одиночній і подвійній шкалах коінциденції.

Таблиця 1

Характерні параметри для шкал

Тип АЦП	NR	Кіл. Поділок	Кіл. компараторів	Виграш Кіл.поділ.	Динаміч. Діапазон. Дб	Питома Дб/поділка
Flesh (класич.)	8	7	7	7/7	18	3,4
Coincidence	16	43	43	43/7	36	1,16
SUPER ADC	52	331	331	331/7	72	0,217
Тип АЦП	NR	Кіл. Поділок	Кіл. компараторів	Виграш Кіл.поділ.	Динаміч. Діапазон. Дб	Питома Дб/поділка
Flesh (класич.)	16	15	15	15/15	24	2,13
Coincidence	32	159	159	159/15	48	0,402
SUPER ADC	200	2921	2921	2921/15	96	0,033
Тип АЦП	NR	Кіл. Поділок	Кіл. компараторів	Виграш Кіл.поділ.	Динаміч. Діапазон. Дб	Питома Дб/поділка
Flesh (класич.)	32	31	31	31/63	30	1,16
Coincidence	64	647	647	647/63	60	0,1402
SUPER ADC	1568	43355	43355	43355/63	120	0,0033

Графічно результати для випадку 8R можливо представити наступною послідовністю нормованих шкал перетворення для вказаних типів АЦП.

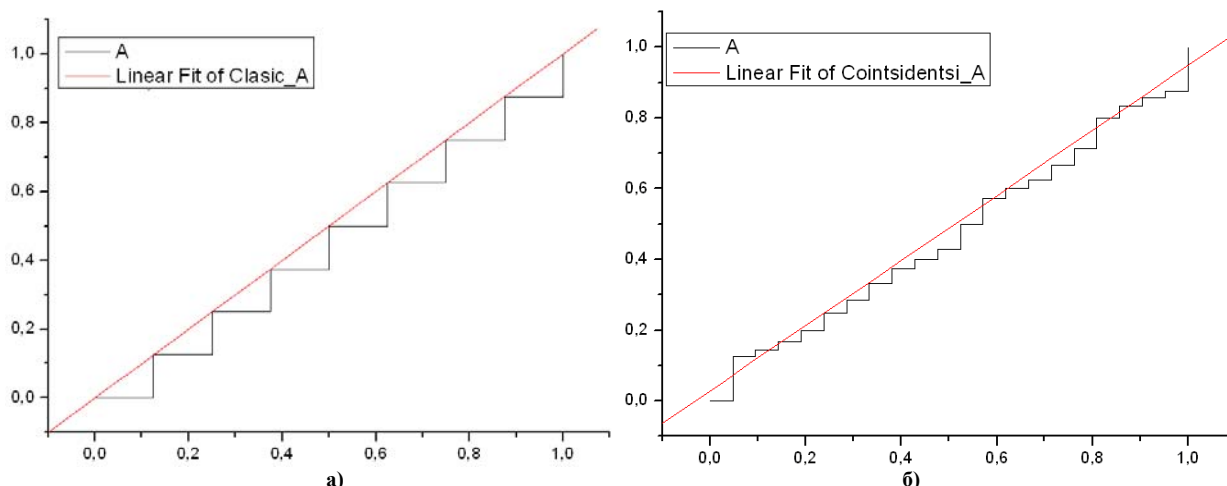


Рис. 1. Нормовані характеристики перетворення АЦП: а) класичний, б) коінциденції

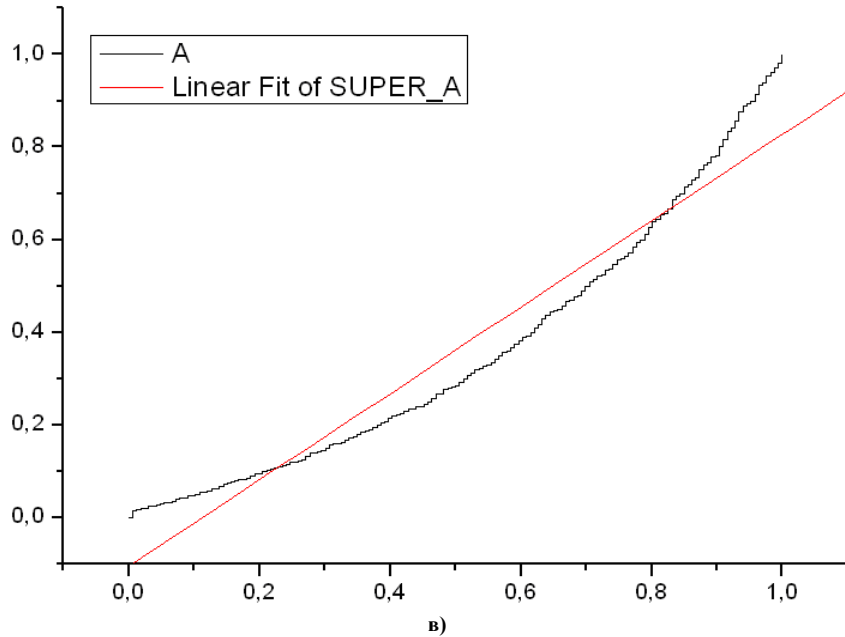


Рис. 1. Нормовані характеристики перетворення АЦП: в) супер-АЦП (продовження)

Очевидним є наявність значних переваг методів Квантової теорії вимірювань для збільшення роздільної здатності шкали вимірювального перетворення, у відповідності до таблиці 1.

### 3. Математичне обґрунтування методу

Для методу коінциденції (подвійного збігу) можливо записати систему рівнянь які пов'язують основні параметри:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_x = \frac{N_{on}}{N_x} U_{on} - \text{Основне рівняння коінциденції} \\ \Delta U_x \cong \frac{U_{on}}{2^{2n_{on}-2}} - \text{Оцінка роздільної здатності шкали} \\ \delta_{U_x} \cong \frac{1}{2^{2n_{on}-2}} - \text{Відносна похибка перетворення} \end{array} \right. \quad (1)$$

Роздільна здатність АЦП дорівнює мінімальній величині зміни аналогової напруги на вході АЦП, при зміні коду на 1 МЗР, для СУПЕР\_АЦП дорівнює  $\Delta U_x$ , яке залежить від розрядності АЦП і визначатися кількістю поділок шкали  $N_{шк} \cong 2^{2 \cdot n_{АЦП}-2}$ .

Наприклад, для двох 12 розрядних ЦАП:  $N_{шк} \cong 2^{2 \cdot 12-2} = 2^{22} = 51000120 \text{ поділ.}$

Розрядність АЦП визначається за тією ж формулою:  $n = \log_2 b$ ,  $b$  – число значень вихідного коду =  $N_{шкали}$ .

Характеристика перетворення і всі її параметри визначаються як і для класичного АЦП, з тією лише різницею, що крок квантування визначається не тільки як  $2^{-n}$  (класичний АЦП), але і має всередині кожного з інтервалів класичної шкали ще до  $2^{n-2}$  додаткових значень.

Відхилення коефіцієнта перетворення, нелінійності АЦП відповідно в  $2^{n-2}$  менші ніж у класичного, і допускають встановлення необхідної кількості поділок в будь-якій зоні шкали, шляхом «проріджування та формування рівномірності шкали», шляхом вибору необхідного кроку квантування, в класичному ці величини жорстко пов'язані.

Динамічний діапазон шкали перетворення в дБ може бути виражений як:

$$D = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}, \quad (2)$$

для шкали коінциденції має кілька значень.

Так в діапазоні 0-1,0000 дорівнює  $N_{шк} = 51000120/2 = 2550060 \text{ поділ.}$  і стільки ж для діапазону 1,0000-4096, тобто  $D = 20 \log N_{шк}$ , дасть відповідно  $D = 126 \text{ дБ.}$

Для забезпечення роботи тільки в дробовій частині і забезпечення шкали перетворення в 126дБ необхідно зрушити початок шкали на  $1 / 4096$  опорного напруги, або ж можна використовувати всю

дробово-раціональну шкалу, 1/4096-4096. Такий незалежний вибір і гнучкість дозволяють оптимізувати АЦП під вирішуване завдання.

1) Частота роботи лічильника обмежена тільки швидкістю ЦАПів, і без проблем може бути більше 10 МГц, для типових, і 100 МГц для спеціальних швидкодійчих, лічильник адресного простору шкали без проблем забезпечує 100 МГц і більше.

2) Частота вимірюваного (перетвореного) сигналу визначається за відомою формулою теореми Вибіроч (Котельникова), і для трьох варіантів виконання АЦП:

- 1) розгортуючого перетворення;
- 2) послідовного наближення;
- 3) паралельного типу,

відповідно становитиме:

$$f = \frac{1}{2} f_{\text{выбор}} = \frac{1}{2} \frac{f_{\text{такт.ген}}}{\sum N_{\text{шкали}}}; \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{2} f_{\text{выбір}} = \frac{1}{2} \frac{f_{\text{такт.ген}}}{\log_2 \sum N_{\text{шкали}}}; \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{2} f_{\text{выбір}} = \frac{1}{2} \frac{1}{\tau_{\text{зат.компар}}}. \quad (5)$$

де  $\sum N_{\text{шкали}}$  – сумарна кількість квантованих поділок шкали перетворення, (зазначено в SUPER\_ADC, і розраховується для конкретної розрядності ЦАПів, розрядність, яких може бути і неоднаковою, все залежить, яку частину шкали, нам необхідно більш деталізувати.

Так що, при 10 МГц і 16 розрядних ЦАП для випадку послідовного наближення частота сигналу:

$$f = \frac{1}{2} f_{\text{выбір}} = \frac{1}{2} \frac{f_{\text{такт.ген}}}{\log_2 \sum N_{\text{шкали}}} = \frac{1}{2} \frac{10^7}{\log_2 \approx 10^9} \approx 160 \text{ кГц}. \quad (6)$$

У ROM занесені розрахункові квантовані значення всієї шкали перетворення, з урахуванням властивостей симетрії, кількість яких визначено виходячи з розв'язуваної задачі, і необхідного алгоритму перетворення. Організація і розмір пам'яті для двох 12 розрядних ЦАП і алгоритму послідовного наближення складе 2x12 розрядних слів кількість яких визначено кількістю поділок шкали, і для випадку

$$N_{\text{шк}} = 51000120 / 2 = 25500060 \text{ под. } n_{RPP} = \log_2 N_{\text{шк}} = 22 \div 24.$$

### 3. Структура АЦП з коротким описом

Структурна схема АЦП коінциденції для випадку використання методу послідовного наближення представлена на рис. 2.

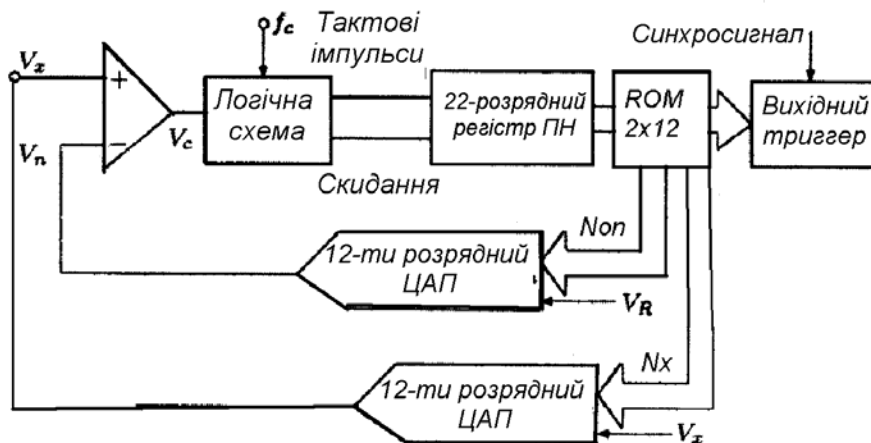


Рис. 2. Структурна схема АЦП коінциденції за методом послідовного наближення

Схема використовує за основу класичну, додані ще один 12 розрядний ЦАП на вхід якого подається вхідний напруга  $U_x$ , Регістр послідовного наближення має 20-23 розрядів (залежно від кількості «прошитих» значень шкали перетворення), коди управління ЦАПами формуються на ROM у вигляді 2x12 розрядних слів.

Алгоритм послідовного наближення працює аналогічно класичному, причому для випадку непарної кількості значень, необхідно на один такт менше, що вимагає для повного циклу перетворення 22-25 тактів. Результуючі значення в зручній для відображення або передачі формі знімається з регістра на тригерах-засувках.

Для забезпечення динамічного діапазону в 126 дБ потрібно компаратор з роздільною здатністю не гірше  $\Delta U_x$ , в той же час, реально сигнал ділиться у кожному з дільників (ЦАП) в 1024 разів меншу величину, ніж у класичній схемі послідовного наближення з 21 розрядом. На відміну від дельта-сігма перетворення, використовується прямий алгоритм квантованого перетворення, а не принцип дельта-модуляції.

### Висновки

Використання результатів нової теорії (КТВ) та її методології можливо скрізь, де потрібно одночасно підвищувати параметр: ТОЧНІСТЬ × ШВИДКОДІЯ ВИМІРЮВАНЬ фізичних величин (військова техніка, медицина (томографія, експрес-аналіз, УЗД), високотехнологічні галузі виробництва, нанотехнології, авіаційно-космічна галузь, мікроелектроніка, системи контролю технологічних процесів, робототехніка, вимірювальна техніка та метрологія, приладобудування тощо).

Особливо високоефективним впровадження нового, саме “ідеологічного підходу” у навчальний процес підготовки фахівців в галузі сучасного приладобудування.

Глобально, нова теорія дозволяє збільшити випуск одиниць якісної продукції в одиницю часу (ТОЧНІСТЬ × ШВИДКОДІЯ ВИМІРЮВАНЬ).

В цілому нова теорія із її феноменальними результатами та встановлення нових невідомих раніше закономірностей може слугувати заявкою на відкриття. Патентування можливе в конкретних галузях приладобудування, а також надання ліцензій для провідних розробників прецизійних вимірювальних приладів.

### Література

1. Троцишин І.В. Вимірювання та перетворення фазочастотних параметрів радіосигналів / І.В. Троцишин. – Хмельницький, ПП Ковальський В.В. – 2002. – 382 с.
2. Троцишина Л.В. Вимірювання частоти за методом коінциденції / Троцишина Л.В., Войтюк О.П., Троцишин І.В // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 2. – С. 198-203.
3. Троцишин І.В. Теорія та практика фазочастотних вимірювань і перетворень радіосигналів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 2. – С. 7-22.
4. Троцишин І.В Ієрархія сучасних цифрових методів вимірювання частоти та методологія їх застосування у радіотехнічних та телекомунікаційних системах / І.В. Троцишин, В.Т. Кондратов, Л.В. Троцишина // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – С. 226-233.
5. Троцишин І.В. Вимірювання частоти за методом коінциденції та особливості утворення шкали вимірювального перетворення / І.В.Троцишин, О.П.Войтюк, Л.В. Троцишина // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 3. – Технічні науки. – С. 240-244.

Надійшла 20.01.2011 р.