УДК 621.317

І.В. ТРОЦИШИН
Хмельницький національний університет

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРИНЦИПІВ КВАНТОВОЇ ТЕОРІЇ ВИМІРЮВАНЬ АМПЛІТУДНИХ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛІВ НА ПРИКЛАДІ АТЕНЮАТОРА-ПОДІЛЬНИКА ТРОЦИШИНА

Стаття присвячена демонстрації одного із положень Квантової теорії вимірювань (КТВ) стосовно збільшення роздільної здатності і швидкодії АЦП-ЦАП на прикладі використання Атенюатора – подільника Троцишина. Приведено методологію та системний аналіз досягнутих в 10-100 разів збільшення роздільної здатності ЦАП та наведено їх графіки передавальних характеристик для типових значень двійкової шкали. Вказано на тісний зв'язок із аналогічними результатами отриманими в Теорії фазочастотних вимірювань.

Article is devoted to demonstrating one of the provisions of the quantum theory of measurement for increased resolution and speed ADC-DAC for example using pad-divider Trotsyshyna. The methodology and system analysis reached 10-100 times increase in resolution DAC and see their schedules transmission characteristics for typical values of the binary scale. Specified in close contact with similar results obtained in the theory fazofrequency measurements.

Ключові слова: квантова теорія вимірювань, атенюатор–подільник Троцишина, збільшення роздільної здатності ЦАП.

Вступ

Радикальний перегляд картини світу, початий фізиками в перші десятиліття минулого століття, і бурхливий розвиток обчислювальної техніки й інформатики останнім часом стали основними факторами, що визначили історію розвитку теорії вимірювання. Розширення й уточнення поняття вимірюваної величини в результаті вивчення мікросвіту і впровадження вимірювань в область дослідження нефізичних величин (економіка, соціологія, психологія, системотехніка й ін.), а також істотні особливості досліджуваних у сучасній фізиці і техніці явищ (швидкоплинні процеси, випадкові процеси і поля, багатомірні детерміновані та випадкові величини і т.д.) поряд з ускладненням процесів їхнього вимірювання і підвищенням вимог до точності та швидкодії процедури вимірювання стали могутнім стимулом для виникнення і розвитку нових концепцій на фундаментальному і на прикладному рівнях теорії вимірювань та метрології. Тому питання пошуку розробки, а особливо впровадження у наукове та інженерне середовище новітніх методів вимірювання, які базуються на нових концептуальних засадах є актуальним, і має свої специфічні особливості. Якщо перші дві складові в цілому залежать від дослідника то на стадії визнання нового – все залишається по старому, що і є актуальним питанням сучасної науки.

Вимірювання як важлива складова пізнання світу.

З древніх часів і до наших днів вимірювання як один зі способів пізнання відіграють важливу роль у житті людини. Спочатку людина у своїй повсякденній діяльності задовольнялася інформацією, що доставляється лише його органами почуттів, а потім залучила їм у допомогу засоби вимірювальної техніки. Метою вимірювання є одержання кількісної інформації про величину досліджуваного об'єкта, під яким розуміються реально існуючі об'єкти (речі, процеси, поля, явища і т.д.) матеріального світу, а також взаємодії між ними. Вимірювання може виконуватися як у пізнавальних (вивчення елементарних часток, організму людини і т.д.), так і в прикладних (керування конкретним технологічним процесом, контроль якості продукції) задачах.

Існує тісний взаємозв'язок між науково-технічним прогресом і досягненнями в області вимірювань і вимірювальної техніки. Важливою складовою частиною більшості науково-дослідних робіт є вимірювання, що дозволяють установити кількісні співвідношення і закономірності досліджуваних явищ. Важливість вимірювань у досягненні наукових результатів неодноразово відзначалася відомими вченими: "Треба вимірювати усе вимірне і робити вимірним те, що поки не піддається вимірюванню" (Галілео Галілей); "Наука починається з тих пір, як починають вимірювати; точна наука немислима без міри" (Д.І. Менделєєв) [1– 4].

Будь-яке сучасне виробництво повинне бути оснащене вимірювальними засобами, що дозволяють здійснювати точний і об'єктивний контроль технологічного процесу. Від цього залежать рівень якості продукції і продуктивність. В автоматизованому виробництві своєчасне одержання необхідної достовірної вимірювальної інформації є однією з найважливіших умов якісного керування об'єктом регулювання. З іншого боку, розвиток і удосконалювання технологічних процесів в області одержання нових матеріалів і елементів створюють можливості для удосконалювання і створення принципово нових засобів вимірювальної техніки.

Прогрес в області вимірювань і вимірювальної техніки немислимий без розвитку теорії вимірювань ("Немає нічого більш практичного, чим гарна теорія"!) В основі будь-якого вимірювального процесу, незалежно від виду об'єкта вимірювання, вимірюваної фізичної величини, принципу вимірювання, способу обробки інформації і т.п., лежать ті самі закономірності. Дослідженню цих закономірностей, задачам оптимізації вимірювального експерименту при різних умовах вимірювань і впливах присвячені основні розділи теорії вимірювань, що викладаються мовою всіх теорій – мовою математики. Причому точний опис

вимірювальних процедур спирається на коректне визначення мети й особливостей вимірювань. У цьому знаходить своє вираження алгоритмізація вимірювань, коли змістовний опис процедур і результатів заміняється формалізованим.

Сутність і особливості вимірювального процесу та процедури вимірювань

Поняття "вимірювання фізичної величини" згідно РМГ 29-99 [1] визначається як «сукупність операцій по застосуванню технічного засобу, що зберігає одиницю фізичної величини, що забезпечують перебування співвідношення (у явному чи неявному виді) вимірюваної величини з її одиницею й одержання значення цієї величини».

Існують інші формулювання поняття "вимірювання" [3], "Вимірювання є процес одержання інформації, що полягає в порівнянні дослідним шляхом вимірюваних і відомих величин чи сигналів, виконання необхідних логічних операцій і представлення інформації в числовій формі".

У роботі [4] дане ще одне визначення: "Вимірювання – одержання числового еквівалента (значення) величини, що характеризує властивості фізичного об'єкта (предмета, процесу, явища), за допомогою експерименту (дослідним шляхом), що задовольняє вимогам системи забезпечення єдності вимірювань, основу якого складає операція порівняння аналогової величини зі зразковою (значенням міри)".

Вимірювання можуть підлягати не тільки фізичні величини, але і функціональні залежності, що характеризують властивості об'єкта вимірювання. У цьому випадку проводяться або вимірювання при фіксованих значеннях аргументу (частіше часу чи просторових координат), або вимірювання функцій за допомогою міри, що відтворює зразкову залежність.

Способи опису вимірювальних процедур і результатів вимірювань

Найчастіше для опису використовують рівняння вимірювань, що встановлює зв'язок результату вимірювання з вхідним впливом і виконуваними перетвореннями, що можуть бути аналоговими (позначимо символом R_a), аналого-цифровими (K) і цифрового ($R_{\#}$).

Залежно від якості апаратурної реалізації прийнятого алгоритму перетворення можна розділити на неідеальні (позначимо індексом *н* при відповідному символі форми перетворення) і ідеальні (без індексу). Якщо прийнятий алгоритм перетворення, що дозволяє при ідеальній апаратурній реалізації одержати результат вимірювання у вигляді істинного значення вимірюваної величини, то таке перетворення називають гіпотетичним (г), залежно від якості алгоритмів перетворення рівняння вимірювань може бути представлене в трьох модифікаціях [4]:

- рівняння вимірювань, що враховує неадекватність апаратурної реалізації прийнятого алгоритму,

$$X_i^* = R_{\#}^{н} K^{н} R_a^{н} g_i, \tag{1}$$

де X_i^* – результат вимірювання, одержуваний за допомогою *i*-го вимірювального експерименту;

g_i - вхідний вплив;

- рівняння вимірювань, що представляє собою прийнятий алгоритм,

$$X_{uj}^* = R_{\#} K \; R_a g_i, \tag{2}$$

де X_{uj}^* – результат вимірювання, отриманий при ідеальній реалізації прийнятого алгоритму;

- рівняння вимірювань, що представляє собою істинне значення вимірюваної величини X_j (гіпотетичний алгоритм),

$$X_j^* = R_{\#}^{г} K^{г} R_a^{г} g_i. \tag{3}$$

Особливе місце займає аналого-цифрове (А-Ц) перетворення, у ході якого здійснюються три операції: квантування, порівняння з мірою, дискретизація. Остання з них зв'язана з тим, що кожне цифрове значення співвідноситься з фіксованим моментом часу, або з фіксованими просторовими координатами. Якщо має місце дискретизація за часом, то перехід від безупинної функції $j(t)$ до дискретної послідовності, реалізованої за допомогою дельта – функції $d(t)$, може бути описаний у такий спосіб:

$$j(t) \to \{j(t_i)\} = \left\{ \int_T j(t) d(t - t_1) dt \right\}, t \in T, \tag{4}$$

де T – час спостереження.

Після рівномірного квантування з кроком Δ_{kj} послідовність дискрет $j(t)$ перетвориться в послідовність чисельних значень:

$$\{K(t)\}_{i=1}^{m} = \left\{ E\left[\frac{1}{\Delta_{kj}} \int_T j(t) d(t - t_1) dt \right] \right\}, \tag{5}$$

де E – діапазон вимірювання.

Враховуючи, що операція ідеального аналого-цифрового перетворення є достатньою для процедури

вимірювання фізичних величин, і враховуючи наявність класичних для цього випадку методичних і інструментальних похибок [5], вважаємо за доцільне поглибити пошук саме в питанні неадекватності математичних моделей і математичних положень, які лежать в основі нових поглядів на сутність речей. Тому актуальним буде наведення декількох прикладів саме таких принципових речей.

Атенюатор-подільник Троцишина і класичний подільник Кельвіна

Типовим прикладом який характеризує можливість отримання принципово нових якісних і особливо кількісних параметрів вимірювальної шкали є порівняння класичного подільника Кельвіна [5], і використання всіх можливих (квантових) станів того ж таки подільника (резисторного ланцюга), який отримав назву Атенюатор-подільник Троцишина (АПТ). На рис. 1.2 приведено їх схеми для наглядного прикладу ланцюга із 8-ми резисторів однакового номіналу.

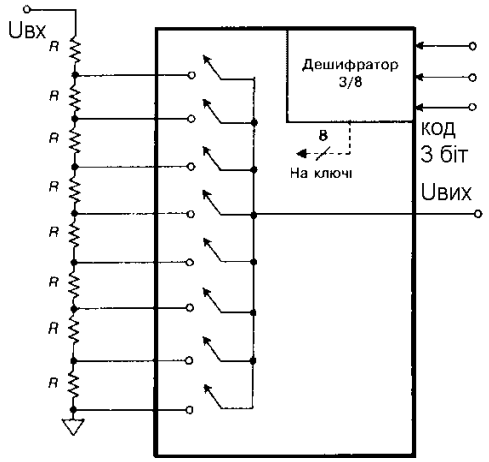


Рис. 1. Подільник Кельвіна

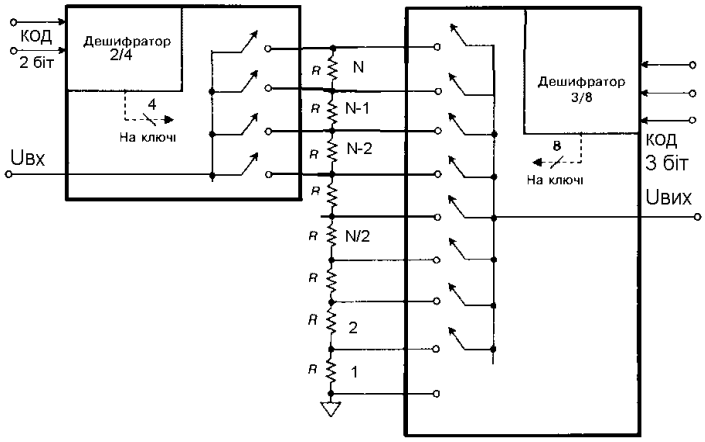


Рис. 2. Схема Атенюатора-подільника Троцишина для 8R

Найпростішою зі всіх структур ЦАП де можливо провести порівняння є подільник Кельвіна, або цуг, показаний на рис. 1. N- розрядна версія цього ЦАП складається з 2^n однакових послідовно з'єднаних резисторів і 2^n ключів (зазвичай КМОП), по одному між кожним вузлом ланцюга і виходом. Вихід організується замиканням одного з ключів, підключених до відповідного відгалуження. Ідея цього ЦАП сходить до часів лорда Кельвіна середини 1800-х років. Ця проста архітектура використовує вихід по напрузі (у якого вихідний імпеданс залежить від коду) і відрізняється хорошою монотонністю. Навіть якщо резистор буде випадково закорочений, сигнал на виході і не перевищить сигналу і + 1-го виходу. При рівності всіх резисторів цей АП має лінійну шкалу. Однак він без праці може бути виконаний нелінійним, якщо буде потрібно нелінійний ЦАП. У зв'язку з тим, що в момент перемикання працюють тільки два ключі, в такій архітектурі рідко відбуваються викиди. Крім того, оскільки викиди не залежать від коду, ЦАП підходить для застосувань, розрахованих на малі спотворення сигналів.

Основний недолік ЦАП подільника (Кельвіна) полягає у великому числі резисторів і ключів, необхідних для досягнення високої роздільної здатності (ступенів перетворення). З цієї причини він не ставився до широко використовуваних ЦАП з простою архітектурою до приходу мініатюрних ІС, відкрили його практичність для ЦАП низької і середньої точності. Сьогодні ця архітектура досить широко застосовується в простих ЦАП, таких як цифрові потенціометри, і, є компонентом більш складних структур ЦАП високої роздільної здатності [5].

Завданням розробленого методу є збільшення роздільної здатності подільника (кількості квантованих значень шкали перетворення) і розширення функціональних можливостей шляхом адаптивного вибору характеристики перетворення.

Завдання вирішується шляхом побудови Атенюатора-подільника Троцишина (АПТ), який полягає у використанні кодокерованої комутації точок проміжних з'єднань лінійки N послідовно з'єднаних резисторів однакового номіналу, в якій на верхній (крайній вивід лінійки резисторів) подається вхідна напруга, а нижній (крайній вивід лінійки резисторів) підключено до спільного виводу атенюатора-подільника (подільника Кельвіна), відрізняється тим що, для збільшення кількості квантованих точок вихідних значень шкали АП, до значень більших за N (подільника Кельвіна), вхідний сигнал кодокеровано подається на виводи (точки з'єднання) починаючи з верхньої N і наступних вниз до N/2, при цьому комутація вхідної напруги на верхній вивід N реалізує класичну шкалу перетворення із N значеннями, а використовуючи наступні проміжні точки N-1 і до N /2 отримуємо, окрім наявних N, ще додаткові квантовані значення шкали перетворення

$$N_i = \mathrm{mod}_{\le 1,000}\left\{\frac{A_j}{B_k}\right\},\ j,k \in 1 \div N, \tag{5}$$

схема АПТ для випадку N=8 резисторів приведена на рис. 2. Робота методу полягає в послідовній комутації

стану АПТ згідно послідовних значень шкали перетворення яку забезпечують вхідний і вихідний комутатори, згідно заданого алгоритму режиму комутації.

Для порівняння проведемо розрахунки кількості квантованих значень шкали перетворення для класичних схем подільника Кельвіна і атенюатора-подільника Троцишина (АПТ), для типових значень кількості резисторів (однакової для обох схем). В таблиці наведено типові значення параметрів АП Кельвіна і АПТ та їх порівняльні співвідношення.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики АПТ і АП Кельвіна

Кількість резисторів NR (N АП Кельвіна)	2	4	8	16	32	64	128	256	1024
Кількість квантових точок шкали АПТ	2	6	22	80	324	1260	5022	19948	318964
Приріст квантованих значень	0	2	14	64	292	1196	4894	19692	317940
Виграш	1	1,5	2,75	5	10,125	19,69	39,08	77,92	311,5

Вигляд шкали перетворення АПТ для 8 резисторів (8R) в нормованих значеннях приведено на рис. 3. В той же час, для тієї ж кількості 8R для випадку шкали перетворення подільника Кельвіна, отримаємо класичну шкалу яка зображена на рис. 4.

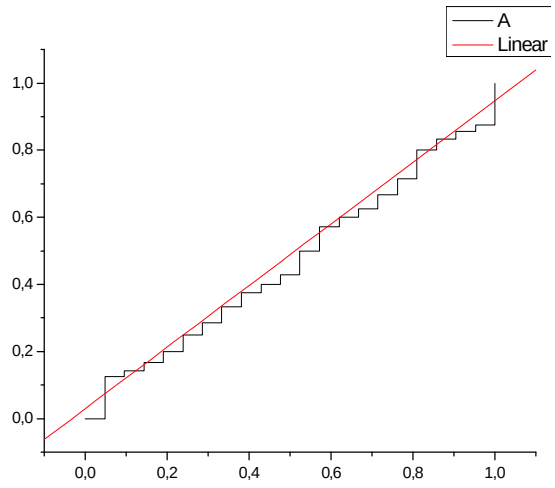


Рис. 3. Квантова шкала перетворення АПТ_8R

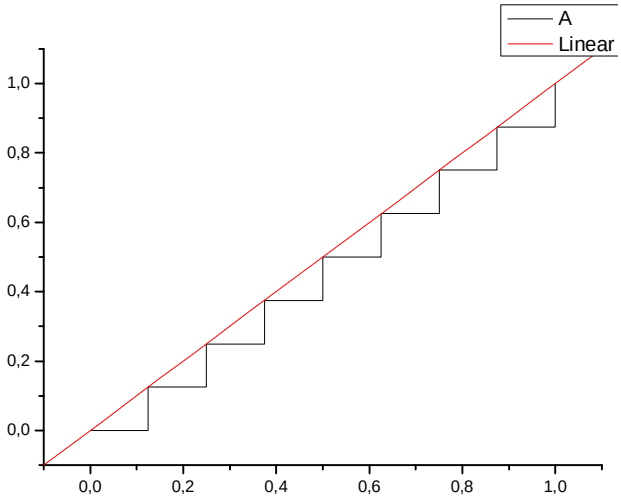


Рис. 4. Квантова шкала перетворення АП Кельвіна_8R

Очевидним є істотне збільшення роздільної здатності шкали перетворення і має виграш (Табл.) всього 2,75 рази, в той же час уже при АПТ_16R, виграш складе 5 разів (80 поділок шкали замість 16!!), які показано у збільшеному масштабі на рис. 5.

Рівняння квантової шкали перетворення можливо записати як:

$$N_i = \mathrm{mod}_{\le 1{,}000}\left\{\frac{A_j}{B_k}\right\},\ j,k \in 1 \div N, \tag{6}$$

яке для випадку АП Кельвіна матиме вигляд:

$$N_i = \mathrm{mod}_{\le 1{,}000}\left\{\frac{N_i}{2^n}\right\}, i \in 1 \div N, \tag{7}$$

тобто є лише частковим випадком АП Троцишина.

Враховуючи, що для невеликої кількості резисторів виграш не є великим, в той же час вже при 16R він вже складає 5 разів, і для наглядності значного покращення нерівномірності та лінійності характеристики АПТ_16, її графік приведено на рис. 5.

Після таких вражаючих результатів уже при досить незначних кількостях розрядів двійкової шкали, очевидним є те, що лише в рамках КТВ можливо досягнути використання всіх наявних квантованих значень шкали, тоді як класична шкала використовує лише двійкові значення і відкидає значно більшу кількість із всіх можливих.

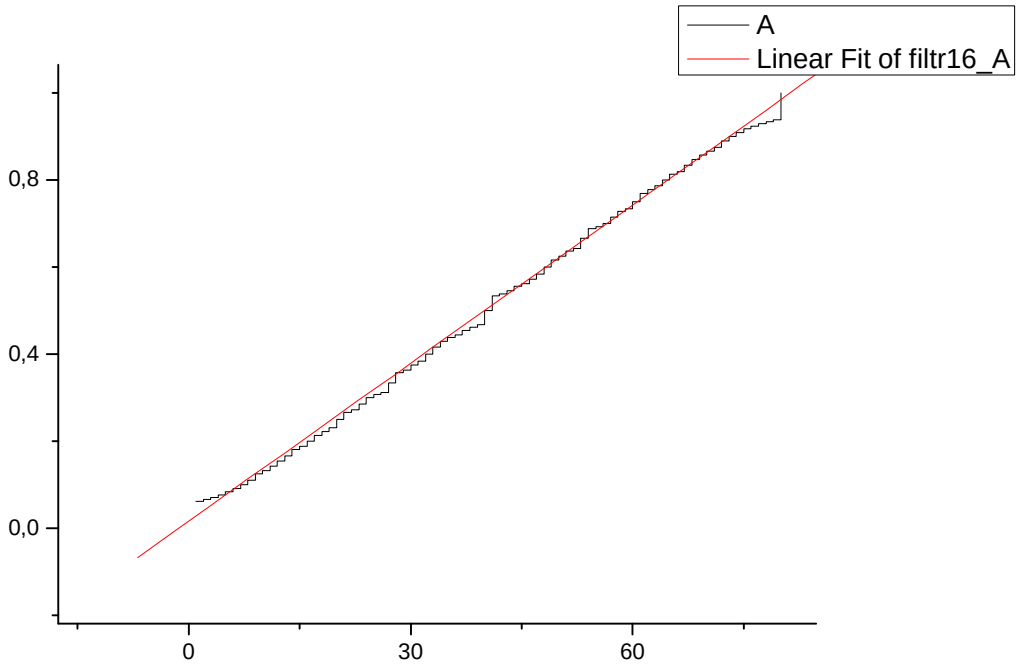


Рис. 5. Квантова шкала перетворення АПТ_16R

Помилки в теорії пізнання та шляхи їх подолання.

Людство, з тих пір, як породжено, біжить без оглядки, як йому здається, по вірному шляху. Але, непогрішних – немає, і часом усе-таки потрібно зробити зупинку, щоб оглянутися назад, критично оцінити і переосмислити досягнуте. І якщо з висоти прожитих цивілізацією років будуть виявлені помилки, то, мабуть, щоб не потрапити на тупикову колію розвитку, на дорогу в нікуди, необхідно їх усунути.

Природно, що кожен учений бажає признання своїх праць, якнайшвидшого впровадження їх у практику життя. Але, удається це тільки тим, хто розвиває науку, рухаючи вперед. Для тих же, хто помічає наукові помилки, справа обстоїть зовсім по-іншому. І тут на арену виступає безліч факторів. Спробуємо розібратися.

Суб'єктивний фактор

Найпершим способом боротьби зі спробами переосмислення устояних положень науки є спосіб умовчання, за принципом: "Ніхто нічого не бачить і не знає". А раз немає розмови, немає і проблеми. Якщо цей спосіб не допомагає, то в силу кастової (цехової) солідарності визнані авторитети дають різкі одповіді "ревізіоністам". У слова можна наділити що завгодно, тому спочатку в хід йдуть "наукові" спростування. Коли не удається виправдати догму з наукового погляду, у хід йде вплив на особистість інодумця, типу: "А хто ти такий?" чи "А хто тебе знає?". Далі можлива кампанія по відвертому шельмуванню інакомислячого.

Під замовчуванням мається на увазі, що варто тільки дозволити підірвати довіру до такої-то науки, особливо з розряду точних, як математика, як автоматично не буде довіри і до її маститих і заслужених авторитетів.

Другим невисловленим мотивом відкидання нових істин стає усвідомлення марності свого наукового внеску, розуміння, що усе своє життя витратив на розробку псевдонаучної чи тупикової колії, гіркоту від утрати свого імені в науці зараз чи у майбутньому, – усе це, звичайно ж, переноситься особливо болісно. Коли ж, у силу очевидності проблеми, позначені кроки не допомагають, включаються важелі об'єктивного фактора.

Об'єктивний фактор

Цей фактор дійсно значимий, і просто так від його питань не піти, а це: "Ви знаєте, у що і в скільки обійдеться переоцінка такого-то наукового положення?"

Усі ці міркування дозволяють зробити один-єдиний висновок – ціна питання в майбутньому буде незмірно вище; можна виразитися і жорсткіше: як за допомогою поганого інструмента неможливо створити високоякісний виріб, так і допомогою помилкового математичного інструментарію ми приходимо тільки до помилкових посилок, що змушені розвивати далі, усе більш і більш занурюючи в дезінформаційну безодню; і наступне – не можна розвиток цивілізації доводити до кризової тупикової точки, коли вже ніякі ліки не допоможуть вилікувати хворобу.

Як резюме: проблему все рівно прийдеться вирішувати.

Нове питання: "Наскільки відомо, так ще питання не ставилося. І хто ж повинний приймати рішення, керувати процесом? Яким повинне бути поле рішення? Чи були прецеденти?"

Відхід з тупикового, помилкового шляху розвитку – питання концептуальне, що стосується всієї людської цивілізації. Одночасно – це питання безпеки України від зовнішніх зазіхань.

Чи можуть вироблятися необхідні перетворення в окремо узятій країні? Звичайно, можуть і повинні, – рішення будь-якої складної задачі завжди починалося з іспитового полігона; рішення ж, здобуваючи

винятково політичний характер, повинне прийматися на рівні керівництва країни з урахуванням усіх факторів: міжнародної підтримки, безпеки, економічної потужності держави, наукового потенціалу, менталітету і рівня освіченості населення.

Прецеденти були, хоча і не такого значимого обсягу, це: становлення нових релігій, зміна календарів літочислення, приведення до міжнародної однаковості систем мір і ваг, на кінець – до схем і правил руху транспорту.

Тут необхідно відзначити: перший, хто вирішить цю задачу, отримає величезний потенціал для наступного прискорення розвитку своєї країни, залишивши далеко позаду всіх інших.

Так виглядає філософія питання, що розглядається, і для продовження дослідження розглянемо деякі визначення із сфери математичного аналізу які лежать в основі опису теорії вимірювань та вимірювальних приладів.

Деякі особливості математичного аналізу важливі для метрології

В основі теорії Дедекінда лежить деяке твердження, що вважається настільки елементарним, що приймається без обговорення: ***між будь-якими двома раціональними числами*** x_1 ***і*** x_2 ***завжди знайдеться третє.*** Як наслідок – між x_1 і x_2 завжди укладена нескінченна безліч раціональних чисел. Тому що будь-якому числу можна зіставити точку на числовій осі, то, по суті, перед нами твердження про безперервність простору, про можливість його розподілу на як завгодно малі відрізки.

У дійсності, якщо ми спробуємо зробити це експериментально, то перед нами виникнуть визначені труднощі, пов'язані із роздільною здатністю вимірювальних приладів**.**

На початку, якщо ми візьмемо механічні прилади, лінійки, штангенциркулі, мікрометри, то ми буде обмежувати роздільну здатність шкал, цих вимірювальних приладів. Точність вимірювання довжини не може перевищувати половини розрізнення шкали приладу. Якщо ми скористаємося мікроскопом, то обмеження виникнуть через хвильові властивості світла. Замість точки у фокальній площині об'єктива виникне складна дифракційна картина, обмежує роздільну здатність приладу. Якщо ми станемо зменшувати довжину хвилі світла, то буде рости енергія світлових квантів, і при достатній енергії підуть різні процеси народження елементарних часток. Зрештою ми впремося в так звану фундаментальну довжину l_F яка, за різними представленнями, може бути порядку $10^{-17}\,см$ чи $10^{-33}\,см$, див [4].

Таким чином, якщо ми слідом за Гілбертом вважаємо, що геометрія є частиною фізики, то ми повинні відмовитися від аксіоми про нескінченну подільність відрізка, замінивши її аксіомою про існування відрізків настільки малих, що їх уже неможливо поділити на менші частини.

Що відбудеться з математикою при введенні такої аксіоми.

По-перше: зникне розподіл чисел на раціональні й ірраціональні, а останні, на алгебраїчні і трансцендентні. Усі числа можна буде представити в десятковому вигляді

$$a_k 10^k a_{k-1} 10^{k-1} \ldots a_1 10^1 a_0 10^{-1} \ldots a_{-1} 10^{-1} \ldots a_{-r} 10^{-r} \pm b 10^{-r} \qquad (8)$$

де *а* і *в* – натуральні числа 0, 1,2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, а в – точність представлення числа. Без обмеження спільності *в* можна покласти рівним 5.

По-друге: усі нескінченні множини будуть мати потужність рахункової множини, якщо вони самі збережуться, що неочевидно. І По-третє: зникне операція граничного переходу.

Як випливає з вище викладених відомих і очевидних проблем матаналізу для метрології саме в цих визначеннях є раціональне зерно, яке для вимірювань формально виражається поняттям вимірювальної шкали, тому без пристрасного розгляду цього питання будь які розмови, про принципові зрушення, саме у теорії і практиці вимірювань, достеменно щось говорити неможливо.

Вимірювальні шкали, короткі визначення та особливості використання.

Шкала порядку. Порівняння за принципом "більше-менше" (чи "дорівнює") приводить до *шкали порядку*. Це найменш інформативна шкала. Проте вона знаходить застосування на практиці. Забезпечення єдності вимірювань по шкалах порядку вимагає стандартизації і ретельній ідентифікації реперних крапок.

Шкала інтервалів. Порівняння за принципом "на скількох більше (менше)" приводить до *шкали інтервалів*. Це вже більш інформативна шкала, і цілком природно, що вона знаходить більш широке застосування. Забезпечення єдності вимірювань по шкалах інтервалів вимагає фіксації і законодавчого закріплення початку відліку.

Шкала відношення. Порівняння за принципом "у скільки разів більше (менше)" приводить до *шкали відношення*. Це сама інформативна шкала, отримали найбільш широке розповсюдження. Забезпечення єдності вимірювань по шкалах відношення вимагає централізованого чи децентралізованого відтворення одиниць фізичних величин і передачі інформації про їхні розміри засобам вимірювань.

Фактори, що впливають на результат вимірювання. На результат вимірювання впливає безліч факторів, точний облік яких неможливий, а підсумок непередбачений. Загальне відношення до факторів, що впливають, можна сформулювати в такий спосіб*: до* вимірювання їх потрібно по **можливості виключити**, *у процесі* вимірювання – **компенсувати**, *а після* вимірювання – **врахувати.**

Результат вимірювання. Непередбачуваність підсумкового впливу факторів, що впливають, на результат вимірювання знаходить своє відображення у *формулюванні третьої аксіоми метрології*, яку

можна розглядати як наслідок чи прояв загального закону природи, що складає в тім, що **всі реальні події мають стохастичний характер.**

Випадковий характер мають результати вимірювань, представлені на кожній із трьох вимірювальних шкал. Усі вони справедливі з тією чи іншою імовірністю. На градуйованій шкалі **результат вимірювання,** наприклад, **ні при яких обставинах не може бути представлений одним числом.** Найбільше повно він характеризується масивом експериментальних даних з *рівноточними* чи *нерівноточними значеннями відліку*.

Але більш гнучким і універсальної є цифрове чи кодове представлення даних. Дані, у цьому випадку, представляються цифрами, буквами, іншими графічними символами, а також дискретними станами сигналів і пристроїв.

Сукупність правил, що дозволяють зіставити системі об'єктів з їхніми характеристиками систему цифрових чи даних систему чисел, називають **шкалою**. У теорії узагальнених вимірювань розрізняють кілька типів шкал. Типи шкал характеризуються наборами співвідношень, тобто еквівалентності й упорядкування.

Масштабні шкали

Масштабна шкала (шкала відношення, чи пропорційна шкала). З погляду співвідношень тут діють еквівалентність, строге упорядкування станів, інтервалів між ними і часток від розподілу станів. Шкала повинна мати не умовний, а природний нуль. Тоді між станами можливо адитивне відношення, тобто можливе додавання. Приклади шкал відношення: шкала довжини, маси, електричної напруги і т.д.

Натуральні (абсолютна) шкали

Цим шкалам властиві будь-які відношення, аналогічні відношенням чисел. Тут немає ні реперних точок, ні еталонних інтервалів. Мова йде про вимірювання відносних величин (у природних одиницях), а також про процедуру підрахунку. Підрахунок деталей, підрахунок числа імпульсів, підрахунок людей і т.д. Вимірювання відносних величин: коефіцієнта підсилення, коефіцієнта розподілу, емпіричної імовірності і т.д.

Вимірювання і шкали

Вимірювання – установлення відповідності між безлічами об'єктів і безліччю "стандартних моделей об'єктів", що і складають вимірювальну шкалу. Терміни "вимірювання" і "шкалювання" вживаються як синоніми. Вимірювання і шкали є інструментами формалізації й узагальнення емпіричних спостережень.

Властивості шкал визначаються відносинами, заданими на безлічі стандартних моделей шкалюємих об'єктів. Визначеним типам шкал відповідають різні правила, що обмежують можливі операції зі стандартними моделями об'єктів, способи обробки результатів вимірювання і їхніх інтерпретацій. Формальне обгрунтування й аналіз властивостей шкал різних типів приведені в роботі [14].

Важливо, що в ряді шкал – найменувань, порядку, інтервалів, відносин – збільшується потужність шкал: якісні вимірювання змінюються кількісними, зростають можливості оцінки властивостей об'єктів, розходжень і відносин їхніх властивостей, застосування арифметичних операцій, статистичних мір і критеріїв, розширюються межі інваріантості вимірювань. **Більш могутні шкали мають усі можливості шкал менш могутніх, що зв'язує всі шкали в єдину систему вимірювань.**

Введення метрики поділяє шкали на неметричні шкали (номінальну і порядкову) і метричні (шкали інтервалів і відносин).

Шкала відношення. Шкала відношення відрізняється від інтервальної шкали введенням "природного", чи абсолютного нуля, якому відповідає повна відсутність вимірюваної властивості. Якщо область визначення значень шкали відносин позитивна, то її називають позитивною шкалою відносин. Усі припустимі перетворення для шкали відношення вичерпуються функціями виду $f(x) = kx$; $(k > 0)$, що вказує на найвищі можливості шкали відносин як інструмента узагальнення [4].

Шкала відношення, як найбільш могутня, підсумовує всі можливості, якими володіють менш могутні шкали найменувань, порядку й інтервалів. На ній визначені відносини еквівалентності, рівності, порядку, функції метрики і відстані. На шкалі відношення можна визначити рівність і ранговий порядок величин, рівність інтервалів і відносин між величинами. Можливість оцінки відношення величин – найбільш важлива відмітна риса цієї шкали, що визначила її назву.

Відомі приклади шкали відношення: маси, довжини; температурна шкала Кельвіна. Вони представляють зразки позитивних шкал відношення. На шкалі відношення визначені всі арифметичні операції, і до її значень можуть бути застосовні будь-які статистичні процедури.

Деякі особливості застосування шкал

В ідеалі варто прагнути використовувати шкали відносин. Однак у реальному дослідженні ці вимоги зм'якшуються: варто віддавати перевагу найбільш могутнім шкалам з тих, котрі застосовні до конкретних даних. Вибір шкали повинний відповідати як вимірюваним показникам, так і цілям і задачам дослідження.

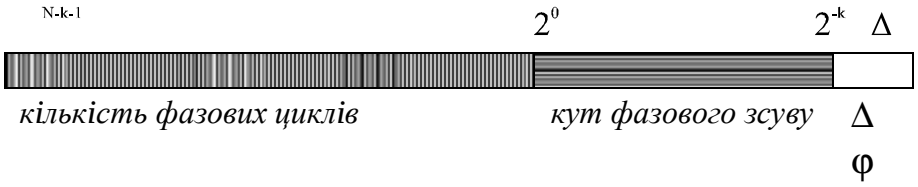
Принципи та методи теорії ФЧВ і ПР

В рамках започаткованого мною нового наукового напрямку, мною особисто та моїми учнями, сім із яких вже успішно захистили кандидатські дисертації за новим науковим напрямком, та під моїм керівництвом, (спец. 05.11.08 – радіовимірювальні прилади, дві дис. 2001р, 2005 Вінницький НТУ, спец. 05.11.13 – прилади та методи контролю і визначення складу речовини, 2003, 2005 Київський НУТД, спец.

05.11.05 – прилади та методи вимірювання електричних та магнітних величин, 2004, НУ "Львівська політехніка, 05.02.01- математичні методи та моделювання " 2006, ТДТУ ім. Полюя. м. Тернопіль,) [6-12], доведено, що в галузі вимірювання частоти та кута фазового зсуву використовуються моделі, які неадекватні до реальних сигналів, що не лише не дозволяє одночасно підвищувати точність та швидкодію вимірювань, а в багатьох випадках призводить до грубих помилок (промахів), які в рамках класичної теорії називають парадоксами.

В рамках розробленої теорії фазочастотних вимірювань та перетворень радіосигналів (ФЧВ і ПР), нам вдалося не лише довести неадекватність класичних підходів та моделей, але і запропонувати принципово новий – фазочастотний підхід, який не лише вільний від вказаних недоліків, а відкриває нові, досі невідомі можливості не лише в галузі вимірювань, а також теорії інформації, теорії сигналів тощо [13].

Коротко суть полягає в тому, що частота визначається як похідна від повної фази ($w(t) = d\Psi(t)/dt$), а всі вимірювальні прилади, реалізують алгоритми накопичення (тобто інтегрування), що є операцію оберненою до знаходження похідної. Таким чином, очевидно що $d/dt \neq \int dt$, але десятки років прилади вимірювали те, чого в принципі не існує в природі (частоту – група Ч, фазовий зсув – група Ф). На сучасному етапі виявилось, що навіть суперсучасні прилади, які мають високі метрологічні характеристики стрімко їх втрачають, коли час доступу до сигналу зменшується, або коли він апріорі невідомий, тим більше коли сигнали мають модуляцію – тобто є радіосигналами (або в трактуванні авторів – такими в принципі є всі реально існуючі сигнали). Класичний підхід пояснити ці явища не може, так як використовує ідеалізовані моделі (синусоїда від $-\infty$ до $+\infty$), що є абсолютною абстракцією, але лише для таких моделей $d/dt \cong \int dt$, і звідси всі проблеми.



Більше того, бажання використовувати спрощенні моделі, зручні методи гармонічного аналізу, призвели до катастрофічної помилки саме в теорії вимірювань, коли єдину шкалу вимірювання Повного фазового зсуву (ПФЗ), було розділено на дві окремі: частотну (група Ч), і фазову (група Ф), які відображають в першому наближення цілу та дрібну частину єдиної шкали. Таким чином, зрозуміло в чому причини та проблеми вимірювання саме фазочастотних вимірювань, а не вимірювання частоти та фази у класичному розумінні, яких для реальних сигналів не існує. Біль детально специфіку поняття «частота» стосовно радіосигналів наведено в [5,13– 16].

Але, як з'ясувалось, запропонована Теорія ФЧВ і ПР, яка базується на концепції фазочастотного підходу до проблеми вимірювання "частоти" та "фази" електричних сигналів виявилась навіть не "технологічним", а "ідеологічним" науковим напрямком у галузі вимірювальної техніки, а конкретно саме фазочастотних параметрів.

По-перше, ми не лише відмовилися від класичних уявлень, а і встановили і довели, що для реально існуючих сигналів (які об'єднано у загальний клас і названо радіосигналами), що мають початок і кінець, і всі вони мають принципові відмінності від ідеальної "синусоїди". Так, для них не існує понять "частота" і "фазовий зсув", у їх класичному розумінні яке регламентується ГОСТами, ДСТУ, так як, ці параметри, як уже вказувалось, вводяться і "існують" лише для ідеальних сигналів (синусоїда без початку та кінця), а це є абсолютна ідеалізація. Тому, "частота" і "фаза" – реально не існують, і не можуть бути виміряні, для сучасних реальних сигналів, що наглядно демонструє простий приклад: жодним прецизійним частотоміром неможливо виміряти із зазначеною точністю приладу носійну мобільного телефону, навіть в активному режимі, тим більше в режимі чекання, аналогічні проблеми при вимірюванні параметрів ЧМС тощо.

Але нова теорія не відмовляється від "частоти" та "фазового зсуву", а встановлює причинно-наслідковий їх зв'язок та адекватне до реальних процесів визначення. Тому основу теорії ФЧВ і ПР складає твердження, що для реальних сигналів (радіосигналів) існує поняття повного фазового зсуву (ПФЗ) $\Psi(t)$, та похідної від нього ($d\Psi(t)/dt = w(t) = 2pf(t)$ – яка і є "миттєвою частотою", а аналізуючи поведінку зміни та екстремуми функції $\Psi(t)$ можна знайти всі відомі (а також нові) параметри як "частоти" так і "фази". Таке визначення не суперечить "класичним" визначенням, які будуть у нас граничним випадком, за умови що $\Psi(t) \in (-\infty \le t \le +\infty)$, а це вже ідеалізація.

Більше того, вимірювальні прилади, які ми розробили на основі нової теорії лише в самому крайньому випадку та при спрощенні схеми і функціональних можливостей дають відомі варіанти існуючих "класичних" методів та приладів, які є частковими випадками фазочастотного вимірювача [15, 16].

Теорія є завершеною, оскільки охоплює не лише аналіз (вимірювання), але також і синтез (формування та перетворення) фазочастотних параметрів радіосигналів. Наприклад на тому ж

технологічному рівні (швидкодії елементної бази, мікросхем) за рахунок зміни конфігурації (схеми прошивки) ми отримали синтезатори, які мають в два рази вищу вихідну частоту (а точніше секвентність), і менший фазовий ривок, (одночасно підвищено і швидкодію і точність).

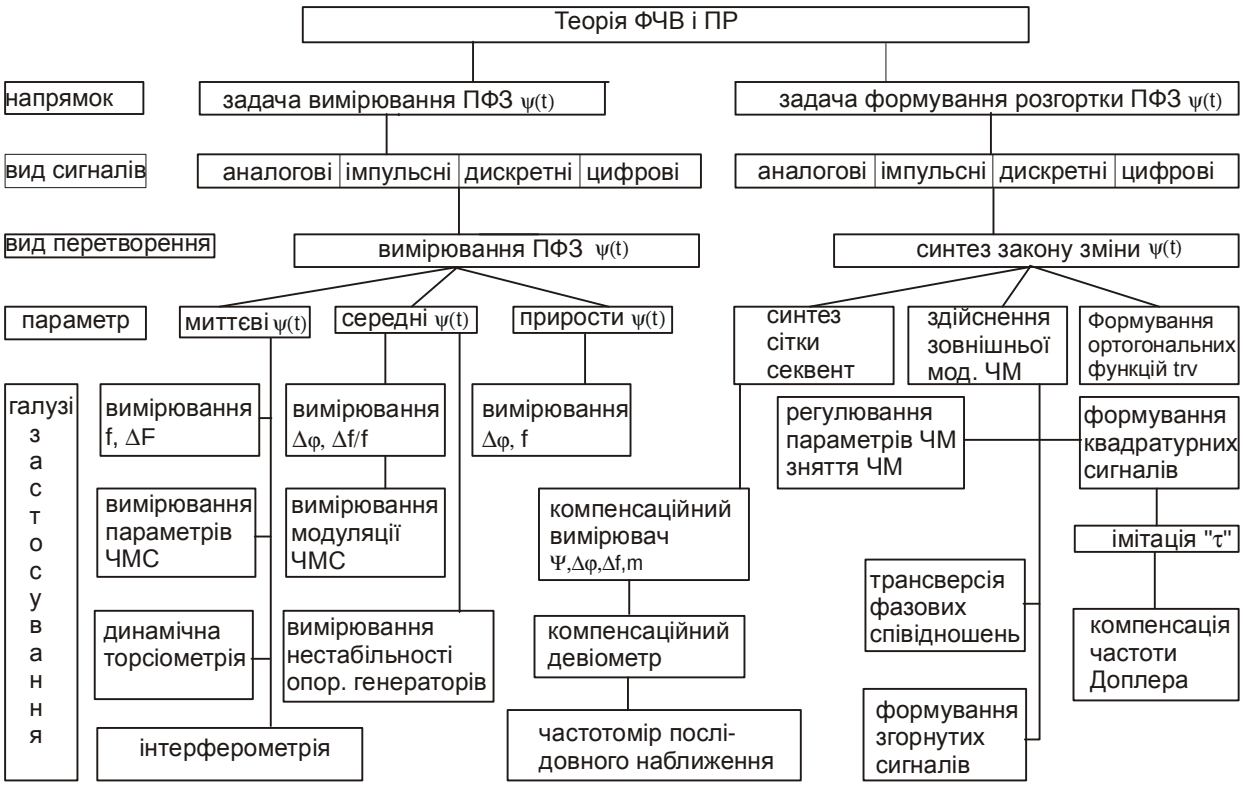


Рис. 6. Узагальнена класифікаційна таблиця основних напрямків застосування теорії ФЧВ і ПР [13].

Крім того, нами виявленні абсолютно нові властивості, які взагалі не можуть бути та існувати в рамках класичних уявлень, тобто можна говорити, що зона властивостей нової теорії у порівнянні із "класичною" має, так-би мовити, "комплексну компоненту", а її проекція на множину "дійсних чисел" дає "класичні системи". Тому потрібно дослідити які ще нові можливості криються за межами наших уявлень в галузі як вимірювання так і обробки радіосигналів тощо.

В теорії ФВЧ і ПР замість двох незалежних шкал (ціла частина – прилади групи Ч, і дробова частина – прилади групи Ф), використовується єдина шкала із раціональними числами, які окрім цілих включають і безмежну кількість проміжних (можливих) значень “дробових” (див. рис. шкали [13]).

Таким чином, для розрізнення сигналів із нашого прикладу не є необхідним чекати $T_{вим.\min} \geq 1c$, а можливо за $T_{вим.\min} \sim 1мс$, що на 10^3 разів швидше ніж в ЕРЧ [16], саме на це вказує теорія ФЧВ і ПР (рис. 7) [17].

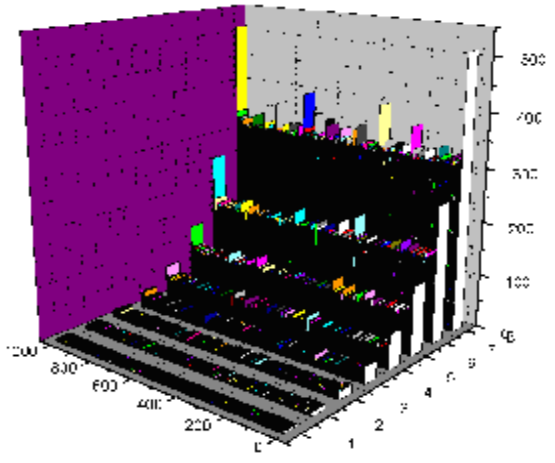


Рис. 7. Динаміка групування кількості “дробових поділок” в межах 1-1024 класичної шкали

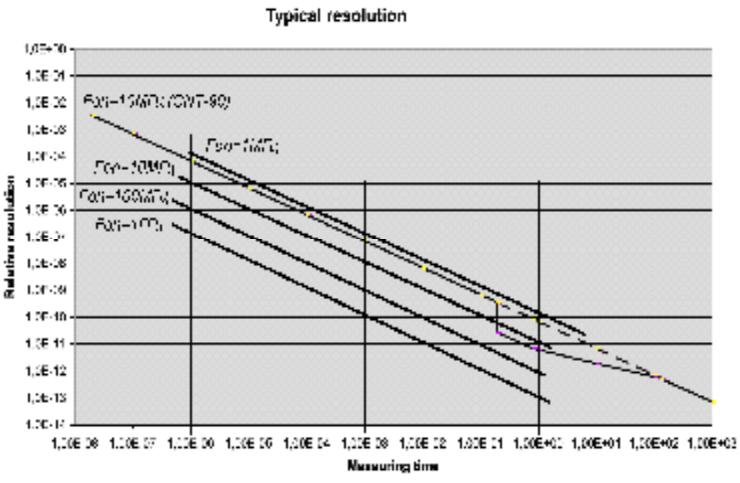


Рис. 8. Порівняння характеристик частотомірів коінциденції із «найкращим у світі» частотоміром CNT-90

Для завершення і підтвердження єдиного джерела досягнутих результатів збільшення роздільної здатності як для АЦП-ЦАП так і Фазочастотних параметрів в рамках КТВ приведемо приклади зростання виграшу шкали коінциденції у порівнянні із класичною (рис. 7), а також порівняння роздільної здатності частотміра коінциденції і CNT-90 (який є «найкращим у Світі») рис. 8.

Виграш методу коінциденції над іншими відомими цифровими методами можливо оцінити як [18]:

$$B = \frac{d_{fккласи}}{d_{fккоін}} = \frac{\sqrt[3]{f_{on}T_{вим}}}{\left(\frac{2}{T_{вим}f_{on}}\right)^2} = \frac{3}{4}\cdot f_{on}T_c = \frac{3}{4}\cdot N_{on} = 3\cdot 2^{n_{on}-2}. \quad (9)$$

Вказаний аналітичний вираз оцінки виграшу у комплексному параметрі (точність вимірювання х швидкість вимірювання) показує таку ж функціональну залежність, яку ми спостерігали досліджуючи кількість поділок на шкалі вимірювання частотоміра коінциденції залежно від розрядності (значень) представлення результатів у лічильниках чисельника та знаменника

Дійсно, експериментальна робота, що підтверджує теорію, не викликає бажання в інших експериментаторів перевірити її результати ще раз. Її місце в оглядових статтях. Експериментатори згадають про неї тільки в тому рідкому випадку, якщо в теорії, що перевірялася, буде знайдений який-небудь дефект, якщо вона виявиться неповною чи помилковою.

Зовсім інша ситуація з публікацією, що спростовує теорію. Вона відразу ж одержує опозицію в особі авторів і прихильників теорії. Усі її дані і висновки безсумнівно будуть ретельно проаналізовані з метою виявлення можливої помилки. Більш того, така робота обов'язково буде пере перевірена незалежними дослідниками.

Як видно, публікація роботи, що спростовує теорію вимагає, узагалі говорячи, більш ретельних досліджень, більш високої кваліфікації дослідника і визначеної відваги, нарешті.

Висновки

Детальним розглядом принципових аспектів Квантової теорії вимірювань і особливо теорії вимірювальних шкал отримано беззаперечне підтвердження, що саме концепція фазочастотного підходу та отримання на її засадах дробово-раціональної шкали вимірювань є дійсно найвищим ступенем ієрархії як фазочастотних вимірювань, так і вимірювань амплітуди та інших параметрів взагалі.

Становлення і розвиток нового фазочастотного підходу для вимірювання частоти і Квантової теорії вимірювань потребує перегляду існуючого стану визначень в галузі метрологічних параметрів групи Ч, а також розроблення нових нормативних матеріалів, які б відображали сучасний рівень знань.

Співвідношення принципів та методології нової теорії та результатів її значимості для розвитку вимірювальної техніки, можна співставити як співвідношення геоцентричної та геліоцентричної систем, де очевидним є що всі можливості представлення та вимірювання параметрів реальної картини світу які є у першої можуть бути отримані також із другої, а навпаки ні.

Встановлено що при використанні методу коінциденції кількість квантованих значень шкали ЦАП-АЦП значно більша ніж прийнято використовувати у класичних двійкових перетворювачах.

Із збільшенням розрядності Атенюатора-подільника Троцишина роздільна здатність збільшується у степеневій залежності в порівнянні із подільником Кельвіна із однаковими кількостями резисторів. Виграш роздільної здатності АПТ при 1024 резисторах перевищує 300 разів, а шкала перетворення є досить лінійною

Література

1. Троцишин І. В. Вимірювання частоти електричних та радіосигналів: – ілюзії та реальність (чому та звідки беруться "парадокси" і шляхи їх усунення) / І. В. Троцишин // Матеріали V-ї міжнароадної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка" (Метрологія-2006). – Харків, 2006. – С. 35– 240.

2. Харкевич А. А. Спектри и анализ / А. А. Харкевич; [4-е изд.]. – М.: ГИ ФМЛ, 1962. – 236 с.

3. Финк Л. М. Сигналы, помехи, ошибки / Л. М. Финк; [2-е изд., пере раб. и доп.]. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

4. Орнатський П. П. Втуп до метрології науки про вимірювання / Орнатський П. П. – К.: Вища школа. 1994. – 149 с.

5. Кестер У. Аналого-цифровое преобразование / У. Кестер. – М: Техносфера, 2007. – 1019 с.

6. 6.Пивовар О. С. Цифрові фазочастотні вимірювачі девіації частоти із підвищеною швидкодією та точністю: автореф. дир.... канд. техн. наук / ВДТУ. – Вінниця, 2001. – 16 с.

7. Любчик В. Р. Вимірювання частотних характеристик радіосигналами з прямокутною обвідною спектру: автореф. дис.... канд. техн. наук / ВДТУ. – Вінниця, 2001. – 16 с.

8. Петрушак В. С. Розробка фазочастотного методу та засобу для підвищення точності ротаційного віскозиметра: автореф. дис.... канд. техн. наук / КНУТД. – Київ, 2003. – 16 с.

9. Войтюк О. П. Розробка та дослідження перетворення частоти у код методом послідовного наближення: автореф. дис.... канд. техн. наук / НУ "Львівська політехніка". – Львів, 2004. – 16 с.

10. Горященко К.Л. Контроль відстаней до пошкоджень в низькочастотній лінії зв'язку, імпульсним та фазовим методами, що використовуються почергово: автореф. дис.... канд. техн. наук / КНУТД. – Київ, 2005. – 16 с.

11. Полікаровських О. І. Швидкодіючі синтезатори секвентності на основі фазочастотних пертворювачів: автореф. дис.... канд. техн. наук / ВДТУ. – Вінниця, 2006. – 16 с.

12. Романюк В. В. Обчислювальний метод побудови базисів ортогональних функцій для системи багатоканального зв'язку з кодовим розділенням каналів: автореф. дис.... канд. техн. наук / ТДТУ ім. Полюя. – Тернопіль, 2006. – 16 с.

13. Троцишин І. В. Вимірювання та перетворення фазочастотних параметрів радіосигналів / І. В. Троцишин. – Хмельницький, ПП Ковальський В.В. – 2002. – 382 с.

14. Троцишин І. В. Теорія фазочастотних вимірювань та перетворень параметрів радіосигналів у процесі дослідження ієрархії ранжирування методів вимірювання частоти / І. В. Троцишин, Л. В. Троцишина // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький. – 2008. – № 3. – Технічні науки. – С. 153– 158.

15. Троцишин І. В. Частота, кут фазового зсуву, повний фазовий зсув: ілюзії та реальність / І. В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 2. – С. 193– 198.

16. Троцишина Л. В. Вимірювання частоти за методом коінциденції / Л. В. Троцишина, О. П. Войтюк, І. В. Троцишин // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – № 2. С. 198– 203.

17. Троцишина Л. В. Фазочастотный подход к измерению частоты радиосигналов и частомер совпадений // "Молодь та сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій" "РТ-2006". Матеріали міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і вчених. – Севастополь, С. 93– 97.

18. Троцишин І. В. Вимірювання частоти за методом коінциденції та особливості утворення шкали вимірювального перетворення / І. В. Троцишин І. В., О. П. Войтюк., Л. В. Троцишина // Вісник Хмельницького національного університету. – 2009. – № 3. – Технічні науки. – С. 240– 244.

Надійшла 10.3.2011 р.

УДК 681.518.2

О.М. ВОЗНЯК, О.В. ВОЙЦЕХОВСЬКА
Вінницький національний технічний університет

АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ОБМОТОК

В статті показано, що параметри електричних обмоток (добротність, активний опір, індуктивність) можуть бути визначені при вимірюванні кута фазового зсуву між двома напругами на виході вимірювального перетворювача, а також відношення амплітуд цих напруг. Проаналізовано залежність складових похибки вимірювання параметрів електричних обмоток від параметрів вимірювального перетворювача. Розроблено структурну схему вимірювача параметрів електричних обмоток.

In the article it is shown that parameters of electric windings (Q-factor, resistance, inductance) can be defined by phase shift angle measuring between two voltages in a measuring device's terminal, as well as by measuring of a ratio of these voltages amplitudes. A dependence of electric windings parameters metering error components on measuring converter's parameters is analyzed. A circuit of electric windings parameters meter is developed.

Ключові слова: параметри обмоток електричних машин, добротність, індуктивність, вимірювання кута фазового зсуву.

Вступ

Випробування електричних обмоток є складним технологічним процесом, що містить операції контролю різних параметрів виробу. Найбільш суттєвою складовою якості електричної обмотки є відсутність короткозамкнених витків. В зв'язку з цим виникає задача визначення кількості короткозамкнених витків електричних обмоток в процесі їх виготовлення.

В наш час відомі декілька способів визначення інформативного параметра: за величиною активного опору; за величиною індуктивності й т.п. Але кожен з цих способів має невелику чутливість до кількості короткозамкнених витків, а для його реалізації необхідно значні часові витрати. Оскільки ці способи реалізуються на базі мостових схем, то процес вимірювання автоматизувати дуже складно.

Постановка задачі дослідження

Всі відомі методи та засоби вимірювання параметрів електричних обмоток можна поділити на дві групи: параметричні та генераторні. До параметричних слід віднести вимірювання опору, діелектричних втрат, ємності, коефіцієнта абсорбції та добротності обмотки, а до генераторних методів – вимірювання перехідних процесів, метод саморозряду, вимірювання поля розсіювання, спектроімпульсний метод, метод акустичної емісії та метод вимірювання часткових розрядів.