

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра інформаційно-вимірювальної техніки
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ В.С. Єременко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка _____
(код і назва спеціальності)

на тему: Система калібрування генератора частоти _____

Виконав: студент 2 -го курсу, групи _____ ВВ-81мп
(шифр групи)

Шейнич Сергій Ігорович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доцент кафедри інформаційно-вимірювальної техніки
кандидат технічних наук, доцент Шведова Вікторія Вікторівна _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

ВСТУП

Калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) є важливою процедурою метрологічного нагляду за ЗВТ, що використовуються в калібрувальних лабораторіях, дослідних випробувальних лабораторіях та лабораторія підприємств – виробників продукції. Відповідно до закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-VII від 5 червня 2014 «калібруванню в добровільному порядку можуть підлягати засоби вимірювальної техніки, які застосовуються у сфері та/або поза сферою законодавчо регульованої метрології» [1]. В той же час калібрування є ключовим етапом забезпечення метрологічної простежуваності, що є властивістю результату вимірювань, яка полягає в тому, що цей результат може бути пов'язаний з еталоном через задокументований нерозривний ланцюг калібрувань, кожне з яких робить свій внесок у невизначеність вимірювання [1-2].

Таким чином калібрування з одного боку забезпечує споживчі потреби власників засобу вимірювальної техніки мати якісний ЗВТ, з визначеними компетентним органом метрологічними характеристиками, з іншого боку виконує важливу метрологічну задачу – забезпечення метрологічної простежуваності.

Сучасний розвиток метрологічної діяльності спрямований на вирішення задач в декількох аспектах:

1. вдосконалення технічних аспектів реалізації калібрування, зокрема, із залученням сучасних інформаційних технологій комунікації, ідентифікації та передачі даних;
2. вдосконалення традиційних підходів до опрацювання результатів калібрування з метою підвищення їх якості, зокрема, точності та інформативності;

3. адаптація результатів калібрування з метою можливості подання результату калібрування у термінах невизначеності (там де це є доцільним).

Перша задача може бути реалізована шляхом застосування підходів, розроблених в сфері так званої інтернет-метрології, що є особливо ефективним при роботі, зокрема, з генераторами частоти через зручність передачі частотного сигналу на відстань.

Друга і третя задачі є взаємопов'язаними і передбачають залучення статистичної обробки даних – результатів вимірювання та їх пристосування та адаптація до теоретичних засад невизначеності результатів вимірювання.

Таким чином створення системи калібрування генератора частоти передбачає вирішення цих трьох задач.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КАЛІБРУВАННЯ. INTERNET-ENABLED СИСТЕМИ КАЛІБРУВАННЯ

Діючі в Україні нормативно-технічні та нормативно-правові документи дають такі визначення калібрування:

ДСТУ 2681-94. Метрологія. Терміни та визначення:

калібрування засобу вимірювальної техніки (засобу вимірювань)]
(calibration) - сукупність операцій, що виконуються з метою визначення метрологічних характеристик та придатності засобу вимірювальної техніки до застосування в певних умовах.

Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314
від 5 червня 2014 р.

Калібрування - сукупність операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу.

За [1] калібрування засобів вимірювальної техніки та оформлення його результатів проводяться відповідно до національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології.

1.1 Технічні рішення при побудові традиційних систем калібрування

При традиційному підході калібрування засобів виміральної техніки, як правило, проходить на стороні метрологічної організації, що проводить калібрування за українським законодавством калібрування засобів виміральної техніки проводиться [1]:

- науковими метрологічними центрами;
- метрологічними центрами, калібрувальними лабораторіями, акредитованими національним органом України з акредитації;
- метрологічними центрами, калібрувальними лабораторіями, які мають документально підтверджену простежуваність своїх еталонів до національних еталонів, еталонів інших держав або міжнародних еталонів відповідних одиниць вимірювання.

В окремих випадках калібрування може проводитись на стороні клієнта (підприємства, організації – власника ЗВТ).

В кожному з цих випадків в одному локальному просторі (калібрувальна лабораторія або лабораторія підприємства) мають бути розташовані:

- засіб виміральної техніки, що калібрується;
- еталонне обладнання;
- допоміжне обладнання;
- персонал калібрувальної лабораторії, який повністю проводить процедуру калібрування (включаючи з'єднання обладнання в систему), опрацювання результатів та інший метрологічний супровід та відповідає за всю процедуру калібрування.

Схема проведення калібрування в традиційному варіанті наведена на рисунку 1.1



Рисунок 1.1. Традиційна схема калібрування засобів вимірювальної техніки.

В той же час на сучасному етапі розвитку метрологічного забезпечення до недоліків традиційних систем відносять:

- надлишкові витрати часу при транспортування засобу вимірювальної техніки до калібрувальної лабораторії;
- зупинка технологічного або іншого виробничого процесу на певний термін під час проведення калібрування засобів вимірювальної техніки (якщо це обладнання використовується в цьому процесі);
- витрата коштів на транспортування;

- надлишкові витрати на оплату праці кваліфікованого персоналу калібрувальної лабораторії під час відвідування лабораторії підприємства;
- надлишкова присутність людського фактору під час проведення процедури, яка має бути виключно об'єктивною та неупередженою.

Перелік недоліків може бути скорегований або доповнений з огляду на особливості тієї чи іншої галузі вимірювань.

В сучасному світі ці недоліки в тій чи іншій мірі усуваються шляхом:

- на першому етапі – автоматизації процедури калібрування навіть при використанні традиційного підходу, що забезпечує об'єктивність, неупередженість та спрощення самого процесу калібрування та опрацювання результатів калібрування;
- на другому – побудову систем так званого інтернет-калібрування, які дозволяють економити ресурси: фінансові, часові, людські.

При розгляді питання калібрування генератора частоту застосування сучасних технологій комунікації є найбільш актуальним, оскільки специфіка частотного сигналу полягає в тому, що він може бути переданий на відстані (як аналоговий сигнал), а також легко кодується без залучення додаткових перетворень, що зазвичай вносять небажані складові до сумарної невизначеності результату калібрування, та передається дротовими та бездротовими шляхами.

1.2 Технічні рішення при побудові систем інтернет-калібрування

Розвиток інформаційних технологій і їх впровадження в різні галузі науки, промисловості і економіки формує нові можливості для удосконалення та розвитку цих галузей. Це стосується і метрології, як науки і сфери діяльності, де впровадження інформаційних технологій відкриває нові напрямки розвитку і сприяє удосконаленню традиційних.

В сучасному світі набуває поширення напрям в інженерії, який охоплює питання використання Інтернету для забезпечення доступу до всього переліку метрологічних сервісів (служб) – це *інтернет-сумісна метрологія* (Internet-enabled metrology).

Основними напрямками, що охоплює інтернет - метрологія є [4]:

- інтернет-сумісне калібрування, при якому калібрувальна лабораторія проводить віддалений контроль за процесом калібрування в лабораторії клієнта;
- віддалений моніторинг обладнання;
- реалізація доступу до бібліотек, контролюючих сервісів, історій калібрування, вимірювальних даних, імітуючого програмного забезпечення (симуляторів) з використанням Web.

Впровадження віддаленого калібрування з використанням інтернет як середовища для передачі інформації крім цього дозволяє вирішити ряд питань, пов'язаних з транспортуванням, нестачею обладнання, простоями в роботі та економічними затратами.

1.2.1 Застосування систем інтернет-калібрування в світі

Інтернет-калібрування калібрування ЗВТ знаходить своє розповсюдження завдяки малим термінам реалізації таких послуг, зменшення їх вартості, можливості всесвітнього застосування та прийнятної точності. Ця організаційна система вже легалізована в деяких країнах, і уряди цих країн виділяють великі бюджетні кошти на розвиток таких проектів, які

реалізуються в Японії, Великобританії, США, Нідерландах тощо, а також у рамках проектів Азійсько-Тихоокеанської метрологічної програми [5].

Зазначені проекти спрямовані на потреби споживачів метрологічних послуг (організацій, закладів і підприємств) у застосуванні, зокрема, дистанційних калібрувальних систем, впровадженні сучасних інформаційних та інших технологій, таких, як Глобальна позиційна система (GPS), оптичні системи комунікацій, Інтернет [5].

Напрямки розвитку систем інтернет метрології, які в літературі скорочено називають ще i-met системами, інститути/організації і країни, які займаються дослідженнями в області i-met систем частоти та часу та вже реалізовані проекти систематизовані в таблиці 2.1.

Таблиця 1.1

Напрями розвитку систем i-met	Інститути/організації та країни, що проводять роботи та дослідження в області i-met	Реалізовані системи і сервіси i-met
Частота та час	Національний інститут метрології (NMIJ), Японія	Розвиток UTC в напрямку розробки системи i-cal з використанням GPS
	Національний інститут еталонів та технологій (NIST), США	TMAS – Time Measurement and Analysis Service
	Національний метрологічний центр (NMC), Сінгапур	Система i-cal з використанням GPS

В Україні також проводяться дослідження можливостей інтернет-калібрування [6-7], хоча такий підхід на сьогодні законодавчо не врегульований.

1.2.2 Типи систем інтернет-калібрування

Виходячи з аспектів практичного розвитку систем інтернет метрології в світі вони були систематизовані [4] – рис. 1.2.

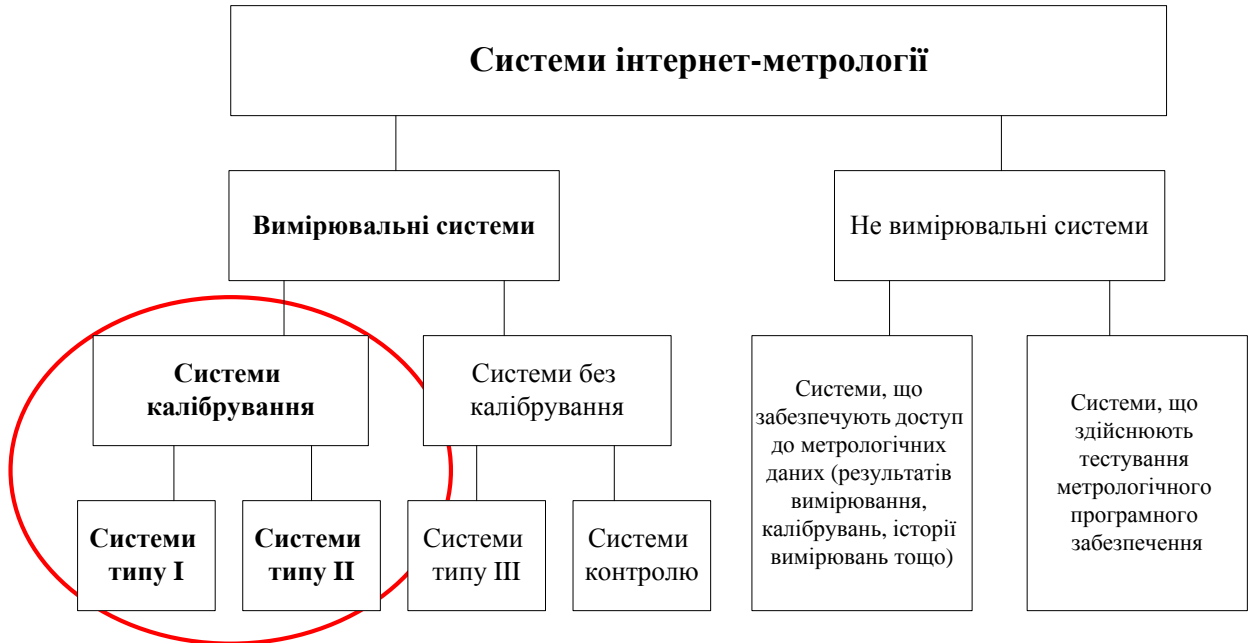


Рисунок 1.2. – Типи i-met систем.

По-перше виділяють вимірювальні системи та системи, що не використовуються в процесі вимірювань.

В контексті питання калібрування нас цікавлять вимірювальні системи, що використовуються під час калібрування. Одже це ситсими типу I та типу II.

Різниця між цими системами обумовлена різницею способу передачі еталона.

Системи калібрування типу I передбачають передачу стабільного еталону або набору еталонів. Калібрування за допомогою систем типу I керується національним метрологічним інститутом (НМІ) і включає в себе такі аспекти калібрування:

- НМІ передає (первинний еталон), знання та досвід калібрування у віддалену лабораторію користувача;

- Організація-користувач (віддалена лабораторія), повинен мати власний (або орендований в НМІ) еталон, який підлягає періодичній калібровці в НМІ;
- Онлайн калібрування на стороні клієнта здійснюється, як правило НМІ, за допомогою веб-сторінки з доступом до віддаленої лабораторії;
- Результати повірки (калібрування) зберігаються в базі даних НМІ, на їх основі формується сертифікат калібрування;
- Невизначеність вимірювання розраховується на стороні НМІ (програмним забезпеченням НМІ), зокрема це може бути здійснено в реальному часі;
- Стабільність роботи системи оцінюється за допомогою програмного забезпечення НМІ;
- Наявна можливість перевірки процедури вимірювань, повторного проведення вимірювань або ігнорування некоректних результатів;
- Наявна можливість призупинки проведення вимірювань та відновлення їх в інший час;
- Для вирішення конфліктних ситуацій та інших аспектів процесу калібрування може бути використана веб-камера (інформація з відеокамер доступна не лише для персоналу НМІ, а і може бути включена в журнал аудиту).

Системи калібрування типу II схожі на системи калібрування типу I, але мають ряд відмінностей:

- Стабільний мобільний еталон відправляється від НМІ у віддалену лабораторію користувача (тобто в процесі калібрування використовується еталон НМІ, а не лабораторії-клієнта);
- Перед відправкою на сторону клієнта НМІ здійснює калібрування власного обладнання, що підлягає відправці, в результаті чого встановлює його метрологічні характеристики;

- Повірочне (калібрувальне) обладнання може доставлятися разом з портативним персональним комп'ютером (ПК), що належить НМІ, який містить відповідне програмне забезпечення для керування повіркою (калібруванням) засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), а також для встановлення зв'язку з НМІ. Це дозволяє уникнути необхідності встановлення програмного забезпечення на комп'ютер користувача та уникнути ризику зловживань;
- Після закінчення дистанційного калібрування дані вимірювання відправляються через Інтернет до НМІ для аналізу, а потім попередні результати в режимі реального часу будуть надані користувачу;
- Калібрувальне обладнання відправляється назад до НМІ, де встановлюється відсутність пошкоджень та здійснюється перевірка відхилень в проведенні вимірювань (оцінюються метрологічні характеристики), і лише тоді здійснюється оцінювання похибки /невизначеності за результатами калібрування та видається сертифікат про проходження калібрування.

Крім того існує багато прикладних метрологічних інтернет-технологій, які не контролюють процес повірки (калібровки), але здійснюють обробку даних вимірювань. Зазвичай данні зберігаються та обробляються на центральному сервері НМІ. Система надання послуг обробки результатів вимірювань за результатами калібрування, за умов, коли центральний комп'ютер не виконує саму калібровку або повірку відносять до систем типу ІІІ. Такий тип і-met систем використовують, зокрема під час акредитації. Також часом обробка даних вимірювань використовується для корекції даних, при чому залучаються програмні засоби, або ж для обробки даних потрібно використати додаткову інформацію, що є доступною лише НМІ (дослідні дані). Після відповідної обробки результати відправляють на сторону клієнта.

Таким чином рисунок 1.1, що ілюструє схему традиційного калібрування перетворюється на на рисунок 1.3 а) та б), що ілюструють схеми інтернет-калібрування за типом І та типом ІІ.

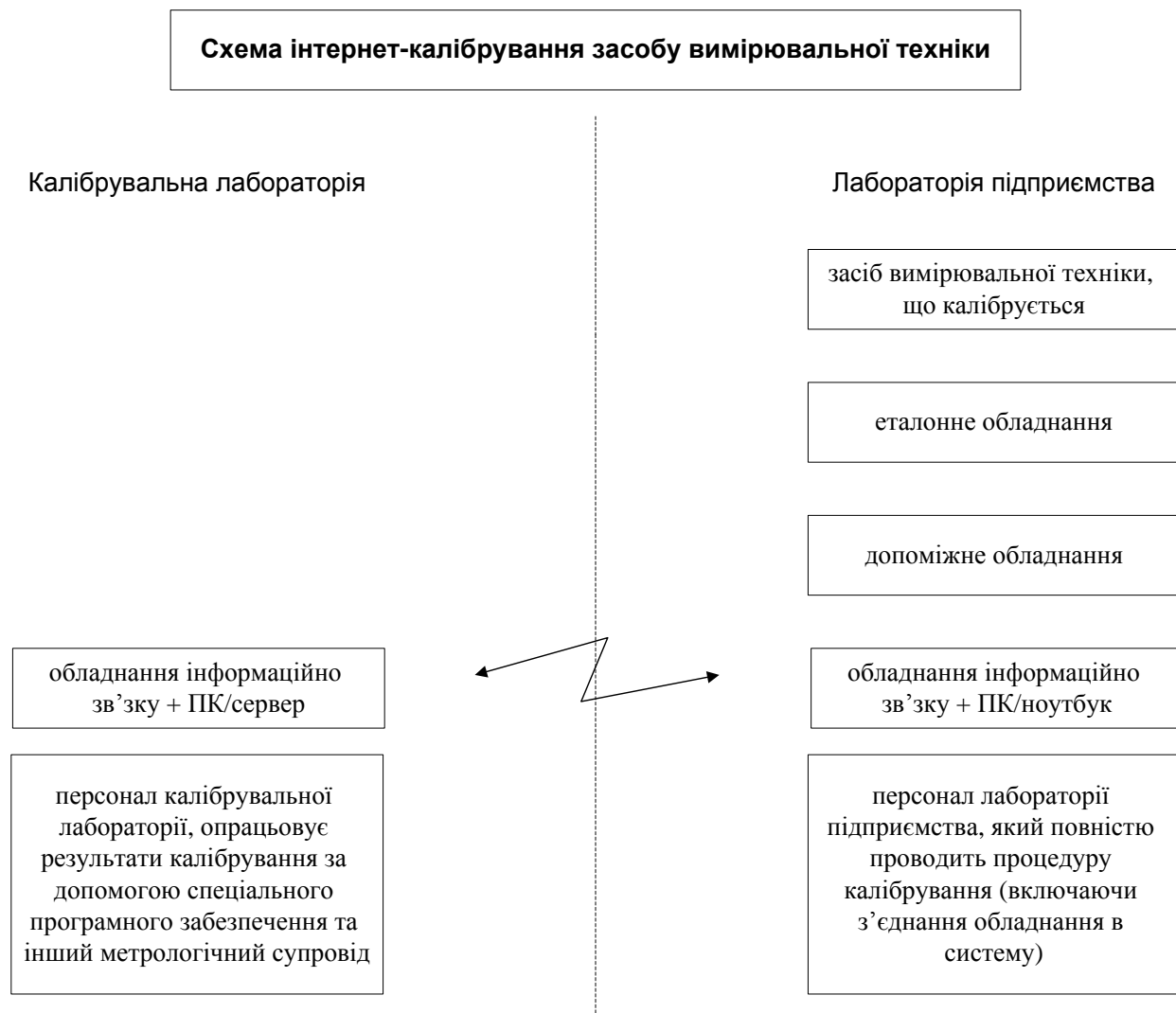


Рисунок 1.3 а) Схеми інтернет-калібрування за типом І та типом ІІ (еталонне обладнання розташоване на стороні клієнта).

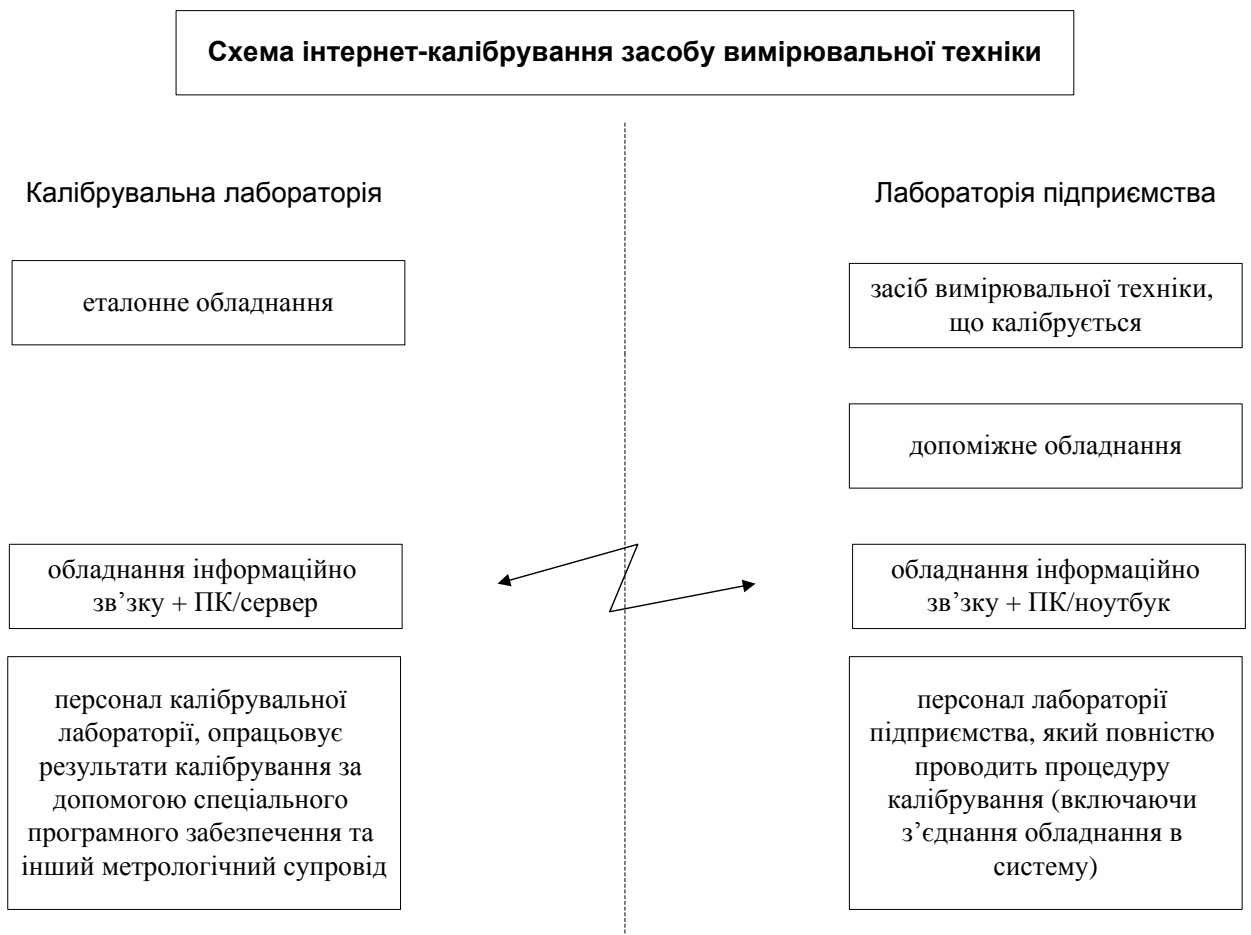


Рисунок 1.3 б) Схеми інтернет-калібрування за типом I та типом II (еталонне обладнання розташоване на стороні калібрувальної лабораторії).

Таким чином забезпечується наступні переваги системи інтернет-метрології [4,8]:

1. Переваги доступності даних вимірювання та прозорості їх отримання.
 - Результати вимірювання можуть зберігатися в базі даних постачальника послуг (наприклад, в калібрувальних лабораторіях), що забезпечує можливість їх отримання в будь – який час (для калібрування, під час аудиту тощо).
 - Спрощення вирішення конфліктних ситуацій за наявності історії калібрування і контрольних журналів.

- Данні можуть оброблятись загальноприйнятими та загальнодоступними способами або спеціалізованими способами, а також передаватись у потрібному форматі.
- Використання оперативного візуального моніторингу вимірювальних процесів сприяє пошуку несправностей у ході діагностування.
- Виробникам обладнання може бути надано частковий доступ до історії вимірювань, що дозволить аналізувати данні для планування профілактичних робіт, а також, метрологічним центрам, встановлювати міжкалібрувальні інтервали.

2. Забезпечення єдності вимірювання.

- Можливість надання сервісу в обраний метрологічним центром та користувачем час.
- Метрологічна діяльність може проводитись в лабораторії користувача, що дозволяє відтворити умови експлуатації обладнання.
- Не виникає потреби в демонтажі та транспортуванні засобів вимірювальної техніки.
- Можливість зменшення вартості метрологічних послуг.
- Можливість швидкого прийняття рішення та отримання консультацій спеціаліста через мережу Інтернет.
- Інтернет – метрологія надає можливість зв'язку засобу вимірювальної техніки (ЗВТ) з еталонним ЗВТ, що дозволяє зменшити ланцюг простежуваності та підвищити точність калібрування.

Потрібно зазначити, що не всі вимірювальні процеси можуть бути адаптовані до віддаленого використання Інтернет. Потрібно виконання декількох основних вимог перш ніж систему можна буде вважати такою, для якої можлива реалізація i-met сервісів. Перш за все – це можливість підключення ЗВТ до ПК, а також можливість керувати ними за допомогою ПК чи безпосередньо через Інтернет. Іншою ключовою вимогою є створення високостабільних мобільних еталонів, які передаються між НМІ та віддаленою лабораторією або розробка способів передачі еталонного сигналу, що відтворює розмір вимірюваної величини від НМІ на сторону користувача i-met послуг. Крім того веб-сторінки та сервери НМІ повинні бути розраховані на прийом великих обсягів вимірювальних даних від розподілених джерел.

У випадку розробки системи калібрування генератора частоти:

Наявна	Відсутня
<ul style="list-style-type: none"> • Можливість передачі сигналу на вістань; • Можливості підключення сучасних генераторів частоти до ПК; 	<ul style="list-style-type: none"> • Необхідність складних фізичних перетворень частотного сигналу

1.3 Технічні аспекти побудови системи інтернет-калібрування генератора частоти

1.3.1 Наявна еталонна база в області вимірювання частоти в Україні

Інформація про державні первинні еталони, які набули статус національних еталонів, відповідно до пункту 3 розділу X «Прикінцеві та перехідні положення» Закону України «Про метрологію та метрологічну

діяльність» [9] наведена на сайті Міністерства економічного розвитку та торгівлі України.

В ньому зазначено:

- Реєстраційний номер еталона
- Найменування еталона
- Організація – зберігач еталона
- Рішення про затвердження еталона
- Метрологічні характеристики еталона

для кожного визнаного в Україні еталону, що бере участь в ланцюгу метрологічної простежуваності.

Для еталону часу та частоти зазначено – таблиця 1.2. інформація про первинний еталон часу та частоти.

Таблиця 1.2 Інформація про первинний еталон часу та частоти.

	Реєстраційний номер еталона	Реєстраційний номер еталона	Організація – зберігач еталона	Рішення про затвердження еталона	Метрологічні характеристики еталона
69	ДЕТУ 07-01-97	Державний первинний еталон одиниць часу та частоти	Національний науковий центр "Інститут метрології"	Наказ Держстандарту України від 18.04.97 № 220	Діапазон значень одиниці: від $1 \cdot 10^{-10}$ с до $1 \cdot 10^8$ с від 1,0 Гц до $7 \cdot 10^{10}$ Гц Відтворення одиниці: $u_A = 5 \cdot 10^{-14}$ $u_B = 5,77 \cdot 10^{-14}$ $u_C = 7,64 \cdot 10^{-14}$ $U = 1,5 \cdot 10^{-13}$

Також в Україні наявний вторинний еталон частоти. Детальна інформація зазначена у табл. 1.3 [12]

Таблиця 1.3 Інформація про первинний еталон часу та частоти.

	Реєстраційний номер еталона	Реєстраційний номер еталона	Організація – зберігач еталона	Рішення про затвердження еталона	Метрологічні характеристики еталона
6 9	ВЕТУ 07-01-03-10	Державний вторинний еталон одиниць часу та частоти	ГП «УКРМЕТРТЕСТ СТАНДАРТ»	Наказ Держстандарту України від 18.04.97 № 220	Діапазон значень одиниць: від $1 \cdot 10^{-9}$ с до $1 \cdot 10^8$ с від 1,0 Гц до $1 \cdot 10^8$ Гц Сумарна відносна похибка по частоті $S_{\sum} = 6.6 \cdot 10^{-14} \text{ Hz}$ $U = 24 \text{ ns}$

1.3.2 Технічні можливості передачі сигналу частоти на відстань

Реалізація технічної складової проектів з електронної простежуваності (e-trace) потребує високоточних мобільних еталонів передавання, дистанційно керованого калібрувального обладнання, створення спеціалізованого чи адаптації існуючого широкоживаного програмного забезпечення тощо.

Стандарти передавання одиниць фізичних величин в рамках реалізації програм електронної простежуваності калібрування засобів вимірювальної техніки поділяють на дві групи [4]:

- стандарти одиниць фізичних величин, які можна перетворити на частотні сигнали;
- безпосередньо компактні мобільні еталони одиниць фізичних величин.

До першої групи відносять стандарти одиниць фізичних величин, які можна перетворити на частотні сигнали, тобто в них частота розглядається як проміжна фізична величина, що може передаватися, наприклад, з використанням системи GPS. До фізичних величин, які дозволяють формувати проміжні частотні сигнали відносять: час, напругу, довжину,

безпосередньо частоту тощо. Найтипівішим прикладом застосування електронної простежуваності калібрування є дистанційне калібрування стандартів часу і частоти замовника та атомного стандарту частоти калібрувальної лабораторії за допомогою системи GPS та Інтернет.

При побудові системи калібрування генератора частоти цікавість представляє саме перша група, тим більше, що в нашому випадку немає необхідності перетворення на частотний сигнал. Тому має бути вирішено питання про його передачу.

До технологій синхронізації та передачі часу та частоти відносять:

- Синхронізація часу за допомогою телефонних каналів;
- Інтернет протоколи для передачі сигналу синхронізації часу;
- Синхронізація часу за допомогою радіозв'язку.

Синхронізація часу за допомогою телефонних каналів

Використання телефонних каналів для синхронізації часу полягає в наступному. Данні передають в ASCII-кодi. Як правило, дані, що передаються, містять модифіковану юліанську дату, поточну дату (число, позначення місяця, рік), поточний час (години, хвилини, секунди), ознаки літнього (зимового) часу, ознаки необхідності додавання (віднімання) корегуючої секунди в останній день поточного місяця, інша службова інформація. Останній символ строки, що передається – символ синхронізації. Момент переходу цього символу на віддалений комп'ютер є моментом настання тієї секунди, код якої міститься в попередній посилці. Затримка передачі кода часу або задається фіксовано, або багаторазово вимірюється в процесі обміну повідомленнями. Відбувається компенсація цієї затримки. Такий спосіб синхронізації довгий час використовується метрологічними службами ряду країн: NIST (США), NPL (Великобританія), PTB (Німеччина).

ASCII [13] (**МФА**: [ˈæski], **акронім** від назви *Американський стандартний код для інформаційного обміну*, **англ.** *American Standard Code for Information Interchange*) в **обчислювальній техніці** — система **кодів**, у якій числа від 0 до 127 включно поставлені у відповідність літерам, цифрам і символам пунктуації. Наприклад, 45 відповідає знаку переносу, а 65 — літері «А» великій. Перші 32 коди використовуються для керівних функцій, на зразок введення і стирання попереднього символу. Строго кажучи, ASCII — це семи-бітний код, а восьмий біт часто використовується для забезпечення відповідності чи додаткових символів. Система широко використовується для зберігання тексту і передачі інформації між **комп'ютерами**.

Інтернет протоколи для передачі сигналу синхронізації часу

А) Протокол Dytime

Dytime – Internet-протокол передачі часу. Відповідно Dytime (RFC-867) поточні дата і час подають рядком символів ASCII. Для передачі використовують протоколи транспортного рівня такі як TCP та UDP. Жорсткого обмеження на формат рядка, що передається не встановлюється. Рекомендований формат наступний: день тижня, місяць, число, поточний час, позначення часового пояса.

User	Datagram	Protocol, UDP [14](укр. <i>Протокол дейтаграм користувача</i>) — один із протоколів в стеку TCP/IP . Від протоколу TCP він відрізняється тим, що працює без встановлення з'єднання. UDP — це один з найпростіших протоколів транспортного рівня моделі OSI , котрий виконує обмін дейтаграмами без підтвердження та гарантії доставки. При використанні протоколу UDP обробка помилок і повторна передача даних має виконуватися протоколом вищого рівня. Але, незважаючи на всі недоліки, протокол UDP є ефективним для серверів , що надсилають невеликі
-------------	-----------------	---

відповіді великій кількості клієнтів.

Б) Протокол Time

Time – Internet-протокол передачі часу. Відповідно протоколу Time (RFC-868) поточні дата і час подають у вигляді 32-розрядного цілого числа, яке визначає кількість секунд, що пройшли з моменту півночі 1 січня 1900 року. Так само як і Dyttime, даний протокол передбачає передачу даних з використанням протоколів транспортного рівня TCP та UDP. Сервер Time очікує підключення до порта 37. Після встановлення з'єднання сервер посилає 32-розрядний двійковий код поточної дати і часу, та закриває з'єднання. Аналогічно, при прийомі UDP – дейтаграми сервер посилає дейтаграму у відповідь, які містить вказані віще дані.

Дейтаграма [15]([англ. datagram](#)), також **дата грама** – блок інформації, що передається протоколом без попередньо встановленого з'єднання і створення віртуального каналу. Будь-який протокол, який не встановлює попереднє з'єднання (а також зазвичай, такий, що не контролює порядок прийома-передачі та дублювання пакетів), називається дейтаграмою. Такими є, наприклад, протоколи [Ethernet](#), [IP](#), [UDP](#) тощо. Термін «дейтаграма» було обрано за аналогією зі словом «телеграмма»

В) Протокол передачі міток часу ICMP

Протокол ICMP (RFC-792) призначено для передачі службових сповіщень при різних контрольних та тестових операціях в мережі. Серед повідомлень, передбачених форматом протоколу, є повідомлення, що містять мітки часу (Timestamp Message Timestamp та Reply Message). Обмін цими повідомленнями необхідний, наприклад, для аналізу проходження трафіка в мережі.

ICMP [16]([англ. Internet Control Message Protocol](#) — міжмережевий протокол керуючих повідомлень) — [мережевий протокол](#), що входить в [стек протоколів TCP/IP](#). В основному ICMP використовується для передачі

повідомлень про помилки й інші виняткові ситуації, що виникли при передачі даних. Також на ICMP покладають деякі сервісні функції, зокрема на основі цього протоколу заснована дія таких загальновідомих утиліт як [ping](#) та [traceroute](#).

Г) Протокол NTP

Протокол NTP (RFC-1305) передбачає передачу UDP-повідомлень, що містять 64-бітні часові мітки, що забезпечують точність подання порядку 200 пікосекунд. Спеціальні алгоритми корегування похибок, пов'язаних із затримками передачі мережею та відключенням частоти кварцового генератора комп'ютера від номінального значення, а також алгоритми вибору сервера часу з найкращими параметрами, забезпечує найвищу точність передавання одиниці часу в порівнянні з описаними вище протоколами.

Протокол SNTP є спрощеним протоколом NTP і використовується у тих випадках, коли достатньо секундної точності синхронізації. Формат часових міток цього протоколу збігається з форматом часових міток NTP.

NTP [17] - мережевий протокол часу ([англ.](#) *Network Time Protocol*) — [мережевий протокол синхронізації](#) внутрішнього [годинника комп'ютера](#) з використанням мереж зі змінною [латентністю](#), заснований на [комутації пакетів](#).

SNTP ([англ.](#) *Simple Network Time Protocol*) — протокол синхронізації часу за комп'ютерною мережею. Є спрощеною реалізацією протоколу [NTP](#). Використовується у вбудованих системах та пристроях, не вимагає високої точності, а також в програмах точного часу користувачів.

Синхронізація часу за допомогою радіозв'язку

Всесвітня адміністративна радіоконференція (Женева, 1979 року) розподілила службі стандартних частот і сигналу часу частоти

$20\text{кГц} \pm 0,05\text{кГц}$; $2,5\text{МГц} \pm 5\text{кГц}$ ($2,5\text{МГц} \pm 2\text{кГц}$); $5\text{МГц} \pm 5\text{кГц}$;
 $10\text{МГц} \pm 5\text{кГц}$; $15\text{МГц} \pm 10\text{кГц}$; $20\text{МГц} \pm 10\text{кГц}$ та $25\text{МГц} \pm 10\text{кГц}$ [5].
Додаткові стандартні частоти та сингали часу випромінюють і в інших діапазонах частот. Всі випромінювання стандартних частот та сигналів часу мають якомога точніше відповідати Всесвітньому координатному часу (UTC). Сигнал часу не повинен відхилятися від UTC більш ніж на 1 мс; стандарт частоти не має відхилятися більше ніж на одну частину від 10^{10} .

1.3.3 Етапи створення системи інтернет-калібрування генератора частоти

В роботі [4] виписані етапи створення вимірювальної системи, які будуть використані при побудові системи інтернет-калібрування генератора частоти.

При створенні вимірювальної інтернет-системи варто дотримуватись послідовності дій, наведеної на рисунку 1.4, що дозволить уникнути багатьох проблем на стадії впровадження та експлуатації такої системи [1]. Розроблена за цією послідовністю вимірювальна інтернет-система дозволяє проводити вимірювання за допомогою пристроїв, відкаліброваних за еталонними засобами з використанням віддаленого сайту лабораторії, що надає послугу (віддаленої лабораторії).

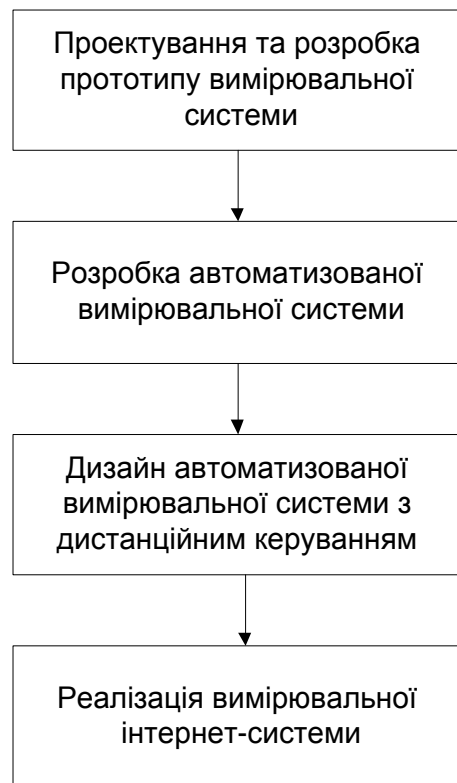


Рисунок 1.4. - Етапи створення метрологічної інтернет-системи.

Проектування та розробка прототипу вимірювальної системи

Система, яку розробляють, повинна бути побудована та протестована так, щоби гарантувати повне наукове обґрунтування. Робота над системою може проходити необмежену кількість ручної відладки та вимірювань.

Розробка автоматизованої вимірювальної системи

Під час розробки автоматизованої вимірювальної системи:

- Спочатку у вимірювальній системі варто замінити якомога більше вимірювальних приладів, які можуть працювати та зчитувати автоматично.
- Зменшити, на скільки це можливо, втручання та ручні налаштування, які необхідні вимірювальній системі, таким чином, щоб система змогла безперервно виконувати серію вимірювань.

- Об'єднати роботу системи таким чином, щоб вона керувалась з одного комп'ютера, підключеного до приладів.
- Персональний комп'ютер повинен приймати інформацію про конфігурації від оператора, давати вказівки оператору, а потім чекати підтвердження від оператора, перш ніж перейти до подальших вимірювань.
- Персональний комп'ютер повинен перевіряти узгодженість вимірювальної системи та конфігурацію, надану оператором і зробити звіт про правильність або порушення функціонування.
- Персональний комп'ютер повинен виконувати необхідну обробку результатів вимірювань, подавати резюме (наприклад, графіки) вимірювань та оброблених даних оператору для перевірки та зробити всі данні доступними для оператора (наприклад, записати у файл, додати у базу даних тощо).

Дизайн автоматизованої вимірювальної системи з дистанційним керуванням

На цьому етапі потрібно вирішити, які інструменти та вимірювальні стандарти (еталони) передбачено використовувати віддалено (на стороні клієнта), і, що має відсилатись на сторону клієнта. Для повірочних (калібрувальних) інтернет-систем необхідно буде пересилати хоча б один інструмент або вимірювальний артефакт (еталон): цей засіб буде відігравати роль еталона для виконання повірки/калібрування. Автоматизована вимірювальна система з дистанційним керуванням буде складатись з певних апаратних та програмних засобів, встановлених на стороні клієнта, разом з засобами, що надаються постачальником вимірювальної інтернет-системи та засобами, що передаються зі сторони метрологічної лабораторії/центру, яка надає послугу віддаленого калібрування/повірки. Обидва комплекти технічних засобів будуть підключені до віддаленої лабораторії клієнта для локального управління автоматизованою вимірювальною системою, а також

контролю зі сторони віддаленого комп'ютера, розміщеного на стороні постачальника послуги інтернет-калібрування.

Реалізація вимірювальної інтернет-системи

Функції комп'ютера, який працює в автоматизованій вимірювальній системі, повинні бути розділені між сервером та клієнтським комп'ютером. Такий поділ функцій повинен залежати від вимірювальних послуг. Як мінімум сервер повинен записувати те, що відбувається в процесі сеансу вимірювання та зберігати копію даних, які були передані віддаленому оператору. Сервер також повинен мати змогу забезпечити діагностику для експертів (спеціалістів віддаленої лабораторії, які контролюють процес віддаленого вимірювання/калібрування), так, щоб експерт мав можливість встановити несправності та інші проблеми, що виникають у оператора на віддаленому вузлі (в клієнтській лабораторії).

Крім того, більшість функціональних можливостей може знаходитись в межах сервера: клієнтське програмне забезпечення може бути у значній мірі спільним, тобто інструкції від сервера до віддаленого оператора передаються в вигляді веб-сторінок/форм, а команди для зняття показів з приладів відправляються з використанням стандартних протоколів опитування шини (наприклад GPIB та RS232). Дослідження показали, що всі інтерфейси з API (Application Programing Interface – програмний інтерфейс, який забезпечується системою в порядку підтримки запитів, що здійснює інше програмне забезпечення) можуть бути використані для побудови ви подібних вимірювальних інтернет-систем.

Висновки до розділу 1.

Проведений аналіз технічних рішень побудови систем калібрування та можливості їх використання для створення системи калібрування генератора частоти дозволив встановити наступне. При створенні системи калібрування генератора частоти обраний сучасний підхід, що базується на засадах інтернет-метрології, а саме буде реалізована система інтернет-калібрування за типом II, яка передбачає розташування еталонного обладнання на стороні калібрувальної лабораторії, а генератора частоти, що калібрують – на стороні клієнта. Сигнал еталонної частоти при цьому має передаватися через протокол NTP. Даний протокол забезпечує точний час синхронізації пристроїв та синхронізацію по частоті через декілька часових зон. В якості базового еталонного обладнання обрано еталон частоти Fluke 910R, точнісні характеристики якого наближені до вторинного еталону частоти, при цьому він має ширшу доступність та легший в експлуатації.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КАЛІБРУВАННЯ ГЕНЕРАТОРА

2.1 Загальна структура системи

Інтернет-метрологія – це сфера метрології, а точніше надання метрологічних послуг, яка набуває поширення в найбільш розвинених країнах світу. Найбільшого поширення системи інтернет-метрології набули в Японії, Великобританії, Нідерландах, Сполучених Штатах Америки. В цих країнах такий вид послуг є легалізований і реалізується на рівні з традиційними метрологічними сервісами.

Метою інтернет-метрології, є зокрема, спрощення процедури калібрування за рахунок проведення цієї процедури на стороні замовника, що дозволяє економити час та фінансові витрати клієнтів [4-5].

Одним з можливих варіантів проведення калібрування на стороні клієнтів є калібрування генераторів частоти. Оскільки частотний сигнал може бути переданий дистанційно: через радіосигнал, за допомогою кодування та передачі через інтернет або передавати по телефонним лініям зв'язку, то такий вид калібрування на відстані є таким що досить легко реалізується [10-11].

В роботі запропоновано схема калібрування генератора частоти з використанням віддаленого доступу до сигналу еталонної частоти, який передається від еталонного генератора, розміщеного на стороні калібрувальної лабораторії в лабораторію клієнта за допомогою мережі інтернет (рисунок 2.1).

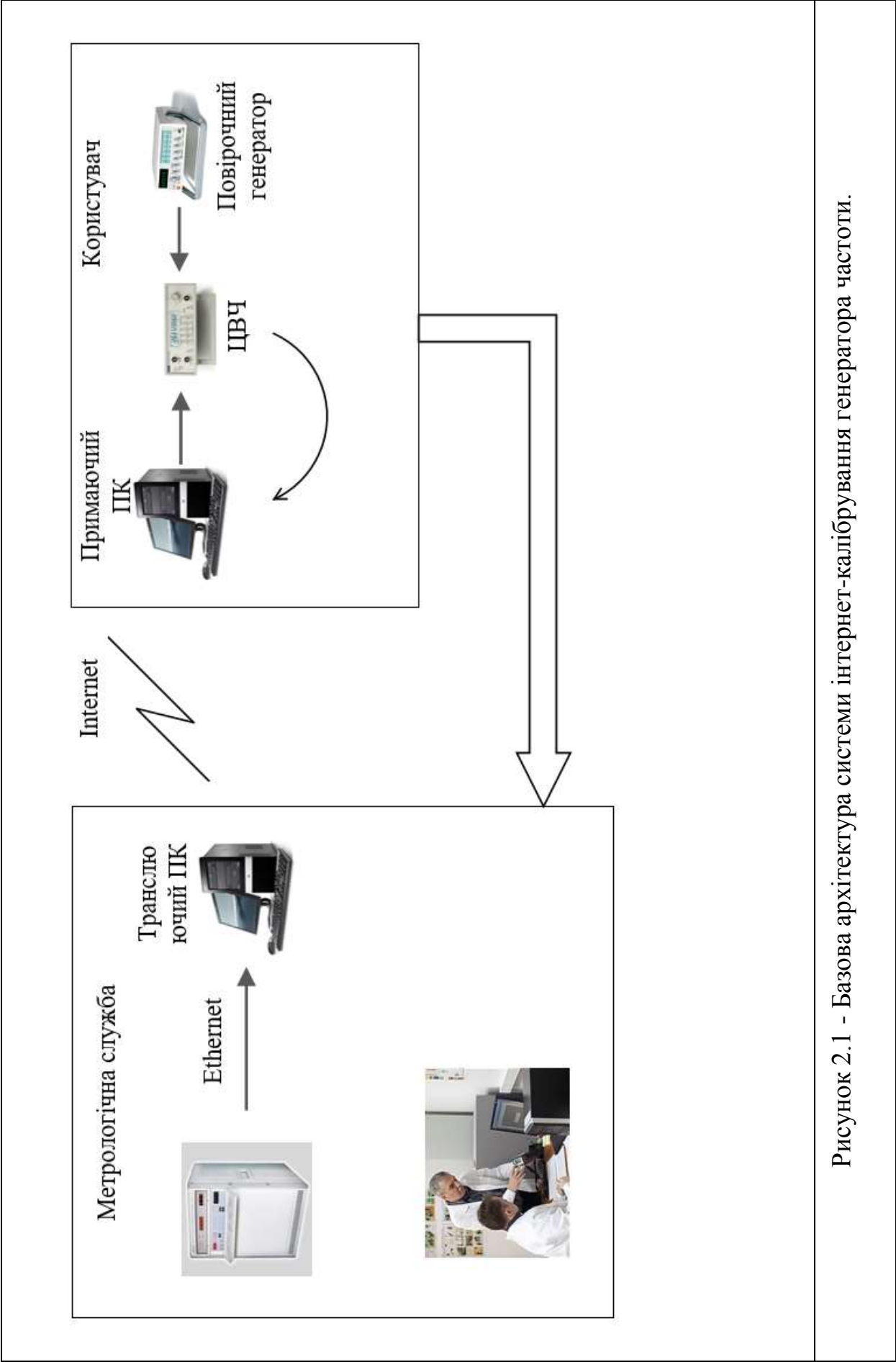


Рисунок 2.1 - Базова архітектура системи інтернет-калібрування генератора частоти.

Відповідно до запропонованої схеми маємо дві сторони: Калібрувальна лабораторія або метрологічний центр, який надає послугу калібрування та лабораторія клієнта (лабораторія підприємства), яка отримує послугу калібрування для свого генератора.

На стороні метрологічного центра розміщено:

- еталонний генератор частоти;
- трансляючий комп'ютер (сервер), в якому забезпечено можливість підключення еталонного генератора частоти (апаратні засоби та драйвер) та встановлено програмне забезпечення для опрацювання результатів калібрування;
- засоби доступу до інтернет;
- кваліфікований персонал.

На стороні клієнта розміщено:

- генератор частоти, що калібрується;
- цифровий вимірювач частоти;
- персональний комп'ютер;
- засоби доступу до інтернет;
- персонал, здатний виконати підключення елементів системи та виконувати інструкції персоналу калібрувальної лабораторії.

Робота системи відбувається наступним чином. Персонал лабораторії клієнта здійснює запит на послугу калібрування до калібрувальної лабораторії (метрологічного центру). Після узгодження сторін визначається час проведення калібрування на стороні клієнта. Для цього клієнт підключає обладнання в своїй лабораторії. Генератор частоти підключається до цифрового вимірювача частоти (при чому сигнал частоти попередньо перетворюється на цифровий код за допомогою багато розрядного АЦП, обраного таким чином, щоб похибка квантування була значно менше за похибку генератора, що калібрується).

В зазначений час з калібрувальної лабораторії передається сигнал від еталонного генератора частоти, попередньо оцифрований прецизійним АЦП за допомогою транслячого комп'ютера та ліній зв'язку інтернет.

На стороні клієнта цей сигнал приймається на передається на інший вхід цифрового частотоміра.

Частотомір працює в режимі вимірювання різницевої частоти. Тобто відбувається вимірювання різниці частот, що відповідає сигналу від генератора, що калібрується, та частоти, що передається від еталонного генератора.

Отримані результати різницевої частоти передаються на персональний комп'ютер лабораторії клієнта і відсилаються за допомогою мережі інтернет на опрацювання на стороні калібрувальної лабораторії.

2.2 Встановлення технічних вимог для компонентів системи

2.2.1 Об'єкт вимірювання

Об'єктом вимірювання є генератори сигналів класу Г3, Г5 за ГОСТ 15094. Основні технічні характеристики генераторів заданого класу наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1-Технічні характеристики генераторів, що калібруються.

Характеристики	Параметри	Значення
Основні вихідні параметри	Частотний діапазон	1Hz...1MHz
	Форма вихідного сигналу	Синусоїдальний сигнал, прямокутний сигнал, імпульсний сигнал
	Розширення	1Hz, 4 – 8 розрядів встановлення частоти
	Час встановлення	Біля 100ms для

	частоти	частот $>100\text{Hz}$, і $0,1..15\text{s}$ для частот $<100\text{Hz}$
	Похибка встановлення частоти	$\pm 0,05\%$
	Час прогріву	Біля 30 хвилин
	Амплітуда	$3,16\text{V}$ на 600Ω
	Вихідний опір	$600\Omega \pm 5\%$
	Похибка встановлення вихідної напруги	$\pm 5\text{db}$ - на частоті 1kHz
Загальні дані	Дисплей	2-х рядковий/16-ти знаковий ЖКД
	Напруга живлення	$115 / 230\text{V} (+10\%, -15\%)$ $47..63\text{Hz}$
	Габарити	$225 \times 85 \times 200\text{mm}$
	Маса	$2..4\text{ kg}$

Представниками класів калібровних генераторів є: ГЗ-122, Г5-109, DAGATRON TG – 100 [1].

2.2.2 Еталонний генератор

У якості еталонного генератора частоти використовується Fluke 910R.

Еталон призначений для транслявання еталонної частоти по каналам зв'язку для подальшого порівняння з частотою генератора, що калібрується. Для обраної базової архітектури необхідно мати Ethernet вихід для зручної передачі даних на робочу станцію. Загальні технічні характеристики наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.2 Основні технічні характеристики еталонного генератора

Стабільність частоти	<p>Зміщення частоти (в середньому за 24г.)</p> <p>$1 \cdot 10^{-12} \text{ Hz}$</p> <p>Короткочасне (відхилення Аллана):</p> <p>$1 \cdot 10^{-12} \text{ Hz}, (t = 100s)$</p> <p>$1 \cdot 10^{-11} \text{ Hz}, (t = 10s)$</p> <p>$3 \cdot 10^{-11} \text{ Hz}, (t = 1s)$</p> <p>Час встановлення (25°C)</p> <p>20 min</p> <p>*При температурах $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$</p>
Інтерфейс Ethernet	<p>Порт зв'язку: Роз'єм:</p> <p>RJ 45</p> <p>Протокол: 10Base-T</p> <p>Буферне ОЗУ: 1kbit</p> <p>Порт конфігурації: Роз'єм:</p> <p>Dsub9, RS232</p>

Детальна інформація про еталонний генератор міститься у додатку 2.

2.2.3 Цифровий вимірювач частоти

Цифровий вимірювач частоти призначений для вимірювання частоти сигналу та знаходження різницевої частоти двох сигналів у системі інтернет-калібрування.

У системі використовується ЦВЧ, що був розроблений у бакалаврському проєкті та завдяки цьому ідеально підходить для використання у системі інтернет калібрування.

Основні технічні характеристики ЦВЧ наведені у таблиці 2.3

Таблиця 2.3 Основні технічні характеристики ЦВЧ

Технічні параметри та характеристики	ЦВЧ 1.0
Діапазон вимірювання частоти	1Hz..1 MHz
Кількість каналів	2
Дисплей	LED
Розрядність індикатора	10
Графічне відображення інформації	так
Статистична обробка результатів	так
Похибка частоти опорного генератора	10^{-6}
Імпеданс	1M Ω , 50pF
Чутливість по входу	25mV
Інтерфейси	RS-232 USB 3.0
Діапазон робочих температур	Від +5 °C до +40 °C
Живлення	$220 \pm 22V$ $50 \pm 2,5Hz$
Габаритні розміри L x H x W (mm)	250x78x310
Маса приладу	1,2 kg

2.2.4 Персональний комп'ютер лабораторії підприємства

Для даного об'єму роботи ПК повинен мати порти USB та Ethernet, достатній об'єм обчислювальної пам'яті та потужності. Для встановлених задач підходить ноутбук Dell Vostro 15 3568 [18].

Основні технічні характеристики наведені у таблиці 2.4

Таблиця 2.4 Основні технічні характеристики ПК

Дисплей	15.6 inch
Операційна система	Windows 10
Відеоплата	Intel® HD Graphics 620
Пам'ять	8 Gb
Жорсткий диск	500 Gb
Порти	Usb 2шт. RJ-45 HDMI VDA

2.2.6 Сервер (трансляючий комп'ютер) калібрувальної лабораторії.

У проектній роботі використовується сервер Dell PowerEdge T30. Він володіє високою швидкодією та здатен оброблювати великий об'єм інформації.

Технічні характеристики серверу наведені у додатку 3.

2.2.7 Підтвердження точнісних характеристик

Відповідно до обраних компонентів системи маємо:

- 1) Похибка еталонного генератора, $\Delta_{EG} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Hz}$ (згідно технічній документації).
- 2) Похибка частотоміра, $\Delta_{\text{ч}} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Hz}$ (згідно технічній документації)..
- 3) Машинна похибка ПК та серверу, $\Delta_M = 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$.
- 4) Похибка АЦП $\Delta_{\text{АЦП}} = 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$.

При передачі даних використовується 32 (n=32) бітний код, тому машинна похибка буде мати вигляд:

$\gamma = \frac{1}{2^n} = \frac{1}{2^{32}} = 2,3 \cdot 10^{-8} \%$, тоді абсолютна похибка при обчислюванні частоти ПК (f=100kHz) матиме вигляд:

$$\Delta_1 = \frac{\gamma \cdot f_n}{100} = \frac{2,3 \cdot 10^{-8} \cdot 1 \cdot 10^5}{100} \text{ Hz} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}.$$

Для ПК, серверу та АЦП маємо $\Delta_{\text{маи}} = \Delta_{\text{маи1}} + \Delta_{\text{маи2}} + \Delta_{\text{АЦП}}$, так як ПК ідентичні, то

$$\Delta_M = 3\Delta_1 = 3 \cdot 2,3 \cdot 10^{-5} = 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}.$$

Похибка від калібрування повинна становити не більше 20% від похибки генератора, що калібрується.

$$\text{Маємо, } \sum_1^i \Delta_i = 0.2 \cdot \Delta_{\text{ген}}.$$

Відповідно технічній документації на генератор Dagatron Tg-100, похибка встановлення частоти $\pm 0.05\%$. Дана похибка буде найменшою при частоті 1 Hz, звідси абсолютна похибка вимірювання дорівнює:

$$\Delta = \frac{\gamma \cdot 1 \text{ Hz}}{100\%} = \frac{0.05\% \cdot 1 \text{ Hz}}{100\%} = 0,0005 \text{ Hz} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$$

Так як похибка системи калібрування має становити 20% від похибки генератора, що калібрується, маємо

$$\sum_1^i \Delta_i = 0.2 \cdot \Delta_{ген} = 0.2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$$

$$1 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-8} + 6,9 \cdot 10^{-5} < 1 \cdot 10^{-4}.$$

$$0.69 \cdot 10^{-4} < 1 \cdot 10^{-4} - \text{ умова виконується.}$$

Висновки з розділу 2.

В розділі було запропоновано структуру системи калібрування генератора частоти, з віддаленою передачею еталонної частоти. Схема складається з еталонного генератора, генератора, що калібрується, цифрового вимірювача частоти, робочої станції метрологічної лабораторії та персонального комп'ютера який розміщується на території замовника. Обрано наступні компоненти системи: DAGATRON TG – 100 у якості основного генератора, що калібрується, еталонний генератор Fluke 910R, цифровий вимірювач частоти представлений ЦВЧ 1.0, що був розроблений безпосередньо для системи інтернет калібрування, АЦП LTC 2500. Сервер метрологічної лабораторії та ПК на стороні замовника представлені продуктами компанії Dell, PowerEdge T30 та Vostro 15 3568 відповідно.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КАЛІБРУВАННЯ

3.1 Загальний алгоритм оцінювання результату вимірювання та його похибки

Відповідно до алгоритму роботи системи в зазначений час з калібрувальної лабораторії передається сигнал від еталонного генератора частоти f_{em} , попередньо оцифрований прецизійним АЦП за допомогою трансляючого комп'ютера та ліній зв'язку інтернет. На стороні клієнта цей сигнал приймається та передається на інший вхід цифрового частотоміра.

Частотомір працює в режимі вимірювання різницевої частоти. Тобто відбувається вимірювання різниці частот еталонного генератора f_{em} та досліджуваного генератора $f_{ген}$.

Таким чином частотомір вимірює різницю сигналів:

$$f_{\text{ч}} = f_{\text{ген}} - f_{\text{em}},$$

де f_{em} - сигнал від еталонного генератора частоти,

$f_{ген}$ - сигнал від генератора частоти, що калібрується.

Такий метод вимірювання називається диференціальним.

За результатом вимірювання невідомої різниці та відомого значення еталонної частоти можна розрахувати реальну частоту, що була на виході генератора частоти, який калібрують за формулою:

$$f_{ген} = f_{em} + f_{\text{ч}}.$$

Однак потрібно враховувати, що генератор частоти може мати:

- випадкову складову похибки;
- систематичну складову похибки.

Для того, щоб отримати значення частоти в точці калібрування пропонується проводити багаторазове генерування частоти генераторам в одній і тій самій точці і, відповідно, оцінювання різницевої частоти.

Оскільки результати вимірювання різницевої частоти при n -кратном вимірювання можуть відрізнятися, потрібно знайти оцінку результату вимірювання частоти генератора, а потім додати її до значення частоти, отриманого з еталонного генератора:

$$f_{ген} = f_{ет} + M[f_q],$$

де $M[f_q]$ - в якості оцінки результату вимірювання частотоміром обираємо центральну тенденцію вибірки результатів вимірювання, що відповідатиме виду розподілі, який набуває послідовність отриманих значень різницевої частоти.

Випадкова складова похибки вимірювання буде обумовлена двома складовими:

- еталонним генератором – його стандартне відхилення $\sigma_{ет} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$;
- та результатом вимірювання частотоміром (випадкова складова обумовлена інструментальною складовою похибки частотоміра $\sigma_1 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$ та випадкова складова через варіацію вимірюваної величини $\sigma_2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$).

Випадкова складова похибки вимірювання різницевої частоти частотоміром визначатиметься як:

$$\sigma_q \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} = \sqrt{\sigma_1^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} + \sigma_2^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}},$$

де $\sigma_1 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$ - визначатиметься за похибкою частотоміра, відомою з паспортних даних до нього (еквівалент складової невизначеності, оціненої пр. типу В);

$\sigma_2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$ - визначатиметься як стандартне відхилення оцінки результату вимірювання частотоміром, відповідно до розподілу результатів вимірювання (еквівалент складової невизначеності, оціненої за типом А).

Отже випадкова похибка генератора частоти визначатиметься, як:

$$\sigma_{ген} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} = \sqrt{\sigma_{ет}^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} + \sigma_{ч}^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}} = \sqrt{\sigma_{ет}^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} + \sigma_1^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} + \sigma_2^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}}.$$

Враховуючи, той факт, що $\sigma_{ет} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} \ll \sigma_{ч} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$ за умовою процесу калібрування, то стандартне відхилення випадкової похибки генератора частоти набуває вигляду:

$$\sigma_{ген} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} = \sqrt{\sigma_1^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix} + \sigma_2^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}}.$$

Систематична похибка генератора частоти може бути оцінена як різниця встановленого на частотомірі значення та значення отриманого за розрахунками:

$$\Delta_s = f_{показ} - f_{ген},$$

де $f_{показ}$ - показ генератора частоти.

Під час нормування похибок генератора частоти проводиться перевірка чи суттєвою є систематична складова похибки.

Якщо виконується умова $\Delta_s < 2\sigma_{ген} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$, то систематична похибка окремо не нормується, а результат калібрування визначається як:

- значення частоти в точці калібрування $f_{ген}$;
- стандартна невизначеність результату $u = \sqrt{\frac{\Delta_s^2}{3} + \sigma_{ген}^2 \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}}$.

Якщо виконується умова $\Delta_s \geq 2\sigma_{ген} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$, то систематична похибка окремо нормується, а результат калібрування визначається як:

- значення частоти в точці калібрування $f_{ген}$;
- стандартна невизначеність результату $u = \sigma_{ген} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta \end{bmatrix}$;
- зміщення Δ_s .

Попередньою умовою калібрування є наступна вимога: похибка калібрування не повинна перевищувати 30% від похибки генератора частоти, який калібрують (відомої з паспорту приладу або результатів попереднього калібрування).

Таким чином вибір еталонного генератора частоти та частотоміри здійснюється за умовою:

$$\Delta_{кал} = \Delta_ч + \Delta_{ет} + \Delta_{доо},$$

де $\Delta_{кал}$ - похибка калібрування;

$\Delta_ч$ - похибка частотоміра;

$\Delta_{ет}$ - похибка еталонного генератора;

$\Delta_{доо}$ - похибка через оцифрування сигналів, передачу цифрових даних та інші важко нормовані фактори.

Виходячи з вище зазначеного загальний алгоритм опрацювання даних має вигляд (рисунок 3.1).

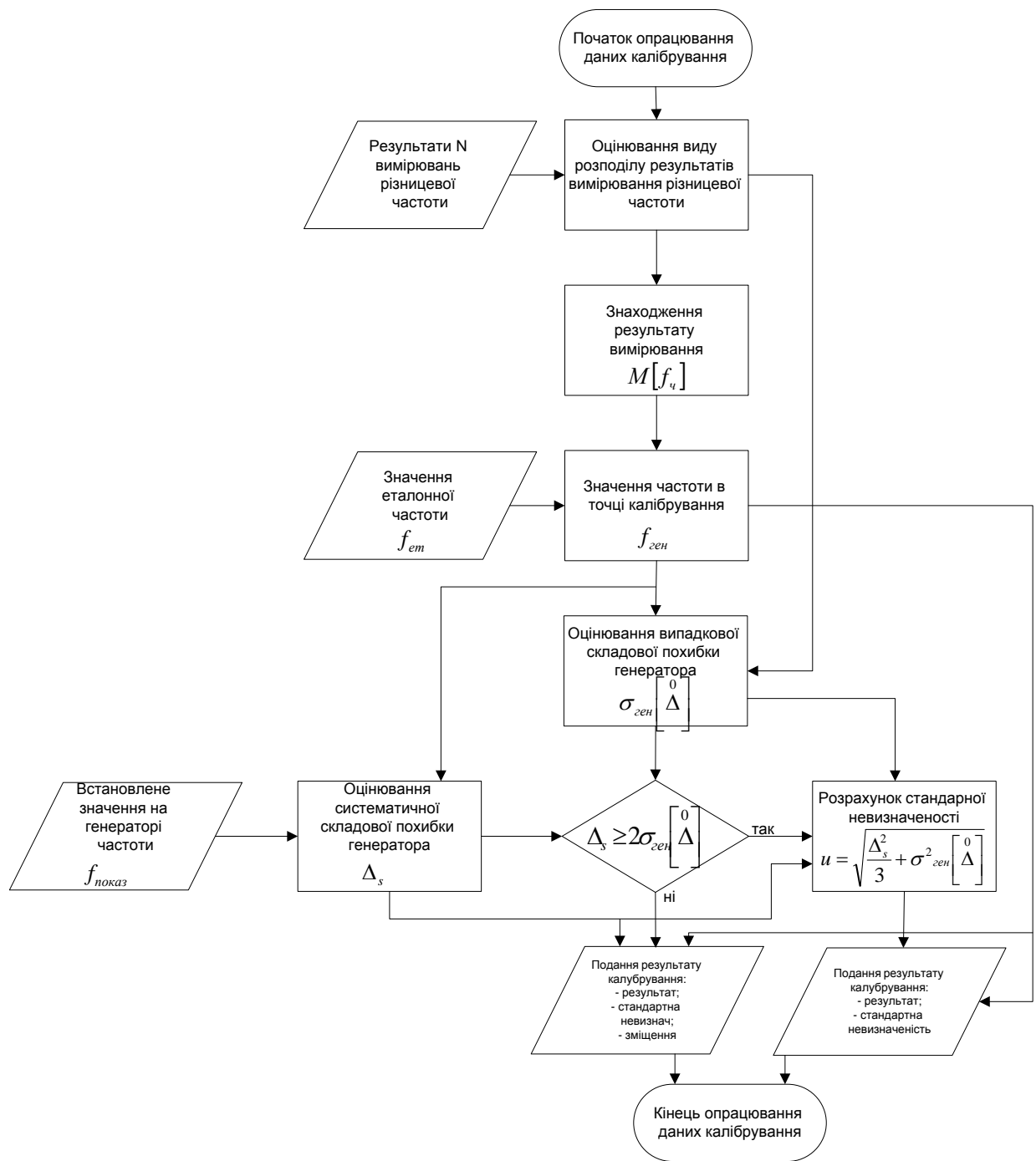


Рисунок 3.1. Алгоритм опрацювання результатів калібрування.

Визначення результату вимірювання частотоміром та стандартної невизначеності обумовлюється видом розподілу даних багаторазового вимірювання.

3.2 Оцінювання результату вимірювання

3.2.1 Вибір статистичної оцінки для визначення результату вимірювання

Вибір статистичної оцінки міри центральної тенденції, що характеризує результат вимірювання частоти обумовлюється видом розподілу результатів вимірювання частоти. [19]

У кожної оцінки міри центральної тенденції є вираз для знаходження її стандартного відхилення, що буде обумовлювати спосіб розрахунку стандартної невизначеності частотоміра, оціненої за типом А.

Оцінки міри центральної тенденції мають задовольняти вимогам:

- Ефективності
- Обґрунтованості
- Незміщеності

Теоретичні закони розподілу характеризуються числовими характеристиками: початковими та центральними моментами різних порядків, характеристиками положення.

Для експериментальних законів можна отримати оцінки цих характеристик. Так як ці оцінки на числовій осі можуть бути представлені у вигляді точок, їх прийнято називати точковими на відміну від інтервальних, зображуваних на числовій осі з допомогою інтервалів.

На противагу самим числовим характеристикам μ , σ^2 , їх оцінки $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}^2$ є випадковими величинами, причому їх значення і розсіюваність залежать від числа експериментальних даних n .

Точкові оцінки числових характеристик повинні задовольняти 3-м вимогам: вони повинні бути обґрунтованими, незміщеними і ефективними.

Обґрунтованою називається оцінка, яка зі збільшенням вибірки наближається до істинного значення характеристики:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \hat{\mu} = \mu ; \lim_{n \rightarrow \infty} \hat{\sigma}^2 = \sigma^2 .$$

Незмщеною називається оцінка, очікування якої дорівнює самій характеристиці:

$$E(\bar{x}) = \mu; E(s^2) = \sigma^2;$$

Ефективною називається оцінка, що володіє найменшою дисперсією (розсіюванням) в порівнянні з іншими.

Для вибору найбільш ефективної оцінки існує цілий ряд методів. Найбільш поширеним є метод максимальної правдоподібності, теоретично обґрунтований Р. Фішером. Ідея методу полягає в знаходженні таких оцінок параметрів розподілу, при яких досягає максимуму т. з. функція правдоподібності. Остання визначається як ймовірність появи всіх незалежних результатів спостереження x_1, x_2, \dots, x_n .

Оскільки ймовірність появи результату x_i , що лежить в інтервалі Δx , дорівнює $P_i = f(x_i)\Delta x$, то для незалежних результатів спостереження ймовірність появи всього ряду спостережень x_1, x_2, \dots, x_n є добутком цих ймовірностей

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n \Delta x f(x_i).$$

Відповідно до принципу максимальної правдоподібності необхідно знайти такі оцінки параметрів диференціальної функції розподілу $f(x_i)$, при яких вираз вище досягає максимального значення.

Для спрощення обчислень користуються логарифмічною функцією правдоподібності

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i).$$

Відповідно до встановлених вимог до точкових оцінок числових характеристик було розраховано очікуване значення та СКВ для кожного із видів розподілу, що використовуються у роботі [12].

Нормальний розподіл

Щільність розподілу:

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma_x^2}}$$

Інтегральна функція розподілу:

$$F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma_x^2}} du.$$

Параметри $\alpha = 0$, $\varepsilon = 0$, $t_p = -\Phi^{-1}(\frac{P}{2})$.

Графічне зображення даного розподілу зображено на рисунку 3.2.

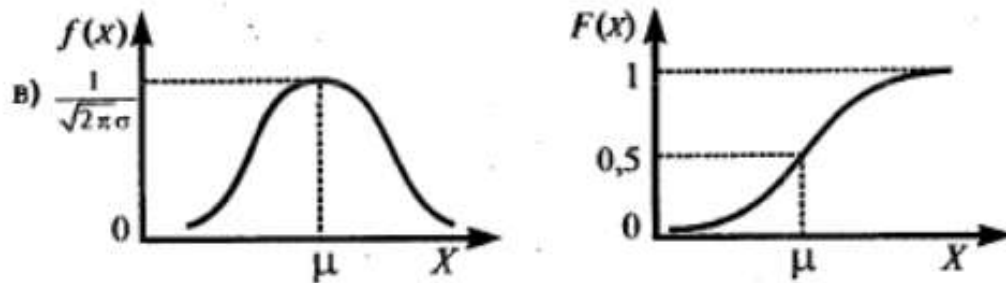


Рисунок 3.2

Очікуване значення та дисперсія будуть мати вигляд

Очікуване значення $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x}$.

Дисперсія $S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = U_{f_a}$.

Рівномірний розподіл.

Щільність розподілу

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{3}\sigma_x}, & x \in [\mu - \sqrt{3}\sigma_x; \mu + \sqrt{3}\sigma_x] \\ 0, & x \notin [\mu - \sqrt{3}\sigma_x; \mu + \sqrt{3}\sigma_x] \end{cases}$$

Інтегральна функція розподілу:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(u) du = \begin{cases} 0, & x < \mu - \sqrt{3}\sigma_x \\ \frac{X - \mu + \sqrt{3}\sigma_x}{2\sqrt{3}\sigma_x}, & x \in [\mu - \sqrt{3}\sigma_x; \mu + \sqrt{3}\sigma_x] \\ 1, & x > \mu + \sqrt{3}\sigma_x \end{cases}$$

Параметри $\mu = \frac{a+b}{2}$; $\sigma_x = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$; $a^1 = 0$; $\xi = -1, 2$; $t_p = \sqrt{3}P$.

Графічне зображення даного розподілу зображено на рисунку 3.3.

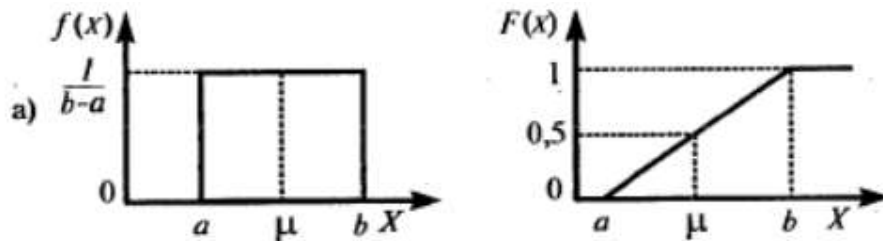


Рисунок 3.3

Очікуване значення та дисперсія будуть мати вигляд

Ефективна оцінка очікування: $x_{cp} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}$;

Ефективна оцінка дисперсії $s = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})^2}{12}}$.

Подвійний експоненціальний розподіл (Лапласа).

Щільність розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{|x-\mu|}{\lambda}}$$

Інтегральна функція розподілу:

$$F(X) = \begin{cases} f(x) = \frac{1}{2} e^{\frac{x-\mu}{\lambda}}, & X < \mu \\ f(x) = 1 - \frac{1}{2} e^{-\frac{x-\mu}{\lambda}}, & X \geq \mu \end{cases}$$

Параметри $\sigma_x = \sqrt{2}\lambda$, $\alpha = 0$, $\varepsilon = 3$, $t_p = -\frac{1}{\sqrt{2}} \ln(1-P)$.

Графічне зображення даного розподілу зображено на рисунку 3.4.

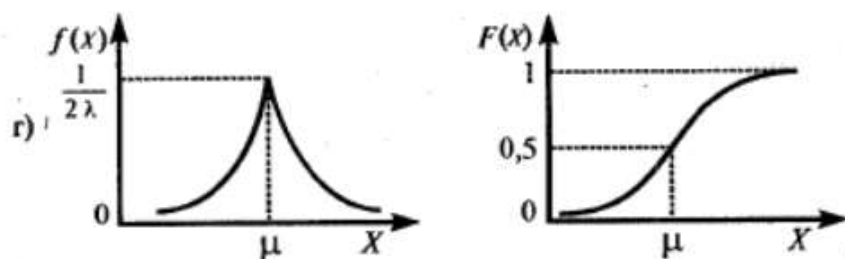


Рисунок 3.4

Для експоненціального закону, k - значення, що стоїть посередині впорядкованого ряду спостережень. Воно називається медіаною Me .

$$Me = \begin{cases} x_{(\frac{n+1}{2})}, n - \text{парне}; \\ \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n+1}{2})}}{2}, n - \text{непарне}. \end{cases}$$

$$\text{Дисперсія } S = \frac{\sqrt{2}}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Me|.$$

Трикутний закон

Щільність розподілу:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - \mu + \sqrt{6\sigma_x}}{6\sigma_x^2}, & X \in [\mu - 6\sigma_x; \mu] \\ \frac{\mu + \sqrt{6\sigma_x} - x}{6\sigma_x^2}, & X \in [\mu; \mu + 6\sigma_x] \\ 0, & X \notin [\mu - 6\sigma_x; \mu + 6\sigma_x] \end{cases}$$

Інтегральна функція розподілу:

$$F(X) = \begin{cases} \frac{(X - \mu + \sqrt{6\sigma_x})^2}{12\sigma_x^2}, & X \in [\mu - 6\sigma_x; \mu] \\ 1 - \frac{(X - \mu - \sqrt{6\sigma_x})^2}{12\sigma_x^2}, & X \in [\mu; \mu + 6\sigma_x] \\ 0, & X < \mu - 6\sigma_x \\ 1, & X > \mu + 6\sigma_x \end{cases}$$

$$\text{Параметри } \mu = \frac{a+b}{2}, \sigma_x = \frac{b-a}{\sqrt{24}}, \alpha = 0, \varepsilon = -0.6, t_p = \sqrt{6}(1 - \sqrt{1-P})$$

Графічне зображення даного розподілу зображено на рисунку 3.5.

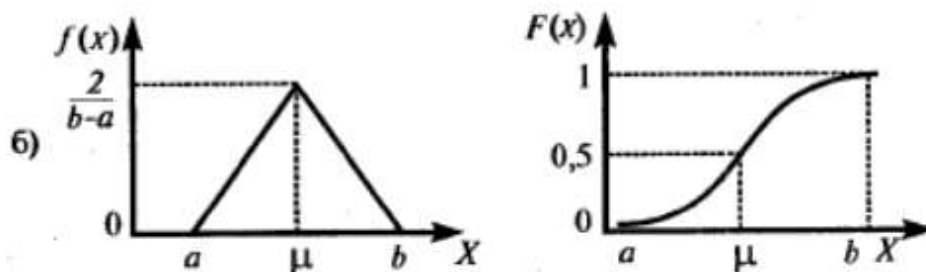


Рисунок 3.5

Ефективна оцінка очікування: $x_{cp} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2}$;

Ефективна оцінка дисперсії $s = \sqrt{\frac{(x_{\max} - x_{\min})^2}{12}}$.

З огляду від отриманого результату можна обрати відповідну статистику для оцінювання результату вимірювання: середнє арифметичне, медіану, усічене середнє тощо (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1.

Вид розподілу	Обґрунтована, ефективна та незміщена оцінка міри центральної тенденції	Стандартне відхилення оцінки
Нормальний	$f_q = \overline{f_q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{qi}$	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{qi} - \overline{f_q})^2}{n-1}}$
Зашумлений нормальний	$f_q = \overline{f_{q\alpha}} = \frac{1}{n} \sum_{i=\alpha/2}^{n-\alpha/2} f_{qi}$	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=\alpha/2}^{n-\alpha/2} (f_{qi} - \overline{f_q})^2}{n-\alpha-1}}$
Рівномірний	$f_q = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2}$	$S = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2\sqrt{3}}$

Експоненціальний	$f_q = Me = \begin{cases} \frac{f_{n+1}}{2}, & \text{якщо } n \text{ парне} \\ \frac{f_n + f_{n+1}}{2}, & \text{якщо } n \text{ непарне} \end{cases}$	$S = \frac{\sqrt{2}}{n} \sum_{i=1}^n f_{qi} - Me $
Трикутний	$f_q = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2}$	$S = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2\sqrt{6}}$

3.2.2 Оцінювання виду розподілу результату вимірювання

Для перевірки узгодження емпіричного розподілу з теоретичним використовують критерії: Колмогорова, критерій χ^2 , критерій ω^2 , критерій W , складений критерій.

Критерій Колмогорова використовують для вибірки об'ємом більше 100, χ^2 для вибірки об'ємом більше 200, критерій ω^2 для вибірки об'ємом більше 50.

Критеріями Колмогорова і ω^2 можна користуватися тільки для розподілу неперервних випадкових величин. За допомогою критерію W перевіряють узгодження емпіричного розподілу з нормальним і лог-нормальним розподілом для вибірки об'ємом 3...50. Складений критерій використовують для перевірки узгодження емпіричного розподілу з нормальним для вибірки об'ємом 15...50.

Послідовність перевірки узгодження емпіричного розподілу з теоретичним така. Формулюють гіпотезу щодо обраної теоретичної моделі. Згідно з наведеними вище рекомендаціями обирають критерій. Задають рівень значущості α , за яким проводять перевірку. Для цього рівня значущості встановлюють відповідну критичну область критерія перевірки, тобто відповідний квантиль чи квантілі (для двосторонньої області). Результати вимірювань під час використання критеріїв Колмогорова, ω^2 і W впорядковують за їх зростанням:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n.$$

Якщо обраний критерій параметричний, невідомі параметри теоретичного розподілу обчислюють за результатами вимірювань. Далі знаходять відповідне значення критерію і перевіряють, чи потрапляє воно в критичну область. Якщо це так, то гіпотезу відкидають. Якщо ні, то гіпотезу приймають [13].

Оскільки в даній предметній області (вимірювання частоти) можна отримати велику вибірку за малий проміжок часу, то для оцінювання ваиду розподілу доцільним є вибір методу χ^2 .

Для визначення результату вимірювання використовують центр розподілення вибірки, формула для оцінювання якого обираємо в залежності від моделі розподілу похибки.

Вибір моделі розподілу результатів вимірювання здійснюємо за результатом перевірки гіпотези, щодо виду розподілу результатів вимірювання частоти.

При цьому використовується наступний алгоритм:

- 1) розраховується кількість значень, що потрапити в інтервали гістограми емпіричного розподілу (кількість інтервалів обираємо 7);
- 2) теоретичний розподіл розраховано для такої ж кількості інтервалів (таблиця 3.2);
- 3) розраховуються розбіжності отриманого розподілу від розрахованих теоретичних значень, визначають критерій χ^2 - Пірсона:

$$\chi_j^2 = \frac{(n_j - \bar{n}_j)^2}{\bar{n}_j}; \quad \chi^2 = \sum_1^7 \chi_j^2.$$

- 4) обираємо модель розподілу, у якої сумарна розбіжність найменша.

В таблиці 3.2 наведені вірогідності чотирьох найбільш розповсюджених теоретичних розподілень для кількості інтевалів 7.

Таблиця 3.2 – Вірогідності теоретичних розподілень для 7 інтервалів

Номер інтервалу	Нормальний закон	Трикутний закон	Експоненціальний закон	Рівномірний закон
1	0,02	0,04	0,1	0,1428
2	0,09	0,12	0,5	0,1428
3	0,23	0,2	0,18	0,1428
4	0,32	0,28	0,52	0,1428
5	0,23	0,2	0,18	0,1428
6	0,09	0,12	0,5	0,1428
7	0,02	0,04	0,1	0,1428

3.2.3 Оцінювання наявності викидів

Грубі похибки (промахів) відносяться до числа похибок, що змінюються випадковим чином при багаторазових вимірюваннях.

Причинами грубих похибок можуть бути неконтрольовані зміни умов вимірювань, несправність, помилки оператора та ін.

Оцінка наявності грубих похибок вирішується методами математичної статистики - статистичною перевіркою гіпотез. Суть методу зводиться до наступного. Висувається нульова гіпотеза щодо результату вимірювання, який викликає деякий сумнів і розглядається як грубий промах у зв'язку з великим відхиленням від інших результатів вимірювання. При цьому нульова гіпотеза полягає в утвердженні, що "сумнівний" результат в дійсності належить до можливої сукупності отриманих даних умов результатів вимірювань, і отримання такого результату ймовірно.

Користуючись певними статистичними критеріями, намагаються спростувати нульову гіпотезу, тобто намагаються довести її практичну

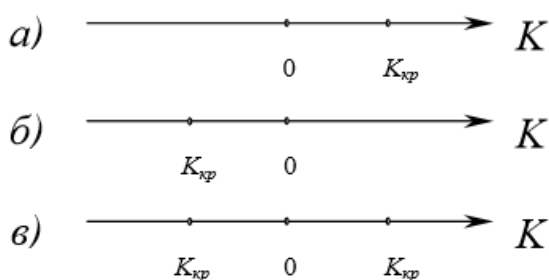


Рис. 3.2.2 Графічна інтерпретація до розподілу області прийняття гіпотизи.

Вибір того чи іншого критерію заснований на принципі практичної впевненості. Для цього задаються досить малою ймовірністю t того, що сумнівний результат дійсно міг би мати місце. Ймовірність називається рівнем значущості і зазвичай вибирається з ряду: 0,10; 0,05; 0,01 і т. д.

Для даного t визначають критичну область значень критерію перевірки нульової гіпотези. Якщо значення критерію потрапляє в цю область, то гіпотеза відкидається.

Відповідно до визначених критеріїв (коефіцієнтів), що визначають границю, в якій присутні «грубі» (в сенсі похибок) результати спостережень у різних авторів різняться, тобто перевірка повинна виконуватися відразу за кількома параметрами (рекомендується використовувати не менше трьох) . Остаточний висновок про належність «підозрілих» результатів даної сукупності слід робити за більшістю критеріїв. Крім того, критерій для визначення грубих похибок повинен бути представлений після побудови гістограми результатів спостережень. Гістограма виконується за попередньою ідентифікацією виду розподілу закону.

Перевірку статистичної гіпотези проводять для прийнятого рівня значущості q (приймається рівним 0,1; 0,05; 0,01 і т. Д.). Так прийнятий рівень значимості $q = 0.05$ означає, що висунута нульова статистична гіпотеза може бути прийнята з довірчою ймовірністю $P = 0.95$. Або є ймовірність відкинути цю гіпотезу (припуститися помилки першого роду), що дорівнює $P = 0.95$.

Нульова статистична гіпотеза підтверджує належність "підозрілого" результату вимірювання (спостереження) до даної групи вимірювань.

При обробці вже отриманих результатів спостережень доволіно відкидати окремі результати не слід, так як це може привести до фіктивного

підвищення точності результату вимірювань. Група вимірювань (вибірка) може містити кілька грубих помилок і їх виключення виробляють послідовно, по одному. Всі методи виключення грубих похибок (промахів) можуть бути розділені на два основних типи:

- а) Методи виключення при відомому генеральному СКВ;
- б) Методи виключення при невідомому генеральному СКВ.

В першому випадку $\bar{X}_{ц.р.}$ та СКВ визначаються за результатами всієї вибірки, у другому випадку, з вибірки перед обчисленням вилучаються підозрілі результати.

У разі обмеженого числа спостережень і (або) складності оцінки параметрів закону розподілу рекомендується виключати грубі похибки, використовуючи наближені коефіцієнти виду розподілу. При цьому виключаються значення $x_i < x_{r-}$ і $x_i > x_{r+}$, де x_{r-} , x_{r+} - границі промахів, що визначаються рівняннями:

$$x_{r-} = X - S \cdot \left[1 + A \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} - 1} \right] \quad (3.2)$$

$$x_{r+} = X + S \cdot \left[1 + A \cdot \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} - 1} \right] \quad (3.3)$$

де A - коефіцієнт, значення якого вибирається залежно від заданої довірчої ймовірності в діапазоні від 0,85 до 1,30

γ - контрекссес, значення якого залежить від форми закону розподілу величини.

Оскільки на практиці частіше зустрічаються вимірювання при невідомому СКВ (обмежене число спостережень), в посібнику розглянуті наступні критерії перевірки підозрілих (з точки зору похибок) результатів спостережень: Ірвіна, Смірнова, Кохрена.

3.2.1 Критерій Ірвіна

Для отриманих експериментальних даних визначають коефіцієнт за формулою:

$$\lambda = \frac{(x_{n-1} - x_n)}{S},$$

де x_{n-1} , x_n - найбільші значення випадкової величини;

S – СКВ, обчислене за всіма значеннями вибірки.

Після цього обчислений коефіцієнт порівнюється з табличним значенням λ_q , значення якого наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Критерій Ірвіна λ_q .

Число измерений n	Уровень значимости	
	$q=0,05$	$q=0,01$
1	2	3
2	2,8	3,7
3	2,2	2,9
10	1,5	2,0
20	1,3	1,8
30	1,2	1,7
50	1,1	1,6
100	1,0	1,5
400	0,9	1,3
1000	0,8	1,2

Якщо $\lambda > \lambda_q$, то нульова гіпотеза не підтверджується, тобто результат - помилковий, і він повинен бути виключений при подальшій обробці результатів спостережень.

3.2.1 Критерій Смірнова

Критерій Смирнова використовується при обсягах вибірки $n \geq 25$, або при відомих значеннях генеральних середнього і СКО. Він встановлює менш жорсткі границі грубої похибки. Для реалізації цього критерію

обчислюються дійсні значення квантилів розподілу (спостережуване значення критерію) за формулою:

$$\beta = \frac{\max |x_{i_{ind}} - \bar{X}|}{S}$$

Знайдене значення порівнюється з критеріальним β_k , яке наведене в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Квантили розподілу β_k .

Объем выборки n	Предельное значение β_k при уровне значимости q				
	0,100	0,050	0,0010	0,005	0,001
1	2	3	4	5	6
1	1,282	1,645	2,326	2,576	3,090
2	1,632	1,955	2,575	2,807	3,290
3	1,818	2,121	2,712	2,935	3,403
4	1,943	2,234	2,806	3,023	3,481
5	2,036	2,319	2,877	3,090	3,540
6	2,111	2,386	2,934	3,143	3,588
7	2,172	2,442	2,981	3,188	3,628
8	2,224	2,490	3,022	3,227	3,662
9	2,269	2,531	3,057	3,260	3,692
10	2,309	2,568	3,089	3,290	3,719
15	2,457	2,705	3,207	3,402	3,820
20	2,559	2,799	3,289	3,480	3,890
25	2,635	2,870	3,351	3,539	3,944
30	2,696	2,928	3,402	3,587	3,988
40	2,792	3,015	3,480	3,662	4,054
50	2,860	3,082	3,541	3,716	4,108
100	3,076	3,285	3,723	3,892	4,263
250	3,339	3,534	3,946	4,108	4,465
500	3,528	3,703	4,108	4,263	4,607

3.2.1 Критерій Кохрена

Передбачається, що мають місце $k > 2$ експериментальних впливів і що спостереження згруповані в b блоків.

	Вплив 1	Вплив 2	...	Вплив k
Блок 1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1k}
Блок 2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2k}
Блок 3	X_{31}	X_{31}	...	X_{3k}

\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
Група b	X_{b1}	X_{b2}	\dots	X_{bk}

Q-критерій Кохрена:

Нульова гіпотеза (H_0): впливи мають однаковий ефект.

Альтернативна гіпотеза (H_a): існує різниця в ефективності різних впливів.

Статистика Q-критерія Кохрена:

$$T = k(k-1) \frac{\sum_{j=1}^k \left(X_j - \frac{N}{k} \right)^2}{\sum_{i=1}^m X_i (k - X_i)},$$

где k - число впливів

X_j - сума позитивних відгуків для j-впливу

m - число груп

X_i - сума позитивних відгуків для i-групи

N – загальне число спостережень.

Для заданого рівня значущості α критична область визначається як:

$$Q > X_{1-\alpha, k-1}^2,$$

Де $X_{1-\alpha, k-1}^2$ квантиль рівня $(1-\alpha)$ розподілу χ^2 з k-1 степенями свободи.

Нульова гіпотеза відхиляється, якщо статистика критерію потрапляє в критичну область.

Метою калібрування є отримання:

- Реального значення частоти в точці калібрування генератора;
- Оцінювання невизначеності калібрування.

Для вирішення цих задач проводить n-кратне вимірювання різницевої частоти (зокрема, можна обрати $n = 100$).

Отримання достатньої статистики дозволяє вирішити декілька задач:

- Підвищити точність оцінювання значення частоти в кожній точці калібрування;
- Отримати оцінку розширеної невизначеності в точні без використання завищеної оцінки;

Отже результат оцінювання значення в точці калібрування визначатиметься як: $f_{gen} = f_{em} + f_q$, де f_{em} - еталонне значення частоти, що поступає від метрологічної служби; f_q - результат вимірювання різницевої частоти частотоміром.

Оскільки проводиться багаторазове вимірювання частоти частотоміром, то в якості результату вимірювання має бути обрана статистика, яка найкращим чином відображатиме результат вимірювання частоти. Отже задачею є знаходження міри центральної тенденції $M[f_q]$ сукупності n результатів вимірювання. Тоді попередня формула набуватиме виду:

$$f_{gen} = f_{em} + M[f_q].$$

Для визначення міри центральної тенденції потрібно визначити вид розподілу результатів вимірювання частоти. Для цієї мети можна скористатися відповідними статистичними критеріями, зокрема, критерієм χ^2 .

За таблицею 1 можна знайти не лише оптимальне значення результату вимірювання частотоміром, а й оцінку складової стандартної невизначеності вимірювання частотоміром, оцінену за типом А: $u_{uA} = S$.

Невизначеність частотоміра, обумовлена його інструментальною складовою похибки, визначає невизначеність складову невизначеності, що оцінюється за типом В. Зокрема, якщо відома відносна похибка вимірювання частотоміром δ_q у %, то: $u_{uB} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\delta_q \cdot f_q}{100\%}$.

Поєднання цих двох складових дозволить оцінити стандартну невизначеність вимірювання різницевої частоти частотоміром:

$$u_q = \sqrt{u_{qA}^2 + u_{qB}^2} = \sqrt{S^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\delta_q \cdot f_q}{100\%} \right)^2}.$$

Стандартна невизначеність оцінки частоти генератора в точці калібрування визначається невизначеність еталонної частоти, що передається та невизначеністю вимірювання різницевої частоти частотоміром:

$$u_{gen} = \sqrt{u_{et}^2 + u_q^2}.$$

Враховуючи той факт, що еталонна частота може передаватись, зокрема, від вторинного еталона частоти, то невизначеністю її відтворення можна знехтувати. Тому невизначеність оцінювання частоти в точці калібрування практично повністю визначатиметься точністю прецезійного частотоміра:

$$u_{gen} \approx u_q = \sqrt{S^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\delta_q \cdot f_q}{100\%} \right)^2}.$$

Оскільки за умови суттєвості варіації результатів вимірювання різницевої частоти, складова невизначеності, оцінена за типом В буде домінувати, то вид її розподілу і буде визначати квантільний коефіцієнт, за допомогою, якого буде оцінюватись розширена невизначеність оцінки частоти генератора в точці калібрування: $U(P) = t \cdot u_{gen}$.

Для випадку нормально розподілу результатів вимірювання різницевої частоти і довірчої ймовірності $t = 2$, для рівномірного розподілу - $t \approx 2,6$, для інших видів розподілу передбачас розрахунок, спираючись на відомі аналітичні вирази функції розподілу.

Реалізація зазначених алгоритмів опрацювання даних вимірювань може закладена в автоматизовану системи, що швидко і надійно формуватиме результати щодо процедури калібрування генератора частоти.

Висновки з розділу 3. В даному розділі було описано загальний алгоритм оцінювання результату вимірювання та його похибки. Було висунуто вимоги до оцінки міри центральної тенденції (оцінка повинна бути ефективною, обґрунтованою та незміщеною). Також було визначено оцінки міри центральної тенденцію та відповідно СКВ для кожного з вірогідних законів розподілу вхідної величини. Загальні дані наведені у таблиці 3.1. Було прийнято рішення з використання статистичних критеріїв для пошуку викидів: Смірнова (для нормального закону розподілу) та Ірвіна (для рівномірного, трикутного та експоненціального законів). Використання 2-х критеріїв обумовлено підвищенням рівня можливої детекції викидів для різних законів розподілу.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ ІНТЕРНЕТ КАЛІБРУВАННЯ

Алгоритм функціонування системи інтернет калібрування можна розділити на 4 етапи:

Етап №1 полягає у моделюванні роботи еталонного генератора та генератора, що калібрується, знаходженні різницевої частоти (еталонного ЗВТ на досліджуваного генератора) яка поступає на вхід частотоміра, а також накопичення 100 значень різницевої частоти для подальшого аналізу. Після ініціалізації програми та введення частоти, автоматично генеруються похибки еталонного та генератора, що калібрується відповідно до похибок, зазначених в їх технічній документації. Після цього отримані значення вхідних частот поступають на вхід частотоміра, де відбувається їх підрахунок та знаходиться різниця показань двох приладів. Далі відбувається накопичення 100 значень різницевої частоти для подальшого аналізу. 100 значень різницевої частоти з похибками генераторів та цифрового вимірювача частоти виводяться на екран. Алгоритм наведений на рисунку 4.1.

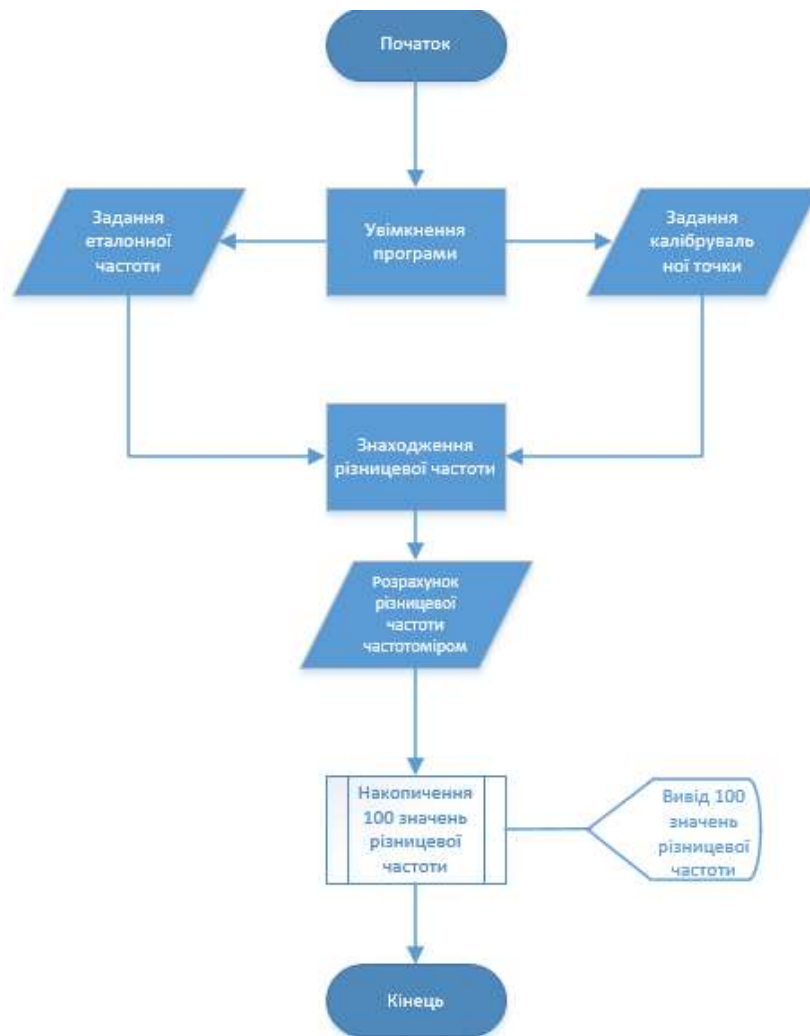


Рисунок 4.1 Алгоритм знаходження різницевої частоти

Етап №2 полягає у знаходженні виду розподілу вхідного сигналу, використовуючи критерій Пірсона . Алгоритм зображений на рисунку 4.2. Отримана різницева частота з цифрового вимірювача частоти подається на робочу станцію для подальшої статистичної обробки. Сигнал ділиться на 7 рівних піддіапазонів, це реалізовано шляхом підрахунку максимального та мінімального значень, а також знаходженням «кроку», який і визначає границі піддіапазонів. Після цього відбувається підрахунок кількості значень які потрапили до кожного з піддіапазонів, це необхідно для визначення закону розподілу вхідної величини. Даний процес реалізований шляхом порівняння отриманих даних з теоретичними, використовуючи критерій Пірсона. Вид розподілу вважається той, розбіжність якого є найменшою в порівнянні з розрахованими теоретичними значеннями для нормального,

рівномірного, трикутного та експоненціального законів розподілу. Алгоритм 2-го етапу наведений на рисунку 4.2.

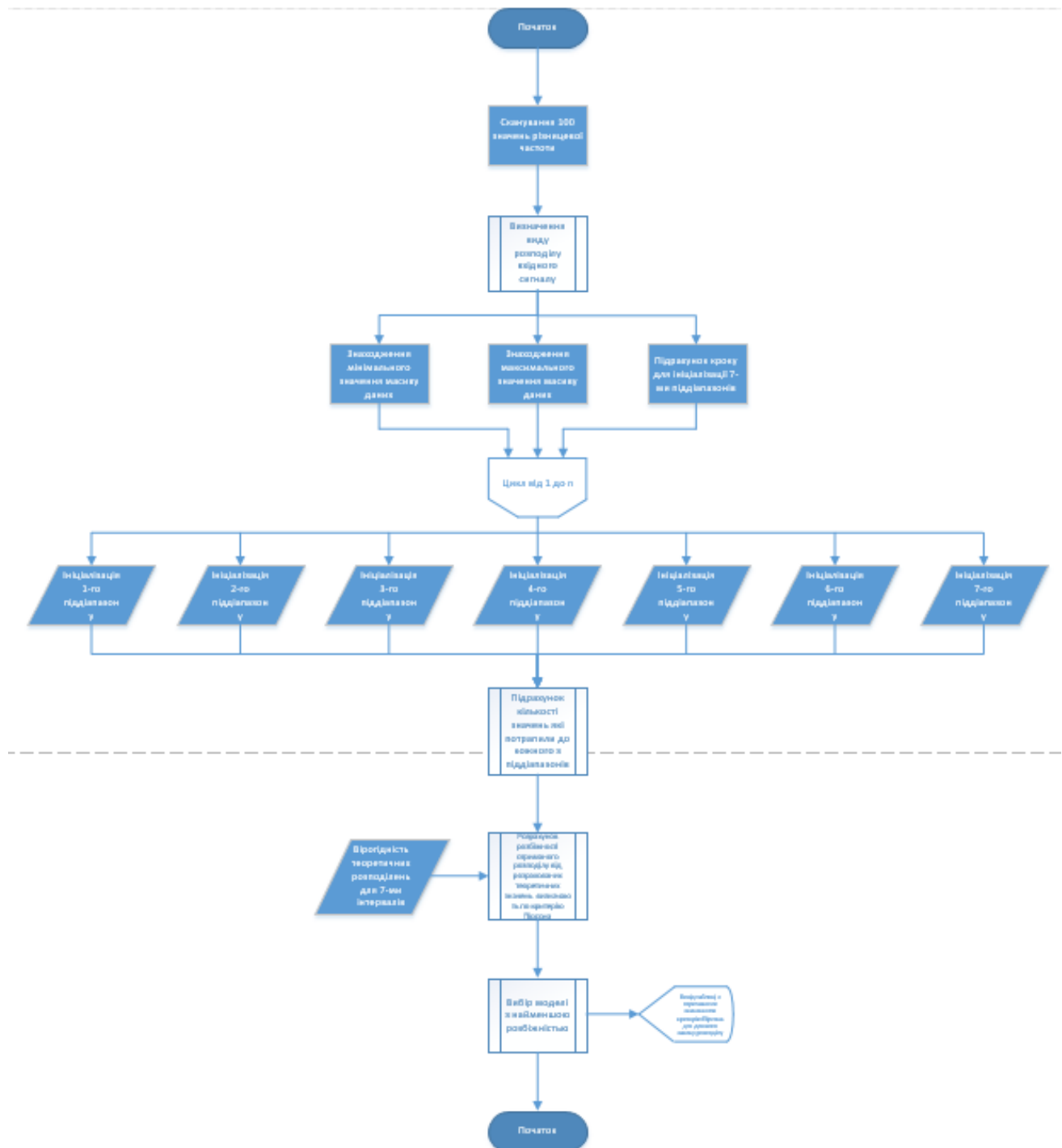


Рисунок 4.2 Алгоритм знаходження виду розподілу вхідного сигналу

Етап №3 полягає у знаходженні викидів та їх вилучення з оброблюваного масиву даних. Відповідно до знайденого виду розподілу вхідного сигналу використовується один з критеріїв знаходження викидів (Смірнова, або Ірвіна). З виходу частотоміра отримується масив 100 значень

різницевої частоти. Відбувається ранжування вибірки, розрахунок середнього значення та розрахунок СКВ, а також отримання інформації щодо виду розподілу вхідної величини. Для підвищення точності знаходження викидів використовується 2 критерії. Для нормального закону розподілу – критерій Смірнова, для рівномірного, трикутного та експоненціального – критерій Ірвіна. У аномальності підозрюються перше та останнє значення ранжованої вибірки. Вони порівнюються з теоретичними значеннями для заданого об'єму вибірки. Якщо теоретичне значення більше за розраховане, то приймається рішення про відсутність викидів. В іншому разі значення вилучається з вибірки. Алгоритм зображений на рисунку 4.3.

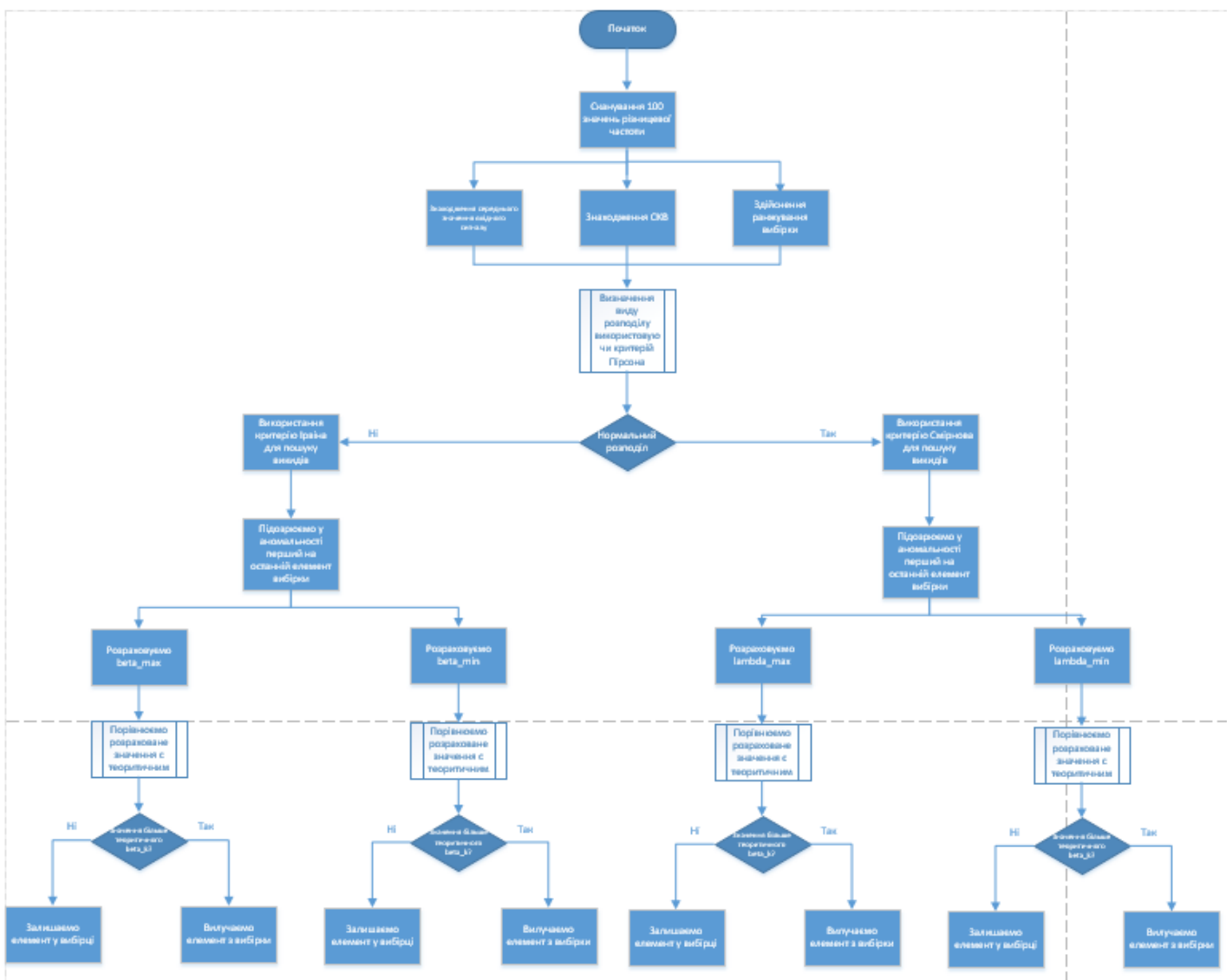


Рисунок 4.3 Алгоритм знаходження викидів

Етап №4 полягає у розрахунку ефективної оцінки очікування відповідно до отриманого закону розподілу.

Відповідно висунутим вимогам до оцінок міри центральної тенденції (оцінка має бути ефективною, обґрунтованою та незміщеною) відбувається розрахунок ефективної оцінки для отриманого виду розподілу вхідної величини. Для нормального закону мірою центральної тенденції є середнє арифметичне та СКВ. Для рівномірного та трикутного законів відбувається розрахунок середнього значення та СКВ. При експоненціальному законі розраховується медіана та СКВ. Після цього, на основі розрахованих даних відбувається розрахунок стандартної невизначеності, яка обумовлена невизначеністю еталонного генератора та генератора, що калібрується. Після цього знаходиться розширена невизначеність включаючи коефіцієнт охоплення для того, чи іншого виду розподілу. Алгоритм зображений на рисунку 4.4.

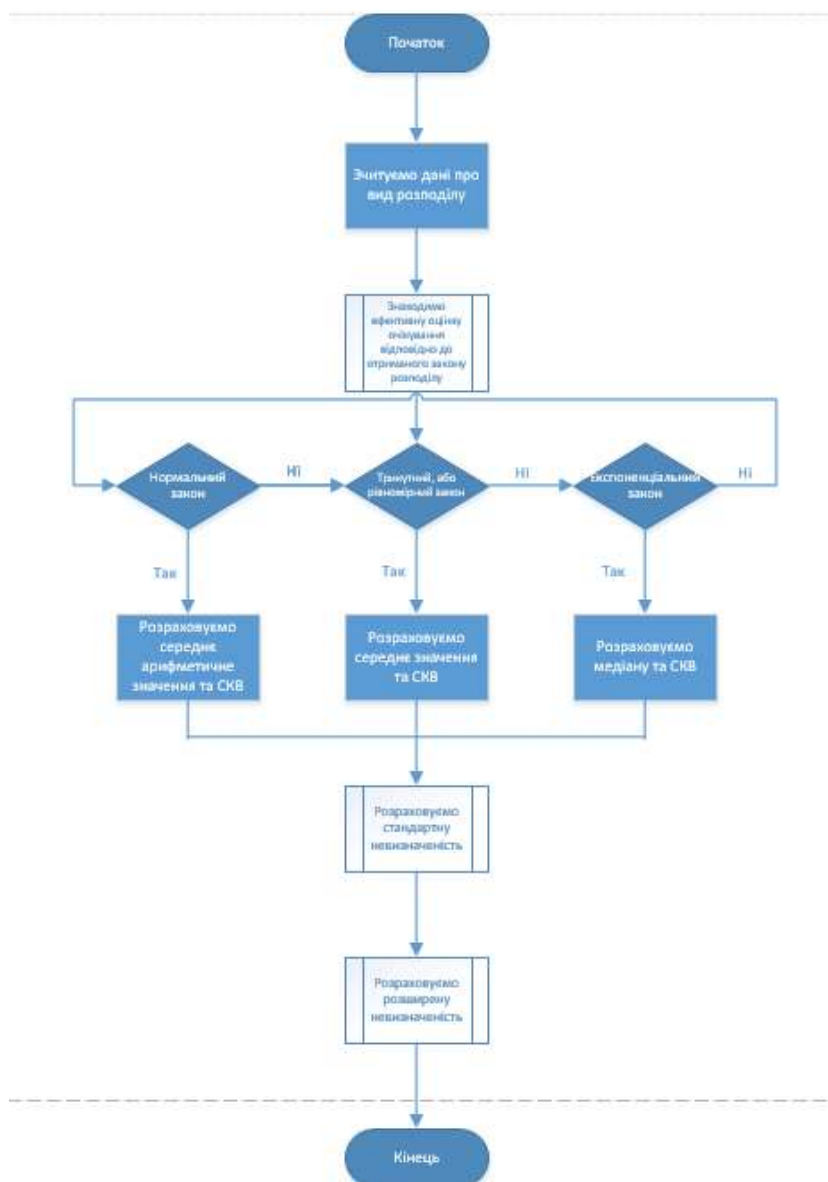


Рисунок 4.4 Алгоритм знаходження викидів

Висновки з розділу 4.

В розділі було запропоновано алгоритм функціонування системи інтернет калібрування генератора частоти. Алгоритм поділений на 4 частини, де детально описано функціональні можливості системи інтернет калібрування. Загалом система моделює наближені до реальних сигнали з еталонного генератора та генератора, що калібрується. Після цього знаходиться різницева частота двох сигналів, здійснюється подальша статистична обробка отриманої інформації та знаходження кінцевого результату у вигляді стандартної та розширеної невизначеностей результату вимірювання різницевої частоти.

5. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Першим етапом у моделюванні роботи системи інтернет калібрування є відтворення роботи досліджуваного та еталонного генераторів. Моделювання проводиться з врахуванням систематичної та випадкової складових похибок. Після цього відбувається накопичення 100 значень різницевої частоти двох сигналів. Накопичений макет значень зображений на рисунку 5.1.

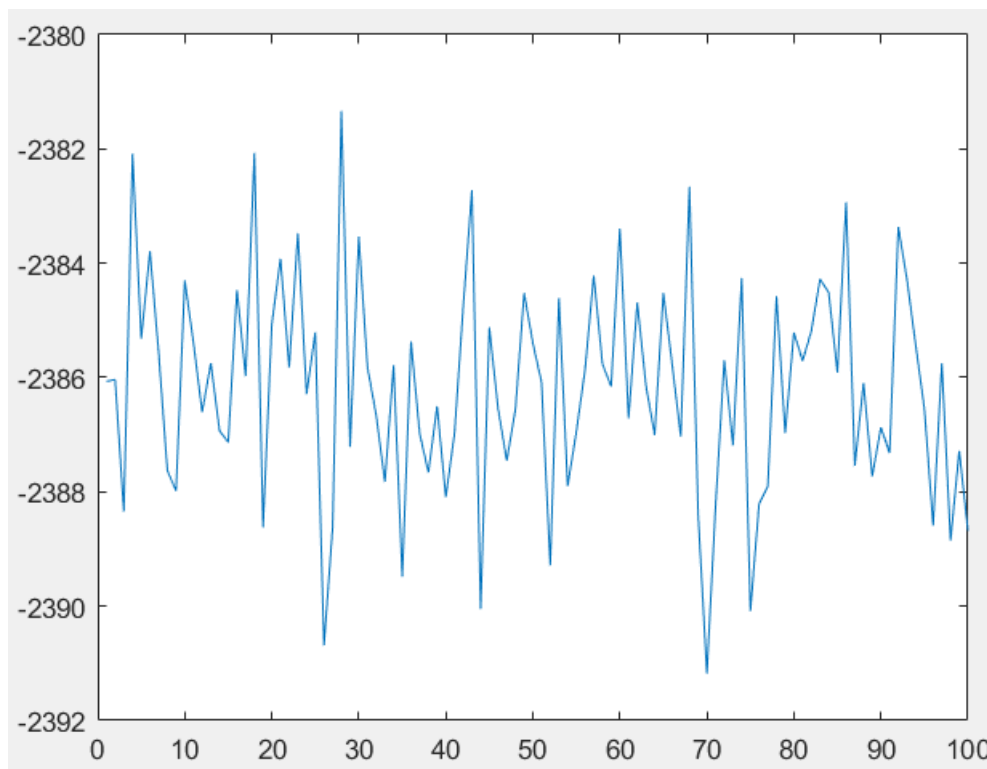


Рис. 5.1 100 значень різницевої частоти

Після цього ініціалізуємо розбиття вхідного масиву даних на 7 однакових піддіапазонів. Для цього знаходимо максимальне та мінімальне значення та «крок», який буде визначати границі піддіапазонів. Лістинг коду MatLab програми наведений далі:

```

maxim = max (f_dif);
m = min (f_dif);
step = (maxim - m)/7;

```

Наступним кроком буде підрахунок кількості значень які потрапили до кожного з піддіапазонів. Результатом стане наявність даних для подальшого визначення виду розподілу вхідного сигналу. Дана дія реалізується за допомогою наступного циклу:

```

range1 = 0; range2 = 0; range3 = 0; range4 = 0; range5 =
0; range6 = 0; range7 = 0;

for ii =1: length(f_dif)
    if (f_dif(ii) >= m && f_dif(ii) < (m+step))
        range1 = range1 + 1;
    elseif (f_dif(ii) >= m+step && f_dif(ii) < (m+2*step))
        range2 = range2 + 1;
    elseif (f_dif(ii) >= m+2*step && f_dif(ii) <
(m+3*step))
        range3 = range3 + 1;
    elseif f_dif(ii) >= m+3*step && f_dif(ii) < (m+4*step)
        range4 = range4 + 1;
    elseif f_dif(ii) >= m+4*step && f_dif(ii) < (m+5*step)
        range5 = range5 + 1;
    elseif f_dif(ii) >= m+5*step && f_dif(ii) < (m+6*step)
        range6 = range6 + 1;
    elseif f_dif(ii) >= m+6*step && f_dif(ii) < (m+7*step)
        range7 = range7 + 1;
    end
end
end

```

За для наглядного відображення інформації будуюмо гістограму розподілу. Лістинг коду побудови гістограми наведений далі:

```

subranges =
[range1;range2;range3;range4;range5;range6;range7];
figure (2); hist (subranges)
figure (3); bar (subranges)

```

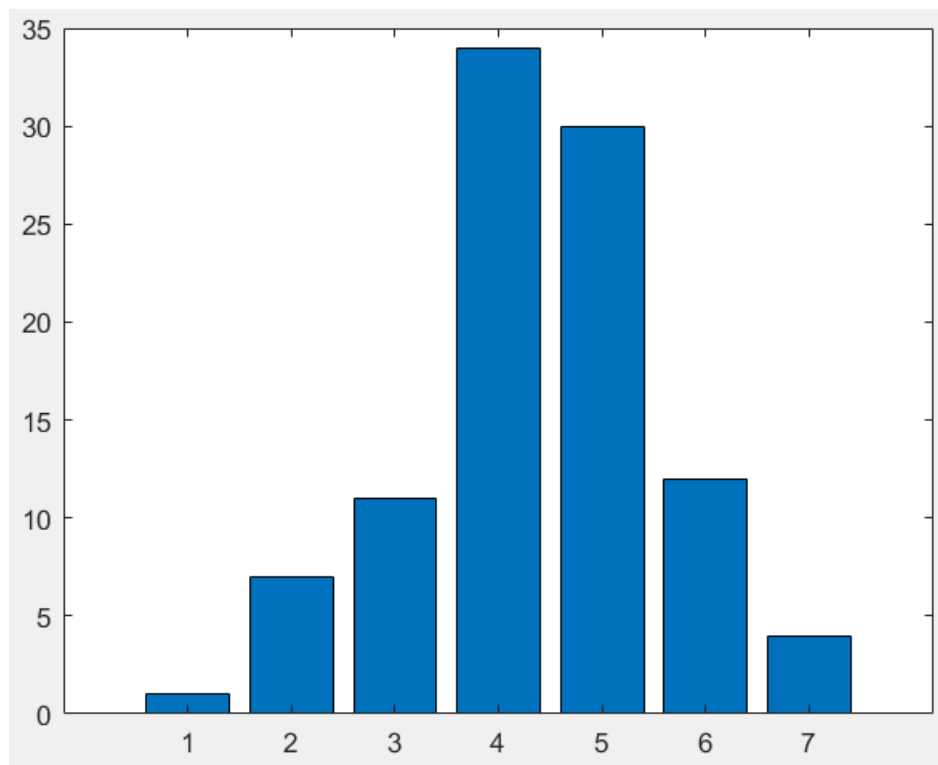


Рис. 5.2 Гістограма розподілу вхідного сигналу

Наступним кроком є безпосереднє визначення закону розподілу вхідної величини використовуючи критерій Пірсона, тобто порівняння отриманих значень з теоретичними. Лістинг коду наведений далі:

```
% Критерій Пірсона
%Нормальный закон

n1 = 0.02;
n2 = 0.09;
n3 = 0.23;
n4 = 0.32;
n5 = 0.23;
n6 = 0.09;
n7 = 0.02;

Chin1 = (range1/100-n1)^2/n1;
Chin2 = (range2/100-n2)^2/n2;
Chin3 = (range3/100-n3)^2/n3;
```

```
Chin4 = (range4/100-n4)^2/n4;  
Chin5 = (range5/100-n5)^2/n5;  
Chin6 = (range6/100-n6)^2/n6;  
Chin7 = (range7/100-n7)^2/n7;  
Chin = Chin1+Chin2+Chin3+Chin4+Chin5+Chin6+Chin7;
```

```
%Трикутний закон
```

```
t1 = 0.04;  
t2 = 0.12;  
t3 = 0.2;  
t4 = 0.28;  
t5 = 0.2;  
t6 = 0.12;  
t7 = 0.04;
```

```
Chit1 = (range1/100-t1)^2/t1;  
Chit2 = (range2/100-t2)^2/t2;  
Chit3 = (range3/100-t3)^2/t3;  
Chit4 = (range4/100-t4)^2/t4;  
Chit5 = (range5/100-t5)^2/t5;  
Chit6 = (range6/100-t6)^2/t6;  
Chit7 = (range7/100-t7)^2/t7;  
Chit = Chit1+Chit2+Chit3+Chit4+Chit5+Chit6+Chit7;
```

```
% Експоненціальний закон
```

```
e1 = 0.01;  
e2 = 0.5;  
e3 = 0.18;  
e4 = 0.52;  
e5 = 0.18;  
e6 = 0.5;  
e7 = 0.1;
```

```
Chie1 = (range1/100-e1)^2/e1;  
Chie2 = (range2/100-e2)^2/e2;  
Chie3 = (range3/100-e3)^2/e3;  
Chie4 = (range4/100-e4)^2/e4;  
Chie5 = (range5/100-e5)^2/e5;  
Chie6 = (range6/100-e6)^2/e6;  
Chie7 = (range7/100-e7)^2/e7;  
Chie = Chie1+Chie2+Chie3+Chie4+Chie5+Chie6+Chie7;
```

```
% Рівномірний закон (uniform distribution)
```

```
u1 = 0.1428;  
u2 = 0.1428;  
u3 = 0.1428;  
u4 = 0.1428;  
u5 = 0.1428;
```

```

u6 = 0.1428;
u7 = 0.1428;

Chiu1 = (range1/100-u1)^2/u1;
Chiu2 = (range2/100-u2)^2/u2;
Chiu3 = (range3/100-u3)^2/u3;
Chiu4 = (range4/100-u4)^2/u4;
Chiu5 = (range5/100-u5)^2/u5;
Chiu6 = (range6/100-u6)^2/u6;
Chiu7 = (range7/100-u7)^2/u7;
Chiu = Chiu1+Chiu2+Chiu3+Chiu4+Chiu5+Chiu6+Chiu7;

```

Для зручності дані заносяться до таблиці. Згідно обраному аглогитму роботи, видом розподілу вхідної величини визнається той, значення χ^2 якого є найменшим.

	1 Chisquere
1 Нормальний закон	0.1246
2 Трикутний закон	0.1467
3 Експоненціальний закон	0.8641
4 Рівномірний закон	0.6912

Рис. 5.3 Таблиця значень χ^2 для кожного з розподілів

Наступним кроком є визначення наявності викидів. Для цього необхідно виконати підготовчі дії, а саме визначити вид розподілу, проранжувати вибірку, визначити мінімальне та максимальне значення, які в подальшому будуть підозрюватися як викиди. А також, знайти середнє значення та середньо квадратичне відхилення. Дані дії виконуються за допомогою стандартних MatLab функцій. Лістинг коду наведено далі:

```

Norm = Chisquere (1);
Tria = Chisquere (2);
Expon = Chisquere (3);
Uni = Chisquere (4);
maxf_dif = max (f_dif);
m_v = mean (f_dif);
S = std (f_dif);
minf_dif = min (f_dif);
f_dif_sort = sort (f_dif);

```

Далі, відповідно до виду розподілу, використовуємо критерій Ірвіна, або Смірнова для визначення видиків та за необхідності їх вилучення з вхідного масиву даних. Лістинг коду наведено далі:

```
% Критерій Смірнова, нормальний розподіл

%Підозрюємо в аномальності перший та останній елементи
вибірки

% Для максимуму
beta_max = (maxf_dif - m_v)/S;
beta_k = 3.285;

if beta_max > beta_k
    crmax = 1;
elseif beta_max < beta_k
    crmax = 0;
end

% Для мінімуму
beta_min = (m_v - minf_dif)/S;

if beta_min > beta_k
    crmin = 1;
elseif beta_min < beta_k
    crmin = 0;
end

else

% Критерій Ірвіна, рівномірний, трикутний, експоненціальний
розподіли

%Підозрюємо в аномальності перший та останній елементи
вибірки

% Для максимуму
bmaxf_dif = max(f_dif(f_dif<max(f_dif))); %before max
lambda_max = (maxf_dif-bmaxf_dif)/S;
lambda_id = 1;

if lambda_max > lambda_id
    c_rmax = 1; %compare result max
elseif lambda_max < lambda_id
    c_rmax = 0;
end
```



```

%Dля мінімуму

aminf_dif = min(f_dif(f_dif>min(f_dif))); %after min
lambda_min = (aminf_dif-minf_dif)/S;

if lambda_max > lambda_id
    c_rmin = 1; %compare result min
elseif lambda_max < lambda_id
    c_rmin = 0;
end

end

% Тест удаления выброса

if c_rmax == 1

f_dif_sort = (f_dif_sort (1:end-1));

end

if c_rmin ==1

f_dif_sort = (f_dif_sort (2:end));

end

```

Останнім кроком є знаходження ефективної оцінки очікування та СКВ. В залежності від виду розподілу вхідної величини, метод знаходження буде різнитися. Знаючи дану інформацію стає можливим знаходження стандартної та розширеної невизначеності результату вимірювання різницевої частоти. Лістинг коду наведено далі:

```

if mChi == Norm

    mu = m_v;
    Sn = S;

elseif mChi == Tria || mChi == Uni

    av_x = (maxf_dif-minf_dif)/2;

    Sn = (maxf_dif-minf_dif)/(2*sqrt(3));

else mChi == Expon

```

```

Me = (f_dif_sort (50) + f_dif_sort (51))/2;

sume = 0;

for j = 1:length (f_dif)
    sume = sume + (f_dif(j) - m_v)^2;
end
Sn = (sqrt(2)/length (f_dif))*sume;

end
Ufa = Sn/sqrt(length (f_dif));
Ufb = freq_error/sqrt (3);
Ugen = sqrt (Ufa^2+Ufb^2);
Ustandgen = gen_fault/sqrt (3);

Ufr = sqrt (Ugen^2 + Ustandgen^2);
if mChi == Norm
    t = 2;
elseif mChi == Uni
    t = 0.95*sqrt(3);
elseif mChi == Expon
    t = 2.13;
elseif mChi == Tria
    t = 1.91;

end

UP = t*Ugen;

```

ТУТ ФИНАЛ ТАБЛ

Висновок до розділу 5. Моделювання роботи системи інтернет калібрування генераторів частоти було реалізовано на базі продукту компанії Mathworks, а саме MatLab. Він задовольняє основним вимогам до зручності та швидкодії при реалізації системи дистанційного калібрування генераторів частоти. В даному розділі було реалізовано моделювання системи відповідно до розробленого алгоритму та наведений лістинг коду програми.

Література

1. Закон України № 1314-VII від 5 червня 2014 року «Про метрологію та метрологічну діяльність».
2. JCGM 200: 2008. International vocabulary of metrology –Basic and general concepts and associated terms (VIM). Joint Committee on Guides for Metrology (JCGM), 2008. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008.pdf
3. ДСТУ 2681-94 Державний стандарт України. Метрологія. Терміни та визначення.
4. Software Support for Metrology: GPG 19 – Internet-enabled Metrology Systems (NPL Report DEM-ES 012), June 2006. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.internetcalibrations.com/\[NPL%20Report\]%20Software%20Support%20for%20Metrology_GPG%2019%20Internet-enabled%20Metrology%20Systems.pdf/](http://www.internetcalibrations.com/[NPL%20Report]%20Software%20Support%20for%20Metrology_GPG%2019%20Internet-enabled%20Metrology%20Systems.pdf/)
5. Величко О.М. Калібровка засобів вимірювальної техніки через інтернет: стан і перспективи впровадження //Український метрологічний журнал, 2006, №1. – с. 45-49.
6. Величко О.Н., Гурин Р. В., Баранов П.Ф. Организация дистанционной калибровки средств измерений электрических величин // Известия томского политехнического университета, 2014, Т.324, № 5. – с. 108-114. http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2014/v324/i5/13.pdf
7. Величко О.Н., Карпенко С.Р., Гурин Р. В. Дистанційне калібрування аналізаторів якості електричної енергії фірми FLUKE // Збірник наукових праць ОДАТРЯ № 1(2) 2013.

8. Шведова В.В. Інтернет-метрологія і її роль в сучасному інформатизованому суспільстві // Збірник статей учасників тридцять п'ятої Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційний потенціал світової науки – ХХІ сторіччя», м. Запоріжжя 2015 (24-27 листопада 2015) – С. 37 – 39.
9. Інформація про державні первинні еталони, які набули статус національних еталонів, відповідно до пункту 3 розділу Х «Прикінцеві та перехідні положення» Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність». Режим доступу: <http://me.gov.ua/Documents/List?lang=uk-UA&id=cb9e4355-668e-4170-89af-ce23d4e0857e&tag=NatsionalnaEtalonnaBaza>
10. Материалы потребителя синхронизации шкал времени. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=90&L=1/>
11. Рекомендация МСЭ-R TF.460-6. Излучение стандартных частот и сигналов времени (Вопрос МСЭ- R 102/7), 2002. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/tf/R-REC-TF.460-6-200202-I!!PDF-R.pdf.
12. Вторичный эталон единиц времени и частоты ВЕТУ 07-01-03-10. ДП «Укрметртестстандарт», 2014. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.metrology.kiev.ua/ru/kievskoe-vremya/843-vtorichnyj-etalon-edinits-vremeni-i-chastoty>.
13. ASCII. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/ASCII>.
14. UDP. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/UDP>.
15. Датаграмма. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0>.

16. ICMP. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/ICMP>.
17. NTP. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/NTP>.
18. Vostro 15 (3568). Офіційний сайт компанії Dell. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.dell.com/ua/business/p/vostro-15-3568-laptop/pd>.
19. Захаров И.П., Кукуш В. Д. Теория неопределённости в измерениях // Харьков, «Консум», 2002, – с. 30-39, приложение А, приложение Б.