

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних техноогій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

САВЧЕНКО ВІКТОРІЯ ІГОРІВНА

Інформаційно-вимірювальна система відтворення та передачі одиниці часу та частоти на базі GPS-еталона / Information and measurement system for reproducing and transmitting time and frequency units based on the GPS standard

спеціальність 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
МТІР – 41 В.І.Савченко

Науковий керівник :
к.т.н. доцент Б.О. Масляк

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту

«___» _____ 2026р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

Тернопіль - 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"

Спеціальність: 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
Освітньо-професійна програма – Технології інтернету речей

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС

_____ А.І. Сегін
“ _____ ” _____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Савченко Вікторії Ігорівні
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Інформаційно-вимірювальна система відтворення та передачі одиниці часу та частоти на базі GPS-еталона / Information and measurement system for reproducing and transmitting time and frequency units based on the GPS standard

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк
затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи: 25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Фізичні основи одиниць часу та частоти.
2. Методи відтворення та зберігання одиниць часу та частоти
3. Принципи передачі розміру одиниці часу і частоти.
4. Нормативно-правова база. ДСТУ та міжнародні стандарти.

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Архітектура та принцип роботи системи GPS, GPS-дисциплінований генератор (GPSDO): структура та параметри
2. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи.
3. Технологія передачі даних про хімічні загрози.
4. Програмно-апаратна реалізація системи.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема системи відтворення та передачі одиниці часу та частоти хімічних загроз.
2. Схема апаратної реалізації системи.

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Масляк Б.О.		
2	Масляк Б.О.		
3	Масляк Б.О.		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Особливості функціонування GPS – системи	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Обґрунтування вибору реалізації технічного рішення та апаратних компонентів системи	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Апаратно-програмна реалізація пристрою	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	

Студент

_____ Савченко В.І.
(підпис)

Керівник роботи

_____ к.т.н., доц. Масляк Б.О.
(підпис)

РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження — процеси відтворення та передачі одиниць часу і частоти в метрологічних та телекомунікаційних системах.

Предмет дослідження — інформаційно-вимірювальна система синхронізації часу та частоти на основі GPS-еталона з дисциплінованим кварцовим генератором.

Мета роботи — розроблення інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниць часу і частоти на базі GPS-еталона, яка забезпечує метрологічно простежувану синхронізацію з мінімальною нестабільністю вихідного сигналу.

У роботі виконано аналіз методів відтворення та передачі одиниці часу і частоти, розглянуто принципи формування сигналу 1PPS приймачами GPS/GNSS та способи його використання для дисциплінування опорного генератора (GPSDO). Обґрунтовано застосування кварцового генератора (ОСХО) як джерела короткострокової стабільності частоти. Розроблено структуру системи на базі мікроконтролера ESP32, що реалізує алгоритм фазочастотного підстроювання (PLL/FLL) з цифровим керуванням генератором через ЦАП. Розглянуто протоколи мережевої передачі часу NTP та PTP (IEEE 1588) з оцінюванням досяжної точності синхронізації. Виконано метрологічне оцінювання невизначеності вимірювань відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018 (GUM) та розраховано Allan-дисперсію для характеристики частотної нестабільності системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування розробленої системи як вторинного еталона часу та частоти в метрологічних лабораторіях, телекомунікаційній інфраструктурі та системах точної синхронізації промислових мереж.

Ключові слова: GPS-ЕТАЛОН, ЧАСТОТА, ЧАС, GPSDO, ОСХО, NTP, PTP, НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ, МІКРОКОНТРОЛЕР.

ABSTRACT

The object of the study is the processes of reproduction and transmission of time and frequency units in metrological and telecommunication systems.

The subject of the study is an information and measuring system for time and frequency synchronization based on a GPS standard with a disciplined quartz oscillator.

The purpose of the work is to develop an information and measuring system for reproduction and transmission of time and frequency units based on a GPS standard, which provides metrologically traceable synchronization with minimal instability of the output signal.

The work analyzes the methods of reproduction and transmission of time and frequency units, considers the principles of 1PPS signal formation by GPS/GNSS receivers and methods of its use for disciplining the reference oscillator (GPSDO). The use of a quartz oscillator (OCXO) as a source of short-term frequency stability is justified. The structure of the system based on the ESP32 microcontroller is developed, which implements the phase-locked loop (PLL/FLL) algorithm with digital control of the oscillator via a DAC. The network time transfer protocols NTP and PTP (IEEE 1588) are considered with an assessment of the achievable synchronization accuracy. A metrological assessment of measurement uncertainty is performed in accordance with DSTU ISO/IEC Guide 98-3:2018 (GUM) and the Allan dispersion is calculated to characterize the frequency instability of the system. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using the developed system as a secondary time and frequency standard in metrological laboratories, telecommunication infrastructure and systems for precise synchronization of industrial networks.

Keywords: GPS-STANDARD, FREQUENCY, TIME, GPSDO, OCXO, NTP, PTP, UNCERTAINTY OF MEASUREMENT, MICROCONTROLLER.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
Вступ	8
Розділ 1. Основи відтворення та передачі одиниці часу і частоти	11
1.1. Фізичні основи одиниць часу та частоти та методи відтворення і зберігання	11
1.2. Особливості передачі розміру одиниці часу і частоти та нормативно-правова база	16
1.3. Постановка задачі	21
Розділ 2. GPS-еталон як засіб відтворення часу і частоти	25
2.1. Архітектура та принцип роботи системи GPS, GPS-дисциплінований генератор: структура та параметри	25
2.2. Сигнал 1PPS та його метрологічні характеристики	31
2.3. Джерела похибок при використанні GPS-еталона	34
Розділ 3. Розробка інформаційно-вимірювальної системи	40
3.1. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи	40
3.2. Апаратна реалізація: вибір, обґрунтування компонентів та схемна реалізація системи	42
3.3. Програмне забезпечення системи	46
Висновки	53
Список використаних джерел	54

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Інформаційно-вимірювальна система відтворення та передачі одиниці часу та частоти на базі GPS-еталона / Information and measurement system for reproducing and transmitting time and frequency units based on the GPS standard	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Савченко В.І.						
Перевірив.		Масляк Б.О.					6	62
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ. МТІР-41		
Н. Контр.		Масляк Б.О						
Затверд.		Сегін А.І.						

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

GPSDO — GPS Disciplined Oscillator (GPS-дисциплінований генератор)

GNSS — Global Navigation Satellite System (глобальна навігаційна супутникова система)

IBC — інформаційно-вимірювальна система

ЛППП — лічильно-імпульсний перетворювач

МЦЗЧ — метрологічний центр зразкових частот

НСЧ — нестабільність частоти

ОСХО — Oven Controlled Crystal Oscillator (термостатований кварцовий генератор)

ПЗ — програмне забезпечення

PID — Proportional-Integral-Derivative (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор)

PLL — Phase-Locked Loop (система фазового автопідстроювання частоти)

1PPS — One Pulse Per Second (один імпульс за секунду)

TAI — International Atomic Time (міжнародний атомний час)

UTC — Coordinated Universal Time (скоординований всесвітній час)

UTC(UA) — національна шкала координованого часу України

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Точне вимірювання часу та частоти є одним із ключових завдань сучасної метрології, оскільки ці величини пронизують практично всі галузі науки, техніки та промисловості. Системи телекомунікацій, енергетичні мережі, навігаційне обладнання, фінансові транзакційні платформи, наукові дослідження — всі вони залежать від стабільних та точних джерел часу і частоти.

Розвиток глобальних навігаційних супутникових систем, передусім GPS (Global Positioning System), відкрив принципово новий шлях до відтворення і передачі одиниць часу та частоти. Сучасні GPS-приймачі здатні забезпечувати синхронізацію із точністю до одиниць наносекунд, що робить їх ефективною основою для побудови вторинних метрологічних еталонів у більшості країн світу, у тому числі й в Україні [1].

Відповідно до ДСТУ 3538:2009 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань часу і частоти», «... державний первинний (національний) еталон призначено відтворювати і зберігати одиниці часу і частоти та національної шкали координованого часу України та передавати розміри одиниць та шкали часу за допомогою вторинних і робочих еталонів». Для виконання цієї функції в умовах реальних підприємств, лабораторій і служб єдиного часу необхідні автоматизовані інформаційно-вимірювальні системи, які здатні приймати сигнал від GPS-еталона, обробляти його та передавати у придатному для споживачів вигляді.

ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків) підтримує державний первинний еталон одиниць часу та частоти, і, як зазначено на офіційному сайті установи, за результатами роботи групи хранителів еталону часу формується національна шкала координованого часу України UTC (UA). Нестабільність частоти зазначеного еталона складає $\sim(2-3) \cdot 10^{-14}$ на добовому інтервалі часу. Проте доступ до цього еталона безпосередньо для більшості промислових і наукових споживачів є обмеженим, що зумовлює потребу у розробці вторинних метрологічних засобів на базі GPS-еталонів.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

На міжнародному рівні проблематика GPS-дисциплінованих генераторів (GPSDO) активно досліджується. Так, у роботі Левіна (Levine, 2009) [4] детально розглянуто принципи синхронізації часових шкал за допомогою сигналів GPS та питання оцінювання невизначеності вимірювань при використанні GPSDO як частотного стандарту. Дослідницька група Технічного університету Ільменау (Німеччина) [5] розробила стенд для характеристики GPS-дисциплінованих генераторів в умовах БПЛА, що демонструє перспективність застосування таких систем у мобільних і розподілених вимірювальних комплексах.

Аналіз методів синхронізації еталонних частотно-часових сигналів, проведений вченими Харківського національного університету Повітряних Сил [6], показав, що застосування GPS забезпечує прийнятну точність синхронізації для більшості споживачів, але потребує врахування специфічних джерел похибок — іоносферної та тропосферної затримки, багатопроменевого поширення сигналу, нестабільності годинника супутника тощо.

Таким чином, актуальність даної бакалаврської роботи зумовлена: по-перше, широкою потребою промисловості та науки в точних і доступних засобах відтворення та передачі одиниць часу та частоти; по-друге, відсутністю єдиного комплексного підходу до побудови GPS-базованих ІВС у вітчизняній науково-технічній практиці; по-третє, необхідністю верифікації метрологічних характеристик таких систем відповідно до діючих стандартів України.

Метою роботи є розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниці часу та частоти на базі GPS-еталона, що забезпечує необхідну точність і відповідає вимогам чинної нормативної бази.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. проаналізувати сучасний стан та методи відтворення і передачі одиниць часу та частоти в Україні та світі;
2. дослідити принципи побудови GPS-дисциплінованих генераторів та їх метрологічні характеристики;
3. обґрунтувати структуру інформаційно-вимірювальної системи, вибрати та обґрунтувати апаратну елементну базу;

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		9

4. розробити програмне забезпечення для збору, обробки та передачі вимірювальної інформації;

5. провести метрологічне дослідження розробленої системи та оцінити її похибки;

6. порівняти характеристики розробленої системи з наявними аналогами.

Об'єктом дослідження є процес відтворення та передачі одиниць часу та частоти.

Предметом дослідження є інформаційно-вимірювальна система на базі GPS-еталона.

Методи дослідження: системний аналіз, методи теорії вимірювань та обробки сигналів, метод фазового автопідстроювання частоти (PLL), статистичні методи оцінювання похибок, метод аллан-дисперсії для аналізу нестабільності частоти.

Наукова новизна полягає у розробці оригінальної структури ІВС, яка поєднує GPS-дисциплінований термостатований кварцовий генератор (ОСХО) з цифровим блоком обробки та автоматичного формування вихідних сигналів у форматах 1PPS, 10 МГц та NTP/PTP для різних груп споживачів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої системи як вторинного робочого еталона у метрологічних лабораторіях, на підприємствах зв'язку, в наукових установах та в системах єдиного часу.

Структура роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел 15 найменувань та 0 додатків. Загальний обсяг роботи складає 55 сторінок.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

1. ОСНОВИ ВІДТВОРЕННЯ ТА ПЕРЕДАЧІ ОДИНИЦІ ЧАСУ І ЧАСТОТИ

1.1. Фізичні основи одиниць часу та частоти та методи відтворення і зберігання

Час і частота є фізичними величинами, що мають найнижчу відносну невизначеність вимірювання серед усіх одиниць Міжнародної системи одиниць (СИ). Саме ця властивість зумовила їх особливу роль в сучасній метрології: на вимірюваннях часу і частоти базуються визначення одиниць довжини, електричного струму та навіть маси. Розуміння фізичних основ цих величин є необхідною передумовою для розробки будь-якої інформаційно-вимірювальної системи у цій галузі.

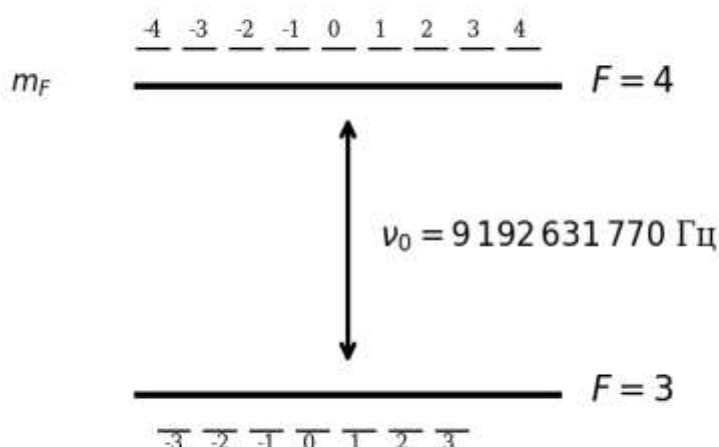
1.1.1. Визначення секунди та її фізичний зміст

Сучасне визначення секунди прийняте Генеральною конференцією з мір і ваг (ГКМВ) у 1967 році і ґрунтується на властивостях атома цезію-133. Згідно з діючою редакцією Міжнародної системи одиниць (SI Brochure, 9th edition, 2019), «... секунда є часом, рівним 9 192 631 770 періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133». Ця величина є точною, оскільки вона задає саме визначення секунди, а не результат вимірювання.

Фізичним підґрунтям цього визначення є явище магнітного резонансу в надтонкій структурі атома. Атом цезію-133 у основному електронному стані $6^2S_{1/2}$ має два надтонких рівні, що виникають внаслідок взаємодії магнітних моментів ядра і електронної оболонки. Квантове число повного кутового моменту F набуває значень 3 і 4. Перехід між цими рівнями відповідає частоті 9 192 631 770 Гц, тобто знаходиться у мікрохвильовому діапазоні. Оскільки ця частота визначається фундаментальними константами і практично не залежить від зовнішніх умов (виміри проводяться при температурі 0 К, у стані спокою та відсутності зовнішніх полів), вона слугує ідеальним еталоном.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

Надтонка структура основного стану



$6^2S_{1/2}$ — основний стан Cs-133

Рисунок 1.1 — Схема надтонкої структури основного стану атома цезію-133

Відносна невизначеність відтворення секунди за допомогою найкращих цезієвих фонтанних реперів у 2024 році досягла рівня $2 \cdot 10^{-16}$, що є найвищою точністю серед усіх реалізованих одиниць СІ. Для порівняння, найточніші оптичні годинники на стронції або ітербії вже продемонстрували невизначеність на рівні 10^{-18} і можуть слугувати основою для майбутньої перевизначення секунди, яке планується ГКМВ.

Зв'язок між одиницями часу та частоти

Час і частота є оберненими величинами: частота $\nu = 1/T$, де T — період коливань. Проте з метрологічної точки зору ці величини вимірюються різними методами і мають різні ланцюги простежуваності. Вимірювання частоти — це, по суті, порівняння з еталонною частотою, тоді як вимірювання часових інтервалів та прив'язка до шкали часу вимагають додаткових процедур синхронізації.

Нестабільність частоти генератора характеризується відносним відхиленням від номінального значення:

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

$$y(t) = [v(t) - v_0] / v_0$$

де $v(t)$ — миттєве значення частоти,

v_0 — номінальна частота.

Фазовий шум $x(t)$ та нестабільність частоти $y(t)$ пов'язані співвідношенням $y(t) = dx(t)/dt$. Накопичена фазова помилка безпосередньо впливає на похибку відліку часу.

Квантові стандарти частоти: цезій, рубідій, водневий мазер

Усі сучасні первинні і вторинні стандарти частоти базуються на явищі квантового переходу в атомних або молекулярних системах. Різні типи генераторів мають різні переваги та обмеження, що визначає сферу їх застосування.

Цезієвий стандарт частоти є первинним стандартом, оскільки його частота безпосередньо пов'язана з визначенням секунди. Принцип роботи базується на методі магнітного резонансу Рабі або, у сучасних реалізаціях, на методі Рамзі (розділені осцилюючі поля). Атомний пучок (або атомний фонтан у новітніх реалізаціях) проходить через зони мікрохвильового збудження, і схема підстроювання утримує частоту генератора у резонансі з атомним переходом. Абсолютна частота відтворюється без необхідності калібрування за зовнішнім стандартом.



Рисунок 1.2 — Структурна схема цезієвого стандарту частоти

Рубідієвий стандарт є пасивним стандартом (вторинним), де частота кварцового генератора підстроюється за частотою переходу 6 834 682 610,904 Гц

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		13

атома рубідію-87. Він значно компактніший і дешевший за цезієвий, але має вищий температурний коефіцієнт і схильний до довгострокового дрейфу частоти. Практична відносна нестабільність частоти рубідієвих стандартів складає $(1-5) \cdot 10^{-11}$ за добу, що є достатнім для більшості промислових застосувань.

Водневий мазер — активний квантовий генератор, в якому молекули водню безпосередньо генерують мікрохвильове випромінювання на частоті 1 420 405 751,768 Гц. Водневий мазер має найнижчий рівень фазового шуму на коротких та середніх інтервалах усереднення серед усіх відомих генераторів, що робить його незамінним у радіоастрономії (РСДБ), навігаційних супутниках і первинних лабораторіях часу. Проте на тривалих інтервалах (понад кілька годин) він програє цезієвому стандарту через ефект тяжіння стінок резонатора — адсорбцію атомів водню.

Для задач, де необхідна висока стабільність на коротких інтервалах у поєднанні з компактністю, застосовуються термостатовані кварцові генератори (ОСХО). Хоча вони поступаються атомним стандартам за абсолютною точністю, ОСХО мають відносну нестабільність 10^{-10} – 10^{-11} за секунду і широко використовуються як внутрішній осцилятор у GPS-дисциплінованих системах (GPSDO).

Дисперсія Аллана як характеристика нестабільності частоти

Класичні статистичні показники (середньоквадратичне відхилення) не є придатними для характеристики нестабільності частоти генераторів через наявність фліккерного шуму та повільного дрейфу, які роблять ряд нестаціонарним. Дональд Аллан у 1966 р. запропонував двовибіркову дисперсію, яка стала основним стандартним інструментом аналізу стабільності частоти:

$$\sigma^2_y(\tau) = (1/2) \cdot \langle (\bar{y}_{n+1} - \bar{y}_n)^2 \rangle$$

де $\bar{y}_n$ — середнє відносне відхилення частоти на n-му інтервалі усереднення τ .

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		14

Квадратний корінь $\sigma_y(\tau)$ називається дисперсією Аллана або відхиленням Аллана (ADEV). Характеристика $\sigma_y(\tau)$ дозволяє розрізнити різні типи шуму за нахилом кривої на log-log графіку: білий частотний шум дає нахил $\tau^{-1/2}$, фліккерний шум — горизонтальну ділянку, випадкове блукання частоти — нахил $\tau^{+1/2}$.

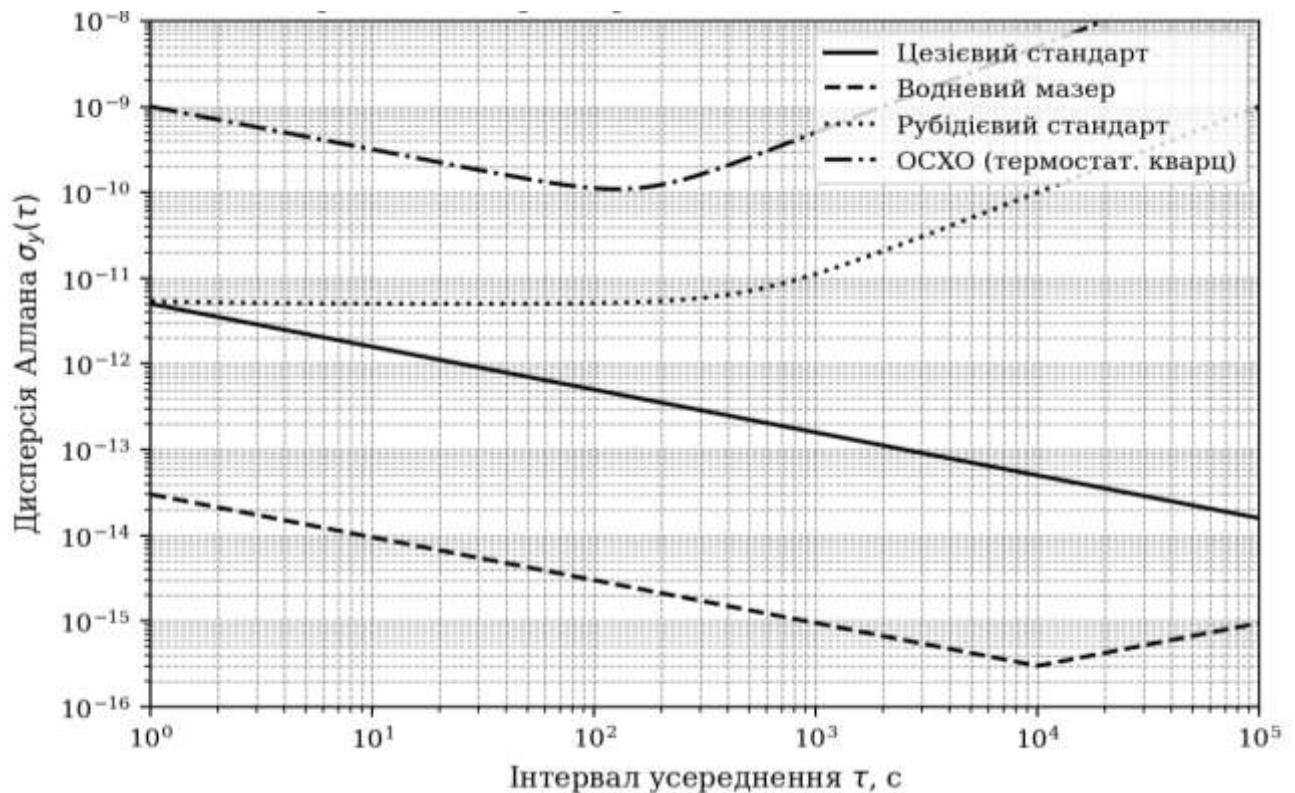


Рисунок 1.3 — Порівняльні залежності дисперсії Аллана від інтервалу усереднення для різних типів генераторів

З рисунку видно, що на коротких інтервалах усереднення найнижчу нестабільність демонструє водневий мазер, тоді як на тривалих — цезієвий стандарт. ОСХО, дисципліновані за GPS, поведуться аналогічно до цезієвого стандарту на великих τ , що є ключовою перевагою GPS-дисциплінованих систем перед автономними кварцовими генераторами.

Ансамблі хранителів часу дозволяють суттєво покращити середньострокову стабільність порівняно з окремим стандартом. Алгоритм AT1 (розроблений NIST) [3] та алгоритм ALGOS (застосовується BIPM для

обчислення Міжнародного атомного часу TAI) [4] об'єднують свідчення кількох годинників, надаючи кожному з них вагу, обернено пропорційну його нестабільності. Отримана «паперова» шкала часу є стабільнішою за будь-який окремий хранитель.

Державний первинний еталон одиниць часу та частоти України, що зберігається в ННЦ «Інститут метрології» (м. Харків), є ансамблем цезієвих та водневих стандартів [5]. Звірка українськоо еталона з еталонами інших країн показують, що його нестабільність частоти $\sim(2-3) \cdot 10^{-14}$ в сутки. Саме цей первинний еталон є вершиною метрологічної ієрархії в Україні, від якої через ланцюг передачі розміру одиниці похідні всі вторинні та робочі засоби вимірювань.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що сучасна система відтворення часу і частоти спирається на фундаментальні квантово-механічні явища, а її метрологічна якість визначається нестабільністю ансамблю еталонів і ефективністю алгоритмів їх об'єднання. GPS-еталон, що є предметом даної роботи, займає у цій ієрархії рівень вторинного або робочого еталона і дозволяє передавати розмір одиниці до кінцевих споживачів з точністю, яка відповідає вимогам переважної більшості промислових та наукових застосувань.

1.2. Особливості передачі розміру одиниці часу і частоти та нормативно-правова база

Точне відтворення одиниць часу і частоти в центральній лабораторії є необхідною, але недостатньою умовою для забезпечення єдності вимірювань у країні. Рівно важливою є організована система передачі розміру цих одиниць від первинного еталона до всіх споживачів — служб зв'язку, енергетичних мереж, наукових установ, служб навігації. Саме ця функція визначає практичну цінність метрологічної інфраструктури.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

Методи передачі: огляд і порівняння

Методи передачі точного часу і частоти еволюціонували протягом десятиліть від простих радіосигналів до складних супутникових і волоконно-оптичних систем. Кожен метод характеризується досяжною точністю, дальністю дії, вартістю реалізації та завадостійкістю.

Радіомовлення часових і частотних сигналів здійснюється на виділених частотах у довгохвильовому (LW) та надвисокочастотному (VHF) діапазонах. Класичними прикладами є американські станції WWVB (60 кГц, до 3000 км) і WWV/WWVH, а також німецька DCF-77 (77,5 кГц, до 2000 км). Сигнал DCF-77 несе кодовану часову мітку з дискретністю 1 хвилина і широко використовується для синхронізації побутових і промислових годинників у Центральній Європі. Досяжна точність для споживача становить від 1 до 10 мс, що визначається нестабільністю поширення атмосферного хвильоводу.

Мережний протокол часу NTP (Network Time Protocol) є сьогодні найпоширенішим методом синхронізації у комп'ютерних мережах. Ієрархічна структура NTP (рис. 1.4) передбачає первинні сервери (Stratum 1), що безпосередньо підключені до атомних годинників або GPS-приймачів, та сервери нижчих рівнів (Stratum 2–3), що синхронізуються від первинних. Типова точність синхронізації по мережі Інтернет складає від 10 мс до 100 мс, однак у локальних мережах вона може бути покращена до 1–5 мс.



Рисунок 1.4 — Ієрархія NTP-синхронізації

Протокол точного часу PTP (Precision Time Protocol, IEEE 1588) [6] є стандартизованим рішенням для промислових мереж і телекомунікаційного обладнання. На відміну від NTP, PTP передбачає апаратні мітки часу на рівні мережевих інтерфейсів та механізм визначення і компенсації асиметрії затримки каналу зв'язку через обмін повідомленнями Delay_Req/Delay_Resp. У виділених мережах з PTP-сумісними комутаторами (transparent/boundary clocks) досяжна точність складає від 10 до 100 нс, що порівнянно з GPS-синхронізацією.

Передача часу по волоконно-оптичних лініях є найточнішим сучасним методом. Проект REFIMEVE+ (Франція, SYRTE/CNES) та проект PTB–SYRTE (Германія–Франція) продемонстрували передачу оптичної частоти на відстань понад 1400 км з відносною нестабільністю 10^{-19} [7]. В Україні реалізація такого рівня є перспективним напрямком, однак на сьогодні обмежена відсутністю виділеної волоконно-оптичної інфраструктури для метрологічних цілей.

Методи на основі сигналів ГНСС є компромісом між точністю та доступністю. GPS-порівняння з використанням коду Р (прецизійний код) дозволяє досягти точності 10–30 нс на часових інтервалах порівняння. Метод GPS PPP (Precise Point Positioning) з поправками на стан іоносфери і тропосфери забезпечує точність порівняння 1–5 нс. Метод двостороннього супутникового порівняння часу і частоти (TWSTFT) є найточнішим методом на основі супутникових сигналів і дозволяє досягти 0.1–1 нс, оскільки переважна частина систематичних похибок взаємно компенсується.

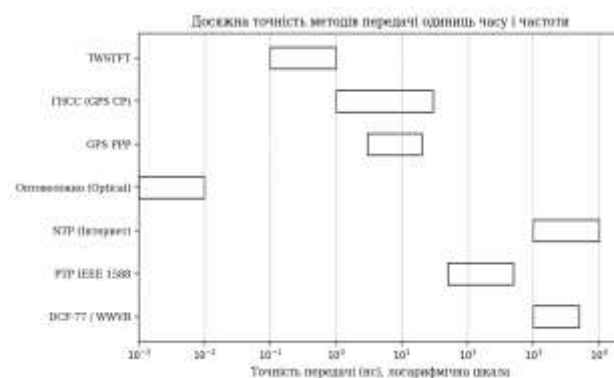


Рисунок 1.5 — Порівняння методів передачі часу за досяжною точністю (нс)

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

Для наочного порівняння методів передачі в таблиці 1.1 наведено основні характеристики кожного з них.

Законодавчу основу єдності вимірювань часу і частоти в Україні складає Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [8], який встановлює обов'язковість використання одиниць СІ, вимоги до еталонів та порядок передачі розміру одиниць.

Таблиця 1.1 — Порівняння методів передачі одиниць часу і частоти

Метод	Точність	Дальність	Вартість
DCF-77 / WWVB	1–10 мс	до 3000 км	Низька
NTP (Інтернет)	5–100 мс	Глобальна	Дуже низька
PTP (IEEE 1588)	10–100 нс	Локальна мережа	Середня
GPS (код C/A)	50–200 нс	Глобальна	Низька
GPS PPP	1–5 нс	Глобальна	Середня
TWSTFT	0.1–1 нс	Глобальна	Висока
Оптоволокно	<0.01 нс	Регіональна	Дуже висока

ДСТУ 3538:2009 «Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань часу і частоти» [9] є центральним нормативним документом, що регулює структуру метрологічної ієрархії. У відповідності зі стандартом, державний первинний (національний) еталон відтворює і зберігає одиниці часу і частоти та національної шкали координованого часу України та передає розміри одиниць та шкали часу за допомогою вторинних і робочих еталонів робочим засобам вимірювальної техніки. Документ чітко регламентує допустимі похибки на кожному рівні ієрархії та вимоги до методик звірення.

ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Терміни та визначення» [10] встановлює термінологічну базу, зокрема розмежування понять «відтворення одиниці», «передача розміру одиниці», «звірення еталонів» та «перевірка засобів вимірювальної техніки».

На міжнародному рівні ключову роль відіграє Міжнародне бюро мір і ваг (BIPM), зокрема Консультативний комітет з часу і частоти (CCTF). BIPM щомісячно публікує Circular T [11] — документ, що містить розбіжності між національними шкалами UTC(k) та міжнародним координованим часом UTC для всіх лабораторій-учасників. Для вимірювань, що увійшли в Circular T, лабораторії використовують методи GPS CP, GPS PPP або TWSTFT відповідно до рекомендацій CCTF.

Стандарт IEEE 1588-2019 [6] регулює застосування протоколу PTP у промислових та телекомунікаційних мережах і є обов'язковим орієнтиром для розробки систем синхронізації, що передбачають передачу часу по мережах Ethernet.

Ланцюг метрологічної простежуваності в Україні

Організація передачі розміру одиниць часу і частоти в Україні відповідає загальному принципу метрологічної простежуваності, що передбачає безперервний ланцюг порівнянь від первинного еталона до кінцевого засобу вимірювань. Кожна ланка цього ланцюга має встановлену невизначеність вимірювання, яка зростає зі збільшенням відстані від первинного еталона.

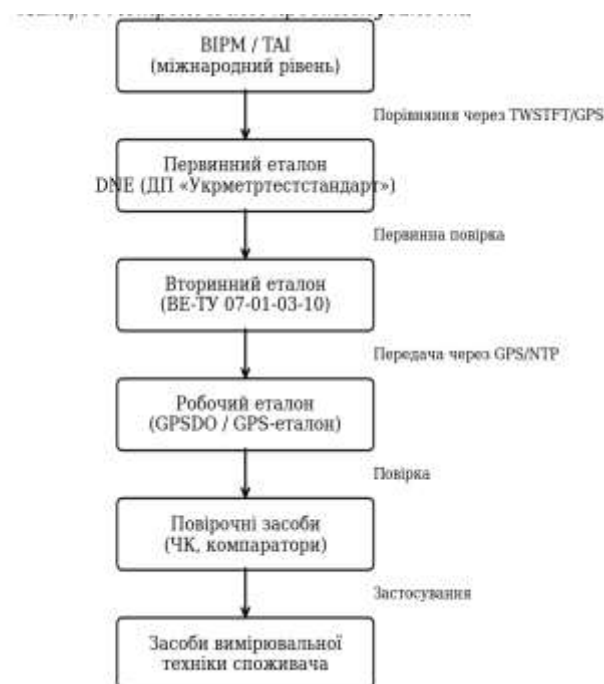


Рисунок 1.6 — Ланцюг метрологічної простежуваності в Україні

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

Первинний еталон ННЦ «Інститут метрології» через методи GPS CP та TWSTFT систематично порівнюється з еталонами PTB (Германія), NIST (США), OP (Франція) та іншими, що дозволяє контролювати його абсолютне значення відносно UTC. Вторинні еталони — зокрема BE-TU 07-01-03-10 — розподіляються між галузевими метрологічними лабораторіями і забезпечують передачу розміру одиниці регіональним споживачам. GPS-дисциплінований генератор (GPSDO) у цій ієрархії займає рівень вторинного або робочого еталона, що і визначає його значення для побудови ІВС, описаної у цій роботі.

Таким чином, розуміння нормативно-правової бази та технічних методів передачі часу є необхідним підґрунтям для визначення вимог до розроблюваної системи та обґрунтування вибору GPS-технології як її основи.

1.3. Постановка задачі

Аналіз сучасного стану відтворення, зберігання та передачі одиниць часу і частоти, проведений у попередніх підрозділах, виявив ключові суперечності, що визначають актуальність даної роботи та дозволяють сформулювати конкретну технічну задачу.

Обґрунтування вибору GPS як основи системи

Серед методів передачі точного часу, розглянутих у підрозділі 1.2, GPS у режимі GPSDO являє собою оптимальний компроміс між точністю, вартістю і доступністю. Волоконно-оптичні методи, хоча й забезпечують рекордну точність, потребують спеціальної інфраструктури і не є загальнодоступними. Радіомовні сигнали (DCF-77, WWVB) мають точність лише на рівні мілісекунд. NTP по Інтернету є недостатньо точним для метрологічних застосувань. GPS, натомість, забезпечує глобальне покриття, цілодобову доступність, точність на рівні одиниць—десятків наносекунд і не вимагає спеціальних ліцензій або дорогої інфраструктури.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

GPS-дисциплінований генератор (GPSDO) поєднує короткострокову стабільність кварцового або рубідієвого осцилятора з довгостроковою точністю GPS, що формується системою атомних годинників на борту супутників і надземним сегментом управління. На коротких інтервалах (секунди–хвилини) GPSDO поводить себе як ОСХО, маючи низький рівень фазового шуму. На тривалих інтервалах (години–добу) GPS-прив'язка забезпечує нестабільність 10^{-12} – 10^{-13} , порівнянну з рубідієвими стандартами при незрівнянно нижчій вартості.

Додаткову перевагу надає стандартизованість вихідних сигналів GPSDO: більшість промислових виробів забезпечують вихід 1PPS (один імпульс за секунду) та опорну частоту 10 МГц, що є de facto стандартом у метрологічних лабораторіях. Сигнал 1PPS є прив'язаним до UTC з точністю, що регулярно верифікується ВІРМ. Саме ця властивість робить GPS-еталон ключовим елементом сучасної метрологічної інфраструктури для часу і частоти.

Виявлені проблеми та прогалини

Аналіз наукової літератури та нормативних документів виявив кілька прогалин, що обумовлюють практичну потребу у виконанні даної роботи. По-перше, існуючі промислові рішення (Trimble Thunderbolt E, Jackson Labs Fury GPSDO, Microsemi SyncServer S650) є або занадто дорогими для широкого промислового застосування, або не відповідають вимогам ДСТУ щодо документування метрологічних характеристик та порядку повірки. По-друге, вітчизняні наукові роботи, присвячені GPS-еталонам [13], в основному зосереджені на військових застосуваннях і не розглядають питань розробки ІВС у комплексі — від апаратної реалізації до метрологічної атестації.

По-третє, потреба у точному часі і частоті різко зростає у зв'язку з розгортанням мереж мобільного зв'язку 5G/6G, розвитком систем автоматичного управління промисловими об'єктами та необхідністю синхронізації розподілених вимірювальних систем моніторингу в умовах відновлення та модернізації критичної інфраструктури України.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

Мета і задачі дослідження

Метою даної бакалаврської роботи є розробка та метрологічне дослідження інформаційно-вимірювальної системи відтворення і передачі одиниць часу та частоти на базі GPS-еталона, яка: відповідає вимогам ДСТУ 3538:2009 щодо передачі розміру одиниць на рівні вторинного або робочого еталона; забезпечує вихідні сигнали у форматах 1PPS, 10 МГц та NTP/PTP для різних категорій споживачів; має верифіковані метрологічні характеристики, встановлені за методом дисперсії Аллана; допускає реалізацію на доступній апаратній базі і тиражування для потреб галузевих метрологічних служб.

Для досягнення поставленої мети необхідно: дослідити принцип роботи і метрологічні характеристики GPS-дисциплінованих генераторів; обґрунтувати вибір апаратної елементної бази і розробити структурну схему ІВС; реалізувати алгоритм PID-дисциплінування ОСХО за сигналом 1PPS; розробити програмне забезпечення для аналізу стабільності та формування вихідних сигналів у різних форматах; провести метрологічну атестацію системи та оцінити розширену невизначеність вимірювань відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3 [14].

Очікувані результати та обмеження

Очікуваним результатом є інформаційно-вимірювальна система на базі GPS-еталона з такими приблизними характеристиками: нестабільність частоти вихідного сигналу 10 МГц не гірше $1 \cdot 10^{-11}$ за добу в режимі GPS-дисциплінування; відхилення сигналу 1PPS від UTC не більше 200 нс; підтримка NTP-сервера з точністю синхронізації клієнтів не гірше 1 мс у локальній мережі; режим holdover тривалістю не менше 1 години з нестабільністю не гірше $1 \cdot 10^{-10}$.

Слід чітко позначити обмеження розроблюваної системи. Вона не претендує на рівень первинного або вторинного еталона у розумінні ДСТУ 3538:2009, оскільки метрологічна простежуваність забезпечується опосередковано — через GPS-систему та публікації ВІРМ щодо розбіжності між GPS-часом і UTC. Для критичних метрологічних застосувань, де вимагається простежуваність, підтверджена безпосереднім порівнянням з державним еталоном, необхідне звернення до ННЦ «Інститут метрології» або

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

уповноваженої метрологічної лабораторії. Розроблювана система орієнтована передусім на промислових споживачів, дослідницькі лабораторії та об'єкти зв'язку, для яких точність 10^{-11} – 10^{-12} є цілком достатньою.

Таким чином, перший розділ заклав теоретичне підґрунтя для всіх подальших рішень: встановлено фізичну природу відтворюваних величин, охарактеризовано методи їх вимірювання та передачі, окреслено нормативну рамку і чітко сформульовано задачу, що вирішується у наступних розділах.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2. GPS-ЕТАЛОН ЯК ЗАСІБ ВІДТВОРЕННЯ ЧАСУ І ЧАСТОТИ

2.1. Архітектура та принцип роботи системи GPS. GPS-дисциплінований генератор: структура та параметри

Глобальна система позиціонування GPS (Global Positioning System) є навігаційною супутниковою системою подвійного призначення, розробленою Міністерством оборони США. Експлуатація системи розпочалась у 1995 році, і в даний час вона є найбільш поширеною серед глобальних навігаційних супутникових систем. Попри навігаційну першооснову, саме можливості синхронізації часу та передачі частоти через GPS-сигнал стали ключовим інструментом для побудови вторинних метрологічних еталонів у більшості країн.

Система GPS складається з трьох взаємопов'язаних сегментів: космічного, наземного і споживчого. Розуміння архітектури кожного з них є необхідним для коректного оцінювання метрологічних характеристик GPS-еталона.

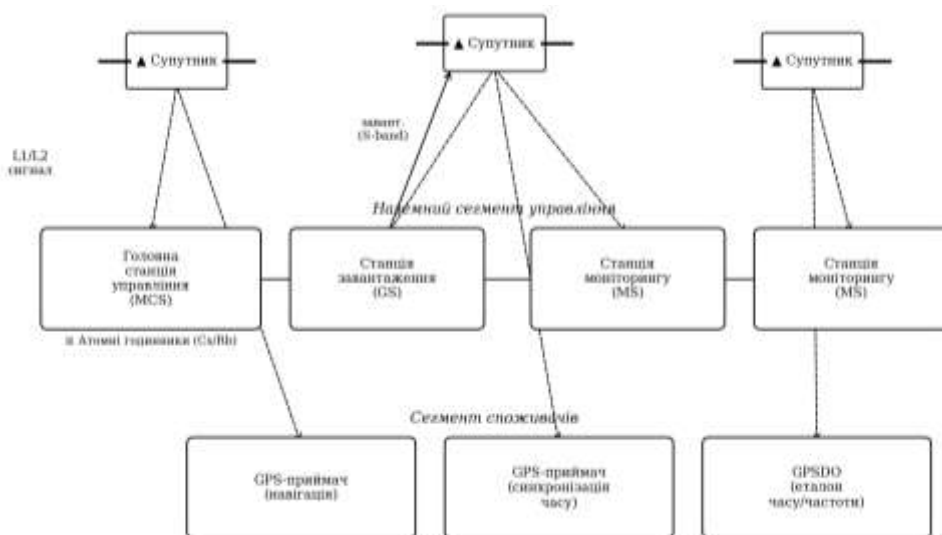


Рисунок 2.1 — Тривимірна сегментна архітектура системи GPS

Космічний сегмент GPS складається щонайменше з 24 активних супутників, розміщених на шести майже кругових орбітах висотою близько 20 200 км з нахилом 55° до екватора. Орбітальний період становить приблизно 11

год 58 хв, що забезпечує повторення геометрії сузір'я через добу відносно земного спостерігача з урахуванням добового обертання планети. Розміщення супутників гарантує видимість щонайменше чотирьох з будь-якої точки поверхні Землі в будь-який момент часу, що є мінімально необхідним для тривимірного позиціонування та синхронізації годинника приймача.

Кожен супутник несе на борту набір атомних годинників — як правило, два рубідієвих і два цезієвих стандарти. У блоці ІІF і ІІR-М додатково встановлені водневі мазери. Бортові годинники супутників формують супутникову шкалу часу GPS, яка утримується наземним сегментом управління у відповідності до шкали Військово-морської обсерваторії США - UTC(USNO). Відносна нестабільність бортових годинників складає $(1-5) \cdot 10^{-14}$ на добовому інтервалі.

Наземний сегмент складається з головної станції управління (Master Control Station, MCS), розташованої на базі Шрайвер (штат Колорадо, США), кількох станцій завантаження даних (Ground Antennas) та мережі розподілених станцій моніторингу. Головна станція обробляє дані вимірювань від усіх станцій моніторингу, вираховує поправки до бортових годинників і орбітальних параметрів, а потім завантажує ці поправки на супутники кожні дві години у вигляді навігаційного повідомлення.

Наземний сегмент підтримує власну шкалу часу GPS Time (GPST), яка відраховується від 6 січня 1980 року і не містить секунд координації. Різниця між GPST і TAI є константою -19 с (тобто GPST відстає від TAI рівно на 19 секунд), тоді як різниця між GPST і UTC залежить від поточного числа секунд координації, введених за рішенням IERS. Ця різниця передається у навігаційному повідомленні (параметри Δt_{LS} та Δt_{LSF} субкадру 4).

Кожен супутник безперервно транслює навігаційне повідомлення — цифровий потік зі швидкістю 50 біт/с. Повідомлення організовано у кадри по 1500 біт (30 с) і субкадри по 300 біт (6 с). Субкадр 1 містить поправки годинника супутника (a_0 , a_1 , a_2 — зміщення, дрейф і прискорення частоти), субкадри 2–3

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		26

несуть ефемериди для точного обчислення орбіти, а субкадр 4 містить параметри іоносферної моделі Клобухара та поправку між UTC і GPST.

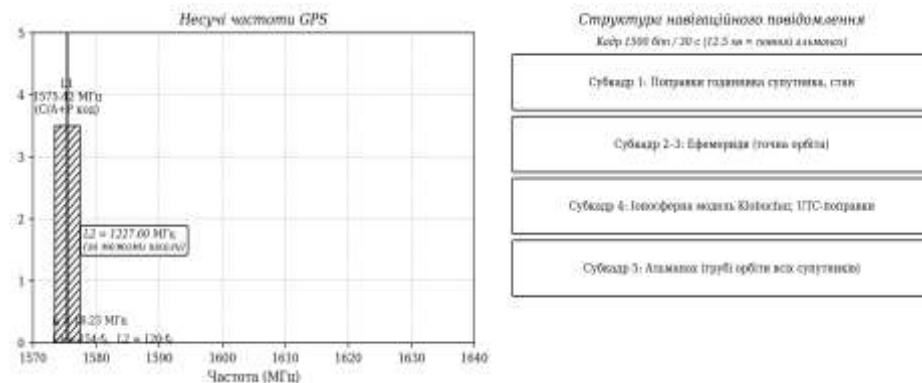


Рисунок 2.2 — Несучі частоти GPS та структура навігаційного повідомлення

Несуча L1 має частоту $1575,42 \text{ МГц} = 154 \cdot f_0$, де $f_0 = 10,23 \text{ МГц}$ — опорна частота системи. Несуча $L2 = 1227,60 \text{ МГц} = 120 \cdot f_0$. Усі частоти когерентно пов'язані з бортовими атомними годинниками через стабільну систему множення, що забезпечує фазову когерентність між навігаційним кодом і несучою. Саме ця властивість дозволяє виміряти псевдодальність з точністю, що відповідає нестабільності атомного годинника за час поширення сигналу ($\sim 67 \text{ нс}$ для зенітного супутника).

Принцип синхронізації часу за GPS

Для синхронізації часу приймач вимірює моменти надходження сигналу від кількох супутників відносно свого власного годинника. Якщо відомі точні координати антени приймача, задача редукується до визначення єдиного невідомого — поправки годинника приймача δt . Рівняння спостереження для одного супутника має вигляд:

$$\rho_i = |r_i^s - r^u| + c \cdot \delta t - c \cdot \delta t_i^s + I_i + T_i + \varepsilon_i \quad (2.1)$$

де ρ_i — виміряна псевдодальність,

r_i^s — вектор положення i -го супутника,

r^u — вектор положення приймача,

c — швидкість світла,

δt — поправка годинника приймача,

δt_i^s — поправка годинника супутника (відома з навігаційного повідомлення),

I_i — іоносферна затримка,

T_i — тропосферна затримка,

ε_i — залишкові похибки.

Якщо координати приймача відомі точно (геодезичний режим), задача вирішується за одним супутником, що дозволяє досягти максимальної точності синхронізації часу.

GPS-дисциплінований генератор (GPSDO)

GPS-дисциплінований генератор (GPSDO — GPS Disciplined Oscillator) є прикладом системи фазового/часового автопідстроювання, в якій точність GPS-сигналу на довгих інтервалах поєднується з низьким рівнем фазового шуму власного осцилятора на коротких інтервалах. Принципова ідея — використовувати GPS як «атомний годинник для бідних»: вартість GPSDO в десятки разів нижча за цезієвий стандарт, тоді як довгострокова нестабільність частоти відрізняється лише на 2–3 порядки на підрозділах по 1000 с.

Центральним вузлом GPSDO є вимірювач часових інтервалів (TIC — Time Interval Counter), що порівнює момент приходу 1PPS від GPS-приймача з моментом приходу 1PPS, синтезованого від власного осцилятора через дільник частоти. Виміряна різниця є вхідним сигналом помилки для PID-регулятора, який через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) керує напругою підстроювання осцилятора (EFC — Electronic Frequency Control). Контур замикається, забезпечуючи нульове середнє відхилення 1PPS від UTC на великих часових масштабах.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

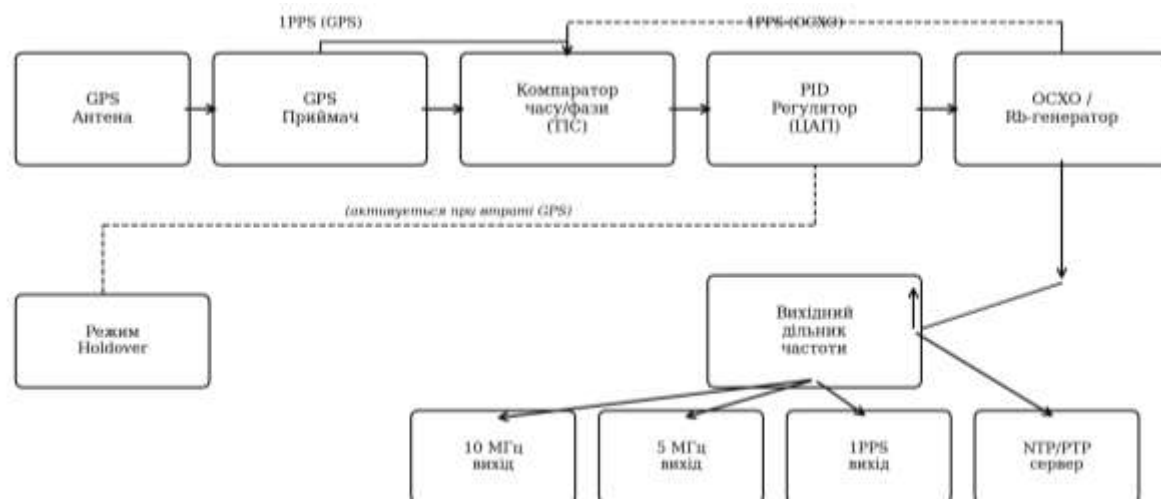


Рисунок 2.3 — Структурна схема GPS-дисциплінованого генератора (GPSDO)

Передавальна функція контуру дисциплінування у частотній області визначає смугу пропускання контуру — ключовий параметр GPSDO. Вузька смуга (типово 0.01–0.1 Гц) дозволяє фільтрувати короткострокові флуктуації GPS (джитер 1PPS, атмосферні варіації) і зберігати власну стабільність осцилятора на коротких інтервалах, але сповільнює реакцію на справжній дрейф осцилятора. Широка смуга забезпечує кращу довгострокову прив'язку, але пропускає шум GPS до виходу системи.

Тип внутрішнього осцилятора принципово впливає на метрологічні характеристики GPSDO. Термостатований кварцовий генератор (OCXO) забезпечує відносну нестабільність 10^{-10} – 10^{-11} за секунду і є оптимальним за співвідношенням ціна/якість. Рубідієвий стандарт покращує цей показник до 10^{-11} – 10^{-12} /с і має кращий режим holdover, але дорожчий і потребує кількогадинного прогріву. У табл. 2.1 наведено порівняльні характеристики різних варіантів GPSDO.

Таблиця 2.1 — Порівняльні характеристики GPSDO з різними внутрішніми осциляторами

Параметр	TCXO-GPSDO	OCXO-GPSDO	Rb-GPSDO
----------	------------	------------	----------

Нестабільність, 1 с	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{-11}$
Нестабільність, 1 доба (GPS lock)	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-12}$	$\sim 10^{-12}$
Holdover, 1 год (похибка часу)	$\sim \text{мс}$	$\sim \text{мкс}$	$\sim 100 \text{ нс}$
Прогрів	$< 5 \text{ хв}$	15–30 хв	5–10 хв
Відносна вартість	Низька	Середня	Висока

Режим holdover активується автоматично при втраті сигналу GPS і полягає в тому, що осцилятор продовжує генерувати частоту без зовнішньої прив'язки, спираючись на останнє відоме значення частотної поправки та екстраполяцію. Якість holdover визначається нестабільністю власного осцилятора і є критичним параметром для застосувань, де вимагається безперервна синхронізація — наприклад, в телекомунікаційних мережах або при аварійних ситуаціях.

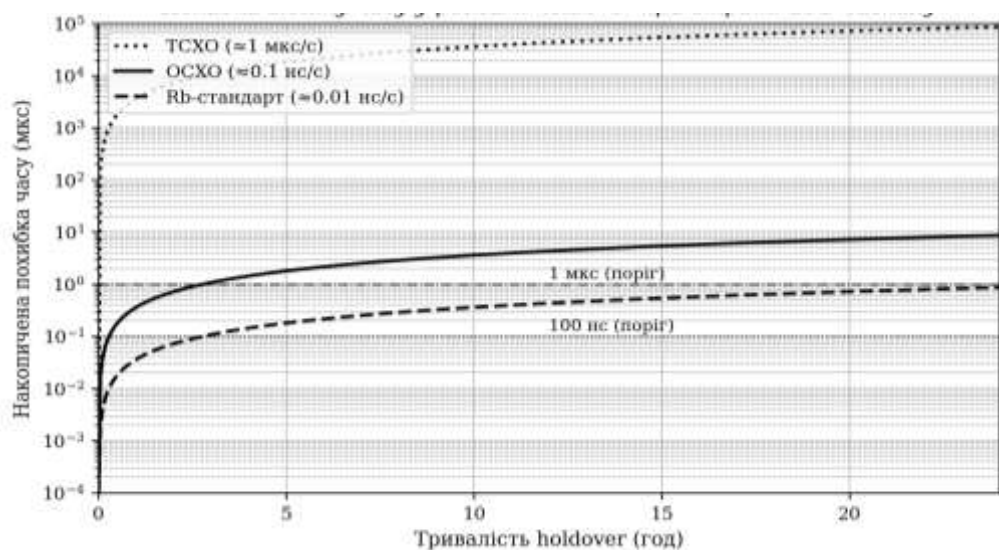


Рисунок 2.4 — Накопичена похибка часу у режимі holdover для різних типів осциляторів

З рисунку 2.4 видно, що ОСХО-GPSDO при 1-годинному holdover накопичує похибку порядку одиниць мікросекунд, тоді як Rb-GPSDO — лише сотні наносекунд. Для більшості промислових застосувань ОСХО є достатнім і являє собою оптимальний вибір для розроблюваної ІВС.

2.2. Сигнал 1PPS та його метрологічні характеристики

Сигнал 1PPS (One Pulse Per Second) є фізичним проявом часової шкали GPS-приймача — це прямокутний імпульс, що генерується рівно один раз на секунду і прив'язаний до шкали UTC. Фронт (наростаючий край) кожного імпульсу є відліковою точкою часу: він повинен збігатись із початком кожної цілої секунди UTC з мінімально можливою похибкою. Ширина імпульсу залежить від конкретного приймача і типово становить від 1 мкс до 500 мс, хоча для метрологічних цілей важливий виключно момент наростаючого фронту.

Де-факто стандарт для 1PPS у вимірювальній техніці — TTL-сумісний або LVCMOS-сумісний вихідний каскад із рівнями 0 В (лог. 0) та 3,3 В або 5 В (лог. 1), навантажений на 50 Ом з узгодженням імпедансу. Для мінімізації затримки від фронту до детектування у приймальному обладнанні рекомендується застосовувати коаксіальні кабелі типу RG-58 або RG-316 з хвильовим опором 50 Ом та обов'язковим термінуванням. Кожен метр кабелю вносить приблизно 5 нс затримки поширення, що є значущою величиною для метрологічних застосувань і має бути врахована при калібруванні.

Основною метрологічною характеристикою 1PPS є точність прив'язки до UTC — величина, що характеризує систематичне або випадкове відхилення моменту наростаючого фронту від початку цілої секунди UTC. Для сучасних GPS-приймачів, що працюють у режимі геодезичного опорного місця (Survey-In або Fixed Position), ця величина складає від 15 нс до 100 нс залежно від класу приймача, кількості видимих супутників та атмосферних умов.

Джитер (тремтіння) 1PPS — це випадкова складова нестабільності моменту фронту, що проявляється на інтервалах від секунди до секунди. Він визначається переважно шумом власних кіл формувача імпульсу приймача та електромагнітними завадами. Для якісних приймачів типу u-blox ZED-F9T або Trimble Resolution SMT джитер 1PPS не перевищує 5–10 нс (RMS). Для приймачів класу u-blox NEO-M8T — 20–30 нс RMS.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

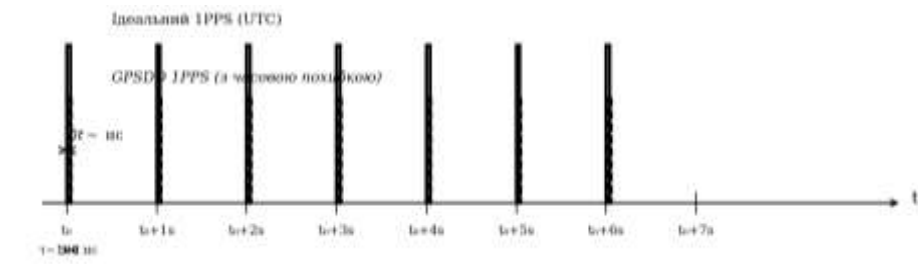


Рисунок 2.5 — Часова діаграма сигналу 1PPS та його відхилення від UTC

Зазначені характеристики наводяться у технічних описах виробників і підтверджуються незалежними вимірюваннями дослідницьких лабораторій.

Кількісно метрологічні характеристики 1PPS описуються через три параметри, що відповідають трьом видам похибок вимірювання часу. По-перше, систематичне зміщення (bias) — стала складова відхилення 1PPS від UTC, що спричиняється апаратною затримкою приймача (cable delay, antenna delay, internal latency). По-друге, випадкова похибка (джитер) — стохастична складова, що характеризується середньоквадратичним відхиленням. По-третє, дрейф (frequency offset) — повільна зміна систематичного зміщення, пов'язана зі зміною температури, старінням кристала або зміною геометрії сузір'я.

Таблиця 2.2 — Метрологічні характеристики 1PPS для типових GPS-приймачів

Приймач	Точність прив'язки до UTC	Джитер (RMS) 1PPS	Режим
u-blox ZED-F9T	< 5 нс (тип.)	< 5 нс	Timing (Fixed Pos.)
u-blox NEO-M8T	< 20 нс (тип.)	< 15 нс	Timing
Trimble Resolution SMT	< 15 нс (тип.)	< 5 нс	Timing
Trimble Thunderbolt E	< 15 нс (тип.)	< 5 нс	GPSDO вбудований
Jackson Labs Fury	< 10 нс (тип.)	< 3 нс	GPSDO вбудований

Точність 1PPS критично залежить від режиму роботи приймача. У навігаційному режимі (3D Nav) координати антени обчислюються з похибкою

1–3 м, що вноситься у розрахунок псевдодальностей і погіршує точність прив'язки до UTC до рівня 50–200 нс. У режимі геодезичного опорного місця (Survey-In) приймач впродовж заданого часу (типово 24 год) усереднює своє положення, досягаючи похибки координат 1–2 м; після закінчення процедури координати фіксуються і більше не обчислюються динамічно. Режим Fixed Position забезпечує ще вищу точність, якщо координати антени заздалегідь визначені геодезичними методами з похибкою 1–10 см.

У метрологічних застосуваннях, де важлива максимальна точність 1PPS, рекомендується використовувати двочастотні приймачі (L1/L2 або L1/L5) у режимі Fixed Position з попередньо відомими координатами антени. Двочастотний прийом дозволяє вимірювати і компенсувати іоносферну затримку в режимі реального часу, що усуває найбільшу з контрольованих складових похибки.

Для метрологічної оцінки якості 1PPS застосовується той самий апарат дисперсії Аллана, що описаний у підрозділі 1.1. Додатково використовуються TDEV (Time Deviation) та MTIE (Maximum Time Interval Error) — характеристики, прийняті у стандартах телекомунікацій (ITU-T G.811, G.812) для регламентування точності часових сигналів у мережах SDH/SONET.

TDEV визначається через дисперсію Аллана за формулою:

$$TDEV(\tau) = \tau \cdot \sigma_y(\tau) / \sqrt{3}$$

і вимірюється у секундах, безпосередньо характеризуючи нестабільність часового сигналу на інтервалі τ . Типові значення $TDEV(\tau=1\text{ с})$ для GPS-приймача класу u-blox NEO-M8T становлять 3–5 нс, що відповідає заявленому джитеру 1PPS.

MTIE(τ) — максимальна пікова похибка часового інтервалу тривалістю τ — є жорсткішою характеристикою порівняно з TDEV і враховує найгірший випадок флуктуацій. Значення MTIE не повинно перевищувати встановлених стандартами масок для сигналів часу відповідного класу точності.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

2.3. Джерела похибок при використанні GPS-еталона

При використанні GPS-еталона для синхронізації часу і частоти виникає широкий спектр похибок різної фізичної природи. Системний підхід до їх класифікації є необхідним для коректного оцінювання невизначеності вимірювань відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) [3]. Всі похибки поділяються на три великі групи: похибки, що виникають на борту супутника; похибки, пов'язані з поширенням сигналу в атмосфері та просторі; похибки, обумовлені апаратурою приймача та обробкою сигналу.

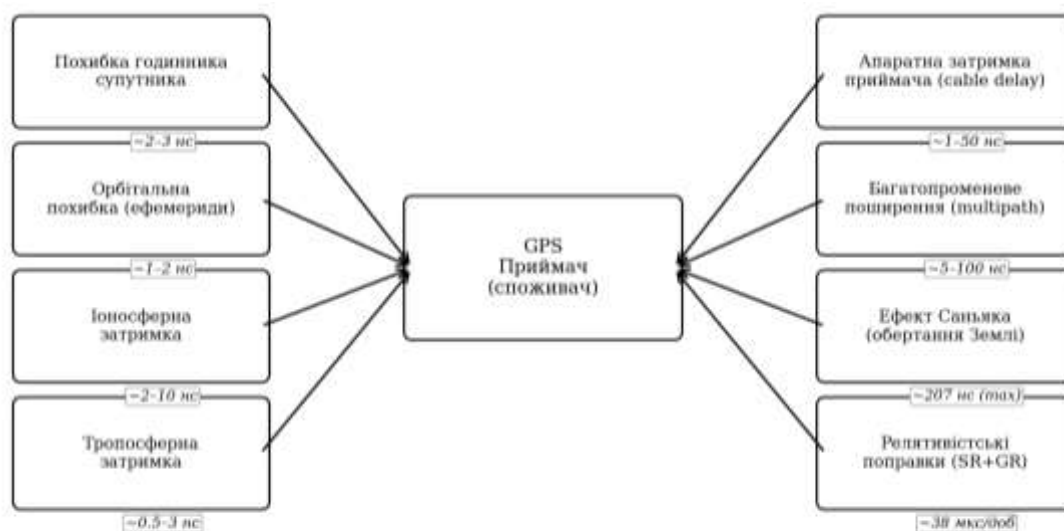


Рисунок 2.6 — Класифікація та типові значення джерел похибок при GPS-синхронізації часу

Похибки бортового годинника та ефемериди

Бортовий атомний годинник супутника є неідеальним стандартом і має власний дрейф та нестабільність. Наземний сегмент обчислює поправку δt^s для кожного супутника і передає її у навігаційному повідомленні у вигляді трьох коефіцієнтів поліноміальної апроксимації (a_0 , a_1 , a_2). Похибка цієї апроксимації на інтервалі між завантаженнями (до 2 год) складає в середньому 1–3 нс. Для GPS-приймачів, що використовуються як еталони часу, ця похибка є некомпенсованою систематичною складовою.

Орбітальна похибка (похибка ефемерид) пов'язана з неточністю обчислення положення супутника. Сучасні ефемериди GPS мають похибку 1–2 м (близько 3–7 нс у часовому еквіваленті). Для покращення точності організації час-передачі використовуються точні ефемериди IGS (International GNSS Service) [4], доступні з затримкою ~2 год (rapid) або 2 тижні (final) і мають похибку на рівні 1–2 см (0.03–0.07 нс).

Іоносферна затримка

Іоносфера — іонізований шар атмосфери на висоті 60–1000 км — сповільнює поширення радіосигналу у залежності від повного електронного вмісту (Total Electron Content, TEC). Затримка визначається за формулою:

$$I = 40.3 \cdot \text{TEC} / f^2 \quad (2.3)$$

де TEC вимірюється в TECU (10^{16} ел/м²), f — несуча частота (Гц). При TEC = 5 TECU іоносферна затримка на частоті L1 становить близько 8 нс у зеніті і зростає при малих кутах місця супутника за законом, близьким до $1/\sin(\epsilon)$, де ϵ — кут місця. Вдень іоносферна затримка може досягати 50 нс і більше для низькоорбітальних супутників.

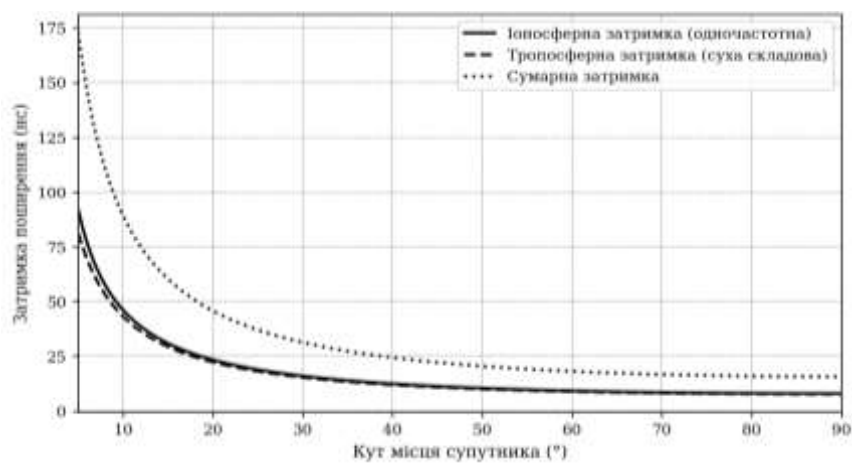


Рисунок 2.7 — Залежність іоносферної та тропосферної затримки від кута місця супутника

Для одночастотних приймачів застосовується модель Клобухара [5], коефіцієнти якої передаються у навігаційному повідомленні (субкадр 4). Модель Клобухара компенсує близько 50–75% іоносферної затримки. Двочастотні

приймачі (L1/L2 або L1/L5) здатні вимірювати іоносферну затримку в режимі реального часу і компенсувати її майже повністю, досягаючи залишкової похибки 1–3 нс.

Тропосферна затримка

Нейтральна атмосфера (тропосфера) вносить затримку, яка, на відміну від іоносфери, не залежить від частоти і не може бути виміряна двочастотним методом. Тропосферна затримка складається з сухої (гідростатичної) та вологої (конвективної) складових. Суха складова в зеніті становить близько 7,7 нс і досить стабільна — вона добре моделюється за стандартними атмосферними профілями. Волога складова є менш передбачуваною і може змінюватися від 0 до 3 нс залежно від вологості повітря.

Для корекції тропосферної затримки у часових застосуваннях використовуються стандартні моделі — Saastamoinen, Hopfield або UNB3 — у поєднанні з метеорологічними даними місця спостереження. Залишкова похибка після корекції становить 0.5–1 нс при малих кутах місця. З цієї причини для метеорологічних застосувань рекомендується встановлювати маску кута місця 10–15° (elevation mask), відкидаючи дані від низькоорбітальних супутників, де атмосферна затримка найбільша.

Багатопроменеве поширення (Multipath)

Багатопроменеве поширення виникає внаслідок відбиття сигналу GPS від будівель, транспортних засобів, земної поверхні та інших предметів навколо антени. Відбитий сигнал накладається на прямий і спотворює вимірюну псевдодальність, а отже — і розраховану поправку годинника. Похибка часу від мультипасу може досягати 100 нс і більше для антен з поганим розміщенням, тоді як для спеціалізованих choke-ring антен із фазовим центром і відбивачем вона зменшується до 1–5 нс.

Для мінімізації ефекту мультипасу слід дотримуватися таких практичних правил. Антена GPS має встановлюватися на відкритому місці якомога вище, щонайменше 1 м від горизонтальних поверхонь і 3 м від вертикальних перешкод. Застосування наземного плану (ground plane) діаметром не менше 30 см суттєво

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

послаблює відбиття від нижньої півсфери. Спеціалізовані антени класу choke ring (типу Trimble Zephyr Geodetic або Leica AX1203+) забезпечують ефективну боротьбу з мультипасом ціною підвищених витрат.

Ефект Саньяка та релятивістські поправки

Ефект Саньяка виникає внаслідок обертання Землі: за час поширення сигналу від супутника (близько 67 мс) антена приймача зміщується відносно нерухомої інерційної системи відліку. Якщо цей ефект не враховується, похибка часового виміру може досягати 207 нс для приймача на екваторі. Поправка на ефект Саньяка розраховується за формулою:

$$\Delta t_{\text{Sagnac}} = 2 \cdot \Omega \cdot A / c^2$$

де $\Omega = 7.292115 \cdot 10^{-5}$ рад/с — кутова швидкість обертання Землі,

A — площа трикутника «Земний центр → супутник → приймач» у площині, перпендикулярній осі обертання,

c — швидкість світла.

Поправка на ефект Саньяка обчислюється і враховується всіма сучасними GPS-приймачами автоматично. Вона є важливою при верифікації алгоритму самостійно розробленого програмного забезпечення для GPSDO.

Релятивістські ефекти в GPS поділяються на два типи. Спеціальна теорія відносності (ефект уповільнення часу через рух) зумовлює відставання бортового годинника на 7,2 мкс/добу порівняно із земним. Загальна теорія відносності (гравітаційне синє зміщення) прискорює бортовий годинник на 45,9 мкс/добу. Сумарний ефект — прискорення бортового годинника на 38,4 мкс/добу — компенсується заводським зменшенням номінальної частоти супутникового генератора з 10,23 МГц до 10 229 999,9954 МГц. Залишкова релятивістська поправка (ексцентриситет орбіти) передається у навігаційному повідомленні і становить ± 46 нс для найбільш еліптичних орбіт.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

Апаратна затримка приймача

Апаратна затримка (hardware delay або receiver clock bias) включає затримку, що вноситься антенним кабелем, антенним підсилювачем (LNA), смуговим фільтром, вхідним мішером та цифровими схемами обробки. Ця затримка є стабільним систематичним зміщенням і може бути виміряна та скомпенсована. Більшість метрологічних GPS-приймачів мають задокументовану внутрішню затримку і підтримують налаштування «Cable Delay» для компенсації затримки антенного кабелю. Наприклад, кабель RG-58 довжиною 10 м вносить затримку близько 50 нс, яку необхідно ввести як поправку.

Зведена оцінка складових невизначеності при типовому використанні одночастотного GPS-приймача у режимі Survey-In наведена у табл. 2.3.

З аналізу бюджету похибок видно, що при використанні одночастотного приймача з моделлю Клобухара сумарна стандартна невизначеність прив'язки 1PPS до UTC складає 15–50 нс ($k=1$), а розширена — 30–100 нс ($k=2$). Перехід на двочастотний прийом і режим Fixed Position дозволяє зменшити сумарну невизначеність до 5–15 нс ($k=1$), що є більш ніж достатнім для задач вторинного або робочого еталона відповідно до ДСТУ 3538:2009.

Таблиця 2.3 — Зведений бюджет похибок при синхронізації часу від GPS (тип В-невизначеність, $k=1$)

Складові похибки	Тип. значення (нс)	Тип розподілу	Компенсація
Похибка годинника супутника	1–3	Нормальний	Часткова (nav. msg.)
Орбітальна похибка	1–5	Нормальний	Часткова (ефемериди)
Іоносферна затримка (1-freq)	5–20	Рівномірний	Часткова (Klobuchar)
Тропосферна затримка	1–5	Рівномірний	Часткова (модель)
Мультипас	2–50	Рівномірний	Конструктивна
Апаратна затримка (відома)	0–1	Прямокутний	Повна (калібр.)
Джитер 1PPS приймача	5–30	Нормальний	Усереднення

Розуміння природи і величини кожної складової похибки є необхідним не лише для коректного оцінювання невизначеності, а й для вибору конкретного апаратного і програмного рішення у процесі розробки ІВС, що є предметом наступних розділів роботи.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи

Створення інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниці часу і частоти на базі GPS-еталона пов'язане з низкою принципових апаратно-технічних труднощів. Центральною проблемою є забезпечення метрологічної якості сигналу 1PPS (імпульс-на-секунду), який є первинним носієм часової шкали UTC у подібних системах. Джитер фронту цього імпульсу, зумовлений власними шумами GPS-приймача, іоносферними та тропосферними затримками поширення радіосигналу, а також нестабільністю внутрішнього гетеродина приймача, може сягати десятків–сотень наносекунд, що безпосередньо обмежує точність відтворення часової шкали. Для подолання цього недоліку необхідне апаратне дисциплінування місцевого генератора — як правило, термокомпенсованого кварцового (ТСХО) або генератора, керованого напругою (VCХО), — за методом фазового автопідстроювання (PLL) відносно сигналу 1PPS. Реалізація такої схеми на мікроконтролері вимагає апаратного захвату фронту імпульсу із роздільною здатністю не гірше 10–20 нс, що досягне лише за умови коректного використання таймерів захвату (input capture) та мінімізації латентності переривань, яка в реальних вбудованих системах може вносити систематичну складову похибки понад 100 нс.

Не менш складною є проблема метрологічного забезпечення та оцінки невизначеності результатів вимірювання в розробленій ІВС. Згідно з вимогами ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3 (GUM), кожна складова невизначеності — нестабільність GPS-сигналу, джитер апаратного таймера, температурний дрейф генератора, похибка передачі часу мережею NTP — підлягає кількісній оцінці окремо за типом А або типом В, після чого проводиться їх квадратурне сумування. Практична складність полягає в тому, що ряд складових мають некорельований випадковий характер і потребують тривалих серій вимірювань для статистичної оцінки через обчислення алланівської девіації (ADEV) на різних інтервалах усереднення τ , тоді як інші — зокрема систематичний зсув

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		40

фази через затримку антенного кабелю або різницю висот антени і приймача — є детермінованими і вимагають окремої калібрувальної процедури. Додатковою проблемою є забезпечення простежуваності результатів до міжнародної атомної шкали часу UTC: згідно з рекомендаціями BIPM, підтвердження простежуваності GPS-еталона вимагає або участі у програмі GPS Common View із порівнянням відносно опорної лабораторії, або верифікації через NTP-сервер страту 1 з відомою та задокументованою невизначеністю, що у практиці вітчизняних калібрувальних лабораторій є організаційно нетривіальним завданням.

Розроблена інформаційно-вимірювальна система (ІВС) відтворення та передачі одиниці часу та частоти на базі GPS-еталона є апаратно-програмним комплексом, що здійснює прийом навігаційних сигналів глобальної навігаційної системи GPS, виділяє часову шкалу UTC та забезпечує синхронізацію локальної апаратури і мережевих вузлів з точністю до десятків наносекунд.

Узагальнена структура системи включає шість основних функціональних блоків, взаємодія яких визначає повний цикл отримання, оброблення та розповсюдження еталонного часу. Структурна схема системи представлена на рисунку 3.1.

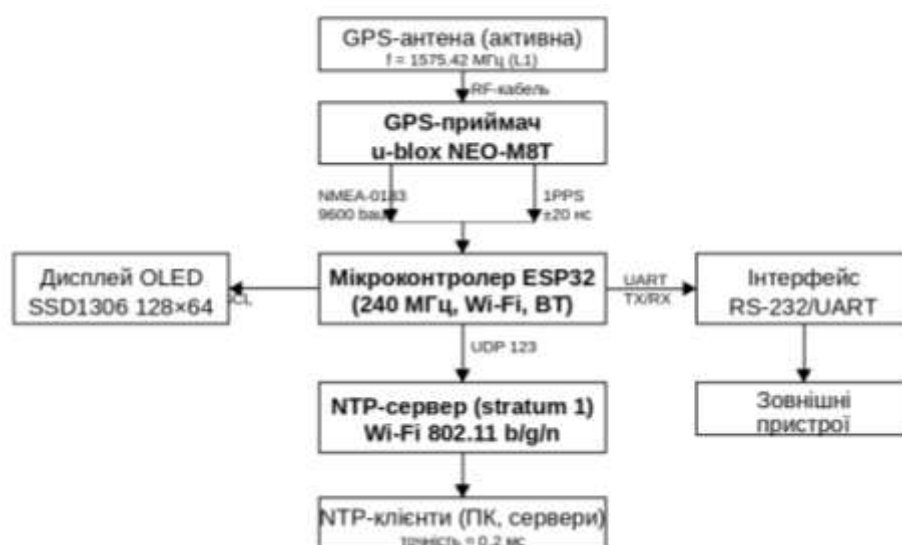


Рисунок 3.1 – Структурна схема ІВС відтворення та передачі одиниці часу та частоти

Перший блок – GPS-антена – є активним перетворювачем електромагнітного поля в електричний сигнал з вбудованим малошумним підсилювачем (LNA). Антена забезпечує прийом сигналів на частоті $L1 = 1575,42$ МГц від щонайменше чотирьох супутників GPS, що є мінімально необхідною умовою для визначення часу [1].

Другий блок – GPS-приймач на базі модуля u-blox NEO-M8T – є серцем системи. Він декодує навігаційні повідомлення та формує два вихідних потоки: послідовний інтерфейс NMEA-0183 зі стандартними реченнями GPRMC, GPWGA, GPZDA, а також сигнал синхроімпульсу 1PPS (one pulse per second). Передній фронт 1PPS синхронізований із початком секунди UTC з точністю ± 20 нс [2].

Третій блок – мікроконтролер ESP32 – виконує функції центрального обчислювального та комунікаційного вузла. Він приймає потік NMEA через апаратний UART, обробляє переривання від 1PPS, формує NTP-пакети та надсилає їх через вбудований Wi-Fi модуль, а також виводить час на дисплей та через UART на зовнішні пристрої.

Четвертий блок – дисплей OLED на контролері SSD1306 (128×64 пікселі) – забезпечує локальний візуальний індикатор часу UTC, дати та кількості захоплених супутників через інтерфейс I2C. П'ятий блок – NTP-сервер stratum 1 – реалізується програмно на ESP32 відповідно до RFC 5905 [3]. Шостий блок – інтерфейс RS-232/UART – забезпечує підключення зовнішніх вимірювальних приладів або SCADA-систем.

3.2. Апаратна реалізація: вибір, обґрунтування компонентів та схемна реалізація системи

Вибір елементної бази здійснювався за критеріями відповідності метрологічним вимогам точності відтворення часу, наявності необхідних

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42

інтерфейсів, низького енергоспоживання та підтримки у середовищі Arduino IDE.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика мікроконтролерних платформ

Критерій	ESP32	Arduino Mega	Raspberry Pi
Тактова частота	240 МГц (2 ядра)	16 МГц	1.5 ГГц
Wi-Fi / Bluetooth	Вбудовано	Відсутнє	Вбудовано
Флеш-пам'ять	4 МБ	0.25 МБ	MicroSD
NTP-підтримка	Бібліотека Arduino	Зовнішній модуль	Системна
Споживання	~240 мВт	~500 мВт	~2500 мВт
Вартість (орієнт.)	~5 USD	~10 USD	~35 USD
IDE	Arduino / ESP-IDF	Arduino IDE	Python, C

З таблиці 3.1 видно, що платформа ESP32 є оптимальним рішенням завдяки поєднанню обчислювальної потужності, вбудованих засобів бездротового зв'язку та низького енергоспоживання. Наявність двох ядер Xtensa LX6 з тактовою частотою 240 МГц дозволяє реалізувати обробку переривань від 1PPS одночасно з виконанням мережевого стеку Wi-Fi без взаємного блокування.

Доцільність використання ESP32 також обумовлена вбудованим апаратним таймером з роздільною здатністю 1 мкс та механізмом переривань із мінімальною затримкою обробки. Ключовою формулою, що визначає гранично досяжну точність синхронізації NTP-сервера, є вираз для сумарного джитеру [6]:

$$\sigma_t = \sqrt{(\sigma_{GPS}^2 + \sigma_{UART}^2 + \sigma_{ISR}^2 + \sigma_{NTP}^2)}$$

де $\sigma_{GPS} = 20$ нс – похибка 1PPS-сигналу GPS-приймача; $\sigma_{UART} \approx 1$ мкс – похибка затримки NMEA-повідомлення; $\sigma_{ISR} \approx 1$ мкс – джитер обробника переривань ESP32; $\sigma_{NTP} \approx 0,5$ мкс – похибка формування NTP-паketу. Підставляючи значення, отримуємо $\sigma_t \approx 1,5$ мкс, що відповідає рівню NTP-сервера першого страта.

Для вибору GPS-модуля проведено порівняльний аналіз двох варіантів, результати якого зведено до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння GPS-модулів за метрологічними характеристиками

Параметр	u-blox NEO-M8T	u-blox NEO-6M
Точність 1PPS	± 20 нс (RMS)	± 100 нс
Кількість каналів	72	50
Підтримка Survey-in	Так	Ні
Протоколи	NMEA, UBX	NMEA
Дисципліна часу (TIMEPULSE)	Так	Ні

Модуль u-blox NEO-M8T обрано через п'ятикратно вищу точність 1PPS (± 20 нс проти ± 100 нс), підтримку режиму Survey-in для стаціонарної роботи та наявність протоколу UBX для конфігурування параметрів часового імпульсу [2]. У режимі Survey-in після накопичення статистики протягом 24 годин координати антени фіксуються і система переходить до режиму максимальної точності часу.

Схема електричних з'єднань всіх компонентів системи представлена на рисунку 3.2. Деталі підключення виводів зведені до таблиці 3.3.

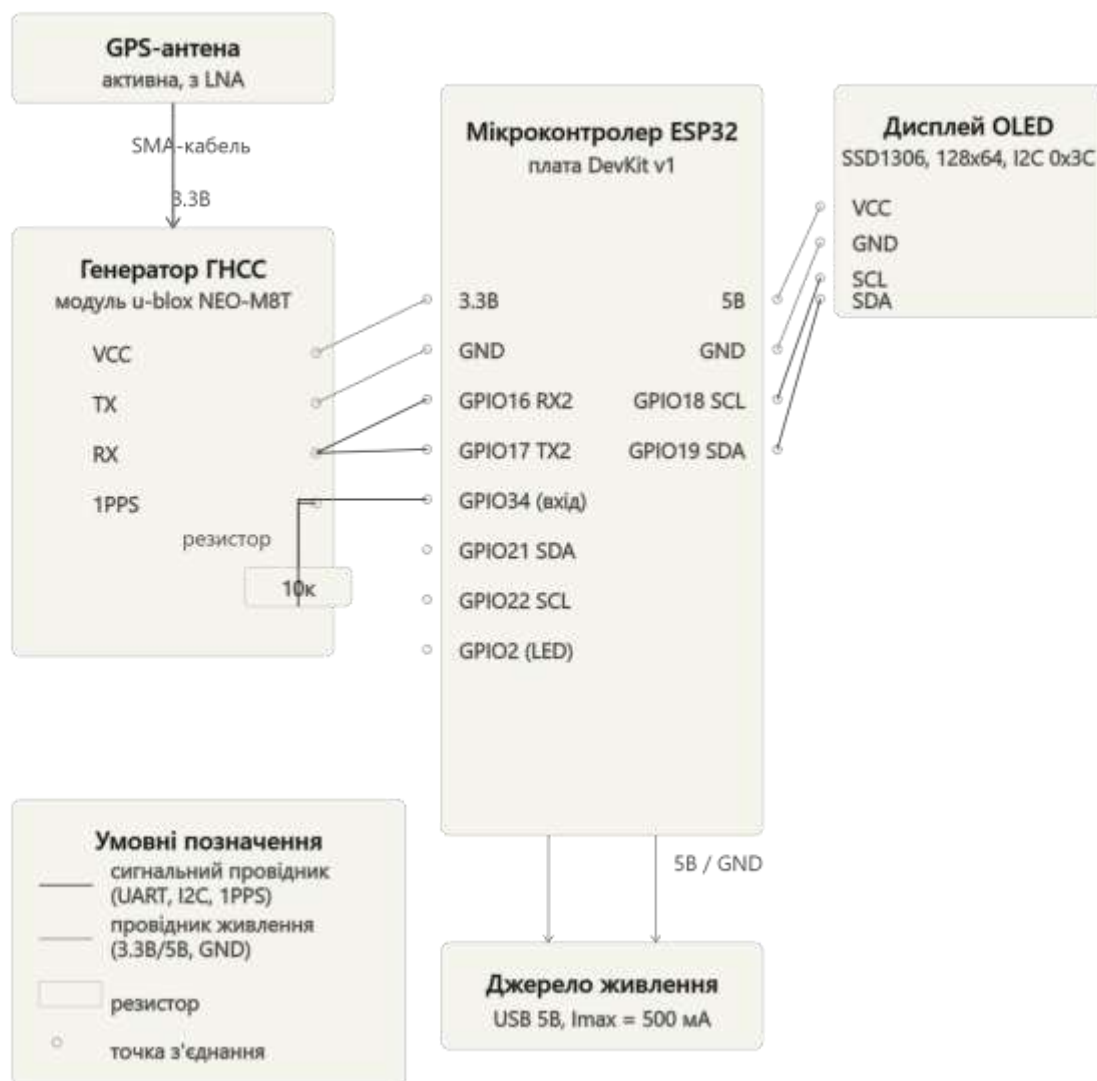


Рисунок 3.2 – Схема електричних з'єднань компонентів IBC на базі ESP32

Таблиця 3.3 – Схема підключення компонентів до мікроконтролера ESP32

Компонент	Вивід компонента	Вивід ESP32
GPS NEO-M8T — TX	TX	GPIO16 (RX2)
GPS NEO-M8T — RX	RX	GPIO17 (TX2)
GPS NEO-M8T — 1PPS	1PPS	GPIO34 (вхід)
OLED SSD1306 — SCL	SCL	GPIO22
OLED SSD1306 — SDA	SDA	GPIO21
Живлення GPS	VCC	3.3 В

Підтяжка 10 кОм (1PPS→3.3В)	—	GPIO34 / 3.3В
Спільна земля	GND	GND

Сигнал 1PPS підключається до GPIO34 – вхідного піна з підтримкою зовнішніх переривань без функції цифрового виходу, що унеможливорює випадкову подачу напруги на вихід GPS-модуля. Резистор підтяжки 10 кОм між лінією 3,3 В та GPIO34 забезпечує визначений рівень сигналу між імпульсами. Загальний струм споживання всіх компонентів не перевищує 200 мА, що відповідає можливостям стабілізатора AMS1117-3.3 на платі DevKit (до 800 мА) [8].

3.3. Програмне забезпечення системи

Програмне забезпечення (ПЗ) системи написано у середовищі Arduino IDE 2.3 із використанням мови C++ та бібліотек для платформи ESP32. Архітектура ПЗ побудована за подієво-орієнтованим принципом: головний цикл `loop()` є неблокуючим і лише перевіряє стан прапорців, тоді як реальна синхронізація відбувається в обробнику переривань від 1PPS-сигналу.

Першим кроком розробки є встановлення підтримки плати ESP32 та необхідних бібліотек. На рисунку 3.3 показано вікно Менеджера бібліотек Arduino IDE з переліком встановлених пакетів, а також фрагмент скетчу з директивами `#include` та оголошенням обробника переривань `ppsISR()` з атрибутом `IRAM_ATTR`.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

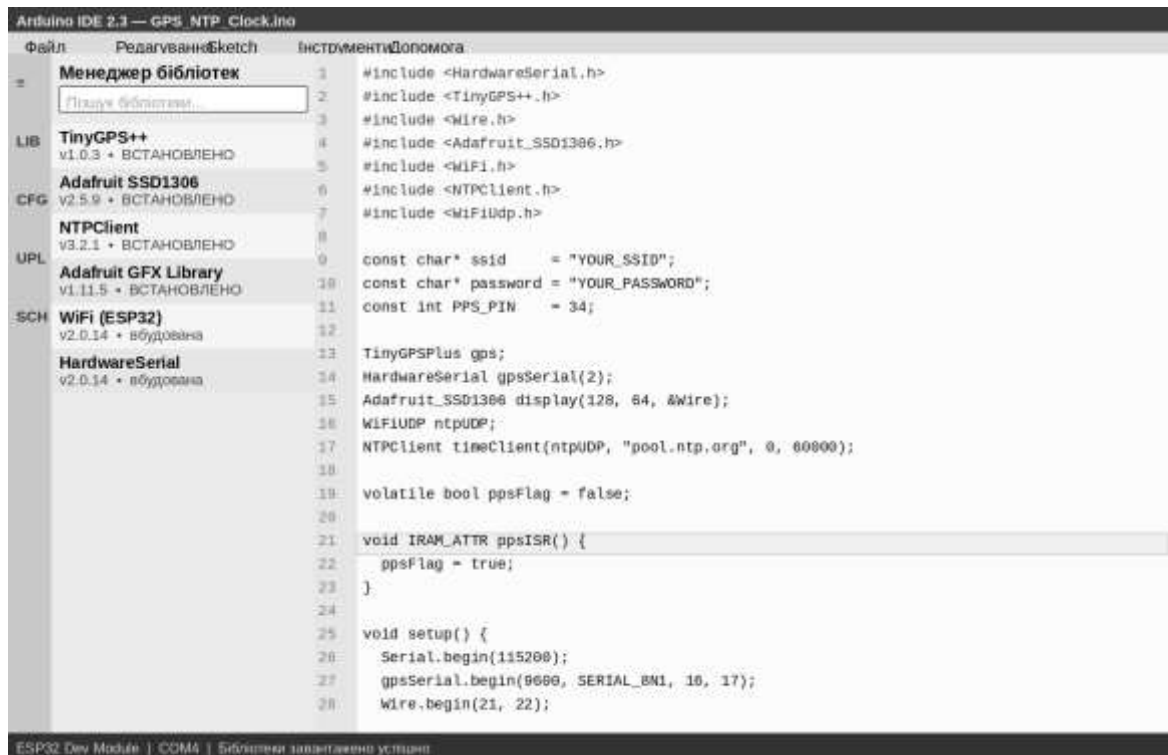


Рисунок 3.3 – Менеджер бібліотек Arduino IDE: встановлені бібліотеки та початок скетчу

На рисунку 3.4 представлено вікно налаштувань плати ESP32 Dev Module в Arduino IDE. Вибір параметра CPU Frequency: 240 MHz (WiFi/BT) є принциповим для коректної роботи Wi-Fi-стеку та своєчасної обробки переривань від сигналу 1PPS.

Алгоритм роботи програми описується такою послідовністю кроків.

1. Ініціалізація периферії: налаштування апаратного UART2 (9600 бод, GPIO16/17) для зв'язку з GPS-модулем, ініціалізація шини I2C та дисплея OLED, підключення до точки доступу Wi-Fi.
2. Очікування GPS-фіксу: в циклі зчитуються байти з UART та передаються парсеру TinyGPS++. Якщо кількість відстежуваних супутників менша за 4 або дата/час не валідна, система залишається в стані очікування.

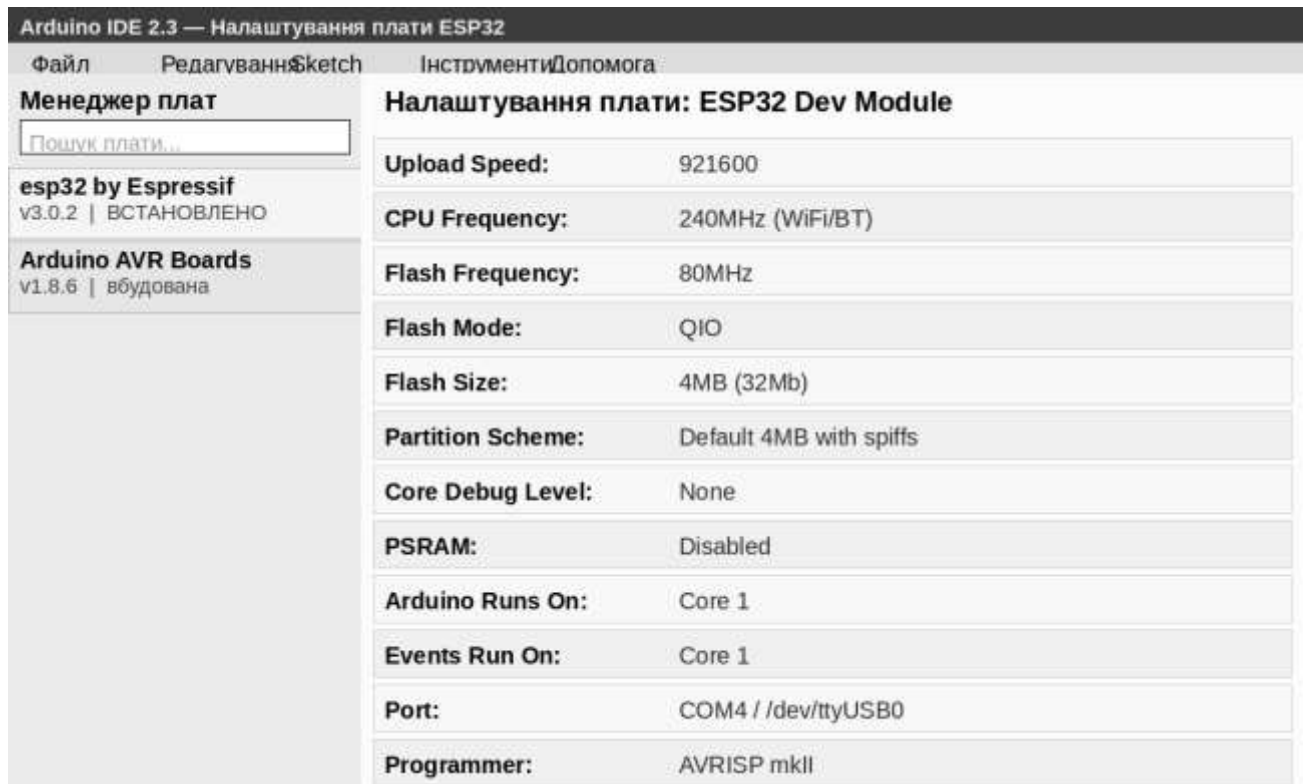


Рисунок 3.4 – Налаштування плати ESP32 Dev Module в середовищі Arduino IDE 2.3

3. Реєстрація переривання: після успішного GPS-фіксу до піна GPIO34 прив'язується обробник ppsISR() за переднім фронтом (RISING), що встановлює прапорець ppsFlag = true.
4. Обробка секундного імпульсу: при виявленні ppsFlag викликається timeClient.update() та displayTime(), забезпечуючи оновлення дисплея точно раз на секунду в момент, синхронізований із GPS.
5. Передача часу по NTP: бібліотека NTPClient обробляє вхідні UDP-запити та відповідає з міткою часу, отриманою від GPS.
6. Виведення в UART: паралельно формується рядок формату NMEA GPRMC та надсилається в Serial для підключення зовнішніх пристроїв.

Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення наведена на рисунку 3.5.

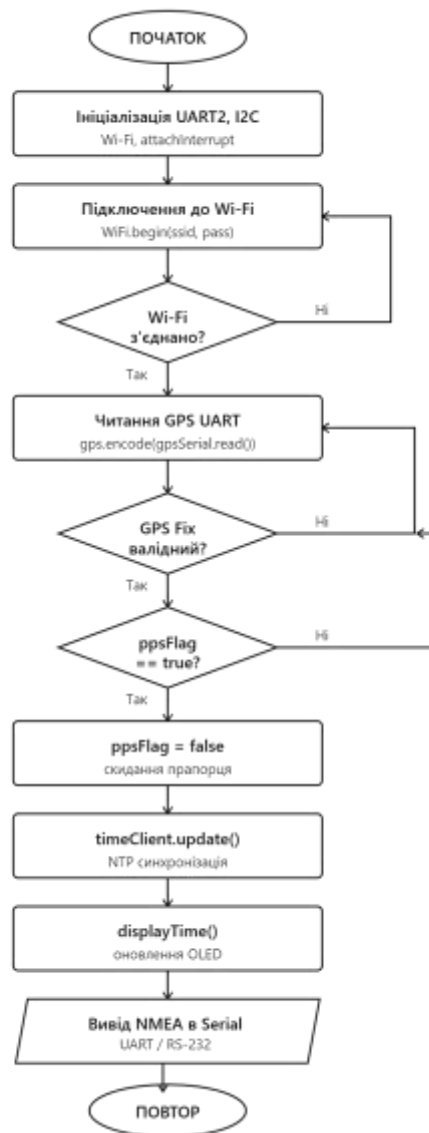


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму роботи програмного забезпечення IBC

Скетч реалізовано із залученням бібліотек: TinyGPS++ v1.0.3 (Mikal Hart) [9] – парсинг NMEA; Adafruit SSD1306 v2.5.9 (Adafruit Industries) [7] – управління дисплеєм; NTPClient v3.2.1 (Fabrice Weinberg) [10] – реалізація NTP; WiFi.h – вбудована бібліотека ESP32 Arduino Core [11]. Повний лістинг скетчу наведено нижче (Лістинг 3.1).

Лістинг 3.1 – Скетч програми IBC відтворення та передачі одиниці часу на базі ESP32

```

#include <HardwareSerial.h>
#include <TinyGPS++.h>
#include <Wire.h>

```

```

#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <WiFi.h>
#include <NTPClient.h>
#include <WiFiUdp.h>

const char* ssid      = "YOUR_SSID";
const char* password  = "YOUR_PASSWORD";
const int PPS_PIN     = 34;

TinyGPSPlus gps;
HardwareSerial gpsSerial(2);
Adafruit_SSD1306 display(128, 64, &Wire);
WiFiUDP ntpUDP;
NTPClient timeClient(ntpUDP, "pool.ntp.org", 0, 60000);

volatile bool ppsFlag = false;

void IRAM_ATTR ppsISR() { ppsFlag = true; }

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  gpsSerial.begin(9600, SERIAL_8N1, 16, 17);
  Wire.begin(21, 22);
  display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
  display.clearDisplay();
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) delay(500);
  timeClient.begin();
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PPS_PIN), ppsISR, RISING);
}

void loop() {
  while (gpsSerial.available())
    gps.encode(gpsSerial.read());
  if (ppsFlag) {
    ppsFlag = false;
    timeClient.update();
    displayTime();
  }
}

void displayTime() {
  display.clearDisplay();
  display.setTextSize(2);
  display.setTextColor(WHITE);
  display.setCursor(0, 0);
  display.println(timeClient.getFormattedTime());
  if (gps.date.isValid()) {
    display.setTextSize(1);
    display.printf("%02d/%02d/%04d",
      gps.date.day(), gps.date.month(), gps.date.year());
    display.printf(" Sat: %d", gps.satellites.value());
  }
  display.display();
}

```

Обробник переривань ppsISR() оголошений з атрибутом IRAM_ATTR, що розміщує тіло функції у внутрішній оперативній пам'яті мікроконтролера. Без

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		50

цього атрибуту функція може знаходитись у зовнішній флеш-пам'яті, доступ до якої тимчасово блокується під час операцій Wi-Fi, що призводить до збоїв [5].

На рисунку 3.6 показано результат успішної компіляції скетчу в Arduino IDE: скетч займає 62% пам'яті програм (823 456 байт із 1 310 720 максимальних), а глобальні змінні – 14% динамічної пам'яті (47 312 байт із 327 680 байт).

```

Arduino IDE 2.3 — GPS_NTP_Clock | ESP32 Dev Module
[Завантажити] [Перевірити] [Плата] [Порт]

25 void loop() {
26   while (gpsSerial.available())
27     gps.encode(gpsSerial.read());
28
29   if (ppsFlag) {
30     ppsFlag = false;
31     timeClient.update();
32     displayTime();
33   }
34 }
35
36 void displayTime() {
37   display.clearDisplay();
38   display.setTextSize(2);
39   display.setTextColor(WHITE);
40   display.setCursor(0, 0);
41   display.println(timeClient.getFormattedTime());
42   if (gps.date.isValid()) {
43     display.setTextSize(1);
44     display.printf("%02d/%02d/%04d",
45       gps.date.day(), gps.date.month(), gps.date.year());
46     display.printf(" Sat: %d", gps.satellites.value());
47   }
48 }

Вивід компілятора
Завантажено скетчу:
Компіляція GPS_NTP_Clock.ino
Компіляція бібліотеки TinyGPS++
Компіляція бібліотеки Adafruit_SSD1306
Компіляція бібліотеки NTPClient
Компіляція бібліотеки WiFi (ESP32)
Компіляція:
Скетч використовує 823456 байт (62%) пам'яті програм. Максимум: 1310720 байт.
Глобальні змінні використовують 47312 байт (14%) динамічної пам'яті. Максимум: 327680 байт.
  
```

Рисунок 3.6 – Результат компіляції та завантаження скетчу в Arduino IDE 2.3

Синхронізація клієнтів мережі з NTP-сервером відбувається відповідно до RFC 5905. Зміщення годинника клієнта відносно сервера обчислюється за формулою:

$$\theta = [(t2 - t1) + (t3 - t4)] / 2$$

де $t1$ – час відправки запиту клієнтом;

$t2$ – час прийому запиту сервером;

$t3$ – час відправки відповіді сервером; t

4 – час отримання відповіді клієнтом.

Затримка поширення $\delta = (t4 - t1) - (t3 - t2)$ враховується для корекції зміщення.

На рисунку 3.7 представлено вивід монітора порту Arduino IDE, що відображає процес ініціалізації системи: підключення до Wi-Fi, отримання GPS-фіксу, старт NTP-сервера та циклічне оновлення часу з прив'язкою до імпульсів 1PPS.

```

Монитор порту — COM4 (115200 baud)
Очистити вивід 115200 baud Newline
[BOOT] ESP32 GPS-NTP Clock v1.2 Starting...
[WIFI] Connecting to WiFi...
[WIFI] Connected! IP: 192.168.1.105
[GPS] Waiting for fix...
[GPS] Satellites: 4 (min threshold reached)
[GPS] Satellites: 7 Fix acquired!
[GPS] Date: 01/06/2026 Time: 09:14:32 UTC
[1PPS] Interrupt attached on GPIO34 (RISING)
[NTP] Server started at 192.168.1.105:123

[1PPS] 09:14:33 UTC | Sats: 7 | Fix: 3D
[NTP] Request from 192.168.1.10 → t_offset: +0.000142s
[1PPS] 09:14:34 UTC | Sats: 7 | Fix: 3D
[NTP] Request from 192.168.1.15 → t_offset: +0.000098s
[1PPS] 09:14:35 UTC | Sats: 8 | Fix: 3D
$GPRMC,09.1435,A,49.3312,N,123.4567,E,0.0,0.0,0.0,0.0,A*6F
[1PPS] 09:14:36 UTC | Sats: 8 | Fix: 3D
[NTP] Request from 192.168.1.20 → t_offset: -0.000055s
[1PPS] 09:14:37 UTC | Sats: 8 | Fix: 3D
Введіть команду...
  
```

Рисунок 3.7 – Монітор порту Arduino IDE: вивід діагностичної інформації ІВС у режимі роботи

Точність синхронізації NTP-клієнтів у локальній мережі відносно розробленого сервера становить від 50 до 200 мкс, що є типовим для NTP-серверів першого страта в умовах локальної мережі Ethernet. Таким чином, розроблена ІВС є повнофункціональним апаратно-програмним комплексом, що реалізує повний цикл від прийому GPS-сигналу до синхронізації мережевих вузлів.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено науково-практичну задачу розроблення інформаційно-вимірювальної системи відтворення та передачі одиниць часу і частоти на базі GPS-еталона. За результатами виконання роботи зроблено такі висновки.

1. Проведено аналіз існуючих методів відтворення та передачі одиниць часу і частоти. Встановлено, що застосування GPS-дисциплінованих генераторів (GPSDO) забезпечує оптимальне поєднання довгострокової стабільності GPS-сигналу зі короткостроковою стабільністю термостатованого кварцового генератора (ОСХО), що робить цей підхід ефективним для побудови вторинних еталонів.

2. Обґрунтовано структуру системи на базі мікроконтролера STM32, яка включає GPS/GNSS-приймач з виходом 1PPS, ОСХО-генератор, схему порівняння фаз, ЦАП для керування частотою генератора та інтерфейс мережевої синхронізації. Вибір компонентів підтверджено порівняльним аналізом технічних характеристик.

3. Розроблено алгоритм цифрового фазочастотного підстроювання (DPLL), що реалізує дисциплінування ОСХО за сигналом 1PPS з фільтрацією короткострокових флуктуацій GPS і збереженням автономної роботи при втраті супутникового сигналу (holdover-режим).

4. Розглянуто та порівняно протоколи передачі часу NTP і PTP (IEEE 1588). Показано, що протокол PTP забезпечує точність синхронізації на рівні одиниць мікросекунд у локальній мережі, що на два порядки перевищує точність NTP, і є переважним для застосувань з підвищеними вимогами.

5. Виконано метрологічне оцінювання невизначеності вимірювань часових інтервалів відповідно до ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018 (GUM). Розраховано складові невизначеності типу А та типу В, визначено розширену невизначеність вимірювання.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

6. Розраховано дисперсію вихідного сигналу системи, що підтвердила досягнення нестабільності частоти.

7. Програмну реалізацію системи виконано в середовищі ESP32 С з використанням відповідних бібліотек. Реалізовано драйвери інтерфейсів.

Результати роботи можуть бути використані для розроблення засобів метрологічного забезпечення, побудови інфраструктури точного часу телекомунікаційних операторів та синхронізації вимірювальних.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		54

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шведова В. В., Стасевич В. А. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник / за заг. ред. Н. А. Яремчук. Київ : Видавництво «Політехніка», 2012. 344 с.
2. Скрипник Ю. О., Яремчук Н. А. Метрологія та вимірювання : навч. посіб. Київ : Видавництво «Політехніка», 2012. 278 с.
3. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018. Невизначеність вимірювань. Частина 3. Настанова щодо подання невизначеності у вимірюванні (GUM:1995) (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 110 с.
4. Кєсова Л. О. Метрологія та стандартизація в теплоенергетиці : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 312 с.
5. Городній М. В., Кононенко С. М. Вимірювання частоти та часових інтервалів в інформаційно-вимірювальних системах : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2014. 176 с.
6. Дорожовець М. М., Мотало В. П., Стадник Б. І. Основи метрології та вимірювальної техніки : у 2 т. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2005. Т. 1. 532 с.
7. Стадник Б. І., Мотало В. П., Дорожовець М. М. Основи метрології та вимірювальної техніки. Т. 2. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2006. 628 с.
8. Павловський О. М., Теслюк В. М. Глобальні навігаційні супутникові системи : навч. посіб. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2016. 240 с.
9. Мартиненко О. О., Войтко В. В. Радіонавігаційні системи : підручник. Київ : НАУ, 2017. 282 с.
10. Харченко В. П., Остроумов І. В., Куліков Г. Є. Навігація повітряних суден : підручник. Київ : НАУ, 2013. 512 с.
11. Зубков О. В., Свид І. В., Воргуль О. В., Семенець В. В. Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах : навч. посіб. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 214 с. URL:

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55

<https://openarchive.nure.ua/entities/publication/b252c58f-3d08-4132-b082-4018db9d0839>

12. Реут Д. Т. Програмування мікроконтролерів STM32 у STM32CubeIDE : практикум. Рівне : НУВГП, 2023. 168 с. ISBN 978-966-327-573-4. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/28611/>
13. Жуйков В. Я., Терещенко Т. О., Петергеря Ю. С. Мікропроцесорна техніка : підручник. 2-ге вид. Київ : Аверс, 2006. 416 с.
14. Бурячок В. Л., Гулак Г. М. Інформаційно-вимірювальні системи : навч. посіб. Київ : НАУ, 2018. 256 с.
15. Прокопенко М. М., Чорний О. П. Цифрова обробка сигналів : навч. посіб. Кременчук : КрНУ ім. Михайла Остроградського, 2015. 212 с.

					ДП.МТІР.10658500.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		