УДК 004.9:621.3.08:629.3 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).66-76

О. В. Щербак, доц., канд. техн. наук, **І. Г. Кириченко**, проф., д-р техн. наук
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна
e-mail: olegcherbak@gmail.com, e-mail: kyrig@ukr.net
С. Л. Хачатурян, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна e-mail: serg130354@gmail.com

Розробка макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи на основі mems-imu модулів для експериментальних досліджень шарнірно-з’єднаних машин

Стаття присвячена актуальній проблемі розробки спеціалізованих засобів вимірювання динамічних характеристик шарнірно-з’єднаних машин (ШЗМ). Особливістю таких машин є наявність декількох модулів, взаємне кутове переміщення яких критично впливає на стійкість, керованість та навантаженість конструкції. Автор обґрунтовує доцільність переходу від дорогих комерційних систем із закритою архітектурою до відкритих апаратно-програмних рішень, що дозволяють гнучко адаптувати систему під специфічні потреби наукового експерименту.

У роботі представлено етап створення макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи (ІВС), побудованого на базі мікроконтролера ATmega328 (платформа Arduino UNO V3) та двох інерціальних MEMS-модулів MPU-6500. Вибір компонентів обумовлений їх доступністю, можливістю просторового рознесення датчиків на різні напіврами машини та здатністю реєструвати лінійні прискорення й кутові швидкості за трьома осями одночасно.

Програмна частина комплексу реалізована за допомогою середовища Arduino IDE для збору даних у реальному часі та мови програмування Python для їх подальшої аналітичної обробки. Розроблений графічний інтерфейс користувача (GUI) підтримує два основні режими: реєстрацію даних у реальному часі та режим аналізу («Analysis»). В останньому реалізовано методи часової та частотної обробки сигналів, включаючи швидке перетворення Фур’є (FFT) для спектрального аналізу, статистичну обробку та оцінку дрейфу сенсорів.

Особливу увагу приділено визначенню відносного кута між модулями ($Δθ$), який є ключовим параметром при дослідженні кінематики ШЗМ. Експериментальна апробація макета підтвердила його здатність фіксувати незначні механічні впливи та коректність роботи алгоритмів. Результати дослідження формують технічну базу для подальшого створення повнофункціонального вимірювального комплексу для модульних дорожньо-будівельних машин.

інформаційно-вимірювальний комплекс, графічний інтерфейс, ARDUINO IDE, PYTHON, MEMS-IMU, акселерометр, гіроскоп, обробка сигналів, Fast Fourier Transform (FFT) (швидке перетворення Фур’є), дрейф

Постановка проблеми. Сучасні шарнірно-з’єднані машини характеризуються наявністю декількох модулів (напіврам), з’єднаних між собою шарнірним вузлом. У типовій конструкції передбачено вертикальний шарнір, який забезпечує поворот напіврам відносно горизонтальної площини, а в окремих моделях також застосовується горизонтальний шарнір, що допускає взаємний кутовий поворот рам у вертикальній площині.

© О. В. Щербак, І. Г. Кириченко, С. Л. Хачатурян, 2026

Така конструктивна схема суттєво ускладнює динамічну поведінку машини, оскільки взаємні кутові переміщення напіврам безпосередньо впливають на керованість, стійкість, навантаженість елементів конструкції та характер взаємодії з опорною поверхнею. У зв'язку з цим під час дослідження динаміки шарнірно-зчленованих машин принципово важливим є визначення просторового положення напіврам в процесі виконання робочих операцій.

На відміну від класичних машин, для яких достатньо аналізу абсолютних параметрів руху, у шарнірно-з'єднаних системах ключовим параметром є саме відносний кутовий стан між модулями. Його експериментальне визначення потребує застосування вимірювальних систем, здатних реєструвати кутові переміщення в реальному часі без жорсткого механічного зв'язку між вимірювальними точками.

У цьому контексті перспективним є використання інерціальних вимірювальних засобів на основі MEMS-технологій, які дозволяють формувати вимірювальні системи з просторово рознесеними датчиками. Розміщення інерціальних модулів безпосередньо на окремих напіврамах дає можливість визначати їх взаємне кутове положення та аналізувати динаміку шарнірних з'єднань без суттєвого втручання в конструкцію машини.

З огляду на це, актуальним є створення макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи на основі MEMS-інерціальних датчиків, призначеного для відпрацювання програмного забезпечення, алгоритмів обробки даних і методів визначення динамічних характеристик та відносних кутових переміщень між модулями шарнірно-зчленованих механічних систем.

У сучасних інженерних дослідженнях технічних систем важливу роль відіграють експериментальні вимірювання кутових переміщень, прискорень і вібраційних параметрів. Для розв'язання таких задач широко застосовуються готові промислові вимірювальні комплекси, що забезпечують високу точність і стабільність результатів. Разом з тим використання комерційних систем збору даних супроводжується рядом обмежень, серед яких висока вартість, закрита чи частково закрита архітектура програмного забезпечення, а також обмежені можливості адаптації до специфічних умов експерименту.

У багатьох випадках дослідник змушений підлаштовувати методику експерименту під наявні можливості програмного забезпечення комерційного комплексу, що знижує гнучкість досліджень. Крім того, універсальність таких систем часто призводить до надлишкової функціональності, котра не використовується при проведенні наукових досліджень, але ускладнює налаштування та експлуатацію.

Альтернативним підходом є створення інформаційно-вимірювальних комплексів на основі відкритих апаратно-програмних платформ, зокрема мікроконтролерних систем родини Arduino та подібних платформ у поєднанні з зовнішніми інерціальними датчиками. Такий підхід забезпечує повний контроль над архітектурою комплексу, можливість реалізації власних алгоритмів обробки сигналів і поетапного розвитку системи відповідно до задач дослідження.

Аналіз основних досліджень і публікацій. У наукових публікаціях значну увагу приділено застосуванню комерційних систем збору даних для вимірювання динамічних характеристик механічних об'єктів. Такі системи демонструють високу точність, проте їх закрита архітектура обмежує можливість модифікації алгоритмів обробки сигналів і інтеграції з нестандартними експериментальними завданнями.

У низці робіт показано, що за умови правильної організації збору даних і застосування статистичних методів обробки MEMS-акселерометри та гіроскопи можуть забезпечувати достатню інформативність для аналізу вібраційних процесів і

кутових переміщень. Разом з тим підкреслюється необхідність врахування шумів та дрейфу, характерних для датчиків цього класу.

Методи частотного аналізу, зокрема швидке перетворення Фур'є, широко використовуються для ідентифікації домінуючих частот коливань і виявлення резонансних явищ у конструкціях. У поєднанні з часовим аналізом такі методи дозволяють отримати комплексне уявлення про динамічний стан об'єкта. Разом з тим у багатьох роботах частотний аналіз реалізується як окремий інструмент без інтеграції в єдину вимірювальну систему.

Наразі в багатьох наукових роботах стали використовуватися MEMS-акселерометри. Галузь їх використання досить широка – це і медицина [10], машинобудування [5-9], сучасні літальні апарати [11], вони найшли широке використання практично в усіх галузях.

У роботі [1] запропоновано метод обробки даних MEMS-акселерометрів і гіроскопів для оцінювання кутів розгойдування вантажу мостового крана. Основна увага приділена алгоритмам фільтрації та експериментальній перевірці на лабораторному стенді. Робота [2] розглядає практичні аспекти вимірювання кутів у шарнірних з'єднаннях за допомогою IMU, зокрема калібрування та усунення дрейфу. Запропоновані підходи є базовими для побудови систем вимірювання відносних кутів. Стаття [3] присвячена проблемі узгодження систем координат IMU при вимірюванні кутів шарнірів. Запропоновано формалізовану процедуру уніфікації опорних систем відліку для підвищення точності вимірювань.

У дослідженні [4] наведено сучасний огляд технологій масивів MEMS-IMU, методів їх калібрування та поєднання даних. Робота демонструє потенціал підвищення точності вимірювань шляхом використання кількох інерціальних сенсорів.

На відміну від наукових праць, які є у відкритому доступі, в даному дослідженні розроблюється макетний апаратно-програмний зразок, основним призначенням якого є відпрацювання архітектури системи, програмного забезпечення та методів обробки інерціальних сигналів для подальшого використання в дослідженнях шарнірно-з'єднаних машин. На цьому етапі застосовується аналіз raw data (сирі вимірювальні дані) та відносних вимірювальних даних, що дозволяє оцінити вплив шумів, дрейфу та динамічних складових без попередньої компенсації.

Остаточне калібрування інерціальних датчиків з використанням спеціалізованих калібрувальних пристроїв планується на наступному етапі досліджень після завершення формування повнофункціонального інформаційно-вимірювального комплексу та його механічної інтеграції з об'єктом експерименту.

Аналіз літературних джерел свідчить, що актуальною є задача створення відкритого інформаційно-вимірювального комплексу, котрий поєднує апаратну частину на базі MEMS-IMU та програмні засоби збору, візуалізації й аналізу експериментальних даних.

Постановка завдання. Метою роботи є створення макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи для налагодження програмного забезпечення та апробації методів обробки інерціальних сигналів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

– проаналізувати можливості існуючих вимірювальних систем і обґрунтувати доцільність використання відкритої архітектури;

– обрати тип інерціальних MEMS-IMU датчиків для вимірювання кутових переміщень;

– розробити апаратно-програмну структуру комплексу;

– реалізувати методи обробки даних;

– створити графічний інтерфейс – програмне забезпечення для реєстрації та обробки експериментальних даних.

Виклад основного матеріалу. При розробці макетного апаратно-програмного зразка інформаційно-вимірювальної системи особливу увагу було приділено вибору програмного забезпечення з урахуванням вимог до ліцензування, доступності та можливості вільного використання у межах науково-дослідної роботи. У процесі аналізу розглядалися як безкоштовні, так і комерційні середовища розробки та пакети обробки даних, зокрема Visual Studio у поєднанні з мовою програмування C#, а також спеціалізовані інженерні програмні продукти для збору та аналізу експериментальної інформації.

З огляду на обмежені фінансові можливості закладу вищої освіти, у якому виконується дослідження, а також на вимоги до використання виключно ліцензійного чи вільно розповсюджуваного програмного забезпечення при підготовці науково-дослідної роботи, було обрано середовище Arduino IDE та мову програмування Python. Обидва програмні інструменти є безкоштовними, відкритими та широко застосовуються у науковій і прикладній практиці в багатьох країнах світу, що забезпечує прозорість і відтворюваність результатів досліджень.

Arduino IDE використовується для реалізації програмної частини, що функціонує безпосередньо на мікроконтролері та забезпечує зчитування інерціальних даних, обмін за стандартними інтерфейсами, а також попередню обробку та передавання інформації до персонального комп’ютера. Простота середовища, наявність великої кількості відкритих бібліотек і стабільна підтримка апаратних платформ роблять Arduino IDE доцільним вибором для створення вбудованих вимірювальних вузлів.

Для реалізації задач збору, візуалізації та аналізу експериментальних даних на персональному комп’ютері застосовано мову програмування Python з використанням відкритих бібліотек для чисельних обчислень, обробки сигналів і графічного представлення результатів. За своїми функціональними можливостями даний підхід є співставним з можливостями комерційних програмних пакетів, таких як MATLAB або LabVIEW, зокрема у частині реалізації алгоритмів фільтрації, спектрального аналізу та статистичної обробки даних.

Слід зазначити, що використання комерційного програмного забезпечення для подібних задач потребує значних фінансових витрат на придбання ліцензій, вартість яких може сягати декількох тисяч доларів США на рік. Запропонований підхід на основі Arduino IDE та Python дозволяє реалізувати повнофункціональну систему збору, обробки та аналізу інерціальної інформації без додаткових фінансових витрат, не поступаючись за рівнем функціональності та гнучкості комерційним аналогам. Вартість професійного обладнання коливається в межах 1000÷3000 євро. Вартість даної розробки, в тому числі вартість компонентів і витратних матеріалів не перевищує 300 євро.

У попередніх дослідженнях та публікаціях широко застосовуються як окремі акселерометри, зокрема ADXL345, так і багатокомпонентні інерціальні модулі на основі MEMS-технологій. Акселерометри типу ADXL345 є простими у використанні та придатними для вимірювання лінійних прискорень у квазістатичних режимах, проте їх функціональні можливості є обмеженими при дослідженні динамічних процесів, пов’язаних із кутовими переміщеннями та швидкими змінами орієнтації.

З огляду на специфіку задач дослідження динаміки шарнірно-зчленованих механічних систем, де визначальним є аналіз **відносних кутових переміщень між модулями**, доцільним є використання інерціального модуля, що поєднує акселерометри та гіроскопи в єдиному пристрої. У цьому контексті для розробки макетного апаратно-програмного зразка було обрано MEMS-інерціальний модуль

MPU-6500, який забезпечує одночасне вимірювання лінійних прискорень і кутових швидкостей за трьома взаємно перпендикулярними осями.

Порівняно з окремими акселерометрами, застосування MPU-6500 дозволяє реалізувати більш інформативну систему збору даних, орієнтовану на аналіз кутового стану та динамічних характеристик руху. Крім того, даний модуль характеризується компактністю, доступністю, широкою підтримкою з боку відкритих апаратно-програмних платформ і наявністю значної кількості прикладних реалізацій, що є важливим на етапі створення стендового макета та відпрацювання програмного забезпечення.

Таким чином, вибір MPU-6500 зумовлений не прагненням досягти максимальну точність на даному етапі, а необхідністю формування **універсального, гнучкого та функціонально повного макетного зразка**, придатного для подальшого розвитку в складі інформаційно-вимірювального комплексу для дослідження шарнірно-з'єднаних машин.

Запропонований комплекс складається з апаратної та програмної частин. Апаратна частина містить мікроконтролерну платформу на базі мікроконтролера ATmega328, встановленого на плату Arduino UNO V3 з підключеними інерціальними датчиками типу MEMS-IMU (в даному комплексі встановлено 2 датчика MPU-6500) (рис. 1), які забезпечують вимірювання лінійних прискорень і кутових швидкостей у трьох взаємно перпендикулярних осях. Датчики були просторово рознесені (на експериментальному зразку будуть встановлюватися на двох напіврамах (модулях), з'єднаних шарніром), що дозволяє формувати багатоточкову вимірювальну систему.

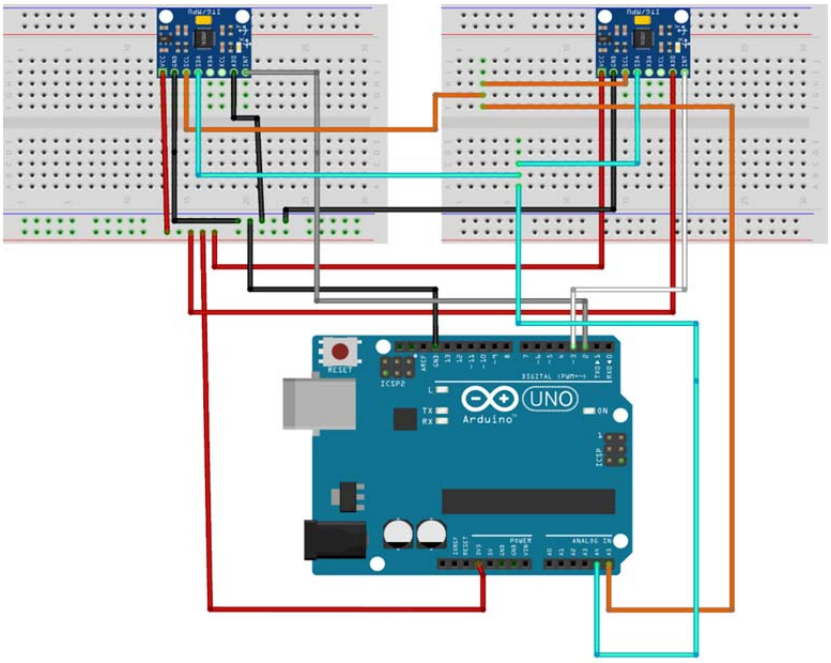


Рисунок 1 – Макетний стенд збору інерціальних даних на основі плати Arduino Uno та двох MEMS-модулів MPU-6500, підключених спільною шиною I²C

Джерело: розроблено авторами

Програмна частина реалізована завдяки використання програми Arduino IDE 2.3.7, яка забезпечує прийом даних у реальному часі, їх буферизацію та передачу у COM порт і прийом на PC та подальшу обробку з програмним забезпеченням, розробленим у Python 3.12.10. Архітектура програмного забезпечення передбачає розділення режимів візуалізації поточних даних і аналітичної обробки. В результаті

виконання цієї програми отримуємо графічні залежності, показані на рис. 2, де наведено часові реалізації сигналів інерціальних датчиків у режимі механічного спокою макетного стенда. За відсутності зовнішніх збурень сигнали характеризуються відносною стабільністю та незначними флуктуаціями навколо сталих рівнів. Постійні складові сигналів обумовлені проєкцією вектору прискорення вільного падіння на чутливі осі акселерометрів, а також індивідуальними зсувами нуля MEMS-сенсорів.

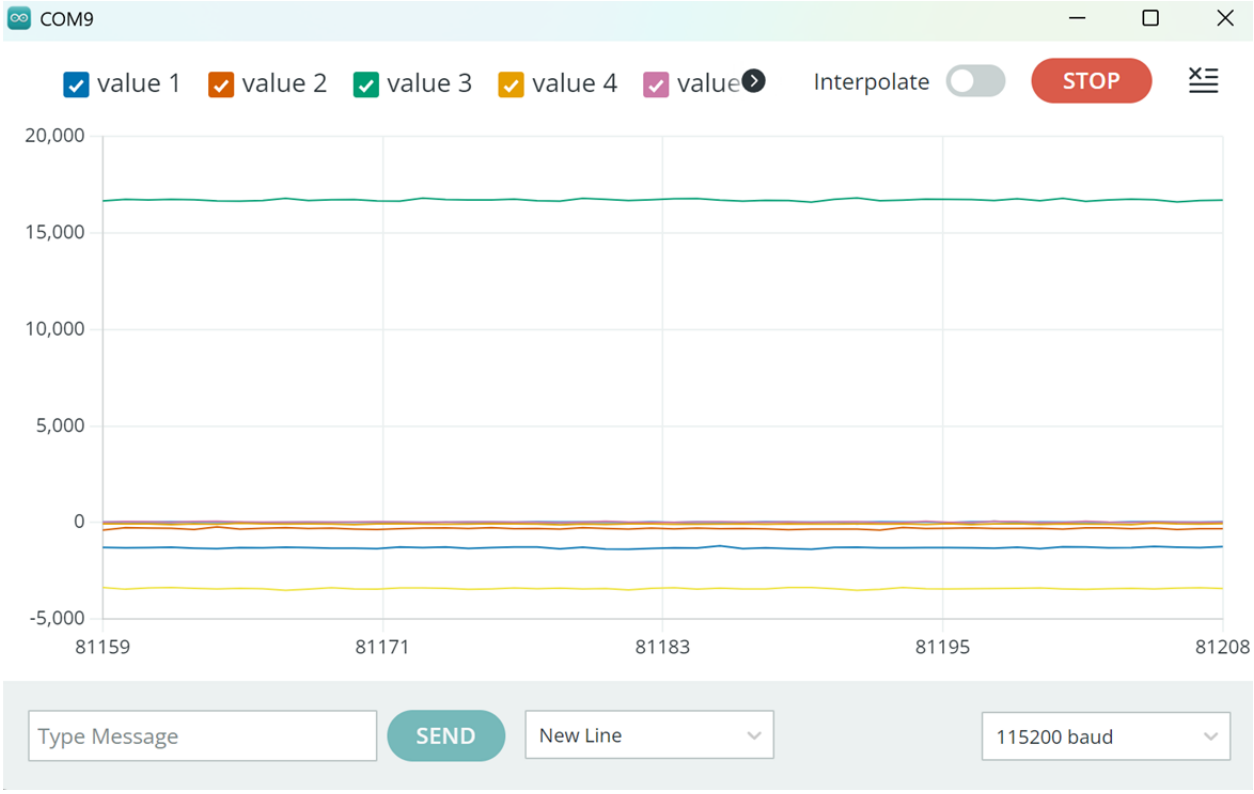


Рисунок 2 – Експериментальні сигнали у часі сирих інерціальних даних, зчитаних з двох MEMS-модулів MPU-6500 у режимі механічного спокою макетного стенда

Джерело: розроблено авторами

Невеликі коливання сигналів пояснюються внутрішніми шумами датчиків, температурними дрейфами та особливостями макетного підключення. Отримані результати підтверджують коректність роботи апаратної частини стенда та дозволяють розглядати даний режим як базовий (референтний) для подальшого аналізу реакції системи на зовнішні механічні впливи. Незважаючи на те, що з двох інерціальних модулів MPU-6500 зчитуються дванадцять інформаційних каналів, на графіках може візуально спостерігатися менша кількість кривих. Це пояснюється накладанням сигналів з каналів, що мають близькі числові значення, зокрема у випадку однакової орієнтації та умов роботи датчиків. Крім того, різний динамічний діапазон акселерометричних і гіроскопічних сигналів призводить до зменшення візуальної виразності окремих каналів при їх спільному відображенні.

На рис. 3 представлено результати вимірювань, отриманих при прикладенні контрольованого зовнішнього механічного впливу до макетного стенда у вигляді легких коливальних рухів макетних плат з інерціальними модулями. У порівнянні з режимом спокою спостерігається зростання амплітуди коливань сигналів та поява динамічних складових, що відображають реакцію датчиків на зовнішнє збурення.

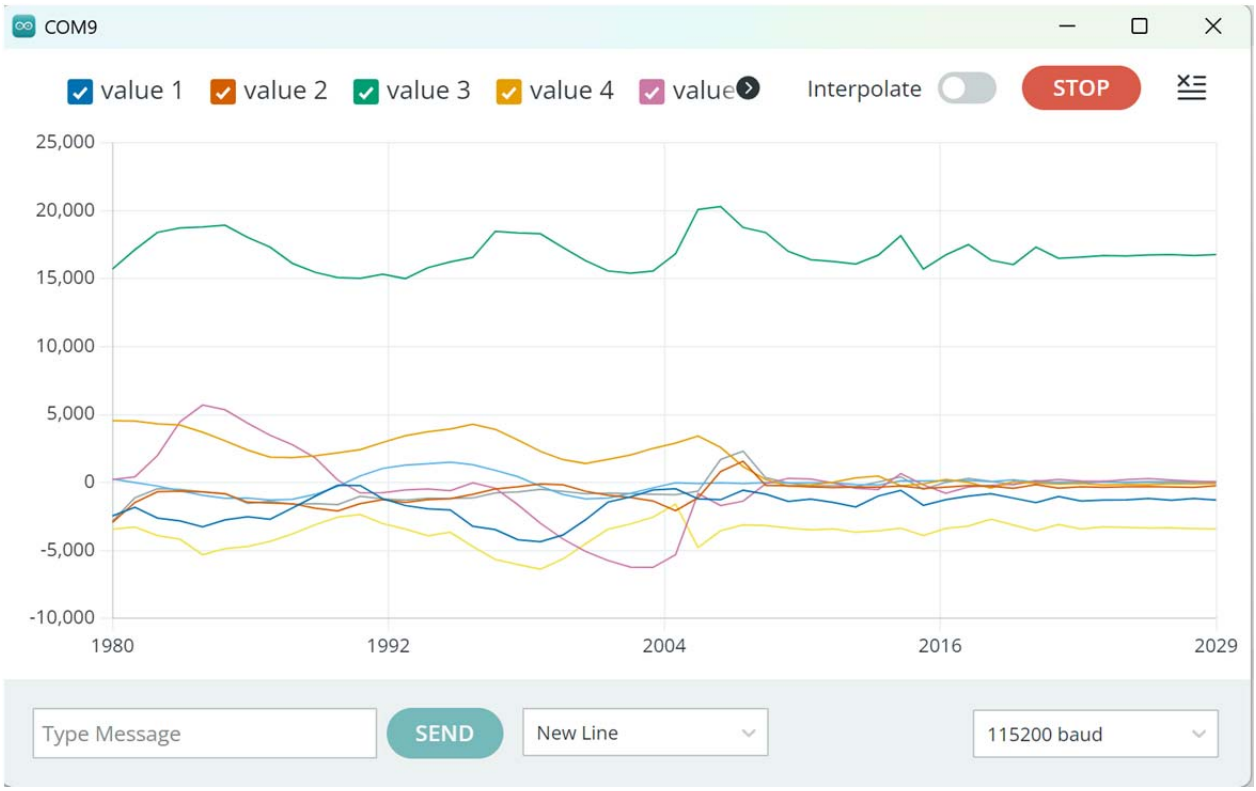


Рисунок 3 – Експериментальні сигнали сирих інерціальних даних
при прикладенні зовнішнього механічного впливу до макетного стенда
Джерело: розроблено авторами

Відмінності у характері сигналів окремих каналів зумовлені просторовою орієнтацією чутливих осей датчиків і різним розташуванням інерціальних модулів у межах макетного стенда. Отримані залежності демонструють здатність розробленого апаратно-програмного зразка фіксувати навіть незначні механічні впливи й можуть бути використані для подальшого аналізу динамічних характеристик, зокрема оцінки дрейфу, спектрального складу та відносних кутових переміщень.

Алгоритм роботи графічного інтерфейсу полягає у такому. Як було зазначено вище, побудова графічного інтерфейсу користувача (graphical user interface – GUI) здійснювалася у програмі Python 3.12.10. У процесі створення програми регістратора GUI було розроблено низку проміжних варіантів (а саме 12), з простого віртуального осцилографа, котрий зчитує COM порт та будує графіки прискорення та дані з гіроскопів у реальному часі. На рис. 4 представлена третя модернізація з додаванням елементу аналізу. До графічного інтерфейсу добавлені експериментальні сигнали кутів нахилу θ_1 та θ_2, визначених за даними двох інерціальних MEMS-модулів MPU-6500, а також їх відносний кут $\Delta\theta=\theta_1-\theta_2$.

Третій графік (Angles) на рис. 4 відображає часові залежності кутових параметрів, обчислених на основі даних акселерометрів двох інерціальних MEMS-модулів. Криві θ_1 та θ_2 відповідають кутам нахилу, визначеним окремо для першого та другого датчика відповідно, у вибраній площині, що визначається орієнтацією чутливих осей датчиків.

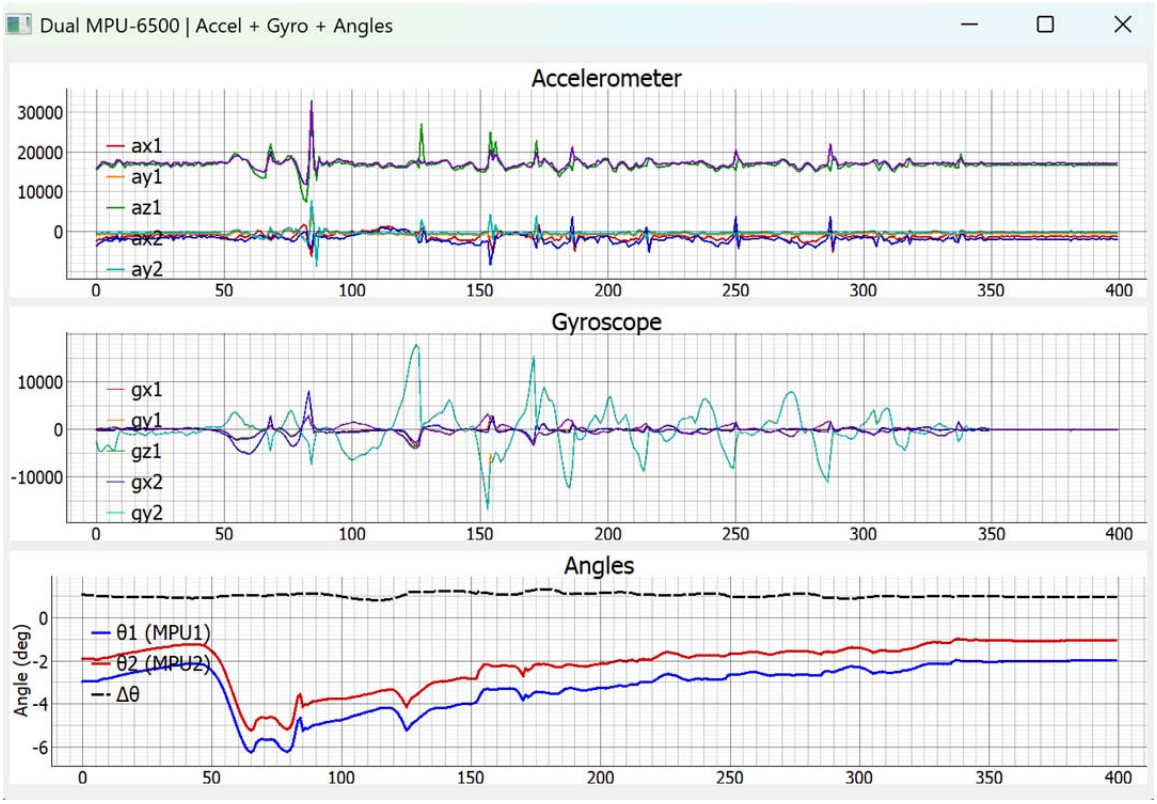


Рисунок 4 – Модернізація GUI №3, додавання графіка Angle до графічного інтерфейсу
Джерело: розроблено авторами

Кутові параметри θ_1 та θ_2 розраховуються на основі співвідношення компонент прискорення з урахуванням гравітаційної складової, що дозволяє оцінити просторове положення кожного модуля відносно вертикалі. Отримані значення відображають абсолютний кут нахилу кожної макетної плати у поточний момент часу.

Третя крива $\Delta\theta$ являє собою різницю між кутами θ_1 та θ_2 і характеризує відносне кутове положення двох інерціальних модулів. Саме цей параметр є найбільш інформативним при дослідженні динаміки шарнірно-зчленованих механічних систем, оскільки дозволяє безпосередньо оцінювати взаємне положення окремих ланок конструкції незалежно від їхнього абсолютного просторового положення.

Використання різниці кутів $\Delta\theta$ дозволяє зменшити вплив систематичних похибок окремих датчиків, таких як зсув нуля та температурний дрейф, що є особливо важливим на етапі роботи з некаліброваними чи попередньо обробленими даними. Таким чином, параметр $\Delta\theta$ може розглядатися як узагальнена характеристика деформаційних або кінематичних змін у макетному стенді та є базовим для подальшого аналізу динамічних процесів.

Після низки переглянутих варіантів, була отримана поки що остання модернізація GUI під номером 12 (рис. 5). На наш погляд, на даному етапі можливостей цього користувацького інтерфейсу достатньо для виконання завдань налагодження компонентів ІВС (інформаційна вимірювальна система). У процесі проведення пошукових експериментів на моделі шарнірної машини користувальницький інтерфейс, з огляду на відкритий код, може бути легко доопрацьований під нові обставини. Це ще більше підкреслює універсальність і модульність розробленої концепції ІВС. Ключові особливості розроблено за допомогою GUI. Для можливості роботи в двох режимах передбачений перемикач між режимом реєстрації даних та їх аналізом. Режим

реєстрації – це відображення в реальному часі вимірюваних параметрів, де без затримки можна спостерігати за процесом, який відбувається. Другий режим програмного забезпечення – Analysis, дозволяє виконувати комплексну обробку експериментальних даних, отриманих з інерціальних акселерометрів та гіроскопів MEMS-модулів MPU-6500. У часовій області забезпечується аналіз зміни сигналів у часі, що дає змогу оцінювати характер перехідних процесів, стабільність показів і реакцію системи на зовнішні збурення. Обчислення кутових параметрів θ_1, θ_2 та відносного кута $\Delta\theta$ дозволяє досліджувати просторове положення окремих елементів і їх взаємну кінематику. Функція оцінки дрейфу (drift) дає змогу кількісно визначити повільні систематичні зміни кутових сигналів у часі, характерні для MEMS-датчиків. Реалізація спектрального аналізу на основі FFT дозволяє виявляти домінуючі частоти коливань і досліджувати вібраційні процеси у системі. Додатково передбачено статистичний аналіз сигналів, зокрема визначення середніх значень, RMS та діапазонів зміни, що забезпечує комплексну оцінку якості та інформативності експериментальних даних.

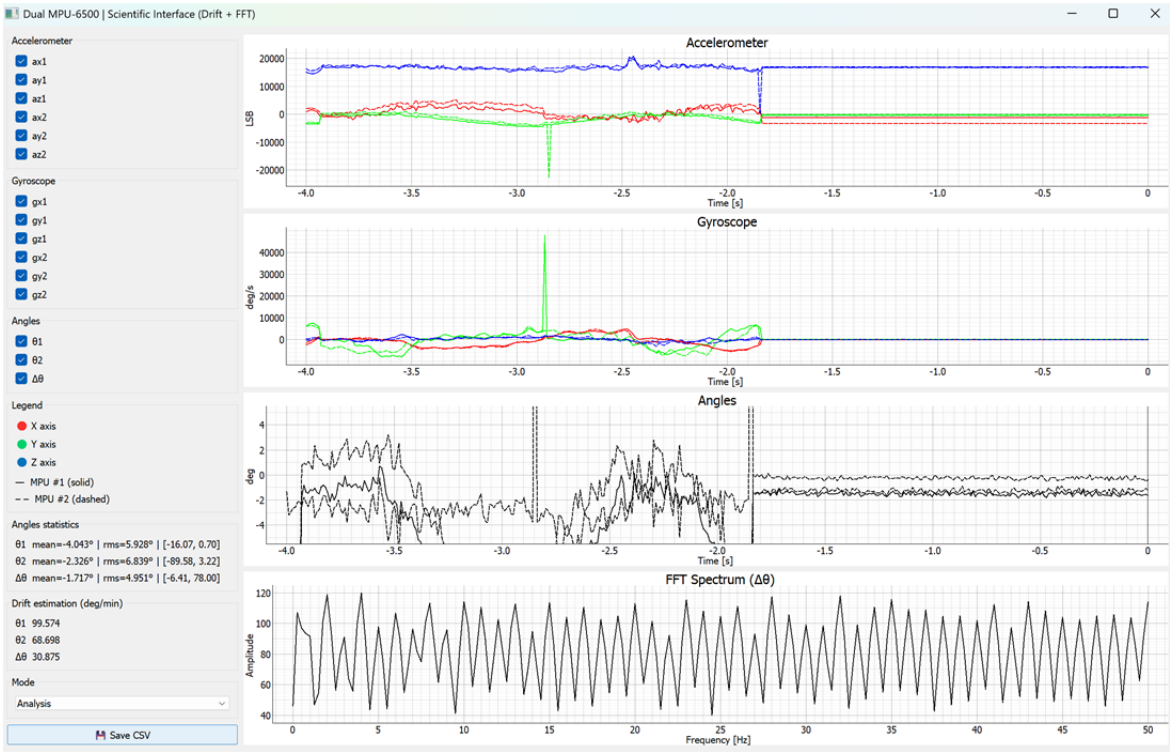


Рисунок 5 – Остання модернізація GUI для реєстрації та обробки експериментальних досліджень
Джерело: розроблено авторами

Подальші дослідження передбачають:

– до графічного інтерфейсу користувача GUI додати зчитування експериментальних даних з 4 тензобалок, які будуть встановлені біля кожного колеса, та будуть фіксувати реакції на них. Також на металевій конструкції зразка буде встановлено 4 тензорозетки. В результаті, на першому етапі проведення експериментальних досліджень GUI буде фіксувати дані з 20 інформаційних каналів;

– зі сторони апаратної частини розроблятиметься модульний блок, який дозволить змінювати компоненти ІВС у залежності від складності та умов проведення експериментальних досліджень, що не можливо здійснювати за допомогою серійних ІВС.

Висновки. 1. У ході дослідження розроблено макетний апаратно-програмний зразок інформаційно-вимірювальної системи на основі MEMS-інерціальних датчиків, призначений для стендового відпрацювання архітектурних і алгоритмічних рішень.

2. Запропонований макетний зразок реалізує базові функції збору, передавання, візуалізації та аналізу інерціальних даних і не є завершеним інформаційно-вимірювальним комплексом, а розглядається як етап підготовки до подальших експериментальних досліджень.

3. Обґрунтовано доцільність застосування відкритої апаратно-програмної архітектури, котра забезпечує гнучкість налаштування, можливість модифікації програмного забезпечення та адаптацію макетного зразка до різних об’єктів дослідження.

4. У складі програмного забезпечення реалізовано методи часової та частотної обробки інерціальних сигналів, зокрема визначення статистичних показників, оцінку дрейфу та спектральний аналіз, що дозволяє виконувати первинну оцінку динамічних процесів.

5. Розроблений графічний інтерфейс розглянуто як складову стендового макета, що забезпечує зручність налагодження програмного забезпечення, наочну інтерпретацію результатів і зменшення впливу оператора на процес аналізу даних.

6. Створений макетний апаратно-програмний зразок формує методичну та технічну основу для подальшої розробки повнофункціонального інформаційно-вимірювального комплексу та його використання в експериментальних дослідженнях механічних і шарнірно-з’єднаних систем.

Список літератури

1. Helma V., Goubej M., Setka M. Inertial measurements processing for sway angle estimation in overhead crane control applications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. 2021. p. 1123–1128.
2. Seel T., Schauer T. IMU-based joint angle measurement made practical. *IEEE Sensors Journal*. 2013. Vol. 14, No. 6. p. 1954–1962.
3. Yi C., Zhou Y., Zhao Y. Reference frame unification of IMU-based joint angle measurement. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 9. Article 3147.
4. Xuan J., Liu H., Zhang Q. A review of inertial measurement unit arrays: configuration, calibration and data fusion. *Micromachines*. 2024. Vol. 15, No. 2. Article 215.
5. Rashid K. M., Louis J., Chowdhury T. Automated activity identification for construction equipment using IMU sensors. *Frontiers in Built Environment*. 2019. Vol. 5. Article 72.
6. Li Z., Wang J., Chen X. Research on structural health monitoring and intelligent lifting technology for cranes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1486. Article 022015.
7. Zhang Y., Liu B., Sun D. Structural health monitoring of lifting machinery based on multi-sensor data fusion. *NDT & E International*. 2024. Vol. 137. Article 102778.
8. Shahirpour A., Taheri S., Moshiri B. Sideslip angle and parameter estimation of an articulated vehicle using joint extended Kalman filter. *Vehicle System Dynamics*. 2023. Vol. 61, No. 4. P. 1057–1074.
9. Suzuki T., Yamamoto M., Kato H. Estimation of articulated angle in six-wheeled dump trucks using sensor fusion. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 14. Article 4738.
10. Uhlenberg M., Seel T., Bellmann M. Where to mount the IMU? Validation of joint angle estimation accuracy for different sensor placements. *Frontiers in Robotics and AI*. 2024. Vol. 11. Article 1298456.
11. Бойко Ю., Свачій О. Дослідження інерційної системи вимірювання відхилення вантажу БПЛА від нульової точки. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. №5. С. 218–226.

References

1. Helma, V., Goubej, M., & Setka, M. (2021). Inertial measurements processing for sway angle estimation in overhead crane control applications. *Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM),* (pp. 1123–1128). [in English].
2. Seel, T., & Schauer, T. (2013). IMU-based joint angle measurement made practical. *IEEE Sensors Journal.* Vol. 14, No. 6. 1954–1962. [in English].
3. Yi, C., Zhou, Y., & Zhao, Y. (2021). Reference frame unification of IMU-based joint angle measurement. *Sensors.* Vol. 21, No. 9. Article 3147. [in English].

4. Xuan, J., Liu, H., & Zhang, Q. (2024). A review of inertial measurement unit arrays: configuration, calibration and data fusion. *Micromachines.* Vol. 15, No. 2. Article 215. [in English].
5. Rashid, K. M., Louis, J., & Chowdhury, T. (2019). Automated activity identification for construction equipment using IMU sensors. *Frontiers in Built Environment.* Vol. 5. Article 72. [in English].
6. Li, Z., Wang, J., & Chen, X. (2020). Research on structural health monitoring and intelligent lifting technology for cranes. *Journal of Physics: Conference Series.* Vol. 1486. Article 022015. [in English].
7. Zhang, Y., Liu, B., & Sun, D.) (2024). Structural health monitoring of lifting machinery based on multi-sensor data fusion. *NDT & E International*. Vol. 137. Article 102778. [in English].
8. Shahirpour, A., Taheri, S., & Moshiri, B. (2023). Sideslip angle and parameter estimation of an articulated vehicle using joint extended Kalman filter. *Vehicle System Dynamics.* Vol. 61, No. 4. P. 1057–1074 [in English].
9. Suzuki, T., Yamamoto, M., Kato, H. (2021). Estimation of articulated angle in six-wheeled dump trucks using sensor fusion. *Sensors*.Vol. 21, No. 14. Article 4738. [in English].
10. Uhlenberg, M., Seel, T., & Bellmann, M. (2024). Where to mount the IMU? Validation of joint angle estimation accuracy for different sensor placements. *Frontiers in Robotics and AI.* Vol. 11. Article 1298456 [in English].
11. Bojko, Yu., & Svachij, O. (2022). Doslidzhennya inercijnoyi sistemi vimiryuvannya vidhilennya vantazhu BPLA vid nulovoyi tochki. *Visnik Hmelnickogo nacionalnogo universitetu,* 5, 218–226. [in Ukrainian].

Oleh Shcherbak, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ihor Kyrychenko,** Professor, DSci.
National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
Serhiy Khachaturyan, Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Development of a Mock-up Hardware and Software Prototype of an Information and Measurement System Based on MEMS-IMU Modules for Experimental Research of Articulated Machines

The article presents the development stage of a mock-up hardware and software prototype of an information and measurement system (IMS) specifically designed for studying the dynamics of articulated-joint machines. Modern articulated vehicles consist of multiple modules (semi-frames) where the relative angular displacement significantly impacts controllability, stability, and structural loading. Unlike classical rigid machines, investigating articulated systems requires real-time monitoring of relative spatial positions without rigid mechanical links between measurement points.

The author highlights the limitations of commercial data acquisition systems, such as high costs, closed architectures, and lack of flexibility for specific research tasks. As an alternative, the research proposes an open-architecture system based on affordable MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) technologies. The prototype's hardware component utilizes the ATmega328 microcontroller (Arduino UNO V3 platform) and two MPU-6500 inertial measurement units (IMU). These sensors are spatially separated to allow placement on different semi-frames, enabling the collection of three-axis linear acceleration and angular velocity data.

The software ecosystem of the developed prototype leverages the Arduino IDE for low-level firmware tasks and Python 3.12 for high-level data processing and visualization. This combination provides a powerful, license-free alternative to expensive commercial packages like MATLAB or LabVIEW. A specialized Graphical User Interface (GUI) was developed, featuring twelve iterations of refinement to ensure effective data logging and analysis. The GUI includes two operational modes: a real-time Registration mode for live monitoring and an Analysis mode for comprehensive post-processing.

The implemented signal processing algorithms include time-domain analysis for transient response evaluation, frequency-domain analysis using Fast Fourier Transform (FFT) for vibration study, and drift estimation to account for inherent MEMS sensor errors. A critical functional feature is the calculation of the relative angle ($Δθ$) between the two IMU modules, which serves as the primary informative parameter for analyzing the kinematic changes in articulated mechanical systems.

Experimental tests of the prototype in both static and dynamic conditions confirmed the reliability of the hardware and the accuracy of the software algorithms in detecting subtle mechanical perturbations. The study concludes that the developed mock-up provides a solid methodological and technical foundation for a future full-scale IMS complex intended for testing modular road-building machines. Future work includes expanding the system with 20 information channels, including strain gauges for reaction measurement at each wheel and structural stress analysis.

information and measuring complex, graphical interface, ARDUINO IDE, PYTHON, MEMS-IMU, accelerometer, gyroscope, signal processing, Fast Fourier Transform (FFT), drift

Одержано (Received) 26.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 01.04.2026*
Прийнято до друку (Approved) 07.04.2026