

1. Ана Паула С. Ларокка, Рикардо Эрнесто Шааль. Миллиметровая точность при измерении динамических характеристик сооружений // www.navgeocom.ru/gps/index.htm 2. Донец А.М. Решение задачи геодезического мониторинга высотных зданий и сооружений методом спутниковой геодезии с использованием измерительно-вычислительного комплекса Trimble // www.navgeocom.ru/gps/index.htm 3. Войтенко А.В., Куприянов В.С., Виноградов А.В. О точности передачи координат пунктов ГГС на вспомогательные пункты с помощью спутниковых приемников // *Геодезия и картография*. – 2005. – № 5. – С.13–15. 4. Савчук С.Г. Вища геодезія / Сфероїдна геодезія. – Львів: Ліга-Прес. – 2000. – 248 с. 5. *Геодезичний енциклопедичний словник / За ред. В. Літинського*. – Львів: Євровіт, 2001. – 668 с. 6. Антонюк В.П., Воронков С.О., Іванов В.І., Тревого І.С., Клепфер Є.І., Корольов В.М., Макаревич В.Д., Проць Б.І., Савчук С.Г. Патент на винахід 73903. Спосіб метрологічного контролю приймально-вимірювального наземного комплексу супутникових систем та пристрій для його здійснення. Опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9. – 2005. – 8 с. 7. Клепфер Є., Іванов В., Антонюк В., Корольов В., Оліярник Б., Савчук С., Тревого І., Макаревич В. Можливості визначення відносного місцеположення з міліметровою точністю: Зб. наук. пр. “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”. – Львів: Ліга-прес. – 2004. – С. 384–390. 8. Клепфер Є., Іванов В., Антонюк В., Корольов В., Воронков С., Савчук С., Тревого І., Макаревич В. Питання точності визначення відносного місцеположення на основі GPS-технологій: Зб. наук. пр. “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”. – Львів, 2005. – С. 80–87.

УДК 53.088.22

Г.С. Сидоренко

Науково-навчальний центр “Метрологія”

ВЕРИФІКАЦІЯ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ ТЕОРІЇ БАЛІСТИЧНОГО ГРАВІМЕТРА

Ó Сидоренко Г.С., 2006

Викладено план і наведено результати керованого фізичного експерименту щодо верифікації газодинамічної теорії балістичного гравіметра. Підтверджено можливість коригування результатів вимірювань прискорення сили ваги шляхом введення відповідних поправок, визначуваних експериментально.

There is presented the method of physical experiment, which allows to confirm the correctness of developed gas-dynamic theory of ballistic gravimeter by means of physical result.

1. Постановка проблеми і аналіз публікацій, які характеризують її стан. Сучасні завдання вищої геодезії вимагають розвитку мережі пунктів, координати яких визначені за допомогою глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС), і накопичення точкових гравіметричних даних [1]. Такі дані можуть бути отримані, зокрема, за сумісного використання портативного балістичного гравіметра (БГ) і приймача ГНСС у складі граві-геодезичного комплексу [2]. Під час абсолютних визначень прискорення сили ваги (ПСВ) [1, 2] за допомогою балістичного гравіметра [3, 4, 5] вимірюють просторові й часові параметри траєкторії руху давача БГ (оптичного відбивача інтерферометра Майкельсона), що падає під дією гравітаційного поля Землі. За таких вимірювань первинною інформацією є відомі лінійні відрізки траєкторії, які давач БГ проходить в режимі падіння за відомі відрізки часу [6]. Проте значення цих параметрів залежить не тільки від ПСВ, але й від багатьох інших фізичних чинників. Одним з них є реальне розрідження газового середовища (РГС) в барокамері давача БГ. Молекули повітря, що залишилися після відкачування газу з барокамери, зіштовхуються з давачем БГ і викликають його гальмування, спотворюючи дійсне

значення ПСВ. Для усунення цього джерела похибки визначення ПСВ під час високоточних гравіметричних вимірювань (≈ 5 мкГал) рівень тиску РГС необхідно в процесі відкачування барокамери зменшувати до 10^{-6} мм рт. ст. [7].

Реалізація такого розрядження протягом тривалого часу являє собою достатньо складне завдання. Труднощі розв'язання цього завдання багаторазово зростають під час експлуатації БГ у польових умовах, що сьогодні для України особливо актуально [8].

Альтернативним рішенням досліджуваної проблеми може бути вимірювання ПСВ за тиску в барокамері 10^{-2} – 10^{-3} мм рт. ст., який порівняно просто забезпечується сучасними засобами вакуумної техніки, з подальшим підвищенням точності результату вимірювання після коригування його газодинамічною поправкою.

Ця поправка дасть змогу провести редукцію значення ПСВ, вимірюваного за реального тиску РГС, до значення, яке повинно бути за тиску газу в барокамері 10^{-6} мм рт. ст. і нижче.

Для оцінки можливостей запропонованого способу польових вимірювань ПСВ було розроблено газодинамічну теорію абсолютного БГ [9].

Одним із висновків цієї теорії є той факт, що сума досліджених складових газодинамічної похибки вимірювання ПСВ у першому наближенні пропорційна до тиску газу. Цей факт може бути обґрунтуванням методу редукції за допомогою побудови лінійної залежності показань гравіметра від тиску і екстраполяції її до нульового тиску з метою отримання незміщеної оцінки ПСВ.

Головним завданням цієї роботи є верифікація розробленої газодинамічної теорії БГ. Для емпіричного підтвердження коректності положення цієї теорії необхідно скласти план активного, керованого в контрольований спосіб фізичного експерименту. Під час складання плану експерименту слід передбачити конструктивні і методичні заходи, здійснення яких уможливило б мінімізувати і стабілізувати компоненти систематичної похибки вимірювання ПСВ, причини яких не пов'язані з дією на давач гравіметра РГС. Реалізація таких заходів створює передумови для спрямованого експериментального дослідження закону зміни ПСВ через газодинамічний ефект.

Виклад основного матеріалу досліджень. Величина вказаних вище систематичних похибок змінюється залежно від часу і умов проведення експерименту, зокрема через конструкцію реального гравіметричного фундаменту, який характеризується індивідуальними габаритними і ваговими параметрами. Саме останні визначають амплітудно-частотні характеристики гравіметричного постаменту, з яким механічно пов'язана інерціальна система відліку величини лінійних переміщень давача БГ під час вимірювань ПСВ. Просторова нестабільність початку координат інерціальної системи відліку лінійних переміщень зумовлює наявність змінної за величиною систематичної похибки вимірювань ПСВ. Своєю чергою, причинами просторової нестабільності точки відліку є зовнішні вібраційні завади і автосейсмічні збурення постаменту.

До інших джерел похибки, окрім взаємодії давача з молекулами РГС, можна віднести ефекти, що виникають через флуктуацію траєкторії руху фізичного тіла (ФТ). Тією чи іншою мірою вказані похибки притаманні як робочим засобам вимірювань, до яких можна віднести гравіметри, розроблені в Харкові і Варшаві, так і еталонним гравіметрам типу FG-5 (США) [5, 10, 11].

На попередніх етапах досліджень було розроблено два методи (окрім конструктивного) зменшення вказаних похибок. Перший з них розвиває статистичні принципи організації гравіметричних досліджень, спираючись на методику рандомізації фізичного експерименту. Другий метод реалізує аналітичні можливості уточненої математичної моделі руху давача БГ в РГС під час оцінювання коригуючої поправки. Під час першого етапу досліджень встановлено, що для заглушення автосейсмічних завад доцільно застосовувати перший метод, а для врахування ефектів, пов'язаних з флуктуаціями траєкторії руху давача БГ, кращим є другий метод. Як критерій відповідності фізичній моделі процесу її математичної версії, як завжди прийнято кореляцію

об'єктивних експериментальних даних з вихідними результатами аналітичних досліджень, виконаних відповідно до газодинамічної моделі БГ.

Зокрема, коректність експерименту забезпечувалася гранично коротким лінійним вимірвальним інтервалом траєкторії польоту давача БГ (3–7 см), що практично виключало похибку через вертикальний градієнт ПСВ.

Перед проведенням досліджень газодинамічного ефекту РГС у макеті портативного БГ заздалегідь було вжито заходів, які заглушують автосейсмічну заваду. Методика досліджень ґрунтувалася на концепції активного керованого фізичного експерименту. Цей експеримент передбачав зміну (варіацію) чинників (аргументів), від яких залежить похибка вимірювань. Для того щоб можна було за результатами експерименту (вимірювань) оцінити реакцію результату на зміну чинника, останньому, за активного експерименту, задавалися, як мінімум, два рівні значень. У нашому випадку активний експеримент передбачав вимірювання ПСВ за різних тисків газового середовища з подальшою побудовою регресії, яка екстраполює вимірне значення ПСВ до нульового тиску газового середовища.

Приклад такої залежності показано на рис. 1, де коефіцієнт кореляції дорівнює 0,82, а коефіцієнт регресії – 1,2 мГал/Торр.

З метою дослідження комплексу чинників, що впливають на характер залежності показань гравіметра від тиску РГС, і формування банку даних для перевірки коректності математичних моделей цього явища було виконано серію експериментів, за яких змінювалися тиск РГС і параметри траєкторії рухомого давача БГ. Можливість постановки такого експерименту було забезпечено багаторівневою методикою вимірювань ПСВ, відповідно до якої під час одного підкидання давача БГ реєструвалася серія результатів, що характеризують просторово-часові параметри траєкторії [11, 12].

Ця методика дає змогу досліджувати залишки після параболічної апроксимації залежності шляху давача БГ від часу його падіння.

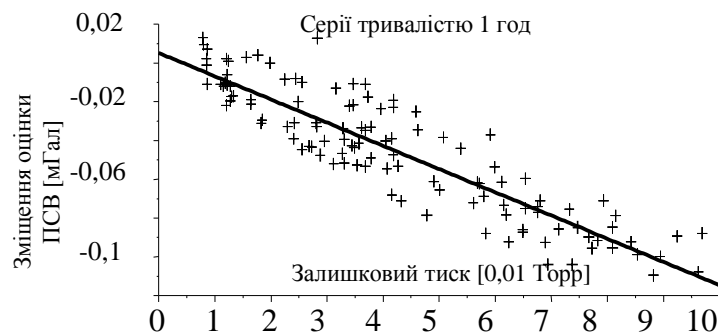


Рис. 1. Залежність показань макета портативного БГ від тиску газового середовища в давачі БГ

На рис. 2 показано дві дванадцятигодинні серії вимірювань ПСВ. Інтервал між кидками становить 20 с. Тиск РГС, який в одній серії дорівнював 0,02, а в іншій – 0,1 Торр, підтримувався на постійному рівні протягом кожного вимірвального циклу.

У результаті експерименту отримано масиви даних, що характеризують просторові характеристики станцій, які послідовно проходив давач БГ через кожні 0,5 мс свого падіння. Після виділення з цього масиву в кожному з підкидань параболічного тренда другого ступеня виконувалося усереднення залишків за усією сукупністю підкидань для дискретного інтервалу 0,5 мс, який фіксував просторове положення вимірвальних рівнів. В такий спосіб, накопичені дані формували «статистичне» підкидання давача БГ, в якому істотно зменшено рівень випадкових похибок через

дискретність лічби шумів електронної апаратури і сейсмічних завад на вищих частотах. На наступному етапі двократним числовим диференціюванням виконувалося обчислення ПСВ.

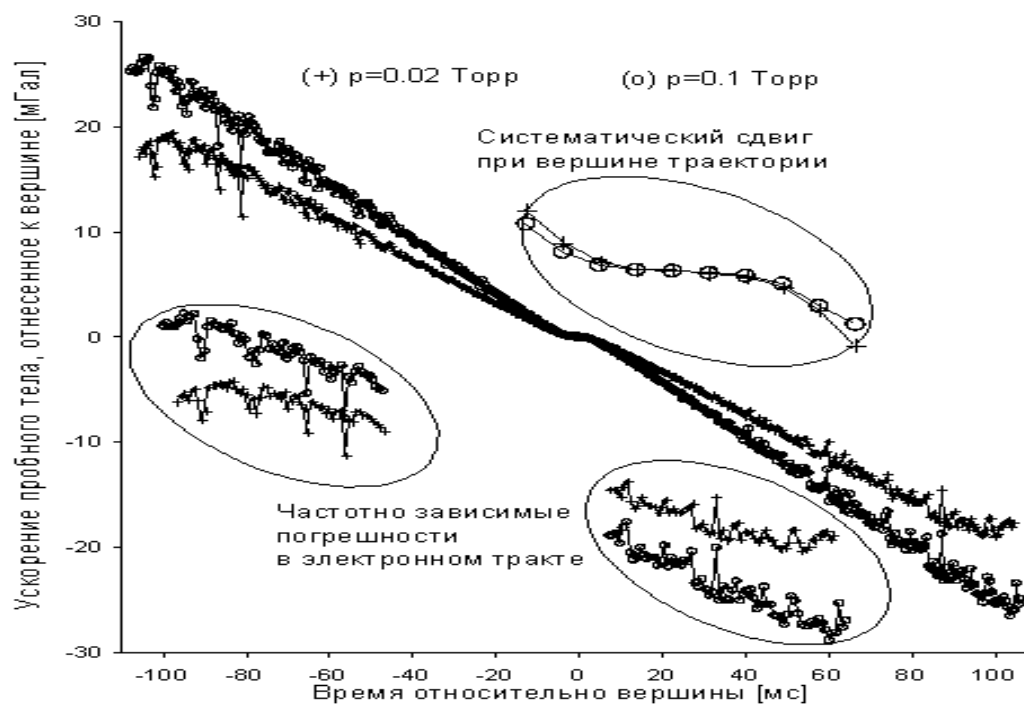


Рис. 2. Залежність миттєвого значення ПСВ давача БГ від часу за різних тисків РГС

На рис. 2 по осі абсцис відкладено час статистичного кидка щодо вершини траєкторії, а по осі ординат – різницю між ПСВ в поточній точці траєкторії і у вершині. Лінійний тренд з кутовим коефіцієнтом тим більшим, чим більший є тиск реального газового середовища, зумовлений силою опору руху давача БГ, яка пропорційна до швидкості руху. Злам лінії тренда при вершині пояснюється особливостями програмного забезпечення, використовуваного в досліджуваному гравіметрі. Як було показано в [13], цей злам не призводить до істотних похибок вимірювання ПСВ. На рисунку виділено фрагменти, що ілюструють частотно-залежні ефекти в електронних блоках, що призводять до квазірезонансних фазових зсувів інтерференційного сигналу. Ці фазові зсуви також не призводять до похибки вимірювання ПСВ.

Після виділення з результатів вимірювань на першому етапі обробки просторово-часових параметрів руху давача БГ (шляху і часу) тренда у вигляді параболі третього ступеня, а також урахування обліку ефектів, пов'язаних з приєднаною масою [9], компоненти, які залишилися, залежності ПСВ від часу набули вигляд, показаний на рис. 3.

Зображений на цьому графіку тренд є наслідком ефектів другого порядку сили опору РГС руху давача БГ. Цей ефект не призводить до похибки вимірювання ПСВ, оскільки він значною мірою ослаблюється симетричним методом вимірювання так само, як і ефект першого порядку (рис. 2).

На рис. 3 показано залежності шляху, пройденого давачем БГ, і його швидкості від часу вільного руху давача БГ після його підкидання катапультною.

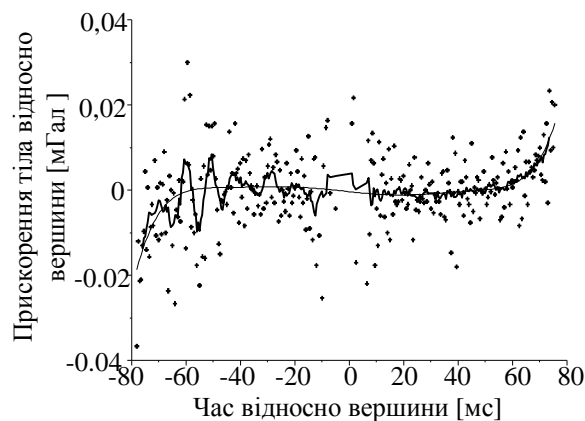


Рис. 3. Залежність ПСВ від часу (залишки після виділення параболі шляху третього ступеня залежно від часу і врахування ефектів приєднаної маси)

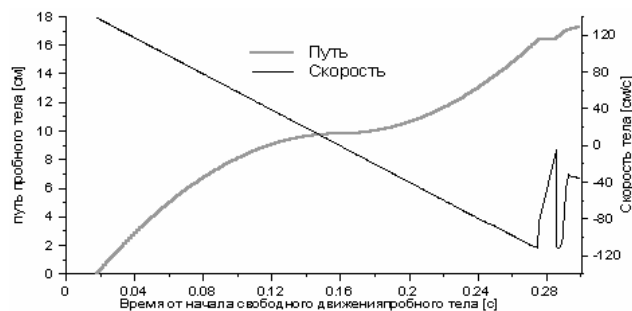


Рис. 4. Шлях і швидкість давача БГ залежно від часу його вільного руху

На рис. 4 зафіксовано різку зміну параметрів руху давача БГ після 0,27 с його падіння, що відповідає моменту контакту рухомого давача БГ з нерухомими елементами корпусу катапульти, які забезпечують прийом і гальмування давача БГ в кінці траєкторії його руху. Апроксимуючий поліном залежності положення тіла (висоти) від часу отримано після попередньої зміни знака приросту шляху в момент досягнення тілом вершини траєкторії.

Параболічну залежність положення тіла за висотою від часу зображено сумою полінома четвертого ступеня декількох згасаючих періодичних компонент і шуму. Головну частину апроксимуючої функції визначено діючим значенням ПСВ за траєкторією руху давача БГ і лінійними ефектами РГС у барокамері. Після виділення головної компоненти складові, що залишилися, були проаналізовані з метою визначення фізичної природи джерел похибок.

Як зрозуміло з рис. 5, виміряне в одному кидку ПСВ мало великий рівень шумів, насамперед через дискретність лічби в електронному тракті.

Поліпшення якості вихідної інформації, яка піддається аналізу, досягнуто накопиченням і підсумовуванням залишків у значній кількості (більше ста) підкидань давача БГ. Як і в аналогічних вітчизняних і зарубіжних експериментах, нами також використані залишки від апроксимації положення давача БГ за висотою, рідше – за прискоренням і швидкістю. Приклади «статистичних» залежностей залишків за прискоренням показано на рис. 2 і 3.

Накопичення великого обсягу статистичного матеріалу і усереднювання залишків дали змогу досліджувати детерміновані процеси, які є загальними для усіх кидків і відповідно приводять до систематичних похибок.

На рис. 6 показано залишки, накопичені в 700 підкиданнях давача БГ під час роботи гравіметра протягом чотирьох годин і в початкових ста підкиданнях цієї серії.

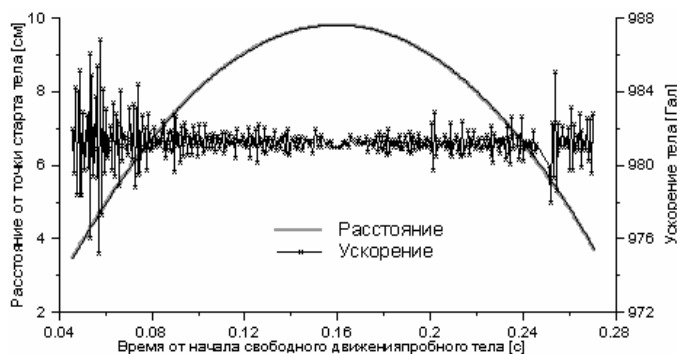


Рис. 5. Траекторія руху давача БГ у координатах «час-висота» і виміряне прискорення давача БГ

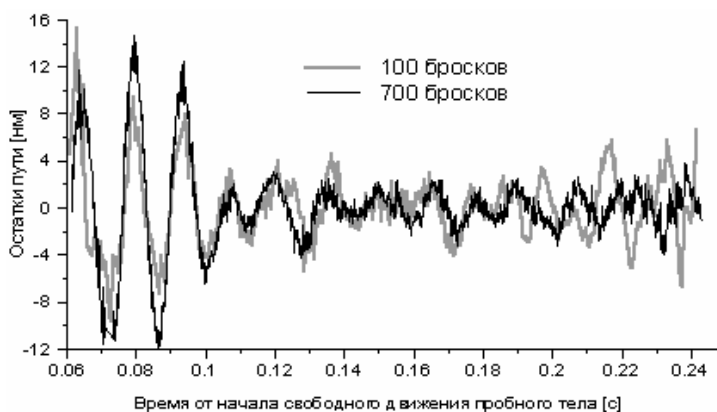


Рис. 6. Статистичні залишки апроксимації шляху залежно від часу вільного руху давача БГ для двох груп кидків

Як бачимо з рис. 6, детермінована основа автосейсмічної завади зберігається практично незмінною, передусім на початковому етапі руху давача БГ. На завершальному етапі руху давача БГ автосейсмічна завада зменшується за амплітудою. Враховуючи останній факт, зроблено висновок про те, що робота катапульты спричиняє згасаючі коливання елементів гравіметра, що інколи набувають характеру биття.

Фазові співвідношення автосейсмічних завад у різних підкиданнях давача БГ практично незмінні на початку його польоту, рандомізуються до кінця польоту через деяку нестабільність роботи механічних елементів катапульты.

На рис. 7 показано тривимірний графік залежності залишків від часу руху давача БГ і часу вимірювань.

На цьому графіку бачимо усталену резонансну реакцію вимірювальної системи на роботу катапульты.

Заходи, вжиті для заглушення автосейсмічних завад, дали змогу зменшити рівень квазіперіодичних завад у залишках до величини одного–двох нанометрів і менше. У цих умовах у залишках виявилися ефекти впливу РГС на рух давача БГ.

Для найбільш чіткого виявлення ефектів РГС вимірювання проводилися з найбільш можливим за цієї висоти вершини траекторії вимірювальним інтервалом, і залишки накопичувалися в такий спосіб, щоб у всіх кидках збігались вершини. На рис. 8 показано типову залежність залишків від часу стосовно вершини за тиску РГС близько 0,02 Торр.

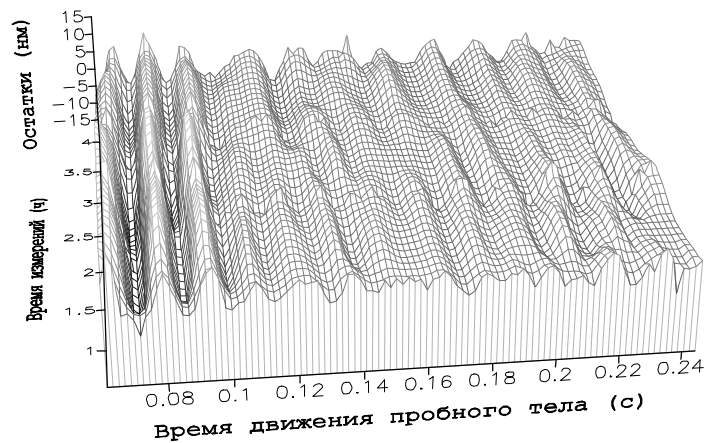


Рис. 7. Залежність залишків апроксимації шляху від часу руху давача БГ і часу вимірювань

На рис. 8 бачимо квазігармонійні складові автосейсмічної завади і тренд, апроксимований поліномом шостого ступеня. Поліноміальний тренд пояснюється наявністю декількох механізмів взаємодії рухомого давача БГ в РГС. Теоретичний розгляд цих механізмів наведено в [7]. Висновки, отримані на підставі аналізу теоретичних моделей, якісно і певною мірою кількісно збігаються з результатами експериментів. Кількісні відмінності пояснюються тим, що вихідні параметри моделей не збігались з фактичними параметрами прототипу БГ. Досліджені моделі не враховували деяких конструктивних особливостей БГ.

Сьогодні у моделях першого наближення використовуються подання елементів балістичного блока у вигляді простих геометричних фігур, якими вони не є насправді.

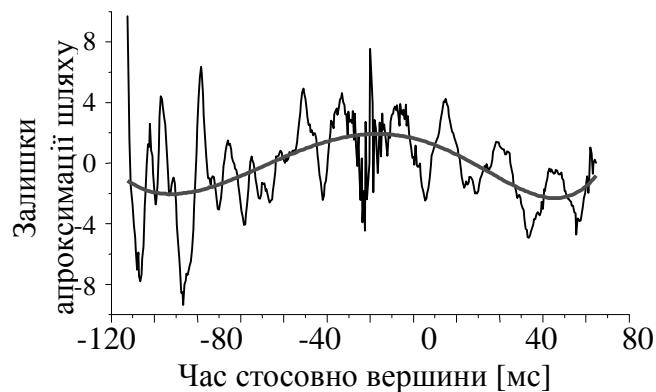


Рис. 8. Залишки шляху руху давача БГ

Автор дякує співробітникам ННЦ “Інститут метрології” і колегам з Варшавського інституту вищої геодезії і картографії за сприяння і допомогу в реалізації розробленого фізичного експерименту.

Висновки:

1. Для перевірки коректності розробленої газодинамічної моделі БГ було запропоновано і реалізовано методику проведення активно керованого в контрольований спосіб фізичного експерименту.

2. Заздалегідь виконаний аналіз систематичних похибок вимірювання ПСВ дав можливість вжити методичні і конструктивні заходи, які уможливили мінімізувати похибки і стабілізувати компоненти систематичної похибки.

3. Стабілізація і мінімізація складових компонент систематичної похибки вимірювання ПСВ створили передумови для цільового експериментального дослідження закону зміни газодинамічної похибки.

4. Для оцінки нелінійної компоненти газодинамічної поправки необхідний додатковий комплекс досліджень із залученням високоточних зарубіжних еталонів ПСВ у рамках звірки національних еталонів ПСВ.

5. Висока кореляція якісних і частково кількісних результатів експерименту підтверджує коректність розробленої газодинамічної теорії БГ.

1. Марченко О.М., Абрикосов О.А. Моделирование гравитационного поля в регионе Украины: Зб. матер. VII Міжн. наук.-техн. симпозиуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища". – Алушта: ЛАГТ, 2002. – С. 22–23. 2. Сидоренко Г.С., Пресняков И.Н., Мирошниченко О.Н., Занимонский Е.М. Использование глобальной навигационной спутниковой системы для гравиметрического мониторинга. Возможности и перспективы // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. – Т. 3. – № 4. – С. 43–48. 3. Дуліт П.Д. Гравіметрія. – Львів.: ЛАГТ, 1998. – 196 с. 4. Цубои Т. Гравитационное поле Земли. – М.: Мир, 1982. – 284 с. 5. Сидоренко Г.С. Разработка и исследование высокоточной радиотехнической доплеровской баллистической гравиметрической системы: Автореф. дисс... канд. техн. наук. – Харьков: ХИРЭ, 1995. – 153 с. 6. Огородова Л.В., Шимбирев Б.П., Юзефович А.П. Гравиметрия. – М.: Недра, 1978. – 325 с. 7. Niebauer T.M. New absolute gravity instruments for physics and geophysics: Ph. D. Dissertation. – University of Colorado, Boulder USA, 1987. – P155. 8. Крюков О.М., Чинков В.М., Мирошниченко О.М., Сидоренко Г.С. Стан та перспективи гравіметричного дослідження території України //Український метрологічний журнал. – 1998. – № 3. – С. 42–45. 9. Сидоренко Г.С. Анализ влияния остаточного газа на движение пробного тела баллистического гравиметра методами механики сплошных сред // – 2004. – № 3. – С. 35–38. 10. Peter, R. Moose, J.E. Faller., TM Niebauer. High – Precision Absolute Gravity Observations in the United States / Journal of Geophysical Research. – 1985.– Vol. – 94. – № B5. – P. 5659–5674. – May 10. 11. Sas – Uhrynowski A., Zanimoski E., Kostin A. 2001, Badanie i udoskonalenie polowego grawimetru balistycznego TBG. – Prace IGiK T. XLVIII. – Z. 103. – S. 83–114. 12. Локшин Ю.В. Многоуровневый измеритель движения для баллистического гравиметра // Работы по исследованию баллистических гравиметров: Сб. науч. тр. – Л.: НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева", 1988. – С. 53–59. 13. Нагорный В.Д. Обработка данных в баллистическом гравиметре: Дисс... канд. физ.-мат. наук. – М., 1993. – 120 с.