УДК 551.510.528:523.98; 520.6
КП
Номер держ. реєстрації 0116U001748
Інв. №

Національна академія наук України
Державне космічне агентство України
Інститут космічних досліджень
(ІКД НАН України та ДКА України)

03680 МСП, Київ 187, проспект Академіка Глушкова, 40, к. 4/1, телефакс 526 41 24,
e-mail: ikd@ ikd.kiev.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. директора ІКД НАН України
та ДКА України, д.ф.-м.н., проф.

_____ О.К. Черемних

_____ 2016 р.

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

НАУКОВІ ОСНОВИ ТА ТЕХНІЧНІ ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО СТВОРЕННЯ КОМПЛЕКСУ АПАРАТУРИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

(Етап «Формулювання оптимальних умов космічного експерименту
та оптимізація параметрів бортової апаратури»)

(Заключний)

за договором 3-02/16 від 01 березня 2016 р.

Науковий керівник
чл.-кор. НАН України О.П. Федоров

Відповідальні виконавці:

к.т.н., с.н.с.
(Розділ 1) В.О. Проненко

д.т.н.
(Розділ 2) В.О. Яценко

д.т.н.
(Розділ 3) В. Демченко

Київ-2016

Результати роботи розглянуті на Вченій раді ІКД НАН України та ДКА України,

протокол № 6 від 9 грудня 2016 р.

СПИСОК АВТОРІВ

ІКД НАН України та ДКА України

Головний науковий співробітник, чл.-кор. НАН України	Федоров О.П. (Розд. 3, Вступ)
Провідний науковий співробітник, д.т.н.	Самойленко Л.І. (Реферат, Висновки)
Завідувач відділу, д.т.н.	Яценко В.О. (Розд. 2)
Старший науковий співробітник, к.т.н.	Підгородецька Л.В. (Розд. 2)
Старший науковий співробітник, к.т.н.	Колос Л. І.(Розд. 3)
Науковий співробітник, к.ф.-м.н.	Черемних С.О. (Розд. 2)
Головний інженер з науково-технічної інформації	Кірносова М.А. (оформлення звіту)
Провідний інженер	Корнієнко О.А. (Розд. 3)
Провідний інженер	Кривицька Ю. Г (Розд. 3)
Аспірант	Макаричев М.В (Розд. 2)

ЛЦ ІКД НАН та ДКА України

Директор ЛЦ ІКД НАН та ДКА України к.т.н.	Лукенюк А.А. (Реферат, Вступ.)
Заст. директора ЛЦ ІКД НАН та ДКА України д.т.н.	Корепанов В.Є. (Розд.1.)
Завідувач відділом, к.т.н., с.н.с.	Проненко В.О. (Розділ 1, Висновки)
Старший науковий співробітник, к.т.н.	Дудкін Ф.Л. (Розд.1)
Старший науковий співробітник, к.т.н.	Марусенков А.А. (Розд.1)
Заступник завідувача відділом	Беляєв С.М. (Розд.1)
Завідувач відділом	Шендерук С.Г. (Розд.1)
Заступник завідувача відділом	Бойчук Б.М. (Розд. 1)
Науковий співробітник	Шимків А.П. (Розд. 1)
Провідний інженер	Штус Т.І. (редагування)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: сторінок 85, рисунків 56, таблиць 7, використаних літературних джерел 72.

Об'єкт досліджень – наукові прилади з високим рівнем метрологічних і експлуатаційних параметрів для здійснення експериментальних досліджень космічної плазми з борту міні- та наносупутників, перспективні прилади для досліджень в умовах мікрогравітації..

Методи досліджень – застосування теорії електричних кіл, основних положень фізики космічної плазми, розробка нових технологій, проведення випробувань та експериментів, аналіз та фізичне моделювання; аналіз ризиків, засоби експериментальної та теоретичної фізики, нанофізика, методи прикладної фізики, математичне моделювання, оптимізація.

Результати досліджень та їх новизна:

– Розроблено кодокероване високостабільне джерело струму з малим рівнем власних шумів для вдосконалення метрологічних та експлуатаційних параметрів ферозондових магнітометрів космічного призначення.

– Здійснено оброблення даних супутникових експериментів для аналізу випадків витікання електромагнітного поля потужних наземних/приземних джерел діапазону частот ULF-VLF (ліній електропередач змінного струму частотою 50/60 Гц та гармонік шуманівського резонансу) в іоносферу.

– Розроблено програмне забезпечення формувача транспортних кадрів інформації.

– Розроблено програмне забезпечення завадостійкого кодування інформації на ПЛІС.

– Отримано нові результати щодо впливу радіаційного випромінювання на супутникові прилади та системи. Розроблено метод мінімізації впливу радіаційного випромінювання на супутникові прилади.

– Методами прямого спостереження за фронтом кристалізації прозорих речовин і чисельними експериментами досліджено вплив вібрацій на морфологію фазової границі і закономірності тепломасопереносу в розплаві.

Результати роботи є основою для створення сучасних приладів наукового призначення, які планується використати в конкретних проектах Загальнодержавної цільової

науково-технічної космічної програми України на 2013-2017 роки, зокрема в проекті ІОНОСАТ.

По результатам досліджень опубліковано одну статтю та підготовлено 8 публікацій.

КОДОКЕРОВАНЕ ДЖЕРЕЛО СТРУМУ, ДАВАЧ, ФЕРОЗОНДОВИЙ МАГНІТОМЕТР, ТЕМПЕРАТУРНИЙ ДРЕЙФ, ВИПРОМІНЮВАННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ, ГАРМОНІКИ МЕРЕЖІ, ШУМАНІВСЬКІ РЕЗОНАНСИ, ЗБІР І ОБРОБКА ДАНИХ, СЗНІ, ФОРМУВАЧ ТРАНСПОРТНИХ КАДРІВ ІНФОРМАЦІЇ, ЗАВАДОСТІЙКЕ КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ НА ПЛІС, СУПУТНКОВІ ПРИЛАДИ ТА СИСТЕМИ, ОЦІНЮВАННЯ ТА МІНІМІЗАЦІЯ РИЗИКУ, ОПТИМІЗАЦІЯ, СПРЯМОВАНА КРИСТАЛІЗАЦІЯ, ВИБРАЦІЯ, ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОС В РОЗПЛАВІ, МОРФОЛОГІЯ ФРОНТУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ, ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів 6
Вступ 8
1 Розробка комплексу наукової апаратури для діагностики навколоземної плазми 10
1.1 Розроблення та макетування високостабільного джерела струму з малим рівнем шумів 10
1.1.1 Мотивація та мета роботи 10
1.1.2 Вимоги до кодокерованого джерела струму 10
1.1.3 Дослідження температурних характеристик джерела опорної напруги 13
1.1.4 Дослідження характеристик цифро-аналогового перетворювача 16
1.1.5 Дослідження температурних характеристик металофольгових резисторів 17
1.1.6 Дослідження температурних характеристик макетів ККДС № 1 та № 2 26
1.2 Оброблення даних супутникових вимірювань ЕМ поля з метою виділення сигналів, які відносяться до випадків проникнення ЕМ поля потужних наземних/приземних джерел в іоносферу в діапазоні ULF-VLF 34
1.2.1 Вступ 34
1.2.2 Аналіз даних супутника «Деметер» 35
1.3. Розроблення програмного забезпечення формувача транспортних кадрів та завадостійкого кодування інформації на ПЛІС 46
1.3.1 Розроблення програмного забезпечення формувача транспортних кадрів 46
1.3.2 Розроблення програмного забезпечення завадостійкого кодування інформації на ПЛІС 52
Висновки до Розділу 1 57
2 Розроблення нового методу мінімізації ризиків впливу космічної радіації на функціонування супутникових приладів 59
2.1 Мінімізації ризиків впливу космічної радіації на функціонування супутникових приладів та систем 59
2.2 Приклади мінімізації ризиків впливу космічної радіації на функціонування супутникових систем та приладів 62
Висновки до Розділу 2 66
3 Визначення діапазону параметрів зовнішнього впливу для нового методу спрямованої кристалізації в космосі 67
3.1 Вплив вібрації на морфологію фронту при спрямованому твердінні 67
3.2 Методика прямого спостереження і результати експериментів 68
3.3 Математична модель гідродинаміки і теплообміну при вирощуванні кристалу методом Бріджмена 73
Висновки до Розділу 3 79
Перелік посилань 80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВЛЕ	випромінювання ліній електропередач
ВНЧ	виключно низька частота
ДНЧ	дуже низька частота
ДКАУ	Державне космічне агентство України
ДОН	джерело опорної напруги
ЕМ	електромагнітний
ІКД НАНУ та ДКАУ	Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
ІМ	індукційний магнітометр
КА	космічні апарати
ККДС	кодокероване джерело струму
ЛЦ ІКД НАНУ та ДКАУ	Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
МСТ	мікросистемна техніка
НАНУ	Національна академія наук України
ПЛІС	програмована логічна інтегральна схема
СА	сонячна активність
СЗНІ	система збору наукової інформації
СК	суперконденсатор
СП	супутниковий прилад
СПР	система прийняття рішення
СТЗ	система теплового захисту
УК	ультраконденсатор
УНЧ	ультранизька частота
ФЗМ	ферозондовий магнітометр
ФПДІ	формувач пакетів джерела інформації
ФТП	формувач транспортних пакетів
ЦАП	цифро-аналоговий перетворювач
ШПФ	швидке перетворення Фур’є
CCSDS	Consultative Committee for Space Data Systems
FIFO	First In, First Out — «першим прийшов — першим пішов» — спосіб організації і маніпулювання даними відносно часу і пріоритетів

LEMI	Laboratory of ElectroMagnetic Investigation (лабораторія електромагнітних досліджень)
MC	Master Channel
SP	Source Packets
TF	Transfer Frames
ULF	Ultra low frequency (виключно низька частота ВНЧ)
VLF	Very low frequency (дуже низька частота ДНЧ)
VC	Virtual Channel

ВСТУП

В даній роботі продовжено дослідження щодо підвищення рівня параметрів бортової апаратури для штучних супутників Землі – давачів та системи збора та обробки даних та пошуку сигналів з частотою мережі в даних інших іоносферних супутників.

В напрямку пошуку шляхів підвищення рівня параметрів бортових магнітометрів проведено дослідження шумових і температурних характеристик кодокерованого джерела струму в цілому, а також окремих компонентів в їх складі. За результатами цих досліджень внесено зміни у принципову схему пристрою з метою отримання меншого рівня шуму цифро-аналогового перетворювача та меншої температурної залежності характеристик перетворювача напруга-струм, що дозволило знизити температурний дрейф ферозондового магнітометра.

Продовжено також роботи зі створення системи збору і оброблення наукової інформації для наносупутників. До основних функцій, які покладаються на систему збору і оброблення наукової інформації, відносяться такі як формування транспортних кадрів для передачі наукових даних на наземні пункти приймання в стандарті CCSDS та RS-кодування інформації для забезпечення надійності її передачі на Землю. Основним завданням роботи є спроба реалізації виконання зазначених функцій на програмованій логічній інтегральній схемі (ПЛІС) шляхом розроблення відповідного програмного забезпечення. Для цього в даній роботі буде виконано основне завдання, що складається в проведенні розроблення програмного забезпечення формувача транспортних кадрів та завадостійкого кодування на ПЛІС.

У результаті досліджень щодо пошуку сигналів з частотою мережі на базі даних, отриманих в ДНЧ діапазоні від мікросупутника «Чибис-М», зроблено висновки про просочування цих сигналів в іоносферу. Отримані результати стимулювали звернутися до даних експерименту на борту іоносферного французького супутника «Деметер» (2006-2010 рр.), які існують у відкритому доступі, з метою підтвердження цих висновків. Перевагою даних супутника «Деметер» є наявність результатів вимірювання усіх трьох компонент як магнітного, так і електричного полів, на відміну від даних супутника «Чибис-М», де оброблялися дані, в основному, одного каналу вимірювань електричного поля. Отже, розпочато вивчення великого обсягу цих даних. На основі цього аналізу зроблено також спробу обчислення таких параметрів іоносфери як її провідність на частоті мережі та еліпсу поляризації. До того ж зроблено спробу пошуку сигналів з частотами Шуманівських резонансів, які в достатній кількості спостерігалися в даних мікросупутника «Чибис-М», але

не були виявлені закордонними дослідниками в даних супутника «Деметер». У розділі 1 представлено результати досліджень по зазначеним вище напрямам робіт.

У розділі 2 представлено результати досліджень, які розпочато у 2014 році і спрямовано на створення нових елементів енергоживлення космічних апаратів, інтелектуальної лазерної системи стикування та системи термозахисту КА. Ці дослідження обумовлені планами перспективних космічних експериментів, які реалізуватимуться в українських та міжнародних програмах дослідження та використання космічного простору у найближчі роки. При розробці космічних апаратів потрібні також нові матеріали, які повинні витримувати навантаження космічних польотів, низькі температури, глибокий вакуум, радіаційний вплив, маючи при цьому низьку масу та здатність забезпечувати надійність та довговічність роботи космічних приладів. Окрім матеріалознавчих досліджень цей новий напрям вимагає створення нових методів оцінювання ризиків впливу факторів комічної погоди на супутникові прилади та системи. Виконані за звітний період роботи мають на меті розроблення підґрунтя для співпраці з європейськими партнерами в межах міжнародних проектів.

Розділ 3 присвячений дослідницький апаратурі, яка планується для розміщення у герметизованих відсіках безпілотних та пілотованих засобів, а отже використовується в умовах мікрогравітації. Ключовою ідеєю зазначених робіт є пошук нових методів зовнішнього впливу на розплав, що кристалізується. Це обумовлено пошуком нових способів управління структурою і властивостями металів та сплавів а також нових методів одержання матеріалів у космосі. В останньому випадку важливим фактором, що впливають на процеси тепло- і масообміну стають неминучі в польотних умовах неконтрольовані вібраційні впливи (так званий фактор j-jitter). При цьому вирішуються дві зв'язані між собою проблеми: усунення небажаних вібрацій і використання контрольованих вібрацій для цілеспрямованого впливу на розплав.

Виконані експериментальні та розрахункові роботи визначають принципову можливість суттєвого впливу аксіальних вібрацій на структуру фронту при спрямованій кристалізації а також дають необхідні кількісні межі можливого впливу, який свідчить про перспективність подальших експериментальних та конструкторських робіт з метою створення перспективного бортового обладнання, а також покращання відповідних земних технологій одержання кристалічних матеріалів.

1 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ НАУКОВОЇ АПАРАТУРИ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ НАВКОЛОЗЕМНОЇ ПЛАЗМИ

1.1 Розроблення та макетування високостабільного джерела струму з малим рівнем шумів

1.1.1 Мотивація та мета роботи

Ферозондові магнітометри (ФЗМ) широко застосовують для вимірювань слабких магнітних полів у геофізичних та космічних дослідженнях, дефектоскопії, у медичній діагностиці тощо. Однак, деякі сфери застосування, зокрема магнітокардіографія, геофізична розвідка тощо, вимагають суттєво вищої роздільної здатності вимірювань магнітної індукції. Отже, зменшення рівня власних шумів є вельми актуальним. Підвищення температурної стабільності зміщення нуля та коефіцієнту перетворення також дуже важливе, особливо для магнітометрів космічного призначення, а також для геофізичних приладів, що працюють у польових умовах. Нові підходи щодо створення ферозондового чутливого елементу, такі як застосування феродіелектричних матеріалів [1], спеціальних режимів збудження [1, 2, 3, 4, 5] дозволяють значно зменшити рівень власних шумів ферозондових сенсорів, зокрема, до 0,1 пТл·Гц$^{-1/2}$ на частоті 1 Гц [2] і з перспективою подальшого зменшення до декількох десятків фТл·Гц$^{-1/2}$ [1, 6].

У найкращих зразках ферозондових давачів космічного призначення, поряд із низьким рівнем шуму, зміщення нуля майже не залежить від температури – в межах 1 нТл в діапазоні температур −40...+65 °С [7, 8]. Використовуючи нові аморфні магнітні матеріали [9], що пройшли оптимальну термомагнітну обробку, в ЛЦ ІКД НАНУ та ДКАУ розроблено ферозондові давачі з рівнем власних шумів 1 та 10 пТл·Гц$^{1/2}$ на частотах 1 та 0,01 Гц, які, одночасно, мають короткочасну стабільність зміщення нуля в межах 40 пТл протягом декількох годин і його температурний дрейф в межах ±1 нТл в діапазоні температур 5...40 °С.

1.1.2 Вимоги до кодокерованого джерела струму

Крім вдосконалення характеристик сенсора, важливо забезпечити високу температурну стабільність та малий рівень флуктуацій поля компенсації, яке усуває основну складову магнітного поля Землі в осерді перетворювача. Поле компенсації створюється шляхом пропускання електричного струму через обмотку компенсації, яку намотують на каркасі із матеріалу з малим температурним коефіцієнтом лінійного розширення. У роботі розглянуто можливості побудови кодокерованого джерела струму (ККДС), що складається з

джерела опорної напруги (ДОН), цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) і перетворювача «напруга-струм», із такими температурними і шумовими характеристиками, які б відповідали параметрам найкращих сучасних ферозондових давачів.

Отже, поставлено за мету досягнути такі шумові характеристики поля компенсації: 0,5; 1,5 та 5 пТл/Гц$^{1/2}$ на частотах 1; 0,1 та 0,01 Гц відповідно, що, враховуючи діапазон компенсації ±70000 нТл, становить 7,1; 22 та 71·10^{-9}/Гц$^{1/2}$ у відносних одиницях. Нестабільність поля компенсації не повинна перевищувати 1 нТл, або 14·10^{-6} у відносних одиницях, в діапазоні температур −40...+60 °С. Температурний коефіцієнт має бути < 0,14·10^{-6} 1/°С за умови лінійної залежності струму від температури.

Аналіз літератури, показав, що проблема створення стабільного струму пов'язана із досить високим рівнем шумів напівпровідникових джерел напруги. В роботі [10] показано, що радикальне зниження рівня шуму може бути досягнуто використанням хімічного джерела струму, в [11] зменшення шумів опорної напруги досягли використанням фільтра низьких частот, що побудовано на суперконденсаторі. Досягнуті в тих працях шумові характеристики пристроїв задовольняють вимоги до ККДС (див. таблицю 1.1). З таблиці 1.1 також видно, що шумові параметри джерела струму [12], що побудовано, використовуючи напівпровідникове джерело опорної напруги, в декілька разів перевищують задані межі. Пристрої, що розроблено в [10, 11], призначено для роботи у лабораторних умовах у досить вузькому діапазоні температур. Стабільність вихідного струму цих джерел залежно від температури, часу та інших факторів впливу не приведено, але можна припустити, що, наприклад, напруга хімічного джерела струму чи ємність суперконденсатора суттєво залежатимуть від температури та механічних впливів. Нижче проаналізовано шумові характеристики найбільш прецизійних напівпровідникових джерел опорної напруги (таблиця 1.2). Оскільки в технічній документації виробники таких мікросхем, як правило, приводять спектральну густину шуму на частотах вище 0.1-10 Гц, необхідні дані було також взято з робіт [13, 14].

Як видно з таблиці 1.2, найменший рівень власних шумів має ДОН LTZ1000. Слід зазначити, що рівень власних шумів цього ДОН залежить від струму, що протікає через стабілітрон. Оскільки параметри схеми включення LTZ1000 можна гнучко змінювати, одним із завдань роботи було вибрати такий режим роботи ДОН, який би забезпечував належний рівень його власних шумів. Згідно з оглядом характеристик напівпровідникових інтегральних джерел опорної напруги [16] це джерело опорної напруги має перевагу над іншими пристроями за такими характеристиками як температурний дрейф та гістерезис, довготривала стабільність опорної напруги. LTZ1000 також має досить слабку залежність вихідної напруги від дози радіоактивного опромінення [17], що може бути важливим при застосуванні в космічній апаратурі. ДОН LTZ1000 базується на підповерхневому

стабілітроні, для термокомпенсації якого використовують напругу база-емітер транзистора, розміщеного на тому ж кристалі. В стандартній схемі включення [15] досягнення рекордно малого температурного дрейфу ($0{,}05 \cdot 10^{-6}$ 1/°C) відбувається за рахунок регульованого підігрівання кристала і підтримання його температури в дуже вузьких межах. Через значну споживану потужність такий шлях не завжди прийнятний у ФЗМ і може виявитись недоцільним внаслідок температурної нестабільності інших вузлів ККДС. Отже, в роботі проведено дослідження температурної залежності вихідної напруги ДОН в режимі лише термокомпенсації, без примусового підігріву кристалу.

Таблиця 1.1 – Вимоги до рівня власних шумів кодокерованого джерела струму

Частота, Гц	0,01	0,1	1
Рівень шуму компенсатора магнітного поля, пТл/$Гц^{1/2}$, не більше	5	1,5	0,5
Рівень шуму ККДС, 10^{-9}/$Гц^{1/2}$, не більше	71	22	7
Рівень шуму джерела струму [10], 10^{-9}/$Гц^{1/2}$	7,5	1,4	0,27
Рівень шуму джерела струму [11], 10^{-9}/$Гц^{1/2}$	немає даних	12	3
Рівень шуму джерела струму [12], 10-9/Гц1/2	немає даних	немає даних	30

Таблиця 1.2 – Рівень шумів прецизійних джерел опорної напруги

Джерело опорної напруги	Рівень власних шумів, 10^{-9}/$Гц^{1/2}$, на частотах		
	0,01 Гц	0,1 Гц	1 Гц
AD587LN (підповерхневий стабілітрон) [13]	250	70	19
LT1021BCN8-5 (підповерхневий стабілітрон) [13]	700	230	70
LT1236ACN8-5 (підповерхневий стабілітрон) [13]	600	130	35
LTZ1000 (підповерхневий стабілітрон) [15]	немає даних	33	9
LTC6655BHMs8-5 (бандгап) [14]	2000	1000	700
MAX6126 (немає даних) [13]	230	100	50
MAX6250ACSA (підповерхневий стабілітрон) [13]	400	150	40
MAX6350 (підповерхневий стабілітрон) [14]	1000	600	100
VRE305 (підповерхневий стабілітрон) [14]	4000	2000	400

В якості цифро-аналогового перетворювача була обрана одна з найкращих моделей в інтегральному виконанні — 20-бітний ЦАП AD5791, температурний дрейф якого складає $0{,}05 \cdot 10^{-6}$ 1/°C [18]. Для уточнення оптимальної схеми включення цієї мікросхеми були проведені вимірювання її рівня власних шумів у включенні з одно- і двополярною опорною напругою.

Перетворювач «напруга-струм» для незаземленого навантаження було побудовано на операційному підсилювачі OPA2188 [19] з малим рівнем низькочастотних шумів і високостабільних металофольгових резисторів. Для вибору найкращого для даної задачі типу металофольгових резисторів були поведені дослідження температурної залежності опору наявної номенклатури резисторів даного класу (Vishay PG: VSMP0805 0k680; VFCP0805 1k000; DSMZ 2K 2K TCR0.2 BASW (Y4485V0059BA9W); ПАО «Завод Тіра»: С5-61 511 Ом; Р2-67 1,91 кОм; Alpha Electronics (Vishay PG brand): MC Y4k000T). Виміряні температурні характеристики найкращих з них приведено у підрозділі 1.1.5. Було зібрано і досліджено характеристики двох макетів ККДС, за результатами попередніх випробувань цих макетів внесено зміни в схему для вдосконалення температурних і шумових характеристик ККДС.

1.1.3 Дослідження температурних характеристик джерела опорної напруги

Схему вимірювальної установки приведено на рисунку 1.1. Для дослідження температурних і шумових характеристик джерела опорної напруги LTZ1000 використовували допоміжне джерело опорної напруги, яке разом із двома інструментальними підсилювачами із змінними коефіцієнтами підсилення було змонтоване на окремій друкованій платі.

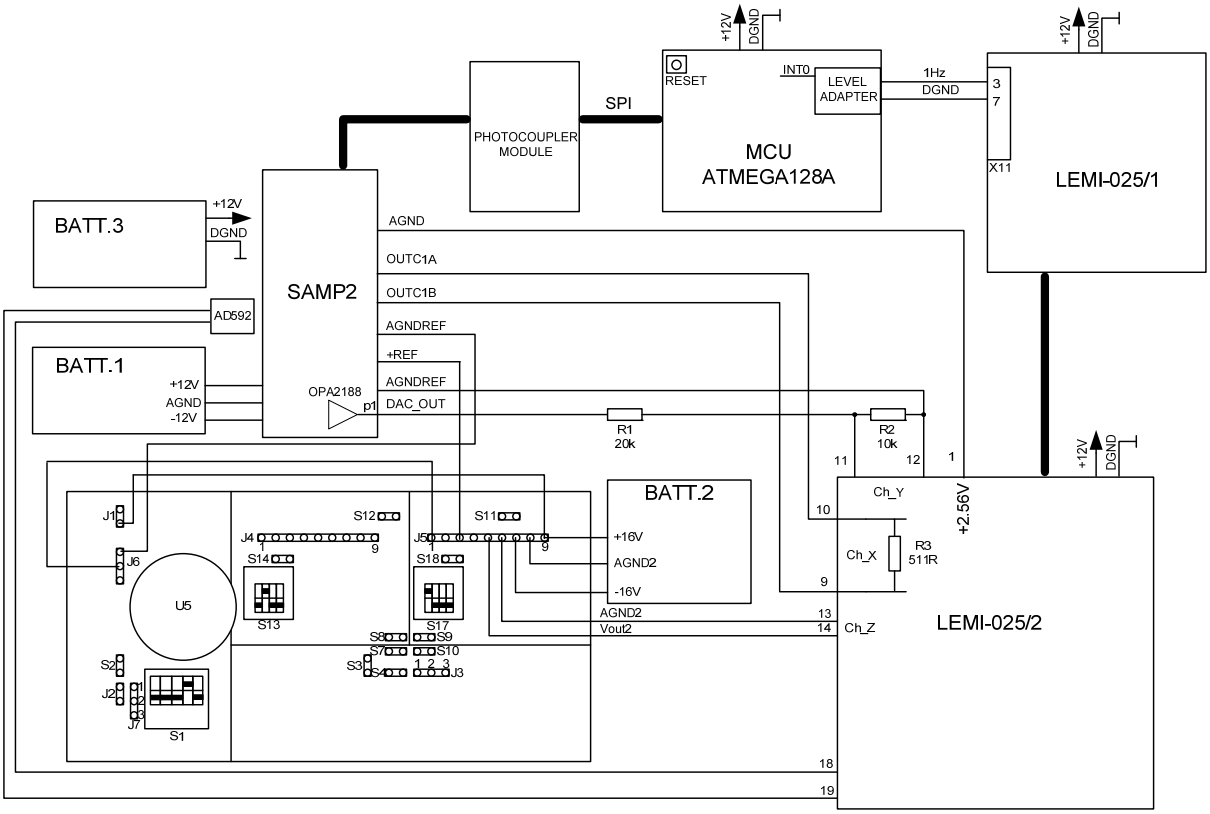


Рисунок 1.1 – Схема включення зразків ККДС для температурних випробувань

Різницю сигналів досліджуваного і допоміжного джерела, підсилену інструментальним підсилювачем, реєстрували системою збору даних від магнітометра LEMI-025 (рисунок 1.2). Під час експериментів як плата допоміжного джерела опорної напруги та інструментальних підсилювачів, так і плати системи збору даних від магнітометра LEMI-025, підтримували при сталій температурі. Досліджували зразки мікросхем LTZ1000, що були змонтовані як в макетах ККДС, так і на ще одній платі магнітометра LEMI-025.

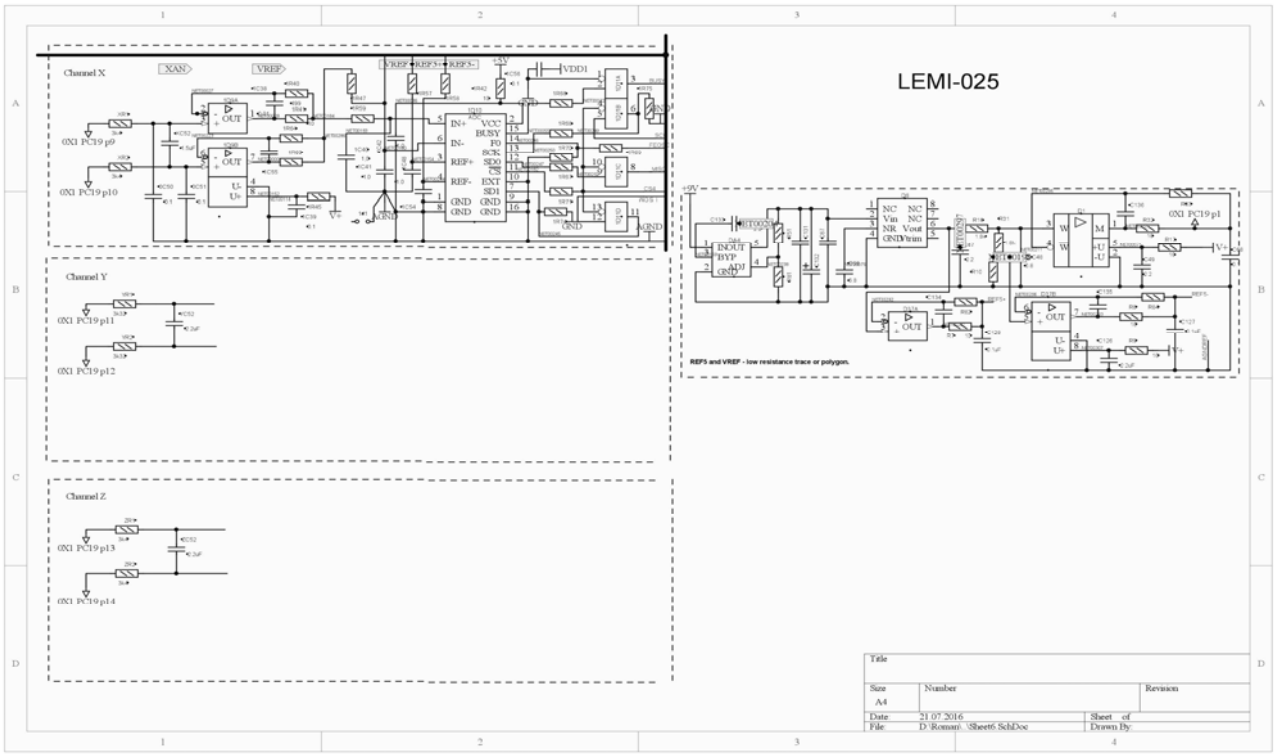


Рисунок 1.2 – Схема електрична аналого-цифрового перетворювача системи збору даних магнітометра LEMI-025

Проведені експериментальні дослідження трьох зразків ДОН показали значну нелінійність температурної залежності вихідної напруги UREF в режимі термокомпенсації без стабілізації температури (рис. 1.3), особливо на краях температурного діапазону.

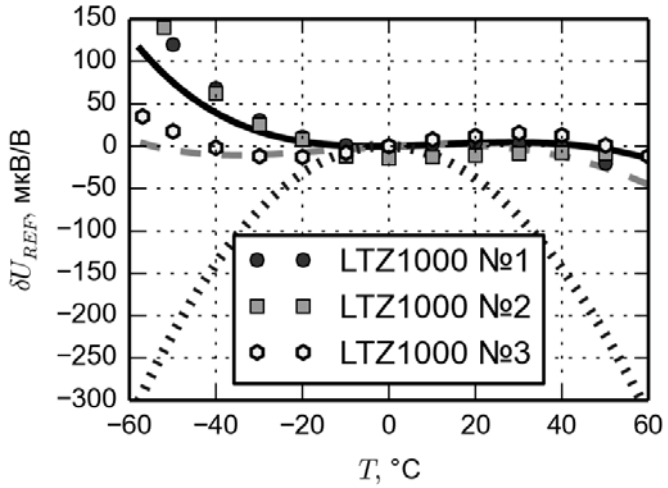


Рисунок 1.3 – Температурна залежність опорної напруги джерела LTZ1000 – результати моделювання (лінії) та експериментальні дані (маркери)

Згідно з [20] та проведеним у пакеті LTSpiceIV комп'ютерним моделюванням схеми ДОН (рисунок 1.4а, $r_б$ = 0 Ом, R2 = 18,6 Ом, R3 = 120 Ом, R4 = 68,1 кОм, R5 відсутній), очікувана нелінійність температурної залежності $U_{бе}$ (VT1) і, відповідно, U_{REF} має вигляд пунктирної кривої на рисунку 1.3, що не узгоджується з результатами вимірювань вихідної напруги зразків LTZ1000. Краще узгодження модельної кривої (рисунок 1.3, суцільна лінія) з результатами експерименту вдалось отримати, додавши в схему LTZ1000, наведену в технічній документації [15], резистор $r_б$ = 15 кОм (рис. 1.4 а).

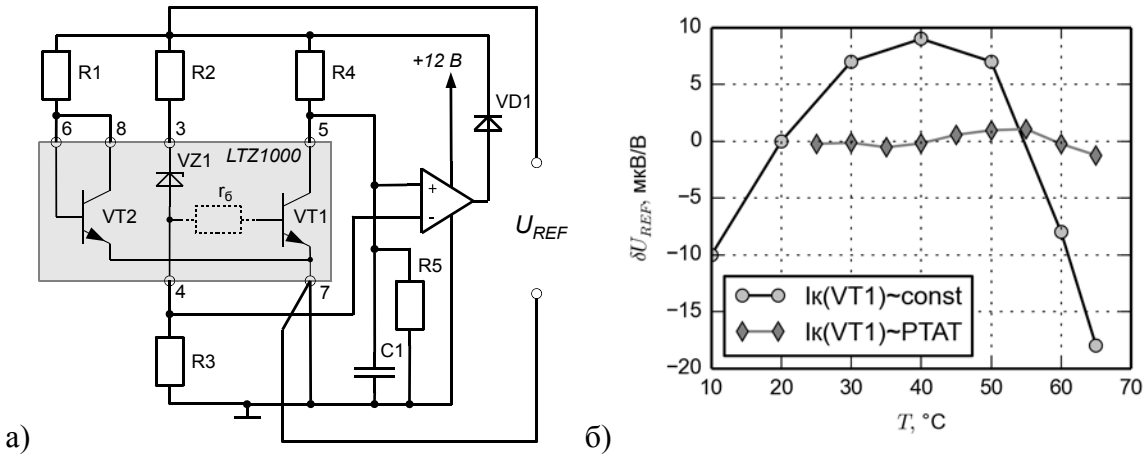


Рисунок 1.4 – а) Електрична схема увімкнення LTZ1000 та б) температурні характеристики опорної напруги залежно від режиму роботи транзистора VT1

Ймовірно, збільшення напруги U_{REF} при низьких температурах обумовлюється зменшенням коефіцієнта передачі струму транзистора VT1 і, оскільки струм колектора незначно залежить від температури (≈0,03 %/°C), відповідним збільшенням струму бази і спадом напруги на $r_б$, R2 та динамічному опорі VZ1. Компенсувати ефект температурної

залежності струму бази, а також дещо лінеаризувати температурну залежність $U_{бе}$(VT1) можна, задавши в колекторі VT1 струм, пропорційний до абсолютної температури кристала (так званий PTAT — proportional to absolute temperature). В схемі на рисунку 1.4, а це реалізоване введенням резистора R5. Результат моделювання модифікованої схеми (рисунок 1.4, а, $r_б$=15 кОм, R2=14,5 Ом, R3=120 Ом, R4=30,1 кОм, R5=6,2 кОм) показані штриховою лінією на рисунку 1.3.

Експериментальні дослідження зразка LTZ1000 №3, увімкненого за модифікованою схемою, показали значне зменшення нелінійності температурної залежності вихідної напруги U_{REF} в діапазоні температур 25...65 °С (рис. 1.4 б). Надалі планується знімати температурні характеристики модифікованої схеми у ширшому діапазоні, а також уточнити параметри елементів LTZ1000 для отримання достовірніших результатів комп'ютерного моделювання.

1.1.4 Дослідження характеристик цифро-аналогового перетворювача

Як цифро-аналоговий перетворювач була обрана одна з найкращих моделей в інтегральному виконанні — 20-бітний ЦАП AD5791, температурний дрейф якого складає $0{,}05 \cdot 10^{-6}$ 1/°С [18]. Оскільки опис цієї мікросхеми містить суперечливі дані про рівень її власних шумів, були перевірені шумові характеристики в двох режимах увімкнення: з двополярним (рис. 1.5, схема 1) та однополярним (рис. 1.5, схема 2) ДОН.

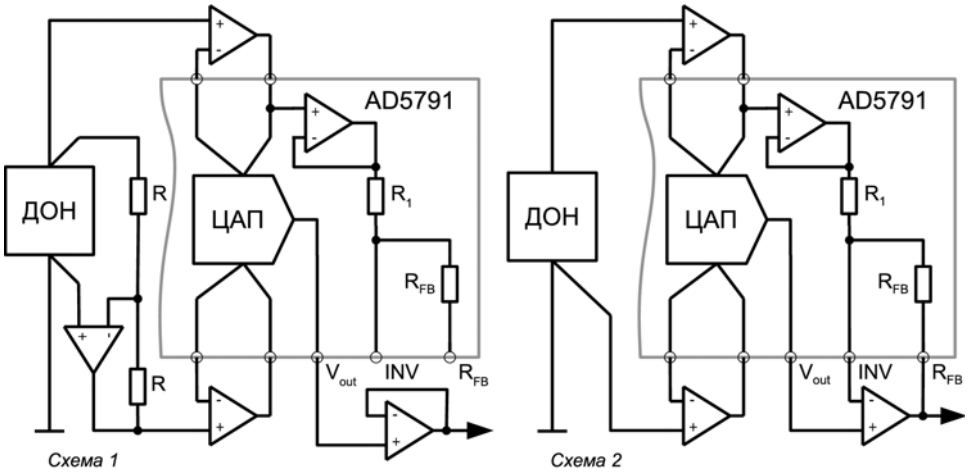


Рисунок 1.5 – Варіанти увімкнення ЦАП AD5791

В обох випадках вихід ЦАП під’єднувався до ідентичних перетворювачів «напруга-струм» з незаземленим навантаженням, які складалися з операційного підсилювача OPA2188 [19] з малим рівнем низькочастотних шумів і високостабільних металофольгових резисторів VSMP0805 [21]. Для кожного зразка у таблиці 4 подана відносна спектральна густина шуму

опорної напруги ДОН, а також вихідних струмів у різних точках діапазону: в нулі (стовпчик «0»), мінімальному (стовпчик «MIN») і максимальному значеннях (стовпчик «MAX»).

Таблиця 1.3 – Рівень власних шумів кодо-керованого джерела струму

Частота,	Відносна спектральна густина шуму, 10^{-9}/Гц$^{1/2}$								
Гц	Опорна напруга		Вихідний струм						Вимоги
			«0»		«MIN»		«MAX»		
	схема 1	схема 2	схема 1	схема 2	схема 1	схема 2	схема 1	схема 2	
1	**9**	**9**	4	**8**	**9**	**16**	**9**	**9**	≤ 7,1
0,1	22	22	7	14	22	**39**	22	22	≤ 22
0,01	70	70	15	42	70	**150**	70	70	≤ 71

Значення спектральної густини шуму, які перевищують встановлені межі, позначені напівжирним шрифтом. Перевищення вимог на частоті 1 Гц при граничних значеннях струму для обох випадків пов'язане з підвищеним рівнем шуму ДОН. Для зменшення шуму на високих частотах надалі планується встановити фільтр низьких частот після ДОН. Шум джерела струму, який відповідає схемі 2, більший, ніж у джерела за схемою 1, і перевищує граничні значення при нульовому і мінімальному значеннях вихідного струму. Це пов'язане з додатковим шумом в резисторах R_1, R_{FB} (рис. 1.5, схема 2) при протіканні через них струму. Отже, для отримання кращих шумових характеристик AD5791 слід під'єднувати в режимі двополярної опорної напруги (рис. 1.5, схема 1).

1.1.5 Дослідження температурних характеристик металофольгових резисторів

Методика вимірювань опору резисторів

Опір досліджуваних резисторів вимірювали трьома способами:

1. В ручному режимі мультиметром KEITHLEY2000 за чотирипровідною схемою.
2. В автоматичному режимі системою збору даних магнітометра LEMI-025 за трипровідною схемою підключення (рис. 1.6).
3. В автоматичному режимі системою збору даних магнітометра LEMI-025 за чотирипровідною схемою підключення (рис. 1.7).

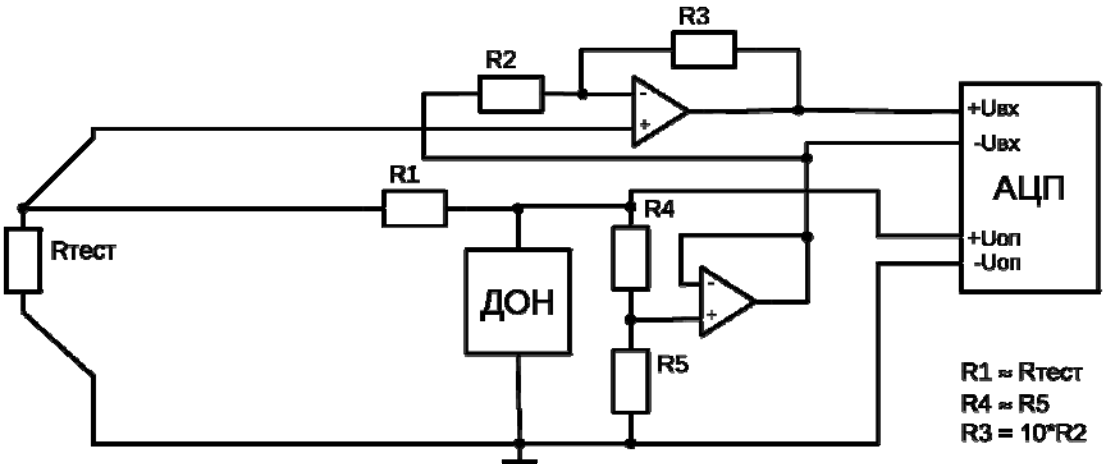


Рисунок 1.6 – Схема для вимірювання опору резисторів, трипровідна схема підключення.

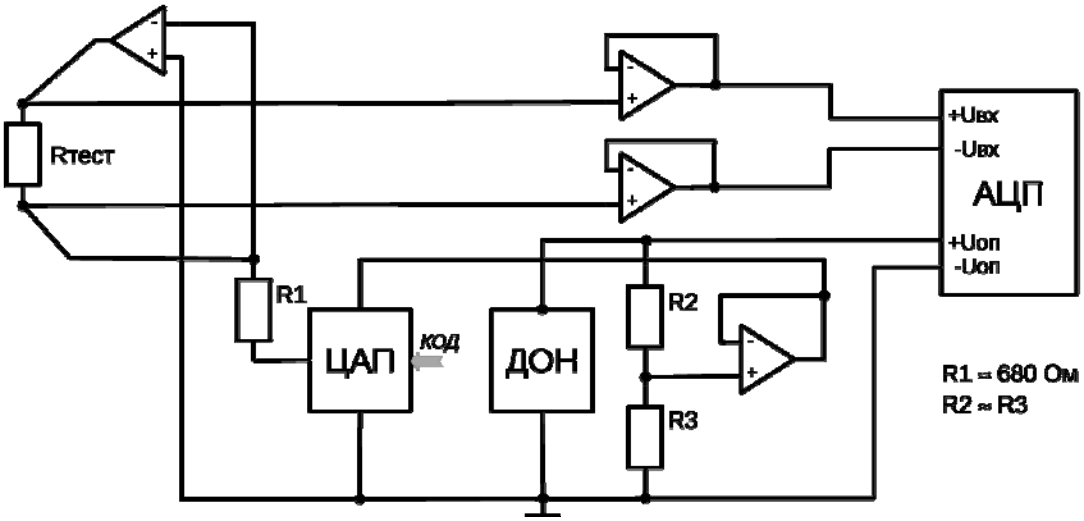


Рисунок 1.7 – Схема для вимірювання опору резисторів, чотирипровідна схема підключення

Оскільки результати вимірювань температурної залежності опору одного і того самого резистору різними методами дуже добре узгоджувались між собою, в подальшому приведені лише результати автоматичних вимірювань системою збору даних магнітометра LEMI-025. Ця система збору даних дозволяє вимірювати опір одночасно трьох резисторів, якщо вони не з'єднані між собою. Температуру резисторів вимірювали температурним давачем AD590 [22], який входить в склад системи збору даних. Для вирівнювання температури давача AD590 та досліджуваних резисторів їх скріплювали разом і розміщали у металевому герметичному корпусі, який в свою чергу поміщали у камеру тепла та холоду. В цьому ж корпусі розміщали гранули силікагелю для усунення конденсації вологості на компонентах під час зміни температури.

Резистори VSMP0805 680 Ом

Для усунення механічних напружень резистори поверхневого монтажу VSMP0805 680 Ом 1% фірми Vishay PG [21] підпаювали на тестову плату мідними дротами діаметром 0,08 мм, а потім покривали шаром електроізоляційної силіконової термопасти для зменшення градієнту температури між виводами і захисту від конденсату (рисунок 1.8). Було перевірено 9 зразків: зразки № 1-3 на тестовій платі; зразки № 4-6 як на платі ККДС№2, де вони були запаяні звичайним способом, так і на тестовій платі (рисунок 1.8); зразки № 7-9 запаяні на платі ККДС№1 звичайним способом. Результати вимірювань температурних характеристик опору цих резисторів наведено на рисунках 1.9, 1.10, 1.11. Експериментальні дані апроксимовано поліномами 4-го ступеню, графіки яких також подано на рисунках 1.9, 1.10, 1.11. Вплив способу пайки на температурну залежність опору резисторів VSMP0805 680 Ом видно на рисунку 1.11. В разі звичайного способу пайки на платі ККДС № 2 температурна залежність опору послідовно підключених зразків № 4-6 (R2) має більш нелінійний характер, ніж при монтажі за допомогою мідних дротинок на тестовій платі. Це, ймовірно, можна пояснити надлишковими механічними напруженнями, які виникають при звичайному способі пайки.

Рисунок 1.8 – Встановлення резисторів поверхневого монтажу на тестовій платі

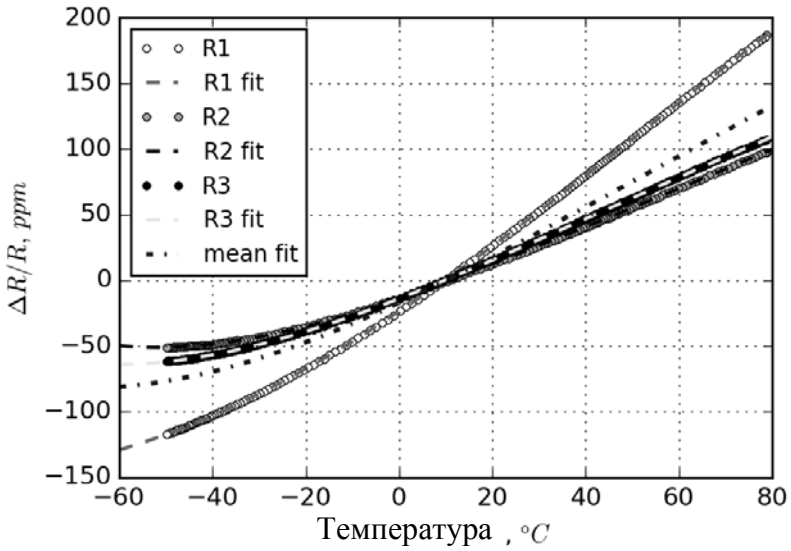


Рисунок 1.9 – Температурна залежність опору резисторів VSMP0805 680 Ом, зразки № 1-3, що їх змонтовано на тонких дротах і покрито термопастою (лініями без маркерів позначено апроксимації поліномами 4-го ступеню)

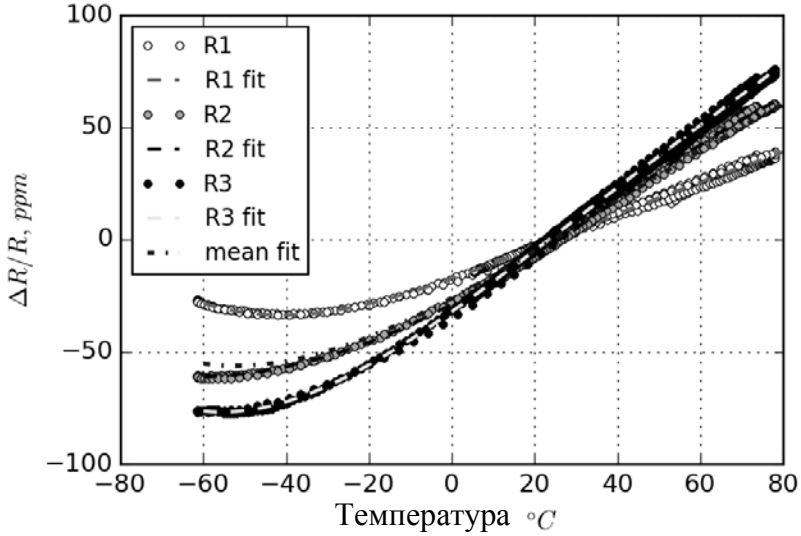


Рисунок 1.10 – Температурна залежність опору резисторів VSMP0805 680 Ом після перепаювання із макету ККДС № 2 на тестову плату, на якій їх змонтовано за допомогою тонких мідних дротів та захищено шаром термопасти (лініями без маркерів позначено апроксимації поліномами 4-го ступеню)

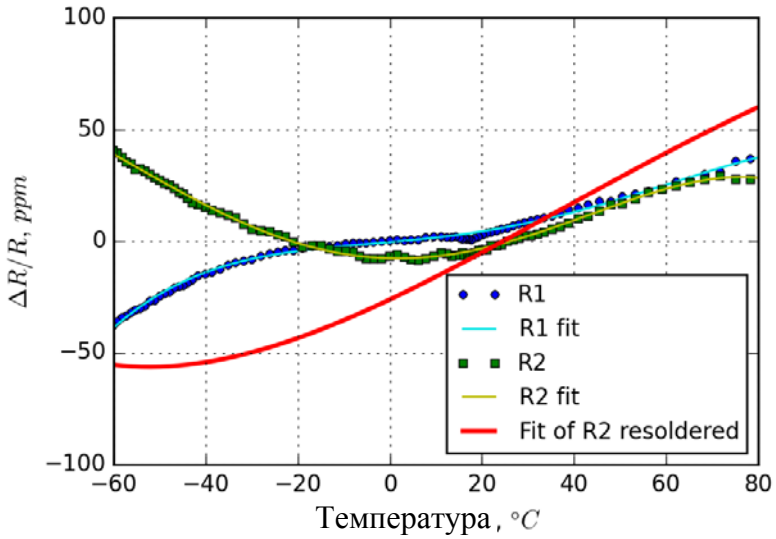


Рисунок 1.11 – Температурна залежність резисторів VSMP0805 680 Ом. Лінії з маркерами – зразки № 7-9 (R1) та № 4-6 (R2), що їх було змонтовано у ККДС № 1 та № 2 у послідовному включенні (суцільна лінія без маркерів – апроксимація температурної залежності зразків № 4-6 (R2) після перепаювання на тестову плату)

Резистори DSMZ 2K 2K TCR0.2 BASW (Y4485V0059BA9W)

Металофольгові резистори для поверхневого монтажу DSMZ 2K 2K TCR0.2 BASW (Y4485V0059BA9W) фірми Vishay PG [23] мають спеціальну конструкцію гнучких контактних виводів, яка усуває передачу механічних напружень від плати до резистивного елементу. З огляду на це, резистори встановлювали на тестову плату у звичайний спосіб. В одному корпусі компонента DSMZ розміщено два послідовно з'єднаних резистори. Перевірили температурні характеристики опору двох зразків. Оскільки в кожному із зразків резистори з'єднані між собою, їх було неможливо перевірити одночасно використовуваною системою збору даних. Отже, випробування проводили два рази — по одному резистору кожного із зразків за раз. На рисунках 1.12, 1.13 результати вимірювань, що проведено у різні дні, згруповано для кожного із зразків. Експериментальні дані апроксимовано поліномами 4-го ступеню, графіки яких також подано на рисунках 1.12, 1.13.

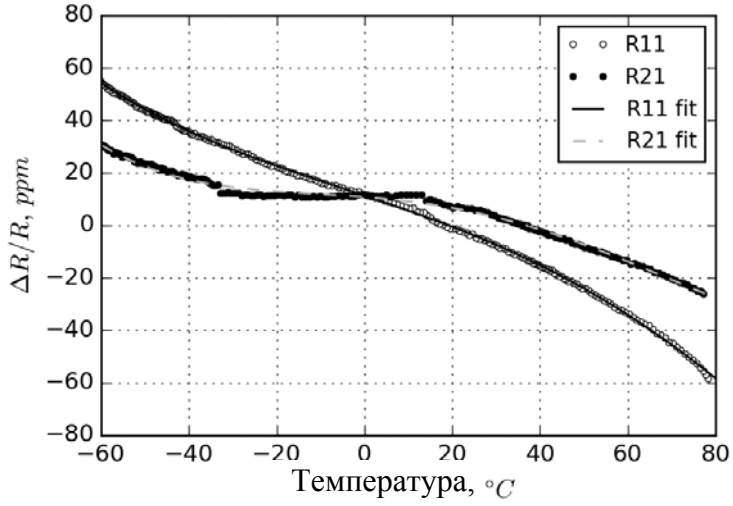


Рисунок 1.12 – Температурні залежності опору резисторів DSMZ 2k 2k, зразок № 1 (лініями без маркерів позначено апроксимації поліномами 4-го ступеню)

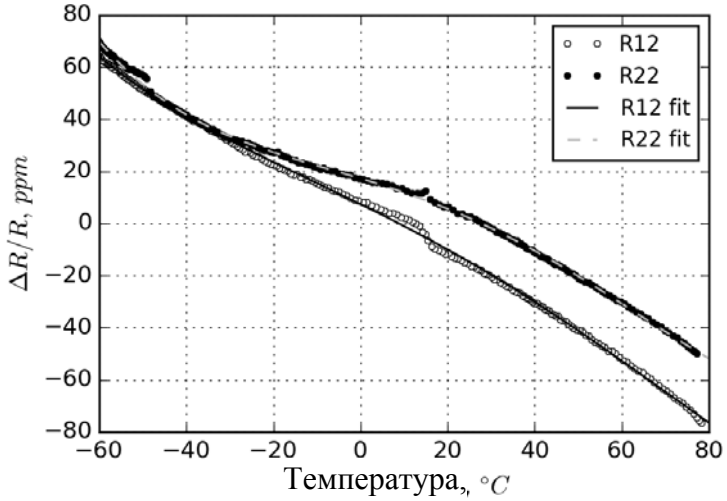


Рисунок 1.13 – Температурні залежності опору резисторів DSMZ 2k 2k, зразок № 2 (лініями без маркерів позначено апроксимації поліномами 4-го ступеню)

Резистори MCY4k000T (Alpha Electronics)

Металофольгові виводні резистори MCY4k000T фірми Alpha Electronics Corporation (підрозділ Vishay PG) [24] запаювали на тестову плату у звичайний спосіб, оскільки їх конструкція запобігає передачі механічних напружень з друкованої плати на резистивний елемент. Було перевірено десять зразків. Пари зразків № 5 і № 8, № 7 і № 9 перевіряли у паралельному включенні. Результати експериментів подано на рисунках 1.14, 1.15, 1.16.

Експериментальні дані апроксимовано поліномами 4-го ступеню, графіки яких також подано на рисунках 1.14, 1.15, 1.16.

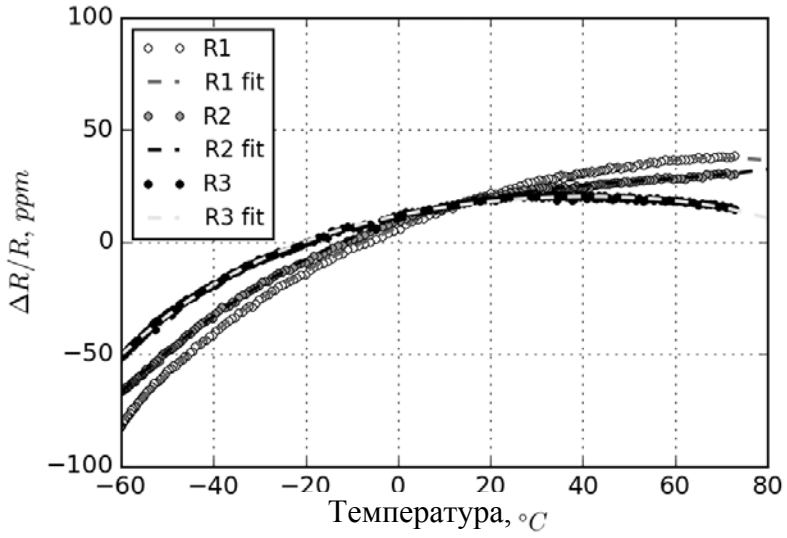


Рисунок 1.14 – Температурна залежність опору резисторів MCY4k000T, зразки № 1-3. Штриховими лініями позначено апроксимації поліномами 4-го ступеню

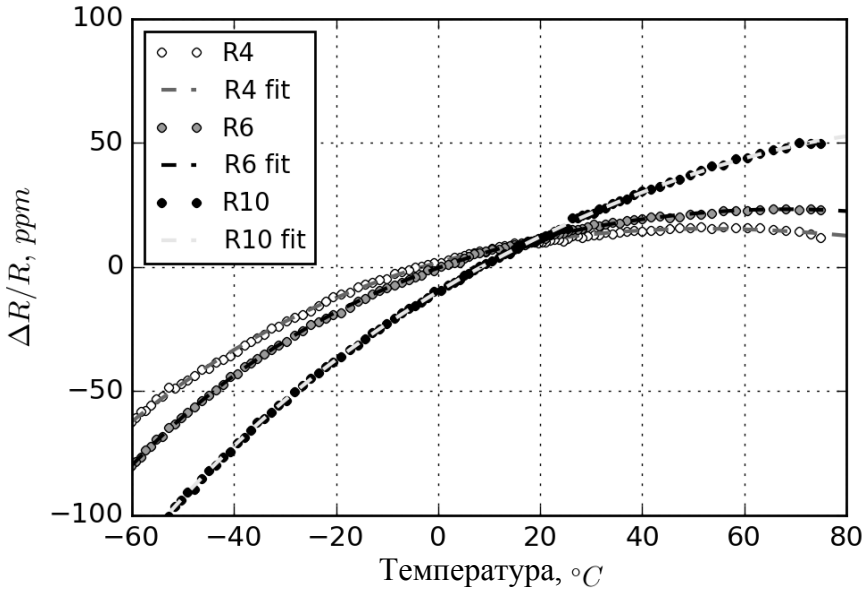


Рисунок 1.15 – Температурна залежність опору резисторів MCY4k000T, зразки № 4 , 6, 10 (штриховими лініями позначено апроксимації поліномами 4-го ступеню)

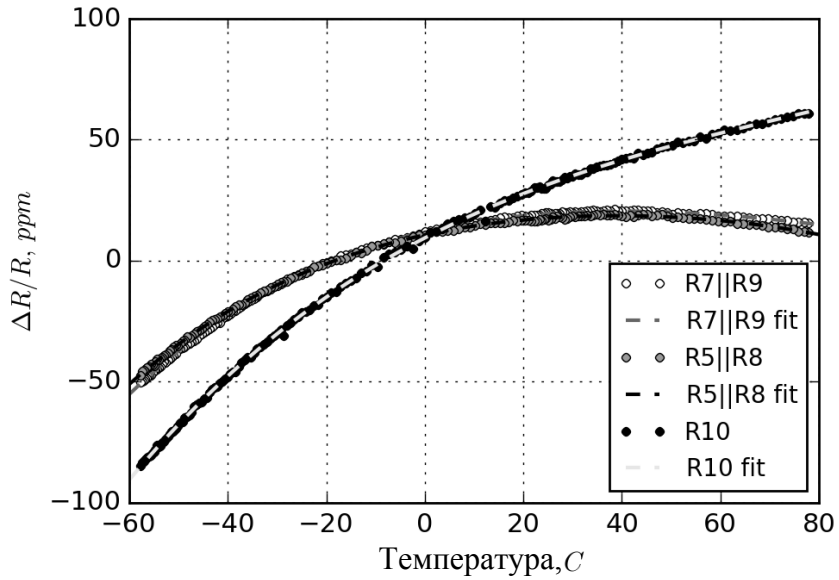


Рисунок 1.16 – Температурна залежність опору резисторів MCY4k000T, зразки № 5-10 (штриховими лініями позначено апроксимації поліномами 4-го ступеню)

Порівняння температурних характеристик резисторів

Як вже було зазначено в підрозділі 0 температурна характеристика резисторів VSMP0805 680 Ом суттєво залежить від способу пайки, що проявляється у збільшенні її нелінійності до таких значень, які перевищують межі встановлені у технічній документації [21]. Залежності температурної характеристики від способу монтажу резисторів інших типів не виявлено. У таблиці 1.4 подано коефіцієнти поліномів апроксимації температурної залежності перевірених зразків резисторів, що можна використати для компенсації нелінійності їхньої температурної залежності програмно-алгоритмичними методами.

Таблиця 1.4 – Коефіцієнти поліномів апроксимації температурної залежності опору резисторів

Резистор		Коефіцієнти поліномів апроксимації температурної залежності опору					Примітки
Тип	Номер	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	
VSMP0805 680 Ом, партія 1435	1	-2.3671841e+01	2.3532407e+00	7.7351009e-03	-4.1083510e-05	-7.9288365e-08	монтаж тонким мідним дротом на плату на мідній пластині. поверх резисторів нанесено шар термопасти
	2	-1.3656934e+01	1.2116168e+00	5.6621894e-03	-5.9385419e-05	2.6013633e-07	
	3	-1.3874027e+01	1.3808181e+00	5.3652890e-03	-5.3052533e-05	1.3366798e-07	
	4	-1.7442629e+01	6.5495678e-01	3.4970868e-03	-5.7290249e-05	2.6665962e-07	

Резистор		Коефіцієнти поліномів апроксимації температурної залежності опору					Примітки
Тип	Номер	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	
	5	-2.8852470e+01	9.7892946e-01	6.1584168e-03	-3.2336017e-05	-2.2435421e-07	
	6	-3.2133365e+01	1.2992049e+00	4.2374593e-03	-6.6235940e-05	3.1548613e-07	
	4-6	-7.6816956e+00	-5.0916000e-02	1.4366892e-02	-2.1799405e-05	-9.9396912e-07	послідовне включення у ККДС №2
VSMP0805 680 Ом, партія 1310	7-9	-4.3834906e-01	1.8061714e-01	1.3651625e-03	9.8116190e-05	-8.6779969e-07	послідовне включення у ККДС №1
DSMZ 2k 2k TCR0.2	1, R1	1.12977089e+01	-5.6013726e-01	-8.5140665e-04	-4.8872334e-05	1.3703077e-07	
	1, R2	1.0740880e+01	-1.3134442e-01	-2.7377473e-03	-6.6451304e-05	5.7689840e-07	
DSMZ 2k 2k TCR0.2	2, R1	7.3772980e+00	-8.2242311e-01	-1.7840712e-03	-4.1850674e-05	3.5994615e-07	
	2, R2	1.7242596e+01	-5.0572770e-01	-2.3305916e-03	-9.2223734e-05	8.1804735e-07	
MCY4k000T	1	6.4324631e+00	8.2601927e-01	-6.4220364e-03	4.1214852e-05	-3.9263076e-07	
	2	9.4503706e+00	6.7690962e-01	-8.6384560e-03	3.2505861e-05	1.8348845e-07	
	3	1.1828974e+01	4.2707584e-01	-6.3761843e-03	4.0793958e-05	-3.7684621e-07	
	4	1.8223810e+00	5.6668705e-01	-6.9335298e-03	2.1952547e-05	-3.4685355e-08	
	6	-4.0961893e-01	7.3199692e-01	-7.1247499e-03	3.4670398e-05	-1.9076422e-07	
	7 і 9	1.1963819e+01	4.7489320e-01	-7.9913334e-03	3.9736063e-05	-1.0513184e-07	паралельне з'єднання
	5 і 8	1.0610186e+01	4.3930735e-01	-7.1214719e-03	3.4584972e-05	-1.7334351e-07	паралельне з'єднання
	10	9.3874490e+00	1.0542316e+00	-7.7175025e-03	3.8921103e-05	-4.3735812e-08	2016.10.12
	10	-9.9384167e+00	1.2275011e+00	-6.5663686e-03	3.0748682e-05	-2.2738007e-07	повтор 2016.10.13

Зразки резисторів MCY4k000T № 3, № 4, паралельно з'єднані № 5 і № 8 та № 7 і № 9 майже не змінюють свій опір ($< 15 \cdot 10^{-6}$) в діапазоні температур 0-80°C. Серед перевірених резисторів найбільш лінійну залежність опору від температури мають резистори DSMZ. Ці пари резисторів було використано для інвертування опорної напруги в макетах ККДС № 1 та № 2. В складі цих макетів було більш точно оцінено рівень неузгодженості температурних залежностей опору пар резисторів кожного зразка (див. рисунки 1.20, 1.24).

1.1.6 Дослідження температурних характеристик макетів ККДС № 1 та № 2

Методика вимірювань

Схема електрична принципова ККДС представлена на рисунку 1.17. Для виокремлення характеристик, що притаманні кожному з компонентів ККДС (ДОН, ЦАП та перетворювач «напруга-струм»), необхідно одночасно вимірювати 4 сигнали: додатну (U_{refpos}) і від'ємну (U_{refneg}) напруги двополярного ДОН, вихідну напругу ЦАП (U_{DAC}), вихідний струм (I_{out}) перетворювача «напруга-струм», який також є вихідним сигналом ККДС в цілому. Для вимірювання температурних характеристик ККДС № 1 і № 2 використовували систему збору даних, за допомогою якої можна одночасно реєструвати лише три сигнали (рисунок 1.1). Оскільки система збору даних не дозволяє провести одночасне вимірювання 4 сигналів, кожен зразок ККДС тестували три рази, за кожним разом реєструючи такі комбінації сигналів:

- U_{refpos} , U_{DAC} , I_{out};
- $U_{refpneg}$, U_{DAC} , I_{out};
- U_{refpos} +$U_{refpneg}$, U_{DAC} , I_{out}.

Суму додатної та від'ємної опорної напруги формували за допомогою пари узгоджених резисторів DSMZ 2k 2k, зразок № 3. Для перевірки залежності сигналів U_{DAC} , I_{out} в різних точках діапазону за один цикл вимірювань, вихідну напругу ЦАП змінювали щохвилини, за допомогою плати мікропроцесора ATMEGA128A (див. рисунок 1.1) записуючи в регістр ЦАП такі коди: 0x100000 (U_{DAC}=$U_{refpneg}$), 0x13FFFF (U_{DAC}=$U_{refpneg/2}$), 0x17FFFF(U_{DAC}=*0 B*), 0x1BFFFF (U_{DAC}=$U_{refppos/2}$) і 0x1FFFFF (U_{DAC}=$U_{refppos}$). Для зменшення рівня завад ККДС розміщали у металевому корпусі, використовуючи прохідні конденсатори на всіх вхідних і вихідних лініях. Температурні характеристики ККДС перевіряли у камері тепла та холоду в діапазоні температур -60 ... +80 °С. Файли даних, записані системою збору, обробляли в пакеті Python 2.7

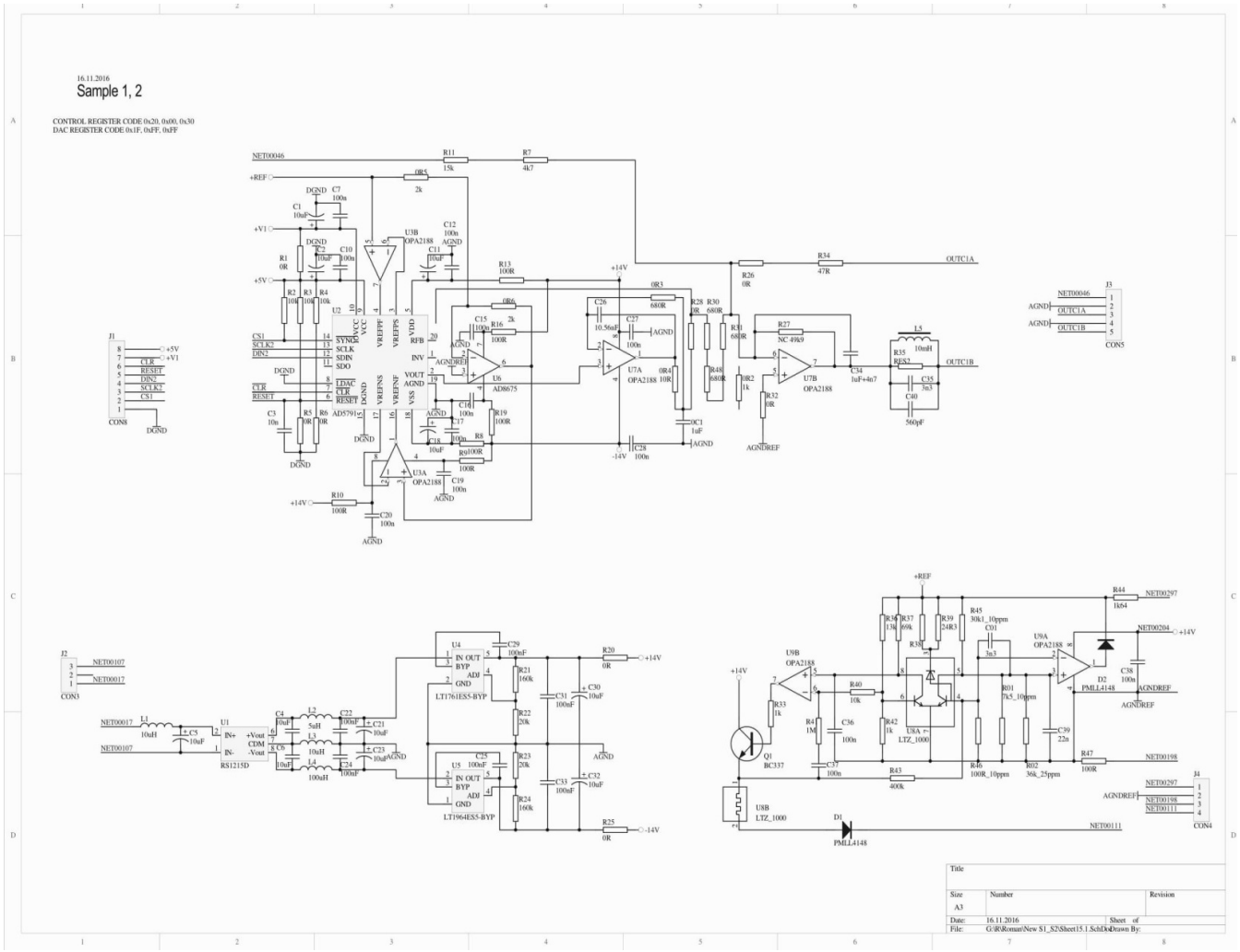


Рисунок 1.17 – Схема електрична принципова ККДС

Результати випробувань

Зміна додатної та від’ємної напруги ДОН ККДС № 1 і № 2 приведена на рисунках 1.18 та 1.22 відповідно. В обох випадках опорна напруга незначно ($< 20 \cdot 10^{-6}$) змінюється в діапазоні температур -10...+60 °С. На краях діапазону, особливо на ділянці від’ємних температур, температурна залежність опорної напруги суттєво більша. Необхідно провести подальші дослідження джерела опорної напруги LTZ1000 для з’ясувань причин такої значної нелінійності температурної характеристики.

Різниця у температурних залежностях U_{refpos} і U_{refneg} обумовлена температурним дрейфом коефіцієнта передачі інвертора напруги на операційному підсилювачі D6 (рисунок 1.17) та парі резисторів DSMZ 2k 2k (№ 2 у ККДС № 1 і № 1 у ККДС № 2). Порівнюючи поліноміальні апроксимації температурних залежностей U_{refpos} і U_{refneg}, було знайдено непрямі оцінки температурного дрейфу коефіцієнта передачі інвертора напруги (суцільні лінії на рисунках 1.19 і 1.23). В ККДС № 2 ця оцінка задовільно збігається із результатами, отриманими у підрозділі 0 при прямих вимірюваннях температурних характеристик опору

резисторів DSMZ 2k 2k № 1 (пунктирна лінія на рисунку 1.23). В ККДС №1 непряма оцінка температурного дрейфу коефіцієнта передачі інвертора напруги значно відрізняється від дрейфу співвідношення резисторів DSMZ 2k 2k № 2, розрахованого за даними підрозділу 0 (штрихова лінія на рисунку 1.19). Більш точні оцінки температурного дрейфу інвертора опорної напруги було отримано при вимірюваннях суми $U_{refpos} + U_{refneg}$, що являється фактично прямими вимірюваннями температурного дрейфу співвідношення опорів в парах резисторів DSMZ 2k 2k № 1 і № 2.

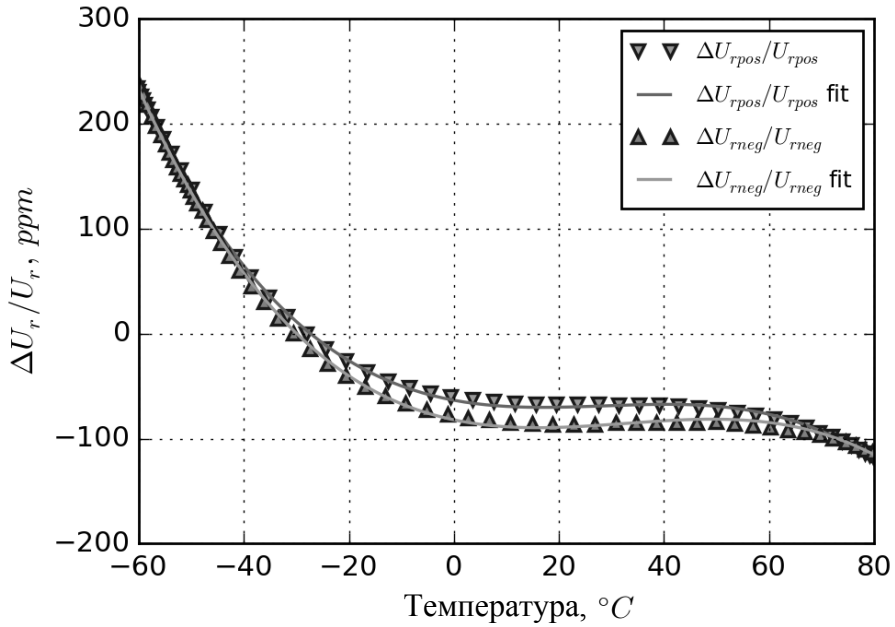


Рисунок 1.18 – Температурні залежності додатної та від'ємної опорної напруги ККДС № 1

Як видно з рисунків 1.20, 1.24 (квадратні маркери) дрейф коефіцієнта передачі інвертора опорної напруги в обох макетах практично лінійно залежить від температури з коефіцієнтами $0{,}27 \cdot 10^{-6}$ 1/°C у ККДС №1 та $0{,}45 \cdot 10^{-6}$ 1/°C у ККДС №2.

Неузгодженість температурних залежностей додатної і від'ємної опорної напруги приводить до того, що навіть при коді 0x17FFFF ($U_{DAC}=0$ *В*) вихідна напруга ЦАП $U_{DAC}(0)$ змінюється із температурою (маркери "◊□ на рисунках 1.20, 1.24) приблизно так само як і коефіцієнт передачі інвертора опорної напруги. Власне відносний дрейф нуля ЦАП (маркери "о" на рисунках 1.20, 1.24) був значно меншим за дрейф $U_{DAC}(0)$ і не перевищував $0{,}07 \cdot 10^{-6}$ 1/°C у гіршому випадку, що узгоджується із даними, приведеними у технічній документації [18].

Температурний дрейф коефіцієнта передачі ЦАП (рисунок 1.25) не перевищував $20 \cdot 10^{-6}$ в діапазоні температур -40...+60 °C.

Температурний дрейф коефіцієнта передачі S_{ui} перетворювача «напруга-струм» обчислювали як різницю відносних змін вихідного струму і вихідної напруги ЦАП:

$$\Delta S_{ui}/S_{ui} = \Delta I_{out}/I_{out} - \Delta U_{DAC}/U_{DAC}$$

ККДС № 2 було перевірено у двох варіантах резистора, що визначає коефіцієнт передачі перетворювача «напруга-струм». В першому випадку із трьома послідовно з'єднаними резисторами VSMP0805 680 Ом № 4-6. Після того як виявили, що спосіб пайки цих резисторів суттєво впливає на лінійність їхньої температурної залежності, їх було замінено на паралельно з'єднані резистори MCY4k000T № 5 і № 8.

Як видно з рисунків 1.21, 1.26, 1.27 у всіх випадках температурний дрейф коефіцієнта передачі перетворювача «напруга-струм» (трикутні маркери) добре узгоджується із температурною залежністю провідності відповідного резистора (штрихова лінія). Відносний дрейф нуля перетворювача «напруга-струм» (маркери «о») практично не залежить від температури.

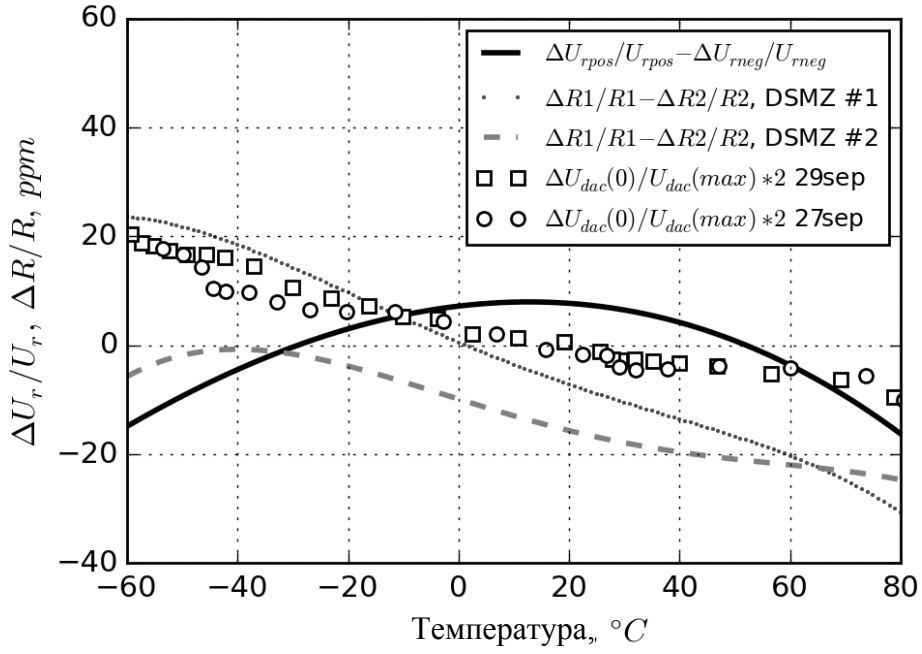


Рисунок 1.19 – Температурні залежності: суцільна лінія – коефіцієнта передачі інвертора опорної напруги (непрямі вимірювання); пунктирна та штрихова лінії – співвідношення опорів пар резисторів DSMZ № 1 та № 2; маркери – напруги на виході ЦАП ККДС № 1

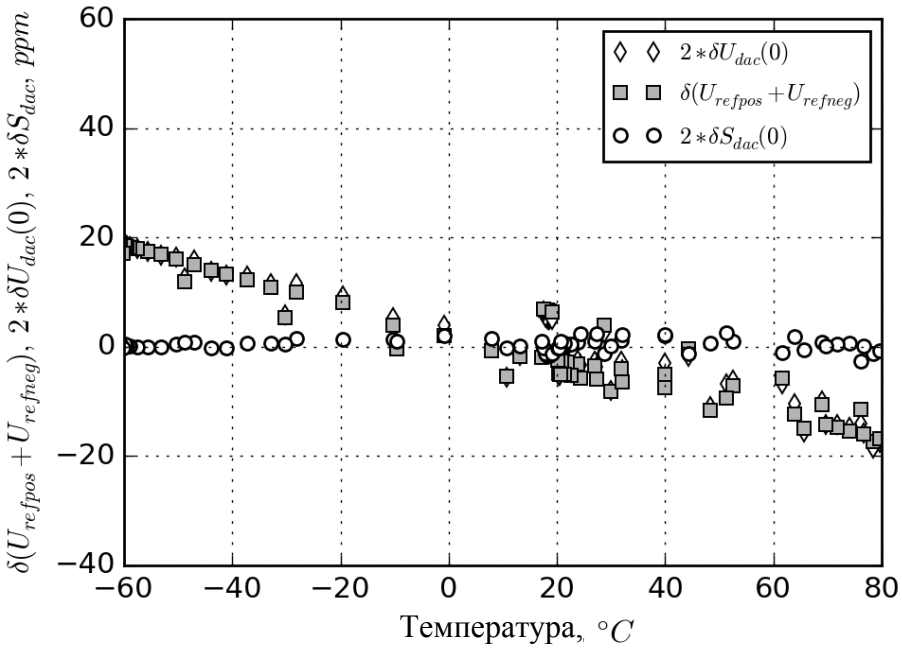


Рисунок 1.20 – Температурні залежності коефіцієнта передачі інвертора опорної напруги (квадрати), напруги на виході (ромби) та зміщення нуля ЦАП (кола) ККДС № 1

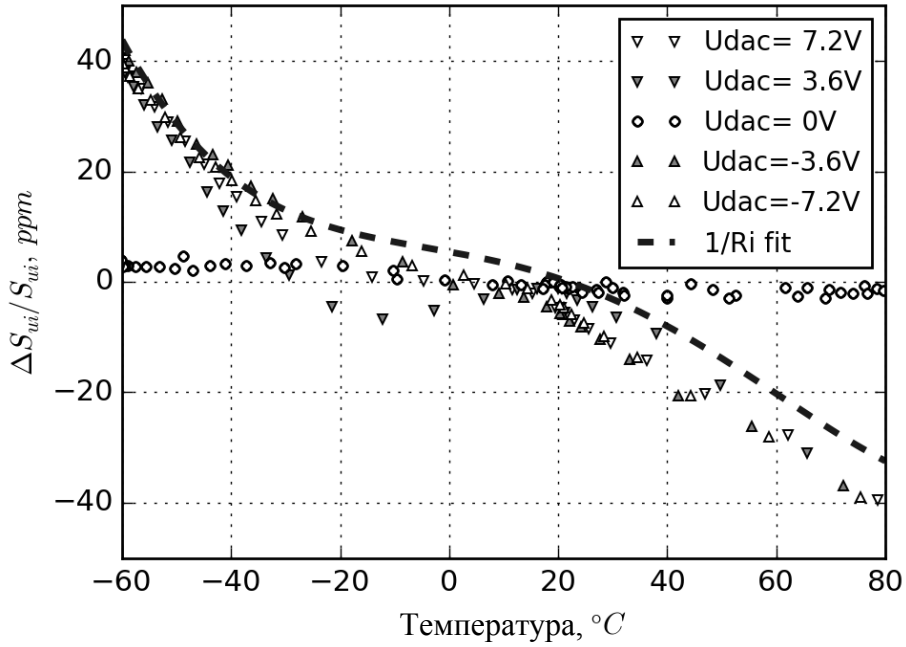


Рисунок 1.21 – Температурні залежності: маркери – коефіцієнта передачі перетворювача «напруга-струм» ККДС № 1; штрихова лінія - провідності послідовно з'єднаних резисторів VSM0805 № 7-9 (апроксимація)

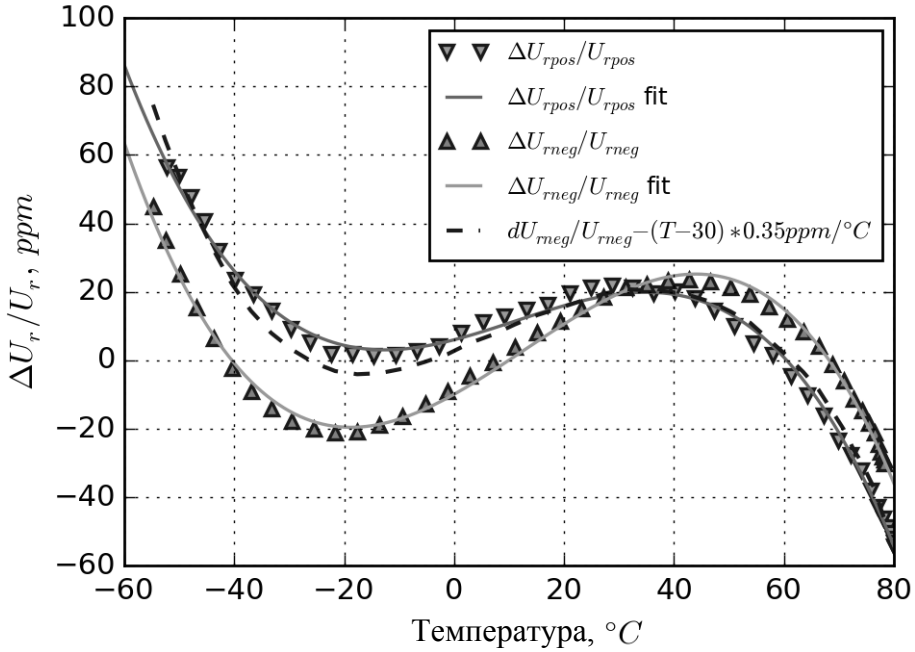


Рисунок 1.22 – Температурні залежності додатної та від'ємної опорної напруги ККДС № 2

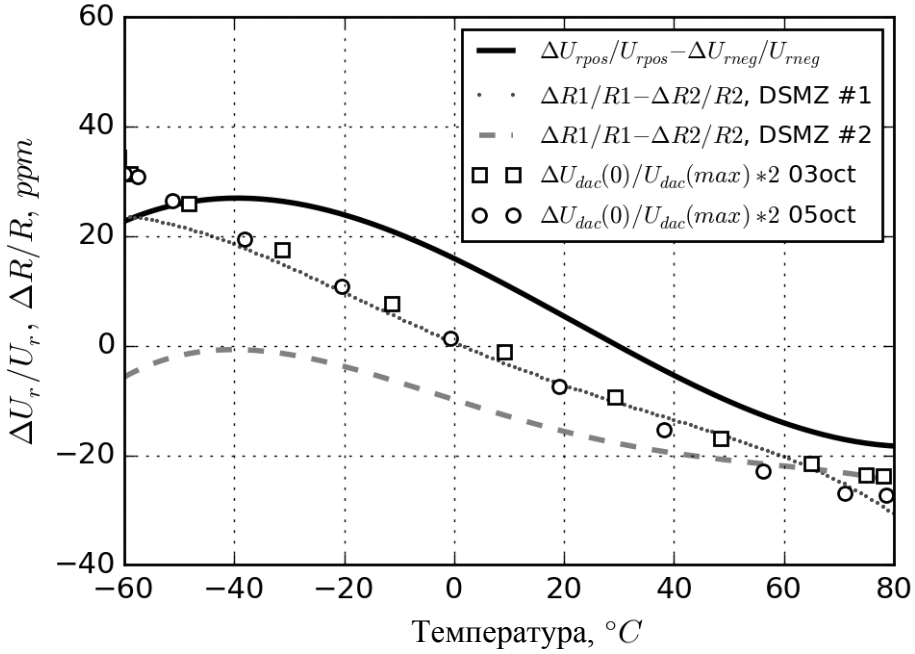


Рисунок 1.23 – Температурні залежності: суцільна лінія – коефіцієнта передачі інвертора опорної напруги (непрямі вимірювання); пунктирна та штрихова лінії - співвідношення опорів пар резисторів DSMZ № 1 та № 2; маркери - напруги на виході ЦАП ККДС № 2

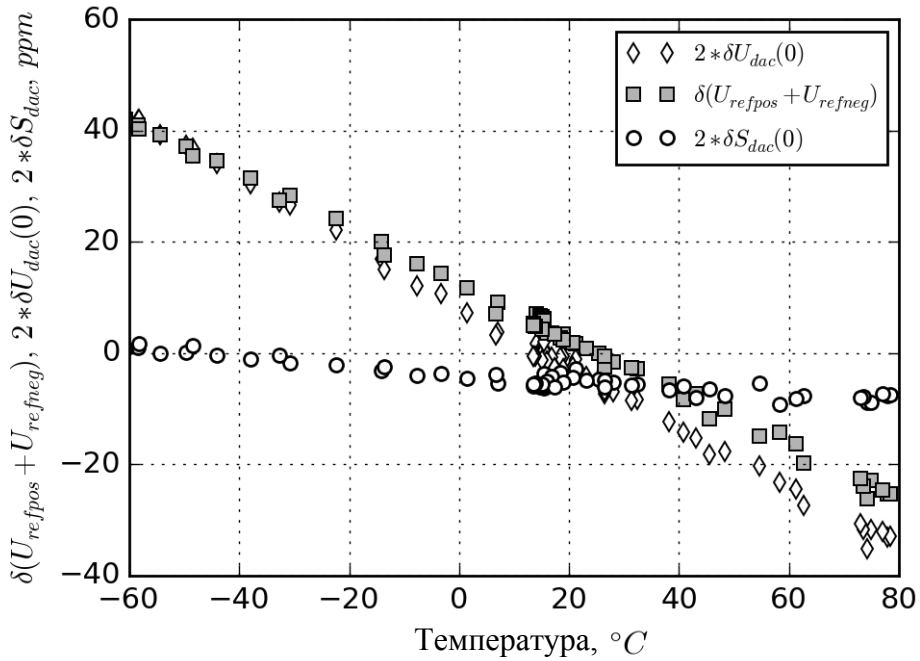


Рисунок 1.24 – Температурні залежності коефіцієнта передачі інвертора опорної напруги (квадрати), напруги на виході (ромби) та зміщення нуля ЦАП (кола) ККДС № 2

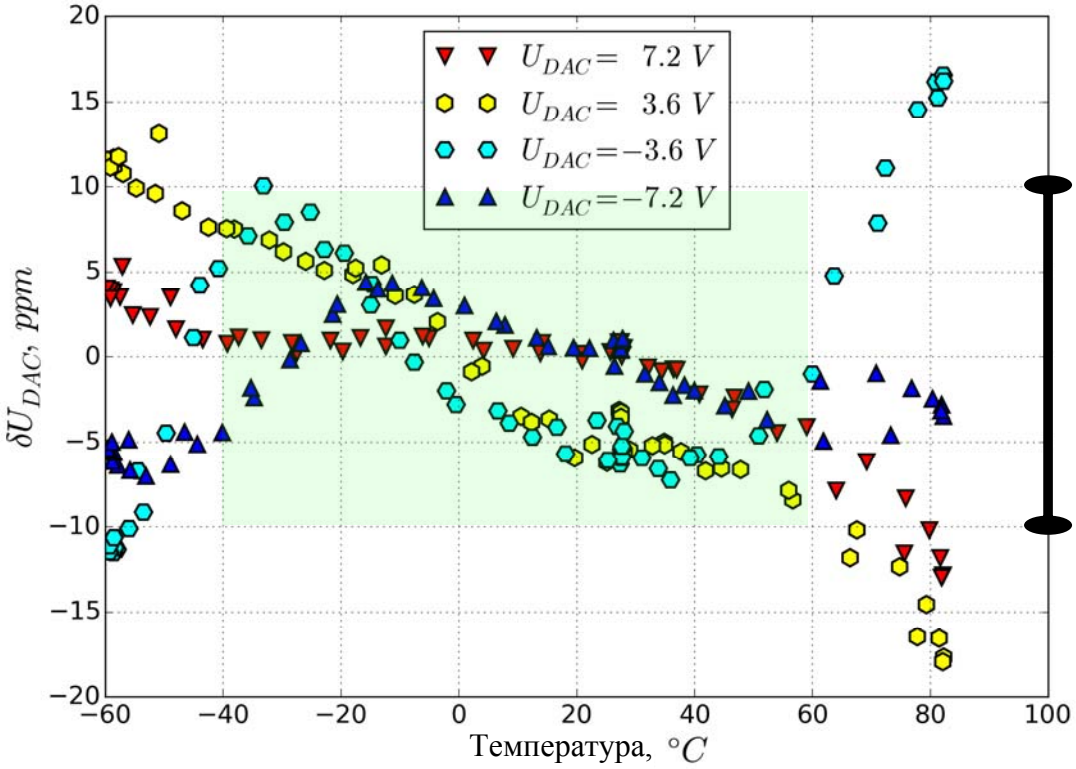


Рисунок 1.25 – Температурний дрейф коефіцієнту перетворення ЦАП ККДС № 2

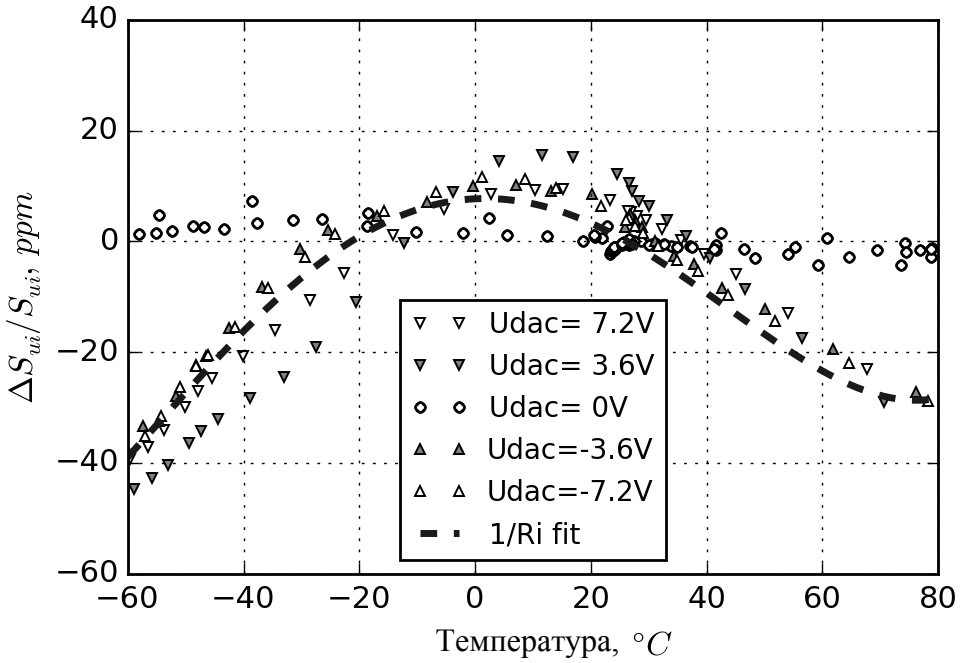


Рисунок 1.26 – Температурні залежності: маркери – коефіцієнта передачі перетворювача «напруга-струм» ККДС № 2; штрихова лінія – провідності послідовно з'єднаних резисторів VSM0805 № 4-6 (апроксимація)

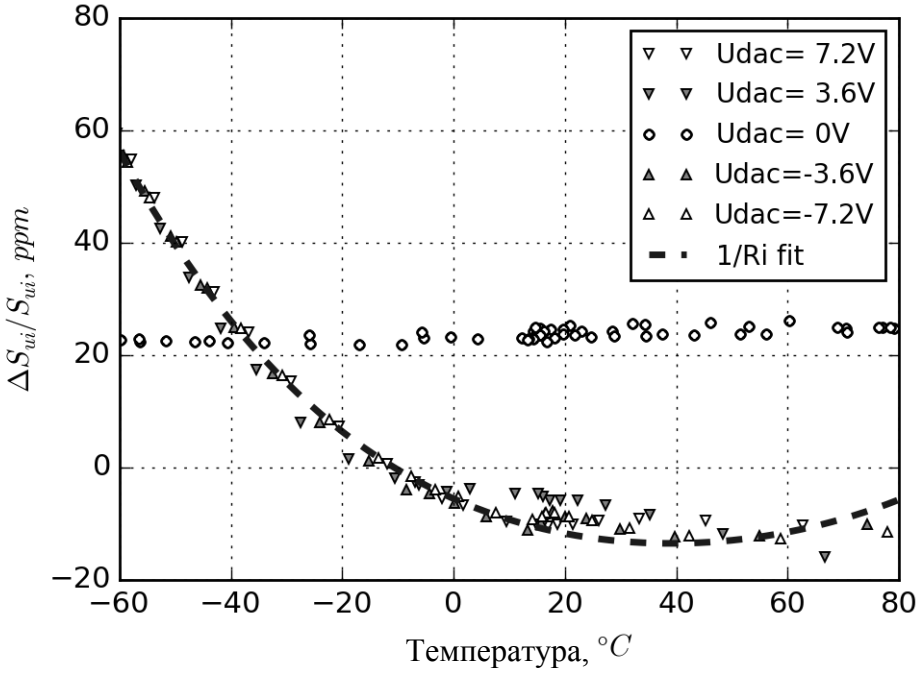


Рисунок 1.27 – Температурні залежності: маркери – коефіцієнта передачі перетворювача «напруга-струм» ККДС № 2; штрихова лінія – провідності паралельно з'єднаних резисторів MCY4k000T № 5 і № 8 (апроксимація)

1.2 Оброблення даних супутникових вимірювань ЕМ поля з метою виділення сигналів, які відносяться до випадків проникнення ЕМ поля потужних наземних/приземних джерел в іоносферу в діапазоні ULF-VLF

1.2.1 Вступ

Відомо, що навколоземне оточення насичене електромагнітними (ЕМ) хвилями наземного походження в широкому діапазоні частот. Всі вони існують в своїх ділянках іоносфери або в порожнині між іоносферою та земною поверхнею, їх розповсюдження підпорядковується відповідним фізичним законам і описується моделлю іоносфери. Останнім часом в даних іоносферних супутникових експериментів (висоти приблизно до 800 км) спостерігаються сигнали явно наземного походження з частотами, які, згідно з існуючими моделями іоносфери, не повинні розповсюджуватись вище шару Е. Зокрема, йдеться про дуже низькочастотні (ДНЧ) випромінювання з частотою мережі 50(60) Гц, які просочуються в іоносферу від потужних наземних ліній електропередач. Цей ефект може мати не передбачувані на сьогодні наслідки, наприклад, глобальний нагрів іоносфери через дисипацію ЕМ енергії, висипання іоносферних електронів, збіднення озонового шару і зміни хімічного складу іоносфери. В свою чергу, зменшення вмісту озону приводить до змін глобальної температури та атмосферної циркуляції, варіацій зональних вітрів тощо. Отже, вивчення цього явища має як науковий інтерес, так і практичну необхідність.

Серед перших іоносферних супутникових експериментів, в яких спостерігалися згадані випромінювання, слід назвати американський супутник C/NOFS та мікросупутник Чибис-М з міжнародним експериментом МВК на борту. За минулий рік детально досліджені дані, отримані за допомогою МВК в ДНЧ діапазоні, і зроблено висновки про просочування цих сигналів в іоносферу. Отримані результати стимулювали звернутися до великого обсягу даних експерименту на борту французького супутника «Деметер» (2006-2010 рр.), які існують у відкритому доступі, з метою підтвердження цих висновків. Перевагою даних супутника «Деметер» є наявність результатів вимірювання усіх трьох компонент як магнітного, так і електричного полів, на відміну від даних супутника «Чибис-М», де оброблялися дані в основному одного каналу вимірювань електричного поля. На рисунку 1.28 подано розташування давачів електричного поля (S1 – S4) [25]. Довжина кожної штанги, на кінці якої встановлено електричні зонди, складає 4 метри, що дозволило отримати високу чутливість вимірювання електричних компонент в повному діапазоні вимірювань від постійного поля до 3.5 МГц.

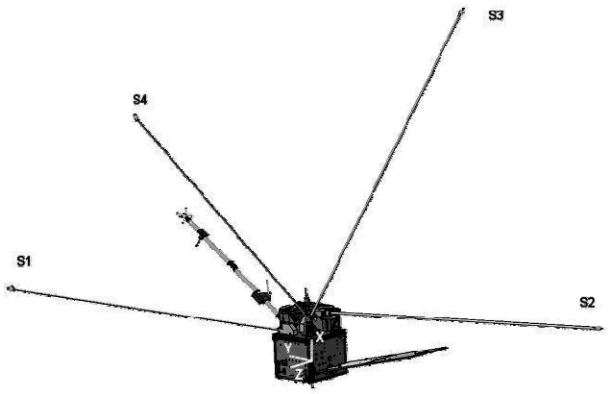


Рисунок 1.28 – Розташування давачів електричного поля (S1–S4)

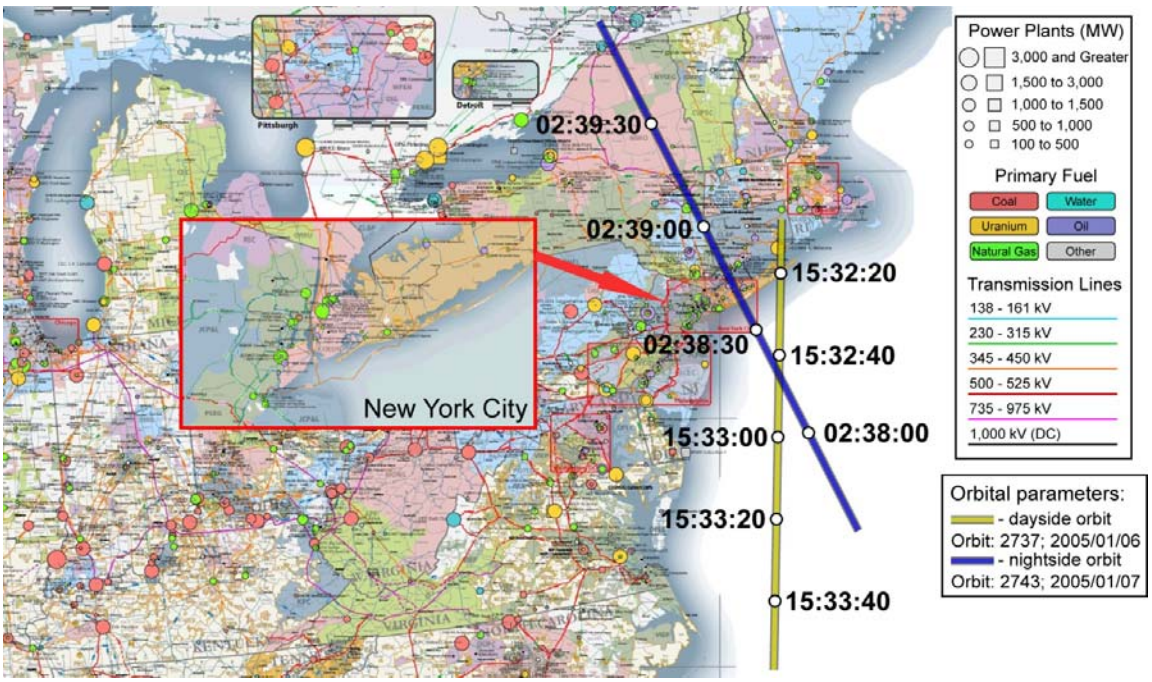
Індукційний магнітометр (рисунок 1.29) встановлено на кінці коротшої штанги (на рисунку 1.28 без позначення) довжиною 2 метри. Він призначений для вимірювання трьох компонент змінного магнітного поля в діапазоні від приблизно 8 Гц до 18 кГц.

Рисунок 1.29 – Індукційний магнітометр

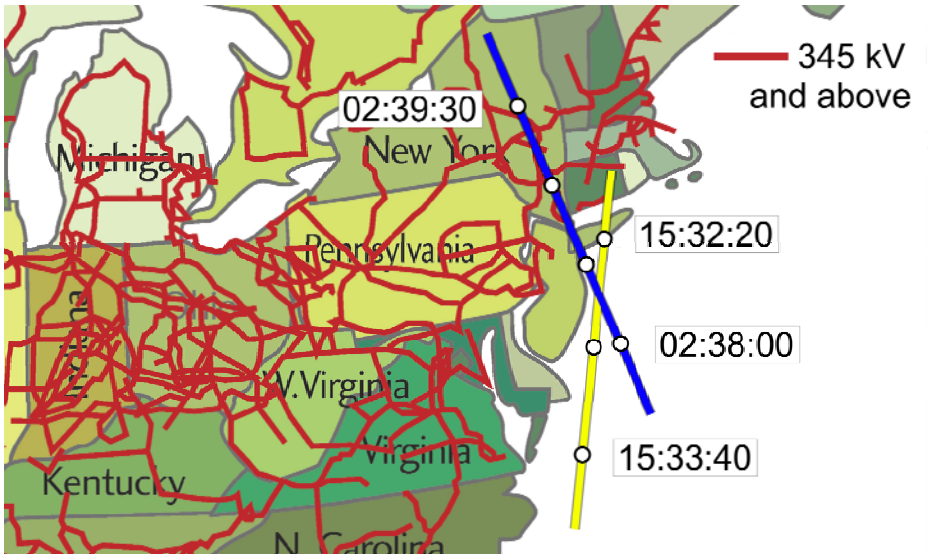
Оскільки метою наших досліджень було виявлення особливостей просочування сигналів з частотою мережі в іоносферу, основна увага була зосереджена на низькочастотному діапазоні – до 200 Гц. Дані з більшою частотою не розглядалися.

1.2.2 Аналіз даних супутника «Деметер»

Було піддано аналізу два прольоти супутника «Деметер» над територією Сполучених Штатів Америки. Саме ці дані були відібрані тому, що прольоти супутника відбувалися фактично над тією ж самою ділянкою території як в денний, так і в нічний час – див. рисунок 1.30 а, б. На рисунку 1.30а подано дані про орбітальні параметри під час прольоту над виділеною частиною території США і карту розташування потужних електростанцій і ліній електромереж.



а



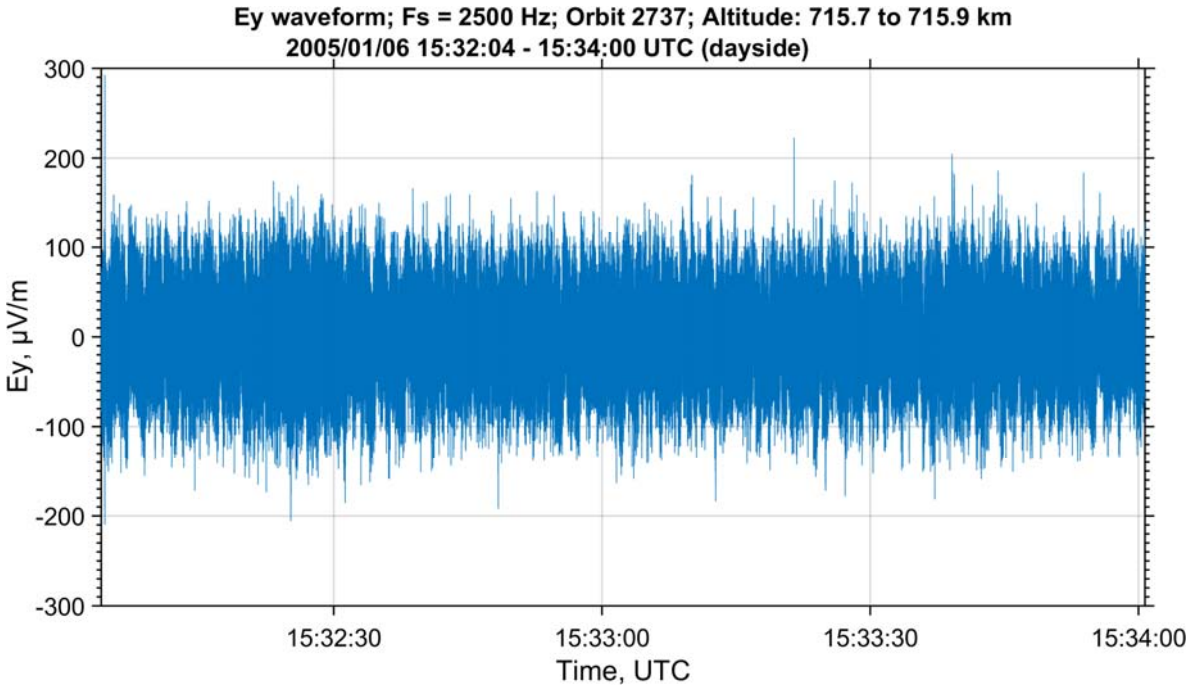
б

Рисунок 1.30 – Карта розташування потужних електростанцій і ліній електромереж з виділеними трасами прольоту над частиною території США (а), лінії найбільш потужних електромереж, виділені з рис. 1.30а (б)

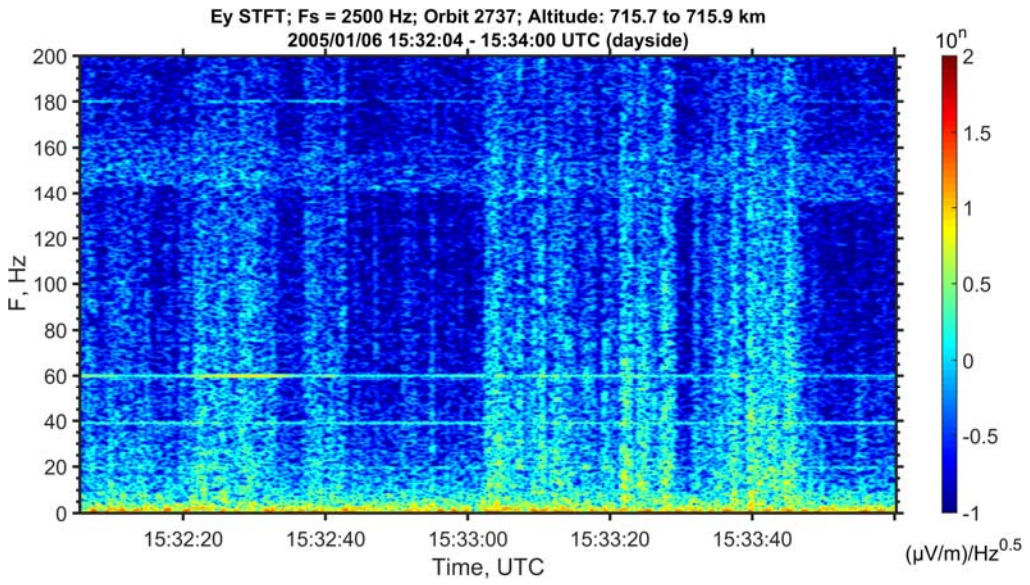
На рис. 1.30 б залишено тільки лінії найбільш потужних електромереж, що дозволило більш зручно виділяти моменти перетину траєкторією супутника конкретної лінії.

Слід відмітити, що вперше сигнали в електричній компоненті випромінювання ліній електромереж в іоносфері отримано на вище згаданому американському супутнику C/NOFS [26]. Вдруге цей ефект спостерігався при обробці даних експерименту на мікросупутнику «Чибис-М» [27]. В цій роботі продовжено обробку даних від супутника «Деметер» з метою

подальшого підтвердження існування просочування сигналів ВЛЕ в іоносферу. Нижче подано результати обробки даних супутника «Деметер», що на сьогодні існують у відкритому доступі [25]. На рисунку 1.31а наведено приклад вимірювання хвильової форми електричної компоненти Ey на борту супутника в денний час, а на рисунку 1.31б – ШПФ цього ж сигналу.



а

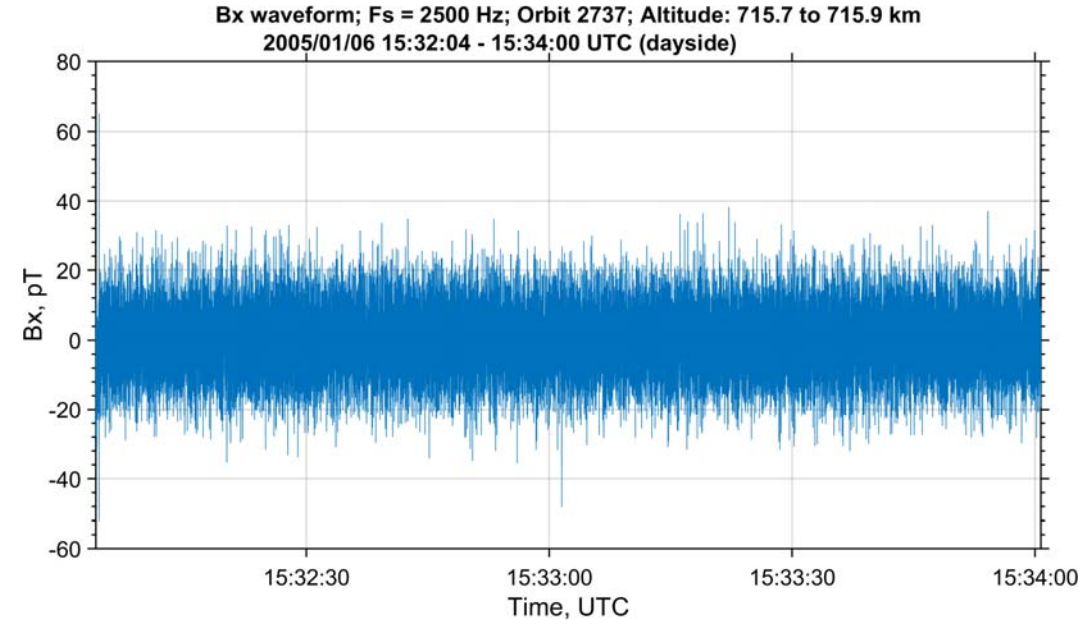


б

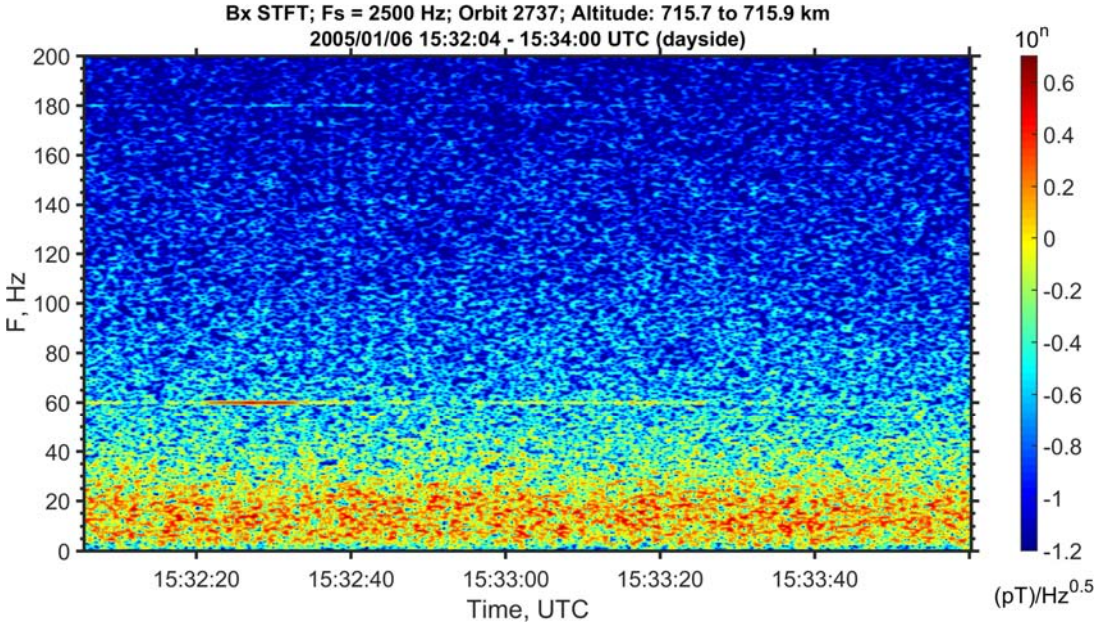
Рисунок 1.31 – Приклад вимірювання хвильової форми електричної компоненти Ey на борту супутника в денний час (а); ШПФ сигналу, наведеного на рисунку 1.31а (б)

З рисунку 1.31б добре видно існування як самого сигналу 60 Гц, так і його третьої гармоніки з частотою 18 Гц. Крім того, досить виразні є лінії з частотами 19.5 Гц і другої гармоніки цього сигналу з частотою 39 Гц. Це є завади, що генерує блок обробки даних BANT супутника «Деметер» [28]. Саме через наявність цього паразитного випромінювання наші французькі колеги не змогли виявити коливання з частотами Шуманівських резонансів (як подано далі, нам це вдалося).

Особливо важливо, що в денний час вдалося виявити і сигнали магнітної складової цих же коливань (рис. 1.32).



а

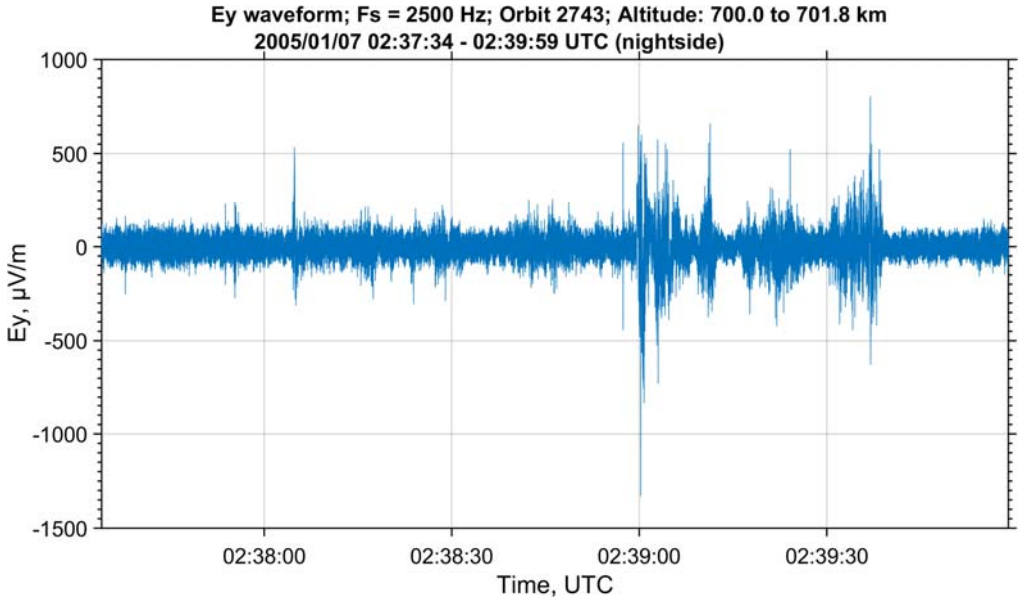


б

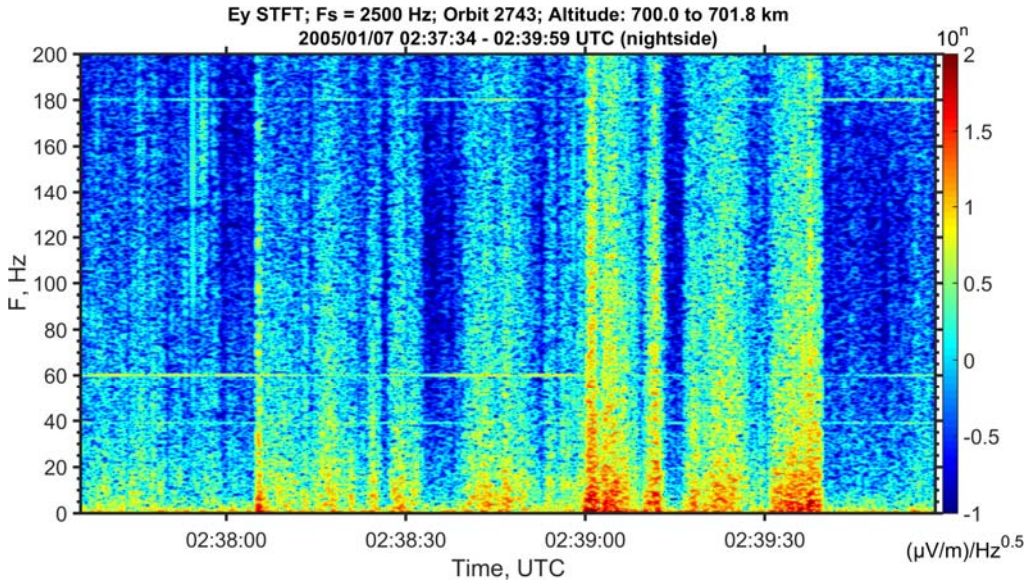
Рисунок 1.32 – Хвильова форма сигналу магнітної складової коливань (а), ШПФ сигналу магнітної складової коливань (б)

Чітко видно першу і третю гармоніку мережі 60 Гц і 180 Гц. Цей результат отриманий вперше. Саме наявність усіх трьох компонент векторів електричного і магнітного полів дозволило нам обчислити, як це буде показано далі, імпеданс іоносферної плазми на цих частотах, а також величини модуля ЕМ поля, що випромінюється, і великої осі еліпса поляризації сигналів ВЛЕ.

В нічний час амплітуди сигналів ВЛЕ виявилися трохи меншими. Нижче наведено приклад вимірювання хвильової форми електричної компоненти Ey на борту супутника в нічний час: на рисунку 1.33а - хвильова форма, а на рисунку 1.33б – ШПФ цього ж сигналу.



а

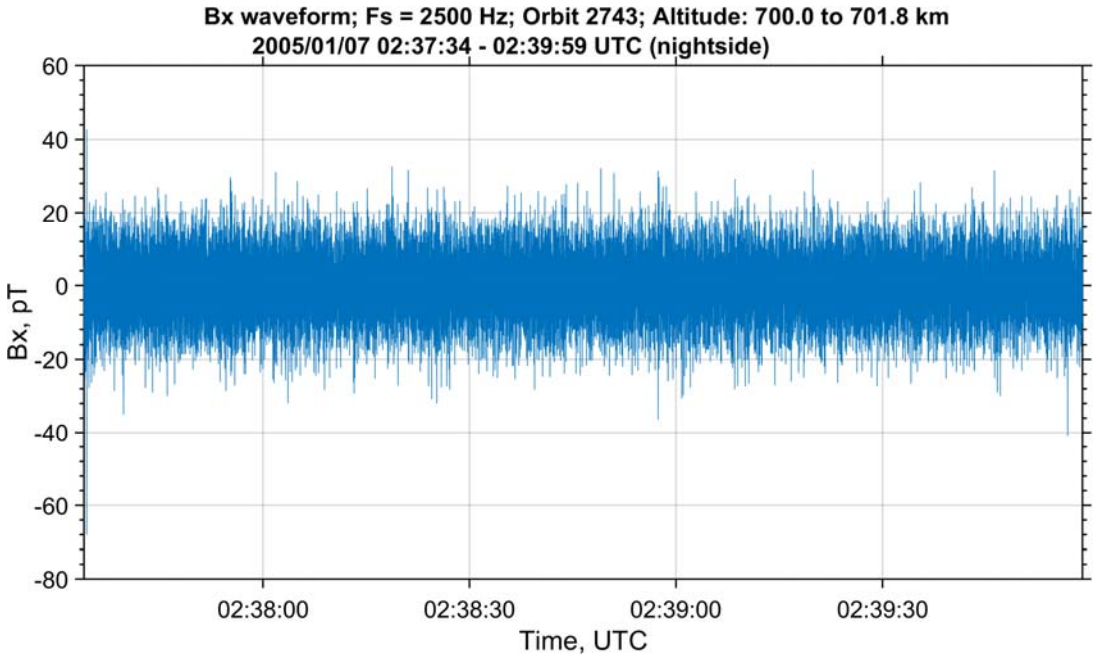


б

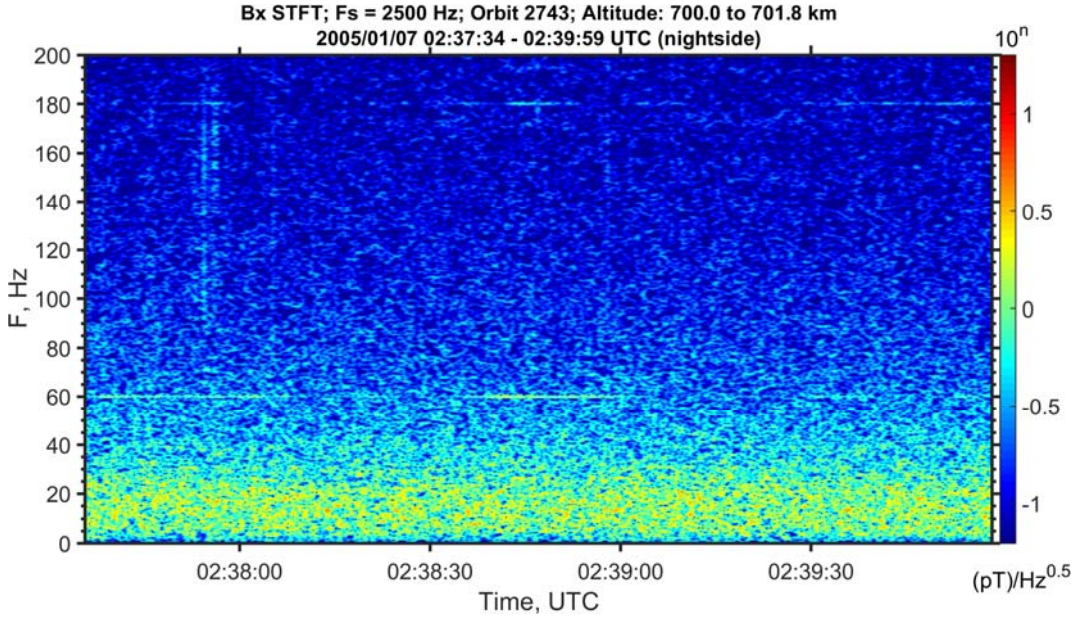
Рисунок 1.33 – Приклад вимірювання хвильової форми електричної компоненти Ey на борту супутника в нічний час (а), ШПФ сигналу, наведеного на рисунку 1.33а (б)

Знов-таки в даних електричного поля видно і сигнали ВЛЕ, і завада з частотою другої гармоніки блока обробки даних.

Ці ж самі сигнали з частотою ВЛЕ знайдені в нічний час і в магнітній компоненті – хвильова форма подана на рисунку 1.34а, а ШПФ цього сигналу – на рисунку 1.34б. Знову ж таки чітко видно першу і третю гармоніки частоти електромереж.



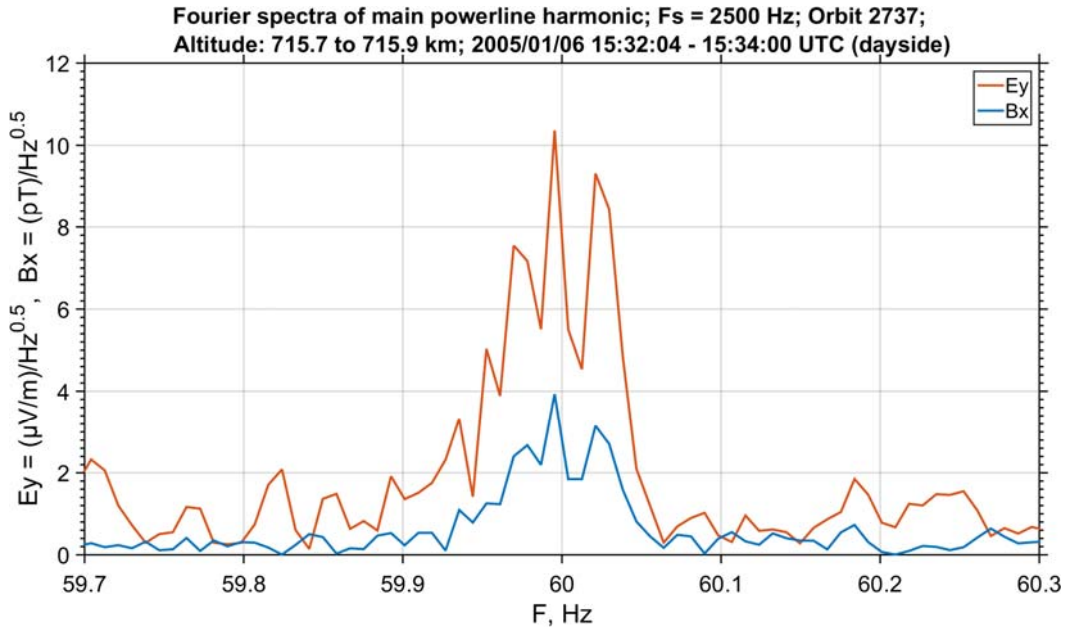
а



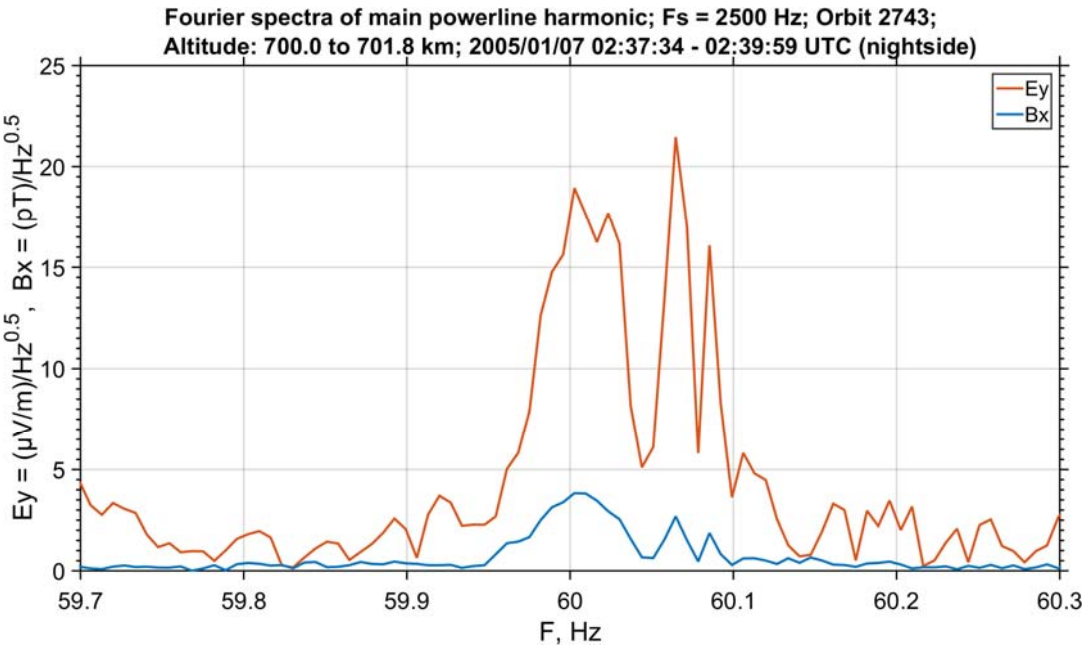
б

Рисунок 1.34 – Приклад вимірювання хвильової форми магнітної компоненти Bx на борту супутника в нічний час (а), ШПФ сигналу, наведеного на рисунку 1.34а (б)

Наявність детальної карти ліній електромереж (рисунок 1.30б) дозволила знайти цікавий ефект. При проведенні Фурьє-аналіза даних, отриманих вздовж траси прольоту супутника, виявлено, що частота мережі не є постійною, а дещо змінюється в залежності від того, яку лінію перетинає супутник. Цей ефект спостерігається як в денний, так і в нічний час, до того ж як в електричній, так і в магнітній компонентах (рисунок 1.35а,б).



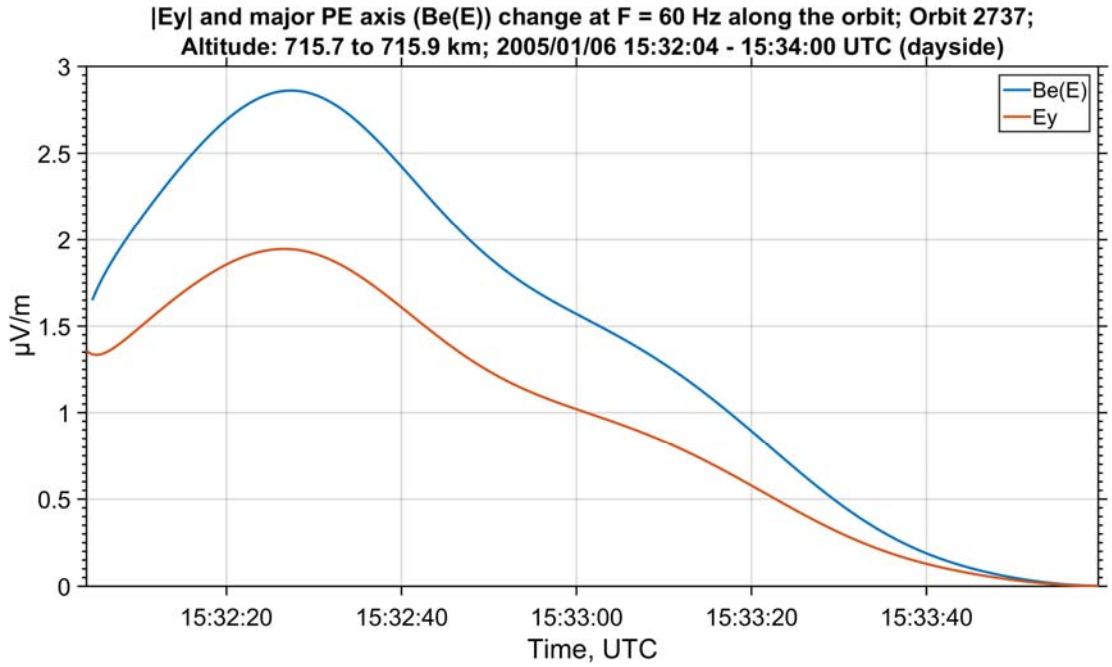
а



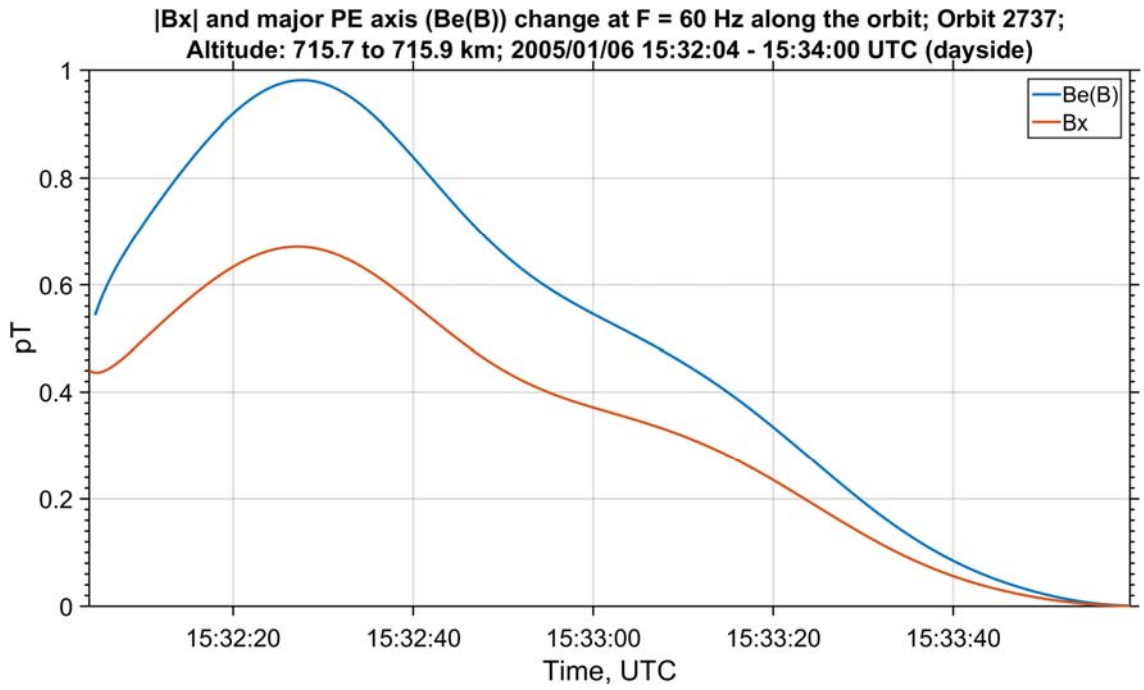
б

Рисунок 1.35 – Зміна частоти мережі від різних виробників у денний час (а), у нічний час (б)

Як вже було згадано, наявність даних вимірювання усіх 6 компонент електромагнітного поля дозволила побудувати залежність зміни амплітуди модуля електричної та магнітної компонент вздовж траси прольоту, а також обчислити залежність величини більшої осі еліпса поляризації за той же час, при чому як в денний, так і в нічний час. Ці результати подані на рисунках 1.36, 1.37.



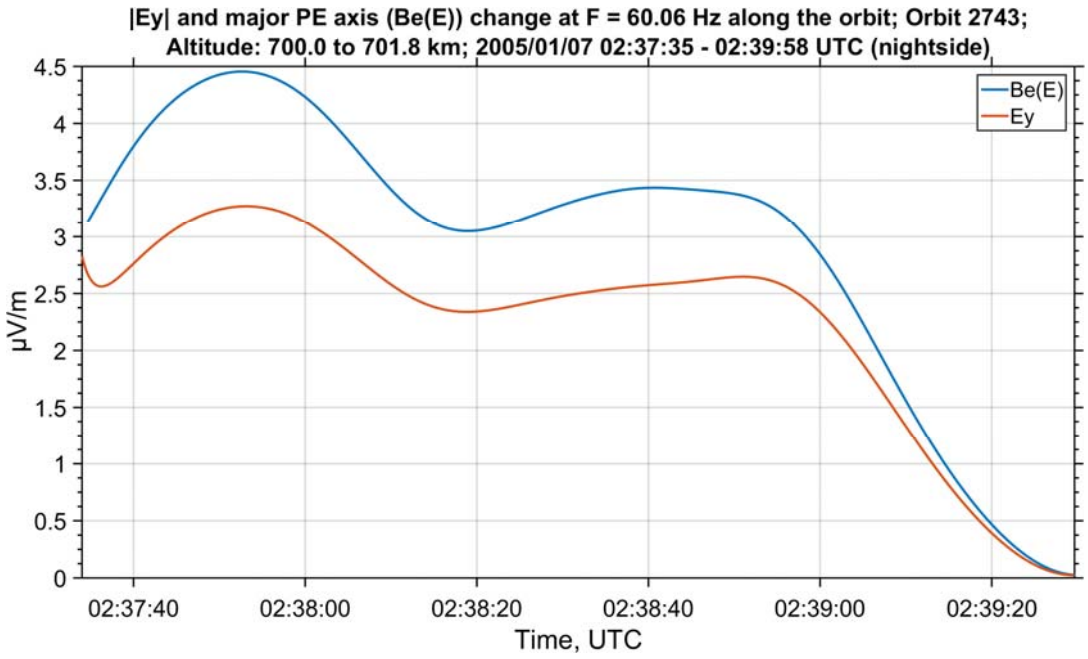
а



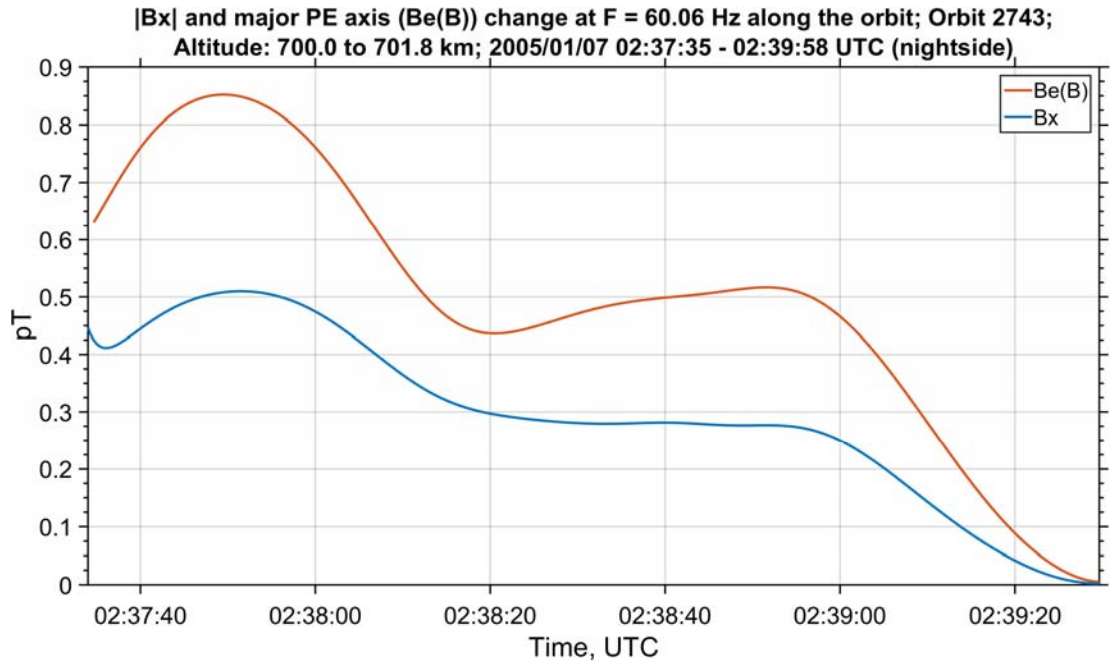
б

Рисунок 1.36 – Зміна величини більшої осі еліпса поляризації у денний час

а) електричне поле, б) магнітне поле



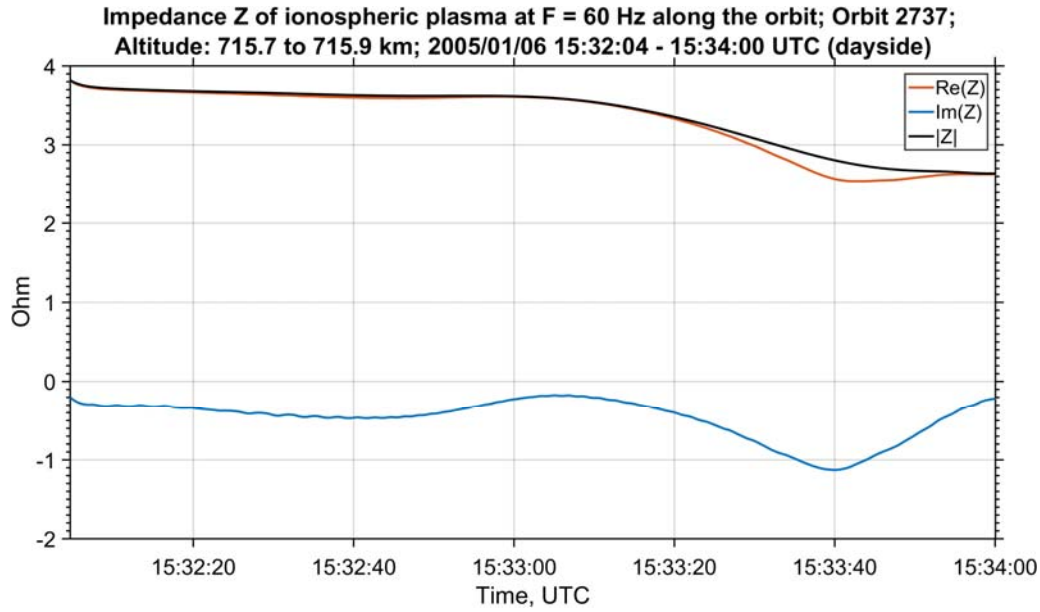
а



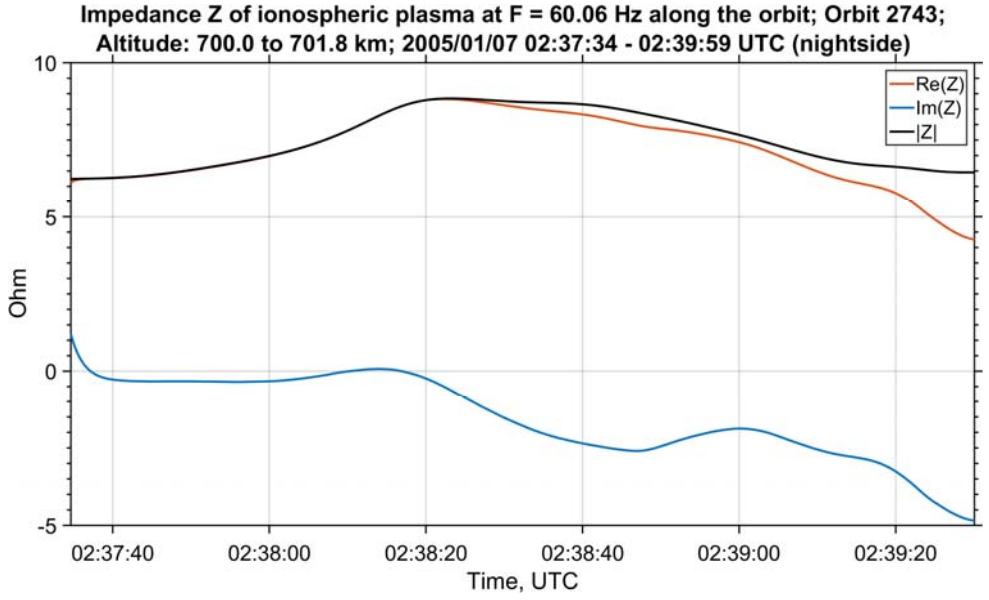
б

Рисунок 1.37 – Зміна величини більшої осі еліпса поляризації у нічний час
а) електричне поле, б) магнітне поле

Наступним кроком було використання даних вимірювання усіх 6 компонент електромагнітного поля вздовж траси прольоту для обчислення імпедансу Z іоносферної плазми та його змін від дня до ночі і вздовж траси. Ці результати подані на рисунок 1.38а, б відповідно для денного і нічного часу.



а



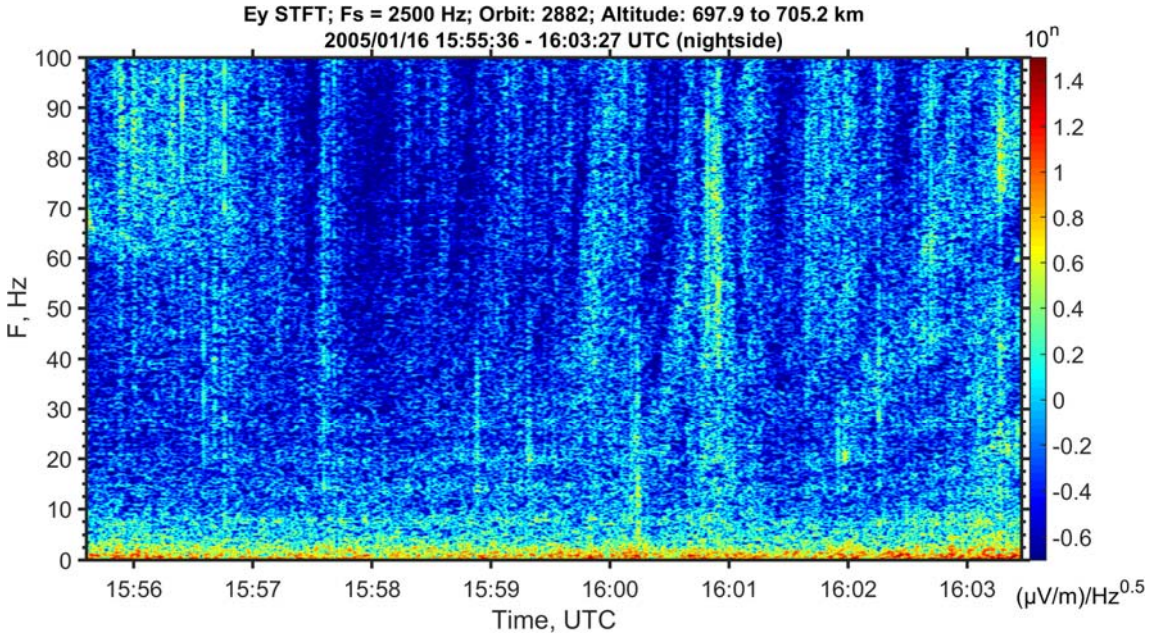
б

Рисунок 1.38 – Імпеданс Z іоносферної плазми

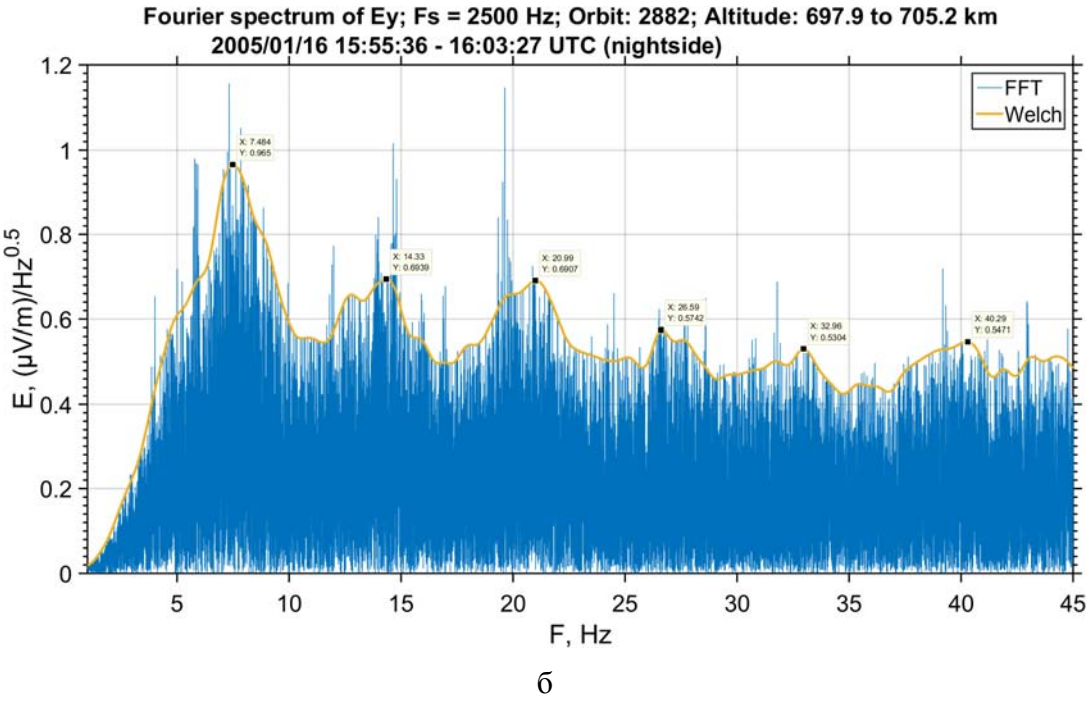
а) у денний час, б) у нічний час

Ефективність спеціально розробленої програми обробки даних проілюстровано вище на результаті обробки сигналів ВЛЕ при прольоті супутника «Деметер» над лініями електромереж, що належать різним генеруючім компаніям (рисунок 1.35): висока роздільна здатність частотного аналізу і адаптивний алгоритм усунення завад дозволив розділити випромінювання ВЛЕ з частотами, що відрізняються на соті долі герца, від електромереж різних компаній.

Ця ж програма обробки дозволила надійно ідентифікувати випромінювання з частотою Шуманівських резонансів в даних супутника «Деметер», що не вдавалося французьким колегам через наявність потужного сигналу завади з близькою частотою (рисунок 1.31). Відповідний результат подано на рисунку 1.39а (ШПФ) і рисунку 1.39б (Фурье-спектр).



а



б

Рисунок 1.39 – Шуманівські резонанси в даних супутника «Деметер»
ШПФ (а), спектри по Фур'є і по Велшу (б)

Знайдено сигнали Шуманівських резонансів аж до 6 гармоніки, при цьому їх амплітуда дійсно є на межі чутливості електричного каналу супутника «Деметер» – від ~ 1 мкв/м на першій гармоніці до ~ 0.5 мкв/м на шостій гармоніці. Але оскільки частоти усіх гармонік лежать в межах допустимих варіацій, можна зробити висновок, що ці дані підтверджують надійність отриманих результатів.

1.3 Розроблення програмного забезпечення формувача транспортних кадрів та завадостійкого кодування інформації на ПЛІС

Розроблення програмного забезпечення формувача транспортних кадрів та завадостійкого кодування інформації на ПЛІС є продовженням робіт, які проводились за договорами з ІКД НАН України та ДКА України зі створення системи збору і оброблення наукової інформації (СЗНІ) для наносупутників. До основних функцій, які покладаються на СЗНІ, відносяться такі як формування транспортних кадрів для передачі наукових даних на наземні пункти приймання в стандарті CCSDS та RS-кодування інформації для забезпечення надійності її передачі на Землю. Виконання зазначених функцій буде реалізовано на програмованій логічній інтегральній схемі шляхом розроблення відповідного програмного забезпечення. Розроблення програмного забезпечення формувача транспортних кадрів та завадостійкого кодування на ПЛІС становить завдання даної роботи.

1.3.1 Розроблення програмного забезпечення формувача транспортних кадрів

Основою для розробки алгоритмів та проектування програмного забезпечення є рекомендації та стандарти The Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS) [29].
Згідно стандартів CCSDS, для передачі даних, накопичених в ході досліджень на борту космічного апарата, кінцевим користувачам на Землі, використовується концепція пакетної телеметрії (Packet Telemetry) [30]. Вона включає наявність пакетів даних (Source Packets – SP), транспортних фреймів (Transfer Frames – TF) та механізм мультиплексування даних від різних систем та давачів (джерел) бортової апаратури в один потік.

Функціональна блок-схема формування потоку інформації для передачі наземним службам показана на рисунку 1.40. Дані, накопичені бортовою апаратурою, розподіляються серед віртуальних каналів (Virtual Channel – VC) до цілковитого заповнення останніх. Сформовані VC заповнюють основні канали передачі даних (Master Channel – MC). Створені таким чином TF поступають на передавальний пристрій. Наземний сегмент дослідницької місії забезпечує зворотнє вилучення даних.

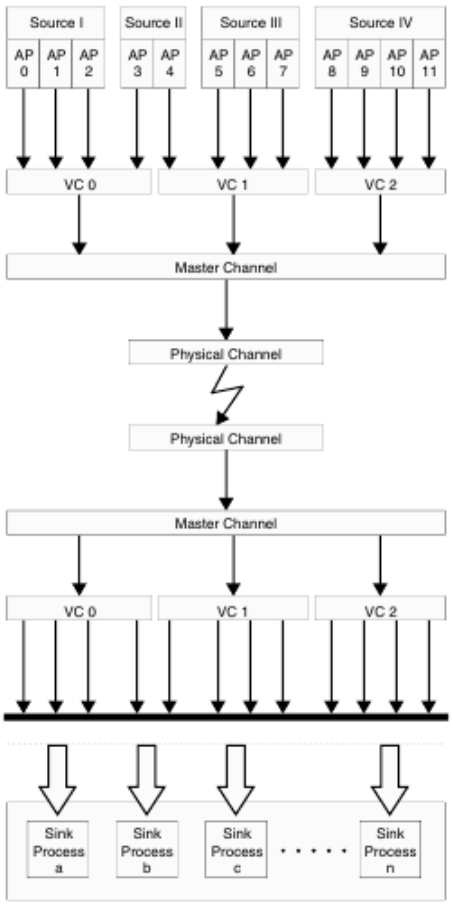


Рисунок 1.40 – Функціональна блок-схема формування потоку інформації для передачі наземним службам

Транспортні фрейми

Транспортні фрейми (TF) призначені для формування структури даних при передачі інформації від бортової апаратури космічного апарата кінцевим користувачам [30]. Він складається з первинного заголовка (Primary Header) і поля даних. Первинний заголовок має сталу довжину, яка становить 6 октетів. Поле даних має нефіксований але обмежений розмір, оскільки довжина TF не може перевищувати 16384 октети.

Первинний заголовок містить необхідну інформацію для ідентифікації даних: лічильники VC та MC, вказівник розміщення першого SP в цьому TF, якщо перед ним розміщено залишок попереднього SP. При відсутності на даний момент даних для передачі, передбачено використання порожніх TF (Idle Frame). Такий механізм забезпечує неперервність потоку даних в передавальному тракті.

Формат TF зображено на рисунку 1.41.

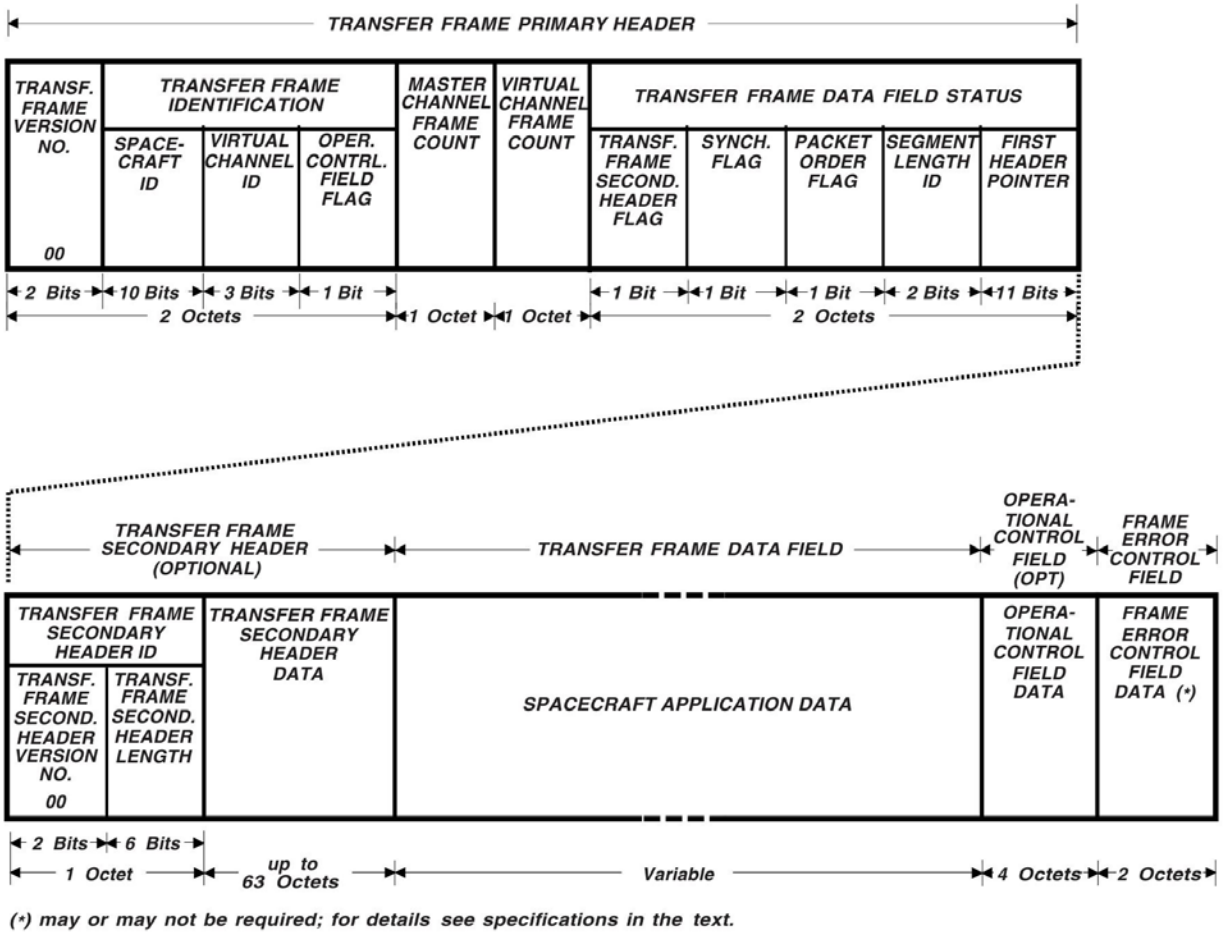


Рисунок 1.41 – Формат транспортного фрейма.

Формувач транспортних пакетів

Формувач транспортних пакетів Transport Frame Packer (ФТП) зображений на рисунку 1.42 відповідає вимогам [31] і містить всі необхідні шини підключення.

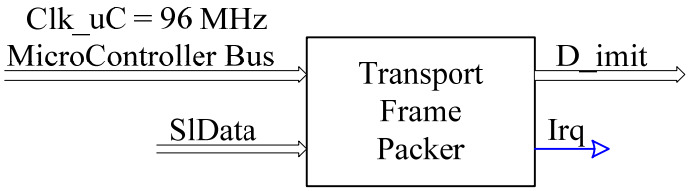


Рисунок 1.42 – Формувач транспортних пакетів.

Вхідні дані можуть заноситися до ФТП або програмно з боку мікроконтролера шиною MicroControlerBus, або апаратно шиною SlData. Вибір способу занесення даних до ФТП здійснюється під час проектування ПЛІС і не може змінюватися під час роботи. Додатково

ФТП формує сигнал запиту переривання при виникненні визначених під час його проектування ситуацій в його роботі.

Через шину MicroControlerBus додатково здійснюється програмне встановлення режимів роботи ФТП, а також зчитується до мікроконтролера інформація про стан ФТП.

Функціональну схема ФТП показано на рисунку 1.43.

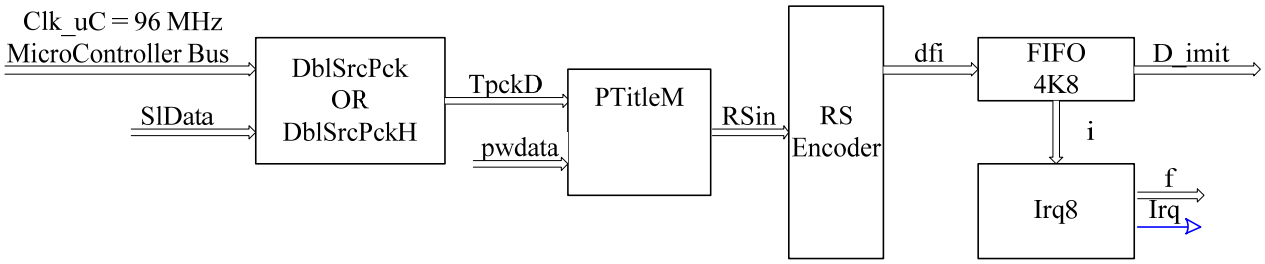


Рисунок 1.43 – Функціональна схема формувача транспортних пакетів.

До складу ФТП входять:

– подвоєний формувач пакетів джерела інформації (ФПДІ) DblSrcPck або DblSrcPckH для програмного або апаратного вводу відповідно;

– формувач заголовків транспортних пакетів PTitleM;

– кодер Ріда-Соломона RS Encoder;

– вихідне FIFO 4K8;

– вузол переривання Irq8 (аналізує стан вихідного FIFO 4K8 та формує ознаку переривань Irq при виникненні сигналів Empty, prog_empty, full, prog_ful);

Подвоєний формувач пакетів джерела інформації

Подвоєний формувач пакетів джерела інформації призначений для перетворення вхідного неперервного потоку даних у пакети джерела інформації, оформлені відповідно до вимог [31]. Функціональну схема ФПДІ показано на рисунку 1.44.

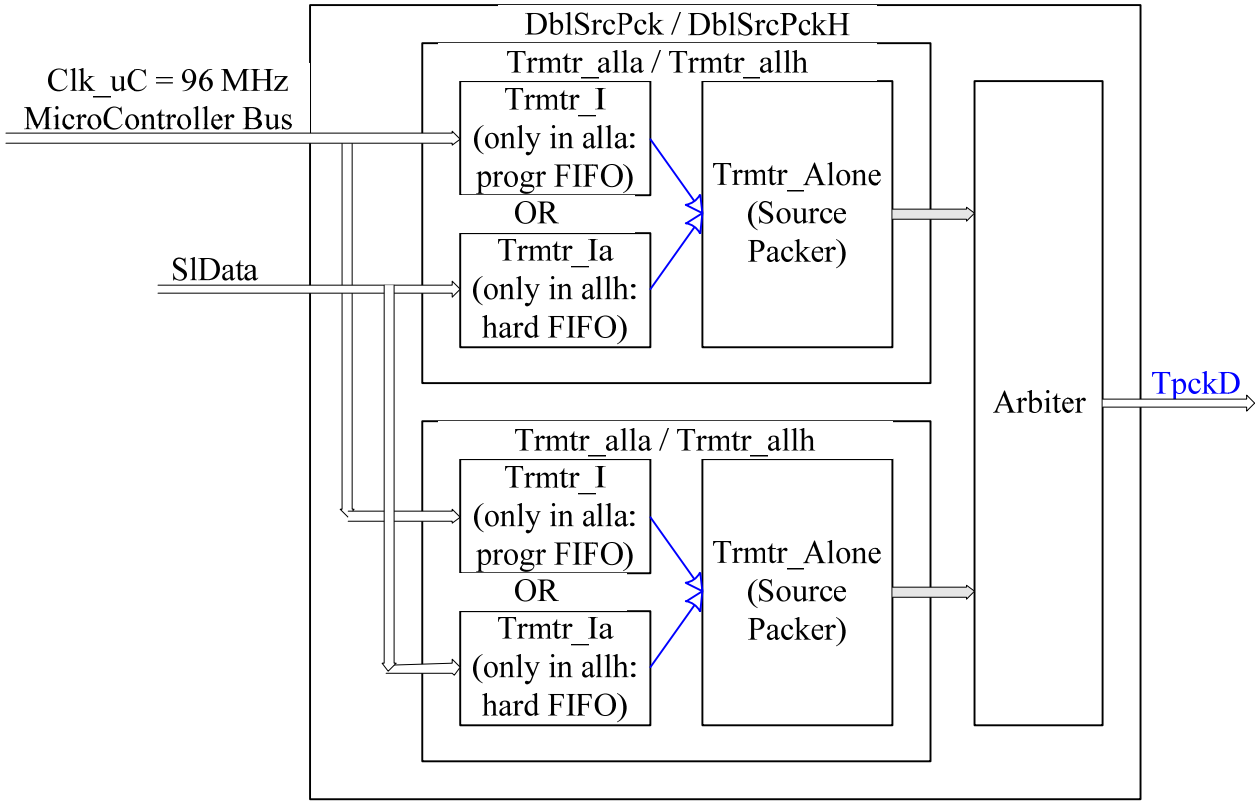


Рисунок 1.44 – Функціональна схема формувача пакетів джерела інформації

До складу ФПДІ входять:

– два передавачі пакетів, сформованих апаратним (вузол Trmtr_allh) або програмним (вузол Trmtr_alla) способом;

– арбітр Arbiter.

Кожний передавач пакетів містить вхідне FIFO, під'єднане або до шини мікроконтролера (вузол Trmtr_I) або до шини SlData (вузол Trmtr_Ia) та власне формувач пакетів джерела Trmtr_Alone.

Разом вхідне FIFO та формувач Trmtr_Alone працюють аналогічно передавачу синхронного каналу SciWay [32].

При готовності пакетів джерела на виході двох формувачів, арбітр віддає перевагу одному з них і транслює підготовлений ним пакет на вихідну шину TPckD.

Формувач заголовків транспортних пакетів PTitleM.

Формувач заголовків транспортних пакетів PTitleM призначений для формування заголовків транспортних пакетів за [33]. Функціональну схему формувача заголовків транспортних пакетів PTitleM наведено на рисунку 1.45.

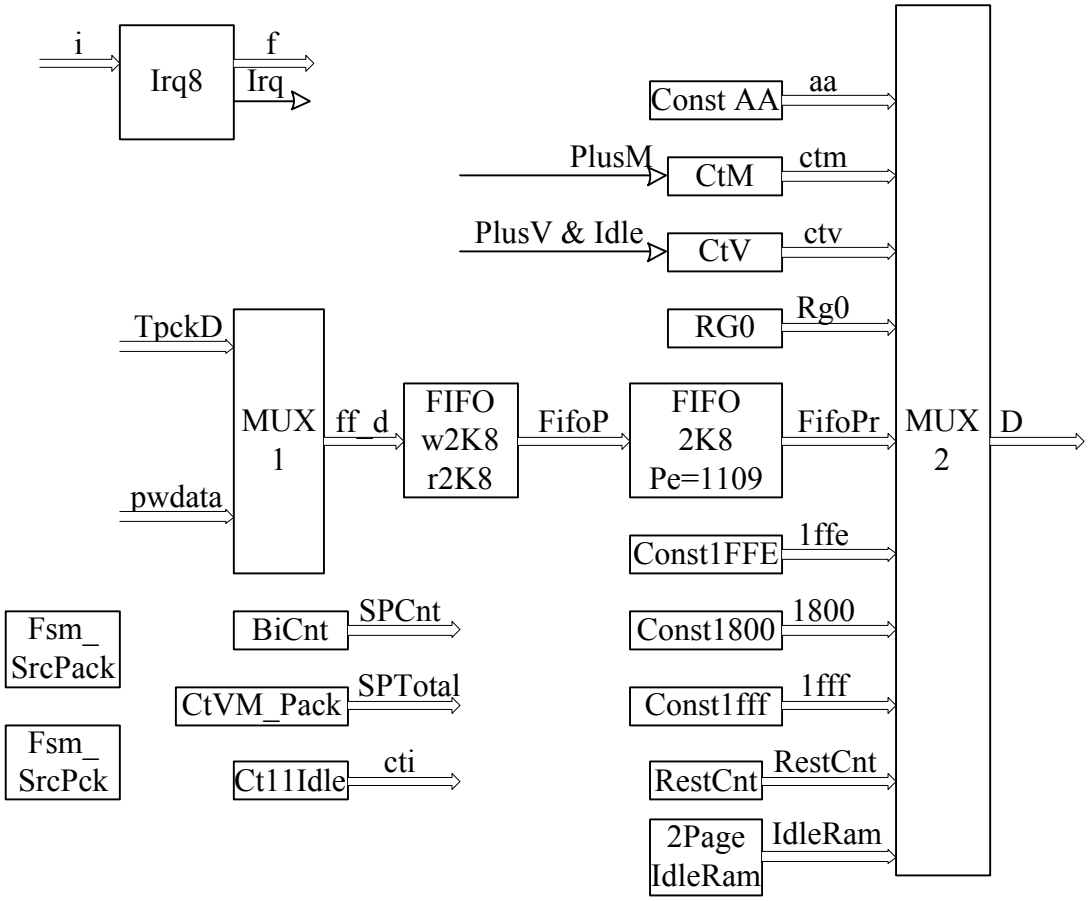


Рисунок 1.45 – Функціональна схема формувача заголовків транспортних пакетів PTitleM

До складу формувача заголовків транспортних пакетів PTitleM входять:

– контролер переривань формувача заголовків транспортних пакетів PTitleM Irq8. Контролер формує запит переривання Irq при виникненні сигналів empty, prog_empty, full, prog_full – від вхідного FIFO w2K8 r2K8, Empty2 – від вихідного FIFO 2K8 з порогом випорожнення Pe=1109, PageRdy – від двосторінкового ОЗП;

– вхідний мультиплексор даних MUX1;

– вхідне FIFO w2K8 r2K8;

– вихідне FIFO 2K8 з порогом випорожнення Pe=1109;

– формувачі константних значень у заголовку транспортного пакету Const 1FFE, Conct 1800, Conct 1fff та в тілі транспортного пакету Cons AA;

– лічильник довжини транспортного пакету RestCnt;

– лічильники віртуальних та основних пакетів CtV та CtM;

– регістр програмованих полів у заголовку транспортного пакета Rg0;

– двосторінкове ОЗП для телеметричної інформації (заноситься до ОЗП програмно), яка видається у холостих транспортних пакетах 2Page IdleRAM;

– службові автомати Fsm_SrcPack, Fsm_SrcPck, які забезпечують підрахунок прийнятих та відправлених пакетів джерела інформації;

– службові лічильники BiCnt, CtVM_Pack, Ct11Idle.

Формат заголовка транспортного пакету ілюструє таблиця 1.5.

Таблиця 1.5 – Заголовок транспортного пакету

Кількість байтів у 5 пакетах після їх перемішування	Кількість байтів в полях пакета	Призначення байтов
1115dec = 45Bhex = 223x5 (558dec = 22Ehex слов)	6	Заголовок пакету для радіолінії
	4	Заголовок пакету джерела інформації
	2	Довжина пакету джерела інформації
	1103	Дані пакету джерела інформації
160 = 32x5		код РС
4		Синхропосилка
1279 = 4ff		Усього

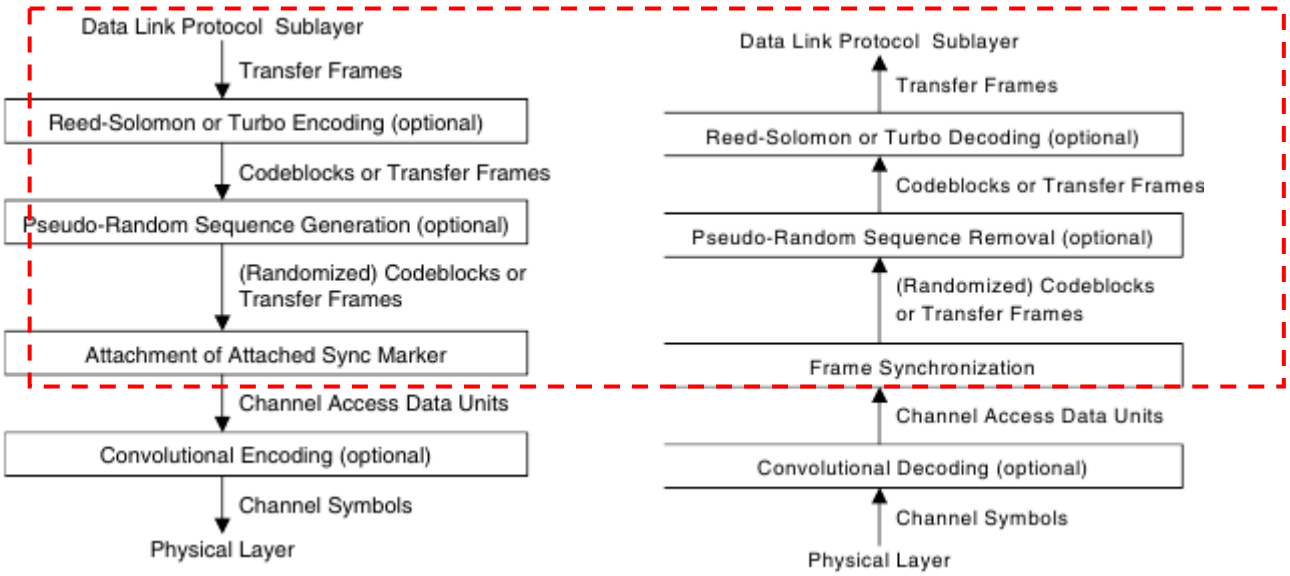
1.3.2 Розроблення програмного забезпечення завадостійкого кодування інформації на ПЛІС

З метою запобігання втраті даних, CCSDS рекомендує застосовувати завадостійке кодування (конволюційне, Ріда-Соломона), а також методику псевдовипадкового формування інформації [34].

Функціональна блок-схема використання завадостійкого кодування і псевдовипадкового формування показана на рисунку 1.46. Сформовані TF поступають на вхід кодера Ріда-Соломона (Reed-Solomon – RS), якщо є рішення про його використання (рис. 1.46 а). Отримана кодова послідовність або сам TF подається на вхід формувача псевдовипадкового розподілу інформації, якщо є рішення про його використання. Випадковим чином розподілена інформація або сам TF отримують перед собою приєднаний синхромаркер (Attached Sync Marker – ASM). Його призначення – відділити послідовні кодовані інформаційні блоки або самі TF. Сформовані інформаційні блоки або самі TF поступають на вхід конволюційного кодера і, далі, – в передавальний пристрій. На рисунку 1.46 б) показано процес декодування.

Для реалізації більш гнучкого механізму ідентифікації даних при розробці апаратно-програмних засобів використовується методика пакетування даних у форматах-контейнерах. Ця методика не входить в перелік стандартів CCSDS, але її використання дозволяє

відновлювати структуру зберігання інформації в накопичувачах бортової апаратури космічного апарата.



а) – послідовність дій при формуванні потоку даних для передачі наземним користувачам

б) – послідовність дій перед вилученням даних з TF

Рисунок 1.46 – Функціональна блок-схема використання завадостійкого кодування і псевдовипадкового формування

Кодування та декодування інформації за алгоритмом Ріда-Соломона

Для кодування та декодування інформації використовуються завадостійкі алгоритми Ріда-Соломона (RS) [34, 35].

Інформація розподіляється на блоки довжиною 223 байти. Для кожного блоку обчислюються кодові символи по 32 байти. Ці символи використовуються при декодуванні і дозволяють при необхідності провести повну реконструкцію до 16 пошкоджених байт інформації. Блок-схема RS-кодера показана на рисунку 1.47.

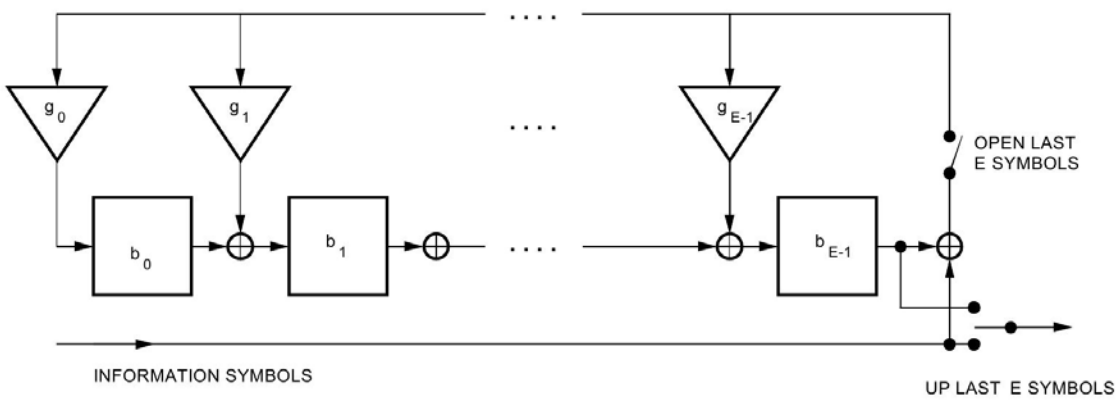


Рисунок 1.47 – Блок-схема RS-кодера

Для запобігання пошкодження неперервних блоків інформації (Burst Error Events) використовуються методика перемішування (Interleaving). Завдяки цій методиці неперервний пошкоджений блок інформації рівномірно розподіляється серед сусідніх (непошкоджених) блоків і зростає ймовірність максимальної реконструкції інформації. Функціональна схема перемішування інформації показана на рисунку 1.48.

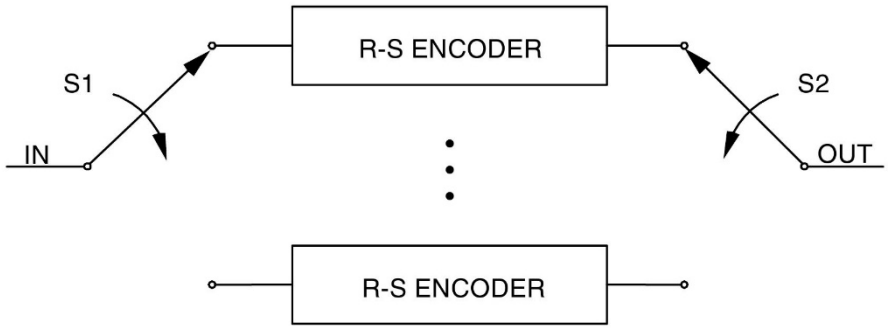


Рисунок 1.48 – Функціональна схема перемішування інформації

Кількість каналів для перемішування (глибина перемішування – Interleaving Depth) може становити 1-5 та 8. Кожен байт інформації з потоку IN почергово подається на вхід одного з RS-кодерів, де формується набір кодових символів. На виході перемішувала формується потік інформації OUT, який складається з вхідної послідовності IN та набору кодових символів кожного каналу перемішувача. Для глибини 5 вихідний потік матиме такий вигляд:

$$I_{out} = I_{in1}^{1} I_{in1}^{2} I_{in1}^{3} I_{in1}^{4} I_{in1}^{5} I_{in2}^{1} I_{in2}^{2} I_{in2}^{3} I_{in2}^{4} I_{in2}^{5} \ldots I_{in223}^{1} I_{in223}^{2} I_{in223}^{3} I_{in223}^{4} I_{in223}^{5} P_{RS1} P_{RS2} P_{RS3} P_{RS4} P_{RS5}$$

де:

I_{out} – вихідний потік інформації;

I^{k}_{inM} – елемент вхідного потоку, розділеного між каналами перемішувача;

k –кількість каналів перемішування;

M – довжина блоку розподілу даних вхідного потоку;

$P_{RS}k$ – послідовність кодових символів кожного з RS-кодерів.

Таким чином довжина кодового блоку при глибині перемішування 5 становитиме

L_{out} = (223+32)*5 = 1275 байт.

Побайтний розподіл кодового блоку показано в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Побайтний розподіл кодового блоку

Поле	Довжина, байт
Заголовок TF	6
Поле даних TF	1109
Кодові символи RS	160 (32*5)

Декодування – складний процес, який потребує математичного апарату метрик Галуа. З алгоритмами декодування можна ознайомитись, наприклад, в [36, 37].

Кодер Ріда-Соломона RSEncoder

Кодер Ріда-Соломона забезпечує виявлення та виправлення помилок, що виникають у процесі передачі транспортних пакетів, а також для формування самих транспортних пакетів на основі вхідних пакетів джерела інформації. Виявлення та виправлення помилок здійснюється відповідно до [30]. Функціональну схема кодера Ріда-Соломона показано на рисунку 1.49.

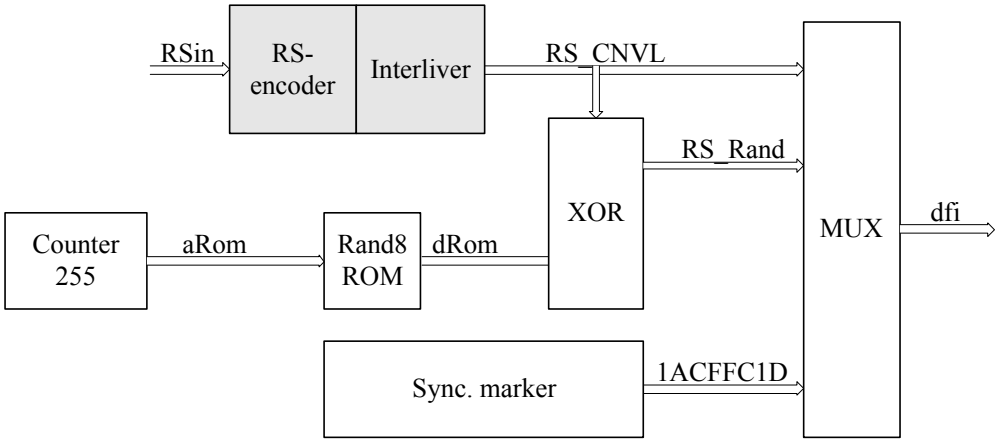


Рисунок 1.49 – Функціональна схема кодера Ріда-Соломона.

До складу кодера Ріда-Соломона входять:

- власне кодер Рида-Соломона RS-encoder;
- перемішував Interliver;
- лічильник за модулем 255 Counter;
- ПЗП скремлювання Rand8 ROM;
- елемент XOR;
- формувач синхромарекра Sync. Marker;
- вихідний мултиплексор MUX.

Власне кодер Рида-Соломона RS-encoder здійснює завалостійке кодування транспортних пакетів за рекомендаціями [33]. Таблиця 1.7 ілюструє кількісну оцінку транспортних пакетів.

Таблиця 1.7 – Код Ріда-Соломона

Кількість байтів пакета без перемішування	Кількість байтів у 5 пакетах після їх перемішування	Призначення байтов
223	223x5= 1115	Дані
32	32x5 = 160	Код РС
255	1275	Усього

Перемішувач Interliver здійснює перемішування закодуванних даних за рекомендаціями [33].

Призначення інших складових кодера Ріда-Соломона зрозуміла з їхніх назв.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

В розділі 1 розглянуті можливості вдосконалення температурних і шумових характеристик кодокерованого джерела струму для ферозондових магнітометрів. Експериментально показано, що вихідний сигнал одного з найкращих джерел опорної напруги LTZ1000 має суттєво нелінійну температурну залежність у режимі без стабілізації температури. Запропоновано метод схемотехнічної лінеаризації температурної характеристики, ефективність якого експериментально підтверджено в діапазоні температур +25...+65°C. Пояснення причин температурного дрейфу вихідної напруги LTZ1000 в діапазоні температур -60...+10°C потребує подальших досліджень. Виявлене джерело надлишкового шуму в інтегральному цифро-аналоговому перетворювачі AD5791 та обрана схема така схема під'єднання ЦАП, що усуває цей недолік. Важливим компонентом з точки зору температурної стабільності є резистор у перетворювачі «напруга-струм», опір якого може також суттєво нелінійно залежати від температури. У випадку резисторів для поверхневого монтажу температурний дрейф опору може залежати від способу монтажу компонента на друковану плату. Застосування отриманих результатів і рекомендацій дозволить створити ФЗМ з рекордними шумовими й температурними характеристиками.

В результаті виконання роботи отримані нові цікаві дані щодо виявлення сигналів ВЛЕ в показах давачів електричного і магнітного поля супутника «Деметер». Крім того, наявність усіх 6 компонент електромагнітного поля дозволило також вперше обрахувати імпеданс космічної плазми на частотах ВЛЕ і побудувати еліпс поляризації електромагнітних хвиль на цих частотах.

У звіті поданий аналіз просторового та часового розподілення ДНЧ сигналів як штучного походження (гармоніки з частотою електромереж), так і природного (гармоніки Шуманівських резонансів). Ще раз підтверджено наявність забруднення іоносфери потужними наземними джерелами електроенергії. Були виявлені перша і третя гармоніки частоти електромережі не тільки в електричному полі, але й в перший раз ці ж самі гармоніки знайдені і в магнітному полі, що дало змогу обчислити імпеданс іоносферної плазми на цих частотах, а також величини модуля ЕМ поля, що випромінюється, і великої осі еліпса поляризації сигналів ВЛЕ. Досліджені можливі зв'язки між розповсюдженням цих сигналів та станом іоносфери та подана оцінка деяких електромагнітних параметрів цих сигналів. На основі цього аналізу зроблено висновок, що на наявному масиві даних суттєвих змін в інтенсивності сигналів з частотами мереж електропередач не виявлено. Скоріш за все, це пов'язано з невеликими рівнями сонячної активності за досліджуваний період. Крім того, вперше в даних супутника «Деметер» виявлені коливання з частотами Шуманівських

резонансів аж до 6 гармоніки, що підтвердило високу ефективність розробленої методики обробки даних. Отримані результати були представлені і обговорені на Асамблеї Європейської спілки наук про Землю (Відень, квітень 2016 р.). Також підготовлено доповідь за результатами досліджень, яку представлено на XVI Українській конференції з космічних досліджень (Одеса, серпень 2016 р.). Проводиться підготовка наукової публікації, що буде подана до міжнародного журналу з високим імпакт-фактором.

В результаті проведеної роботи розроблено формувач транспортних кадрів в стандарті CCSDS та кодер Ріда-Саламона на ПЛІС, які є необхідними атрибутами для створення системи збору наукової інформації наносупутників.

2 РОЗРОБЛЕННЯ НОВОГО МЕТОДУ МІНІМІЗАЦІЇ РИЗИКІВ ВПЛИВУ КОСМІЧНОЇ РАДІАЦІЇ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

2.1. Мінімізації ризиків впливу космічної радіації на функціонування супутникових приладів та систем

У даному розділі проведено аналіз сучасних підходів до оцінювання негативних факторів космосу на супутникові прилади та системи. Суть дослідження полягає в тому, що основні принципи оцінки ризику можуть бути застосовані на статистичних методах. Проте, аналіз ризиків повинен також враховувати аспекти поведінки розробника. Тому нами було запропоновано наступний набір методів оцінки ризиків: (а) статистичні методи; (б) оцінювання надійності; (в) методи оптимізації; (г) прискорене моделювання; (д) нелінійні математичні моделі [1-22].

Дослідження радіаційного впливу на космічні апарати стає все більш важливим в останні роки. Уже давно відомо, що електричні системи чутливі до радіації. Недавні дослідження показали на ймовірність того, що механічні пристрої також можуть бути схильні до радіаційно-індукованих пошкоджень. Особливо чутливі до радіації пристрої з механічним підсистемами, що керують електричними полями через ізолятори; тобто електростатично розташовані консольні балки. Так як ізолятори можуть руйнуватися у випадку діелектричного розриву, існує велика ймовірність, що ці пристрої будуть мати знижену функціональну спроможність в космічному середовищі. Ще одна складність полягає в тому, що випромінювання може викликати пошкодження матеріалів комічних систем.

Ми визначаємо ризик як ймовірність майбутніх втрат. Це визначення може застосовуватися послідовно до елементів супутникових приладів (СП), і це корисно для прогнозування ризиків, хоча це не є загальновизнаним. На противагу цьому, ретроспективні концепції оцінки ризику не розглядаються. Для аналізу ризику ми пропонуємо використовувати характеристики відхилення від нормального режиму.

В умовах впливу негативних факторів космосу на супутникові прилади та системи зростає інтерес до мір ризику, що здатні оцінити можливі порушення їх функціонування. Найбільшого поширення в останні роки набули наступні міри ризику Value-at-Risk (VaR) і Conditional VaR (CVaR) або, як її ще називають ES (Expected Shortfall). Останнім часом з'явилося багато робіт, присвячених як розробці нових методів оцінювання цих мір ризику, так і специфіці їх застосування. Більшість методів мають обмежену область застосування,

свої переваги і недоліки, орієнтовані на роботу з певним типом даних, що ускладнює користувачу вибір адекватної моделі оцінювання та прогнозування при розв'язанні конкретної задачі.

У даному розділі, використовуючи методи системного аналізу, проведена систематизація методів оцінювання динамічних мір ризику (див. рис. 2.1).

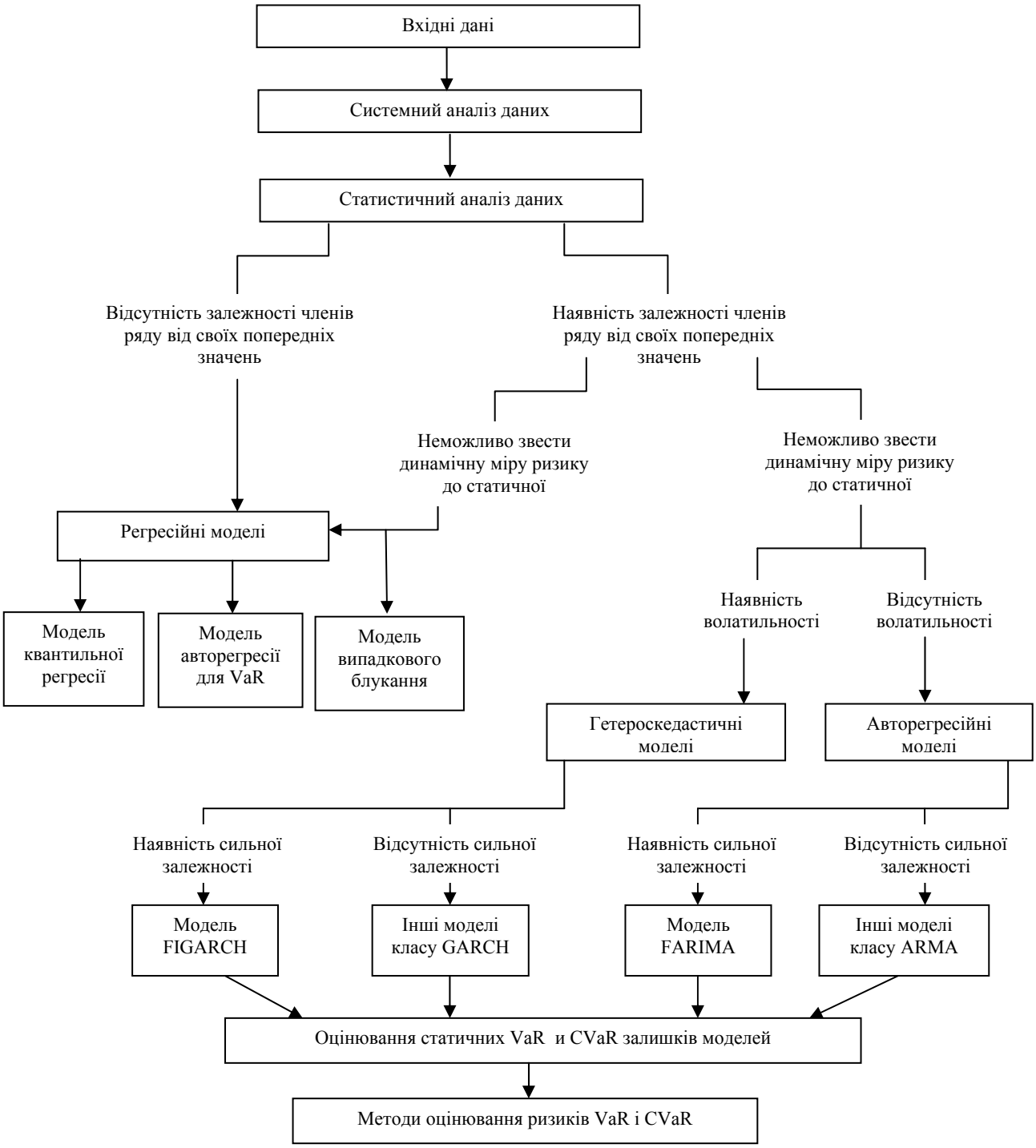


Рисунок 2.1 – Функціональна схема вибору методу аналізу ризиків

Сформульована система прийняття рішення (СПР) вибору методу оцінювання VaR і CVaR для часових рядів в залежності від особливостей досліджуваних даних і кінцевих цілей дослідження. Запропонований підхід зводить процес вибору методу оцінювання до виконання та аналізу результатів послідовності тестів. Проведена апробація вказаної процедури на штучно змодельованому ряді за моделлю GARCH з нормально розподіленими залишками ряду. Запропонована зручна в користуванні структурна схема системного підходу до вибору моделі оцінювання динамічних міри ризику CVaR.

Функція, яка задовольняє всім п'яти умовам називається *когерентною мірою ризику*.

У фізичних додатках необхідно звести до мінімуму ризик в експлуатаційних умовах. Введемо підмножину X множини L. Нехай П – непуста, компактна, замкнута та опукла. Тоді ми зацікавлені у вирішенні наступної проблеми:

$$\min\{\Gamma(X) \mid \text{overall } X \in \Pi\}. \tag{2.1}$$

Такий підхід дозволяє використовувати методи оцінки ризику факторів космосу для оцінювання можливих пошкоджень компонентів СП.

Нехай $z = f(v,u)$ – функція втрат СП, яка залежить від керуючого впливу v і випадкового вектора u. Вектор керування u належить до множини V, яка задовольняє певним вимогам. Будемо вважати, що випадковий вектор u має щільність ймовірності p(u). Тепер розглянемо функцію

$$\Phi_\alpha = (v,\zeta) = \zeta + (1-\alpha)^{-1} \int_{f(u,v)>\zeta} (f(v,u) - \zeta) p(u) du, \tag{2.2}$$

де α – CvaR рівень конфедіційності і величина ζ негативна.

Це дозволяє включати CVaR в обмеження і замінити їх за допомогою функції $\Phi_\alpha(v,\zeta)$. Наприклад, розглянемо задачу мінімізації середніх втрат $\mu(v) = \mathrm{E}(-f(v,u))$ при обмеженні $v \in V$ і двох CVaR обмеженнях з рівнями конфідиційності β і γ. Давайте розглянемо два CVaR рівні з константами C_β і C_γ. В цьому випадку оптимізаційна проблема може бути описана наступними рівняннями:

$$\min \mu(v) \tag{2.3}$$

$$v \in V, \Phi_\beta(x,\zeta) \le C_\beta, \Phi_\gamma(x,\eta) \le C_\gamma, \tag{2.4}$$

$$\zeta, \eta \ge 0. \tag{2.5}$$

Розв’язок цієї оптимізаційної проблеми може бути знайдений за допомогою пакету програм Optimization Toolbox системи Matlab.

2.2. Приклади мінімізації ризиків впливу космічної радіації на функціонування супутникових систем та приладів

Мінімізація ризиків для системи теплового захисту КА.

Описаний вище підхід дозволяє використати запропонований метод для оцінювання можливих пошкоджень компонентів системи теплового захисту. Функціональна модель аналізу ризику показана на рисунку 2.2.

Було досліджено вплив умов нагріву системи теплового захисту (СТЗ) на величину ризику. Вивчено також вплив формуючих матриць на рівномірність нагріву СТЗ. У першому варіанті панель, що складається з сот, верхньої та нижньої кришок, безпосередньо нагрівались. У другому випадку система теплового захисту підігрівалася формуючим пристроєм. Формуючий пристрій складався з лімітуючої втулки і масивних кришок (верхньої і нижньої), які повинні усунути перегрів елементів кутової панелі для перерозподілу потоку тепла від нагрівача до панелі теплового захисту. У цій роботі зварювання СТЗ і система підігріву аналізувалися за допомогою двох аналітичних та чисельних моделей. Зокрема, чисельна модель була реалізована за допомогою методу скінченних елементів. Теоретичні результати були зіставлені з експериментальними даними з точки зору різниці температур, що показує істотну надійність як аналітичних, так і чисельних моделей. Після перевірки моделі скінченних елементів, був проведений аналіз чутливості для дослідження впливу деяких змінних.

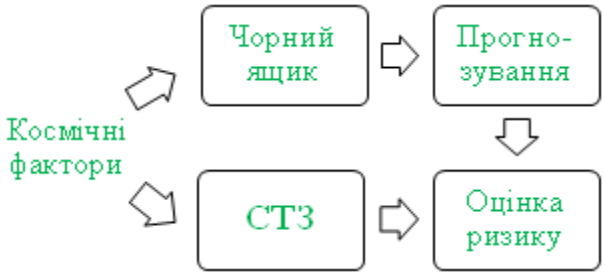


Рисунок 2.2 – Функціональна схема аналізу ризику для СТЗ

Мінімізація ризиків для накопичувачів енергії.

Згідно рис. 2.2 мінімізація ризику може бути досягнута за рахунок своєчасного прогнозування космічної погоди. Він дозволяє змінити режим функціонування накопичувача енергії за рахунок використання керуючого впливу. Отримано нові фундаментальні результати щодо динаміки космічної плазми та космічної погоди. Розроблено нові моделі прогнозування геомагнітних індексів (Dst, Kp та AE) на основі часових рядів щодо

параметрів сонячного вітру в околицях точки Лагранжа L1. Отримано також нові фундаментальні результати щодо динаміки космічної плазми; моделі прогнозування Dst і Kp індексів, методи ідентифікації та реконструкції динамічних моделей прогнозування геомагнітних індексів; метод оцінювання горизонту прогнозу геомагнітних індексів, який базується на локальних показниках Ляпунова.

Результати є новими в галузі створення нових типів накопичувачів енергії. Практична значимість полягає в можливості мінімізації ризику впливу факторів космічної погоди на супутникові прилади для космічних досліджень. Результати можуть бути використані при створенні нових приладів для космічних досліджень та рзробки вебсторінок.

Зменшення ризику може бути досягнуто за рахунок використання графену у суперконденаторах. При дії світла на матеріал, останній отримує можливість руху вперед. Відкриття було зроблено випадково під час дослідження графенових губок. Вони являли собою зім'яті шари графену, товщина яких рівна 1 атому вуглецю. Коли відбулось розірвання графенової губки за допомогою лазерного променю, науковці зрозуміли, що графен може рухатись під впливом світла. З'явилась теорія, згідно з якою матеріал можна буде використовувати як сонячний парусник. У фотонів світла є рушійна сила, яка передається у будь-який об'єкт, з яким фотони зіштовхуються. Експеримент з графеновими губками свідчить про те, що такої сили може бути достатньо для руху космічного апарату. Існує версія, згідно з якою графеном поглинається енергія лазерного променю і створюється заряд електронів. Коли рівень заряду стає максимальним, відбувається вивільнення зайвих електронів і розпочинається рух губки у протилежному напрямку. Вплив лазера призводить до утворення електричного імпульсу.

Вчені Колумбійського університету очікують створити з застосуванням графену космічний ліфт. Графен буде слугувати основою для виготовлення тросу, який буде сполучати орбітальну станцію та планету. Сама ідея була висунута ще наприкінці 19 століття, розробка деталей відбулась у 1960-х роках, а популярності набула наприкінці 1970-х. Графен є матеріалом, який може підійти для втілення космічного ліфту через свою міцність. Вчені вважають, що подорож у такому ліфті є дешевшою, ніж подорож ракетою.

В майбутньому графен буде застосовуватись для захисту космічних апаратів від мікрометеоритів. Дослідник Томас Едвін з Університету Райса прогнозує, що броньові властивості, які проявляє графен, можуть бути використані для захисту космічних супутників, кораблів, що робитимуть подорожі між планетами та міжнародної космічної станції.

У космосі дослідниками було виявлено декілька модифікацій вуглецю, серед яких була структура, що нагадувала форму графену на планеті Земля. Спостереження були

здійсненні з використанням інфрачервоного телескопу «Спітцер». За думкою астрономів Національної радіоастрономічної обсерваторії, молекули вуглецю були сформовані під впливом вітрів від старих зірок у планетарних туманностях.

Гібрид графена і нанотрубки — новий матеріал для суперконденсаторів

В даний час активно розробляються нові матеріали на основі гібриду графена і нанотрубки. На рис. 2.3. зображено кільця із семи атомів (позначено червоним) у місці переходу графену в нанотрубку створюють новий гібридний матеріал — безшовний провідник. Цей гібрид може бути найкращим можливим матеріалом для багатьох приладів збереження енергії та для електроніки.

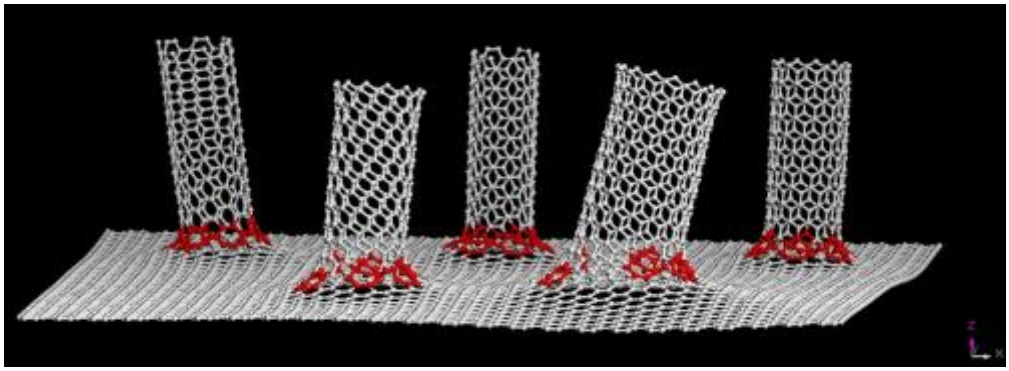


Рисунок 2.3 – Функціональна схема гібридного матеріалу

Безшовний гібрид нанотрубки і графену, може стати найкращим матеріалом для електродів для багатьох акумуляторів та приладів. Дослідники успішно створили ліси із вуглецевих нанотрубок, які швидко виростали з аркушів графену на висоту до 120 мікрон. В результаті ми маємо величезну площу поверхні, ключовий фактор для створення таких приладів, як суперконденсатори для зберігання енергії (рис. 2.3). Гібрид поєднує двомірний графен, тобто аркуш вуглецю товщиною в один атом, та нанотрубки у безшовну тривимірну структуру. Зв’язки між ними ковалентні, тобто сусідні атоми вуглецю обмінюються електронами у дуже надійній конфігурації. Нанотрубки не просто сидять на аркуші графену, вони стають його частиною.

Структури із нанотрубок, які виросли прямо із графену, можуть стати гібридним матеріалом із величезною площею поверхні, можливо, найкращим матеріалом для суперконденсаторів та інших електронних використань (рис. 2.4). Семичленні кільця у основі трубок (позначено червоним) роблять можливим безшовний перехід від графену до нанотрубки. У результаті ми маємо величезну площу поверхні, більше 2 000 квадратних метрів на грам матеріалу. Це величезна цифра.

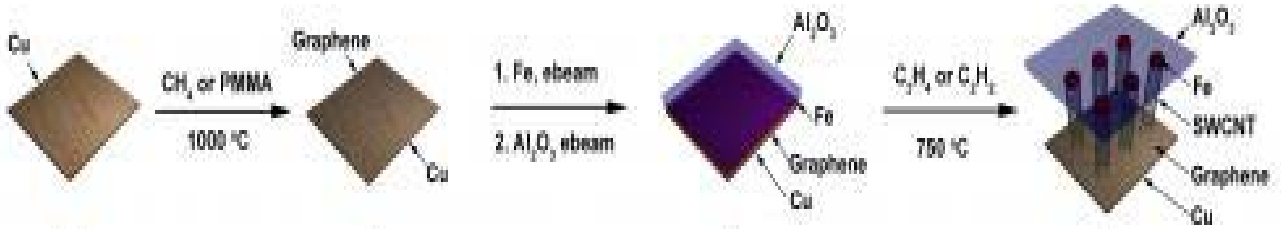


Рисунок 2.4 – Функціональна схема росту нанотрубок із графену

Гібридна природа матеріалу лежить у семичленних кільцях на стику між графеном і нанотрубкою: структурою, що була передбачена теорією для подібних матеріалів і сьогодні підтверджена зображеннями з електронного мікроскопу із субнанометричною резолюцією. Вуглець не має рівних собі у якості провідного матеріалу із тонкою і жорсткою структурою, особливо у формі графену та деяких типів нанотрубок. Поєднання двох видів дає величезний потенціал таким електронним компонентам, як суперконденсатори, оскільки завдяки масивній площі поверхні він може зберігати величезні обсяги енергії у невеличкому об’ємі.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Отримано нові результати щодо аналізу впливу радіаційного випромінювання на супутникові прилади та системи. Розроблено метод мінімізації впливу радіаційного випромінювання на супутникові прилади.

2. Проведено аналіз впливу факторів космічного середовища на систему теплового захисту космічних апаратів. Запропоновано нову концепцію моделювання системи TPS, яка грунтується на наступних моделях: синергетичних, фізичних та обчислювальних.

3. Розроблено новий чисельний алгоритм оцінювання впливу космічної радіації на функціонування гібридного накопичувача енергії на основі суперконденсаторів в умовах космосу на основі кількісної оцінки величину ризику. Вперше запропоновано алгоритм мінімізації впливу іонізуючої радіації з урахуванням динамічної моделі суперконденсатора на основі розв'язання задачі оптимізації з обмеженнями. Вона враховує як статистичні, так і динамічні характеристики комбінованого елемента живлення.

4. Запропоновано способи зменшення впливу космічного іонізуючого випромінювання на функціонування накопичувача енергії. Зокрема, показано на доцільність виробництва суперконденсаторів на основі графену, який робить їх ще на один крок ближче до можливості космічного застосування.

5. Розроблені нові технічні пропозиції щодо використання гібридних накопичувачів енергії в супутникових приладах для дослідження «космічної погоди». Планується підготовити новий проект в рамках програми Horizon 2020 щодо тестування приладів на супутниках «Мікросат» під час космічного польоту, який планується у 2018 році.

6. Проведено аналіз можливостей використання комбінованих накопичувачів енергії в енергосистемах України. Показано можливості їх використання у якості буферних систем електрохімічного генератора. Застосування в системі тягового електроприводу суперконденсатора дозволить застосовувати електрохімічний генератор зменшеної потужності в 1,5-2 рази. Показана можливість побудови інтелектуальної системи керування поновлюваним джерелом енергії для системи електропостачання.

7. Суперконденсатори, гібриди, а також комбіновані пристрої можуть бути використані в якості джерел енергії на мікросупутниках, на які суттєво впливає гама випромінення. При типових дозах опромінення погіршення характеристик комбінованих накопичувачів енергії не суттєві.

8. Підготовлено пропозиції щодо реалізації підсистеми керування експериментальним зразком гібридного накопичувача з врахуванням систем збору і обробки наукової інформації. Отримано попередні домовленості з вченими із США та Європи, щодо підготовки нового проекту в рамках програм «Горизонт 2020».

По результатам досліджень опубліковано одна стаття та підготовлено дві публікації. Представлено доповідь на 13 Європейській конференції з космічної погоди [4].

3 ВИЗНАЧЕННЯ ДІАПАЗОНУ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНЬОГО ВПЛИВУ ДЛЯ НОВОГО МЕТОДУ СПРЯМОВАНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ В КОСМОСІ

3.1 Вплив вібрації на морфологію фронту при спрямованому твердінні

Для створення нових технологій принципово важливою є побудова адекватної фізичної картини вібраційного впливу на розплав, що кристалізується. Складність цієї проблеми обумовлена тим, що доводиться вирішувати комплекс різнорідних завдань: гідродинамічну проблему руху розплаву з урахуванням гравітаційних і вібраційних сил, завдання тепломасопереносу в тривимірному зразку в поле температурного градієнта, а також завдання руху (а також стійкості) фазової границі. В останні роки різними авторами отриманий ряд важливих теоретичних і експериментальних результатів, що суттєво проясняють складну картину впливу вібрації на матеріал, що кристалізується [1-8].

У роботах Любимової зі співавторами [1-3] аналітичними методами встановлені особливості високочастотного вібраційного впливу на розподіл домішок і форму фронту кристалізації. Зокрема, показано, що аксіальні коливання в умовах мікрогравітації виявляють вплив аналогічний гравітаційної конвекції на Землі [1].

В експериментальних роботах [4-5] досліджувалися можливості введення в розплав різної форми робочих тіл, за допомогою яких розплав піддавався вібраційному впливу. При цьому отримані дані про істотне поліпшення структурно-чутливих властивостей кристалів в результаті формування змушеного перемішування розплаву.

Експерименти із твердіння в космічних умовах з металевими монокристалами [6, 7] показали складний характер впливу вібраційної конвекції на розподіл домішок перед фронтом. Зокрема, встановлено, що кристал виростає неоднорідним на макро- і мікрорівні, причому частоти розподілу неоднорідностей близькі до частот мікроприскорень [7].

Сильний модифікуючий вплив вібраційної конвекції на морфологію фронту пов'язан з роллю потоку розплаву перед фронтом і відповідною зміною температурного і концентраційного профілю перед зростаючим кристалом. У роботах [8-10] показано їх вплив на макроструктуру і морфологічну стійкість фронту. Так в [10] показано, що гравітаційна конвекція помітно знижує критичну швидкість втрати стійкості плоского фронту, а в [9] отримано загальну діаграму зменшення області стійкого росту при збільшенні швидкості потоку розплаву.

Подальший прогрес в розумінні фізичної картини росту кристала в розплаві при вібраційному впливі може бути досягнуто при спільному вивченні гідродинамічних процесів і процесів на фронті кристалізації. У даній роботі вплив вібрації вивчався в ході прямого

спостереження за еволюцією фронту кристалізації в прозорій речовині – сукцінонітрілі. Використовувалася експериментальна установка, яка забезпечувала безперервну фіксацію структури фазової границі; для вивчення тепломасопереносу в розплаві застосовували імітаційне моделювання, параметри якого відповідали експерименту. Ставилась задача вивчення морфології фронту при накладанні аксіальних вібрацій в земних умовах, а також прогнозування особливостей цього процесу в умовах мікрогравітації.

3.2 Методика прямого спостереження і результати експериментів

Досліджувалося накладання вібрацій вздовж вертикальної осі циліндричного зразка установки по вирощуванню кристалів за методом Бріджмена Схема експериментальної установки показана на рис 3.1. Розплавлювання зразка і кристалізація розплаву здійснювалось за допомогою градієнтного пристрою, який складається з нагрівача, холодильника і розташованого між ними теплоізоляційного шару. Зразок переміщався відносно градієнтного пристрої із заданою швидкістю v в діапазоні від 0.1–10 мкм/с). Температура нагрівача становила 80ºС, холодильника 15ºС, що забезпечувало постійний температурний градієнт 30 град/см

В експериментальній установці (ЕУ), показаній на рисунку 3.1, зразок являв собою скляний герметичний циліндр, заповнений сплавом сукцінонітріл–0.1 ваг.% ацетону. За методикою, описаної в роботі [11], одержували монокристал з орієнтацією <100>.

Фронт кристалізації спостерігали з торця циліндра через шар розплаву, а також через бокову стінку. Накладання вібрації в аксіальному напрямку забезпечувалося двома варіантами пристроїв, електронним (рис. 3.1) і механічним, вибір яких визначався зручністю одночасного спостереження за фронтом і реєстрації віброприскорень. У випадку нерухомого фронту кристалізації використовували електронний блок вібрації, який забезпечував відносні віброприскорення $\mathbf{g/g_0} = 0{,}4; 1{,}3; 1{,}6$ (5, 11, 19 Гц), де g_0 – прискорення вільного падіння.

В режимі протяжки (основний режим – 1,4 мкм/с) використовували механічний блок, який забезпечував $\mathbf{g/g_0} = 1{,}3$ (11 Гц). Крім того проводилися експерименти без вібрації при швидкостях вирощування 1,4, 2,8, 4,2, 5,6 і 7,0 мкм/с.

В режимі вирощування без вібрації спостерігали наступну еволюцію морфології: при постійній швидкості вирощування (1,4 мкм/с) протягом 120-160 хвилин спостерігався плоский фронт, потім протягом 80 хвилин – структура вузлів (нод), яка переходила в ніздрювату структуру. Така нестаціонарність пов'язана з накопиченням домішки перед фронтом в процесі вирощування, створенням умов втрати стійкості і розвитку нестійкої морфології [11, 12].

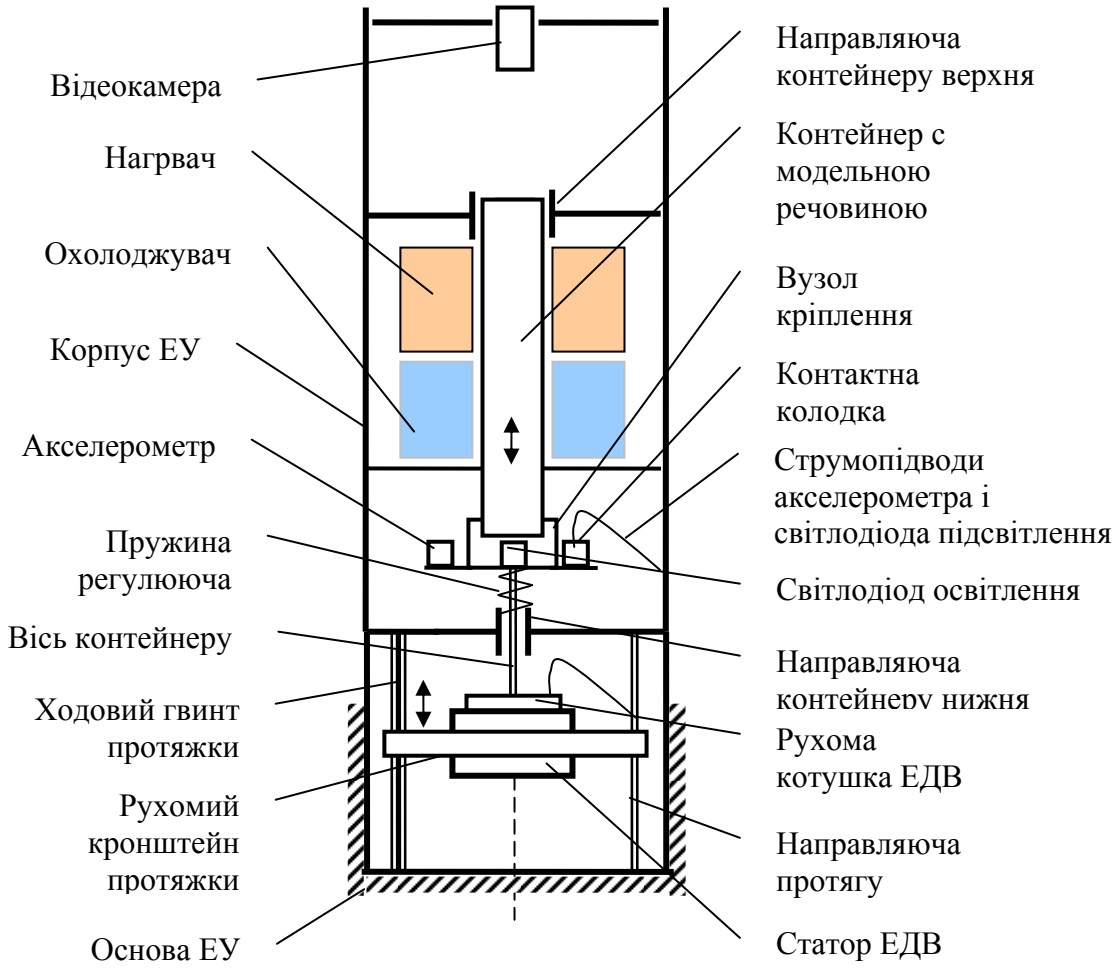
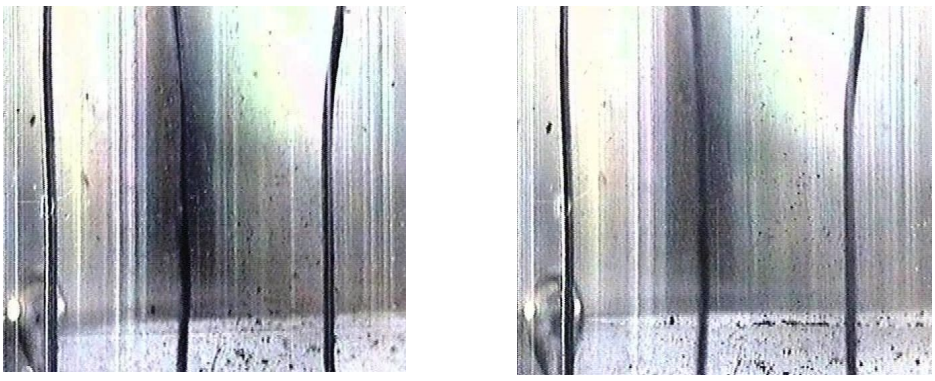
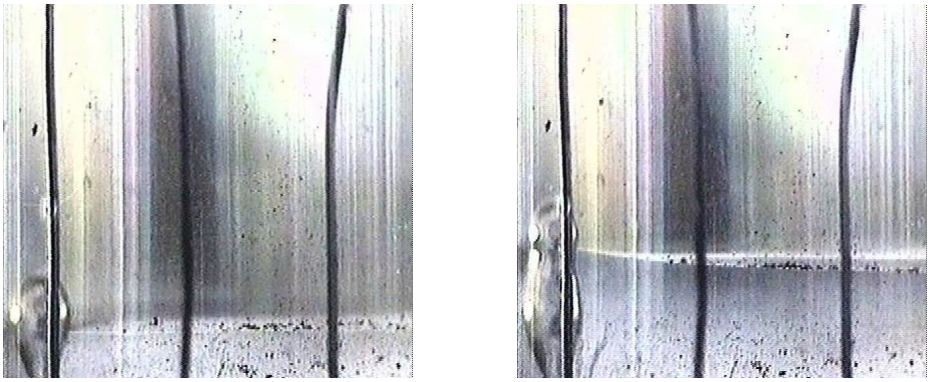


Рисунок 3.1 – Конструктивна схема експериментальної установки з вібратором

Еволюція фронту під впливом вібрації виявилася суттєво різною для різних інтенсивностей вібрацій. При нерухомому зразку і $\mathbf{g/g_0}$ = 0,4 (режим № 1, частота 5 Гц) спостерігалося просування плоского фронту без втрати стійкості. При цьому фронт викривлявся в області стінок, рис. 3.2. Зняття дії вібрації повертало фронт в початковий стан. При більшій інтенсивності вібрації (режим № 2, 3; $\mathbf{g/g_0}$ = 1,3; 1,6) відбувається вибухоподібне прискорення фронту, що супроводжується утворенням дрібних дендритів, рис. 3.3. Із часом структурні елементи збільшуються, кристалічна структура стає суцільною, а форма фронту близька до тієї, яка спостерігалася для режиму 1.

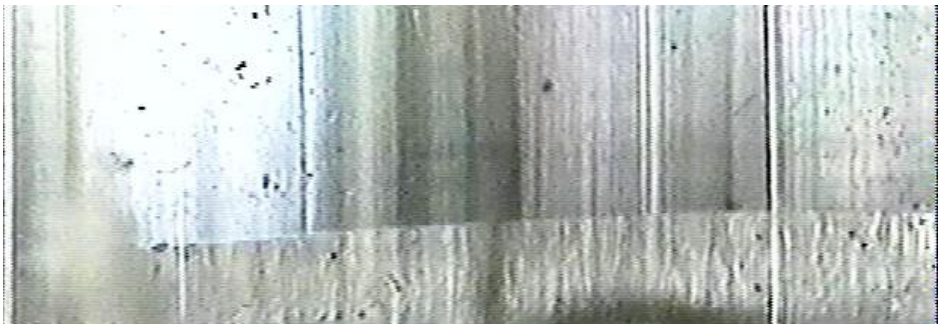


а б

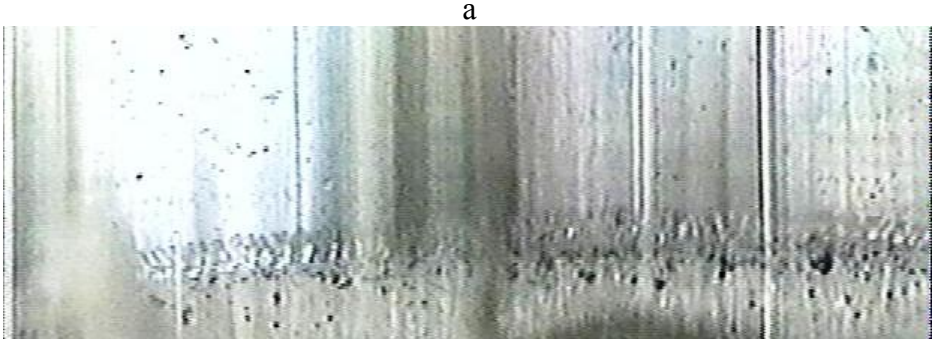


в г

Рисунок 3.2 – Вплив низькочастотної вібрації f = 5 Гц на відхилення фазової границі від рівноважного положення
а, в – положення фазової границі до вібраційного впливу; б, г – після вібраційного впливу; б – амплітуда вібрації 3 мм; г – амплітуда вібрації 6 мм



а



б

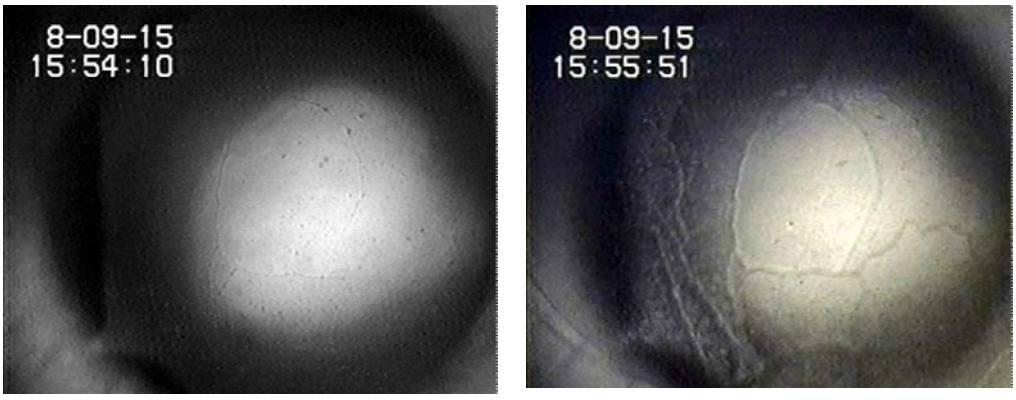
Рисунок 3.3 – Втрата стійкості границею розділу фаз при частоті вібраційного впливу 11 Гц
а – границя розділу фаз до вібраційного впливу; б – після вібраційного впливу

В серії експериментів вібраційний вплив ($\mathbf{g/g_0} = 1{,}3$) включали в процесі вирощування на кожному із згаданих етапів розвитку структури. На рис. 3.4 наведено форми фронту відразу після вимикання вібраційного впливу. Подальша витримка при знятті вібрацій призводить до повернення до вихідної структури фронту (нодам, коміркам або плоскому фронту). Експерименти показали пороговий характер вібраційного впливу: зазначений стрибок у розвитку нестійкої структури залишався якісно незмінним при різних часах вібраційного впливу від 30 с до 10 хвилин.

Ефект вібраційного впливу слабо залежить від положення зразка в робочому блоці по відношенню до нагрівача і холодильника. Ці досвіди проводилися в процесі вирощування та різному положенні зразка відносно ізотерми, яка відповідає рівноважній температурі.

Проводилися тестові експерименти в установці Бріджмена для квазидвумерних зразків [12] із застосуванням тих же частот і амплітуд. Тобто фронт кристалізації коливався відносно ізотерми в процесі просування, що досягалося відповідним настроюванням крокового двигуна. У цій геометрії експерименту впливу вібрації на морфологію фронту не виявлено.

Для виявлення нестаціонарних вторинних вихрів (отриманих у розрахунковому експерименті) у розплав сукцінонітрілу вводилися маркери – спори лікоподію, рух яких фіксувався відеокамерою. Маркери, що рухаються в розплаві, можна розділити на дві групи. В першій з них траєкторії руху часток відповідали циркуляції розплаву в глобальній вихровій течії. Друга група маркерів здійснювала коливальні рухи поблизу фронту кристалізації, що може свідчити про існування вторинних вихрів (передвіщених чисельним моделюванням, див. нижче). Спрощена експериментальна схема не дає можливості одержати кількісні дані про швидкості потоків, однак характер руху часток біля фронту якісно свідчить про нестаціонарний характер руху розплаву поблизу фронту і існуванні декількох контурів циркуляції поблизу фронту кристалізації.



а б

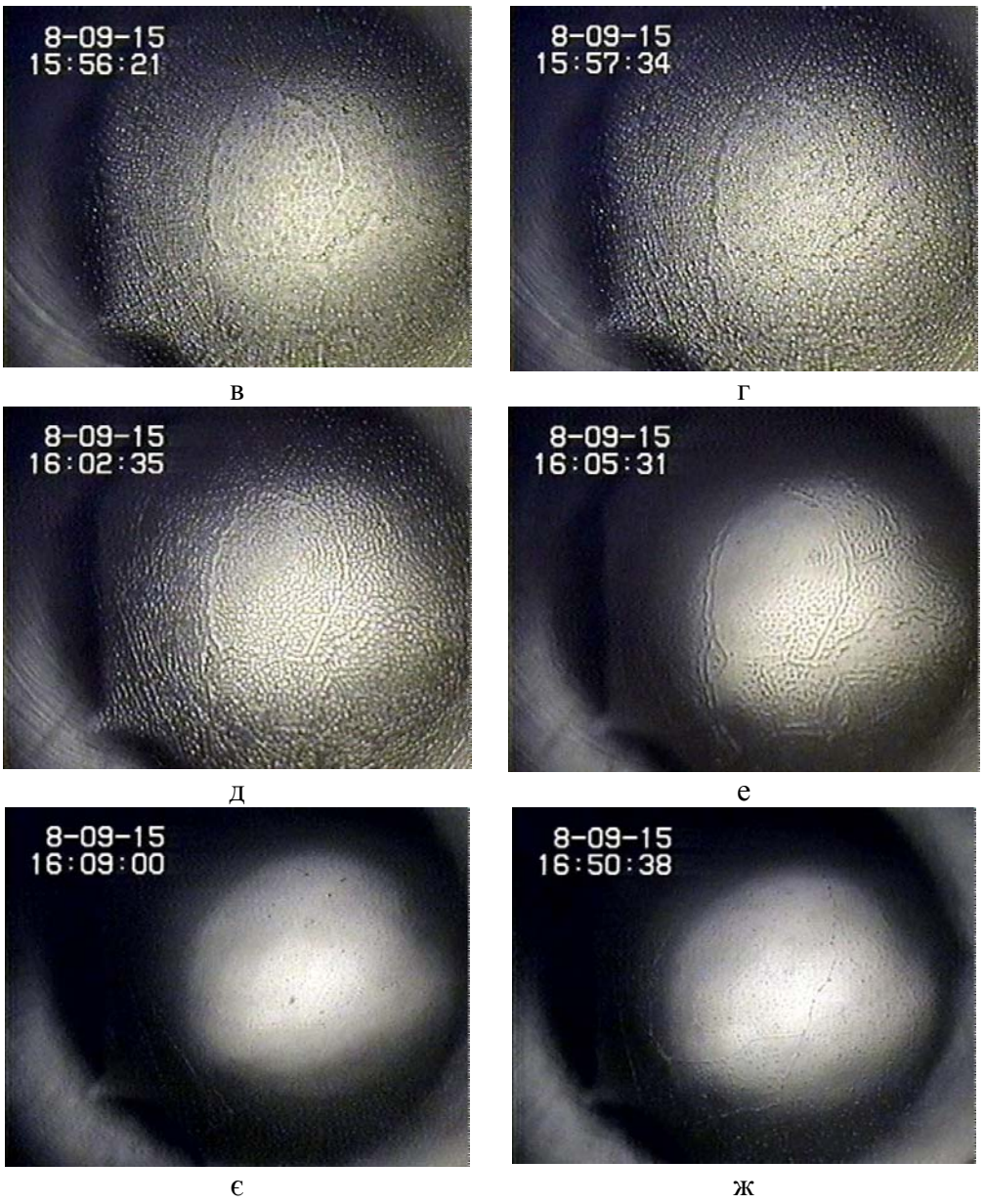


Рисунок 3.4 – Еволюція морфології границі розділу фаз кристал – розплав в монокристалі сукцинонітрилу, що вирощено зі швидкістю 1,4 мкм/с. Вплив низькочастотної вібрації здійснено на стадії існування плоскої фазової границі

Для напівкількісної оцінки впливу вібрації на параметри морфології фронту монокристали сукцінонітрілу вирощували з різними швидкостями протяжки 2,8 мкм/с, 4,2 мкм/с, 5,6 мкм/с і 7,0 мкм/с без вібрації. Порівняння дисперсності дендритів в цих експериментах і експериментах з вібрацією показало, що накладення вібрації ($\mathbf{g/g_0}$ = 1,3 (11 Гц)) призводить до такої дисперсності дендритів, яка відповідає швидкості вирощування 7,0 мкм/с. Тобто накладення вібрації відповідає збільшенню швидкості вирощування в 5 раз при незмінних інших умовах.

3.3 Математична модель гідродинаміки та теплообміну при вирощуванні кристалу методом Бріджмена

Математичний опис теплових і гідродинамічних процесів у препараті, що кристалізується, розглядалося в осесіметричному наближенні. Таке припущення є виправданим для градієнтного обладнання, використаного при вирощуванні кристалу. Спряжена (зв'язана) задача гідродинаміки і теплообміну базується на рівнянні конвективно-кондуктивного перенесення енергії завдання гідродинаміки і теплообміну базується на рівнянні конвективно-кондуктивного переносу енергії

$$c\rho\left(\frac{\partial T}{\partial t}+V_r\frac{\partial T}{\partial r}+V_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda(T)\ \frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right),\ r,z\subset\Omega \qquad (3.1)$$

і рівняннях гідродинаміки грузлої нестисливої рідини в наближенні Бусінеска

$$\frac{\partial V_r}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_r}{\partial \mathrm{r}}+V_z\frac{\partial V_r}{\partial \mathrm{z}}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r}+\nu\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\mathrm{r}\frac{\partial V_r}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2}-\frac{V_r}{r^2}\right),$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t}+V_r\frac{\partial V_z}{\partial \mathrm{r}}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial \mathrm{z}}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial \mathrm{z}}+\nu\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial V_z}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right)+F_z, \qquad (3.2)$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial z}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rV_r\right)=0.$$

Тут: $\{r,z\}$ – циліндричні координати, t – час, T – температура; c,ρ,λ – теплоємність, щільність і теплопровідність матеріалу, відповідно; $\vec{V}=\{V_r,V_z\}$ – вектор швидкості руху розплаву; P – тиск, ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $F_z=g\beta_T T$ – об'ємна щільність сили Архімеда, $g=g(t)$ – прискорення, β_T – коефіцієнт об'ємного розширення розплаву.

Рівняння (3.1) інтегрується в прямокутнику $\Omega_T=\{0<r<R,\ 0<z<L\}$, де R,L – відповідно зовнішній радіус ампули та її довжина. Область Ω_T включає розплав, заготовку, що плавиться, а також стінку ампули, теплоперенос вздовж якої враховується через високий коефіцієнт теплопровідності ампули (в порівнянні з теплопровідністю препарату). Розрахункова область $\Omega_V=\{0<r<R_в,\ 0<z<L\}$, в якій інтегруються рівняння (3.2), обмежується заготовкою, що плавиться, і розплавом. При цьому в частині області Ω_V, займаній твердою фазою, коефіцієнт кінематичної в'язкості покладається в 10^6 раз більшим, ніж у розплаві; це забезпечує в твердій фазі препарату, що кристалізується, швидкість рівну нулю.

Сформулюємо граничні умови. При $r = 0$ має місце симетрія температурного поля і поля швидкостей

$$\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=0} = 0, \quad \left.\frac{\partial V_z}{\partial r}\right|_{r=0} = 0, \; V_r\big|_{r=0} = 0. \tag{3.3}$$

На стінках ампули граничні для рівнянь (2) задаються в вигляді

$$V_z\big|_{z=0,L} = 0, V_r\big|_{r=R_a} = 0. \tag{3.4}$$

Передбачається, що теплообмін торцевих поверхонь ампули з навколишнім середовищем відсутній, тобто

$$\left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=0} = 0, \left.\frac{\partial T}{\partial z}\right|_{z=L} = 0. \tag{3.5}$$

На зовнішній стінці ампули задається умова теплообміну ампули з нагрівачем (холодильником) відповідно до закону Ньютона-Ріхмана

$$\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R} = \alpha(z)\left[T(R,z,t) - T_h(z,t)\right], \tag{3.6}$$

де $\alpha(z)$ – коефіцієнт теплопередачі між зовнішньою стінкою ампули і нагрівачем 5 (холодильником 8), $T_h(z,t)$ – температура нагрівача (холодильника). Коефіцієнт теплопередачі $\alpha = \frac{\lambda_г}{\delta}$ розраховувався як величина, обернена термічному опору газового зазору ($\lambda_г$ – коефіцієнт теплопровідності газового зазору, δ – його товщина); на границі контакту ампули з ізолятором α покладався рівним нулю. На фронті кристалізації вважаються виконаними умови ідеального теплового контакту між рідкої і твердої фазами (при швидкостях кристалізації 1…10 мкм/с виділенням схованою теплотою можна зневажити). В початковий момент часу задається початкове положення системи «нагрівач - ізолятор - холодильник» відносно ампули.

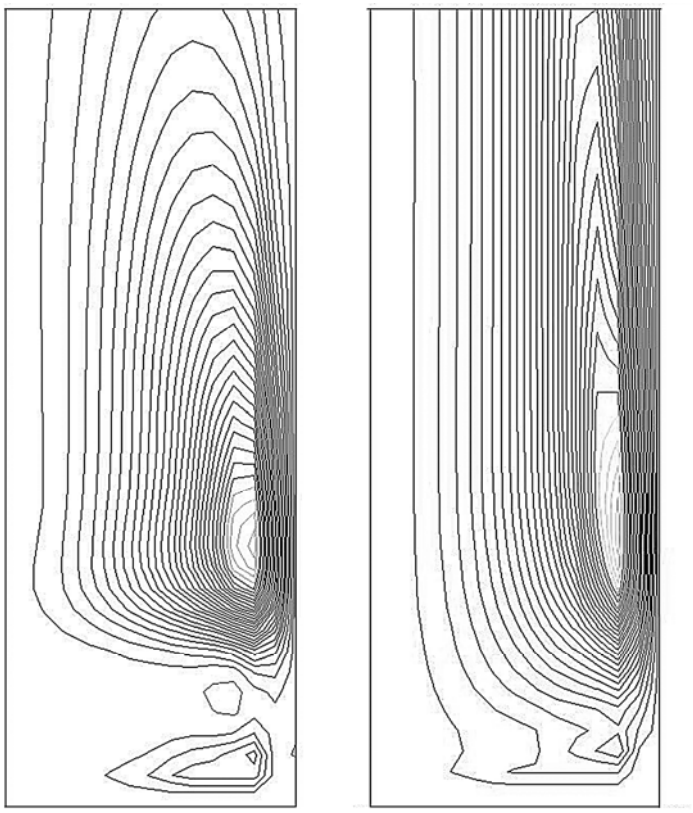
Прискорення $g = g(t)$ представимо в вигляді суми $g(t) = g_0 + g_v(t)$, де g_0 – фонове, $g_v(t)$ – вібраційне прискорення. Будемо вважати, що вібраційні коливання здійснюються вздовж осі кристала і є гармонійними, так що $g_v(t) = 4A\pi^2\omega^2 \sin 2\pi\omega t$, де ω – частота, A – амплітуда коливань.

Числові значення параметрів, що входять у математичний опис, вибиралися наступними: R = 7,5 мм, довжина нагрівача 100 мм, довжина ізолятора 10 мм, довжина холодильника 20 мм, температура нагрівача 85º С, температура холодильника 15º С.

Використовувалися значення термодинамічних і транспортних параметрів сукцінонітрілу з робіт [12].

Найбільший інтерес представляють потоки розплаву поблизу фронту кристалізації, тому що саме вони визначають стійкість росту кристала та його морфологію. На рис. 3.5а показані розрахункові лінії струму в розплаві до початку вібрації при земних умовах вирощування напрямок циркуляції вихрів схематично показане жирними стрілками. Під дією піднімальної сили в рідкій фазі утворюється глобальна вихрова течія: поблизу стінки розплав піднімається до верху ампули, в осьовій частині ампули формується низхідна течія, спрямована до фронту кристалізації. При гальмуванні потоку розплаву поблизу фронту кристалізації формуються нестійкі слабоінтенсивні вторинні вихри, які періодично руйнуються та виникають знову.

При накладанні вібрації із частотою 11 Гц ($\max|g_v| = 0{,}5g_0$) уже на першому вібраційному циклі вторинні вихри, що утворювалися до початку вібрації, руйнуються, і формується одноконтурна схема циркуляції розплаву, яка підтримується в процесі подальших циклів вібрації (рис. 3.4б). При цьому центр глобального вихру зміщається до стінки ампули, швидкості потоків в осьовій зоні суттєво слабшають.



а б

Рисунок 3.5 – Структура потоків розплаву при земних умовах вирощування кристала
а – без вибрации; б – с вибрацией при А = 1 мм, ω = 11 Гц

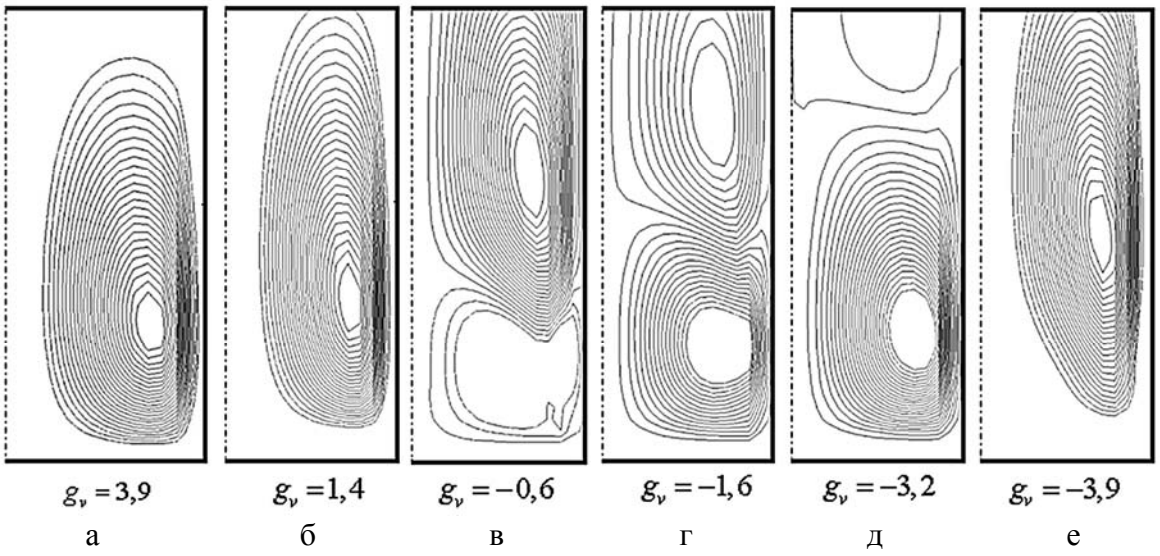


Рис. 3.6 – Ізолінії функції струму в різні моменти часу першого напівперіоду вібраційного циклу (величини вібраційного прискорення представлені в см /с^2)

Якісно інша картина виникає при накладанні вібрації у відсутності сили тяжіння ($g_0 = 0$). На рис. 3.6 представлені картини ліній струму в різні часи першого півперіоду вібраційного циклу при ω = 1 Гц, A = 1 мм. При зміні знаку віброприскорення в нижній частині розплаву зароджується вихор, що циркулює в напрямку, протилежному напрямку обертання глобального вихору, який існував до зміни знака віброприскорення. Новоутворений вихор поступово витісняє в верхню частину ампули початковий вихор до повного його зникнення. У другому напівперіоді вібраційного циклу формується аналогічна нестаціонарна течія рідкої фази, але з протилежним напрямком обертання новообразующегося вихора. Досить декілька десятків циклів вібрації, щоб встановилася подібна періодична структура течії розплаву. Описаний вплив вібрації на гідродинаміку розплаву можна трактувати як квазістаціонарну релей-тейлорівську нестійкість руху рідкої фази в умовах безперервного розподілу щільності розплаву в його об'ємі. Обчислювальним експериментом установлено, що подібні гідродинамічні осциляції розплаву підтримуються і при інших частотах вібрації в діапазоні до 20 Гц.

Обговорення результатів

Вплив гравітаційної конвекції на морфологію фронту в експериментальних умовах, описаних вище, чітко проявляється в специфіці макро- і мікроструктури фронту кристалізації. Так асиметрія нодної та ніздрюватої структури поперечних перерізів зразку, а також специфічне поглиблення в осьовій частині кристала спостерігається в металевих і

прозорих органічних кристалах. Крім того, течія розплаву вздовж фронту приводить до істотного зниження критичної швидкості втрати стійкості [1, 9].

Гравітаційна конвекція в розплаві виникає внаслідок радіального градієнту температури [13], який виявляється істотним у практично важливих випадках вирощування кристалів в земних умовах. У космосі ситуація суттєво інша: гравітаційної конвекції немає, однак виникає вібраційна складова, яка визначається нерегулярними мікроприскореннями в діапазоні частот до 15 Гц і амплітуд порядка 1 мкм.

Побудова повної фізичної картини течії розплаву під дією гравітаційної та вібраційної конвекції в широкому діапазоні параметрів представляється важким завданням. У даній роботі досліджувалися типові розміри зразків із прозорим модельним сплавом на основі сукцінонітрілу, які використовуються для наземних і космічних експериментів. Крім того, в завдання роботи входив пошук характерних режимів вібраційного впливу в тому діапазоні, який включає характерні для орбітальних умов значення. Частоти, що використовувалися, слід вважати високими, оскільки частота впливу набагато більше зворотних часів вгасання збурювань температури і швидкості.

Відносний внесок вібраційної і гравітаційної конвекції оцінюють, співставляючи відповідні числа Релея [1, 2]. В даній роботі використовували спрощений емпіричний критерій, оцінюючи експериментальний параметр $\mathbf{g}/\mathbf{g_0}$. При цьому розрахунки проводили для умов близьких до експериментальних. Про коректність співставлення експериментальних і розрахункових даних можуть свідчити виміри мінімального часу, протягом якого встановлюється нова структура фронту, яке виявилося, і порівнянним з характерним часом рахунку (менше 30 секунд).

Виявлені ефекти впливу аксіальної вібрації відносяться до різних масштабів впливу на структуру фронту. В макроскопічному масштабі відбувається зміна форми глобального вихору, яке відображається на експериментально виявленій формі фронту. Крім того, відбувається зникнення осциліручих вторинних вихрів поблизу фронту кристалізації. Розрахункові та експериментальні дані, як видно, підтверджують висновок про те, що аксіальна вібрація підсилює дію гравітаційної конвекції. Причому при певних параметрах примусова вібрація може регулювати гідродинамічні потоки в розплаві.

В умовах мікрогравітації, коли вібраційна конвекція стає визначальною, виявлений ефект дестабілізації глобального потоку внаслідок виникнення нестійкості типу Релея–Тейлора. Це накладає серйозні обмеження на застосування методу Бріджмена в космічних умовах.

Несподівано сильним виявився вплив вібраційної конвекції на мікроструктуру фронту. При певних значеннях вібраційного впливу спостерігались вибухоподібна втрата

стійкості та утворення дисперсних дендритів, що відповідало збільшенню швидкості протяжки при відсутності вібрації (і, відповідно, рушійної сили кристалізації) в 5 раз. Причому такий ефект відповідає $\mathbf{g / g_0} > 1$, тоді як при оберненому знаку нерівності відбувається просування неспотвореного фронту. Раніше аналітичними методами показано, що вібрація призводить до істотного зниження критичної швидкості втрати стійкості плоского фронту [1]. Отримані дані підтверджують цей висновок, а також передбачення того, що рух розплаву перед фронтом суттєво звужує область стійкого фронту кристалізації [9]. По всій видимості цей ефект ще більш виражений в умовах мікрогравітації, коли вібраційна конвекція стає визначальною.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Розрахунковий експеримент показує, що при використанні схеми Бріджмена аксіальний вібраційний вплив на циліндричний зразок призводить до істотної зміни структури потоків поблизу фронту кристалізації, особливості яких визначаються співвідношенням амплітуд віброприскорення та прискорення сили ваги. При $|g_v| < g_0$ (земні умови) спостерігається придушення нестаціонарних вихрів, а при оберненому знаку нерівності (умови мікрогравітації) розвивається релей-тейлерівська нестійкість течії розплаву.

2. Натурні та розрахункові експерименти свідчать про формування потоку розплаву вздовж поверхні фронту при накладанні аксіальних вібрацій, причому його виникнення має граничний характер, а час формування слабо залежить від частоти коливань в області частот до 20 Гц.

3. Виникаючий внаслідок аксіальної вібрації зразка потік сприяє втраті стійкості плоского фронту та виникненню нестійких структурних елементів, комірок і дендритів. Зняття вібрацій призводить до повернення до вихідної структури фронту. Оцінки за експериментально отриманими дендритними параметрами свідчать, що накладання вібрації ($\mathbf{g}/\mathbf{g_0}$ = 1,3 (11 Гц)) еквівалентно збільшенню швидкості протяжки в 5 раз.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

До Розділу 1

1. Vetoshko P.M., Valeiko V.V., Nikitin P.I. Epitaxial yttrium iron garnet film as an active medium of an even-harmonic magnetic field transducer // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – **106**, No. 1-3. – P. 270–273.

2. Koch R.H., Rozen J.R. Low-noise flux-gate magnetic-field sensors using ring- and rod-core geometries // Applyied physics letters. – 2001. – **73**, No. 13. – P. 1897-1899.

3. Ioan C., Tibu M, Chiriac H. Magnetic noise measurement for Vacquier type fluxgate sensor with double excitation // J. of Optoelectronics and Advanced Materials. – 2004. – **6**, No. 2. – P. 705-708.

4. Sasada I., Kashima H. Simple Design for Orthogonal Fluxgate Magnetometer in Fundamental Mode // J. of the Magnetics Society of Japan. – 2009. – **33**, No. 2. – P. 43-45.

5. Paperno E. Suppression of magnetic noise in the fundamental-mode orthogonal fluxgate // Sensors and Actuators A: Physical. – 2005. – **116**, No. 3. – P. 405-409.

6. Koch R.H., Deak J.G., Grinstein G. Fundamental limits to magnetic field sensitivity of flux-gate magnetic-field sensors // Applied Physics Letters. – 1999. – **75**, No. 24. – P. 3862-3864.

7. Merayo J.M.G., Brauer P., Primdahl F. Triaxial fluxgate gradiometer of high stability and linearity // Sensors and Actuators A: Physical. – 2005. – **120**, No. 1. – P. 71-77.

8. Nielsen O.V., Petersen J.R., Primdahl F., Brauer P., Hernando B., Fernandez A., Merayo J.M.G., Ripka P. Development, construction and analysis of the «Oersted» fluxgate magnetometer // Measurement Science and Technology. – 1995. – **6**, No. 8. – P. 1099.

9. Носенко В.К. Аморфні та нанокристалічні сплави для приладобудування і енергоефективних технологій // Вісник НАН України. – 2015. –No. 4 – P. 68-79.

10. Ciofi C., Gianatti R., Dattilo V., and Neri B. Ultra Low Noise Current Sources / IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference,Ottawa, Canada,1997, May, 19-21.

11. Scandurra G., Cannata G., Giusi G., and Ciofi C. Programmable, very low noise current source // Review of Scientific Instruments. – 2014. – **85**, No. 12. – P. 125109.

12. Costa T., Piedade M.S., and Santos M. An ultra-low noise current source for magnetoresistive biosensors biasing / IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS), 2012.

13. Fleddermann R., Trobs M., Steier F., Heinzel G., and Danzmann K. Intrinsic Noise and Temperature Coefficients of Selected Voltage References // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009. – **58**, No. 6. – P. 2002-2007.

14. Halloin H., Prat P., Brossard J. Long term characterisation of electronic components, / APC - Université Paris Diderot, 10 rue Alice Domon et Léonie Duquet, Paris, May 18-23, 2014, http://www.phys.ufl.edu/lisasymposiumx/resources/contributions/posters/Halloin.pdf

15. Linear Technology Corporation, LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference, Rev. E, http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1000afe.pdf, ресурс доступний на 2016.06.07.

16. Harrison L.T. Current sources & voltage references, 2009.

17. Rax B.G., Lee C.I., Johnston A.H. Degradation of precision reference devices in space environments, IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – **44**, No. 6. – P. 1939-1944.

18. Analog Devices, Inc., 1 ppm 20-Bit, ± 1 LSB INL, Voltage Output DAC AD5791, Rev. D, http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5791.pdf, ресурс доступний на 2016.07.16.

19. Texas Instruments Incorporated, OPA2188 0.03-μV/°C Drift, Low-Noise, Rail-to-Rail Output, 36-V, Zero-Drift Operational Amplifiers, Rev. June 2016. http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa2188.pdf, ресурс доступний на 2016.06.07.

20. Tsividis Y.P. Accurate analysis of temperature effects in Ic-Vbe characteristics with application to bandgap reference sources // IEEE Journal of Solid-State Circuits. – 1980. – **15**, No. 6. – P. 1076-1084.

21. Vishay Precision Group, Inc., VSMP Series (0603, 0805, 1206, 1506, 2010, 2512) (Z Foil) Ultra High Precision Foil Wraparound Surface Mount Chip Resistor., Rev. 25-July-2016, http://www.vishaypg.com/docs/63060/VSMP.pdf, ресурс доступний на 2016.09.05.

22. Analog Devices, Inc., 2-Terminal IC Temperature Transducer AD590, Rev. G, http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD590.pdf, ресурс доступ–ний на 2016.11.09.

23. Vishay Precision Group, Inc., DSMZ (Z foil). Ultra High Precision Bulk Metal® Z-Foil Surface Mount VoltageDivider, TCR Tracking of < 0.1 ppm/°C, PCR of ± 5 ppmat Rated Power and Stability of ± 0.005 % (50 ppm), Revision 2015.03.04, http://www.vishaypg.com/docs/63121/dsmz.pdf, ресурс доступний на 2016.11.09.

24. Alpha Electronis Corporation, Ultra Precision Resistor (Transfer Molded). MA, MB, MC, MD Series, Rev. 2016.04.25, http://www.alpha-elec.co.jp/w2img/2016071918410867002-MA-MB-MC-MD(E)_final_25Apr2016.pdf, ресурс доступний на 2016.11.09.

25. Веб-ресурс «Demeter Data Server». Режим доступу: http: //demeter.cnrs-orleans.fr

26. Simões, F.A., Pfaff R.F., and Freudenreich H.T. (2011), Satellite observations of Schumann resonances in the Earth's ionosphere, Geophys. Res. Lett., 38, L22101, doi:10.1029/2011GL049668.

27. Dudkin F., Korepanov V., Dudkin D., Pilipenko V., Pronenko V., and Klimov S. (2015), Electric field of the power terrestrial sources observed by microsatellite Chibis-M in the Earth's ionosphere in frequency range 1-60 Hz, Geophys. Res. Lett., 42, doi:10.1002/2015GL064595.

28 Boitier d'Analyse Numerique et de Traitement) Parrot et al., 2006, doi:10.1016/j.pss.2005.10.015.

29. https://public.ccsds.org/default.aspx

30. http://public.ccsds.org/publications/archive/102x0b5s.pdf

31. RECOMMENDATION FOR SPACE. DATA SYSTEM STANDARDS. PACKET TELEMETRY. CCSDS 102.0-B-5. Consultative Committee for Space Data Systems BLUE BOOK. November 2000.

32. Космический проект «Ионосат-Микро»: монография / Под общ. ред. С.А. Засухи, О.П. Фёдорова. – К.: Академпериодика.– 2013. – 218 с.

33. RECOMMENDATION FOR SPACE DATA SYSTEM STANDARDS TELEMETRY CHANNEL CODING CCSDS 101.0- B-6 Consultative Committee for Space Data Systems BLUE BOOK October 2002.

34. http://public.ccsds.org/publications/archive/131x0b2ec1.pdf.

35. http://public.ccsds.org/publications/archive/130x1g2.pdf.

36. Perlman M. and Lee J.J. Reed-Solomon Encoders—Conventional vs. Berlekamp's Architecture. JPL Publication 82-71. Pasadena, California: Jet Propulsion Laboratory, December 1, 1982.

37. McEliece R.J. The Decoding of Reed-Solomon Codes. TDA Progress Report 42-95, July-September 1988 (November 15, 1988): 153-157.

До Розділу 2

1. Martysh E.V., Yatsenko V.O., Pidgorodetska L.V. Spacecrafts intelligence docking system with active in fraredmarkers / XVI Українська конференція з космічних досліджень, 24-28 серпня 2016, Одеса. – С . 134

2. Yatsenko V., Girenko A., Husarova I., Falchenko Yu., Silvestroni L. Superlight-weight termal protection systems for space applications: conception, methods, and applications / 6th European Conference for Aeronautic and Space Sciences (EUCAS 2015), Book Abstracts, 29 June- 3 July 2015, Krakow, Poland.

3. Chermnikh O., Balikhin M., Walker S., Yatsenko V.A. Prediction of geospace radition environment and solar wind parameters: modeling, identification and risk analysis / XVI Українська конференція з космічних досліджень, 24-28 серпня 2016, Одеса. – С. 15.

4. Yatsenko V. Space weather prediction using robust dynamical models: identification, optimization, and risk analysis. – 13th European Space Weather Week, November 14-17, 2016, Oostende, Belgium. – C. 141.

5. Yatsenko V. Space Weather Influence on Power Systems: Prediction, Risk Analysis, and Modeling. Geophysical Research Abstracts Vol. 18, EGU General Assembly, 2016. – P. 6145.

6. Yatsenko V. The influence of the free space environment on the superlight-weight thermal protection system: conception, methods, and risk analysis. – Automatic Welding, Paton Publishing House. – 2017. – P. 11 (in print).

7. Maini A.K., Agraval V. Satellite technology: principles and application. – John Wiley&Song Ltd. The Atrium. Southern Gate, Chichester, WestSussex, England. – 2007. – 560 p.

8. Hadjipaschalis I., Poullikkas A., Efthimiou V. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – 13. – P.1513–1522.

9. Conway B.E. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications. – Springer, 1999. – 736 p.

10. Desprez P., Barrailh G., Moreau L., et al. Ultracapacitors: a power bufferin satellites // SpacePower, Proceedings of the Sixth European Conference. Portugal. European SpaceAgency, ESA SP-502. – 2002. – P. 23-26.

11. Shojah-Ardalan S., Wilkins R., Machado H., et al. Susceptibility of ultracapacitors to proton and gamma irradiation // Workshop Recordofthe 2003 IEEE Radiation Effects Data Workshop. – 2003. – P. 89-91.

12. Daglis I.A. Effects of space weathe rontechnology in frastructure. – NATO Science Series. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 2005. – 334 p.

13. Maletin Y.A., Stryzhakova N.G., Zelinskyi S.O., etal. Key Factors Influencing the Supercapacito rLifetime / Proc. 19th Intern. Seminar on Double Layer Capacitor and Hybrid EnergyStorage Devices, Deerfield Beach, Florida, Dec. 2009 – P. 111-114.

14. Maletin Y.A., Stryzhakova N.G., Zelinskyi S.O., Gozhenko O.V., et al. Ultracapacitors as the Key to Efficient Power Solutions / Proc. 6th Intern. Symp. on Large Ultracapacitor Technology and Application, AABC Conference, Orlando, FL, May, 2010. – P. 121-126.

15. Maletin Y.A., Stryzhakova N.G., Zelinskyi S.O., Gromadskyi D.G., Rozhenko A.B. Electrolyte Mobility in the Electrode Nanopores – a Way to Reduce the EDLC Inner Resistance / Proc. 20th Intern. Seminar on Double Layer Capacitor and Hybrid Energy Storage Devices, Deerfield Beach, Florida, Dec. 2010. – P. 180-185.

16. Hromadskyi D.H., Fateev Y.F., Stryzhakova N.H., Maletin Y.A. Anodic processes on Aluminuminaprotic electrolytes based on tetraethylammonium tetrafruoroborates altina cetonitrile // Materials Science. – 2010. – No. 46. – P. 412-417.

17. Малетин Ю.А., Стрижакова Н.Г., Зелинский С.А., Тычина С.А., Дробный В.М. и др. Радиационная восприимчивость суперконденсаторов и перспективы их космического применения // Космічна наука і технологія. – 2013. – **19**, № 3. – С. 47-60.

18. Федоров О.П., Яценко В.А. Моделирование и оптимизация характеристик ультра-конденсаторов: наноматериалы, динамические модели и анализ риска / 4-я Международная конференция «Наноразмерные системы: строение, свойства, технологи», Киев, 19-22 ноября 2013.– С. 541.

19. Малетин Ю., Стрижакова Н., Зелінський С., Гоженко О., Клименко Ю., Яценко В. Суперконденсатори як джерела енергії для мікросупутників // 14-а Українська конференція з космічних досліджень, Ужгород, 8-12 вересня 2014. – С. 123.

20. Яценко В.О., Клименко Ю.О., Кочкодан О.О., Малетин Ю.А., Зелінський С.О. Моделювання та оптимізація комбінованих накопичувачів енергії з урахуванням надійності, впливу температури та радіаційного випромінювання // Космічна наука і технологія. – 2015. – **21**, № 2. – С. 36-39.

21. Yatsenko V. Optical laser systems for small satellites based on supercapacitors // 7th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers Caol*2016, Odessa, September 12-15, 2016. – P. 56.

22. Yatsenko V. Modeling and optimization of hybrid supercapacitor energy system // 3rd International Conference on Energy, Sustainability and Climate Change ESCC 2016, Athens, Greece, July 10-16, 2016. – P. 72.

До Розділу 3

1. Yu W.C., Chen Z.B., Hsu W.T. et al. Reversing radial segregation and suppressing morphological instability during Bridgman crystal growth by angular vibration // J. Cryst. Growth. – 2004. – **271**, No. 3-4. – P. 474-480.

2. Lan C.-W., Lyubimov D., Lyubimova T.P. et al. // Fluid Dynamics. – 2008. – **43**, No. 4. – P. 514-523.

3. Lyubimov D.V., Lyubimova T.P., Tcherepanov A.A. et al. Vibration Influence on Morphological Instability of a Solidification Front // Intern. J. Microgravity Res. and Appl. – 2005. – **16**, No. 1. – P. 290-294.

4. Fedyushkin A., Bourago N., Polezhatv V., Zharikov E. The influence of vibration on hydrodynamics and heat-mass transfer during crystal growth // J. Cryst. Growth. – 2005. – 275, No. 1–2. – P. e1557-e1563.

5. Жариков Е.В., Аветисов И.Х., Скоренко А.В. и др. Подготовка космического эксперимента по выращиванию кристаллов методом направленной кристаллизации в условиях вибрационного воздействия на Российском сегменте Международной космической станции // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2001. – № 9. – С. 56-62.

6. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Влияние условий микрогравитации на однородность кристаллов полупроводников, выращенных на космических аппаратах методами направленной кристаллизации. Итоги и перспективы исследований в ИМЕТ РАН // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2001. – № 9. – С. 41-47.

7. Земсков В.С., Раухман М.Р., Шалимов В.П. Итоги экспериментов ИМЕТ РАН по выращиванию монокристаллов в условиях полетов космических аппаратов. ИМЕТ РАН. 75 лет. – М.: Наука, 2013. – С. 383-407.

8. Fedoseyev A.I., J. Iwan D Alexander. Investigation of vibrational control of convective flows in Bridgeman melt growth configurations // J. Cryst. Growth. – 2000. – **211**, No. 1-2. – P. 34-42.

9. Федоров О.П., Машковский А.Г. Влияние потока расплава на устойчивость фазовой границы при направленном затвердевании // Кристаллография. – 2015. – **60**, № 2. – С. 260-269.

10. Buhler L., Davis S.H. Flow-induced changes of the morphological stability in directional solidification: localized morphologies // J.Cryst. Growth. – 1998. – **186**, No.4. – P. 629-647.

11. Федоров О.П. Процессы роста кристаллов: кинетика, формообразование, неоднородности. – Киев: Наук. думка. – 2010. – 207 с.

12. Федоров О.П., Демченко В.Ф., Шуба И.В., Лесной А.Б. Влияние гравитационной и вибрационной конвекции на тепломассоперенос в расплаве при выращивании кристаллов методами Бриджмена и плавающей зоны // Физика и химия обработки материалов. – 2015. – № 6. – С. 85-93.

13. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М.: Наука. – 1972. – 296 с.