

УДК 550.38

Хвильовий плазмовий експеримент в проєкті «Марс-96»

В. Є. Корепанов¹, С. І. Климов², В. Г. Тарасов¹, О. О. Червінка³

¹ Львівський центр Інституту космічних досліджень НАНУ—ІКАУ

² Інститут космічних досліджень РАН, Москва

³ Фізико-механічний інститут НАН України, Львів

Надійшла до редакції 04.04.96

Наведено короткий опис проєкту «Марс-96» та завдань, які вирішуватиме хвильовий плазмовий комплекс ELISMA, до складу якого входить створений в Україні багатоканальний аналізатор ультранизькочастотних хвиль у плазмі — ULFW. Широкі можливості багатокомпонентного аналізу електромагнітних полів забезпечуються спеціальною структурою приладу, що включає високо-стабільні фільтри ультранизьких частот з ідентичними фазо-частотними характеристиками та підсилювачами з керованими коефіцієнтами підсилення, спеціальні пристрої вибору-зберігання даних та комплекс алгоритмів відбору й відновлення первинної інформації. Описані методика та результати наземних випробувань блоку ULFW у складі комплексу ELISMA, що проведені в умовах, наближених до відкритого космосу.

Якщо ніщо не завадить, то 16 листопада 1996 року ракета-носіє «Протон» відправить з космодрому Байконур космічний апарат «Марс-96». Більше 20 країн, у тому числі й Україна, брали участь у підготовці цього проєкту. Космічний апарат (КА) складається з орбітальної станції, що обертатиметься навколо Марса, та чотирьох апаратів, що опустяться на поверхню планети: двох малих станцій та двох пенетраторів. Загальна маса КА — біля 6700 кілограмів, з них біля 3000 кілограмів є паливе, а наукова апаратура важить 550 кг.

Приблизно через 300 діб після старту КА має досягти Марса, й 10 вересня 1997 р. орбітальна станція перейде на еліптичну орбіту з періодом 43 год, апоцентром $A = 296\ 62.6$ км, перицентром $P = 300$ км. У випадку успішного виконання основної програми місії планується через деякий час перевести орбітальну станцію на низьку кругову орбіту з періодом всього 8 год. За декілька днів до 10 вересня буде відокремлено дві малі станції по 75 кг кожна, що будуть м'яко посаджені на поверхню; пенетратори при посадці повинні увійти у ґрунт Марса на глибину до 6 метрів.

* * *

Головною метою проєкту «Марс-96» є дослідження поверхні та атмосфери планети Марс. Це буде проводитися за допомогою наукової апаратури, що включає 12 приладів для вивчення поверхні і атмосфери, 6 — для вимірів параметрів плазми

оточуючого середовища і сонячного вітру, 4 — для астрофізичних досліджень. На відміну від амери-канських експериментів у галузі вивчення Марса, метою яких ніколи не було дослідження плазмового оточення, ці шість приладів на борту орбітальної

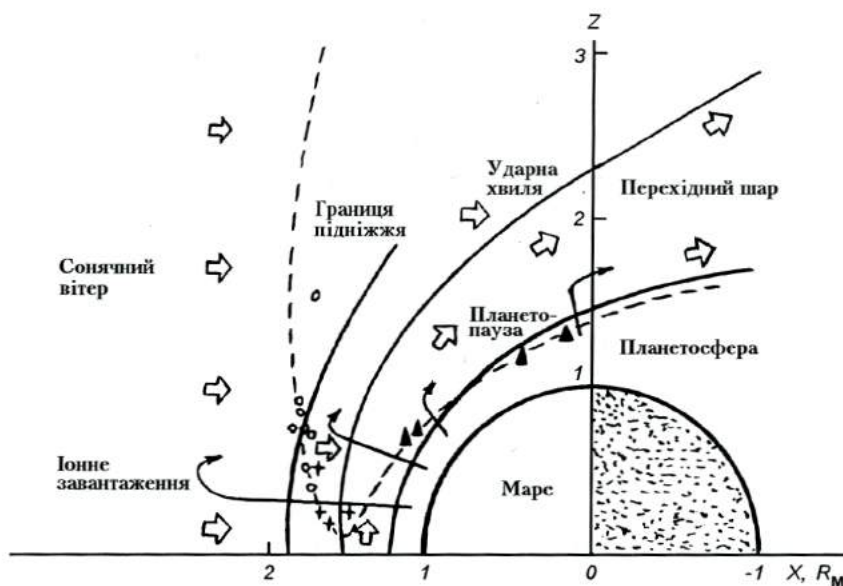


Рис. 1. Структура плазмового оточення Марса

станції будуть досліджувати склад плазми, енергії електронів та іонів і напрямки їх рухів, параметри електромагнітних полів, а також плазмові хвилі. Саме електромагнітні поля й хвилі є основним об'єктом досліджень експерименту ELISMA, до складу апаратурного забезпечення якого входить аналізатор ультранизькочастотних коливань ULFW, розроблений та виготовлений в Україні.

Експеримент ELISMA є розширеним продовженням досліджень магнітних полів, розпочатих у рамках проекту «Фобос», реалізованого у 1988 р. Незважаючи на втрату КА «Фобос-1» та «Фобос-2» на кінцевій стадії проекту, на прольотному відрізку траєкторії та протягом перших витків навколо планети перед втратою зв'язку було отримано важливі наукові дані (Бреус и др., 1991; Долгинов, 1991, 1992; Стяжкін и др., 1993; 1994). На рис. 1 наведено опосередковане зображення оточення Марса, побудоване на підставі експериментальних результатів, отриманих протягом перших чотирьох витків. Відстань подана в радіусах Марса ($R_M = 3393$ км), вісь X направлена на Сонце. На цьому рисунку показано положення головних плазмових границь: підніжжя ударної хвилі, власне ударної хвилі, планетопаузи, траєкторії надтеплових або прискорених важких іонів, що витікають з іоносфери Марса і поступово навантажують сонячний вітер. Пунктирною лінією нанесена проекція першої орбіти, три останні дуже подібні.

Як відомо, ще досі не вирішене питання про існування власного магнітного поля Марса, що не

дозволяє визначити тип плазмової структури навколо цієї планети — земний, де основну роль у створенні плазмових границь відіграє власне магнітне поле, чи венеріанський, де границі утворюються за рахунок індукованого поля, що виникає при взаємодії планетарної оболонки з сонячним вітром. Попередні результати свідчать, що у випад-

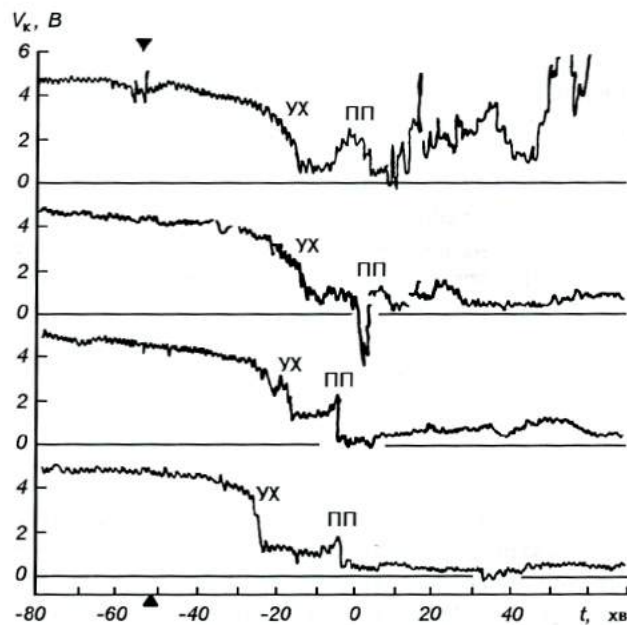


Рис. 2. Плаваючий потенціал КА

ку Марса мова йде про проміжний стан, у якому як плазма, так і магнітне поле грають суттєву роль у балансі тиску на поверхні, що утворює перешкоду сонячному вітрові.

Так, під час проведення експерименту «Фобос» розташування таких границь було достатньо чітко визначене. Ефективним індикатором варіацій концентрації в плазмі виявився власний потенціал КА, що є обернено пропорційним потоку захоплених електронів. На рис. 2 наведені результати вимірювання потенціалу КА на перших чотирьох витках, при цьому нульовий відлік відповідає моменту перицентру. У сонячному вітрі потенціал КА дорівнює приблизно $V_k = 5$ В. При наближенні до Марса V_k знижується через підвищення густини плазми за рахунок іонів, що витікають з іоносфери Марса. При перетині ударної хвилі (УХ) V_k різко спадає і в перехідній ділянці виявляє дрібні флюктуації, викликані локальними турбулентностями. Переміщення з перехідної області в планетосферу (перетин планетопаузи ПП) характеризується зникненням дрібних флюктуацій. Далі з переходом КА в менш щільну плазму V_k знову поступово збільшується.

Цікаво, що на першому графіку досить чітко виявляється момент перетину орбіти Фобоса (відмічено трикутником). Є подібні ознаки й на інших графіках, але значно слабші, що повністю відповідає віддаленню КА від Фобоса при перетині його пилової хмари: 4000 км на першій орбіті і більше 10000 км на всіх інших.

Наведені дані наукових досліджень попередніх експериментів («Марс-5», «Фобос-1, -2») показують ефективність електромагнітної діагностики для вивчення плазмового оточення Марса. Тому і в проєкті «Марс-96» цьому напрямку надано належну увагу. Після інтерпретації даних «Марс-5», «Фобос», що дозволили оцінити структуру основних плазмових границь, найбільш важливим завданням наступного експерименту є глобальний електромагнітний моніторинг Марса для визначення ролі електричних та магнітних полів у взаємодії іоносфери Марса з сонячним вітром. Як і в попередніх дослідженнях, важливим для вивчення взаємодії хвиль у планетосфері є застосування хвильових вимірювань як інструмента для аналізу властивостей електричних та магнітних полів Марса.

Одним з важливих фізичних об'єктів досліджень є також продовжені в просторі структури. Розвиток тонких структур очікується в довіллі Марса, особливо на плазмових границях (ударна хвиля, магніто- та іонопауза). Планується вивчення ролі цих структур у процесі перенесення маси через плазмові границі. Особливий інтерес викликають флюк-

туації поблизу нижньогібридної частоти (НГЧ), що відіграють суттєву роль у механізмі аномального тертя між іонами і електронами, а також питання про іоносферні струми, їхні складові та потоки дисипуючих іонів. Передбачається, що завдяки нижчій орбіті КА будуть отримані відповіді на більшість поставлених питань.

У цьому плані й спроектований експеримент по вивченню ультранизкочастотних електромагнітних хвиль у планетосфері Марса. Його апаратна частина втілюється в приладі ULFW і входить до плазмового комплексу ELISMA, який створено у співдружності з вченими та інженерами Франції, Росії, Великої Британії, Європейського космічного агентства (ЕКА), Польщі та Болгарії.

На рис. 3 подана блок-схема комплексу ELISMA, що складається з наступних модулів різного призначення:

- блок DWP — цифрова обробка хвильових сигналів, стиск даних, керування експериментом, цифровий процесор (Англія);
- блок ULFW — вимірювання 6 електричних і 3 магнітних компонентів хвильової форми у УНЧ-діапазоні до 47 Гц (Франція, Росія, Україна);
- блок ESLPE — вимірювання електричних полів і теплової діагностика плазми (Нідерланди, ЕКА, Болгарія);
- блок VLFA — обробка даних, що надходять з електричних і магнітних датчиків, зондів Ленгмюра, спектральний аналіз (Франція);
- блок SFA — обробка сигналів електричних датчиків у діапазоні 1–256 кГц (Польща, Франція);
- блок HFMI — спектральний аналіз однієї електричної компоненти у ВЧ-діапазоні, контроль за зондом взаємного імпедансу (Франція);
- DC/DC — перетворювачі живлення для всього комплексу (Польща).

Крім того, до складу комплексу ELISMA входять датчики електричного поля EP, зонди Ленгмюра LP, індукційні магнітні датчики MP, датчики взаємного імпедансу HP, блок попередніх підсилювачів SCPA (S/C — космічний літальний апарат).

До основних наукових завдань, що їх вирішує комплекс ELISMA, належать:

- дослідження стиску магнітосфери Марса сонячним вітром і передача енергії через ударну хвилю і плазмопаузу;
- ідентифікація нестійкості в іоносфері і магнітосфері;
- глобальне картографування конвекції плазми;

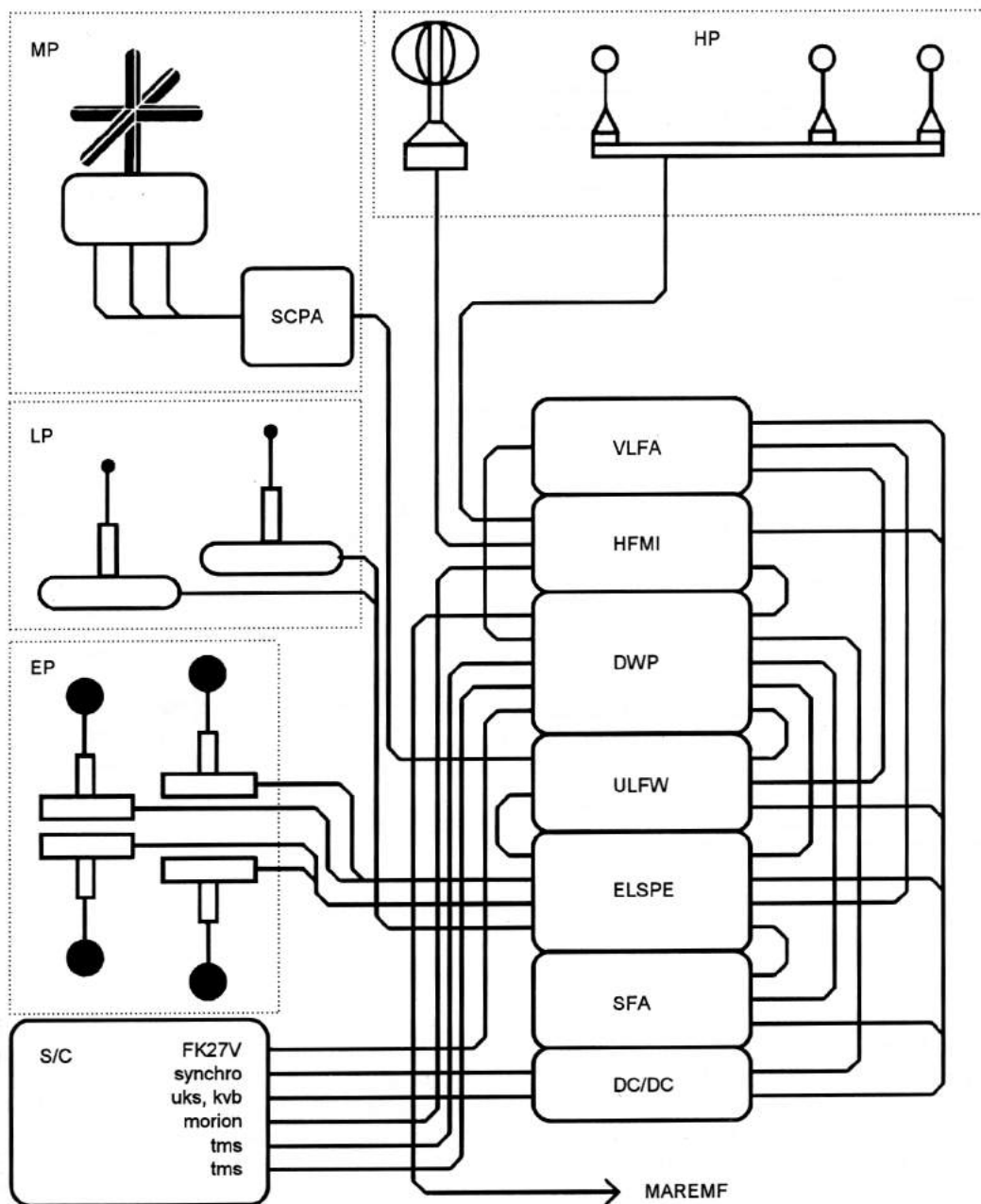


Рис. 3. Блок-схема комплексу ELISMA

- дослідження розподілу температури й щільності теплової плазми;
- вияв динамічного зв'язку між верхньою й нижньою іоносферою;
- дослідження хвиль атмосферного походження,

- що генеруються пиловими бурями й блискавками;
- дослідження співвідношень між фотоіонізаційними, дифузійними та рекомбінаційними процесами.

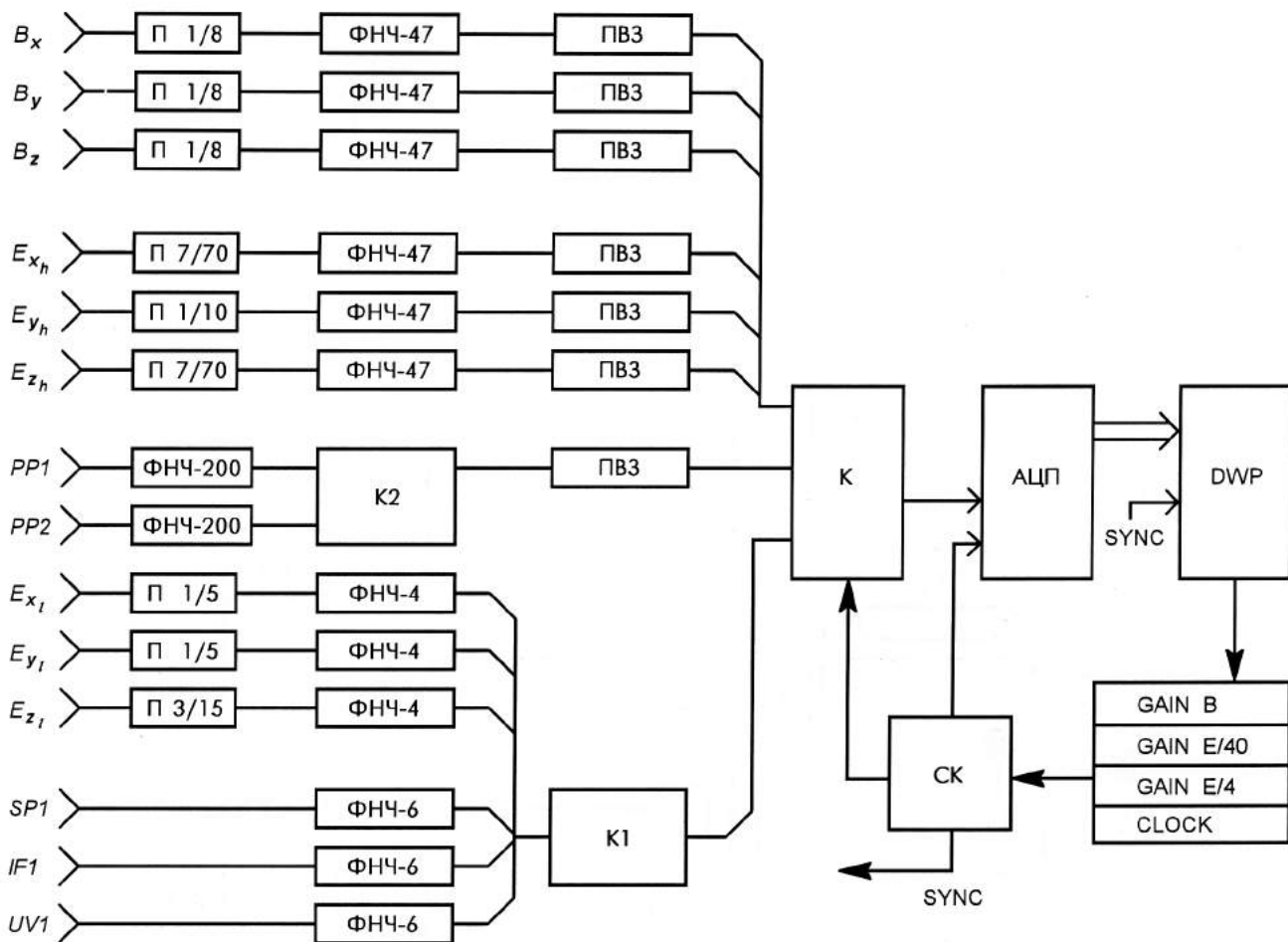


Рис. 4. Блок-схема блока ULFW

Комплекс ELISMA працює на трасі перельоту від Землі до Марса і на орбітах навколо Марса; довготривале включення передбачається при перетині магнітосфери Землі. При виході на трасу й на орбітах довкола Марса керування комплексом ELISMA здійснюється за допомогою наперед заданих програм згідно з циклограмою. Виходячи з геометрії орбіти в просторі відносно плазмових границь і при її еволюції, а також в залежності від квоти на обсяг телеметрії, що надається кожному приладу, передбачається декілька режимів роботи, основні з яких: «черговий» режим і «підсилений» режим з найбільшою частотою реєстрації даних.

Блок ULFW призначається для обробки аналогових сигналів, що надходять від магнітних та електричних датчиків. Вхідну аналогову інформацію блок ULFW перетворює на цифрову й передає її до

блоку DWP — цифрової обробки хвильових сигналів, стиску й керування експериментом. В умовах польотів блок ULFW повинен нормально функціонувати при температурі від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$ і в умовах сумісної праці з усіма іншими блоками комплексу ELISMA та апаратурою, що знаходиться на КА для проведення інших експериментів. Блок-схема функціональних зв'язків окремих вузлів блоку ULFW подана на рис. 4.

Блок ULFW складається з шести розділених за частотою каналів вимірювання складових сигналів електричного поля (E_{xi} , E_{yi} , E_{zi} , $i = h, d$), трьох складових флюктуацій сигналів магнітного поля (B_x , B_y , B_z) і п'яти додаткових вимірювальних каналів:

— SP1 — сигналу потенціалу космічного апарата відносно електричного зонду ES1;

- PP1, PP2 — сигналів струмів зондів Ленгмюра;
- IF1 — сигналу флюктуацій струму зонда Ленгмюра;
- UV1 — сигналу керування струмів зонда Ленгмюра.

До складу кожного з вимірювальних каналів входять підсилювачі П, ФНЧ — фільтри нижніх частот з показаною на рисунку частотою зрізу, пристрої вибору-зберігання даних ПБЗ. Сигнали з каналів, що не включають ПБЗ, надходять спочатку на входи субкомутаторів K1 і K2, а потім на входи головного комутатора K і далі для оцифрування на АЦП, з виходу якого поступають до блоку DWP комплексу ELISMA. Блок DWP виробляє команди керування і надсилає їх до схеми керування СК блоку ULFW. Це команди: CLOCK, GAINB, GAIN E/4, GAIN E/40. Від схеми керування СК на вхід блоку DWP надходить сигнал команди SYNC, що визначає момент часу опитування субкомутаторів K1 і K2, і є сигналом для керування роботою АЦП.

Сигнали B_x , B_y , B_z від датчиків магнітного поля проходять через підсилювачі П, коефіцієнти підсилення яких можуть змінюватися, як вказано на рис. 4, за командою GAINB, і ФНЧ з частотою зрізу 47 Гц. З виходу кожного каналу сигнал B_i запам'ятовується у ПБЗ і надходить на входи комутатора K.

Сигнали E_x , E_y , E_z від датчиків електричного поля обробляються двома способами, що відрізняються частотним діапазоном фільтрації, а також значеннями коефіцієнтів підсилення підсилювачів П, які встановлюються автоматично за командою GAIN E/4 для каналів з низьким діапазоном фільтрації та командою GAIN E/40 для каналів з підвищеним діапазоном фільтрації.

Сигнали E_{x0} , E_{y0} , E_{z0} від електричних датчиків, що проходять через низькочастотні фільтри ФНЧ з $f_s = 4$ Гц, подаються безпосередньо на входи субкомутаторів так само, як і сигнали PP1, PP2, SP1, IF1, UV1. Сигнали E_{x0} , E_{y0} , E_{z0} від електричних датчиків, що проходять через фільтри ФНЧ з частотою зрізу 47 Гц, підлягають попередньому запам'ятовуванню пристроями ПБЗ, після чого надходять на входи головного комутатора K. Сигнали SP1, IF1, UV1 проходять через фільтри ФНЧ, ширина смуги пропускання яких становить 0—6 Гц. Сигнали PP1, PP2 від зондів Ленгмюра проходять через фільтри ФНЧ, ширина смуги пропускання яких становить 0—200 Гц і також запам'ятовуються у ПБЗ. Застосування останніх викликано необхідністю прив'язки більш високочастотних сигналів до однієї точки простору — часу

при послідовному алгоритмі дискретизації цих сигналів.

Особливістю фільтрів ФНЧ каналів E_{i0} та B_i є висока подібність фазових характеристик: у смузі пропускання вони відрізняються не більше ніж на 0.5° . Все це дозволяє не вносити додаткових похибок при подальшій обробці сигналів і фізичній інтерпретації вимірів.

З огляду на обмеженість обсягу телеметрії, що посилається на Землю з КА, проблема організації даних є визначальною. Під час роботи на борту в блоці ULFW використовуються наступні режими передачі даних:

- передача первинної хвильової форми;
- передача стиснутої хвильової форми з різними коефіцієнтами стиску;
- обчислення й передача спектру сигналів;
- передача стиснутого спектру;
- обчислення й передача інтегральної потужності;
- комбінація режимів;
- передача інформації при режимі «burst».

Треба зауважити, що найцікавішими для досліджень є дані, що не підлягали ніякій обробці, а поступають з борту КА як первинна хвильова форма. В такому випадку зберігаються всі інформаційні окраси сигналів, що їх передають вимірювальні зонди. Але цей режим вимагає найбільшого обсягу телеметрії (до 9 кб/с). Постійна передача по каналах телеметрії даних в такому режимі є неекономичною, особливо при майже постійних параметрах досліджуваного середовища. Але у випадках, коли йде інтенсивна зміна параметрів, такий режим набуває особливої ваги й доцільності. Щоб забезпечити дослідників високоякісною інформацією саме про збурений стан досліджуваного середовища і разом з тим не перевищити виділений обсяг телеметрії, було впроваджено спеціальний режим, так званий «burst», який включається на певних відрізках траскторії КА і при певних обставинах: перетин ударної хвилі, перетин іоно- й магнітопауз і т. ін.

Безумовно, передбачити заздалегідь найбільш доцільний момент часу включення цього режиму неможливо, що пояснюється ймовірнісним характером процесів, що досліджуються. Тому було запропоновано й реалізовано алгоритм визначення моменту включення й виключення режиму «burst», а також розроблено спосіб швидкого запам'ятовування і наступної передачі отриманої під час дії режиму «burst» наукової інформації по телеметричних каналах.

Для цього використовуються сигнали від блоку MAREMF (Австрія) про компоненти постійного ма-

гнітного поля в плазмі, що особливо чутливо реагують на початок збурень. Далі проводиться аналіз варіацій постійного магнітного поля й визначається їх характер. Крім того, в блок DWP введена попередня інформація про відрізки траєкторії КА, на яких можливий збурений стан під час руху КА, складена з попередніх досліджень Марса. Все це використовується блоком DWP для подання команди на проведення аналізу варіацій за спеціально розробленою програмою. Якщо аналіз варіацій показує збурений стан, це стає сигналом для ввімкнення режиму «burst». Під час аналізу варіацій дані з блоку ULFW в телеметрію не подаються, а накопичуються в циклічно організованому буфері обсягом в 1 Мб. Враховуючи дані аналізу варіацій постійного магнітного поля, що були зареєстровані КА «Фобос» при перетині границі іоно- та магнітопаузи, було рекомендовано вибирати час і частоту відліків.

При закінченні дії режиму «burst» накопичені в буфері дані починають передаватися в канали телеметрії. При цьому на їх місце записуються нові дані, що надходять з блоку ULFW. Таким чином, дані від блоку ULFW в телеметрію передаються з деяким запізненням, що враховується при розшифруванні.

Вимоги дослідників щодо обсягу та швидкості отримання даних вступають у протиріччя з можливостями телеметрії. Це приводить до необхідності запису інформації, що передається. Режими передачі даних визначаються попередніми заявками дослідників і програмується в блоці DWP. Запропоновано сім видів телеметричних пакетів первинної інформації, що передається для попередньої обробки в блоці DWP; вони залежать від кількості й типу даних, що передаються.

Для оптимального використання можливостей телеметрії вводяться режими, при яких на телеметрію надходить хвильова форма тільки від частини складових, або тільки спектр зі стиском чи без нього. Це дає гнучкість у використанні можливостей телеметрії, що може змінюватися від 48 б/с до 9 кб/с, в залежності від характеру процесів у досліджуваній ділянці простору й від поставленої мети досліджень.

Для прийому й попередньої обробки інформації, що надходить по каналах телеметрії з блоку ULFW, а також для прийому й дешифрування інформації про загальну працездатність комплексу було розроблено програмне забезпечення ПЗ і структура апаратної частини інтерфейсу для наземної підтримки експерименту, в склад якої входять комп'ютери типу IBM PC.

У зв'язку з високою складністю як самого комп'

лексу ELISMA, так і алгоритмів його зв'язку з іншими комплексами КА, принципове значення надається тестуванню апаратури й контролю за її роботою під час польотів і при наземних випробуваннях. Для вирішення цього завдання були розроблені спеціальні тести: автономні для поблочного контролю й інтегральні для комплексного контролю всієї апаратури. Для наземних випробувань було розроблено спеціальні апаратні комплекси під керуванням ЕОМ, що генерують усі сигнали, та організують безпосереднє введення даних від блоку ULFW до комп'ютера.

На етапі підготовки експерименту «Марс-96» у Франції в Лабораторії фізики й хімії навколишнього середовища (Орлеан та Тулуза) та в ІКД РАН (Москва) учасниками плазмового експерименту ELISMA був проведений комплекс випробувань:

- на загальну працездатність,
- на електромагнітну сумісність,
- на термічну й термовакуумну стійкість.

Випробування на загальну працездатність включали монтаж комплексу ELISMA разом з імітатором космічного борту до комп'ютера наземної підтримки й розгорнутого ПЗ, а також розподіл мережі та узгодження інтервалів циклограми функціонування наукових експериментів та даних між учасниками експерименту.

Випробування на електромагнітну сумісність проводилися з метою з'ясування електромагнітного впливу окремих експериментів один на одного, визначення рівня паразитного випромінювання і визначення працездатності комплексу в умовах дії зовнішніх електромагнітних полів різної інтенсивності і частоти. Блоки апаратного комплексу ELISMA розмішувалися в спеціальній камері, де моделювалася дія зовнішніх полів.

Випробування на дію термічних та термовакуумних факторів відбувалось у термо-вакуумній камері. Окреме випробування блоку ULFW на працездатність при низьких температурах було проведено при його розміщенні в холодильній камері.

При всіх трьох типах випробувань, а також при штатному польоті, на борту КА формується спеціальна таблиця найбільш узагальнених даних про стан апаратури — «housekeeping». Це дозволяє робити оперативно висновок про працездатність комплексу в цілому.

Випробування на загальну працездатність проводилися за схемою інтеграційних тестів з використанням спеціально створених командних файлів (MACROS), орієнтованих на завдання цього тестування:

- амплітудний тест (при двох значеннях коефіцієнта підсилення для підсилювачів у вимі-

- рювальних каналах ULFW);
- частотний тест (при високих значеннях коефіцієнта підсилення в каналах ULFW);
- АFT-тест оперативного контролю працездатності всього комплексу ELISMA під час польотів за штатною програмою.

Командні файли цього тесту враховували побажання всіх учасників кожного окремого експерименту. Під час цього тесту блок ULFW працював у режимі прийому хвильової форми з обома коефіцієнтами підсилення на кожному з каналів. Датчики працювали під дією калібрувальних сигналів. Випробувалась також подача робочого зміщення на вимірювальні зонди електричних полів.

Випробування на електромагнітну сумісність включали перевірку працездатності блоку ULFW при сумісній роботі з рештою блоків комплексу ELISMA, а також перевірку долі випромінювання блоку ULFW у навколишнє середовище. Результати були позитивними, а доля випромінювання не виходила за межу допустимої, встановленої для космічної апаратури. Експерименти на працездатність блоку ULFW при наявності зовнішнього електромагнітного опромінення високої потужності й широкого частотного спектру, а також при наявності імпульсних завад у шинах живлення, також засвідчили нормальну роботу блоку ULFW.

Вищезгадані експерименти проводилися в спеціальній камері, що була встановлена в лабораторії INTESPACE-CNES у м. Тулуза, Франція.

Накопичений під час випробувань досвід доводить, що проведення наземних випробувань комплексу ELISMA в цілому і блоку ULFW окремо дає змогу не тільки впевнитися у надійності роботи апаратних і програмних засобів, але й (при оцінці отриманих результатів включно з виявленими збоями) продумати і передбачити додаткові кроки покращення програм наукових досліджень у відкритому космосі. А це, в свою чергу, може

позитивно впливати на прийняття альтернативних і адекватних рішень при виникненні нештатних ситуацій, що дозволить зменшити втрати, чи взагалі обійтися без них, і навпаки, розширити обсяг корисної інформації та модель випробувань для наступних експериментів за рахунок виявлення нових впливових факторів.

- Бреус Т. К., Крымский А. М. и др. Взаимодействие солнечного ветра с Марсом. Результаты «Фобос-2» // Косм. исслед.—1991.—29, вып. 5.—С. 741—750.
- Долгинов Ш. Ш. Магнитное поле и магнитосфера планеты Марс // Косм. исслед.—1991.—29, вып. 5.—С. 754—789.
- Долгинов Ш. Ш. Вековые изменения магнитного момента планеты Марс // Косм. исслед.—1992.—30, вып. 3.—С. 425—428.
- Стажкин В. А., Ерошенко Е. Г., Иванов К. Г. Межпланетное магнитное поле по измерениям на КА «Фобос-2» // Геомагнетизм и аэронавигация.—1994.—34, № 1.—С. 7—48.
- Стажкин В. А., Иванов К. Г., Ерошенко Е. Г. Магнитное поле на $24 \cdot 10^6$ км вблизи по потоку от Земли по измерениям на КА «Фобос-2» в сентябре 1988 г. // Косм. исслед.—1993.—31, вып. 5.—С. 137—147.

“MARS-96”: PLASMA WAVE COMPLEX

*V. Ye. Korepanov, S. I. Klymov, Y. G. Tarasov,
and O. O. Chervinka*

We give a short description of the “Mars-96” experiment and scientific problems which will be studied on board the spacecraft by the plasma wave complex ELISMA. The multichannel ULF wave analyser ULF-W developed at the Special Design Division of the Physical Mechanical Institute, National Academy of Sciences, is one of the main components in this complex. A special structure of this device includes high-stability ULF-filters, with identical phase-frequency parameters, amplifiers with controlled amplification coefficients, sample-and-hold blocks, and a variety of processing algorithms for data collection, compression and decompression. All this provides wide possibilities for a multicomponent analysis of electromagnetic fields. We discuss the methodology and results of on-ground tests of the ULF-W analyser as a component of the ELISMA complex under conditions approaching such of the outer space.