

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2019.02.038>

УДК 533.9

О. Б. Коханов, Ю. І. Венедіктов, М. О. Барабанов, О. Ю. Венедіктов

Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна

ПРИЛАД «ПІОН» ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ІОНОСФЕРНОЇ ПЛАЗМИ НА БОРТУ МІКРОСУПУТНИКА НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ «YUZH SAT»

Описано проект створення приладу «Піон», розроблений в Одеському національному політехнічному університеті. Прилад призначений для встановлення на борту мікросупутників і дозволяє отримати інформацію про масовий склад, щільність, температуру, спрямовану швидкість іонів холодної іоносферної плазми і потенціал корпусу супутника відносно плазми. Розглянуто передумови для створення приладу, наведено конструкцію приладу, принципи його роботи та обробки результатів вимірювання, технічні та наукові характеристики приладу. Як давач прилад використовує плоский аналізатор з гальмівним потенціалом. Проект створення приладу зайняв третє місце на конкурсі «Відбір проектів корисного навантаження платформи «YuzhSat».

Ключові слова: космічна плазма, вимірювання, обробка даних, пристрій, проект.

Вимірювання параметрів іонів іоносферної плазми має велику наукову і практичну цінність для вивчення сонячно-земних зв'язків, уточнення моделі іоносфери Землі, дослідження впливу стану іоносфери на радіозв'язок, на потенціал космічних апаратів, а також на їхню траєкторію; для пошуку змін стану іоносфери, що передують землетрусам; для правильної інтерпретації результатів експериментів з вимірювання магнітного поля Землі.

Конструкцію запропонованого приладу представлено на рис. 1. Прилад складається з аналізатора з гальмівним потенціалом (АГП) і блоку електроніки (БЕ), який здійснює живлення електродів АГП, прийом і обробку сигналу АГП, формування пакетів даних вимірювань і видачу їх по послідовному інтерфейсу на систему збору даних для передачі.

Прилад встановлюється на борту мікросупутника (МС). Попадання сонячного світла у вхідне вікно

АГП має бути мінімальним, тобто прилад бажано розміщувати у сонячній тіні. Для нормальної роботи приладу супутник повинен мати тривісну стабілізацію з точністю не гірше 0.2° , яку забезпечує платформа «YuzhSat». Нормаль вхідного вікна АГП повинна бути орієнтована по вектору швидкості МС з точністю не гірше 2° , щоб реєструвати потік іоносферної плазми, що набігає. В поле зору давача (у межах $\pm 70^\circ$ від нормалі до вхідного вікна АГП) не повинні потрапляти елементи конструкції МС. Слід зазначити, що прилад не вимагає застосування виносних штанг, що є безперечною перевагою.

Для забезпечення теплового режиму прилад, крім вхідного отвору давача, обшивається екранно-вакуумною теплоізоляцією (ЕВТІ). В результаті очікується діапазон робочих температур БЕ $-20 \dots +50^\circ\text{C}$. Аналізатор з гальмівним потенціалом може працювати у ширшому діапазоні температур, до $-100 \dots +100^\circ\text{C}$.

Розглянемо принцип роботи і характеристики приладу. Конструкцію плоского АГП представ-

лено на рис. 2. Аналізатор з гальмівним потенціалом складається з корпусу у вигляді металевого стакана, всередині якого розміщено систему металевих сіток і колектор. Гальмівна сітка забезпечує аналіз іонів по енергії. Цю сітку долають тільки ті іони, енергія яких достатня для подолання потенціалу, створюваного напругою U_p , яка подається на сітку відносно корпусу супутника. Ступенево змінюючи напругу U_p , можна здійснювати аналіз іонів по енергії. Колектор являє собою плоску пластину, яка збирає іони, що пройшли систему сіток. Струм колектора I_c несе інформацію про щільність потоку іонів, які пройшли сітку. Для ефективного збирання іонів на колектор відносно корпусу супутника подається негативна напруга $U_c \approx 20$ В. Супресорна сітка забезпечує додаткове відсічення електронів плазми і притлумлення струму фото- і вторинних електронів з колектора. Для цього на цю сітку відносно корпусу супутника подається негативна напруга, істотно менша за U_c ($U_{sg} \approx -70$ В).

Метод вимірювань, що реалізується за допомогою АГП, — непрямий. Він полягає у вимірюванні вольтамперної характеристики (ВАХ) АГП у вигляді залежності струму колектора I_c від напруги U_p аналізаторної (гальмівної) сітки і подальшій наземній обробці даних вимірювань з отриманням інформації про параметри іонів: масовий склад, концентрацію, температуру, спрямовану швидкість. Крім того, отримується інформація про потенціал корпусу супутника відносно плазми і фоновий струм колектора, що утворюється високоенергійними зарядженими частинками, які пройшли систему сіток. При знятті ВАХ гальмівна

напруга змінюється східчасто від нуля до максимального значення порядку 25 В.

Інформація про ВАХ передається у вигляді масивів цифрових відліків струму колектора I_c і значень ступенів гальмівної напруги U_p , при яких вимірювалися відліки струму колектора. У залежності від програми вимірювань інформація про значення ступенів U_p може і не передаватися, в цьому випадку ці значення можна визначити за відомим алгоритмом вимірювань U_p .

Наземна обробка даних вимірювань здійснюється за критерієм мінімуму суми квадратів різниці відліків отриманої ВАХ і її моделі (метод найменших квадратів).

Для оцінки визначуваних параметрів авторами проекту був розроблений алгоритм пошуку на основі еволюційних методів, який прискорює рішення і підвищує його достовірність [1].

Для висот орбіти мікросупутників платформи «YuzhSat» (від 450 до 1000 км) основними компонентами іоносферної плазми є іони H^+ , He^+ , N^+ , O^+ з очікуваними параметрами: загальна концентрація іонів — $10^3 \dots 10^5 \text{ см}^{-3}$; температура іонів — $900 \dots 1700$ К; потенціал корпусу — $0 \dots -10$ В; спрямована швидкість іонів — $7 \dots 9$ км/с. Виходячи з цих даних, діапазон зміни гальмівної напруги U_p було обрано від 0 до 25 В. Ефективна площа колектора АГП приладу «Піон» обрана досить великою (близько 50 см^2) для підвищення чутливості приладу. При цьому діапазон реєстрованих іонних струмів колектора охоплює значення $10^{-11} \dots 10^{-6}$ А. Крім іонних струмів в сигналі колектора наявний адитивний фоновий струм, утворений струмом високоенергійних за-

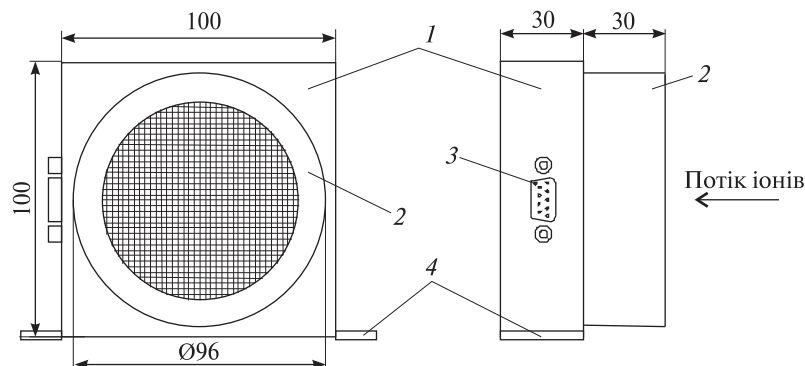


Рис. 1. Конструкція приладу «Піон»: 1 — блок електроніки, 2 — аналізатор з гальмівним потенціалом, 3 — комунікаційний роз'єм (живлення і інтерфейс RS-422), 4 — лапки кріплення

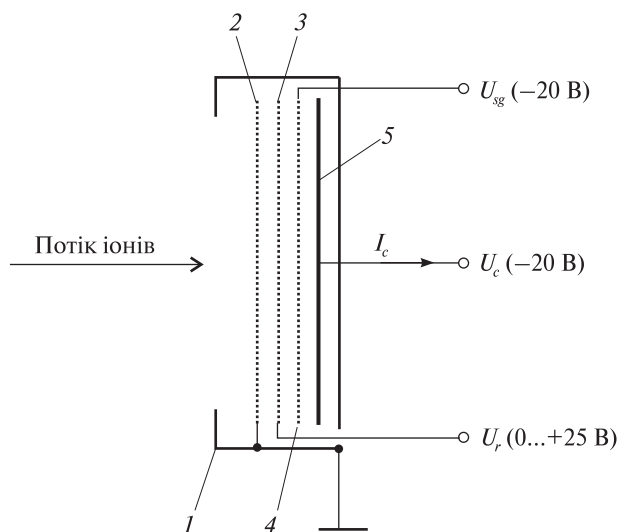


Рис. 2. Аналізатор з гальмівним потенціалом: 1 — корпус, 2 — вхідна сітка, 3 — аналізаторна (гальмівна) сітка, 4 — супресорна сітка, 5 — колектор

ряджених частинок, залишковим (не придушеним супресорною сіткою) струмом фото- і вторинної емісії, вхідним струмом вимірювача струму і наведеним до входу зміщенням його нуля. Цей фоновий струм може становити $\pm 10^{-8}$ А.

Розглянемо особливості вимірювання ВАХ АПП у приладі «Піон». Для зменшення впливу фонового струму на точність вимірювання іонного струму на початку кожного циклу вимірювань проводиться апаратна компенсація фонового струму при максимальній гальмівній напрузі [2]. Вона полягає у подачі в ланцюг колектора компенсаторного струму, величина якого підбирається методом проб і помилок таким чином, щоб вихідний сигнал вимірювача струму був близький до нуля.

Струм іонів перетворюється у двійковий код з плаваючою точкою з 12-розрядною мантисою (включаючи знак) і основою 8 у степені від -3 до 0 . При цьому величина струму визначається виразом

$$I = 0.5 \cdot N \cdot 8^{L-4} \text{ нА},$$

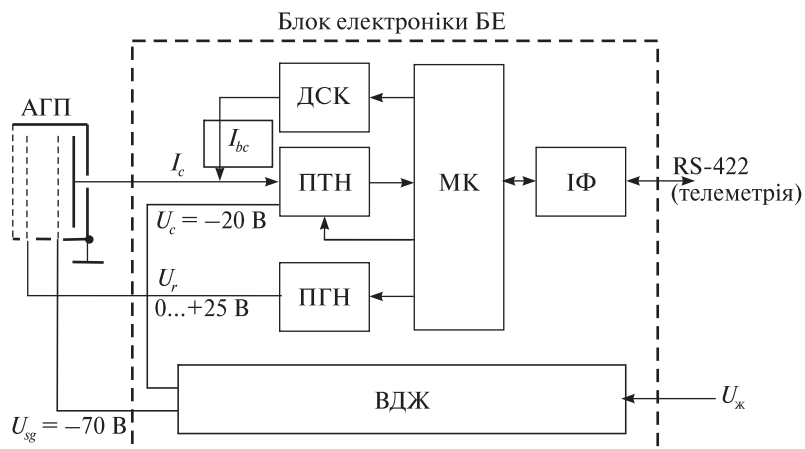
де N — десятковий еквівалент коду мантиси, L — номер шкали від 1 до 4 . Мінімальна дискретність струму становить 2 пА. Таке перетворення, на відміну, наприклад, від логарифмічного перетворення, дозволяє поліпшити розділ іонів з малою концентрацією.

Алгоритм роботи приладу передбачає локалізацію відліків на спадній ділянці ВАХ. Це підвищує точність визначення масового складу іонів і їхніх параметрів в умовах обмеженої кількості відліків ВАХ. Обмеження циклу вимірювань значенням 1 с і низька швидкодія вимірювача струму (час релаксації 10 мс) не дозволяють знімати більш ніж 100 відліків ВАХ. Для локалізації відліків у приладі здійснюється грубе і точне сканування ВАХ. При грубому скануванні U_r поступово змінюється від 0 до 25 В з рівномірним кроком при числі ступенів 32 . У результаті грубого сканування по порогах 95 і 5% від повного іонного струму визначаються межі напруги U_r спадної ділянки ВАХ. Після цього у зазначених межах провадиться точне сканування (з дрібнішим кроком) з числом ступенів 64 .

Структурну схему електроніки приладу приведено на рис. 3. Розглянемо функції основних вузлів на структурній схемі. АПП виконує роль давача іонів. Джерело струму компенсації (ДСК) виробляє біполярний ток I_{bc} , керований сигналом цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) мікроконтролера (МК). Цей струм додається до струму колектора I_c . Під час компенсації фонового струму МК підбирає I_{bc} таким чином, щоб вихідний сигнал ПТН був близький до нуля. ДСК також використовується для тестування приладу. ПТН перетворює сумарний струм $I_c + I_{bc}$ у ланцюзі колектора у пропорційну напругу на одній з чотирьох лінійних шкал, яку обирає МК. ПТН розширює діапазон сигналів внутрішнього ЦАП МК до діапазону зміни U_r від 0 до 25 В.

Мікроконтролер типу STM32F100 складається з типових вузлів: 32-розрядного процесора, пам'яті програм, пам'яті даних, портів введення-виведення, багатоканального 12-розрядного АЦП, двох 12-розрядних ЦАП, універсального асинхронного приймально-передавального послідовного інтерфейсу (UART), набору таймерів, годинника реального часу (RTC) і давача температури. За допомогою порту виведення МК керує вибором шкали ПТН. За допомогою АЦП МК оцифровує: вихідні сигнали ПТН, постійні напруги живлення АПП і сигнал вбудованого давача температури. За допомогою одного ЦАП МК керує ДСК, а за допомогою іншого —

Рис. 3. Структурна схема приладу «Піон»: АГП — аналізатор з гальмівним потенціалом, ДСК — джерело струму компенсації, ПТН — перетворювач «струм — напруга», ПГН — підсилювач гальмівної напруги, МК — мікроконтролер, ІФ — інтерфейс, ВДЖ — вторинне джерело живлення



гальмує напругою (через ПГН). МК програмно реалізує цикл вимірювань, проводячи компенсацію фоновому струму, вибір шкали ПТН, грубе і точне сканування. МК накопичує інформацію про вимірювання у пам'яті даних, формує телеметричний кадр і за допомогою UART видає його через ІФ за певним протоколом на бортову систему збору даних. Крім того, МК приймає команди по послідовному інтерфейсу і реалізує їхнє виконання. Зокрема, за допомогою послідовного інтерфейсу здійснюються команди переходу в режим зниженого споживання, виконання калібрування і тестування, синхронізації внутрішнього годинника RTC з бортовим часом.

Інтерфейс об'єднує в собі драйвер і приймач, який забезпечує фізичне узгодження UART МК з бортовою системою збору даних і керування за певним стандартом (передбачається використання стандарту RS-422). ВДЖ забезпечує перетворення напруги бортової мережі (наприклад, 12 В) в ряд напруг, необхідних для харчування АГП і пристроїв БЕ.

Вся електроніка приладу розміщується на двосторонній друкованій платі розміром 94 × 94 мм, яка розташована в алюмінієвому боксі розміром 100 × 100 × 30 мм. Максимальна інформативність приладу складає 1.521 кбіт/с (213 байт за 1.12 с). Для платформи «YuzhSat» така інформативність є цілком прийнятною. При необхідності зменшити інформативність приладу може використовуватися алгоритм стиснення даних, реалізований в МК, який підключається в залежності від режиму вимірювань.

Основні характеристики приладу «Піон»

Тип давача	Плоский АГП
Компоненти вимірюваної плазми	H^+, He^+, N^+, O^+
Концентрація іонів, іон/см ⁻³	$10^3 \dots 10^5$
Еквівалентна температура іонів, К	900...1700
Спрямована швидкість іонів, км/с	7...9
Діапазон вимірювання іонного струму, А	$10^{-11} \dots 10^{-6}$
Діапазон компенсації фоновому струму колектора АГП, А	$-10^8 \dots +10^8$
Діапазон зміни потенціалу гальмівної сітки АГП, В	0...+25
Потенціал супресорної сітки АГП, В	-70
Потенціал колектора АГП, В	-20
Напруга живлення, В	12
Потужність, Вт	≤0.5
Час циклу вимірювань, с	1.12
Число відліків ВАХ АГП за цикл вимірювань	96
Тип інтерфейсу даних і команд	Послідовність RS-422
Інформативність, кбіт/с	≤1.55
Габаритні розміри, мм	≤100 × 100 × 60
Маса, кг	≤0.6
Діапазон робочих температур, °С	≥-20...+50

Таким чином, прилад «Піон» є простим і надійним приладом, виконаним на сучасному науково-технологічному рівні. Габарити, маса, енергоспоживання та інформативність приладу узгоджуються з обмеженнями мікросупутників на базі платформи «YuzhSat» комплектацій 2 і 3, але наведені цифри сумісні з характеристиками приладів, які літали на набагато більших платформах. Використання приладу

не вимагає застосування виносних штанг, хоча і висувуються високі вимоги до орієнтації АГП і її стабілізації.

Реалізація космічного експерименту з використанням приладу «Пион» дозволить: провадити моніторинг стану іоносфери вздовж орбіти МС, дані якого можуть бути використані для: створення більш досконалої Міжнародної Моделі Іоносфери; уточнення процесів взаємодії іоносфера — плазмосфера; виявлення іоносферних ознак, що передують землетрусам; корекції даних інших експериментів; отримувати інформацію про потенціал корпусу МС, що важливо для вивчення процесів електризації поверхні супутника з метою забезпечення надійності функціонування бортових радіоелектронних засобів; апробувати сучасну компонентну базу для космічної апаратури; випробувати нові алгоритми вимірювань за допомогою АГП. Алгоритми вимірювання і обробки після успішної апробації на мікросупутниках можуть бути після мінімальної адаптації використані для вимірювання параметрів плазми в інших космічних експериментах, де як давач використовуються АГП.

До розробки приладу планується залучити молодих вчених, аспірантів і студентів ОНПУ, які набудуть досвіду розробки космічної апаратури і програмного забезпечення для обробки інформації космічних експериментів та підвищать рівень своєї підготовки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Венедіктов А. Ю., Барабанов Н. А. *Определение наиболее рациональной стратегии скрещивания при обработке информации о свойствах космической плазмы с помощью метода основанного на эволюционных вычислениях для зонда с запирающим потенциалом*. Тези доп. 15 Укр. конф. з космічних досліджень. Київ: НАН України, 2015. С. 78.
2. Knudsen W. C., Bakke J. C., Spenner K., Novak V. Retarding potential analyzer for the Pioneer-Venus Orbiter mission. *Space Sci. Instrum.* 1979. 4. P. 351—372.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2018

REFERENCES

1. Venediktov A. Yu., Barabanov N. A. (2015). *Opreделение naibolee ratsional'noy strategii skreshchivaniya pri obrabotke informatsii o svoystvakh kosmicheskoy plazmy s pomoshch'yu metoda osnovannogo na evolyutsionnykh vychisleniyakh*

dlya zonda s zapirayushchim potentsialom. Tezy dopovidey 15 Ukrainiskoi konferentsii z kosmichnykh doslidzhen'. Kyiv: NANUP, 78 [in Russian].

2. Knudsen W. C., Bakke J. C., Spenner K., Novak V. (1979). Retarding potential analyzer for the Pioneer-Venus Orbiter mission. *Space Sci. Instrum.*, 4, 351—372.

Received 26.11.2018

А. Б. Коханов, Ю. И. Венедиктов,
Н. А. Барабанов, А. Ю. Венедиктов

Одесский национальный
политехнический университет, Одесса, Украина

ПРИБОР «ПИОН» ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА БОРТУ МИКРОСПУТНИКА НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ «YUZH SAT»

Описан проект создания прибора «Пион», разработанного в Одесском национальном политехническом университете. Прибор предназначен для установки на борту микроспутников и позволяет получить информацию о массовом составе, плотности, температуре, направленной скорости ионов холодной ионосферной плазмы и потенциале корпуса спутника относительно плазмы. Рассмотрены предпосылки для создания прибора, приведена конструкция прибора, принципы его работы и обработки результатов измерения, технические и научные характеристики прибора. В качестве датчика прибор использует плоский анализатор с тормозящим потенциалом. Проект прибора занял третье место на конкурсе «Отбор проектов полезной нагрузки платформы «YuzhSat».

Ключевые слова: космическая плазма, измерения, обработка данных, прибор, проект.

А. В. Kokhanov, Yu. I. Venediktov,
М. О. Barabanov, О. Ю. Venediktov

Odesa National Polytechnic University, Odesa, Ukraine

“PION” DEVICE FOR STUDYING IONOSPHERIC PLASMA ON BOARD OF A MICRO-SATELLITE BASED ON THE YUZH SAT PLATFORM

We present the design of the “Pion” device, which is intended for installation on board micro-satellites. It is developed at the Odesa National Polytechnic University. The device provides data about the mass composition, density, temperature, directional velocity of ions of the cold ionospheric plasma, and the potential of the satellite shell relative to the plasma. The device uses a flat analyzer with a braking potential as a sensor. In the article, we consider the prerequisites for creating the device, the device design, principles of its operation and processing of measurement results. Technical and scientific characteristics of the device are presented too.

Keywords: space plasma, data processing, device, micro-satellite.