

<https://doi.org/10.15407/knit2019.04.029>

УДК 537.811

С. М. Беляєв, Ф. Л. Дудкін, В. О. Проненко, В. Є. Корепанов

Львівський центр Інституту космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Львів, Україна

ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ МАЛИХ СУПУТНИКІВ

Електромагнітна сумісність є важливою вимогою до космічних апаратів через обмеження їх об'єму і можливостей компонування окремих вузлів. Завади від бортових систем супутників — головна перешкода при проведенні високочутливих вимірювань магнітних полів хвильових процесів у плазмі в діапазоні низьких частот. Особливо це стосується популярних останнім часом дуже малих супутників — кубсатів (КС) з чутливою апаратурою для вимірювання електричних і магнітних полів у діапазоні від постійного струму до низьких частот. Для мінімізації взаємовпливу корисного навантаження і службових систем необхідне визначення частоти й амплітуди основних спектральних складових магнітного поля завад кожної супутникової підсистеми з метою зниження рівня цих завад або, при відсутності такої можливості, врахування при обробці даних. У статті описана спеціальна апаратура — вимірювальна система, яка була створена для реєстрації та оцінки магнітних завад в УНЧ-діапазоні. Ця система складається з двох ідентичних трикомпонентних індукційних магнітометрів, блока збору даних, блока живлення і керуючого портативного комп'ютера з відповідним набором програм. За допомогою такої системи вимірювали рівень магнітного поля змінного струму, який створює кожна з підсистем КС, та здійснювали цифрову обробку даних. Для розділення досліджуваних та фонових сигналів використовувалися дані, отримані від двох ідентичних трикомпонентних індукційних магнітометрів системи, з наступним розв'язанням оберненої задачі — визначення параметрів джерела випромінювання за даними вимірювання магнітного поля, створеного цим джерелом, у двох точках. Наведені результати випробувань на електромагнітну сумісність для КС, створеного за проектом SEAM, величини та місця розташування еквівалентних магнітних диполів випромінювання окремих підсистем — джерел завад в КС.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, кубсат, аналіз, результати експерименту.

ВСТУП

Електромагнітна сумісність (ЕМС) є важливою вимогою до космічних апаратів через обмеження їхнього об'єму і можливостей компонування окремих вузлів. Особливо це стосується малих супутників з чутливою апаратурою для вимірювання електричних і магнітних полів у діапазоні від постійного струму до низьких частот, де, крім близько розташованих службових і наукових підсистем, сильний вплив мають кола живлення і передачі сигналів.

Тепер наносупутники (масою від 1 до 10 кг) стали звичайним форматом для розміщення наукової апаратури, яка має пакуватися в стандарт кубсату (КС) 1U...10U, де U — блок розмірами $10 \times 10 \times 10$ см і масою близько 1 кг. Це викликано передусім на порядок меншими фінансовими витратами на їхнє створення і запуск, що зробило космічні дослідження доступними для невеликих компаній та університетів. Але через набагато більшу щільність розміщення окремих вузлів на платформі, ЕМС залишається проблемою, яку треба розв'язати, особливо коли науковим завданням є вивчення електромагнітних полів у просторі. Останнім прикладом такої наукової

© С. М. БЕЛЯЄВ, Ф. Л. ДУДКІН,
В. О. ПРОНЕНКО, В. Є. КОРЕПАНОВ, 2019



Рис. 1. Кубсат SEAM, штанги розгорнуті

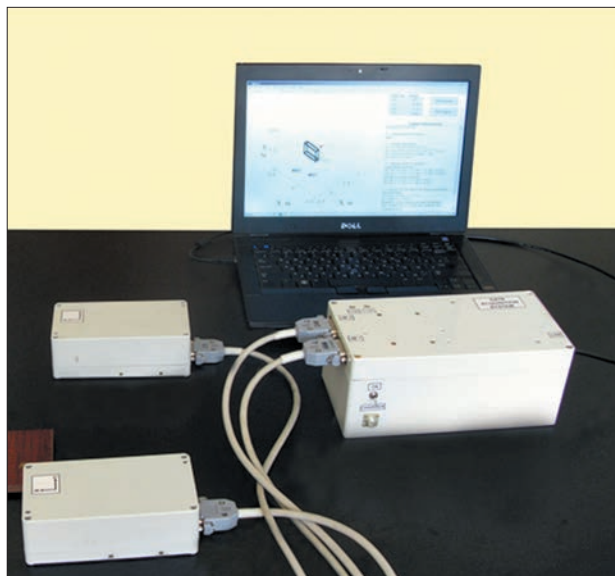


Рис. 2. Вимірювальна система для аналізу магнітних випромінювань в УНЧ-діапазоні

місії на базі кубсату 3U є SEAM (Small Explorer for Advanced Missions), який фінансувався у межах проекту 607197 Європейської програми FP-7 [2]. Спеціально для цього проекту було створено новий чутливий трикомпонентний індукційний магнітометр [3]. Для зменшення впливу підсистем супутника розроблено дві штанги довжиною 1 м, на кінцях яких встановлені давачі ферозондових та індукційних магнітометрів (рис. 1) для вимірювання сигналів у діапазоні від постійного струму до 20 кГц [2]. Однак, незважаючи на таке віддалення давачів від корпусу КС, вплив завад не вдалося зменшити до прийняттого рівня. Тому було знайдене інше рішення — визначити частоти та амплітуди основних спектральних складових магнітного поля завад кожної супутникової підсистеми і врахувати їх при обробці даних.

Для реалізації цього рішення була розроблена і спеціально виготовлена вимірювальна система, яка використовувалася для реєстрації та оцінки магнітних завад в УНЧ-діапазоні. Система

складається з двох ідентичних трикомпонентних індукційних магнітометрів, блока збирання даних, блока живлення і керівного портативного комп'ютера з відповідним набором програм [1], див. рис. 2. За допомогою цієї системи вимірювався рівень магнітного поля змінного струму, який створює кожна з підсистем КС, та здійснювалась цифрова обробка даних з метою оцінки параметрів та локалізації еквівалентного магнітного диполя джерела завад [4].

Оскільки завади, генеровані підсистемою, фіксувалися при наявності інших магнітних сигналів, для розділення досліджуваних та фонових сигналів використовувалися дані, отримані від двох ідентичних трикомпонентних індукційних магнітометрів з наступним розв'язанням оберненої задачі — визначення параметрів джерела випромінювання за даними вимірювання магнітного поля, створюваного цим джерелом, у двох точках.

ДОСЛІДЖЕННЯ НА ЕЛЕКТРОМАГНІТНУ СУМІСНІСТЬ

На рис. 3 показано 3U-кубсат SEAM із знятою кришкою. Експерименти проводилися в калібрівальному павільйоні магнітної обсерваторії Нурміярві Фінського метеорологічного інституту, м. Ройкка, Фінляндія. Всі прилади та обладнання, які не використовувалися під час кожного вимірювання, а також системи електричного опалення, були від'єднані від живлення. Портативні комп'ютери, які використовувалися для управління приладами та збору даних, встановлювалися на відстані 3...4 м від магнітних давачів, і під час вимірювань працювали від батарей. Адаптер мережевого живлення, який використовувався під час деяких вимірювань для моделювання заряджання супутникової батареї, був розташований на відстані 6...7 м від магнітних давачів, встановлених на стовпі, механічно ізолюваному від підлоги павільйону і підвалу.

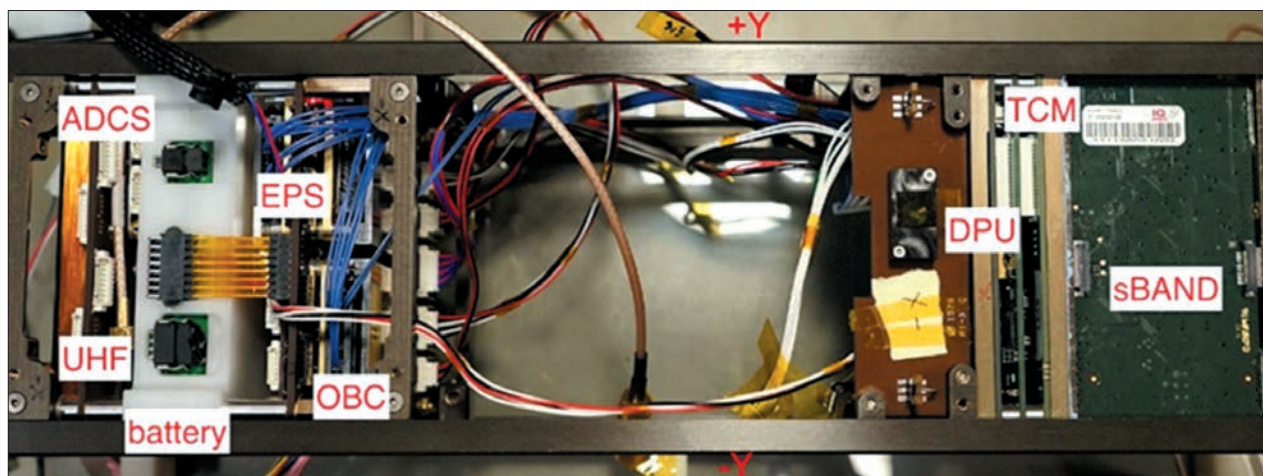


Рис. 3. Кубсат SEAM без кришки: ADCS — система визначення та управління орієнтацією (Attitude Determination and Control System), UHF — УВЧ передавач (Ultra High Frequency transmitter), EPS — система електричного живлення (Electric Power System), DPU — блок обробки даних (Data Processing Unit), TCM — система телекоманд та телеметрії з блоком пам'яті (Telecommand and Telemetry unit with Memory), sBAND — передавач S-діапазону (s-BAND transmitter), OBC — бортовий комп'ютер (On Board Computer)

Супутник стояв на немагнітній та непровідній опорі (рис. 4).

Вісь супутника, позначена як «+Y», була спрямована до давачів. Початок системи координат прийнято у центрі першого давача. Відстань до центральної лінії супутника (довга вісь) становила 500 мм у системі координат першого давача. Координати другого давача в цій системі: $dx = -0.2$ м, $dy = 0.42$ м, $dz = 0$ м.

Під час вимірювань всі підсистеми супутника працювали по черзі з одночасним записом магнітного поля змінних струмів. Використовувалися типові 20-с інтервали запису для кожної тестованої підсистеми. Протягом першої половини інтервалу записувалися наявні фонові сигнали (завади), потім підсистема вмикалася, а час, що залишився, був виділений для запису магнітних полів, створених цією підсистемою. Після запису дані були оброблені таким чином:

- обчислювалися та аналізувалися спектрограми для ідентифікації найбільших сигналів, які з'явилися після увімкнення підсистеми;
- для окремих підсистем за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення обчислювалися величини моментів та координати магнітних диполів, які створювали еквівалентне магнітне поле у місцях розташування давачів, що давало розв'язок оберненої задачі.



Рис. 4. Конфігурація системи для дослідження ЕМС: давач 1 і давач 2 на плиті опори

У ході випробувань було виявлено, що основним джерелом завад був блок DPU, внесок якого у сумарну заваду значно перевищував внески всіх інших підсистем. Для прикладу нижче наведено результати відповідних вимірювань, отриманих при випробуваннях DPU. Через тривалу процедуру ініціалізації та виходу на робочий режим, DPU вмикався близько 13-ї секунди довшого (60 с) вимірювального інтервалу, на фоні вже працюючих EPS, OBC, ADCS, UHF і TCM. Більш тривалий інтервал був обраний для того, щоб вмістити всю

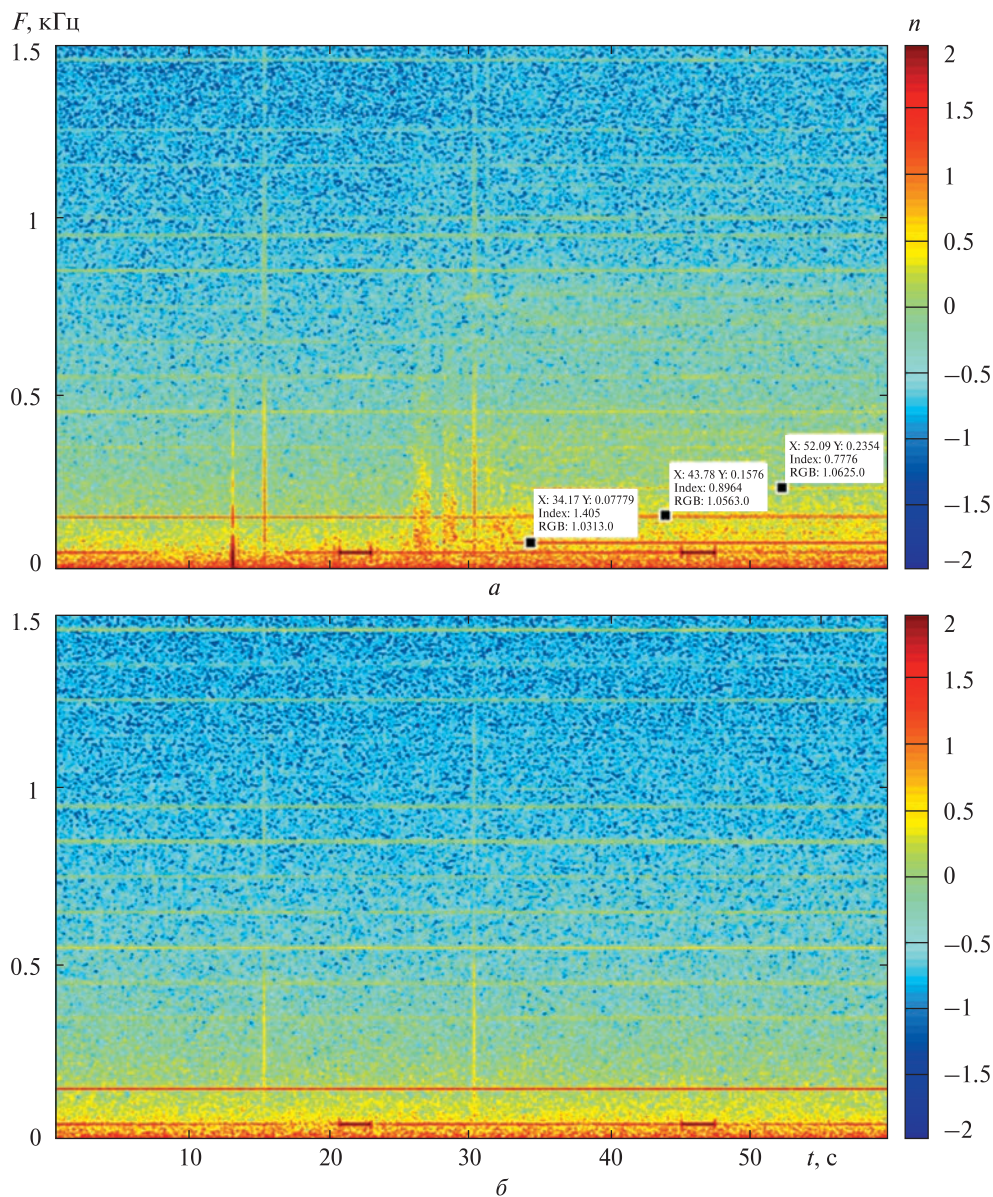


Рис. 5. Складова $B_y = 10^n$ пТл/Гц $^{1/2}$: а — для давача 1, б — для давача 2 (блоки EPS, ОВС, ADCS, UHF та TCM працюють, DPU вмикається у момент $t = 13$ с)

послідовність циклів роботи DPU. Спектрограми сигналів вздовж осі Y (низькочастотна ділянка частотного діапазону) показані на рис. 5 (давачі 1 і 2).

У низькочастотній ділянці вимірюваного діапазону можна побачити завади, коли DPU запускається й підзаряджається (13...33 с), а потім обробляє дані (після 33 с). Було виявлено як шумоподібні, так і гармонічні сигнали.

Серед усіх сигналів постійної частоти найвищу амплітуду (крім сплесків під час увімкнення) має сигнал частотою 78 Гц та його друга й третя гармоніки. Цей сигнал аналізувався за допомогою програмного забезпечення ЕМС-системи і обчислювалися дипольні параметри джерела (рис. 6 — відфільтрований сигнал частотою 78 Гц, рис. 7 — розташування еквівалентного диполя).

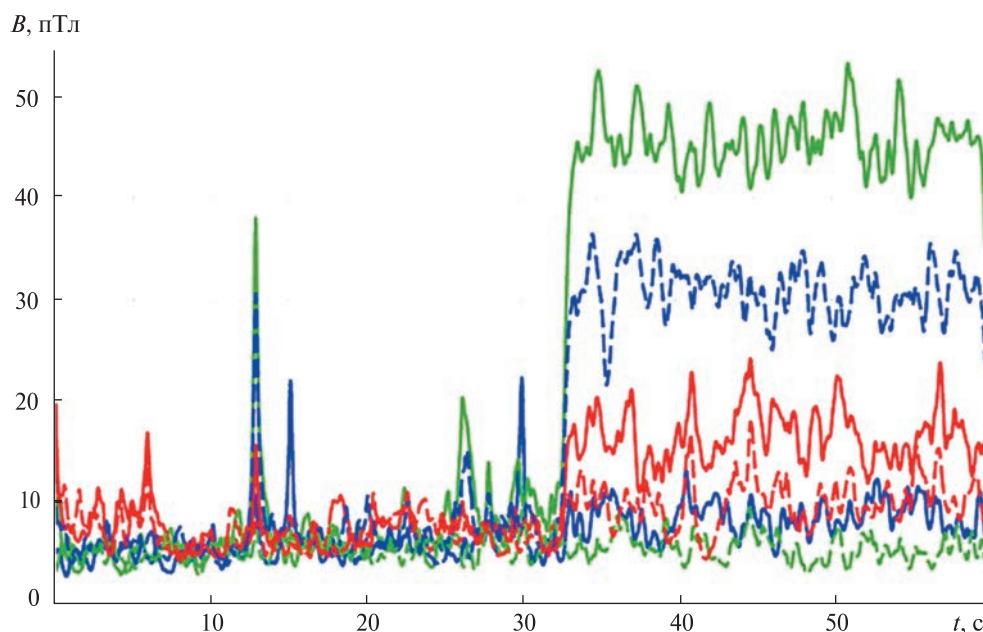


Рис. 6. Відфільтровані сигнали від DPU частотою 78 Гц, записані впродовж 60 с. Сигнали після 33 с відповідають початку робочого циклу DPU

Інформація про вимірювання:

EPS + ОВС +...+ DPU живляться від акумулятора.

Координати другого датчика:

$$dx = -0.2 \text{ м}, dy = 0.42 \text{ м}, dz = 0.$$

Компоненти магнітного поля (пікова амплітуда):

$$\text{IM1: } B_x = 13.5 \text{ пТл}, B_y = -71.7 \text{ пТл}, B_z = -26.1 \text{ пТл}, |B| = 77.5 \text{ пТл}.$$

$$\text{IM2: } B_x = -48.5 \text{ пТл}, B_y = -8.6 \text{ пТл}, B_z = -15.8 \text{ пТл}, |B| = 51.8 \text{ пТл}.$$

Результати розрахунку координат джерела (положення джерела в об'ємі супутника, позначеному сірим кольором) показано на рис. 7:

$$x = 0.52 \text{ м}, y = 0.23 \text{ м}, z = 0.06 \text{ м}; \\ r_1 = 0.57 \text{ м}, r_2 = 0.74 \text{ м}.$$

Величина і орієнтація магнітного моменту (пікова амплітуда):

$$M_x = -72 \text{ мкА} \cdot \text{м}^2, M_y = 110 \text{ мкА} \cdot \text{м}^2, \\ M_z = 42 \text{ мкА} \cdot \text{м}^2,$$

$$|M| = 140 \text{ мкА} \cdot \text{м}^2; \varphi = -56.7^\circ, \theta = 72.3^\circ.$$

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цілому розраховані координати еквівалентних диполів сигналів завад приблизно відповідають

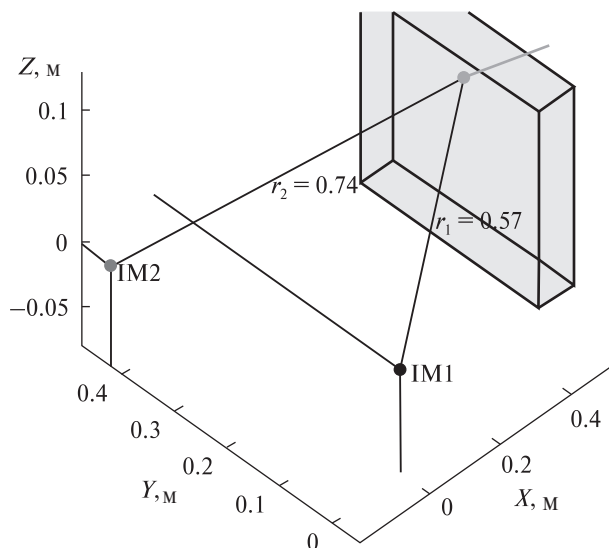


Рис. 7. Розташування еквівалентного диполя сигналу 78 Гц, який генерується під час роботи DPU (початок системи координат — центр Sensor 1, об'єм супутника позначений сірим кольором)

компонуванню супутникових підсистем. Спостерігалися деякі відхилення при незначному співвідношенні сигнал/завада для слабких джерел випромінювання. Для уточнення розташування таких джерел треба зменшувати рівень

Перелік основних гармонійних завод змінного струму

Частота, Гц	Магнітний момент, мкА·м ²	Джерело	Максимальна індукція на відстані 1 м, пТл	Можливе джерело	Рівень шуму ІМ, пТл
~78	140	DPU	28	Плата DPU (на відстані 0.5 м)	1.2
80	98	DPU	20	Плата DPU з кабелем	1.2
114	25	EPS + OBC	5	Плата OBC	1
501	4.4	ADCS	0.88	Близько плати ADCS	0.19
704	7.5	DPU	1.5	Плата DPU з кабелем	0.13
782	17	DPU	3.4	Кабель	0.12
800	3.3	S-Band	0.7	Кабель	0.12
1384	8.7	DPU	1.7	Плата DPU з кабелем	0.075
1400	1.4	UHF	0.3	EPS з кабелем	0.075
8000	8	FGM	0.2 (на відстані 2 м)	Ферозондовий давач	0.04
9398	10	Star Tracker	0.25 (на відстані 2 м)	Зірковий давач на штанзі	0.04
12423	4	TCM	0.8	Кабель	0.038

фонових завод, що не завжди вдається. З використанням магнітних моментів еквівалентних диполів для найпотужніших завод, зареєстрованих під час ЕМС-тестів, розраховано максимальні значення індукції магнітного поля на відстані 1 м (відстань до місця кріплення на штанзі індукційного магнітометра КС), які наведено у таблиці. Для порівняння показані рівні шумів індукційного магнітометра (ІМ) космічного апарата на цих частотах.

Як видно, в усіх випадках, незважаючи на винесення давача на штангу довжиною 1 м, рівень завод перевищував рівень шумів магнітометра (в нижній частині діапазону частот більш як на порядок). Оскільки вимкнення DPU, який власне обробляє дані від магнітометрів, неможливе, єдиним методом боротьби з цими заводами є якомога точніше визначення величини й орієнтації їхніх магнітних моментів для виділення паразитних сигналів з отриманих даних при обробці. Слід відзначити, що заводи від бортових систем супутників є головною перешкодою при проведенні високочутливих вимірювань магнітних полів хвильових процесів у плазмі в діапазоні низьких частот.

На додаток до описаних гармонійних і шумоподібних завод, були зареєстровані імпульсні заводи, які відповідають перехідним процесам під час увімкнення живлення супутникових систем.

Наявність цих імпульсів також слід враховувати при космічних експериментах і обробці даних.

Робота підтримана Європейською програмою FP-7 (проект 607197).

ЛІТЕРАТУРА

1. Belyayev S. M., Dudkin F. L. Minimization of nanosatellite low frequency magnetic fields. *Review of Scientific Instruments*. 2016. 87. 034705. doi: 10.1063/1.4943667.
2. Ivchenko N., Pronenko V., Tibert G., Gerhardt D. and SEAM Team. Cubesat for scientific mission development. *Small Satellites Systems and Services Symposium. The 4S Symposium*. May 26—30, 2014, Porto Petro, Majorca, Spain, 2014. 1—13.
3. Pronenko V. Miniature scientific-grade induction magnetometer for cubesats. *Geophysical Research Abstracts*. 2017. 19. EGU2017-1910.
4. Pronenko V., Belyayev S., Dudkin F. Electromagnetic compatibility analysis for small satellites: method and instrumentation. *IEEE Metrology for Aerospace*. 2016. 38—42. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573182.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2019

REFERENCES

1. Belyayev S. M., Dudkin F. L. (2016). Minimization of nanosatellite low frequency magnetic fields. *Review of Scientific Instruments*, 87, 034705. doi: 10.1063/1.4943667.
2. Ivchenko N., Pronenko V., Tibert G., Gerhardt D. and SEAM Team (2014). Cubesat for scientific mission devel-

opment. *Small Satellites Systems and Services Symposium. The 4S Symposium*. May 26 — 30, 2014, Porto Petro, Majorca, Spain, 1—13.

3. Pronenko V. (2017). Miniature scientific-grade induction magnetometer for cubesats. *Geophysical Research Abstracts*, 19, EGU2017-1910.
4. Pronenko V., Belyayev S., Dudkin F. (2016). Electromagnetic compatibility analysis for small satellites: method and instrumentation. *IEEE Metrology for Aerospace*, 38—42. doi: 10.1109/MetroAeroSpace.2016.7573182.

Received 22.03.2019

С. М. Беляев, Ф. Л. Дудкин,
В. А. Проненко, В. Е. Корепанов

Львовский центр Института космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Львов, Украина

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МАЛЫХ СПУТНИКОВ

Электромагнитная совместимость является важным требованием к космическим аппаратам из-за ограничения их объема и возможностей компоновки отдельных узлов. Помехи от бортовых систем спутников — главное препятствие при проведении высокочувствительных измерений магнитных полей волновых процессов в плазме в диапазоне низких частот. Особенно это касается популярных в последнее время очень малых спутников — кубсатов (КС) с чувствительной аппаратурой для измерения электрических и магнитных полей в диапазоне от постоянного тока до низких частот. Для минимизации взаимовлияния полезной нагрузки и служебных систем необходимо прежде всего определить частоту и амплитуду основных спектральных составляющих магнитного поля помех каждой спутниковой подсистемы с целью снижения уровня этих помех или, при отсутствии такой возможности, учета при обработке данных. В статье описана специальная аппаратура — измерительная система, созданная для регистрации и оценки магнитных помех в УНЧ диапазоне. Эта система состоит из двух идентичных трехкомпонентных индукционных магнитометров, блока сбора данных, блока питания и управляющего портативного компьютера с соответствующим набором программ. При помощи такой системы измеряли уровень магнитного поля переменного тока, создаваемого каждой из подсистем КС, и производили цифровую обработку данных. Для разделения исследуемых и фоновых сигналов использовались данные, полученные от двух идентичных трехкомпонентных индукционных магнитометров системы, с последующим решением обратной задачи — определение параметров источника излучения

по данным измерения магнитного поля, создаваемого этим источником, в двух точках. Приведены результаты испытаний на электромагнитную совместимость для КС, созданного по проекту SEAM, величины и места расположения эквивалентных магнитных диполей излучения отдельных подсистем — источников помех в КС.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, кубсат, анализ, результаты эксперимента.

S. M. Belyayev, F. L. Dudkin,
V. O. Pronenko, V. Ye. Korepanov

Lviv Centre of Institute for Space Research of NAS and SSA, Lviv, Ukraine

MEASURING SYSTEM FOR ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF SMALL SATELLITES

Electromagnetic compatibility (EMC) is an important requirement for spacecrafts due to the limitation of their volume and the possibilities of the layout of individual subsystems. Interference from satellite service systems are the main problem in conducting high-sensitivity measurements of magnetic fields when studying wave processes in plasma in the range of low frequencies. This is especially true for the becoming recently popular very small satellites — CubeSats (CS) with sensitive equipment for measuring electric and magnetic fields in the range from direct current to low frequencies. In order to minimize the mutual influence of the payload and service systems, it is necessary to determine the frequency and amplitude of the main spectral components of the emitted magnetic field of each satellite subsystem to reduce the level of the interference or, if not possible, to take into account when processing data. A special measuring system, created for registration and estimation of magnetic interference in the ULF range, is described in the article. This system consists of two identical three-component induction magnetometers, data acquisition unit, power supply unit, and control computer with a corresponding set of programs. With this system, the level of the AC magnetic field, generated by each of the subsystems of the CS, was measured and digital processing was performed. For the separation of the studied and background signals, data obtained from two identical three-component induction magnetometers of the system were used with the following solution of the inverse problem — the determination of the parameters of the radiation source using the measured magnetic field generated by this source at two points. The results of the EMC tests for the CS developed under the SEAM project, the values and locations of the equivalent magnetic dipoles of the radiation of the separate subsystems, which are the sources of radiation in the CS, are given.

Keywords: electromagnetic compatibility, cubesat, analysis, experimental results.