

УДК 621.317.42

**І.А. Большакова, Р.І. Брайлян, Р.Л. Голяка, А.Г. Єгоров,
І.В. Когут, П.С. Копцев, А.В. Марусенков**
Національний університет "Львівська політехніка",
Лабораторія магнітних сенсорів центру "Кристал"

ВИКОРИСТАННЯ РАДІАЦІЙНО СТІЙКИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ХОЛЛА В СИСТЕМАХ ОРІЄНТАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

© *Большакова І.А., Брайлян Р.І., Голяка Р.Л., Єгоров А.Г., Когут І.В.,
Копцев П.С., Марусенков А.В., 2003*

**I. Bolshakova, R. Braylyan, R. Holyaka, A. Egorov,
I. Kogut, P. Koptsev, A. Marusenko**
Magnetic Sensor Laboratory, Center "Crystal"
Lviv Polytechnic National University

RADIATION RESISTANCE HALL GENERATORS USES IN APPLICATIONS OF SPACE CRAFT ORIENTATION

© *Bolshakova I., Braylyan R., Holyaka R., Egorov A., Kogut I.,
Koptsev P., Marusenko A., 2003*

Робота присвячена створенню радіаційно стійких перетворювачів Холла, дослідженню їх при опроміненні швидкими нейтронами та використанню в магнітометричних модулях магнітних систем управління космічними апаратами.

Paper is dedicated to the radiation hard Hall generators creation, to their investigation during the irradiation by fast neutrons and their application in magnetometric units of spacecraft control magnetic systems.

Вступ. Державною космічною програмою України передбачено створення низки уніфікованих космічних платформ і на їх базі сімейства космічних апаратів різного цільового призначення вагою від 50 до 200 кг. Такі космічні апарати проходять під назвою мікросупутники. Вони орієнтовані на вирішення основних двох задач: обслуговування космічного зв'язку на висоті орбіт, менших 2000 км, та дистанційний моніторинг поверхні Землі з орбіт, вищих за 500 км.

У теперішній час в Державному конструкторському бюро "Південне" розробляється державний проект "Мікросупутник" та міжнародний проект "Egypsat-1". У космічних апаратах, що розробляються за цими проектами, використовуються магнітні системи орієнтації та стабілізації їх під час польоту на орбіті [1], які базуються на взаємодії створеного ними магнітного моменту з магнітним полем Землі. Одним з елементів таких систем є магнітний виконавчий орган, виготовлений у формі стрижневого електромагніту. Магнітні виконавчі органи, як правило, розташовуються на зовнішній поверхні космічного апарата і знаходяться під дією опромінення радіаційних поясів Землі, що відповідають висоті орбіти цього апарата.

Вирішення проблеми створення радіаційно стійких перетворювачів Холла дозволило б створити телеметричний контроль працездатності магнітних виконавчих органів під час

польоту на орбіті. Крім того, це відкрило б перспективу енергозбереження на космічному апараті за рахунок використання зворотного зв'язку і переходу на ефективніші способи управління, а також підвищення точності орієнтації космічних апаратів.

Для вирішення проблеми створення стійких до радіаційного опромінення перетворювачів Холла з метою використання їх в космічних апаратах, що виготовляються в Україні в ДКБ “Південне”, була розроблена технологія отримання напівпровідникових мікрокристалів антимоніду індію; характеристики яких є достатньо стабільними в радіаційних умовах [2,3]. На основі мікрокристалів та тонких плівок InSb були створені перетворювачі магнітного поля [4,5]. У статті наведені результати досліджень, випробувань та розробок, внаслідок яких були створені радіаційно стійкі перетворювачі магнітного поля, а також магнітометричні зонди та модулі, призначені для космічних апаратів „Мікросупутник” та “Egypstsat-1”.

Дослідження радіаційної стійкості перетворювачів Холла. Випробування радіаційної стійкості створених перетворювачів Холла було проведено в жорстких радіаційних умовах, що значно перевищують рівень навантажень радіаційного поясу Землі на висоті орбіти мікросупутника.

Дослідження проводилися в Лабораторії нейтронної фізики в Об'єднаному інституті ядерних досліджень в м. Дубна (Росія) на імпульсному швидкому реакторі ИБР-2 в потоці високоенергетичних нейтронів. Нейтрони є найбільш руйнівними частинками для напівпровідникових матеріалів і дослідження у високих дозах нейтронного опромінення забезпечує достатню інформацію про стійкість матеріалу чи приладу до радіації.

На рис. 1 показані результати дослідження трьох зразків плівкових перетворювачів Холла, яке проводилося безпосередньо під час опромінення їх нейтронами з енергією $E \geq 1,5$ MeV. На осі ординат показана відносна зміна чутливості перетворювача Холла, на осі абсцис – тривалість опромінення в годинах. При інтенсивності потоку нейтронів $j = 6,8 \cdot 10^9$ см⁻²с⁻¹ досліджувані зразки були опромінені до флюенсу $\Phi = 6,6 \cdot 10^{15}$ н·см⁻².

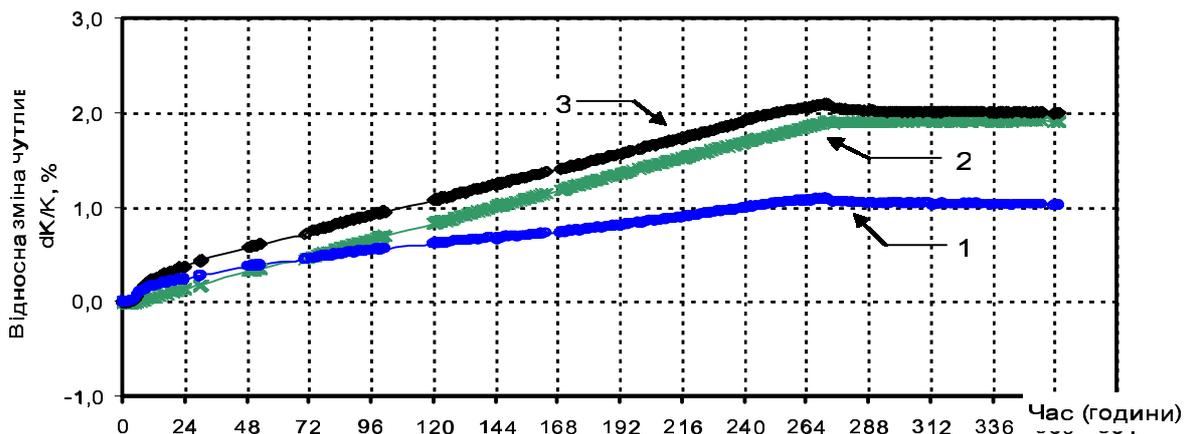


Рис. 1. Відносна зміна чутливості опромінених плівкових перетворювачів Холла
 1 – концентрація носіїв $n = 3,4 \cdot 10^{17}$ см⁻³; 2 – $n = 3,0 \cdot 10^{18}$ см⁻³; 3 – $n = 7,5 \cdot 10^{17}$ см⁻³.

Як видно з рисунку, навіть при такій високій дозі радіаційного опромінення, яке значно перевищує сумарну дозу опромінення на орбіті космічного апарата “EGYHTSAT-1”, чутливість перетворювача Холла змінюється сумарно не більше ніж на 1 % для зразків з

початковою концентрацією $n=3,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (крива 1 на рис. 1) та на 2% для зразків з початковою концентрацією $n=7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ та $n=3,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (криві 2 та 3 на рис. 1). Це повністю задовольняє вимоги до радіаційної стійкості перетворювачів Холла для використання їх в умовах радіаційного опромінення на орбіті штучного супутника "EGYPTSAT-1".

Таблиця 1

Технічні характеристики перетворювача Холла

Розміри перетворювача Холла, мм	1,5x2x0,5
Вхідний опір $R_{\text{вх}}$, Ом	13
Вихідний опір $R_{\text{вих}}$, Ом	13
Номинальний струм I , мА	90
Магнітна чутливість K_B , мВ/Тл	730
Залишкова напруга U_0 , мВ	0,1
Коефіцієнт нелінійності K_H , %	0,1
Температурний коефіцієнт вихідного сигналу β , %·град ⁻¹	-0,004

Використання радіаційно стійких сенсорів в магнітометричних модулях для космічних апаратів. Радіаційно стійкі сенсори магнітного поля були використані при створенні магнітометричного модуля, який призначений для контролю магнітних параметрів магнітних виконавчих органів системи орієнтації космічних апаратів "Мікросупутник" та "EGYPTSAT-1".

На висоті орбіти космічних апаратів "Мікросупутник" та "Egypstsat-1", які становлять відповідно, 600 км та 668 км розташовані радіаційні пояси Землі, для яких характерна наявність певного складу іонізуючого опромінення. Воно зумовлене потоками протонів з енергією від 0,1 МеВ до 300 МеВ та електронів з енергією від 0,04 МеВ до 5,5 МеВ. Густина цих потоків відповідно $2,9 \cdot 10^3 \div 3,9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ та $3,3 \cdot 10^5 \div 2,8 \cdot 10^1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Загальна іонізаційна доза електронного та протонного опромінення за 5 років експлуатації космічного апарата становить $2,2 \cdot 10^6$ рад [6, 7].

Конструкція магнітометричного модуля, в якому використовуються радіаційно стійкі сенсори, зображена на рис. 2, принципова електрична схема – на рис. 3.

Основним елементом магнітометричного модуля є перетворювач магнітного поля (1), в якості якого використовується перетворювач Холла. До складу магнітометричного модуля входять також: підсилювач (3) типу AD8552 фірми Analog Device; стабілізатор напруги (2) типу TLE4264G фірми Siemens для узгодження живлення магнітометричного модуля з бортовою мережею живлення космічного апарата; конденсатори стабілізатора напруги та резистори для забезпечення роботи перетворювача Холла та операційного підсилювача. Всі елементи електричної принципової схеми розпаяні на друкованій платі (5) діаметром 15 мм, яка після налагодження заливається відповідним компаундом і монтується в легкий алюмінієвий корпус (7). Друкована плата (5) через монтажне кільце (6) притискається до корпусу (7) кришкою (8). Для електричного під'єднання магнітометричного модуля використовуються гнучкі виводи (4) з дроту МГТФ-0,07.

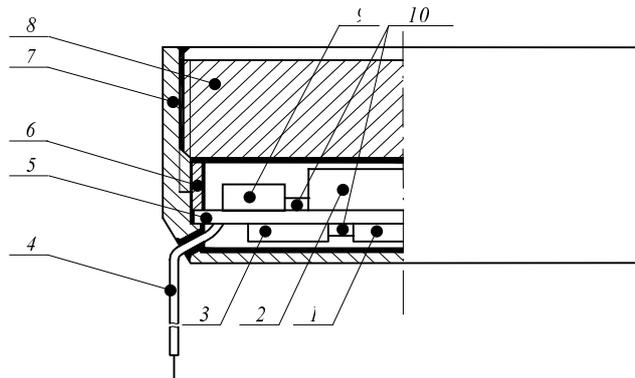


Рис. 2. Конструкція та склад магнітометричного модуля:
 1 – перетворювач магнітного поля; 2 – стабілізатор напруги; 3 – підсилювач операційний;
 4 – виводи; 5 – плата друкована; 6 – кільце монтажне; 7 – корпус; 8 – кришка;
 9 – конденсатор; 10 – резистори

Конструктивне поєднання перетворювача Холла з підсилювачем і стабілізатором напруги дає змогу: підвищити магнітну чутливість перетворювача до необхідного рівня; збільшити корисний вихідний сигнал при зменшенні вихідного опору перетворювача, що сприяє підвищенню завадостійкості інформаційного сигналу; пом'якшити вимоги до джерела живлення перетворювача Холла; відтворювати модулі з мінімальними відхиленнями від нормованих значень магнітної чутливості та залишкової напруги.

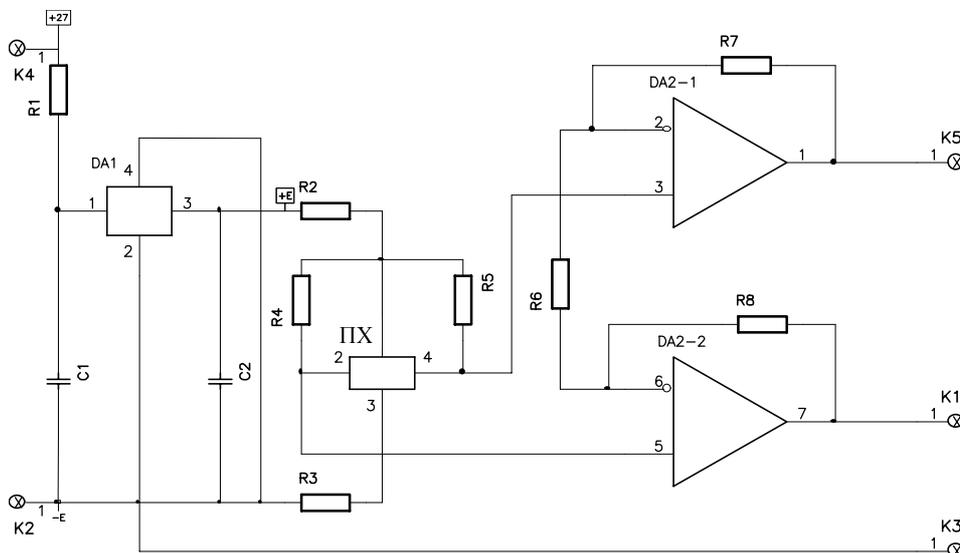


Рис. 3. Схема електрична принципова модуля магнітометричного:
 C1, C2 – конденсатори; DA1 – мікросхема стабілізатора напруги типу TLE4264G;
 DA2 – мікросхема операційного підсилювача типу AD8552; K1 □ K5 – виводи;
 R1 □ R8 – резистори; ПХ – перетворювач Холла

Вимоги до технічних характеристик магнітометричного модуля диктуються умовами його експлуатації у відкритому космосі та параметрами магнітного виконавчого пристрою, до складу якого входить модуль. Серед них основними вимогами є:

1. Працездатність, тобто стабільність характеристик модуля в радіаційних умовах природних радіаційних поясів Землі. На висоті орбіти космічного апарата "EGYPTSAT-1", що становить 668 км., розташований радіаційний пояс Землі, для якого умови експлуатації магнітометричного модуля передбачають опромінення його в радіаційному поясі Землі. Передусім вплив іонізуючого опромінення повинен відчувати основний елемент магнітометричного модуля – перетворювач Холла [8]. Працездатність, тобто стабільність характеристик модуля при періодичній зміні температури навколишнього середовища в інтервалі температур від мінус 40°C до 60°C, який створюється на борту космічного апарата спеціальними теплозахисними екранами;

2. Достатня магнітна чутливість для контролю магнітної індукції магнітного виконавчого пристрою, яка становить на його торці $\pm (50 \pm 5)$ мТ;

3. Лінійність вихідного сигналу при флуктуаціях магнітної індукції в межах 10 % від номінального значення;

4. Довготривала стабільність технічних характеристик (не менше п'яти років);

5. Мінімальні габарити, вага та потужність споживання.

Основні технічні характеристики магнітометричного модуля наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики магнітометричного модуля

Технічна характеристика	Значення
Магнітна чутливість (K_B), В/Т	$\geq 10,0$
Значення диференціального вихідного сигналу ($U_{вих}$) при індукції магнітного поля 50 мТ, В	$\geq 0,5$
Нелінійність вихідного сигналу, %	0,25
Значення залишкової напруги (U_3), В	$\leq 0,005$
Струм споживання (I) при напрузі живлення 27В, А	0,007
Номінальна потужність споживання, Вт	0,2
Зміна вихідного сигналу, викликана зміною температури оточуючого середовища від мінус 40 до 60°C, %/°C	$\leq 0,1$
Допустиме значення напруги живлення, В	5,5 ÷ 45
Маса, кг	0,006
Габаритні розміри, мм	$\varnothing 17,2 \times 8,2$
Імовірність безвідмовної роботи протягом 50000 годин	0,995

Випробування магнітометричних модулів. Для створення надійних магнітометричних модулів із стабільними в довготривалих умовах експлуатації характеристиками були розроблені та реалізовані цикли випробувань експериментальних зразків модуля. При цьому декілька партій магнітометричних модулів, кожна з яких складалася з 12 експериментальних зразків, підлягали випробуванням в умовах, параметри яких значно перевищували параметри реальних умов експлуатації.

Наприклад, для отримання стабільних характеристик у робочому інтервалі температур від мінус 40°C до 60°C серія зразків модулів проходила випробування в розширеному по відношенню до робочого інтервалі температур: вони піддавалися багаторазовим термоударам у діапазоні як криогенних температур (від мінус 196°C до 20°C), так і в діапазоні підвищених

температур (від 20°C до 125°C). При цьому в розширеному інтервалі температур основна характеристика магнітометричного модуля – його магнітна чутливість не змінювалася більше ніж на 1 %. У робочому інтервалі температур стабільність характеристики модуля була не гірше ніж 0,5 %.

Так само досліджувалася працездатність модуля в розширеному по відношенню до робочого інтервалі зміни напруги живлення. Робоча напруга живлення магнітометричного модуля в реальному режимі експлуатації може змінюватися від 21В до 34В. Випробовування в розширеному інтервалі напруги живлення від 6В до 40В показали, що зміна значень вихідного сигналу модуля при цьому не перевищує 0,5 %.

Значення іншої важливої характеристики – коефіцієнта нелінійності – залишилося практично незмінним в інтервалі магнітної індукції ± 400 мТ, який значно ширший від робочого інтервалу магнітної індукції на торці магнітного виконавчого пристрою, який становить лише $\pm(50\pm 5)$ мТ.

Висновки. Отримані в роботі характеристики перетворювачів Холла показали, що при оптимальних концентраціях вільних носіїв заряду $(3\div 8)\cdot 10^{17}$ см⁻³, які забезпечуються легуванням оловом під час технологічного процесу вирощування тонких плівок InSb, їх радіаційна стійкість є достатньо високою.

Радіаційна стійкість напівпровідникового перетворювача Холла забезпечує стабільну роботу модуля в умовах природних радіаційних поясів Землі на висоті орбіти мікросупутника.

Висока стабільність та відтворюваність характеристик модуля підтверджена його випробуваннями в розширених по відношенню до робочих інтервалах температури, магнітної індукції, напруги живлення та радіаційних навантажень.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про перспективність у подальшому розширення функцій магнітометричного модуля від контрольних до вимірювальних та використання його в системі зворотного зв'язку для підвищення точності орієнтації космічного апарата.

1. Коваленко А.П. *Магнитные системы управления космическими аппаратами.* – М., “Машиностроение”, 1975г.
2. Bolshakova I., Moskovets T., Krukovsky S., Zayachuk D., *Radiation resistant microcrystals and thin films of III-V semiconductors // Materials Science & Engineering.* – 2000. – В 69-70. – Р. 441 – 443.
3. Bolshakova I. *Semiconductor sensor materials stable under conditions of hard ionizing radiation // Book of abstracts. 4th European Magnetic Sensor & Actuator Conference (EMSA 2002) – Athens (Greece) – 2002 – s7-p8.*
4. Bolshakova I., Moskovets T., Bolshakov M., Matkovski A., Makoveev V., Zamiatin N., Karpukhin A., Lachinov V. *Influence of neutron irradiation on magnetic field sensors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity.* – 2000. – V. 10. - №.1. – Р. 1407 – 1409.
5. Bolshakova I., Krukovskii S., Holyaka R., Matkovskii A., Moroz A. *Ways of providing radiation resistance of magnetic field semiconductor sensors // Radiation Physics and Chemistry – 61 (2001) – pp.743-745.*
6. ГОСТ 25645.139-86. *Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно – энергетического распределения плотности потока электронов.*
7. ГОСТ 25645.138-86. *Пояса Земли радиационные естественные. Модель пространственно – энергетического распределения плотности потока протонов.*
8. Кулаков В.М., Ладыгин Е.А., Шаховцов В.И. *Действие проникающей радиации на изделия электронной техники.* – М., Соврадио, 1980.