

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЗАЩИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

М. В. Кожухов, К. С. Осикова

Рассмотрена возможность применения активной системы электромагнитной защиты космического аппарата от ионизирующего излучения космического пространства. Приведены параметры магнитного поля для защиты космического аппарата от ионизирующих излучений. Рассмотрено современное состояние развития методов защиты от ионизирующего излучения космического пространства. Представлены результаты моделирования магнитного поля, а также выполнена оценка эффективности защиты от заряженных частиц.

Ключевые слова: система электромагнитной защиты, сверхпроводники, магнитное поле, заряженные частицы.

Введение

При функционировании космического аппарата (КА) на высоких орбитах, а также при межпланетных полетах особенно актуальна проблема обеспечения защиты от проникающей радиации как для аппаратуры, так и для экипажа. Современные методы защиты позволяют обеспечивать эффективную защиту бортовой аппаратуры от проникающей радиации и гарантировать срок ее службы более 10 лет. Однако современные решения не позволяют обеспечить большие сроки нахождения человека на космическом корабле, что особенно важно для межпланетных полетов. Поэтому необходимо разрабатывать более эффективные методы защиты от воздействия ионизирующего излучения космического пространства (ИИКП), и наиболее перспективным является создание магнитного поля вокруг КА. Магнитное поле правильной конфигурации вокруг КА позволит существенно уменьшить потоки заряженных частиц, которые определяют уровень поглощенной дозы [1 – 3].

Современные методы обеспечения радиационной стойкости космического аппарата

В космическом пространстве солнечной системы регистрируются огромные потоки заряженных частиц различной природы. ИИКП состоят из потоков первичных заряженных ядерных частиц (электронов, протонов и тяжелых заряженных частиц), характеризующихся определенным спектрально-энергетическим распределением, а также вторичных ядерных частиц, которые являются продуктами ядерных реакций, вызванных первичными ядерными частицами в результате их взаимодействия с элементами конструкций аппаратуры КА. Основные эффекты воздействия ИИ обусловлены ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц в изделиях электронной компонентной базы и организме человека.

Основным методом защиты бортовой аппаратуры и экипажа КА от ИИКП является экранирова-

ние защищаемых объектов с помощью конструктивных материалов и дополнительных защитных материалов, которые позволяют снизить уровни потоков заряженных частиц. Однако необходимо учитывать, что взаимодействие электронного излучения с элементами конструкции КА приводит к образованию рентгеновского излучения, которое обладает высокой проникающей способностью и может оказывать влияние на человеческий организм. Поэтому для увеличения длительности пилотируемых полетов и срока активного существования КА необходимо разрабатывать новые варианты защиты от воздействия ИИКП. Одним из таких методов является электромагнитная защита, которая позволит отклонять заряженные частицы от защищаемого объекта и тем самым обеспечивать требуемый уровень поглощенной дозы внутри объекта.

В настоящее время ведется разработка электромагнитной защиты в NASA [1, 2]. Представленная конструкция электромагнитной защиты обладает существенными недостатками, а именно: развертываемая конструкция, предназначенная для небольшого обитаемого модуля, с возможностью стыковки к окололунной станции Gateway оснащена сверхпроводящими электромагнитами огромных размеров, которые находятся на небольшом расстоянии от самого КА. Такое расположение сверхпроводящих электромагнитов, магнитная индукция которых достигает 10 Тл, будет оказывать негативное воздействие на бортовую аппаратуру и на здоровье экипажа. При этом варианты защиты аппаратуры и экипажа внутри КА от сильных магнитных полей не рассматриваются.

Существует математическая модель «магнитосферного дипольного тора» NASA [3], предназначенная для защиты КА от галактических космических лучей. Минус такой тороидальной конструкции в том, что она не позволяет обеспечить защиту со всех направлений, а также является сложной

конструктивно-сборочной задачей и требует больших как энергетических, так и финансовых затрат.

Концепция электромагнитной защиты, представленная в работе [4], заключается в конструктивном расположении мини-магнитосферы в центре КА. Данная статья была посвящена влиянию плазмы на эффективность электромагнитного экранирования для защиты космических объектов, поэтому не рассматривает ряд важных факторов, таких как соблюдение правил электромагнитной обстановки внутри КА, экранирование магнитного поля конструкцией КА и др.

В связи с этим целью данной работы является проработка конструкции системы электромагнитной защиты (СЭЗ), ее состава и конфигурации магнитного поля, способного отклонять заряженные частицы ИИКП с минимальными энергетическими затратами и возможностью обеспечить приемлемую электромагнитную обстановку внутри КА для бесперебойного функционирования бортовой аппаратуры и минимального вреда для здоровья экипажа.

Система электромагнитной защиты

Применение магнитной защиты от воздействия ИИКП является более эффективным методом, чем использование дополнительных материалов, так как не приводит к возникновению вторичного излучения, в том числе и рентгеновского излучения. Однако требует проработки конфигурации магнитного поля, которое позволяет эффективно экранировать защищаемый объект от ИИКП и минимизировать влияние сильных магнитных полей на бортовую аппаратуру и организм человека.

Применение обычных постоянных электромагнитов позволяют получить магнитное поле с индукцией около 1,5 – 2 Тл непосредственно внутри катушки, которое быстро ослабляется при удалении от электромагнита. Такое магнитное поле недостаточно для эффективной защиты от воздействия электронов с энергией более 1 МэВ и протонов с энергиями более 50 МэВ (рис. 1, 2). Но с помощью применения электромагнитов со специальными материалами, обладающими сверхпроводимостью [5], стало возможно создать магнитное поле с магнитной индукцией до десятков Тл. Такие электромагниты эффективно применяются для циклотронов, специальных магнитных систем [6], для удержания плазмы [7] и ряда других приложений.

С помощью сверхпроводящих электромагнитов на базе сверхпроводящей ленты второго поколения на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП-ленты второго поколения), позволяющих получить около 20 Тл при температурах кипения жидкого гелия, возможно создать магнитосферу вокруг КА, способную защитить

аппаратуру и экипаж от негативного воздействия на них проникающей радиации.

Для того, чтобы обеспечить защиту КА от ИИКП, необходимо определить эффективный размер и силу магнитного поля достаточного для отклонения заряженных частиц разных энергий. Для этого необходимо рассчитать ларморовский радиус заряженной частицы при движении в магнитном поле:

$$R = \frac{m_{\text{ч}}}{\sqrt{1 - \frac{V_{\text{ч}}^2}{c^2}}} \cdot \frac{V_{\text{ч}}}{q_{\text{ч}} B},$$

где $q_{\text{ч}}$ – заряд частицы; $V_{\text{ч}}$ – скорость частицы; $m_{\text{ч}}$ – масса частицы; c – скорость света; B – индукция магнитного поля.

На рис. 1 и 2 представлены результаты расчетов ларморовского радиуса для электронного и протонного излучения разных энергий. Из данных расчетов видно, что применение магнитного поля с магнитной индукцией более 2 Тл с линейным размером (толщина электромагнитного поля) более 2 см позволит отсечь электронное излучение с энергией до 10 МэВ. Отклонение протонного излучения магнитным полем с магнитной индукцией 2 Тл возможно только при больших размерах магнитного поля, а именно более 3,5 м. Для создания магнитного поля такой конфигурации необходимо применять сверхпроводящий магнит с максимальной магнитной индукцией около 15 Тл.

Для создания магнитной защиты КА с применением сверхпроводящих электромагнитов требуется обеспечить несколько дополнительных условий. Первым обязательным условием является обеспечение криогенной температуры электромагнитов от 4 до 77 К. Поэтому в состав СЭЗ должна входить термостатирующая криогенная система. Криогенная система (рис. 3) должна состоять из насоса, рефрижератора, рабочего тела (жидкий гелий с температурой кипения 4 К или жидкий азот с температурой кипения 77 К). В качестве рефрижератора может быть использован радиационный холодильник. Однако применение радиационного холодильника требует дополнительных исследований.

Вторым важным условием применения СЭЗ является необходимость обеспечения минимальных уровней магнитной индукции внутри жилых отсеков [8], а также защиты бортовой аппаратуры от сильных магнитных полей. Поэтому для исключения влияния высоких магнитных полей на работу бортовой аппа-

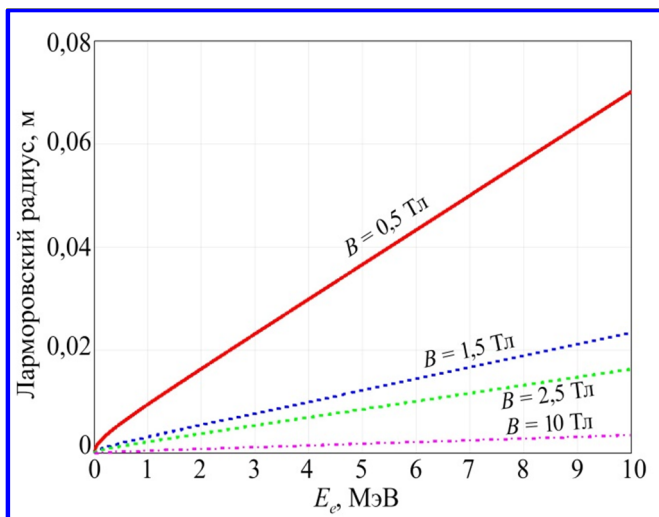


Рис. 1. Ларморский радиус электрона с энергией до 10 МэВ в разных магнитных полях

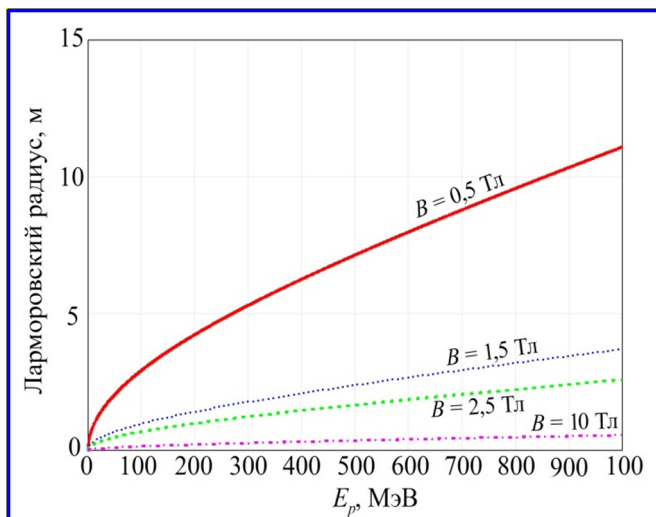


Рис. 2. Ларморский радиус протона с энергией до 1000 МэВ в разных магнитных полях

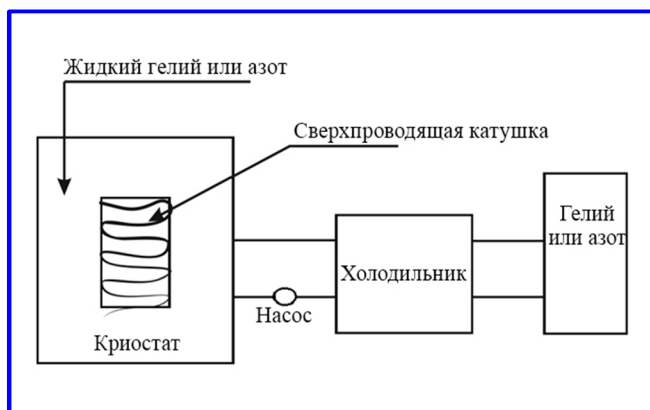


Рис. 3. Схематичное изображение состава одного электромагнита с криогенной установкой

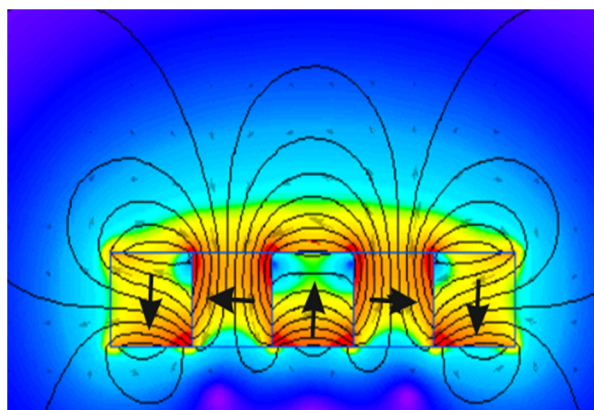


Рис. 4. Однонаправленное магнитное поле, созданное по схеме Хальбаха

ратуры и жизнедеятельность человека необходимо создать определенную конфигурацию магнитного поля. Для этого вокруг защищаемого объекта необходимо расположить не менее шести сверхпроводящих электромагнитов по схеме Хальбаха (рис. 4). Отличительной особенностью схемы Хальбаха является эффект концентрации магнитного потока либо внутри, либо снаружи магнитной системы.

В данном случае схема Хальбаха позволяет создать усиленное однонаправленное магнитное поле с помощью мультинаправленных векторов снаружи системы. На рис. 5 представлено схематичное расположение сверхпроводящих электромагнитов для обеспечения защиты КА от ИИКП.

На рис. 6 представлен расчет магнитного поля, необходимого для защиты КА. Вокруг КА расположены сверхпроводящие электромагниты по схеме Хальбаха в количестве 12 штук. Размеры катушки составляют 30 × 60 см. Расстояние катушек от КА составляет 3,5 м.

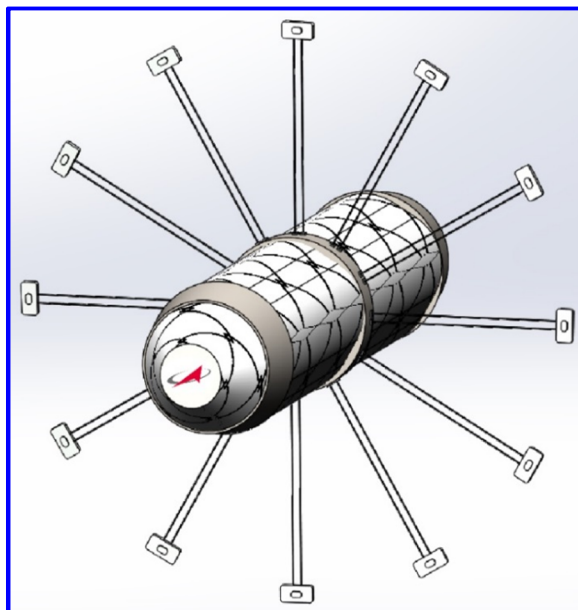


Рис. 5. Внешний вид космического аппарата с системой электромагнитной защиты

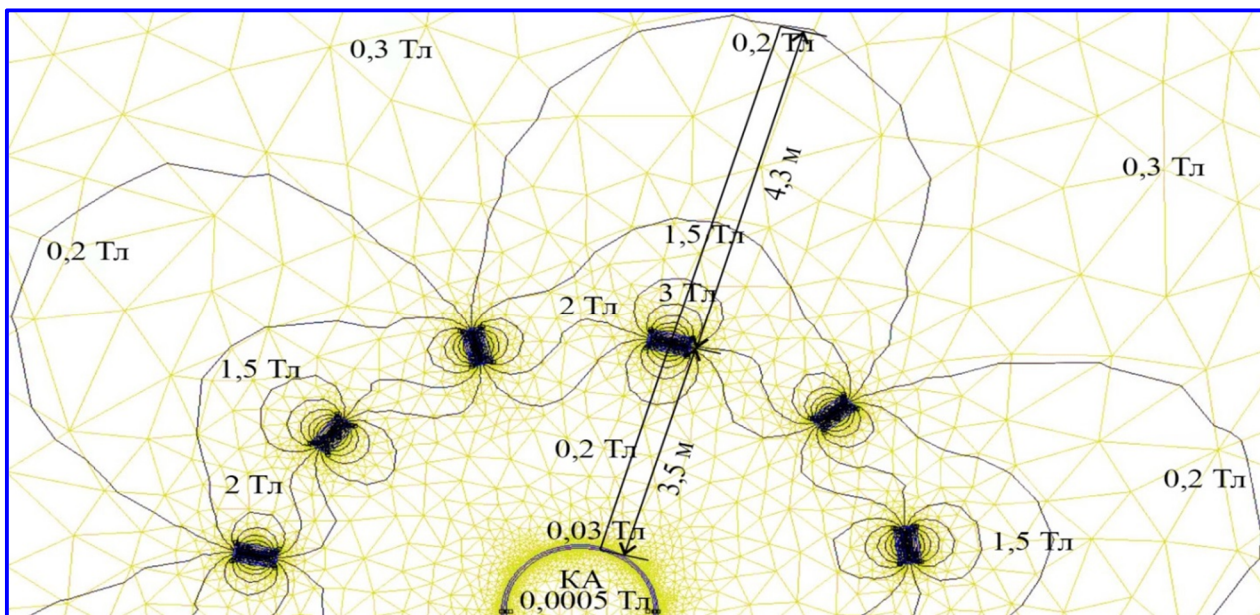


Рис. 6. Моделирование магнитного поля вокруг космического аппарата

Из рис. 6 видно, что магнитное поле, сформированное сверхпроводящими электромагнитами, направлено наружу и обладает магнитной индукцией от 0,5 до 15 Тл. При этом внутри системы магнитное поле обладает магнитной индукцией от 0,2 до 0,03 Тл.

Третьим важным условием является управление СЭЗ, которое осуществляется с использованием электронного блока управления. Электронный блок управления необходим для контроля температуры и токов сверхпроводящих электромагнитов, коммутации питания, управления электромагнитами, а также для хранения и передачи телеметрии.

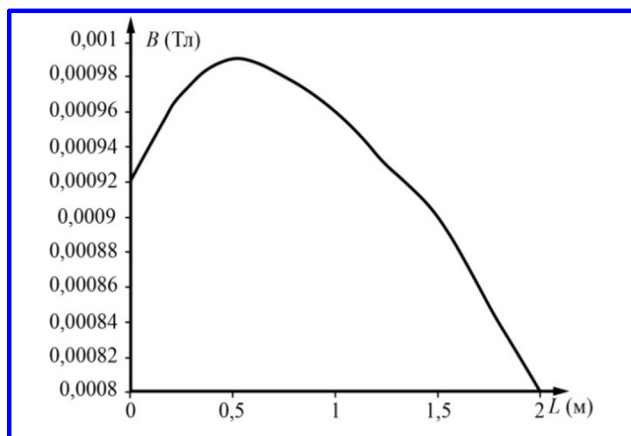
Дополнительное экранирование космического аппарата

Понижение электромагнитной нагрузки внутри КА до $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, что соответствует уровню маг-

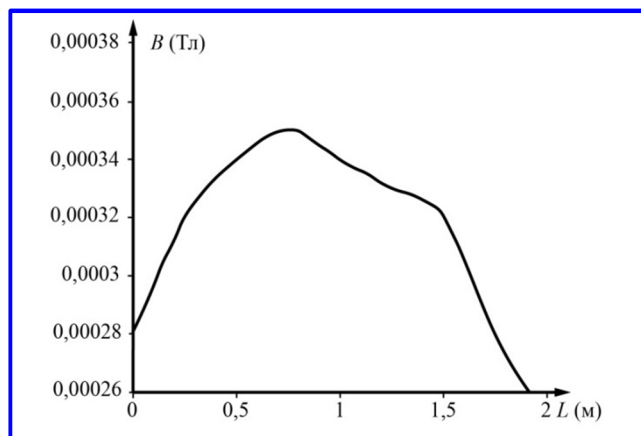
нитного поля на поверхности Земли, является не менее важной задачей, чем радиационная стойкость КА.

Для более эффективного экранирования КА от магнитного поля, создаваемого СЭЗ, необходимо применять несколько слоев защиты [9]. Первый слой должен состоять из материала, который поглощает магнитное поле (например, пермаллой), а второй слой должен обладать свойствами отражения магнитного поля (например, сталь).

На рис. 7 приведены результаты моделирования магнитного поля внутри КА с применением двухслойного экранирования КА. Первый слой (внешний) состоит из пермаллоя, а второй слой (внутренний) из стали. Расчет магнитного поля был проведен методом конечных элементов с помощью программы FEMM.



а



б

Рис. 7. Магнитная индукция внутри космического аппарата с защитным слоем 5 (а) и 10 (б) см

На рис. 7 приведены результаты моделирования магнитного поля внутри КА с двухслойным экранированием пермаллоя и стали с толщиной 5 (а) и 10 (б) см соответственно.

Из графиков, изображенных на рис. 7, видно, что увеличение толщины слоев экрана с 5 до 10 см позволяет уменьшить магнитную индукцию внутри КА более чем в 2 раза. При этом можно уменьшить магнитную индукцию до $3,5 \cdot 10^{-4}$ Тл. Кроме того, в случае нештатной ситуации, которая вызовет отключение СЭЗ, малая толщина экранирующего слоя не обеспечит необходимые уровни дозовых нагрузок, что может привести к накоплению смертельной дозы радиации для экипажа. В связи с вышеизложенным целесообразно применять экран с толщиной слоев не менее 10 см. Таким образом, будет обеспечена также пассивная защита, которая в случае отключения СЭЗ сможет продолжить защищать от проникающей радиации экипаж в полете. Стоит также учитывать, что для каждого КА с СЭЗ необходим индивидуальный расчет пассивной защиты. В случаях, когда возможна неблагоприятная электромагнитная обстановка на борту КА, необходимо применение трех и более слоев металла.

Выводы

В работе были проведены исследования по возможности создания СЭЗ КА от воздействия ИИКП:

1. Рассмотрена конструкция СЭЗ КА от ИИ, которая включает в себя 12 сверхпроводящих электромагнитов, расположенных вокруг КА по схеме Хальбаха.
2. Установлено, что сверхпроводящие электромагниты, расположенные по схеме Хальбаха вокруг КА, позволяют создать магнитное поле однонаправленной конфигурации.
3. Расчеты показали, что для отклонения заряженных частиц с типичными энергиями для солнечного космического излучения и естественных радиационных поясов Земли необходимо создать магнитное поле с индукцией не менее 15 Тл.
4. Рассмотрены варианты экранирования магнитного поля СЭЗ пассивной защитой КА с использованием пермаллоя и стали. Пермаллой обладает свойством поглощения магнитного поля, а сталь, наоборот, – отражением. Такое сочетание

слоев позволяет создать внутри КА электромагнитную обстановку, близкую к земным условиям.

Представленные в работе результаты позволяют сделать заключение о возможности применения СЭЗ КА при условии решения ряда задач, таких как обеспечение правильной конфигурации магнитного поля, обеспечение экранирования КА от сильных магнитных полей, обеспечение криогенных температур в условиях космического пространства и др.

Литература

1. Desiati P. CREW HaT: A Magnetic Shielding System for Space Habitats / P. Desiati, E. D'Onghia // arXiv preprint arXiv:2209.13624. – 2022. – URL : <https://arxiv.org/abs/2209.13624>.
2. Magnet Architectures and Active Radiation Shielding Study (MAARSS). Final Report for NASA Innovative Advanced Concepts Phase II / S. C. Westover, R. Meinke, S. Nerolich [et al.]. – 2019. – URL : <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190002579>.
3. Slough J. Spacecraft Scale Magnetospheric Protection from Galactic Cosmic Radiation / J. Slough // 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). – 2022. – С. 1 – 19.
4. An exploration of the effectiveness of artificial mini magnetospheres as a potential solar storm shelter for long term human space missions / R. A. Bamford, B. Kellet, J. Bradford [et al.] // Acta astronautica. – 2014. – Т. 105. – №. 2. – С. 385 – 394.
5. Tinkham M. Introduction to superconductivity / M. Tinkham. – Second edition. – North Chelmsford : Dover Publications, 2004. – 480 p.
6. Разработка сверхпроводящих композиционных материалов для специальных магнитных систем / Е. А. Дергунова, Д. К. Фигуровский, И. М. Абдюханов [и др.] // Международная научно-техническая конференция «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» («МНТК ФТИ-2017»). – 2017. – С. 37 – 46.
7. Радиационные эффекты в космосе. Ч. 1. Радиация в околоземном космическом пространстве / И. П. Безродных, А. П. Тютнев, В. Т. Семёнов. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2014. – 106 с.
8. Кечиев Л. Н. Электрофизические основы конструирования электронной аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – Москва : Грифон, 2020. – 480 с.
9. Кечиев Л. Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – Москва : Грифон, 2019. – 719 с.

Поступила в редакцию 30.09.2022

Максим Владимирович Кожухов, кандидат технических наук, начальник лаборатории технической физики.

Кристина Сергеевна Осикова, аспирант, научный сотрудник лаборатории технической физики.

Т. (495) 366-38-38. E-mail: lab188@mcc.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

SYSTEM FOR ELECTROMAGNETIC PROTECTION OF SPACECRAFT FROM IONIZING SPACE RADIATION

M. V. Kozhukhov, K. S. Osikova

The article deals with possibility of application of an active system for electromagnetic protection of spacecraft from ionizing space radiation. The parameters of the electromagnetic field for spacecraft protection from ionizing radiation are specified. The current state of the methods of protection from ionizing space radiation is considered. The results of modelling of the magnetic field are presented, and efficiency of protection from charged particles is assessed.

Key words: electromagnetic protection system, superconductors, magnetic field, charged particles.

References

1. Desiati P. CREW HaT: A Magnetic Shielding System for Space Habitats / P. Desiati, E. D'Onghia // arXiv preprint arXiv:2209.13624. – 2022. – URL : <https://arxiv.org/abs/2209.13624>.
2. Magnet Architectures and Active Radiation Shielding Study (MAARSS). Final Report for NASA Innovative Advanced Concepts Phase II / S. C. Westover, R. Meinke, S. Nerolich [et al.]. – 2019. – URL : <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190002579>.
3. Slough J. Spacecraft Scale Magnetospheric Protection from Galactic Cosmic Radiation / J. Slough // 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). – 2022. – P. 1 – 19.
4. An exploration of the effectiveness of artificial mini magnetospheres as a potential solar storm shelter for long term human space missions / R.A. Bamford, B. Kellet, J. Bradford [et al.] // Acta astronautica. – 2014. – V. 105. – No. 2. – P. 385–394.
5. Tinkham M. Introduction to superconductivity / M. Tinkham. – Second edition. – North Chelmsford : Dover Publications, 2004. – 480 p.
6. Development of superconducting composite materials for special magnetic systems / E. A. Dergunova, D. K. Figurovskiy, I. M. Abdyukhanov [et al.] // International Scientific and Technical Conference 'Computer Science and Technologies. Innovative Technologies in Industry and Computer Science' ('MNTK FTI-2017'). – 2017. – P. 37 – 46.
7. Radiation effects in space. Part 1. Radiation in near-Earth space / I. P. Bezrodnykh, A. P. Tyutnev, V. T. Semyonov. – Moscow : VNIEM Corporation JSC, 2014. – 106 p.
8. Kechiev L. N. Electrophysical principles of design of electronic equipment / L. N. Kechiev. – Moscow : Grifon, 2020. – 480 p.
9. Kechiev L. N. Radioelectronic equipment shielding / L. N. Kechiev. – Moscow : Grifon, 2019. – 719 p.

Maksim Vladimirovich Kozhukhov, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Applied Physics Laboratory. Kristina Sergeyevna Osikova, Ph. D. Student, Researcher of Applied Physics Laboratory. Tel.: +7 (495) 366-38-38. E-mail: lab188@mcc.vniem.ru. (JC «VNIEM Corporation»).