

УДК 629.78

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ НА ПОВЕРХНОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2012 Н. Д. Сёмкин, В. Л. Балакин, В. В. Брагин

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В статье рассмотрено влияние факторов космической среды на космический аппарат с низкой орбитой и углом наклона порядка 90° . Предложена методика определения мест возможного возникновения электростатических разрядов, проведён расчёт потенциалов поверхности и моделирование электромагнитного поля.

Космический аппарат, факторы космической среды, электростатический разряд, электромагнитное поле, моделирование.

Введение

Длительное существование на околоземной орбите космических аппаратов (КА), функционирующих в условиях воздействия факторов космической среды, требует обеспечения их высокой надёжности. Основной эксплуатационной характеристикой КА является его способность выполнять поставленные целевые задачи в течение требуемого срока активного существования.

В результате воздействия широкого спектра факторов космического пространства происходит зарядка КА при изменении свойств окружающей плазмы. Вследствие бомбардировки его заряженными частицами, особенностей конструкции и применения материалов с различными электрофизическими свойствами на поверхности КА в процессе перезарядки возникает дифференциальный заряд. В результате разности потенциалов поверхности, а также в местах попадания в КА твёрдых заряженных микрочастиц (микрометеороиды, космический мусор) возможно возникновение электростатических разрядов (ЭСР), что приводит к возникновению паразитного электромагнитного

поля (ЭМП), которое вносит помехи в работу бортовой аппаратуры (БА). Также происходит проникновение электронов в отсеки КА с негерметичным исполнением через дренажные отверстия. По оценке экспертов [1], до 50% сбоев в функционировании и отказов БА вызваны поражающим действием электризации.

Следовательно, одной из актуальных задач является моделирование процессов электризации и их влияние на КА. Это позволяет определить возможные места возникновения ЭСР и влияние паразитного значения ЭМП на работоспособность БА. Имея эти данные, на этапе конструирования можно внести доработки с целью уменьшения вероятности возникновения ЭСР, а также провести компоновку БА внутри отсека таким образом, чтобы паразитное значение ЭМП и проникновение электронов через дренажные отверстия не превышало порогового значения уровня помех и не влияло на работоспособность БА.

В данной работе предложена методика определения мест возможного возникновения ЭСР, проведён расчёт потенциалов поверхности и моделирование ЭМП.

1. Трёхмерная твёрдотельная модель КА

С электрофизической точки зрения КА представляет собой проводящий металлический замкнутый гермоконтейнер, внутри и снаружи которого располагается БА с разветвлённой кабельной сетью. Для обеспечения теплового режима внешних и внутренних систем спутника его поверхность на 98% покрыта различными диэлектрическими материалами.

Модель геометрически сложного КА создаётся в виде ансамбля различных трёхмерных тел, каждое из которых, в свою очередь, представляется в виде совокупности базовых элементарных поверхностей, математически описываемых как двумерные и трёхмерные элементарные поверхности: плоскость, тор, эллипсоид, эллиптический цилиндр, эллиптический конус и эллиптическая диафрагма с отверстием. Каждая базовая поверхность

представляется в виде одной или нескольких элементарных математических поверхностей. Например, сфера моделируется одним эллипсоидом, имеющим одинаковые полуоси. Полусферический фрагмент моделируется, в зависимости от реальной конструкции, только полуэллипсоидом (в виде открытой чашки) или полуэллипсоидом, закрытым диафрагмой. Цилиндрическая поверхность может быть незамкнутой. Усечённый замкнутый конус моделируется с помощью фрагмента эллиптического конуса и двух диафрагм. Параллелепипед моделируется в виде набора шести плоскостей.

На расчётную модель (рис. 1) воздействуют следующие факторы: авроральные электроны со средней энергией спектров 5-20 кЭВ и концентрацией 1-10 см⁻³, а также солнечное электромагнитное излучение, характеристики которого приведены в табл. 1.

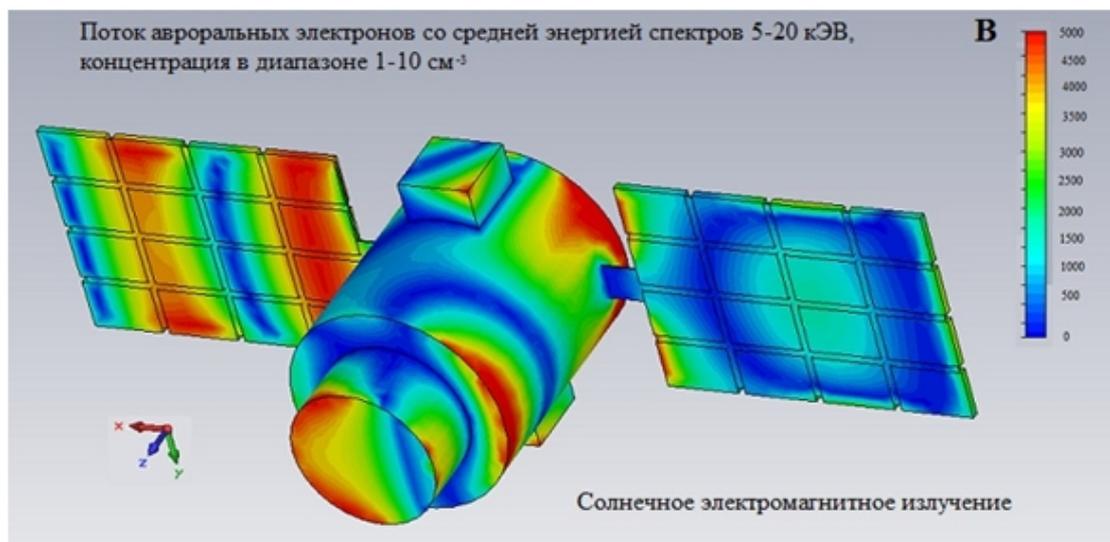


Рис.1. Расчётная модель КА под воздействием факторов космической среды

Таблица 1. Распределение плотности потока энергии в спектре солнечного излучения

Интервал длин волн, нм	Вид излучения	Плотность потока энергии, Вт/м ²	Доля от общего потока, %	Энергия квантов, эВ
10–400	Ультрафиолетовое излучение	126	9,0	124–3,1
400–760	Видимое излучение	644	46,1	3,1–1,6
760–5000	Инфракрасное излучение	619	44,4	1,6–0,2

2. Расчёт потенциала поверхности КА

Значения потенциалов и напряжённости электрического поля на элементах конструкции КА зависят, в первую очередь, от параметров внешних воздействующих факторов: ионосферной плазмы, потока авроральных электронов, солнечного излучения – и от значений вторично-эмиссионных коэффициентов материалов, находящихся на поверхности аппарата. При выполнении моделирования использована динамическая модель анализа процессов электризации при варьировании условий воздействия внешних факторов на КА [2]. Математическая связь указанных величин устанавливается с помощью уравнения полного тока для поверхности КА.

Уравнение для полного тока J , текущего через некоторый элемент поверхности тела, может быть представлено в следующем виде:

$$J = J_e - J_p - (dJ_e + hJ_e + gJ_p + J_{ph}), \quad (1)$$

где J_e – электронный ток плазмы; J_p – протонный ток плазмы; d – коэффициент истинной вторичной электронной эмиссии; h – коэффициент обратного отражения электронов; g – коэффициент ионно-электронной эмиссии, J_{ph} – ток фотоэлектронной эмиссии.

Равновесное значение потенциала рассматриваемого элемента поверхности определяется путём решения уравнения (1) при условии $J = 0$. Первичные токи, текущие через поверхность тела, движущегося в космической среде, непосредственно зависят от физических характеристик среды. При этом для рассматриваемой задачи наиболее важными параметрами, характеризующими окружающую космическую плазму, являются:

- длина дебаевского экранирования D , с помощью которой учитывается экранирование электрического поля объекта окружающей его плазменной оболочкой;
- скорости теплового движения электронов и ионов плазмы, от соотноше-

ния которых со скоростью движения объекта в значительной степени зависят величины потоков электронов и ионов, попадающих на поверхность объекта.

Компьютерное моделирование электризации принятой модели выполнялось по схеме, имеющей следующую последовательность операций:

- модель КА разбивается на базовые поверхности;
- на основании данных об окружающей космической среде рассчитываются значения равновесных потенциалов для каждой базовой элементарной поверхности КА;
- по найденным значениям потенциалов базовых элементарных поверхностей рассчитывается структура электрического поля в окрестности КА;
- путём вычисления и суммирования траекторий электронов и ионов окружающей плазмы, движущихся к поверхности КА, рассчитываются локальные первичные токи для заданных базовых элементарных поверхностей;
- на основании найденных величин локальных первичных токов и задаваемых данных о вторично-эмиссионных свойствах материалов поверхности КА вычисляются локальные вторичные токи;
- рассчитываются токи, связывающие между собой базовые элементарные поверхности, их фрагменты и включённые в модель КА элементы конструкции на основании заданных параметров электропроводности материалов;
- решается система уравнений баланса первичных и вторичных токов, составленная из уравнений баланса для каждого элемента поверхности КА, в результате чего определяются новые значения потенциалов и локальных токов для каждого элемента;
- реализуется итерационный цикл решения приведённой ниже системы уравнений до наступления состояния баланса токов на каждом элементе поверхности, что позволяет получить равновес-

ное распределение потенциала по поверхности КА.

Расчёт основывается на следующей системе уравнений.

1. Потенциал $U(r)$ в точке \mathbf{r} в момент времени t удовлетворяет уравнению Пуассона:

$$\Delta U(\mathbf{r}, t) = -4\pi r(\mathbf{r}, t), \quad (2)$$

где r – объёмная плотность заряда.

В случаях, когда пространственным зарядом можно пренебречь, используется уравнение Лапласа.

2. Функции распределения $f_a(v, r, t)$ первичных и вторичных частиц по скоростям v удовлетворяют бесстолкновительному уравнению Власова:

$$v \frac{\partial f_a}{\partial r} + \frac{q_a}{m_a} \frac{\partial U}{\partial r} \frac{\partial f_a}{\partial v} = 0, \quad (3)$$

где индекс a соответствует частицам с массой m_a , зарядом q_a и скоростью \mathbf{v} .

3. Процессы взаимодействия заряженных частиц и солнечного излучения с поверхностью КА описываются системой уравнений связи:

$$f_a(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) = \int d\mathbf{x} (\mathbf{v}\mathbf{n}) \sum_{a'} F^{a \rightarrow a'}(\mathbf{v}, \mathbf{v}', \mathbf{n}) f_{a'}(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t), \quad (4)$$

где коэффициенты $F^{a \rightarrow a'}(\mathbf{v}, \mathbf{v}', \mathbf{n})$ являются вероятностными характеристиками конкретных процессов, например, вторично-эмиссионных.

4. Плотность пространственного заряда вокруг КА определяется по соотношению:

$$r(\mathbf{r}, t) = \sum_a \int dv f_a(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t). \quad (5)$$

5. Плотность локального тока на поверхности КА с учётом внутренних токов проводимости вычисляется по формуле:

$$\mathbf{j}(\mathbf{r}, t, U) = \sum_a \int dv q_a (\mathbf{v}\mathbf{n}) f_a(\mathbf{v}, \mathbf{r}, t) + \mathbf{j}_{cond}(\mathbf{r}, t, U), \quad (6)$$

где $\mathbf{j}_{cond}(\mathbf{r}, t, U)$ – плотность токов проводимости.

6. Плотность заряда на диэлектрических поверхностях КА определяется по соотношению:

$$s(\mathbf{r}, t) = \int_{-\infty}^t J(\mathbf{r}, t') dt'. \quad (7)$$

7. Полный заряд, накопленный на КА, вычисляется по формуле:

$$Q(t) = \int_S dS \int_{-\infty}^t J(\mathbf{r}, t') dt'. \quad (8)$$

8. Для тонких диэлектрических покрытий на проводящем основании КА граничные условия для уравнения Пуассона записываются в приближении двойного электрического слоя:

$$\frac{e(r)}{d(r)} (U(\mathbf{r}, t) - U_c(t)) = 4\pi ps(\mathbf{r}, t), \quad (9)$$

где e – коэффициент диэлектрической проницаемости материала; d – толщина материала; $U_c(t)$ – потенциал металлической подложки, на которой расположен диэлектрик.

9. Уравнение движения заряженных частиц в электрическом поле КА имеет вид:

$$\frac{\partial r}{\partial t} = -\frac{e}{m} \cdot \frac{\partial U}{\partial r}. \quad (10)$$

Для численного решения уравнений в трёхмерном расчётном пространстве, которое дискретизируется с помощью объёмной сетки аналогично дискретизации поверхности КА, использован метод интегральных уравнений. В этом случае решается соответствующее интегральное уравнение, связывающее неизвестную поверхностную плотность зарядов и потенциал на поверхности КА:

$$U(r) = \int_S \frac{s(r')}{|r-r'|} dS' + \int_S \frac{m(r')((r-r')n)}{|r-r'|^3} dS' + \int_V \frac{r(r')}{|r-r'|} dV, \quad (11)$$

где $m(r)$ – плотность дипольного момента двойного электрического слоя в точке поверхности \mathbf{r} .

Для численного решения этого интегрального уравнения производится разложение рассматриваемых величин по базисным функциям. В результате получена система линейных уравнений относительно плотностей зарядов s_i на дискретных параметрических элементах модели КА:

$$\sum_j A_{ij} s_j = U_i^*, \quad (12)$$

где A_{ij} – матрица кулоновского взаимодействия элементов; U_i^* – «эффективный» поверхностный потенциал элемента, описывающий вклад в потенциал как от пространственного заряда, так и от дипольного момента.

В результате моделирования получена картина распределения потенциала на поверхности модели. Значение градиента потенциала в каждой точке определяется по шкале (рис. 1).

3. Расчёт напряжённости поля, возникающего в результате ЭСР

Моделирование последствий ЭСР на поверхности КА проводилось методом конечных разностей, в основе которого лежат дифференциальные уравнения n -го порядка. Метод позволяет перейти от решения краевой задачи для дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений относительно значений искомой функции на заданном множестве точек. Это достигается путём замены производных дифференциального уравнения на их конечно-разностную аппроксимацию [3].

Линейное дифференциальное уравнение второго порядка определяется на отрезке $[a, b]$ и имеет следующий вид:

$$\sum_{i=a}^b \left(\frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{h^2} + p(x) \left(\frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2h} \right) + q(x)u_i + R_i \right) = f(x), \quad (15)$$

$$u'(x) + p(x)u'(x) + q(x)u(x) = f(x) \quad (13)$$

$$x \in [a, b]$$

с граничными условиями:

$$\alpha_1 u(a) + \beta_1 u'(a) = \gamma_1,$$

$$\alpha_2 u(b) + \beta_2 u'(b) = \gamma_2.$$

Здесь u, u', u'' – составляющие функции напряжённости поля; $p(x), q(x), f(x)$ – известные функции; $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ – заданные постоянные, причём выполняется условие: $\alpha_i^2 + \beta_i^2 > 0, \quad i = 1, 2$.

Система дифференциальных уравнений решается заменой области непрерывного изменения аргумента дискретным множеством точек, т.е. на отрезке $[a, b]$ строится сетка:

$$\omega_k = \{a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b\}. \quad (14)$$

Дифференциальное уравнение и граничные условия аппроксимируются на сетке разностными уравнениями. Для этого:

- в каждом узле сетки x_i ($i=0, 1, \dots, n$) определяем сеточную функцию $y_i = y(x_i)$, $i=0, 1, \dots, n$;
- заменяем значения производной отношением конечных разностей;
- переходим от непрерывного дифференциального уравнения относительно функции $u = u(x)$ (аргумент x непрерывен) к разностной задаче относительно сеточной функции $y_i = y(x_i)$, $i=0, 1, \dots, n$;
- граничная задача заменяется системой алгебраических уравнений относительно сеточной функции $y_i = y(x_i)$, $i=0, 1, \dots, n$.

Таким образом, решение краевой задачи для дифференциального уравнения сведено к решению системы алгебраических уравнений вида:

где R_i – порядок погрешности аппроксимации.

Такая система будет линейной или нелинейной в зависимости от того, линейно (или нелинейно) исходное дифференциальное уравнение.

Для негерметичной модели КА с низкой орбитой и углом наклона порядка 90^0 в результате моделирования получена зависимость напряжённости поля от времени в каждой точке выбранной сетки (рис. 2). На рис.2а приведён пример

напряжённости поля вне отсека при ЭСР с напряжением 5 кВ. Наблюдается резкий скачок напряжённости до 450 В/м. На рис. 2б и 2в приведены примеры зависимости напряжённости поля от времени внутри отсека, соответственно до и после экранирования. После экранирования наблюдается значительное снижение уровня напряжённости, на рис.2в нет характерного скачка напряжённости, вызванного ЭСР, и помехи на уровне шума.

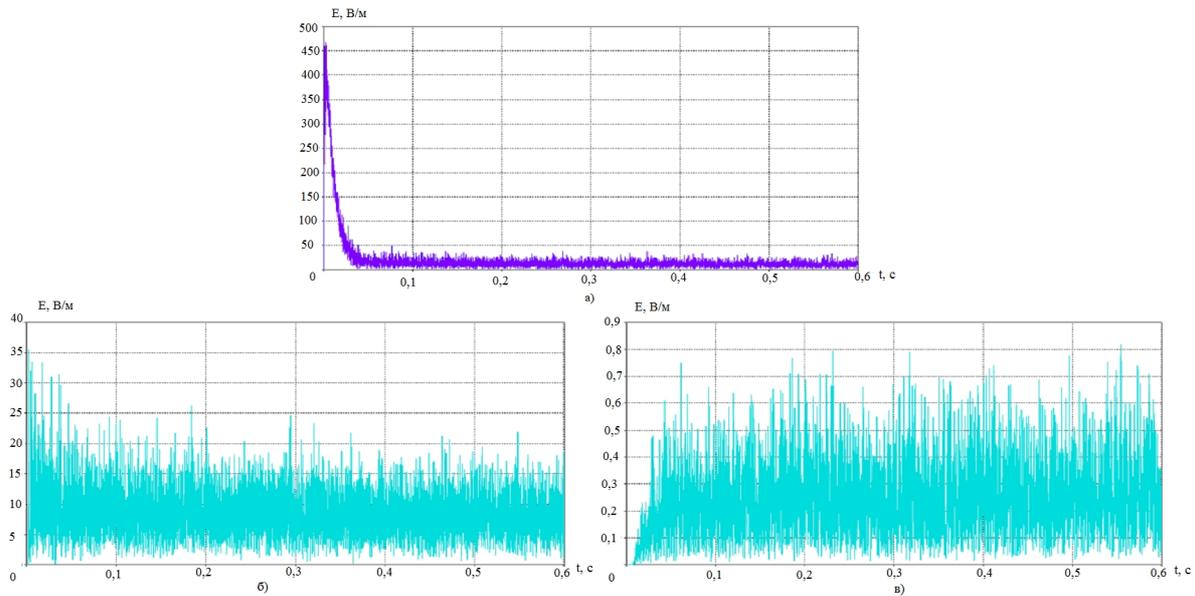


Рис. 2. Зависимость напряжённости поля от времени:

а - напряжённость поля в центре дренажного отверстия с координатами (0; 500; 1000) без экранирования при ЭСР 5 кВ;

б - напряжённость поля в точке с координатами (0; 250; 1500) без экранирования при ЭСР 5 кВ;

в - напряжённость поля в точке с координатами (0; 250; 1500) с цилиндрическим экраном на внешней поверхности при ЭСР 5кВ

4. Определение возможных мест возникновения ЭСР на поверхности КА

Определение мест возможного возникновения ЭСР основывается на анализе картин распределения потенциалов на поверхности модели КА. При таком анализе выявляются области наибольших градиентов потенциалов [4].

Используя численные значения потенциалов в разных узлах расчётной сетки и данные о размерах сетки, с высокой точностью рассчитываются значения градиентов потенциала.

Анализ совокупности этих расчётных данных показывает, что возникновение ЭСР возможно:

- на остроугольных элементах;
- на элементах с градиентом потенциала, равным или превышающим пороговое значение ЭСР;
- на любом элементе поверхности КА в результате попадания твёрдой заряженной частицы.

Заключение

1. Для моделирования воздействия факторов космической среды на КА с

низкой орбитой и углом наклона порядка 90^0 сформирована трёхмерная твердотельная модель, представляющая собой набор n -го количества простых геометрических элементов. Моделирование проведено при следующих уровнях воздействий для данной области плазмосферы: авроральные электроны со средней энергией спектров 5-20 кЭВ и концентрацией 1-10 см^{-3} ; солнечное электромагнитное излучение с длиной волн от 10 до 5000 нм: доля ультрафиолетового излучения 9%, плотность потока энергии 126 $\text{Вт}/\text{м}^2$, доля 46,1% и 44,4% с плотностью потока энергии 644 и 619 $\text{Вт}/\text{м}^2$ для видимого и инфракрасного излучения, соответственно; энергия квантов от 124 до 0,2 эВ.

2. Построена зависимость потенциала поверхности трёхмерной модели как функция от параметров воздействий во времени, позволяющая определить градиенты потенциалов. Для выбранной модели и характеристик воздействий диапазон потенциалов поверхности составил от 200 до 5000 В.

3. Предложен метод определения мест возможного возникновения ЭСР на основе анализа картин градиентов потенциалов, который показал, что наиболее вероятными местами возникновения разряда являются элементы с большим радиусом кривизны, элементы со значением градиента потенциала, равным или превышающим пороговое значение возникновения ЭСР, и элементы, являющиеся мишенью для твёрдых заряженных час-

тиц. Получены значения напряжённости поля от времени для каждой точки выбранной модели путём моделирования последствий ЭСР. Рассчитано паразитное значение напряжённости ЭМП внутри негерметичного отсека КА.

Библиографический список

1. Графодатский, О.С. Взаимодействие спутников связи с окружающей средой [Текст] / О.С. Графодатский, Ш.Н. Исляев. – Томск, МГП «РАСКО», 1993. – 208 с.

2. Новиков, Л.С. Комплексная методология определения параметров электростатической зарядки, электрических полей и пробоев на космических аппаратах в условиях их радиационной электризации [Текст] / Л.С. Новиков, Г.В. Бабкин, Е.П. Морозов [и др.]. М.: Изд-во ЦНИИмаш, 1995. – 160 с.

3. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики [Текст]: учебник. / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – 7-е изд. М.: Изд-во МГУ; Изд-во «Наука», 2004. – 798 с.

4. Новиков, Л.С. Математическое моделирование электризации космических аппаратов [Текст] / Л.С. Новиков, В.Н. Милеев, А.А. Маклецов, В.В. Синолиц // Модель космоса. Т.П. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов; под ред. Л.С. Новикова. – М.: КДУ, 2007. – С. 276-314.

SIMULATING ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION DUE TO ELECTROSTATIC DISCHARGE ON THE SPACECRAFT SURFACE

© 2012 N. D. Syomkin, V. L. Balakin. V. V. Bragin

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

The influence of space factors on a low-orbit spacecraft with the angle of deflection of approximately 90 degrees is discussed in the paper. A procedure for determining the sites of possible occurrence of electrostatic discharges is put forward. Surface potentials are calculated, the electromagnetic field is simulated.

Spacecraft, space factors, electrostatic discharge, electromagnetic field, simulation.

Информация об авторах

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: системы управления движением, физика высокоскоростного удара, космические исследования.

Балакин Виктор Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: balakin@ssau.ru. Область научных интересов: динамика полёта и управление движением летательных аппаратов, космическое машиностроение.

Брагин Василий Владимирович, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: bragin_vv@inbox.ru. Область научных интересов: электромагнитная совместимость, физика космической плазмы.

Syomkin Nikolay Danilovich, doctor of technical science, professor, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: semkin@ssau.ru. Area of research: motion control systems, physics of high-velocity impact, space research.

Balakin Victor Leonidovich, doctor of technical science, professor, the department of space engineering, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: balakin@ssau.ru. Area of research: flight dynamics, flying vehicle motion control, space engineering.

Bragin Vasily Vladimirovich, postgraduate student, the department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: bragin_vv@inbox.ru. Area of research: electromagnetic compatibility, space plasma physics.