

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

© 2016

- Д. Л. Каргу** кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, dmitrii_kargu@mail.ru.
- А. М. Безняков** кандидат технических наук, преподаватель кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, bez-al@mail.ru.
- А. В. Немиров** преподаватель кафедры бортового электрооборудования и энергетических систем летательных аппаратов, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, nemirov-vka@yandex.ru.

В статье проведён анализ современных систем электроснабжения космических аппаратов и возможные варианты расширения их возможностей за счёт использования источников электрической энергии малой мощности (энергия отражённого от Земли солнечного излучения и энергия магнитного поля Земли). Сделан вывод о наиболее подходящем типе системы электроснабжения космического аппарата для использования дополнительных источников энергии малой мощности. Рассмотрены особенности функционирования предложенной системы электроснабжения. Описан способ получения дополнительной электрической энергии на борту космического аппарата за счёт его вращения в магнитном поле Земли. Проведён анализ математических моделей магнитного поля Земли. На основе результатов анализа этих моделей для оценки величины магнитной индукции вдоль невысоких орбит космических аппаратов была применена модель описания геомагнитного поля, использующая ряды сферических гармоник (ряд Гаусса). На основе оценки магнитной индукции, заданных параметров космического аппарата и орбиты была рассчитана средняя мощность полученной электрической энергии от источников энергии малой мощности для бортовых потребителей на одном витке. Предложен вариант использования полученной таким образом дополнительной электрической энергии на борту космического аппарата. Использование предложенной схемы позволит расширить возможности космических аппаратов по получению, преобразованию и накоплению электроэнергии от первичных источников малой мощности, что позволит увеличить срок активного существования и энерговооружённость космических аппаратов.

Космический аппарат, система электроснабжения, генерирующий контур, модель магнитного поля Земли, электродвижущая сила.

Цитирование: Каргу Д.Л., Безняков А.М., Немиров А.В. Система электроснабжения космического аппарата с использованием дополнительных источников энергии малой мощности // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 17-24. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-17-24

Введение

К современным космическим аппаратам (КА) предъявляются высокие требования по срокам активного существования. В зависимости от типа КА и его целевого предназначения эти сроки могут достигать 10 лет и более. Одним из основных факторов, влияющих на длительность эксплуатации, является состояние системы электроснабжения (СЭС) КА, а именно источников электрической энергии: солнечных и аккумуляторных батарей. Ухудшение характеристик этих элементов снижает срок активного существования КА. Одним из способов решения проблемы является дополнение первичных источников электрической энергии в СЭС КА источниками энергии малой

мощности, устройствами, преобразующими энергию магнитного поля Земли и энергию отражённого солнечного излучения.

Основные типы систем электроснабжения

В настоящее время системы электроснабжения космических аппаратов делятся на несколько основных типов в зависимости от подключения шин питания к потребителям: система с общими шинами, система с разделёнными шинами и с параллельно включённым с потребителями стабилизатором напряжения, система с разделёнными шинами и с последовательно-параллельным включением стабилизатора напряжения. Выбор типа системы электроснабжения для КА может быть существенно осложнён допустимыми массогабаритными характеристиками [1].

Оптимальным типом для СЭС КА с использованием дополнительных источников энергии малой мощности является система с разделёнными шинами и с последовательно-параллельным включением стабилизатора напряжения.

Такая схема СЭС даёт возможность включения в неё дополнительных элементов, предназначенных для получения, преобразования и накопления электроэнергии от источников энергии малой мощности. В общем виде СЭС с разделёнными шинами последовательно-параллельным включением стабилизатора включает в себя: группу солнечных батареи (СБ) прямого солнечного света 1, стабилизатор напряжения 2, зарядное устройство 3, разрядное устройство 4, аккумуляторную батарею 5 (рис. 1).

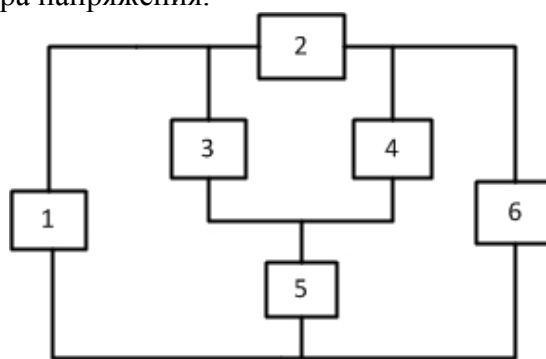


Рис. 1. Структура СЭС с разделёнными шинами и с последовательно-параллельным включением стабилизатора

В СЭС с использованием источников энергии малой мощности (рис. 2) [2; 3] дополнительно включены следующие элементы: группа солнечных батарей, предназначенных для преобразования отражённого от Земли солнечного света в электрическую энергию 7; генерирующий контур 8, представляющий собой совокупность проводников (обмотку), расположенных вдоль корпуса космического аппарата; выпрямительное устройство 9. В качестве потребителя энергии малой мощности может использоваться контроллер заряда аккумуляторной батареи от источников электроэнергии малой мощности 10.

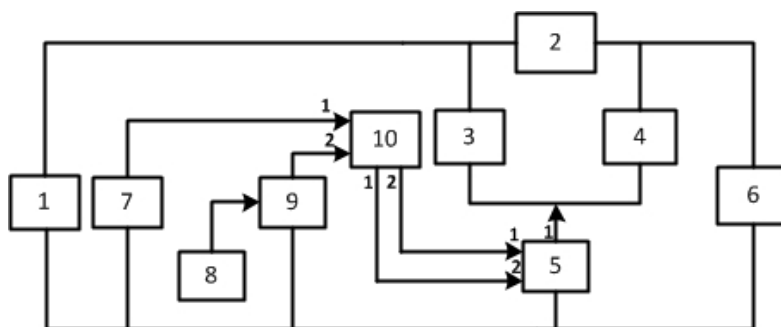


Рис. 2. Структура СЭС с использованием источников энергии малой мощности

Функционирование системы электроснабжения с использованием источников малой мощности

Рассмотрим каким образом осуществляется получение электроэнергии от магнитного поля Земли. Во время движения по орбите КА или отдельные его части могут вращаться. Это обусловлено задачей стабилизации КА в пространстве либо конструктивными особенностями КА. Генерирующий контур жёстко привязан либо к корпусу КА, либо к его вращающейся части. На рис. 3 представлен пример внешнего вида КА, стабилизированного вращением, когда генерирующий контур жёстко привязан к корпусу КА. Упрощённая схема движения КА по орбите в магнитном поле Земли представлена на рис. 4.

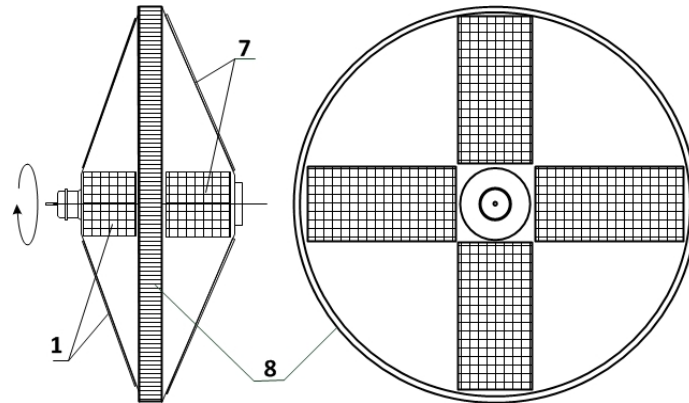


Рис. 3. Внешний вид КА, стабилизированного вращением

При вращении генерирующий контур пересекает линии индукции магнитного поля Земли, в результате чего по закону электромагнитной индукции в генерирующем контуре наводится мгновенная электродвижущая сила

$$e_i = - \frac{d(B S_B N_c \cos \omega t)}{dt} = B S_B N_c \omega \sin \omega t ,$$

где B – индукция магнитного поля Земли; S_g - площадь поперечного сечения генерирующего контура; N_c - количество витков в контуре; ω - угловая частота вращения (рис. 4).

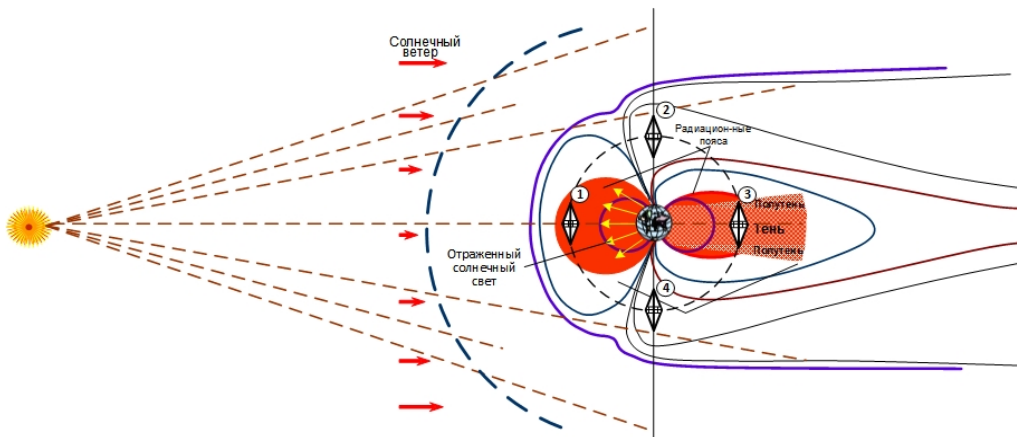


Рис. 4. Упрощённая схема движение КА по орбите в магнитном поле Земли

При замыкании генерирующего контура на нагрузку в цепи «потребитель – генерирующий контур» протекает ток. Средняя электрическая мощность генерирующего контура определяется выражением [4]:

$$P_{cp} = \frac{E^2}{R_c},$$

где E - действующее значение электродвижущей силы, R_c - сопротивление генерирующего контура. Таким образом, кинетическая энергия, сообщаемая КА в совокупности с энергией магнитного поля Земли, преобразуется в электрическую энергию. Чем выше момент закрутки КА, тем больше будет наводимая в генерирующем контуре электродвижущая сила (ЭДС) и тем выше будет его мощность.

Выработанная таким образом электрическая энергия через выпрямительное устройство 9 и контроллер заряда аккумуляторной батареи от источников электроэнергии малой мощности 10 может поступать, например, на отдельные элементы аккумуляторных батарей для их подзаряда.

Модель магнитного поля Земли

Для расчёта ЭДС и мощности генерирующего контура необходимо иметь значение магнитной индукции в любой точке орбиты КА. Для этого используются различные математические модели магнитного поля Земли (МПЗ). К настоящему моменту в результате успешных запусков КА получен большой экспериментальный материал, который позволяет дать достаточно полную картину магнитного поля Земли, уточнить существующие и разработать новые модели его описания. В результате анализа всех измерений магнитного поля Земли с использованием наземной, воздушной и космической съёмки были получены и постоянно уточняются модели геомагнитного поля Земли IGRF, WMM, GSFC, POGO, MGST [5] и модель ГОСТ 25645.126-85 [6].

Современные модели геомагнитного поля позволяют с высокой точностью рассчитывать индукцию магнитного поля на высотах до 18000-20000 км от поверхности Земли, однако выше магнитное поле Земли слабеет и влияние солнечного ветра становится существеннее. Это приводит к необходимости использования высотных моделей магнитосферы Земли – области взаимодействия МПЗ с солнечным ветром. Традиционно для описания геомагнитного поля используются ряды сферических гармоник (ряд Гаусса) в зависимости от географических координат. Современные модели геомагнитного поля искусственно ограничивают количеством $N = 13$ (195 коэффициентов), что определяется компромиссом между стремлением достичь хорошей определённости моделей главного поля и избежать влияния помех, создаваемых полями в земной коре. При длине ряда в 10-13 гармоник погрешность вычисления магнитной индукции на поверхности Земли составляет около 2%. Коэффициенты главного поля округлены до десятых нТл, что соответствует пределу разрешения данных современных наблюдений. Прогностическая модель вековой вариации ограничена $N = 8$ (80 коэффициентов), коэффициенты округлены до первых 0,1 нТл/год, что соответствует разрешению имеющихся данных. Точность вычисления магнитной индукции по современным моделям геомагнитного поля определяется в основном точностью сферических гармонических коэффициентов и их количеством в ряде Гаусса. Для глобальных моделей геомагнитного поля дальнейшее повышение точности связано со значительным увеличением числа сферических гармонических коэффициентов.

Согласно [7] модель геомагнитного поля внутриземных источников на расстоянии от 100 до 40 000 км от поверхности Земли определяется потенциалом U индукции

геомагнитного поля источников в точке пространства со сферическими координатами r, λ, θ и вычисляется по формуле:

$$U = r_3 \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda \right) \left(\frac{r_3}{r} \right)^m P_n^m(\cos \theta), \text{ нТл/км};$$

где r_3 – средний радиус Земли, км; n – степень сферических гармоник; m – порядок сферических гармоник; $N = 13$ – максимальная степень сферических гармоник; g_n^m , h_n^m – сферические гармонические коэффициенты, нТл; λ – долгота от Гринвичского меридиана, °; r – геоцентрическое расстояние, км; θ – дополнение до широты, $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$, °; φ – широта в сферических координатах, °; P_n^m – присоединённые полиномы Лежандра первого рода, определяемые по формуле:

$$P_n^m = \frac{(1-x^2)^m}{2^n n!} \frac{\partial^{n+m}}{\partial x^{n+m}} (x^2-1)^n.$$

Составляющие вектора индукции геомагнитного поля внутриземных источников \vec{B} в точке пространства со сферическими координатами r, λ, θ вычисляются по формулам:

$$B_x = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta}, \quad B_y = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \lambda}, \quad B_z = \frac{\partial U}{\partial r}.$$

Модуль индукции магнитного поля вычисляется по формуле

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2},$$

где B_x, B_y, B_z – проекции вектора B на соответствующие оси координат.

На основе представленной модели магнитного поля Земли были получены зависимости величины ЭДС e_i и средней мощности P_{cp} генерирующего контура от положения КА на орбите, задаваемой истинной аномалией \mathcal{I} по Кеплеровским элементам орбиты на один виток (рис. 5, 6).

В качестве исходных данных для расчёта были приняты:

- круговая орбита высотой 500 км, наклонением 55 градусов, долготой восходящего узла 0 градусов;
- генерирующий контур с площадью поперечного сечения $S_g = 1 \text{ м}^2$ и сопротивлением проводов $R_c = 1.7 \text{ Ом}$;
- частота вращения КА вокруг своей оси 30 об/мин.

Расчёты проводились без учёта момента, тормозящего вращение КА, обусловленного действием сил Ампера на генерирующий контур, поскольку масса КА существенно превышает массу генерирующего контура.

Среднее значение мощности генерирующего контура за виток составило 14 мВт, а максимальное значение – 74 мВт. Таким образом, генерирующий контур может служить дополнительным источником электроэнергии на борту космического аппарата.

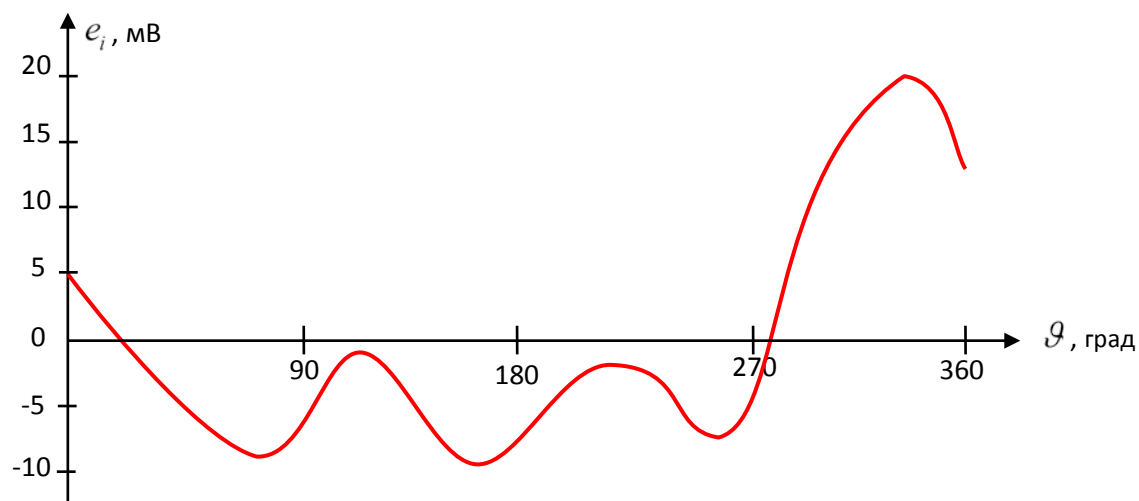


Рис. 5. Зависимость ЭДС генерирующего контура от истинной аномалии на виток

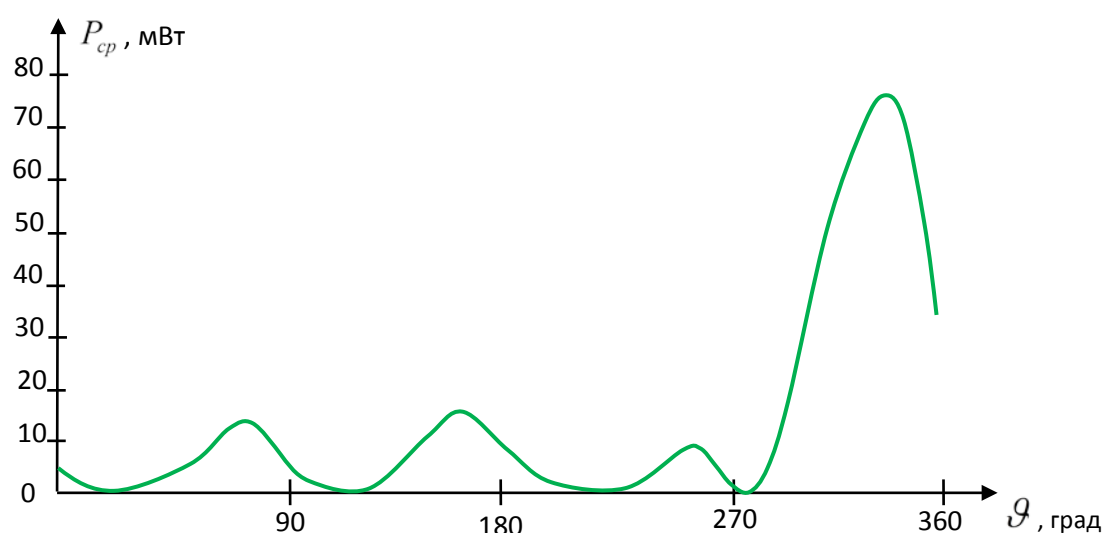


Рис. 6. Зависимость средней электрической мощности генерирующего контура от истинной аномалии на виток

Заключение

Система электроснабжения космического аппарата с использованием источников энергии малой мощности способна получать, преобразовывать и накапливать: а) энергию прямого и отражённого от Земли солнечного света; б) кинетическую энергию вращения космического аппарата в магнитном поле Земли. Использование в составе системы электроснабжения микроконтроллерного зарядного устройства, позволяющего осуществить зарядку аккумуляторной батареи от источников электрической энергии малой мощности (отражённого солнечного света и энергии магнитного поля Земли), позволит увеличить срок активного существования космического аппарата.

Библиографический список

1. Каргу Д.Л., Стеганов Г.Б., Петренко В.И., Власов В.А., Ратушняк А.И., Маленин Е.Н., Радионов Н.В. Системы электроснабжения космических аппаратов и ракет-носителей: уч. пособие. СПб: Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, 2013. 116 с.

2. Грилихес В.А., Попов Л.Б. Солнечная энергия и космические полёты. М.: Наука, 1984. 216 с.

3. Каргу Д.Л., Безняков А.М., Кузнецов В.А., Комаров П.А., Овсянников А.Е. Система электроснабжения космического аппарата, стабилизированного вращением: заявка на изобретение № 2015102425 от 26.01.15 г.

4. Чилин Ю.Н. Моделирование и оптимизация в энергетических системах. СПб.: Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 1995. 277 с.

5. Magnetospheric Field Models.
http://modelweb.gsfc.nasa.gov/magnetos/magnetos_index.html

6. ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. М.: Издательство стандартов, 1990. 23 с.

7. ГОСТ 25645.127-85. Магнитосфера Земли. Модель магнитного поля магнитосферных токов. М.: Издательство стандартов, 1990. 11 с.

SPACECRAFT POWER SUPPLY SYSTEM USING ADDITIONAL LOW-POWER SOURCES OF ENERGY

© 2016

D. L. Kargu Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Energy Systems of Flying Vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg, Russian Federation, dmitrii_kargu@mail.ru

A. M. Beznyakov Candidate of Science (Engineering), teacher of the Department of Electrical Equipment and Energy Systems of Flying Vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg, Russian Federation, beznyakov@mail.ru

A. V. Nemirov teacher of the Department of Electrical Equipment and Energy Systems of Flying Vehicles, Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint-Petersburg, Russian Federation, nemirov-vka@yandex.ru

The article analyzes modern spacecraft power supply systems and possible options for extending their possibilities through the use of low-power electric energy sources (the energy of solar radiation reflected from the Earth and the energy of the magnetic field of the Earth). A conclusion is made as to the most appropriate type of spacecraft power supply systems for the use of additional low-power sources of energy. The peculiarities of operation of the proposed power supply system are discussed. A method of producing additional electric energy on board the spacecraft due to its rotation in the Earth's magnetic field is described. Mathematical models of the Earth's magnetic field are analyzed. A model of description of the geomagnetic field using a series of spherical harmonics (number of Gauss) was applied on the basis of the results of the analysis of these models to assess the magnitude of the magnetic induction in spacecraft low orbits. Based on the evaluation of the magnetic induction, the set parameters of the spacecraft and the orbit the average power of electrical energy generated by low-power sources for on-board power consumers in one orbit pass was calculated. A variant of using additional electrical energy on board a spaceship is proposed. The use of the proposed scheme will make it possible to expand the possibilities of spacecraft to receive, transform and accumulate electrical energy from primary low-power sources, which will make the spacecraft service life longer and improve its power supply capacity.

Spacecraft, power supply system, generating circuit, model of the Earth's magnetic field, electromotive force.

Citation: Kargu D.L., Beznyakov A.M., Nemirov A.V. Spacecraft power supply system using additional low-power sources of energy. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 17-24. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-17-24

References

1. Kargu L., Steganov G.B., Petrenko V.I., Vlasov V.A., Ratushnyak A.I., Malenin E.N., Radionov N.V. *Sistemy elektrosnabzheniya kosmicheskikh apparatov i raket-nositeley: uch. posobie* [Systems of power supply for spacecraft and carrier rockets: study guide]. SPb.: Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2013. 116 p.
2. Grilikhes V.A., Popov L.B. *Solnechnaya energiya i kosmicheskie polety* [Solar energy and space flights]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 216 p.
3. Kargu D.L., Beznyakov A.M., Kuznetsov V.A., Komarov P.A., Ovsyannikov A.E. *Sistema elektrosnabzheniya kosmicheskogo apparata, stabilizirovannogo vrashcheniem* [Power supply system of spin-stabilized spacecraft]. Application for a discovery № 2015102425 dated 26.01.2015.
4. Chilin Yu.N. *Modelirovanie i optimizatsiya v energeticheskikh sistemakh* [Modelling and optimization in power systems]. Saint-Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy Publ., 1995. 277 p.
5. Magnetospheric Field Models. Available at:
http://modelweb.gsfc.nasa.gov/magnetos/magnetos_index.html
6. GOST 25645.126-85. Geomagnetic field. Magnetic field model of infernal originals. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1990. 23 p.
7. GOST 25645.127-85. Earth's magnetosphere. Magnetic field model of magnetospheric currents. Moscow: Izdatel'stvo Standartov Publ., 1990. 11 p.