

УДК 629.78

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЗЗ НА ПОКАЗАТЕЛИ ОПЕРАТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

© 2014 В.В. Лохматкин¹, В.И. Куренков²

¹ ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс», г. Самара

² Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 20.03.2014

Разработано методическое и программное обеспечение для имитационного моделирования влияния отказов бортовых систем космических аппаратов дистанционного зондирования Земли на показатели оперативности передачи видеоинформации на наземные пункты приёма.

Ключевые слова: *космический аппарат наблюдения, оперативность, доставка информации, надёжность, отказ, имитационное моделирование, алгоритм, программное обеспечение*

Актуальность и постановка задачи исследования. Во время эксплуатации космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) могут возникать отказы бортовых систем, которые влияют на показатели целевой эффективности (обзорность, линейное разрешение на местности, ширина полосы захвата, производительность съёмки, периодичность наблюдения, оперативность доставки информации на Землю, точности привязки снимка к геодезическим координатам, срок активного существования и др.). Моделирование влияния отказов бортовых систем на показатели целевой эффективности, с одной стороны, позволяет прогнозировать эти показатели на этапе проектирования, а с другой – определять исходные данные, необходимые для нормирования показателей надёжности бортовых систем КА с целью обеспечения выполнения заданных показателей целевой эффективности. В работах [1-4] рассматривались вопросы моделирования целевых показателей эффективности космических систем наблюдения, однако вопросы влияния надёжности КА на эти показатели не обсуждались. В работах [5, 6], в которых принимали участие авторы настоящей статьи, исследовались вопросы влияния отказов бортовых систем КА на показатели производительности съёмки и периодичности наблюдения заданных районов Земли, представлено разработанное соответствующее программное обеспечение, основанное на методе имитационного моделирования.

Цель работы: продолжение исследований по влиянию отказов бортовых систем КА на показатели целевой эффективности. В статье представлено методическое и программное обеспечение для имитационного моделирования влияния отказов бортовых систем КА ДЗЗ на показатели оперативности передачи видеоинформации на наземные пункты приёма.

В общем случае показатель оперативности получения и доставки снимка потребителю измеряется в единицах времени, и включает в себя (путем суммирования) следующие частные показатели оперативности:

- время, необходимое для представления задания на проведение съёмки в виде, пригодном для использования информационных технологий (формализация задания);
- время, необходимое для передачи заявки на съёмку заданной цели на борт КА (с учетом входа КА в зону радиовидимости пункта управления или с учетом использования спутника-ретранслятора);
- время, необходимое для планирования порядка съёмки целей и постановки заявки в очередь с учетом заданных приоритетов и прогнозируемых условий съёмки (облачности, высоты солнца над горизонтом, отклонения оптической оси КА от надира);
- время, необходимое для подхода к цели и проведения съёмки;
- время, необходимое для обработки видеоинформации на борту КА и подготовки ее к передаче на Землю;
- время, необходимое для входа КА в зону радиовидимости наземных пунктов приема видеоинформации (или задействования спутника-ретранслятора);

Лохматкин Вадим Владимирович, инженер-конструктор. E-mail: lohmatkin.vadim@yandex.ru
Куренков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры космического машиностроения. E-mail: kvi.48@mail.ru

- время для передачи (перекачки) видеоинформации на Землю;
- время для обработки видеоинформации на Земле и получения снимка, пригодного для передачи заказчику;
- время, необходимое для передачи готового снимка заказчику.

В статье в качестве показателя оперативности рассматривается один из частных показателей, а именно: время, прошедшее с момента проведения съёмки заданного объекта, до момента вхождения КА в зону радиовидимости ближайшего из наземных пунктов приема информации (НППИ). Считается, что время для обработки видеоинформации на борту КА и подготовки ее к передаче на Землю пренебрежимо мало по сравнению со временем попадания (подлёта) КА в зону радиовидимости КА с НППИ.

Значения показателей оперативности космической системы (КС) ДЗЗ зависят от многих факторов – её **свойств** (*характеристик*), **условий** применения средств КС и **управления** этими средствами. Применительно к орбитальной группировке на показатели оперативности в большей степени влияют следующие факторы:

- бортовой состав КА ДЗЗ (межспутниковой лазерной системы передачи информации);
- параметры рабочей орбиты спутников-ретрансляторов;
- характеристики антенны высокоскоростной радиолинии (ВРЛ);
- геодезическая широта расположения НППИ;
- распределение и оптимизация работ по передаче информации между КА ДЗЗ и отдельными спутниками-ретрансляторами, циклограммы работы бортовой и обеспечивающей аппаратуры и др.

Кроме того, на реальные показатели оперативности существенное влияние оказывают такие случайные факторы, как частичные отказы бортовых систем (БС). При возникновении определенных отказов БС, относящихся к классу восстанавливаемых, сеанс связи может не состояться какое-то время, и БС как бы «простаивают» по целевому функционированию. В этой связи уместно говорить не о баллистической оперативности, а о действительной (эффективной). В общем случае показатель оперативность доставки целевой информации на Землю также является случайной величиной, которая наиболее полно характеризуется функцией распределения или функцией плотности распределения. В качестве частных показателей оперативности используются числовые характеристики этой случайной величины: математическое ожидание, дисперсия, верхние или нижние доверительные

границы, крайние значения оперативности из выборки и др. В данной работе рассматривается только один пункт системы приёма и преобразования информации (НППИ), спутники-ретрансляторы не используются.

Суть моделирования. Производится имитация орбитального движения КА и его функционирования по целевому назначению [4]. Организуется имитация отказов элементов целевой аппаратуры и бортовых обеспечивающих систем в зависимости от моделируемого уровня надёжности [5, 6]. Для каждого момента времени имитации производится проверка работоспособности целевой аппаратуры и бортовых обеспечивающих систем. В случае отказа оценивается случайное время вынужденных перерывов в работе той или иной бортовой системы. Оперативность доставки информации на НППИ, как и другие показатели целевой эффективности (производительность съёмки, периодичность наблюдения) подсчитываются с учётом этих перерывов. При отсутствии отказов бортовых систем (БС) на момент входа в зону радиовидимости НППИ осуществляется запись в массив текущего значения оперативности. При возникновении частичных отказов БС приращение текущего значения оперативности в массив приостанавливается на время, которое также моделируется на основе статистических данных по отказам КА. При восстановлении работоспособного состояния КА процесс записи текущего значения оперативности возобновляется при очередном пролёте КА над зоной радиовидимости КА с НППИ.

Процесс моделирования останавливается при достижении одного из трёх условий: достижения заданного времени моделирования, достижения времени, соответствующему сроку активного существования КА, в случае возникновения (во время моделирования) критического отказа. Моделирование проводится для различных уровней надёжности КА. Для каждого моделируемого уровня надёжности КА производится нормирование надёжности бортовых систем КА по методике [7]. На каждом уровне надёжности КА производится заданное количество статистических испытаний или такое количество, которое обеспечивает заданную точность моделирования. Результатами расчёта являются текущее, минимальное, максимальное значения показателя оперативности, математическое ожидание, дисперсия этого времени и доверительные границы оперативности.

Моделирование целевого функционирования. Для моделирования целевого функционирования КА использовались ранее разработанные модели и программное обеспечение [4]. Для запуска программы задаются

географические координаты НППИ, на которые осуществляется передача информации с КА ДЗЗ, задаются параметры рабочей орбиты КА. Остальные вспомогательные исходные данные, необходимые для моделирования влияния отказов БС, берутся в процессе вычислений, а именно: долготы и широта подспутниковой точки КА на поверхности Земли в каждый момент времени имитационного моделирования, появление КА в зоне радиовидимости и др.

Моделирование отказов и времени простоя элементов бортовых систем. Моделирование отказов БС основано на экспоненциальном законе распределения и использовании статистических данных по времени простоя БС в случае их отказа, как это показано в работах [5, 6]. Применительно к элементам, непосредственно влияющим на показатели оперативности КА, были проведены дополнительные исследования по анализу видов, последствий и критичности отказов. Первая группа отказов ВРЛ соответствует времени простоя t_{zi} от 1,5 до 12 часов. Остальные группы отказов относятся к частичным отказам ВРЛ, которые несущественно влияют на показатели оперативности. А именно, вторая группа отказов связана с ограничением скорости передачи информации на НППИ; третья группа отказов связана с отказами приводов антенны

высокоскоростной радиолинии (ВРЛ) и невозможностью её направления на НППИ; четвёртая группа отказов связана с частичной потерей информации по отдельным каналам ВРЛ. Таким образом, моделирование времени простоя по целевому функционированию КА необходимо осуществлять с учётом статистики, приведенной в [5, 6].

Моделирование влияния отказов бортовых систем на отказы КА. Моделировать влияние отказов БС на отказы КА в целом удобнее всего с использованием логических функций, которые, в свою очередь, строятся с помощью деревьев отказов [7]. Дерево отказов должно учитывать возможные отказы всех элементов бортовых систем КА. В работах [5, 6] было представлено дерево отказов КА, в котором отдельные элементы были представлены в укрупнённом виде. Более подробно рассматривались отказы элементов системы управления движением, так как эта система существенно влияет на показатели производительности и периодичности наблюдения КА. Ниже представлено дерево отказов КА, в котором отдельные элементы также представлены в укрупнённом виде, но более подробно представлены элементы, существенно влияющие на показатели оперативности КА.

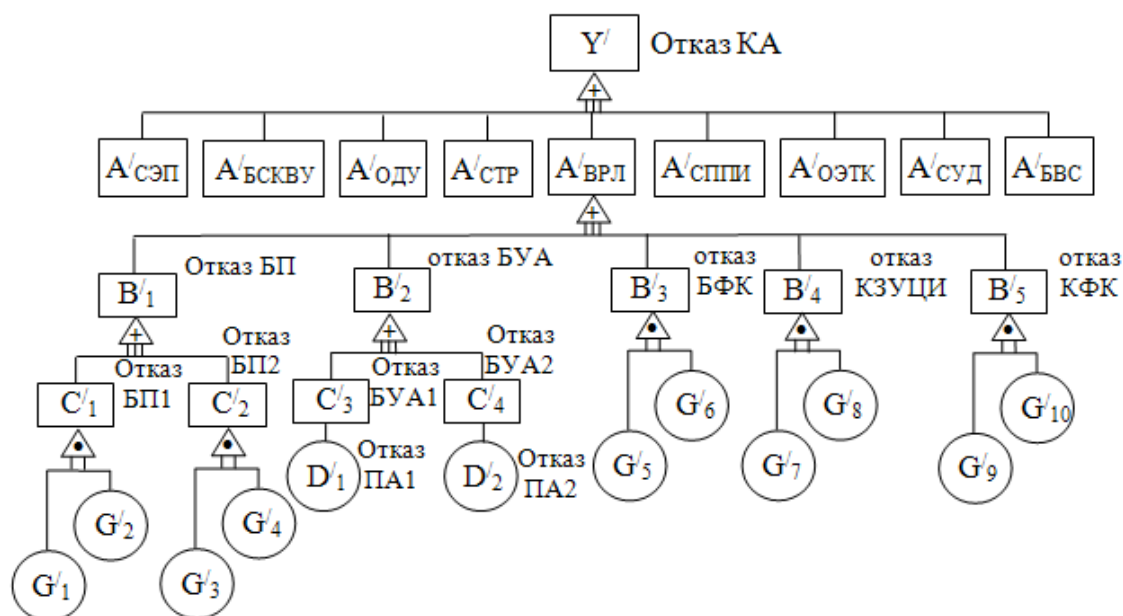


Рис. 1. Дерево отказов КА ДЗЗ

На рис. 1 литерами A со штрихами и индексами обозначены события отказов следующих бортовых систем КА: электропитания (СЭП), управления движением (СУД), объединенной двигательной установки (ОДУ), терморегулирования (СТР), высокоскоростной радиолинии (ВРЛ), приёма и преобразования информации (СППИ), оптико-электронного телескопического

комплекса (ОЭТК), высокоскоростной радиолинии (ВРЛ), бортовой вычислительной системы (БВС). Подробнее рассматривается ветвь по отказам ВРЛ, соответствующая событию $A_{ВРЛ}$. При построении ветви дерева отказов ВРЛ, учитывался тот факт, что в состав ВРЛ входят банк памяти (БП), блок управления антенной (БУА), блок формирования кадра (БФК), комплект

запоминающего устройства целевой информации (КЗУЦИ) и контролер формирования кадра (КФК). Эти события обозначены литерами B с индексами от единицы до пяти. Банк памяти состоит из двух резервных комплектов БП1 (событие C_1') и БП2 (событие C_2'), которые, в свою очередь, состоят из нечётных (события G_1' и G_3') и чётных (события G_2' и G_4') модулей памяти. В состав БУА входят основной (событие C_3') и резервный (событие C_4') комплекты, которые включают в себя приводы антенны ПА1 и ПА2 (события D_1' и D_2') соответственно. БФК, КЗУЦИ и КФК, состоят из основного и резервного комплектов приборов (события G_5' , G_6' , G_7' , G_8' , G_9' , G_{10}') соответственно.

На основе рассмотренного дерева отказов можно записать логическую функцию отказов КА в зависимости от отказов его составных частей:

$$Y_{KA}' = A_{CЭП}' \vee A_{БСКВУ}' \vee A_{ОДУ}' \vee A_{СТР}' \vee G_1' G_2' \vee G_3' G_4' \vee D_1' D_2' \vee G_5' G_6' \vee G_7' G_8' \vee G_9' G_{10}' \vee A_{СПИ}' \vee A_{ОЭТК}' \vee A_{СУД}' \vee A_{БВС}' \quad (1)$$

Алгоритм имитационного моделирования. Алгоритм оценки оперативности КА с учётом показателей надёжности БС аналогичен алгоритмам при оценке производительности съёмки и периодичности [5, 6]. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

Описание основных блоков представлено в [5, 6]. Отличия состоят в следующем. Блок 1 алгоритма соответствует вводу исходных данных (по надёжности, по географическим координатам пункта приёма и преобразования информации (НППИ), по вероятностям отказов приборов ВРЛ. В блоке 10 проверяется условие попадания КА ДЗЗ в зону НППИ (пункт 10). В блоке 11 происходит расчёт текущего значения показателя оперативности доставки информации на НППИ.

Программное обеспечение. На основе представленного алгоритма разработано программное обеспечение, с помощью которого можно на ранних этапах проектирования оценивать показатели оперативности доставки целевой информации на Землю с учётом надёжности КА ДЗЗ. Как упоминалось, в качестве базового использовалось программное обеспечение, представленное в [4]. Оно было доработано в [5, 6] применительно к моделированию влияния отказов БС на показатели производительности съёмки и периодичности наблюдения. В данной работе программное обеспечение доработано применительно к оценке влияния отказов БС на

показатели оперативности доставки информации на НППИ. Программа реализована в среде программирования Delphi 7, операционная система Windows. Перед запуском программы вводятся исходные данные по надёжности КА, а в процессе запуска программы рассчитываются случайное время отказа и время простоя БС, в частности, приборов ВРЛ.

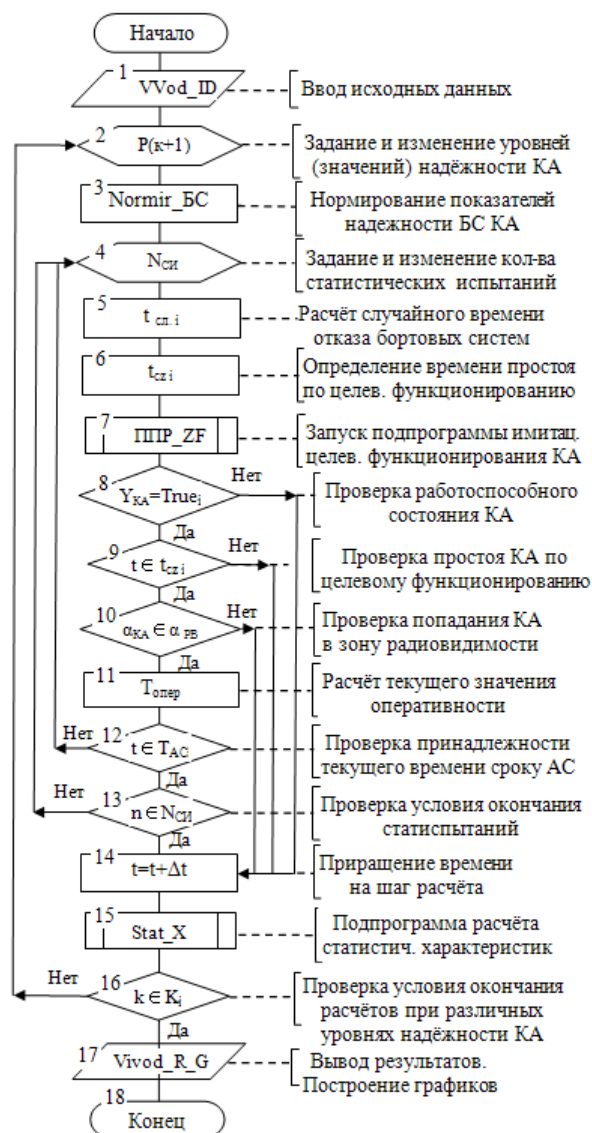


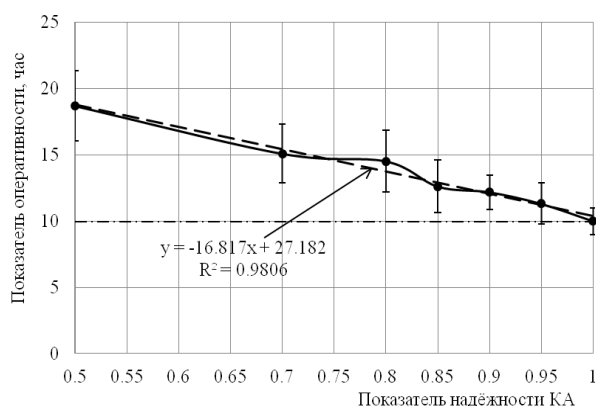
Рис. 2. Блок-схема алгоритма имитационного моделирования

Результаты моделирования. Моделирование проводилось при следующих исходных данных: НППИ расположено в Москве с соответствующими географическими координатами. При моделировании принимались следующие исходные данные параметров рабочей орбиты КА: орбита круговая с высотой 730 км и наклоном 98,3 градуса. Долгота восходящего узла орбиты 30 градусов. Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты моделирования оперативности КА ДЗЗ

$P_{КА}$	$N_{ст}$	$m_{опер}$	P_H	P_B	$\Delta, \%$
0,500	18	18,69	16,025	21,355	46,5
0,700	15	15,091	12,864	17,318	33,74
0,800	18	14,521	12,196	16,846	31,13
0,850	14	12,618	10,627	14,609	20,76
0,900	15	12,188	10,894	13,481	17,97
0,950	14	11,308	9,755	12,861	11,58
1,000	14	10,00	9,6	10,4	0

В табл. 2 введены следующие обозначения: $P_{КА}$ – показатель надёжности КА, $N_{ст}$ – количество статистических испытаний, $m_{опер}$ – математическое ожидание показателя оперативности, P_H и P_B – соответственно нижняя и верхняя границы показателя оперативности при доверительной вероятности $\gamma=90$, Δ – степень ухудшения показателя оперативности (в процентах) при снижении надёжности КА. Результаты также представлены на графике (рис. 3), где показана зависимость оперативности от уровня показателей надёжности КА. Точки на графике соответствуют математическим ожиданиям показателя оперативности, а вертикальными отрезками показаны доверительные интервалы. Сплошная кривая на графике соответствует сглаженным результатам, а пунктирная – аппроксимации степенной зависимостью (линия тренда), уравнение которой представлено на поле рисунка. Горизонтальная штрихпунктирная прямая соответствует значению показателя оперативности без учёта влияния отказов.

**Рис. 3.** Зависимость показателя оперативности от уровня надёжности КА ДЗЗ

Верификация моделей и анализ результатов. Ожидаемое увеличение оперативности при снижении уровня надёжности КА в целом подтверждается. В результате тестирования программного обеспечения было получено значение

оперативности доставки целевой информации на наземные пункты приёма информации НППИ при абсолютной надёжности КА, равное 10 часам. При показателе надёжности КА, равном 0,95, математическое ожидание показателя оперативности доставки информации на НППИ соответствует примерно 12 часов (с учётом доверительной вероятности). Этот показатель практически совпадает с показателем оперативности передачи информации на пункт приёма (до 12 часов) для реально существующего КА ДЗЗ «Ресурс – П» [8].

Выводы: разработаны модели, алгоритм и программное обеспечение для имитационного моделирования влияния частичных отказов целевой бортовых систем КА ДЗЗ на показатели оперативности доставки информации на Землю. С помощью данного программного обеспечения можно прогнозировать показатели оперативности на этапе проектирования КА и оценивать допустимые потери выходного эффекта при отказах КА. Зависимости показателей оперативности от показателей надёжности могут служить в качестве исходных данных для нормирования надёжности КА ДЗЗ на ранних этапах проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ханцеверов, Ф.Р. Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли / Ф.Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов. – М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
2. Лебедев, А.А. Космические системы наблюдения / А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко. – М.: Машиностроение, 1991. 224 с.
3. Мальшиев, В.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / В.В. Мальшиев, М.Н. Красильщиков, О.П. Нестеренко, В.Т. Бобронников, под ред. В.В. Мальшиева. – М.: Изд-во МАИ, 2000. 568 с.
4. Куренков, В.И. Основы устройства и моделирования целевого функционирования космических аппаратов наблюдения: учеб. пособие / В.И. Куренков, В.В. Салмин, Б.А. Абрамов. – Самара: Изд-во Самар-го. гос. аэрокосм. ун-та, 2006. 296 с.
5. Лохматкин, В.В. Прогнозирование производительности съёмки космического аппарата дистанционного зондирования Земли с учётом надёжности бортовых систем / В.В. Лохматкин, В.И. Куренков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4(2). С. 465-472.
6. Кирилин, А. Н. Влияние надёжности бортовых систем космических аппаратов ДЗЗ на показатели периодичности съёмки / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, В.И. Куренков и др. // Материалы III Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (III Козловские чтения) (16-20 сентября 2013, г. Самара). – Самара, 2013. С. 73-83.

7. Куренков, В.И. Методы расчета и обеспечения надежности ракетно-космических комплексов: учебн. пособие / В.И. Куренков, В.А. Капитонов. – Самара: Изд-во Самар-го. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. 320 с.
8. Кирилин, А.Н. Космическое аппаратостроение: научно-технические исследования и практические разработки ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС» / А.Н. Кирилин, Г.П. Аниаков, Р.Н. Ахметов, А.Д. Сторож. – Самара: Издательский дом «АГНИ», 2011. 280 с.

MODELING OF INFLUENCE OF ONBOARD SYSTEMS FAILURES AT EARTH REMOTE SENSING SPACECRAFTS ON EFFICIENCY OF DATA TRANSMISSION RATE

© 2014 V.V. Lokhmatkin¹, V.I. Kurenkov²

¹ Federal State Unitary Enterprise “State Research Production Space-Rocket Center
“TsSKB-Progress”, Samara

² Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov
(National Research University)

It is developed methodology and software for imitating modeling the influence of onboard systems failures at Earth remote sensing spacecrafts on efficiency of videodata transmission rate on land receiving stations.

Key words: *supervision spacecraft, efficiency, information delivery, reliability, failure, imitating modeling, algorithm, software*

Vadim Lokhmatkin, Engineer-designer. E-mail: lohmatkin.vadim@yandex.ru
Vladimir Kurenkov, Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Space Mechanical
Engineering. E-mail: kvi.48@mail.ru