

УДК 629.7.058.83

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ И КОМПЕНСАЦИИ МИКРОУСКОРЕНИЙ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ МИКРОГРАВИТАЦИОННОЙ ПЛАТФОРМЫ

© 2010 Ю.Я. Пузин

ФГУП «ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Изложены методические аспекты, результаты экспериментальных и компьютерных исследований, связанные с оценкой целевых показателей эффективности космических аппаратов «Фотон-М» №2 и №3. Приведён состав моделей программно-математического обеспечения научной аппаратуры и результаты выбора проектных параметров алгоритмов этих моделей.

*Показатели эффективности, проектные параметры, микрогравитационная платформа, научная аппаратура, информационное обеспечение, алгоритмы моделей, программно-математическое обеспечение, микроускорения, микрогравитация*

### 1. Методический подход повышения эффективности космических МПП с научной аппаратурой контроля состояния и компенсации микроускорений

В настоящее время отмечается рост числа научно-практических задач с высокими техническими требованиями к условиям реализации на борту космической микрогравитационной платформы (МПП), которые в совокупности определяют соответствующее изменение основных и частных показателей целевой эффективности, а именно:

- снижение величины остаточной микрогравитации на борту до диапазона значений от  $10^{-5}g_0$  до  $10^{-6}g_0$  ( $g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения);
- увеличение времени активного существования на орбите ИСЗ с 15 до 30 суток и более;
- повышение оперативности решения целевых задач, связанных с контролем состояния и компенсации микроускорений на борту КА, до величины соизмеримой с масштабом реального времени;
- повышение мощности бортовой системы энергоснабжения за счёт перехода от химических источников тока к

преобразователям солнечной энергии в электрическую;

- увеличение полезной нагрузки на борту МПП.

В рамках повышения всех перечисленных показателей эффективности предприятие ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс» разрабатывает космические аппараты:

- «Бион-М» №1 с бортовой научной аппаратурой (НА) контроля состояния поля микроускорений в низкочастотной части спектра (от 0 до 0,01 Гц) ГРАВИТОН;

- «Фотон-М» №4 с бортовой НА, решающей задачи контроля состояния и компенсации микроускорений КСКМ.

Аппаратные средства бортовой НА изготавливаются Самарским государственным аэрокосмическим университетом, а специальное программно-математическое (ПМО) и информационное обеспечение аппаратуры разрабатывается при участии специалистов ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Основной особенностью аппаратуры ГРАВИТОН и КСКМ является наличие датчиков измерений магнитного поля, электронных блоков с развитым ПМО реализованным на вычислительных средствах этой НА, а также информационного обеспечения, основанного на передаче структуры

данных от обеспечивающих систем в контур аппаратуры по мультиплексному каналу обмена от бортовой вычислительной системы МГП.

Аппаратура ГРАВИТОН и КСКМ многорежимные, управляются в зависимости от состава информационных данных и разовых команд, а результаты измерений и расчёта поля микроускорений в заданных контрольных точках внутри объектового пространства спускаемого аппарата (СА), передаются в наземный комплекс управления (НКУ) полётом в составе программно-телеметрической информации (ПрТМИ) средствами МГП.

Аппаратура КСКМ имеет в своём составе дополнительные средства, включая блок управления силой тока в исполнительных элементах, а также ортогональную систему электромагнитов, управляемое магнитное поле которых при взаимодействии с геомагнитным полем создаёт механический момент, направленный в сторону, противоположную действующих на МГП возмущений. На КА «Фотон-М» №4 предполагается установить экспериментальный комплект системы электромагнитов, который создаёт магнитные моменты, уменьшенные в  $\sim 10^3$  раз от расчетных значений. Подтверждение эффективности НА такого типа планируется получить в орбитальном полёте маломассогабаритного КА «Аист», запускаемого в качестве дополнительной полезной нагрузки в составе КА «Бион-М» №1.

При разработке НА ГРАВИТОН и КСКМ актуальной является задачи выбора проектных параметров математических моделей контроля состояния поля микроускорений  $F_{м1}^b$  и контроля состояния и компенсации микроускорений  $F_{м2}^b$ , которые решаются в рамках методического подхода повышения целевой эффективности космических МГП и объединяющего следующие частные задачи, а именно:

1. Расчёт показателей эффективности КА «Фотон-М» №2, 3  $A^f = \{A_{мг}^f, A_{оп}^f\} \in \{A^f\}_{доп}$ , включая величину микроускорений  $A_{мг}^f$  с минимальной ошибкой ( $\Delta A_{мг}^f \rightarrow \min$ ), оперативность решения целевой задачи  $A_{оп}^f$ , средствами ПМО математической модели  $F_{м1}^f$ , принципиальной особенностью которой является следующее:

- реализация на наземных вычислительных средствах и отсутствие практических ограничений на объём занимаемой памяти и быстродействие алгоритмов ПМО при расчёте соответствующих показателей эффективности;

- технологическая схема информационного обеспечения и состав информационных данных  $q_{но}^f(w, \mathbf{V}_e, \mathbf{G}_{под})$  для расчёта показателей эффективности построены на измерениях параметров орбитального движения  $\mathbf{G}_{под}$  от средств НКУ, параметров угловой скорости  $w$  от бортовой системы управления движением (СУД) и вектора магнитной индукции (ВМИ) геомагнитного поля  $\mathbf{V}_e$  по данным измерений бортовой научной аппаратуры;

- наличие отработанного ПМО с модулями расчёта кинематических параметров движения МГП, показателей целевой эффективности и оценкой адекватности математической модели  $F_{м1}^f$  по данным реального орбитального полёта КА «Фотон-М» №2, №3 [2,3,4,6];

- разработка метода расчёта показателя эффективности  $A_{мг}^f$  и алгоритма структурного модуля ПМО модели  $F_{м1}^f$ , связанного с уточнением внешних возмущений, действующих на МГП в полёте, по данным двух смежных интервалов измерений текущих навигационных параметров от средств НКУ.

2. Обоснование проектных параметров НА ГРАВИТОН космической МГП типа «Бион-М» в режиме солнечной ориентации и выбор ПМО математической модели  $F_{м1}^b$  принципиальной особенностью которой является следующее:

- заимствование отработанного ПМО математической модели  $F_{m1}^f$  в качестве опорной при выборе проектных информационных параметров математической модели  $F_{m1}^b$ ;

- определены и приняты постоянными проектные параметры, характеризующие массу аппаратуры  $m_1 \in \{m_1\}_{\text{доп}}$ , энергопотребление  $w_1 \in \{w_1\}_{\text{доп}}$  и циклограмму  $T_1 \in \{T_1\}_{\text{доп}}$  работы аппаратуры, пространственно-геометрические характеристики  $v_1 \in \{v_1\}_{\text{доп}}$  и конструктивные параметры, включая место установки на борту КА  $r_1 \in \{r_1\}_{\text{доп}}$  и пространственную ориентацию  $\Pi_1 \in \{\Pi_1\}_{\text{доп}}$ ;

- математическая модель  $F_{m1}^b$  с составом информационных проектных параметров реализуется на вычислительных средствах бортовой аппаратуры ГРАВИТОН и имеет ограничения на объём занимаемой памяти  $u_{\text{по1}} \in \{u_{\text{по1}}\}_{\text{доп}}$  и быстродействие алгоритмов  $t_{\text{по1}} \in \{t_{\text{по1}}\}_{\text{доп}}$  ПМО при расчёте показателей эффективности  $A^b = \{A_{\text{мг}}^b, A_{\text{сэп}}^b, A_{\text{оп}}^b\} \in \{A^b\}_{\text{доп}}$ ;

- технологическая схема информационного обеспечения и состав информационных данных  $q_{\text{но}}^b(w, V_e, G_{\text{под}})$  для расчёта показателей эффективности построены на измерениях  $G_{\text{под}}$  бортовой системы спутниковой навигации (ССН),  $w$  СУД и  $V_e$  научной аппаратуры ГРАВИТОН, что обеспечивает максимальную оперативность решения задачи ( $t_{\text{но1}} \rightarrow \min$ );

- разработка алгоритмов исполнительных модулей  $F_{\text{ак}}^b$ , где  $k=1, \dots, 4$  – число алгоритмов ПМО модели  $F_{m1}^b$ .

3. Обоснование проектных параметров бортовой НА КСКМ космической МГП типа «Бион-М» №1 - «Фотон-М» №4 на участках неориентированного орбитального полета с выключенной СУД и выбор ПМО математической модели  $F_{m2}^f = F_{m2}^b$ , принципиальной особенностью которой является следующее:

- заимствование отработанного ПМО математических моделей  $F_{m1}^b$  в качестве опорных при выборе проектных информационных параметров математической модели  $F_{m2}^b$ , включая алгоритмы структурных модулей  $F_{\text{ак}}^b$ , где  $k=1, \dots, 5$  – число алгоритмов ПМО модели  $F_{m2}^b$ ;

- определены и приняты постоянными проектные параметры, характеризующие массу аппаратуры  $m_2 \in \{m_2\}_{\text{доп}}$ , пространственно-геометрические характеристики  $v_2 \in \{v_2\}_{\text{доп}}$  и конструктивные параметры, включая место установки на борту КА  $r_2 \in \{r_2\}_{\text{доп}}$  и пространственную ориентацию  $\Pi_2 \in \{\Pi_2\}_{\text{доп}}$ ;

- математическая модель  $F_{m2}^b$  с составом информационных проектных параметров реализуется на вычислительных средствах бортовой научной аппаратуры и имеет ограничения на объём занимаемой памяти  $u_{\text{по2}} \in \{u_{\text{по2}}\}_{\text{доп}}$  и быстродействие алгоритмов  $t_{\text{по2}} \in \{t_{\text{по2}}\}_{\text{доп}}$  ПМО при расчёте показателей эффективности  $A^b = \{A_{\text{мг}}^b, A_{\text{сэп}}^b, A_{\text{оп}}^b\} \in \{A^b\}_{\text{доп}}$ ;

- технологическая схема информационного обеспечения и состав информационных данных  $q_{\text{но}}^b(V_e, G_{\text{под}})$  для расчёта показателей эффективности построены на измерениях  $G_{\text{под}}$  бортовой системы спутниковой навигации и  $V_e$  научной аппаратуры КСКМ ( $t_{\text{но2}} \rightarrow \min$ );

- выбор проектных параметров аппаратуры, характеризующих энергопотребление  $w_2 \in \{w_2\}_{\text{доп}}$  и циклограмму  $T_2 \in \{T_2\}_{\text{доп}}$  работы аппаратуры, а также алгоритмов ПМО и структурного модуля модели  $F_{m2}^b$  расчёта управляющего магнитного момента  $M_m$  в режиме компенсации микроускорений МГП.

## 2. Выбор алгоритмов программно-математического обеспечения научной аппаратурой контроля состояния микроускорений

Принимая во внимание технологическую схему

информационного обеспечения научной аппаратуры ГРАВИТОН космической МГП, проведена декомпозиция решения задачи, связанной с выбором проектных параметров следующих алгоритмов модели  $F_{m1}^b$  этой аппаратуры:

1. В рамках решения задачи определения внешних интегральных возмущений, действующих на космическую МГП в орбитальном полете, по данным параметров орбитального движения от средств ССН, разработан алгоритм  $F_{a1}^b$ . В основу алгоритма положены уравнения движения КА в отклонениях, в которых функция возмущений аппроксимирована рядом Фурье постоянной структуры. Проектные параметры алгоритма  $F_{a1}^b$  представлены вектором состояния, компоненты которого принадлежат множеству Парето и включают: размерность модели гравитационного поля Земли (ГПЗ), дискретность измерений параметров орбитального движения.

Критерием выбора проектных параметров алгоритма  $F_{a1}^b$ , с заданными техническими характеристиками МГП и аппаратуры ГРАВИТОН, в условиях воздействия внешних факторов, является выполнение условий минимизации частных показателей, а именно:

- время работы алгоритма  $F_{a1}^b$ ;
- объём оперативной памяти данных ПрТМИ для радио телеметрических средств (РТС);
- ошибка или точность расчёта с оценкой на уровне математического ожидания модуля вектора возмущений и радиус-вектора местоположения МГП.

В результате решения частной задачи выбраны следующие значения проектных параметров алгоритма  $F_{a1}^b$ :

- число членов разложения в ряд по сферическим функциям в модели гравитационного поля Земли должно составлять 4, включая все зональные, секториальные и тессеральные компоненты;
- дискретность измерений параметров орбитального движения должна

соответствовать диапазону значений от 30 до 60 с.

Общий объём памяти исполнительного модуля алгоритма  $F_{a1}^b$  не превышает 385 Кбайт, при этом требуемый объём оперативной памяти данных ПрТМИ, которые формируются для средств РТС МГП, не превышает 870 байт, а время работы алгоритма не более 12,0 с.

2. Проектные параметры алгоритма  $F_{a2}^b$  аппроксимации рядом Фурье выборки измерений угловой скорости МГП средствами математической модели аппаратуры ГРАВИТОН представлены вектором состояния, компоненты которого принадлежат множеству Парето и включают: размерность ряда Фурье, дискретность измерений параметров углового движения.

Критерием выбора проектных параметров алгоритма  $F_{a2}^b$ , с заданными техническими характеристиками МГП и аппаратуры ГРАВИТОН, в условиях воздействия внешних факторов, является выполнение условий минимизации частных показателей, а именно:

- время работы алгоритма  $F_{a2}^b$ ;
- ошибка аппроксимации угловой скорости (точность расчёта математического ожидания модуля угловой скорости);
- объём оперативной памяти данных ПрТМИ этого алгоритма для средств РТС.

В результате решения частной задачи выбраны следующие значения проектных параметров алгоритма  $F_{a2}^b$ :

- размерность ряда Фурье должна соответствовать диапазону значений от 12 до 18;
- дискретность измерений параметров угловой скорости должна быть минимальной и соответствовать диапазону значений от 12 до 36 секунд.

Применение алгоритма  $F_{a2}^b$  с выбранными проектными параметрами позволяет сжимать измеренную информацию по каждому каналу: крен, тангаж, рыскание на интервале времени 1-го витка полёта практически в 12 раз, что позволяет значительно сократить

объём данных ПрТМИ до величины 324 байта. Общий объём памяти исполнительного модуля алгоритма не превышает 330 Кбайт, а время его работы не превышает 6,0 с.

3. Алгоритм  $F_{a3}^b$  расчёта поля низкочастотных микроускорений в спектральном диапазоне частот от 0 до 0,01 Гц представлены уравнением линейных возмущений, обусловленными следующими составляющими: осеостремительное, вращательное, адьювантное и аэродинамическое. Проектные параметры алгоритма  $F_{a3}^b$  представлены вектором состояния, компоненты которого принадлежат множеству Парето и включают: размерность модели ГПЗ, дискретность расчёта поля низкочастотных микроускорений.

Критерием выбора проектных параметров алгоритма  $F_{a3}^b$ , с заданными техническими характеристиками МГП и аппаратуры ГРАВИТОН, в условиях воздействия внешних факторов, является вычисление компонентов текущих значений вектора микроускорений, показателя целевой эффективности  $A_{mg}^b$  с реализацией условий минимизации частных показателей, а именно:

- время работы алгоритма  $F_{a3}^b$ ;
- объём оперативной памяти данных ПрТМИ, формируемых этим алгоритмом для средств РТС.

В результате решения частной задачи выбраны следующие значения проектных параметров алгоритма  $F_{a3}^b$ :

- число членов разложения в ряд по сферическим функциям в модели гравитационного поля Земли, как и в алгоритме  $F_{a1}^b$ , должно составлять 4, включая все зональные, секториальные и тессеральные компоненты;

- минимальное время работы этого алгоритма соответствует максимальной величине дискретности расчёта микроускорений 60 с и позволяет минимизировать объём оперативной памяти данных до величины 672 байта.

Общий объём памяти исполнительного модуля алгоритма  $F_{a3}^b$

составляет до 440 Кбайт, а время его работы не превышает 10,0 с.

Максимальные микроускорения внутри объектового пространства спускаемого аппарата МГП соответствуют удалённой от центра масс в окрестностях контрольной точке с координатами  $r_{24}=[2,175; 0,0; -0,650]^T$ .

4. Основная целевая задача алгоритма  $F_{a4}^b$  связана с формированием данных ПрТМИ для последующей передачи средствами РТС в наземный пункт приема информации МГП. Проектные параметры алгоритма  $F_{a4}^b$  представлены вектором состояния, компоненты которого принадлежат множеству Парето и включают: число 8-ми разрядных каналов составляющих телеметрический канал аппаратуры, частоту опроса телеметрического канала аппаратуры ГРАВИТОН средствами РТС.

Критерием выбор проектных параметров, обеспечивающих передачу ПрТМИ от аппаратуры ГРАВИТОН средствами РТС МГП, является выполнение условия минимизации проектных параметров в смысле Парето, при расчёте частного показателя эффективности алгоритма  $F_{a4}^b$ , характеризующего длительность зоны радио видимости наземного пунктом приема информации.

Решением частной задачи выбора проектных параметров алгоритма  $F_{a4}^b$  являются следующие результаты: число 8 разрядных каналов составляющих телеметрический канал не менее 6, частота опроса телеметрического канала аппаратуры ГРАВИТОН не менее 20 Гц.

Максимальный объём оперативной памяти для формирования данных ПрТМИ на интервале времени одни сутки полёта МГП, составляет 27990 байт. Объём памяти исполнительного модуля алгоритма  $F_{a4}^b$  при расчётах составляет 140 Кбайт, а время его работы не превышает 0,1 с.

Проведён расчёт выбранной системы показателей целевой эффективности при завершении цикла работы математической модели аппаратуры ГРАВИТОН  $F_{m1}^b$  на суточном интервале

времени полёта космической МГП с выбранным составом проектных параметров алгоритмов.

При расчёте показателей целевой эффективности принята основная схема орбитального полёта МГП в режиме солнечной ориентации.

Получены следующие результаты:

а) Показатель целевой эффективности, характеризующий состояние поля микроускорений размерностью от 1 до 28 контрольных точек внутри объектового пространства СА МГП, представлен на каждом витке полета данными оценки на уровне максимальных и минимальных значений, среднеквадратичного отклонения и математического ожидания.

Квазистатическое микроускорение внутри СА космической МГП не превышает диапазона значений от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $10^{-6}$  м/с<sup>2</sup> при оценке показателя на уровне математического ожидания  $A_{\text{мг}}(A_{\text{мо}})$ . Возмущения аэродинамического характера (в центре масс МГП) не превышают значения  $5 \cdot 10^{-8}$  м/с<sup>2</sup> при оценке показателя на уровне математического ожидания  $A_{\text{мг}}(A_{\text{мо}})$ .

б) Показатель целевой эффективности, характеризующий оперативность решения задачи оценки поля микроускорений на интервале полёта МГП текущих суток средствами аппаратуры ГРАВИТОН при выбранной структурной и технологической схеме информационного обеспечения лежит в диапазоне значений от 87016 до 87106 с. Выбранные проектные параметры алгоритмов математической модели аппаратуры КСМ обеспечивают решение задачи контроля состояния поля микроускорений с оперативностью не хуже требуемой на всём 30-ти суточном интервале полёта МГП.

в) Эквивалентом показателя целевой эффективности, характеризующего энергетические характеристики СЭП МГП, является математическое ожидание углового расстояния между осью  $O_{\text{с}}c$  и вектором положения Солнца в ССК, рассчитанного по данным выборки текущих значений этой величины.

Результаты численной оценки этого показателя показывают достаточно высокий уровень значений освещённости панелей солнечных батарей, который лежит в диапазоне от 0,996 до 0,999 и связан в основном с ошибкой отработки угловой ориентации в режиме солнечной ориентации средствами СУД МГП.

г) Показатель целевой эффективности, который характеризует затраты памяти вычислительных средств на реализацию программно-математического обеспечения математической модели аппаратуры ГРАВИТОН, рассчитывается в виде суммы следующих компонентов:

- объём памяти с данными ПрТМИ для средств РТС МГП;

- объём данных поступающих по каналам МКО и измерений ВМИ от датчиков аппаратуры ГРАВИТОН;

- объём основных исполнительных модулей перечисленных алгоритмов с временно создаваемыми файлами;

- общий объём памяти, занимаемый системным программно-математическим обеспечением.

Полученная оценка затрат памяти вычислительных средств на реализацию программно-математического обеспечения математической модели  $F_{\text{м1}}^b$  составляет 794387,3 Кбайт и не превышает допустимого диапазона объёма флеш-памяти вычислительных средств аппаратуры ГРАВИТОН, значение которого принимается равным 1 Гбайт.

### **3. Особенности функционирования программно-математического обеспечения научной аппаратурой контроля состояния и компенсации микроускорений**

Основной особенностью научной аппаратуры КСКМ является её функционирование в целях повышения показателей целевой эффективности в режиме неориентированного орбитального полёта МГП с выключенной бортовой СУД (в целях снижения расхода не восполняемых

энергоресурсов и повышения времени активного существования МГП, или отказа СУД), а именно:

- поддержание на максимальном уровне освещённости панелей солнечных батарей  $A_{с\text{эл}}^b \rightarrow \max$ ;

- контроль состояния и снижения величины остаточных низкочастотных микроускорений  $A_{мг}^b \rightarrow \min$ ;

- повышение оперативности решения целевой задачи, связанной с оценкой состояния и компенсации низкочастотных микроускорений  $A_{оп}^b \rightarrow \min$ .

Повышение показателей эффективности обеспечивается в активном режиме работы аппаратуры КСКМ, когда расчётное значение управляющего механического момента вращения МГП создается магнитным моментом  $P_m$  от исполнительных элементов аппаратуры. Система электромагнитов аппаратуры установлена на внешней поверхности конструкции МГП, так что продольные оси совпадают с направлениями осей ССК.

Общая масса аппаратуры КСКМ не превышает следующей суммы отдельных структурных элементов  $m_{\text{КСКМ}} = m_1 + m_2 + \dots + m_8 \leq 42,6$  кг. Общее энергопотребление аппаратуры КСКМ представляет сумму отдельных структурных элементов  $W_{\text{КСКМ}} = W_1 + W_2 + \dots + W_8$  и изменяется в диапазоне от 6,5 до 66,5 Вт.

Длительность работы аппаратуры КСКМ в активном режиме компенсации микроускорений составляет от 1 до 3 суток полёта и определяется величиной показателей целевой эффективности МГП  $A_{мг}^b$  и  $A_{с\text{эл}}^b$ .

Состав информационных данных аппаратуры КСКМ в режиме неориентированного орбитального полета МГП представлен вектором состояния  $q_{но}^b (B_e, G_{под})$ .

Математическая модель  $F_{м2}^b$  аппаратуры КСКМ максимально заимствует алгоритмы ПМО  $F_{м1}^b$  аппаратуры ГРАВИТОН и функционально объединяет:

- алгоритм  $F_{м2}^b$  «Планирования работы аппаратуры КСКМ» в целях решения частных задач контроля состояния и компенсации низкочастотных микроускорений, а также обеспечения максимальных условий освещенности ПСБ;

- алгоритм  $F_{a2}^b = F_{a1}^b$  «Расчёт внешних интегральных возмущений» на начальный момент времени  $t_0$ ;

- алгоритмы  $F_{a2}^b$  «Аппроксимация выборки измерений ВМИ» дискретным рядом Фурье;

- структурные модули алгоритмов «Расчёт параметров орбитального движения»  $G_{под}^b$ , внешних возмущений и адьювантных возмущений, освещенности ПСБ на текущий момент времени  $t_i$  (модель орбитального движения космической МГП);

- алгоритм  $F_{a5}^b$  «Расчет угловых параметров движения» на текущий момент времени  $t_i$ ;

- структурные модули алгоритмов  $F_{ак}^b$  «Модели расчёта внешних факторов орбитального полета», включая следующие: гравитационного поля Земли, плотности атмосферы Земли; ВМИ геомагнитного поля;

- алгоритм  $F_{a3}^f = F_{a3}^b$  «Расчёт низкочастотных микроускорений»  $a_j$ , для заданной структуры контрольных точек  $r_j$  ( $j=1, \dots, N_{на}$ ) на текущий момент времени  $t_i \in [t_0, t_k]$  при заданном уровне дискретности  $h_a$ ;

- структурный модуль алгоритма  $F_{a4}^b$  «Формирование данных ПрТМИ для РТС» измеренных и рассчитанных значений  $G_{под}^f, w_i, a_j, P_{mi}, \alpha_i$ .

Организация логической связи перечисленных модулей и программ осуществляется «Алгоритмом планирования работы аппаратуры КСКМ»  $F_{м2}^b$  путём обращения или вызова перечисленных отдельных подпрограмм с обратным возвратом в системный модуль прерывания работы программ, что обеспечивает возможность обслуживания:

- модуля МКО БВС с аппаратурой КСКМ с дискретным шагом  $h_{\text{МКО}}$  в диапазоне значений от 5 до 60 с;

- датчиков измерения геомагнитного поля с дискретным шагом  $h_{\text{МП}}$  в диапазоне значений от 1 до 60 с;

- отдельных функциональных алгоритмов, модулей и подпрограмм математической модели  $F_{\text{М2}}^b$ .

Основу математической модели  $F_{\text{М2}}^f$ , как и  $F_{\text{М1}}^b$ , составляет модуль «Расчёта параметров орбитального движения и внешних возмущений», включая вычисления вектора местоположения и скорости МПП  $G_{\text{под}}^f$ , вектора внешних возмущений и условий освещенности ПСБ. Модель орбитального движения МПП, реализованная на средствах аппаратуры ГРАВИТОН, без изменений используется в контуре программно-математического обеспечения аппаратуры КСКМ, включая и вызывающие эту модель алгоритмы, а именно:

- алгоритм  $F_{\text{1}}^b$  «Расчёт внешних интегральных возмущений» на начальный момент времени с периодичностью включения на уровне  $\sim 1 T_{\text{д}}$ ;

- алгоритм  $F_{\text{а3}}^b$  «Расчет низкочастотных микроускорений» в заданной контрольной точке внутри объектового пространства МПП с периодичностью включения от 12 до 60 с;

Основной особенностью математической модели  $F_{\text{М2}}^b$  является следующее:

- необходимость проведения измерений ВМИ с минимальной дискретностью в диапазоне от 1 до 60 с, их обработка средствами алгоритма  $F_{\text{а2}}^b$  «Аппроксимация выборки измерений ВМИ»;

- определение возмущений и расчёт управляющих магнитных моментов алгоритмом  $F_{\text{а5}}^b$  по данным измерений ВМИ, которые обеспечивают компенсацию возмущений и условия максимальной освещенности ПСБ с минимальной дискретностью в диапазоне значений от 12 до 60 с;

- увеличение объёма данных ПрТМИ для средств РТС, формируемых алгоритмом  $F_{\text{а4}}^b$ , в состав которых входят расчётные значения микроускорений  $a_i(r_j)$  в заданной контрольной точке, управляющие магнитные моменты  $P_{\text{м}}$  и угловая ориентация осей ССК  $a_i(\gamma, \delta, \beta)$  передаются в составе ПрТМИ средствами РТС в наземный пункт приема информации. Описание угловой ориентаций осей ССК  $(\gamma, \delta, \beta)$  МПП, кинематические уравнения движения полностью приведены в работах [2,3,4,6,7].

Рассмотрим два основных активных режима работы аппаратуры КСКМ.

1. Первый режим работы аппаратуры соответствует условию, когда перед выключением СУД поддерживал режим солнечной ориентации осей ССК. В этом случае алгоритм  $F_{\text{а5}}^b$  функционирует в режиме компенсации микроускорений.

Принимаются следующие допущения [1, 7]:

- на спутник действует только один внешний механический момент  $M_{\text{м}}$ , создаваемый исполнительными элементами аппаратуры КСКМ;

- кинетическая энергия движения спутника относительно центра масс описывается выражением

$$T = \frac{1}{2} (I_1 \omega_1^2 + I_2 \omega_2^2 + I_3 \omega_3^2).$$

Здесь  $I_1, I_2, I_3$ - моменты инерции МПП относительно осей ССК,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – составляющие угловой скорости вращения относительно соответствующих осей ССК.

Принимая во внимание теорему об изменении кинетической энергии  $dT/dt = w \cdot M_{\text{м}} = P_{\text{м}} \cdot (B_{\text{е}} \times w)$ , закон управления магнитным моментом системой магнитных стержней может быть задан в следующем виде:  $P_{\text{м}} = a(\omega \times B_{\text{е}})$ , где  $a$  — положительный коэффициент.

Учитывая состав информационного обеспечения аппаратуры КСКМ  $q_{\text{по}}^b(B_{\text{е}}, G_{\text{под}})$ , значение угловой скорости МПП  $w$  вычисляется по данным измерений ВМИ  $B_{\text{е}}$ .

Согласно формуле Бура абсолютная производная по времени ВМИ имеет вид

$$\dot{\mathbf{B}}_e = \frac{d'\mathbf{B}_e}{dt} + \bar{\omega} \times \mathbf{B}_e,$$

где  $d'\mathbf{B}/dt = (B_1/dt, B_2/dt, B_3/dt)$  – скорость изменения ВМИ в ССК.

Угловая скорость МГП рассчитывается по данным измерений ВМИ  $\mathbf{B}_e$  и равна

$$\omega = \frac{\left(\dot{\mathbf{B}}_e - \frac{d'\mathbf{B}_e}{dt}\right) \times \mathbf{B}_e}{B_e^2}.$$

Описанный первый режим работы аппаратуры КСКМ достаточно экономичен и на его реализацию требуется электроэнергия, обеспечивающая изменение магнитного момента  $\mathbf{P}_M$  в диапазоне значений от  $\pm 50$  до  $\pm 300 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ .

2) Второй режим работы аппаратуры КСКМ соответствует условию, когда СУД не обеспечил на момент отключения режим солнечной ориентации МГП.

В этом случае алгоритм  $F_{a5}^b$  функционирует в режиме трёхосной гравитационной ориентации осей ССК, а обобщённый интеграл энергии можно представить в следующем виде

$$H = \frac{1}{2}(I_1\omega_1^2 + I_2\omega_2^2 + I_3\omega_3^2) - \omega_0(I_1\omega_1 a_{21} + I_2\omega_2 a_{22} + I_3\omega_3 a_{23}) + \frac{3}{2}\omega_0^2(I_1 a_{31}^2 + I_2 a_{32}^2 + I_3 a_{33}^2).$$

Этот интеграл использовался в качестве функции Ляпунова при исследовании устойчивости стационарных решений [ 1 ].

Производная  $H$  по времени с учётом действия управляющего магнитного момента имеет вид

$$\dot{H} = (\omega - \omega_0 \mathbf{E}_2) \mathbf{M}_M = \mathbf{P}_M \cdot [\mathbf{B}_e \times (\omega - \omega_0 \mathbf{E}_2)].$$

Здесь  $\mathbf{E}_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23})$  - орт оси местной вертикали  $OX_2$  ССК.

Принимая закон управления магнитным моментом в виде

$\mathbf{P}_M = a[(\omega - \omega_0 \mathbf{E}_2) \times \mathbf{B}_e]$ , где  $a$  — положительный коэффициент, получим

$$\dot{H} = -a|(\omega - \omega_0 \mathbf{E}_2) \times \mathbf{B}_e|^2.$$

При выполнении достаточных условий устойчивости  $0 < (I_1/I_3) < 1 < (I_2-I_3)/I_1$

стационарные решения  $\omega_1 = \omega_3 = 0$ ,  $\omega_2 = \omega_0 \cos \gamma$ ,  $\sin \gamma = \sin \delta = \beta = 0$  являются точками строгого минимума  $H$ . Поэтому закон управления  $\mathbf{P}_M$  обеспечивает гашение возмущенного движения МГП в режиме трёхосной гравитационной ориентации.

Для реализации закона управления  $\mathbf{P}_M$  необходимо располагать информацией об угловой скорости и ориентации спутника. Ее можно получить, обрабатывая показания магнитометров средствами ПМО аппаратуры КСКМ.

Реализация второго режима работы алгоритма  $F_{a5}^b$  требует значительно больших затрат электроэнергии на обеспечение закона управления магнитным моментом  $\mathbf{P}_M$  в диапазоне значений от  $\pm 50$  до  $\pm 500 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Но величина управляющих моментов уменьшается при выполнении заданных условий трёхосной стабилизации ССК космической МГП.

Средствами компьютерного моделирования исследованы оба закона управления магнитным моментом  $\mathbf{P}_M$  [ 7 ].

Оба закона эффективно решают свои задачи, обеспечивая компенсацию низкочастотных микроускорений, но в первом режиме работы аппаратуры КСКМ точность угловой стабилизации ниже, чем во втором. Применение любого из этих законов позволяет существенно (в 10 раз и более), по сравнению с начальными возмущениями, снизить уровень низкочастотных микроускорений на борту МГП, а применение второго режима работы алгоритма  $F_{a5}^b$  позволяет обеспечить угловую ориентацию осей ССК в целях повышения условий освещённости панелей солнечных батарей.

Энергопотребление при реализации каждого закона, а также точность угловой стабилизации осей ССК зависит от начальных условий движения МГП на момент включения одного из режимов компенсации микроускорений.

**Библиографический список**

1. Белецкий В.В. Движение искусственного спутника относительно центра масс. Изд-во «Наука», М., 1965. – С. 416.
2. Абрашкин В.И., Волков М.В., Егоров А.В., Зайцев А.С., Казакова А.Е., Сазонов В.В. Анализ низкочастотной составляющей в измерениях угловой скорости и микроускорения, выполненных на спутнике "Фотон-12". Космические исследования, 2003, т. 41, № 6, с. 632-651.
3. Абрашкин В.И., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е., Казакова А.Е., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Семкин Н.Д., Чебуков С.Ю. Определение вращательного движения спутника Фотон М-2 по данным бортовых измерений магнитного поля Земли. Препринт №96 за 2005г. Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша. РАН, М., 2005. – С. 32.
4. Абрашкин В.И., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е., Казакова А.Е., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Семкин Н.Д., Чебуков С.Ю. Определение вращательного движения спутника "Фотон М-2" по данным измерений бортовых датчиков. IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород, 22-28 августа 2006. Аннотации докладов, том I, с. 8.
5. Программно-математическое обеспечение средств компьютерного моделирования целевого функционирования КА «Фотон-М» и расчет микроускорений по данным вектора магнитной индукции геомагнитного поля в орбитальном полете. Научно-технический отчет 353П - 34КС - 31155 - 1103, ЦСКБ-Прогресс, Самара, 2006.- С.86.
6. Абрашкин В.И., Богоявленский Н.Л., Воронов К.Е., Казакова А.Е., Пузин Ю.Я., Сазонов В.В., Семкин Н.Д., Чебуков С.Ю. Неуправляемое вращательное движение спутника «Фотон М-2» и квазистатические микроускорения на его боту. Космические исследования, 2007, т. 45, № 5, с. 450-470.
7. Анализ эффективности бортовых средств компенсации микроускорений по

данным математического моделирования целевого функционирования КА «Фотон-М». Научно-технический отчет 353П - 34КС - 32246 – 1103, ЦСКБ-Прогресс, Самара, 2007.- С.63.

**References**

1. Beletsky V.V. Satellite motion relative to centre of mass. Nauka, Moscow, 1965 – P. 416.
2. Abrashkin V.I., Volkov M.V., Egorov A.V., Zaitsev A.S., Kazakova A.E., Sazonov V.V. Analysis of LF component during measuring of angular velocity and microacceleration onboard Foton-12 spacecraft. Space Research, 2003, vol.41, №6, P. 632-651.
3. Abrashkin V.I., Bogoyavlensky N.L., Voronov K.E., Kazakova A.E., Puzin Y.Y., Sazonov V.V., Semkin N.D., Chebukov S.Y. Estimation of Foton M-2 spacecraft angular motion according to onboard measurements of terrestrial magnetism intensity. Preprint №96, 2006, IPM after Keldish M.V., RAS6 Moscow – P. 32.
4. Abrashkin V.I., Bogoyavlensky N.L., Voronov K.E., Kazakova A.E., Puzin Y.Y., Sazonov V.V., Semkin N.D., Chebukov S.Y. Estimation of angular motion of Foton M-2 spacecraft according to onboard sensor measurements. IX All-Russian Congress on Engineering and Applied Mechanics. Nizhniy Novgorod, 22-28 August 2006. Paper abstracts, vol.1, p.8.
5. CAD software for operation of Foton-M spacecraft and calculation of microaccelerations using magnetic inductance vector of geomagnetic field during orbital flight. Technical report 353P – 34KS - 31155 – 1103, TsSKB-Progress, Samara, 2006 – P. 86.
6. Abrashkin V.I., Bogoyavlensky N.L., Voronov K.E., Kazakova A.E., Puzin Y.Y., Sazonov V.V., Semkin N.D., Chebukov S.Y. Uncontrolled angular motion of Foton M-2 spacecraft and quasi-static loads onboard. Space research, 2007, vol. 45, №5, p. 450-470.
7. Performance analysis of spacecraft microacceleration balancing systems according to results of mathematical simulation of Foton-M spacecraft operation. Technical report 353P – 34KS - 32246 – 1103, TsSKB-Progress, Samara, 2007 – P. 63.

**EXPERIMENTAL RESEARCH AND SELECTION OF DESIGN PARAMETERS OF  
THE ONBOARD MICROACCELERATIONS STATE AND COMPENSATION  
MONITORING EQUIPMENT ON THE LOW-ORBIT SPACE  
MICROGRAVITATIONAL PLATFORM**

© 2010 Yu. Ya. Puzin

State Research and Production Space Centre “TsSKB-Progress”, Samara

The given work describes methodical aspects, the results of experimental and computer research connected with an estimation of target indicators of efficiency of space vehicles "Foton-M" No2 and No3. The structure of software models of scientific equipment and some results of a choice of design parameters of algorithms of these models are shown.

*Efficiency indices, design objectives, microgravitational platform, research hardware, dataware, modelling algorithms, software and mathematical support, microaccelerations, microgravitation.*

**Информация об авторе**

**Пузин Юрия Яковлевич** - ведущий инженер-конструктор ФГУП ГНП РКЦ “ЦСКБ-Прогресс”, Тел. (846) 2289321, E-mail: [csdb@samtel.ru](mailto:csdb@samtel.ru). Область научных интересов: проектирование космических микрогравитационных платформ научного назначения.

**Puzin Yuri Yakovlevich**, leading design engineer Samara Space Centre TsSKB-Progress, Telephone: (846) 2289321, E-mail: [csdb@samtel.ru](mailto:csdb@samtel.ru). Field of research: design of space microgravitational platforms for research applications.