

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.78

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ КА «МЕТЕОР-М» № 1 ЗА ПРЕДЕЛАМИ СРОКА ГАРАНТИИ

О.М. Мирошник, А.Д. Беленький, П.А. Козочкин

*Управление ориентацией КА «Метеор-М» №1 осуществляется тремя двигателями-маховиками ДМ20-250 с осями вращения, параллельными осям стабилизации КА. Помимо штатной системы ориентации на борту установлена экспериментальная система ориентации (ЭСО), в состав которой входят шесть двигателей-маховиков ДМ1-20 с осями вращения, перпендикулярными граням правильной пирамиды. В ходе испытаний ЭСО не ставилась задача передачи управления ориентацией КА, а решались ограниченные задачи цифрового управления. После окончания пятилетнего срока эксплуатации КА произошёл отказ канала крена штатной системы ориентации. Возможности цифровой ЭСО позволяли активизировать управление КА по любой оси управления. Это дало возможность использовать управляющие возможности системы маховиков ДМ1-20 для управления КА вокруг оси крена по сигналам датчика вертикали и датчика угловой скорости ЭСО. Исследуются характеристики КА «Метеор-М» №1 после окончания гарантийного периода. Проводится анализ работоспособности штатной и экспериментальной систем ориентации. Описан комбинированный метод поддержания ориентации и стабилизации КА для получения целевой информации. Приведены данные телеметрической информации и фотосъёмки, подтверждающие эффективность реализованного метода ориентации.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, ориентация, система ориентации, двигатель-маховик, телеметрия.

Космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 1 был выведен на орбиту 17 сентября 2009 г. со сроком активного существования не менее пяти лет. 24 сентября 2014 г., т. е. через неделю после окончания пятилетнего срока, в системе ориентации произошёл фатальный отказ. Все резервы системы ориентации, способные парировать отказ были израсходованы, и КА оказался не способным поддерживать штатную ориентацию в орбитальной системе координат. Оставшихся ресурсов КА оказалось достаточно для поддержания режима ориентации солнечных батарей (СБ) на Солнце, что позволило иметь положительный энергобаланс и обеспечить работоспособность всех служебных систем КА.

Анализ телеметрической (ТМ) информации показал, что отказ произошёл в контуре управления двигателем-маховиком (ДМ) канала крена. Вследствие отказа двигатель-маховик вращался с максимальной скоростью, а КА совершал неуправляемое вращение вокруг оси крена. Каналы управления по курсу и тангажу остались работоспособными. В этой ситуации представлялось возможным наведение СБ на Солнце путём совместной работы двух систем КА: канал курса системы ориентации (система 520) обеспечивал наведение СБ на Солнце вращением КА вокруг оси курса, используя показания собственного датчика Солнца; а система ориентации солнечных батарей обеспечивала вращение СБ вокруг оси крена по сигналам своего датчика Солнца.

На практике оказалось, что неконтролируемое вращение маховика крена приводит к периодическому нарушению ориентации СБ на Солнце, поскольку привод СБ периодически достигал упора. Этот отрицательный эффект частично удалось парировать за счёт установки привода одной СБ в фиксированное положение. Проведённые мероприятия обеспечили положительный энергобаланс системы энергоснабжения (СЭС), устойчивую работу служебных систем КА и гелиофизической аппаратуры ГГAK-M. Регулярно проводились сеансы управления и обработки ТМ-информации. Предпринимались попытки съёмки поверхности Земли, но качество полученных кадров было не удовлетворительным. Убедиться в этом можно, взглянув на рис. 1 или обратившись к сайту [1].

10 сентября 2015 г. в системе ориентации произошёл ещё один отказ, в результате которого маховик канала крена прекратил бесконтрольное вращение и остановился. Характер движения КА существенно изменился. Телеметрическая информация за 4 витка представлена на рис. 2: графики трёх угловых скоростей КА, сигналы наличия Земли в двух датчиках вертикали (с основной и экспериментальной систем ориентации), ток заряда аккумуляторной батареи.

Наблюдаемое поведение КА подсказало идею восстановления работоспособности системы ориентации путём передачи функции управления вокруг оси крена экспериментальной системе ориентации

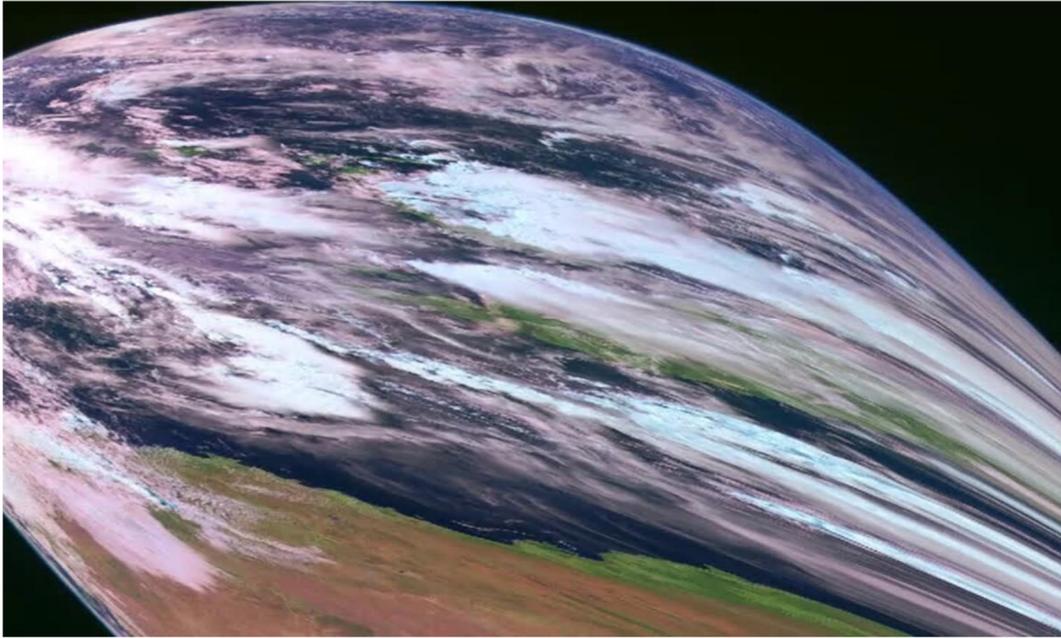


Рис. 1. Съёмка 28 января 2015 г. (съёмочная система МСУ-МР)

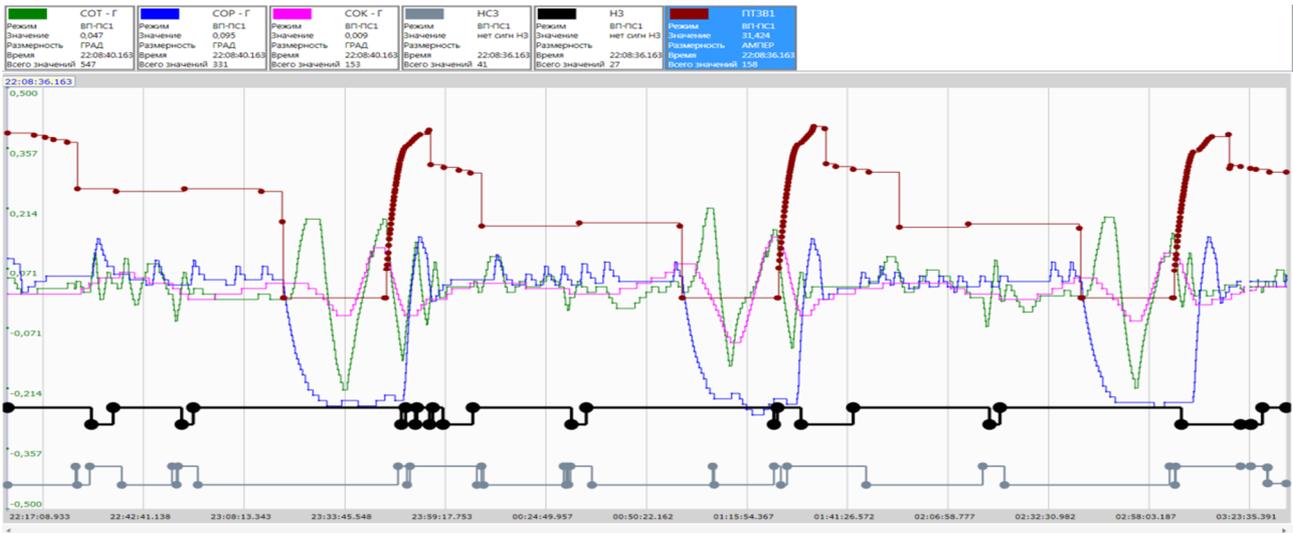


Рис. 2. Телетрическая информация

(ЭСО). Вернёмся на десять лет назад. При комплектации КА «Метеор-М» № 1 штатной системой ориентации было ясно, что в перспективе потребуется её замена из-за устаревшей и снимаемой с производства элементной базы. Учитывая это, Главный конструктор ВНИИЭМ поставил перед разработчиками задачу укомплектовать КА «Метеор-М» № 1 ЭСО. Предстояло создать современную цифровую систему ориентации, новые перспективные приборы, разработать алгоритмы управления и бортовое программное обеспечение. Успешное решение поставленной задачи открыва-

ло магистральный путь развития систем ориентации нового поколения серии спутников «Метеор-М». Экспериментальная система ориентации имела следующий состав: бортовую цифровую вычислительную машину (БЦВМ), блок связи с командной и телетрической системами КА, датчик инфракрасной вертикали Земли, звёздный датчик, датчик Солнца, датчик вектора угловой скорости, выполненный на базе прецизионного гироскопа с газодинамическим подвесом ротора, спутниковую навигационную систему и блок из шести двигателей-маховиков ДМ1-20. Возможности ЭСО по управле-

нию КА «Метеор-М» № 1 были ограничены по двум причинам: во-первых, в ней отсутствовал обязательный для электромеханических систем контур разгрузки; во-вторых, кинетический и управляющий момент маховиков ДМ1-20 был на порядок меньше, чем соответствующие характеристики маховиков ДМ20-250 штатной системы ориентации. В ходе лётных испытаний ЭСО не ставилась задача передачи управления ориентацией КА, а решались ограниченные задачи управления, позволяющие подтвердить заложенные принципы управления и отдельные характеристики системы. Основная задача лётных испытаний состояла в подтверждении работоспособности и технических характеристик, вновь разработанных приборов, алгоритмов управления и бортового программного обеспечения.

Возможности цифровой системы позволяли оперативно активизировать управление КА по любой оси управления. Это давало возможность использовать управляющие возможности системы маховиков ДМ1-20 для управления КА вокруг оси крена по сигналам датчика вертикали и датчика угловой скорости ЭСО. Проблема состояла в организации разгрузки накапливаемого кинетического момента маховичной системы.

Движение вокруг центра масс КА, управляемого двигателями-маховика, описывается уравнениями динамики гиростата [2]:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K} = \mathbf{M}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{K}=(K_x, K_y, K_z)$  – вектор кинетического момента;  $\boldsymbol{\omega}$  – вектор угловой скорости вращения КА относительно инерциальной системы координат;  $\mathbf{M}$  – момент внешних сил, действующих на КА. Пренебрегая внешними силами  $\mathbf{M}=0$  и считая скорость стабилизации КА много меньше скорости вращения орбитального трёхгранника  $\boldsymbol{\omega} = [0, \omega_{op}, 0]^T$ , решение уравнения (1) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} K_x &= K_0 \sin \omega_{op} t \\ K_y &= K_1 \\ K_z &= K_0 \cos \omega_{op} t, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $K_1, K_0 - \text{const}$ .

Из решения (2) видно, что при движении КА по орбите кинетический момент по осям крена и курса меняется по гармоническому закону, т. е. имеет место «перекачка кинетического момента» между каналами крена и курса. Это позволяет осуществлять сброс накопленного кинетического момента КА, имея контуры разгрузки только в каналах тангажа и курса. Однако проблема разгрузки имеет и другую,

количественную сторону. На КА «Метеор» используется электромагнитная система разгрузки (напомним, что ВНИИЭМ является «пионером» в её разработке и применении [3]). Одними из важных технических параметров системы разгрузки являются пороги включения и отключения электромагнитов по величине кинетического момента. Их оптимизация производится по ряду критериев, позволяющих снизить массовые и энергетические показатели системы. Для штатной системы разгрузки КА «Метеор-М» № 1 были выбраны порог включения 5 Н·м·с и порог отключения 1,5 Н·м·с.

Оси вращения двигателей-маховиков ЭСО установлены перпендикулярно граням правильной шестиугольной пирамиды [4]. Для этого использованы две подставки в виде треугольной пирамиды. На одной подставке установлены двигатели-маховики с нечётными номерами, на другой – с чётными. Возможность выбранной схемы установки двигателей-маховиков ЭСО по накоплению кинетического момента вдоль оси крена при номинальном напряжении бортовой сети 27 В составляет 3,4 Н·м·с [5]. Этот уровень существенно ниже порога включения, но выше порога отключения системы разгрузки. На практике напряжение бортовой сети колеблется в пределах 29 – 32 В, что позволяет поднять уровень накопления кинетического момента до 4 – 4,5 Н·м·с, при этом двигатели-маховики ЭСО выходят в «насыщение» на скорости вращения 7000 – 8000 об/мин. Таким образом, можно было рассчитывать, что на значительной части витка орбиты система разгрузки будет обеспечивать сброс кинетического момента до уровня работоспособности маховиков ЭСО.

Для перевода КА в режим орбитальной ориентации путём подключения ЭСО в канал управления по крену потребовалось организовать интерактивный сеанс управления КА. Были задействованы новейшие программно-технические комплексы ЦУП-Метеор и СГК-ВНИИЭМ. Процедура перевода была проведена 3 ноября 2015 г. (сеанс 31799) по техническому заданию, согласованному с Главным конструктором КА. В режиме непосредственного приёма телеметрической информации (режим «НП») специалисты по системе ориентации контролировали скорости стабилизации КА и ждали появления сигналов «наличие Земли» двух датчиков ИК-вертикали Земли. При «наличии Земли» в обоих датчиках вертикали и малых скоростях стабилизации ЦУП-Метеор по специальному каналу связи получил указание на выдачу командно-программной информации (КПИ), активизирующей

контур управления каналом крена ЭСО. Телеметрическая система КА была переведена в режим ПС4, позволяющий в реальном времени контролировать частоты вращения ДМ ЭСО. Подтверждением работы контура ЭСО было синхронное изменение частот вращения шести ДМ, при этом, в соответствии со схемой установки ДМ на КА, три маховика №1, №2, №6 разгонялись в одном направлении, три других №3, №4, №5 в противоположном направлении. После контроля контура управления по крену была выдана команда на включение гироорбитанта (ГО-1). Бортовая автоматика штатной СО подала бортовое питание на гироорбитант №1 и автоматически перевела КА в режим орбитальной ориентации.

Анализ телеметрии на последующих сеансах связи и по настоящее время показывает, что ориентация КА относительно орбитальной системы координат выполняется. Ошибка ориентации в канале крена на большей части витка лежит в пределах линейной зоны датчика вертикали (2 град), однако имеются короткие участки, где ошибка достигает 8 – 10 град. Как показывает анализ, улучшение точности следует сразу после включения электромагнитов системы магнитной разгрузки. Телеметрическая информация (сеанс С-32877.1) за 3 витка представлена на рис. 3: сигналы крена, тангажа и «наличия Земли» датчика вертикали ЭСО, ток заряда батареи.

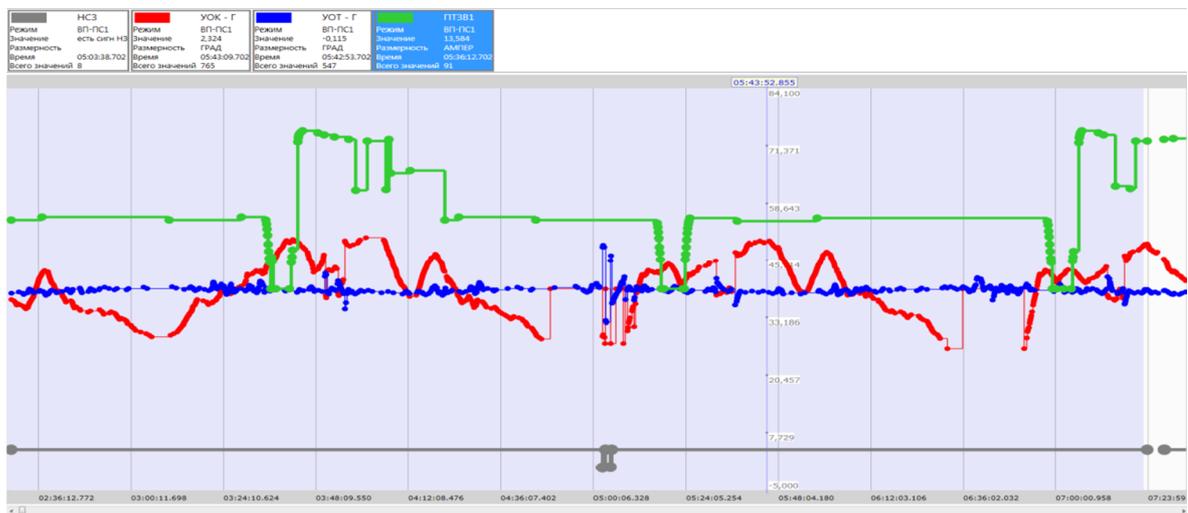


Рис. 3. Телеметрическая информация при совместном управлении штатной и экспериментальной систем ориентации

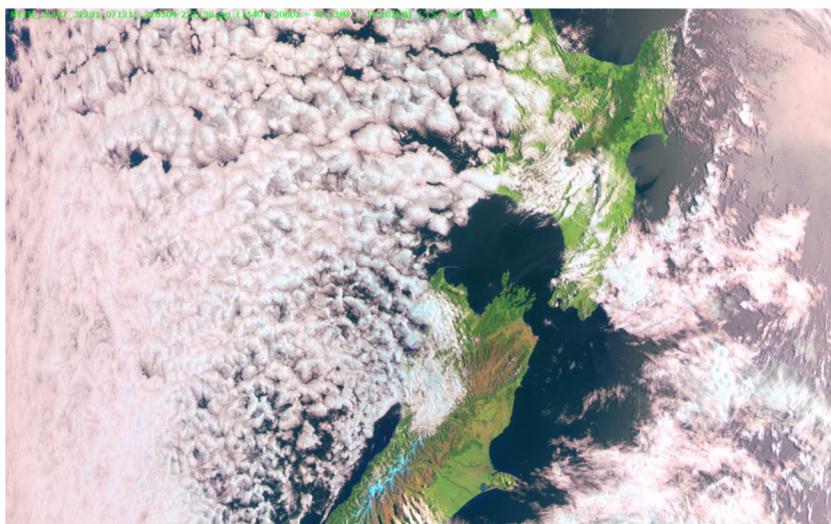


Рис. 4. Съёмка 7 декабря 2015 г., съёмочная система МСУ-М

Для оценки качества стабилизации КА при совместном управлении штатной СО и ЭСО была проведена съёмка. Результаты съёмки Новой Зеландии, приведённые на рис. 4, показывают удовлетворительное качество видеоинформации.

Вместе с тем, условия освещённости для съёмки поверхности при полёте КА над территорией РФ в настоящее время неблагоприятны. В соответствии с баллистическим прогнозом уже в 2017 г. эти условия вновь станут благоприятными. В текущий период положительный эффект от эксплуатации КА «Метеор-М» № 1 состоит в получении информации гелиофизического комплекса и продолжении ресурсных испытаний бортовой аппаратуры в условиях космического полёта.

Особый интерес представляет успешный опыт эксплуатации ДМ ЭСО в условиях повышенной нагрузки, что подтверждает правильность технических решений по выбору их подшипников и смазки [6].

### Литература

1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cloud.mail.ru/public/5rVs/GBz9LqfFR>.
2. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов / Б. В. Раушенбах, Е. Н. Токарь. – М. : Наука, 1973.
3. Бихман Р. И., Шереметьевский Н. Н. Электромагнитная система сброса кинетического момента для искусственных спутников Земли, ориентированных в орбитальной системе координат // Избранные проблемы прикладной механики. Сборник статей к 60-летию академика В. Н. Челомея. – М. : ВИНТИ, 1974.
4. Беленький А. Д., Васильев В. Н., Семёнов М. Е. Управление избыточной системой электродвигателей маховиков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2005. – Т. 102. – С. 107 – 115.
5. Беленький А. Д., Васильев В. Н., Лебедева М. Ю., Семёнов М. Е. Исследование свойств избыточных систем электродвигателей-маховиков // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2005. – Т. 102. – С. 93 – 106.
6. Михайлов Е. М. Опыт проектирования и эксплуатации опор качения электродвигателей научной и служебной аппаратуры в космических аппаратах // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 1998. – Т. 98.

Поступила в редакцию 03.02.2016

*Олег Митрофанович Мирошник, канд. техн. наук,  
начальник отдела, т. (495) 365-27-14.*

*Арон Давыдович Беленький, канд. техн. наук,  
начальник лаборатории, т. (495) 366-21-22.*

*Павел Александрович Козочкин, ведущий инженер,  
т. (495) 365-26-70.*

*E-mail: vniiem\_mir25@mail.ru.  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## CASUALTY CONTROL of 'METEOR-M' №1 SC BEYOND the WARRANTY PERIOD

**O.M. Miroshnik, A.D. Belenkii, P.A. Kozochkin**

*'Meteor-M' №1 SC attitude control is performed by three ДМ20-250 reaction wheels with rotation axis parallel to SC stabilized axis. Apart from the regular attitude control system on board there is also a test bed attitude control system (ЭСО) installed which includes six ДМ1-20 reaction wheels with rotation axis, perpendicular to the edges of the regular pyramid. During the testing procedures the ЭСО was not tasked to transfer attitude control over the SC, it was only dealing with limited tasks related to digital control. On completing of SC life, failure has been detected in the rolling axis of the regular attitude control system. Capabilities of the digital ЭСО allowed to promptly enabling the SC controls by any of the control axis. That granted the ability to use the control capabilities of the ДМ1-20 reaction wheels system to obtain control over the SC around the rolling axis using the vertical sensor signals as well as ЭСО rotation rate sensor signals. Properties of the 'Meteor-M' №1 SC are being analyzed on completing of the warranty period. Operability analysis of the regular and test bed attitude control systems is being performed. Mixed method of maintaining pointing and attitude control of SC in order to obtain the relevant information is described. Telemetry and photoshoot data has been provided confirming the effectiveness of the implemented attitude control method.*

**Key words:** Space craft, attitude control, attitude control system, reaction wheel, telemetry.

### List of References

1. [Digital resource], Access mode: [https:// cloud. mail.ru/public/5rVs/GBz9LqfFR](https://cloud.mail.ru/public/5rVs/GBz9LqfFR).
2. Raushenbakh B. V., Tokar E. N. Space craft attitude control / Raushenbakh B. V., Tokar E. N. – M. : Nauka [Science] Publ., 1973.
3. Bikhman R. I., Sheremetevskii N. N. Electromagnetic kinetic momentum discharge system intended for the artificial Earth satellites oriented in the orbital coordinate system // Selected issues of applied mechanics. Collection of articles by the 60<sup>th</sup> birthday of academician V. N. Chelomei. – M. : VINITI, 1974.
4. Belenkii A. D., Vasilev V. N., Semenov M. E. Control over the redundant system of the reaction wheel electric drives // Matters of electromechanics. NPP VNIIEM Proceedings. – M. : FSUE 'NPP VNIIEM', 2005. – Vol. 102. – P. 107 – 115.
5. Belenkii A. D., Vasilev V. N., Lebedeva M. Iu., Semenov M. E. Investigation of properties of the reaction wheel redundant systems // Matters of electromechanics. NPP VNIIEM proceedings. – M. : FSUE 'NPP VNIIEM', 2005. – Vol. 102. – P. 93 – 106.
6. Mikhailov E. M. Expertise in designing the rolling-contact bearings of electric drives intended for the space crafts' scientific and service equipment // Matters of electromechanics. VNIIEM proceedings. – 1998. – Vol. 98.

**Oleg Mitrofanovich Miroshnik**, *Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),  
Head of Division, tel. (495) 365-27-14.*

**Aron Davydovich Belenkii**, *Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),  
Head of Laboratory, tel. (495) 366-21-22.*

**Pavel Aleksandrovich Kozochkin**, *Leading Engineer,  
tel. (495) 365-26-70.*

*E-mail: vniiem\_mir25@mail.ru.  
(JC 'VNIIEM Corporation').*