

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 629.7

ЭВОЛЮЦИЯ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЮ РОТОРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ ДМ20-250/Т ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЕМИЛЕТНЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КА «МЕТЕОР-М» № 2

А. Д. Беленький, А. Л. Чуркин

Двигатели-маховики, как исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов, имеют ряд технических характеристик, существенным образом определяющих достижимый уровень качества системы ориентации. Одна из таких характеристик – момент сопротивления вращению ротора двигателя-маховика. Исследование этой характеристики при наземных испытаниях не дает достоверных результатов по нескольким причинам: действие гравитации, недостижимый уровень космического вакуума, отсутствие космического излучения. Предложена методика оценки момента сопротивления вращению роторов двигателей-маховиков космического аппарата «Метеор-М» № 2 по телеметрической информации, формируемой системой ориентации. Показаны результаты исследования за семилетний срок летной эксплуатации космического аппарата «Метеор-М» № 2. Приводятся вероятные условия, которые могут оказывать влияние на значения моментов сопротивления, а также дается оценка дальнейшего ожидаемого срока эксплуатации.

Ключевые слова: двигатель-маховик, управляющий момент, момент сопротивления, гироскоп, система стабилизации, методическая погрешность.

Летная эксплуатация космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2 началась в июле 2014 года.

В качестве исполнительных органов в системе ориентации и стабилизации КА используются три двигателя-маховика (ДМ) ДМ20-250/Т [1] (разработчик АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Двигатель-маховик ДМ20-250/Т может создавать управляющий момент от $-0,25$ до $+0,25$ Н·м в диапазоне кинетических моментов ротора ± 20 Н·м·с.

В технических условиях на ДМ20-250/Т регламентируются две составляющих момента сопротивления вращению ротора: момент сухого трения не более $0,0025$ Н·м и коэффициент момента вязкого трения не более $0,00003$ Н·м/мин⁻¹.

Штатный режим ориентации КА «Метеор-М» № 2 – это стабилизация его углового положения в пространстве относительно орбитальной системы координат, при этом каждый ДМ парирует действие на КА возмущающих моментов, кроме того, один из ДМ выполняет функцию компенсатора кинетического момента вращающейся антенны СВЧ-радиометра. Для снятия с маховиков накопленного кинетического момента от внешних моментов используется электромагнитная система разгрузки [2]. Таким образом, установившийся режим работы двух ДМ характеризуется скоростями вращения роторов порядка ± 200 об/мин, а ротора компенсирующего маховика 300 ± 200 об/мин.

Для оценки работы ДМ в полете доступна следующая телеметрическая информация: требуемый управляющий момент и частота вращения ротора, которые формирует бортовая вычислительная машина с тактом $0,125$ с. Объем информации принимае-

мой на сеансах связи с КА после слепых витков составляет от 4000 до 6000 тысяч показаний с тактом съема 4 с. Большой объем выборки позволяет применить статистический метод оценки моментов сопротивления вращению ротора.

Примем в качестве динамической модели КА модель гиростата [3], для которой имеем уравнение:

$$J \frac{d\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} J \vec{\omega} + \vec{\omega} \vec{H} = \vec{M}_{эм} + \vec{M}_{св} + \vec{M}_{сскм} + \vec{M}_{вв}, \quad (1)$$

где J – тензор инерции КА; $\vec{\omega}$ – вектор угловой скорости КА; \vec{H} – вектор кинетического момента роторов системы ДМ; $\vec{M}_{эм}$ – вектор электромагнитного момента, развиваемого электродвигателями маховиков; $\vec{M}_{св}$ – вектор момента сопротивления вращению роторов; $\vec{M}_{сскм}$ – вектор момента создаваемого системой электромагнитной разгрузки; $\vec{M}_{вв}$ – вектор внешних возмущающих моментов, действующих на КА.

Система стабилизации КА «Метеор-М» № 2, используя показания астродатчиков и волоконно-оптических гироскопов, непрерывно обеспечивает высокую точность стабилизации на уровне 10^{-4} с⁻¹. Это позволяет, переходя в уравнении (1) к средним значениям, получить:

$$\hat{M}_{эм} = -\hat{M}_{св}, \quad \hat{M}_{сскм} = -\hat{M}_{вв}. \quad (2)$$

Выражения (2) имеют простой физический смысл: – среднее значение электромагнитного момента двигателей-маховиков расходуется на преодоление

среднего значения момента сопротивления вращению роторов (а в предположении его постоянства на интервалах наблюдения – просто значения);

– среднее значение момента, создаваемого системой электромагнитной разгрузки, расходуется на преодоление среднего значения внешнего возмущающего момента.

Для КА «Метеор-М» № 2, где для стабилизации по каждой оси используется отдельный маховик, первое уравнение системы (2) запишем в виде трех независимых уравнений. При этом учтем, что знак момента сопротивления вращению ротора всегда противоположен направлению его вращения:

$$\hat{M}_{сви} = \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (M_{эмi}(t) \text{sign} \Omega_i(t)) dt \right\}, \quad (3)$$

где $M_{эмi}$, Ω_i – электромагнитный момент и частота вращения ротора i -го маховика; T – период осреднения (использовались выборки длительностью не менее трех периодов орбиты).

Основным фактором, определяющим методическую погрешность оценки момента сопротивления вращению ротора маховика, является наличие в спектре внешних возмущающих моментов низкочастотных гармонических составляющих. Это в основном возмущения на орбитальной и двойной орбитальной частоте. Для оценки верхней границы методической погрешности можно воспользоваться минимаксной оценкой, получаемой варьированием интервала осреднения в пределах половины периода орбиты:

$$\check{M}_i = \min_{t_1 < T < t_2} \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (M_{эмi} \text{sign} \Omega_i) dt \right\},$$

$$\hat{M}_i = \max_{t_1 < T < t_2} \left\{ \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (M_{эмi} \text{sign} \Omega_i) dt \right\},$$

$$t_2 - t_1 = \pi / \omega_{ор},$$

где $\omega_{ор}$ – угловая скорость вращения орбитального трехгранника; $i = 1, 2, 3$ – номера маховиков.

Тогда методическая погрешность не превысит величины:

$$\delta_i = \check{M}_i - \hat{M}_i.$$

Численные эксперименты на ряде случайных выборок дали для верхней границы методической погрешности следующий результат:

$$\delta_i \cong 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \text{ (10 гс} \cdot \text{см)}.$$

На этапе разработки ДМ20-250 была предусмотрена возможность их установки вне гермоотсека КА, поскольку в перспективе предполагалось отказаться от использования гермоотсека. Поэтому первая модификация ДМ20-250 имела герметич-

ный кожух с магнитным клапаном двухстороннего действия [4], что позволяло снизить массу кожуха и гарантировать наличие остаточного давления в кожухе на уровне 1500 ÷ 4000 Па. Для смазки подшипников применялась смазка ВНИИ НП-274 в сочетании с патроном подпитки, содержащим летучую фракцию смазки. Эти мероприятия должны были обеспечивать поддержание момента сопротивления вращению ротора на требуемом уровне в течение заданного ресурса (5 лет). Успешная эксплуатация ДМ20-250 на КА «Электро» НПП ВНИИЭМ и КА АО «НПО им. Лавочкина» лишь косвенно подтверждали, что принятые конструктивные решения были оправданы.

При производстве ДМ20-250 для систем ориентации КА серии «Метеор-М» с целью упрощения технологии было принято решение (без серьезного обоснования) отказаться от герметизации корпуса ДМ и исключить магнитный клапан. Известно, что одни зарубежные производители ДМ (в частности Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL), Великобритания) также пошли по пути отказа от герметизации корпусов, однако при этом перешли на использование сухих смазок подшипников. Другие производители ДМ со схожими характеристиками идут по пути сохранения герметичного корпуса, но с заполнением его инертным газом под низким давлением (Tamam Reaction Wheel Assembly P/N 1712-XXXX Main Specification, Израиль). Кроме того, в связи с ухудшением качества смазки ВНИИ НП-274, был расширен допуск на момент сухого трения до 0,004 Н·м.

Толчком к проведению исследований поведения момента сопротивления вращению ротора ДМ20-250/Т послужило существенное увеличение постоянной составляющей ошибки ориентации и корреляция ее знака с направлением вращения ротора соответствующего маховика в процессе летной эксплуатации КА (рис. 1), а также ряд других косвенных причин.

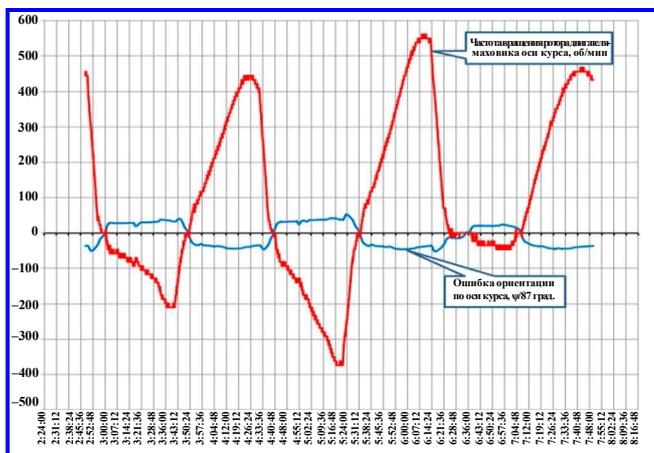


Рис. 1. Ошибка ориентации по углу курса

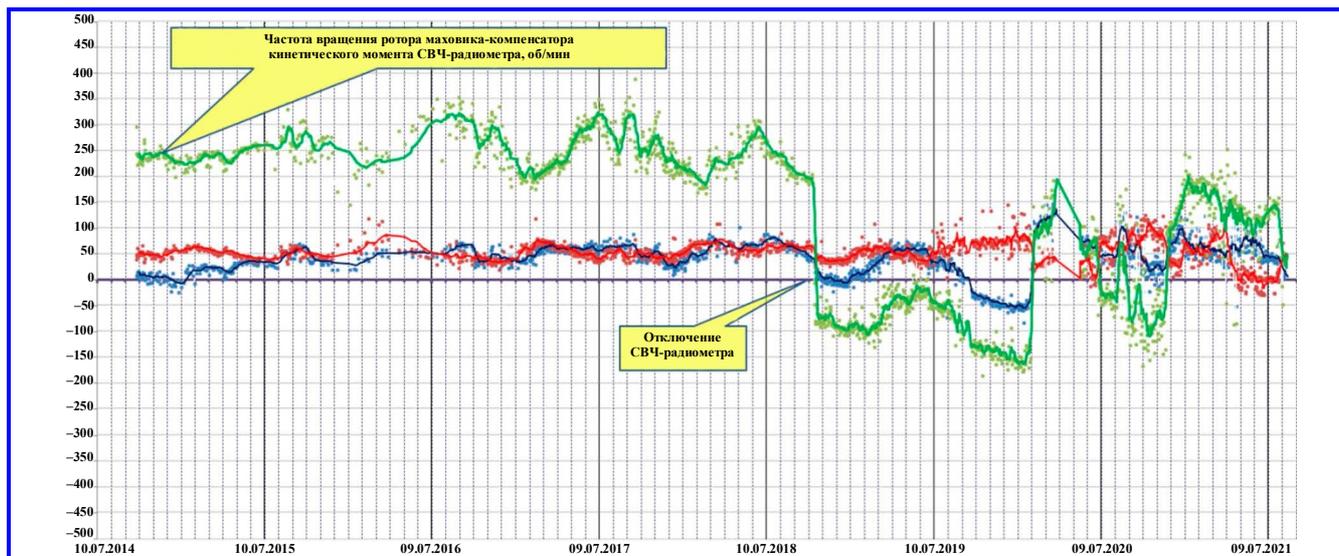


Рис. 2. Средние значения частот вращения роторов двигателей-маховиков (об/мин)

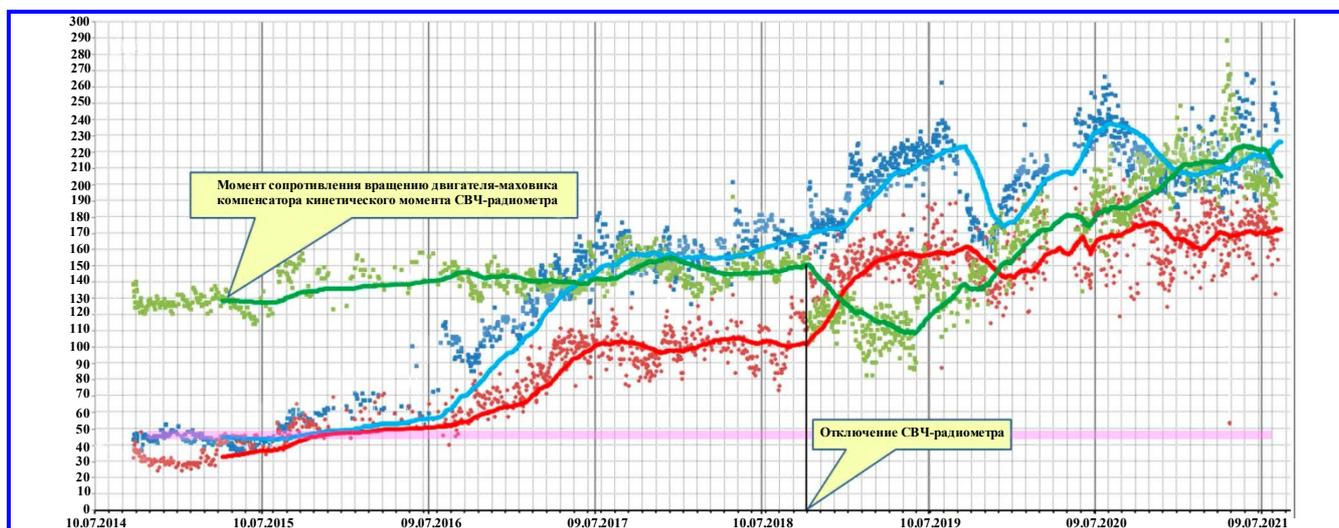


Рис. 3. Оценки моментов сопротивления вращению роторов двигателей-маховиков (гс·см)

На рис. 2 приведены средние значения частот вращения ДМ (сплошные линии) за семь лет эксплуатации КА «Метеор-М» № 2. В октябре 2018 года СВЧ-радиометр был выведен из эксплуатации, соответственно маховики перестали выполнять функцию компенсации его кинетического момента, что видно на рис. 2 по резкому изменению частоты вращения ротора маховика-компенсатора (зеленая линия).

На рис. 3 приведены графики изменения средних значений моментов сопротивления вращению роторов ДМ (сплошные линии).

Следует отметить, что в течение первых 20-ти месяцев летной эксплуатации значения моментов сопротивления вполне соответствуют техническим

условиям на ДМ20-250/Т. Следующие 12 месяцев характеризуются резким нарастанием моментов сопротивления медленно вращающихся маховиков, что скорее всего связано с истощением легкой фракции в патроне подпитки и, как следствие, деградации смазки. Начиная с 2020 года и по настоящее время (летняя эксплуатация продолжается) момент сопротивления в 3 – 5 раз превышает допустимый и практически не зависит от частоты вращения ротора, фактически имеет характер сухого нестабильного момента трения.

Температурные условия эксплуатации ДМ КА «Метеор-М» № 2 характеризуются годовым изменением температуры фланца крепления ДМ от 15 до 25 градусов Цельсия, при этом

имеет место тенденция к возрастанию среднегодовой температуры примерно на 1 градус в год. Таким образом, следует ожидать, что ДМ не менее 10 лет будут эксплуатироваться в условиях допустимых технических условиями температур ($0 \div 40$ °С).

Литература

1. Электродвигатель-маховик постоянного тока / В. Я. Журавлев, В. Н. Кузьмин, Е. М. Михайлов [и др.] //

Труды ВНИИЭМ. – Москва : ВНИИЭМ, 1985. – Т. 78. – С. 67 – 74.

2. Коваленко А. П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами / А. П. Коваленко. – Москва : Машиностроение, 1975. – 248 с.

3. Раушенбах Б. В., Токарь Е. Н. Управление ориентацией космических аппаратов / Б. В. Раушенбах, Е. Н. Токарь. – Москва : Наука, 1974. – С. 600.

4. Магнитные клапаны давления / И. А. Вевюрко, И. В. Мягков, Л. М. Паластин [и др.] // Труды ВНИИЭМ. – М. : ВНИИЭМ, 1985. – Т. 78. – С. 75 – 84.

Поступила в редакцию 14.06.2021

Арон Давыдович Беленький, кандидат технических наук, заместитель главного конструктора по системам ориентации, т. (495) 366-21-22, e-mail: ar.bel81@mcc.vniiem.ru.

Александр Львович Чуркин, кандидат технических наук, главный конструктор космических систем и комплексов, т. (495) 623-31-98, e-mail: a.churkin@hq.vniiem.ru.

(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

EVOLUTION OF THE MOMENTS OF RESISTANCE TO ROTATION OF RW20-250/T REACTION WHEEL ROTORS ACCORDING TO THE RESULTS OF SEVEN-YEAR OPERATION OF «METEOR-M» № 2 SATELLITE

A. D. Belenkii, A. L. Churkin

Reaction wheels, as actuating devices of spacecrafts attitude control systems, have a number of technical characteristics, which essentially define the attainable level of the attitude control systems quality level. One of these characteristics is the moment of resistance to rotation of reaction wheel rotor. Exploration of this characteristic during the ground tests does not provide valid results for several reasons: action of gravity, unattainable level of space vacuum, absence of space radiation. A method for evaluation of the moment of resistance to rotation of the reaction wheel rotors of Meteor-M #2 satellite according to telemetry data generated by the attitude control system is suggested. The results of the research covering seven years of Meteor-M #2 satellite flight operation are presented. The probable conditions, which may influence the values of resistance moments, are specified; further expected lifetime is evaluated as well.

Key words: reaction wheel, control moment, resistance moment, gyrostat, stabilization system, systematic error.

References

1. DC electric reaction wheel / V. Ia. Zhuravlev, V. N. Kuzmin, E. M. Mikhailov [et al.] // VNIIEEM proceedings. – Moscow : VNIIEEM, 1985. – Vol. 78. – Pp. 67 – 74.

2. Kovalenko A. P. Space vehicles magnetic control systems / A. P. Kovalenko. – Moscow: Mashinostroyeniye, 1975. – P. 248.

3. Rauschenbach B. V., Tokar E. N. Spacecrafts attitude control / B. V. Rauschenbach, E. N. Tokar. Moscow: Nauka, 1974. – P. 600.

4. Magnet pressure valves / I. A. Vevyurko, I. V. Miagkov, L. M. Palastin [et al.] // VNIIEEM proceedings. – M.: VNIIEEM, 1985. – Vol. 78. – Pp. 75 – 84.

Aron Davydovich Belenkii, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Deputy General Designer for attitude control systems, tel.: +7 (495) 366-21-22, e-mail: ar.bel81@mcc.vniiem.ru.

Aleksandr Lvovich Churkin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief Designer of Space Systems, tel.: +7 (495) 623-31-98, e-mail: a.churkin@hq.vniiem.ru. (JC «VNIIEEM Corporation»).