

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ ИСЗ ТИПА «МЕТЕОР-М» ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БЦВМ АЛГОРИТМА РАБОТЫ МАГНИТОГИРОСКОПИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Магнитогироскопическая система (МГС) состоит из магнитометра, БЦВМ, магнитопривода (трех электромагнитов) и одностенного гиросtabilизатора (двигателя-маховика) с постоянным кинетическим моментом, направленным по оси тангажа $OУ$ ИСЗ [1]. На вход БЦВМ должна поступать навигационная информация.

В МГС на основании измерения вектора индукции магнитного поля Земли (МПЗ), определения положения ИСЗ в географической системе координат и вычисления соответствующего этому положению вектора индукции по Международному эталонному геомагнитному полю (МЭГП) определяются разности между измеренными и расчетными значениями векторов индукции и их производных по времени. Полученная информация используется для управления магнитоприводом, создающим управляющий момент за счет взаимодействия его магнитного момента с МПЗ.

Необходимость гиросtabilизации оси $OУ$ ИСЗ связана со стремлением ослабить влияние на точность ориентации известного недостатка магнитопривода – его неспособность создавать управляющий момент по направлению вектора индукции МПЗ. Для минимизации погрешности ориентации в МГС используется магнитопривод с линейной зависимостью магнитного момента от управляющих сигналов БЦВМ.

МГС может работать в трех основных режимах ориентации.

В первом режиме [1] в качестве расчетных значений вектора индукции используются проекции оценки текущего вектора индукции МПЗ по МЭГП на оси орбитальной системы координат. В этом случае МГС осуществляет успокоение, приведение и ориентацию ИСЗ в орбитальных координатах. При этом ИСЗ ориентирован на Землю, его ось $OУ$ совпадает с бинормалью к орбите, а направление на Солнце вращается относительно спутника вокруг его оси $OУ$ с орбитальной скоростью.

Во втором режиме, который можно условно назвать энергетическим, после успокоения ИСЗ ориентируется таким образом, что его

ось OY , как и в первом режиме, направлена по бинормали к орбите, а вокруг этой оси ИСЗ поворачивается так, чтобы его плоскость OYZ совпадала с направлением на Солнце. При этом спутник вращается вокруг оси OY относительно Земли с орбитальной скоростью, зато направление на Солнце остается неподвижным относительно его корпуса. Угол между нормалью к СБ и направлением на Солнце можно минимизировать за счет поворота СБ вокруг оси OX и, тем самым, создать благоприятные условия для работы системы энергоснабжения. В идеальном случае угол падения солнечных лучей на поверхность СБ может быть равен нулю. Рассматриваемый режим МГС можно реализовать, если в качестве расчетных значений вектора индукции МПЗ по МЭГП использовать его проекции на оси системы координат, связанной с бинормалью и направлением на Солнце.

В третьем режиме МГС функционирует в нештатной ситуации, когда навигационная информация, необходимая для вычисления вектора индукции МПЗ по МЭГП, по каким-либо причинам на входе БЦВМ МГС отсутствует. В этом случае, после успокоения, ИСЗ ориентируется в системе координат, связанной с вектором индукции МПЗ: ось OY , как и ранее, направлена по бинормали к орбите, а любое наперед заданное направление в плоскости OYZ спутника совпадает с проекцией вектора индукции МПЗ на эту плоскость. При такой ориентации ИСЗ вращается вокруг оси OY относительно Земли со средней скоростью, равной орбитальной, а скорость вращения Солнца относительно ИСЗ в два раза больше орбитальной. Третий режим работы является менее благоприятным для съема электроэнергии с СБ. Поэтому если рассматриваемая нештатная ситуация оказывается достаточно длительной, то БЦВМ МГС может быть переведена в режим автономного определения навигационных параметров по магнитному полю Земли с последующим (приблизительно через сутки) переключением МГС на первый или второй режим ориентации. Очевидно, что точность ориентации ИСЗ при этом будет хуже, чем в случае использования известных неавтономных средств определения навигационных параметров спутника.

Современные прецизионные системы ориентации обычно содержат в своем составе необходимые для работы МГС устройства: БЦВМ и двигатели-маховики – в составе системы ориентации; магнитометр и магнитопривод – в составе магнитной системы успокоения и разгрузки двигателей-маховиков. Поэтому современные маховичные системы могут работать в режиме магнитогироскопической ориентации, реализуя принцип функционального резервирования, который, как известно [2], играет важную роль при решении задачи обеспечения живучести системы ориентации.

Точность ориентации МГС сравнительно невелика. Например максимальная погрешность ориентации на мини-ИСЗ типа УМКП-3 (массой около 150 кг) может достигать $1,0-1,5^\circ$ [1]. Поэтому переход прецизионной системы ориентации в режиме МГС при появлении нештатной ситуации может иметь своей целью, главным образом, создание необходимых условий для работы системы энергоснабжения с тем, чтобы обеспечить возможность дальнейшей работы с ИСЗ в возникших обстоятельствах.

Существует мнение [3] о целесообразности включения в число расчетных нештатных ситуаций, подлежащих предполетному рассмотрению, тех обстоятельств, вероятность появления которых хотя и незначительная, но их реализация может существенно повлиять на ход дальнейшего полета.

К числу таких обстоятельств, безусловно, относится случай отсутствия информации об угловой скорости вращения ИСЗ на начальном этапе полета сразу после отделения от носителя. В этих условиях работа системы ориентации в режиме МГС обеспечит успокоение ИСЗ и ориентацию его оси OY по бинормали к орбите, т.е. позволит решить задачу создания необходимых условий работы, по крайней мере, системы энергоснабжения ИСЗ, находящегося на солнечно-синхронной орбите.

Необходимо отметить, что переход прецизионной системы ориентации в режим МГС может оказаться целесообразным также в случае отсутствия сигналов ПМВ на любом этапе полета. Однако в такой нештатной ситуации более предпочтительным является использование в системе прецизионной ориентации ИСЗ сигналов так называемого [4] магнитогироскопического орбитанта, который позволяет по сигналам ДУСа и магнитометра с помощью БЦВМ осуществить вычисление отклонений ИСЗ от орбитальной системы координат с предельной точностью порядка $0,5^\circ$.

Основными показателями работы прецизионной системы ориентации в режиме МГС являются: скорость сброса кинетического момента на этапе успокоения, время выхода оси OY на бинормаль, а также потребление магнитопривода и точность ориентации в установленном режиме.

Существуют два обстоятельства, являющиеся специфическими для работы прецизионной системы ориентации в режиме МГС и оказывающие существенное влияние, прежде всего, на точность ориентации.

Необходимую для работы в режиме МГС степень гиросtabilизации ИСЗ можно характеризовать величиной периода нутационных колебаний оси OY , которая определяется отношением величины кинетического момента одностепенного гиросtabilизатора к

средней геометрической величине моментов инерции ИСЗ по осям OX и OZ . Чем меньше период нутационных колебаний, тем ближе свойства ИСЗ к желаемым свойствам гироскопа и тем более качественным может быть регулирование положения оси OY с помощью магнитопривода.

Величина максимального кинетического момента двигателя-маховика прецизионной системы ориентации (который в режиме МГС может быть использован в качестве гиростабилизатора) выбирается из условия его работы в штатном режиме. В большинстве случаев период нутационных колебаний ИСЗ, гиростабилизированного с помощью штатного двигателя-маховика, оказывается достаточно большим. Например для ИСЗ типа «Метеор-М» период нутационных колебаний может составлять величину порядка 15 мин. Для сравнения отметим, что период нутационных колебаний мини-ИСЗ типа УМКП-3 при использовании в качестве специального одноступенного гиростабилизатора двигателя-маховика с максимальным кинетическим моментом $1\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ равен одной минуте.

Вторая особенность работы прецизионной системы в режиме МГС связана с тем, что в ее магнитной системе успокоения и разгрузки двигателей-маховиков чаще всего используется магнитопривод в релейном исполнении. Очевидно, что релейное включение магнитопривода для осуществляемого в МГС управления положением ИСЗ сказывается неблагоприятным образом на точности ориентации.

Требования к основным характеристикам МГС могут быть определены в процессе решения комплексной задачи создания необходимых условий для работы служебной аппаратуры, обеспечивающей возможность работы с ИСЗ в нештатной ситуации.

Важно отметить, что для работы системы энергоснабжения требования по точности ориентации могут быть почти на два порядка ниже тех, которые необходимы для работы ИСЗ в штатном режиме. В первом приближении можно полагать, что погрешность ориентации оси OY на бинормаль может быть того же порядка, что и погрешность работы привода СБ в штатном режиме ориентации ИСЗ.

Результаты приближенного моделирования работы прецизионной системы ориентации в режиме МГС на примере ИСЗ типа «Метеор-М», ориентируемого в орбитальных координатах. В процессе моделирования учитывались следующие основные инструментальные погрешности:

- возмущающий момент, действующий на ИСЗ, 10^{-4} Н·м;
- нулевой сигнал магнитометра 500 нТл;
- погрешность крутизны магнитометра 3%;
- гармоническая помеха магнитометра 200 нТл;
- дискретность магнитометра 20 нТл;

- гармоническая вариация МПЗ (являющаяся приближенным аналогом наиболее интенсивных геомагнитных пульсаций типа Pс-5 [5]) с амплитудой 100 нТл и периодом 150 - 600 с;
- влияние работы магнитопривода на сигнал магнитометра 100 нТл.

Методические погрешности работы МГС (в число которых помимо погрешности представления главного геомагнитного поля с помощью МЭГП и геомагнитных вариаций включены также погрешности определения текущего положения ИСЗ в географической системе координат по поступающей в БЦВМ МГС навигационной информации) в проведенных исследованиях не учитывались. В первом приближении можно считать [1], что минимально достижимая методическая погрешность МГС равна $0,5^\circ$.

Авторы считают своим долгом выразить глубокую благодарность канд. техн. наук В.С.Самборскому НИИЭМ (г. Истра), любезно предоставившему сведения о характеристиках инструментальных погрешностей магнитных систем.

При расчетах полагалось, что: моменты инерции ИСЗ на момент отделения $J_{XO}=J_{YO}=200 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_{ZO}=100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; моменты инерции после раскрытия СБ $J_X=200 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_Y=800 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_Z=700 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; орбитальная угловая скорость 10^{-3} с^{-1} ; начальная максимальная угловая скорость отделения ИСЗ по каждой оси $2,5 \text{ }^\circ/\text{С}$; кинетический момент маховика по оси ОУ $2,5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$; номинальный магнитный момент электромагнита $100 \text{ А}\cdot\text{м}^2$; остаточный магнитный момент электромагнита $7 \text{ А}\cdot\text{м}^2$.

Полагается, что для минимизации влияния работы магнитопривода на магнитометр используется способ импульсного управления, при котором измерение индукции МПЗ происходит в паузах работы электромагнитов. При этом период импульсного управления равен 6 с, а время паузы 1 с.

Закон управления магнитоприводом – релейный. После отключения электромагнита величина его магнитного момента принималась равной остаточной намагниченности, а знак совпадал со знаком магнитного момента в предшествующее включение.

При моделировании МПЗ было представлено полем диполя [6]. Величина индукции на магнитном экваторе принималась равной $2\cdot 10^{-5} \text{ Тл}$. Угол магнитного наклона плоскости орбиты считался постоянной величиной и выбирался из диапазона $87 - 109^\circ$.

Расчеты показали, что средняя скорость сброса начального кинетического момента зависит от его исходного положения в орбитальной системе координат и находится в диапазоне $(19-31)\cdot 10^{-4} \text{ Н}\cdot\text{м}$. Суммарное время успокоения и приведения не превышает 4 ч.

- В режиме ориентации:
- максимальное отклонение оси OY от бинормали к орбите не превосходит 6° ;
 - максимальное отклонение оси OZ от местной вертикали не превышает $4,5^\circ$;
 - величина процента включения магнитопривода за один период обращения ИСЗ по орбите находится в диапазоне от 3, 6 и 4% до 24, 52 и 27% соответственно для электромагнитов по осям OX , OY и OZ (в зависимости от частоты гармонической помехи магнитометра).

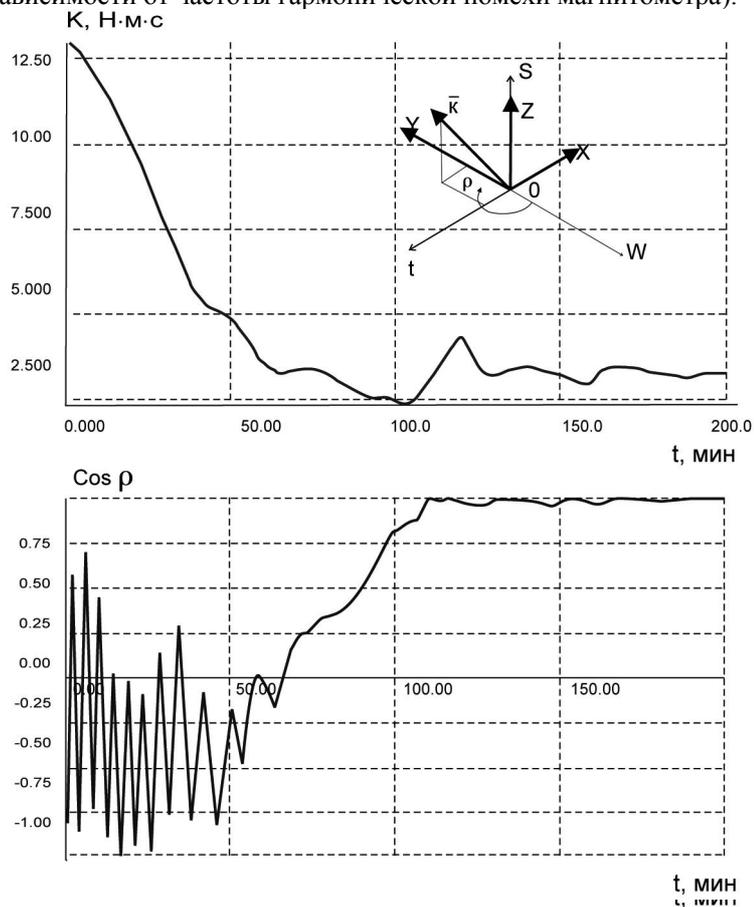


Рис. 1. Успокоение и наведение

На рис. 1 приведены графики изменения во времени модуля кинетического момента и косинуса угла ρ между осью OY и бинормалью OW к орбите в процессе успокоения и приведения. Там же изображены начальные положения вектора кинетического момента K системы и строительной системы координат $OXYZ$ изделия относительно орбитальной системы $OtWX$. На рис. 2 представлены графики изменения угла тангажа ϑ и угла ρ во времени в режиме ориентации. Видно, что указанные выше максимальные значения погрешности ориентации достигаются только в отдельные моменты времени, так что средние величины погрешностей ориентации за виток оказываются значительно меньше максимальных.

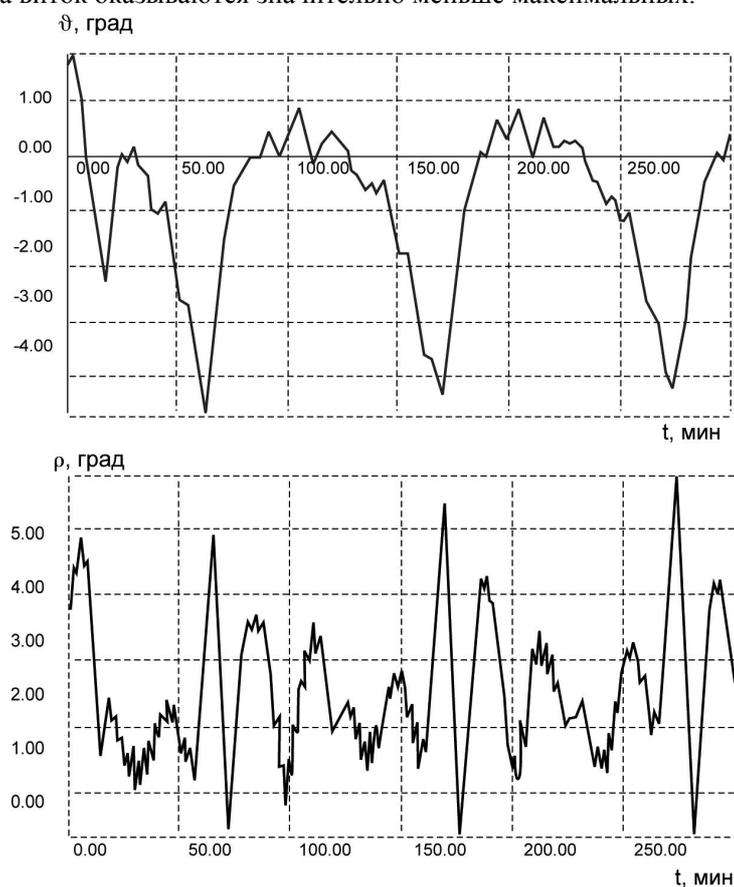


Рис. 2. Режим ориентации

Необходимо отметить, что даже при отсутствии возмущений и погрешностей реализации МГС точность ориентации ИСЗ составляет несколько градусов. При этих же условиях точность ориентации мини-ИСЗ типа УМКП-3 (со сравнительно малым периодом нутационных колебаний и линейным законом управления магнитоприводом) не превышает $2'$. Приведенный пример демонстрирует отмеченную выше специфику работы прецизионной системы ориентации в режиме МГС, связанную со слабой степенью гиросtabilизации и релейным исполнением магнитопривода.

Наконец необходимо отметить особенность работы МГС в третьем режиме ориентации, когда ИСЗ ориентируется по бинормали и проекции вектора индукции МПЗ на плоскость OXZ . В этом случае имеет место неравномерность вращения ИСЗ вокруг оси OY , что связано с неравномерностью вращения в инерциальном пространстве вектора индукции МПЗ вокруг бинормали, регистрируемого на ИСЗ при его движении по орбите. Поэтому в третьем режиме ошибка ориентации оси OY на бинормаль и процент включения магнитопривода оказываются больше, чем при ориентации в орбитальной системе, когда вокруг оси OY ИСЗ вращается с равномерной скоростью, отслеживая осью OZ направление на Землю. Для ИСЗ типа «Метеор-М» ошибка ориентации OY на бинормаль не превышает $9,3^\circ$, а процент включения 44, 64 и 9% соответственно для электромагнитов по осям OX , OY и OZ . Время перехода с третьего режима ориентации на первый составляет около 2,5 ч.

Заключение. Проведенное приближенное моделирование работы МГС при релейном законе управления и низкой частоте нутационных колебаний на примере ИСЗ типа «Метеор-М» показало, что максимальная погрешность ориентации оси тангажа на бинормаль к орбите может не достигать чрезмерно большой величины и быть сопоставимой с погрешностью слежения за Солнцем применяемого на ИСЗ привода СБ.

Это предоставляет возможность в нештатной ситуации осуществить перевод прецизионной системы ориентации в режим работы МГС с целью обеспечения приближенной ориентации ИСЗ для создания необходимых условий работы системы энергоснабжения на солнечно-синхронной орбите.

Приведенные результаты являются предварительными. Они могут использоваться для приближенной оценки свойств работы прецизионной системы ориентации в режиме МГС при решении комплексной задачи обеспечения живучести ИСЗ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козаков А.В. Магнитогироскопическая система – достойный соперник гравитационной системы ориентации на малых спутниках. М.: Труды НПП ВНИИЭМ. Т.100. 2001.
2. Мирошник О.М. Проблемы обеспечения живучести систем современных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. М.: Труды ВНИИЭМ. Т.99. 1999.
3. Кравец В.Г., Любинский В.Е. Основы управления космическими полетами. М.: Машиностроение. 1983.
4. Козаков А.В. Перспективы использования магнитного поля Земли при решении задачи определения ориентации ИСЗ с высокой точностью /См. наст. том.
5. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир. 1986.
6. Коваленко А.П. Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами. М.: Машиностроение. 1975.