

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СИЛОВЫХ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Приведены основные отечественные разработки силовых гироскопических комплексов для систем управления ориентацией космических аппаратов с момента возникновения этого технического направления по настоящее время. Представлены конструктивные и схемные особенности, технические характеристики современных СГК. Рассмотрены научно-технические решения, позволившие существенно улучшить динамические и точностные параметры новых разработок. Сделаны выводы об основах построения современных СГК и перспективах их развития.

Ключевые слова: силовые гироскопические комплексы, гиродины, кинетический момент, система управления ориентацией, космический аппарат.

Введение

Для систем управления космических аппаратов (КА), требующих создания управляющих моментов от единиц до нескольких десятков ньютоно-метров, основным типом исполнительных органов являются силовые гироскопические комплексы (СГК).

В нашей стране, так же как и в США [1], разработка СГК для систем управления космических аппаратов началась в конце 1960-х годов, когда возникло требование минимизировать расход рабочего тела двигательных установок КА при переориентации.

История создания СГК для КА

Первыми силовыми гироскопическими комплексами были СГК «Квадрат», состоящие из двух спаренных трехстепенных гироскопов и обеспечивающей электроники. Величина кинетического момента каждого из 4 гироскопов была приблизительно 100 Н·м·с.

Первый СГК этого типа был разработан НИИ командных приборов в 1971 г. В 1978 г. этот силовой гироскопический комплекс был принят в эксплуатацию в составе КА «Янтарь-2К». Всего было изготовлено 183 таких изделия, 140 из них

Мкртычян Александр Рачикович. Генеральный директор, главный конструктор АО «НИИ командных приборов» (С.-Петербург).

Башкеев Николай Иванович, первый заместитель генерального директора, первый заместитель главного конструктора АО «НИИ командных приборов».

Якимовский Дмитрий Олегович. Кандидат технических наук, начальник отделения АО «НИИ командных приборов».

Акашев Денис Иванович. Начальник отдела АО «НИИ командных приборов».

Яковец Ольга Борисовна. Ведущий инженер АО «НИИ командных приборов».

Статья по докладу на XXIX конференции памяти ведущего конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова.

отработали в натуральных условиях (суммарная наработка 150 тыс. часов), полностью подтвердив свою эффективность и высокую надежность.

Использование СГК позволило создать практически безрасходную, высокоточную систему управления ориентацией высокоманевренного КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

В дальнейшем было разработано еще несколько поколений СГК подобного типа: «Катет», «Корона», «Кристалл», «Контракт», «Камея» – всего было изготовлено 287 комплектов. Они эксплуатировались до 2001 г.

В 1978 г. НИИ командных приборов по техническому заданию РКК «Энергия» для астрофизического КА «Гамма» разработал первый двухступенной силовой управляющий гироскоп – гиродин [3]. Эти приборы в конструктивном отношении значительно проще спаренных трехступенных гироскопов, но их применение потребовало развития специальной теории и разработки сложных алгоритмов и программ управления работой системы гироскопов.

Кинетический момент этого СГК составлял 94 Н·м·с, максимальный управляющий момент ± 7 Н·м, масса 42 кг. Было изготовлено 40 изделий, 34 из них прошли автономную отработку с общей наработкой 50 тыс. часов, а шесть успешно работали на орбите с июля 1990 года по февраль 1992 года.

В восьмидесятых годах НИИ командных приборов были разработаны гиродины с кинетическим моментом 250 Н·м·с, в том числе «Кондор» для КА ДЗЗ и научного назначения, и начата НИР «Консул» по разработке гиродин на бесконтактном подвесе.

Отличительной особенностью гиродин «Консул» явилось использование электромагнитной опоры ротора гироскопа. Впервые гиродин с такой опорой был разработан ВНИИ электромеханики для орбитальной станции «Мир»; он обладал кинетическим моментом 1100 Н·м·с и находился в эксплуатации с 1986 по 2001 годы. Возникновение данного направления работ в стране было обусловлено необходимостью обеспечения длительных сроков активного существования КА за счет исключения изнашиваемой шарикоподшипниковой опоры ротора, уменьшения момента сопротивления, а также снижения уровней вибрационных и акустических возмущений. Однако необходимость наличия в конструкции аварийных подшипников на случай пропадания электропитания приводит к снижению общего ресурса работы таких приборов. По сравнению с шарикоподшипниковыми опорами применение электромагнитных опор ротора приводит к уменьшению жесткости и дополнительному энергопотреблению гироскопа. При этом шарикоподшипниковые опоры при правильно выбранных параметрах способны обеспечить ресурс работы силового гироскопа более 20 лет при скоростях вращения ротора до 10 000 об/мин, что подтверждено результатами испытаний НИИ командных приборов по исследованию надежности шарикоподшипниковых опор силовых гироскопов. В связи с этим электромагнитные опоры ротора гироскопа в последующих разработках НИИ командных приборов не нашли применения. В настоящее время шарикоподшипниковые опоры ротора являются основным типом опор, применяемым в силовых гироскопах как отечественных, так и зарубежных. Разработки СГК с электромагнитными опорами могут быть востребованы в обеспечение создания систем управления ориентацией КА со специальными требованиями к уровню вибрационных возмущений.

Следует отметить уникальность еще одной разработки НИИ командных приборов. В 1985 г. разработан крупнейший отечественный гиродин с кинети-

ческим моментом $2500 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ в рамках темы «Кентавр-С», прошедший автономную наземную отработку в полном объеме. Создание гиродин с массой 250 кг потребовало технического перевооружения производственных и испытательных баз предприятий, участвовавших в его разработке и изготовлении.

Современные разработки СГК

В конце 1990-х – начале 2000-х годов были активизированы работы по созданию гиродин для КА «Ресурс-ДК» с кинетическим моментом $100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ в рамках темы «Кратер». СГК «Кратер» на сегодняшний день применяется в различных КА, в том числе с 2006 г. находится в эксплуатации в составе аппарата «Ресурс-ДК». В разработке был применен универсальный интерфейс магистральный последовательный, создан цифровой измеритель угла поворота подвеса гироскопа, устанавливаемый на оси подвеса гироскопа и используемый в контуре управления электродвигателем привода в виде 16-разрядного кода угла. Разработан блок питания асинхронного двигателя гироскопа, что обеспечило его работу от источника постоянного тока 27 В (вместо ранее используемого источника $40 \text{ В } 500 \text{ Гц}$). В этом приборе был применен низкоскоростной двигатель электропривода и выбраны оптимальные характеристики редуктора с одноступенчатой зубчатой передачей с передаточным числом 10. Масса СГК составила 43 кг , ресурс работы на орбите – 3 года.

Для КА «Ресурс-П» были разработаны гиродин с кинетическим моментом $250 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, масса этого СГК составила 49 кг , ресурс работы – 5 лет. Комплект из шести СГК находится в летной эксплуатации.

В настоящее время в НИИ командных приборов изготавливается современный СГК с двумя уровнями кинетического момента 60 и $100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ для штатного комплекта КА «Обзор-Р» [11]; разработаны СГК с кинетическими моментами 3 , 5 , $30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ для малых КА. Ведется разработка СГК с кинетическим моментом ротора $50 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ и подготовлен научно-технический задел для разработки современного СГК с кинетическим моментом ротора $1000 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, потребность в котором прогнозируется для орбитальной станции.

СГК с двумя уровнями кинетического момента ротора 60 и $100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ разработан в 2009 г. для высокоманевренных КА ДЗЗ (рис. 1, а).

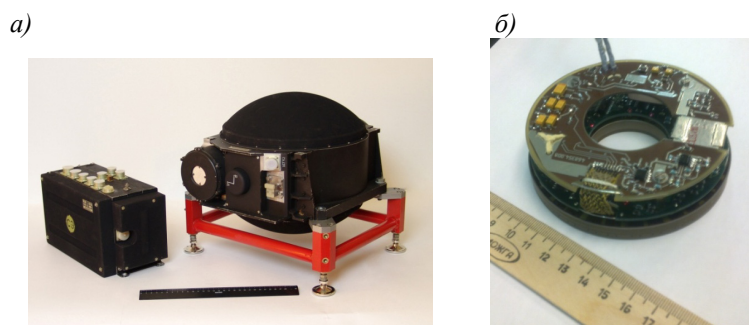


Рис. 1. СГК с кинетическим моментом ротора $H=60$; $100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ (а); внешний вид измерителя углового положения (б)

Данный СГК обладает улучшенными динамическими характеристиками по быстродействию и точности создания управляющего гироскопического момента, а также меньшей массой и более низким энергопотреблением относительно

предшественников. Был принят ряд новых технических решений, позволивший существенно улучшить его основные параметры.

Были минимизированы массовые характеристики силового гироскопа за счет оптимизации габаритных размеров, увеличения частоты вращения ротора более чем на 25% и сделан ряд конструктивных и технологических усовершенствований. Разработан новый цифровой исполнительный электропривод [10], в состав которого входят: измеритель углового положения подвеса (ИУП), бесконтактный моментный двигатель постоянного тока (БДПТ), одноступенчатый редуктор, блок управления приводом (БУП).

В БУП реализована двухконтурная система регулирования скорости, которая содержит контур регулирования интеграла скорости (угла поворота подвеса) и подчиненный ему контур регулирования тока двигателя. На каждом такте управления (160 мкс) определяется величина углового рассогласования между расчетным и измеренным углами поворота подвеса. После необходимых преобразований и коррекции информация поступает в контур регулирования тока двигателя.

Данные об угловом положении ротора БДПТ, необходимые для формирования системы 3-фазных токов, вычисляются по информации ИУП. Для обеспечения необходимых вычислений с заданным быстродействием электрическая схема БУП создана на базе 32-разрядного микроконтроллера с тактовой частотой 40 МГц.

Динамические свойства и точность электропривода во многом определяются характеристиками ИУП. Разработан цифровой ИУП со следующими характеристиками: разрядность выходного кода – 20, погрешность не более 7,5", время преобразования сигнала 160 мкс. В состав измерителя входит 2-отсчетный индукционный датчик угла и электронный преобразователь. Для уменьшения помех в тракте преобразования сигналов электронный преобразователь расположен в непосредственной близости с датчиком угла, в одном с ним корпусе (рис. 1, б).

Задача электронного преобразователя – преобразование аналоговых сигналов грубого и точного отсчетов датчика угла в код и передача его в БУП. В процессе обработки сигналов используются тарировочные функции, позволяющие компенсировать систематические погрешности датчика угла. Тарировка производится дважды – до установки ИУП в электромеханический модуль гироскопа и после – и осуществляется в два этапа. На первом этапе при совершении полного оборота подвеса снимаются показания ИУП и эталонного энкодера, определяются нормировочные коэффициенты трактов грубого и точного отсчетов.

На втором этапе для всех периодов грубого и точного отсчетов определяются коэффициенты рядов Фурье для гармонических составляющих, вносящих основной вклад в погрешность угла. Коэффициенты заносятся в память контроллера электронного преобразователя.

Принятые технические решения позволили обеспечить погрешность обработки задаваемых скоростей подвеса в диапазоне от 0,1 до 60°/с не более 1%. СГК прошел цикл наземной отработки и начал проходить летные испытания.

Новый СГК с кинетическим моментом ротора $H=30$ Н·м·с, разработанный в 2013 г., принципиально отличается от ранее разработанных приборов моноблочным исполнением электронных и механических модулей (рис. 2, а).

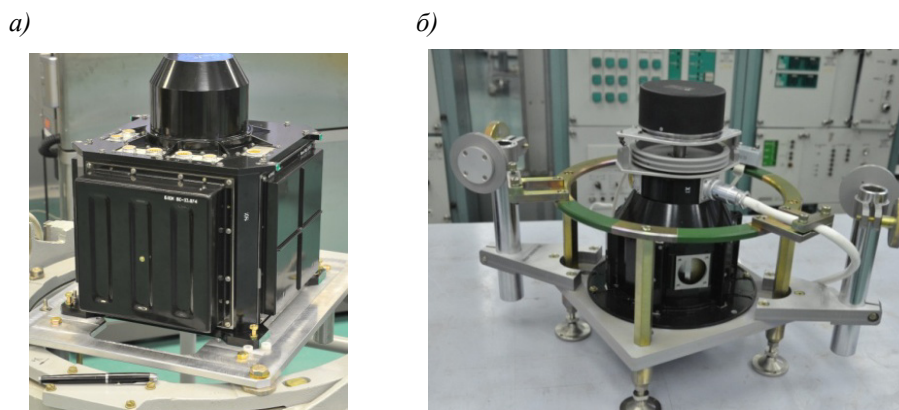


Рис. 2. СГК с кинетическим моментом $H=30 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ (а); силовой гироскопический прибор СГК с кинетическим моментом $H=3 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ (б)

Электропривод гироскопа и исполнительный электропривод подвеса также построены на базе БДПТ. Структурные и схмотехнические решения реализации приводов практически совпадают с решениями, принятыми при создании двухуровневого СГК с $H=60; 100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$. В настоящее время проводятся лабораторные автономные испытания приборов и систем СГК.

Мероприятия по разработке СГК с кинетическим моментом $H=3 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ (рис. 2, б), начатые НИИ командных приборов в 2010 г., создали задел для систем управления малоразмерных высокоманевренных КА с получением минимальных массогабаритных характеристик.

На основе этого задела в настоящее время проводится разработка СГК с кинетическим моментом $H=5 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, востребованного НПО им. С.А. Лавочкина для такого типа КА.

Гиродин состоит из электромеханического и электронного модулей. Электроприводы гиромотора (ГМ) и исполнительный электропривод подвеса выполнены на базе БДПТ. В исполнительном электроприводе подвеса не используется редуктор. Для снижения массогабаритных характеристик ИУП выполнен меньших размеров и имеет 16-разрядный выходной код. Оптимизированы схмотехнические решения электронных блоков. В настоящее время изготовлены два опытных образца СГК с $H=3 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$, завершаются автономные испытания.

Основные технические характеристики гиродинов современного унифицированного ряда, разработанного предприятием, приведены в таблице.

Основные технические характеристики гиродинов

Характеристика	СГК для КА «Ресурс-П»	СГК для КА «Обзор-Р»	СГК-30	Мини-СГК
Кинетический момент, $\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$	250	60; 100	30	3 (3÷5)
Максимальный управляющий момент, $\text{Н}\cdot\text{м}$	37,5	100	30	1
Масса прибора с блоком электроники, кг	49	25,6	17	4,5
Диапазон изменения скорости поворота подвеса, $^\circ/\text{с}$	$\pm 8,6$	$\pm 57,3$	$\pm 57,3$	± 21
Дискретность изменения скорости поворота подвеса, $^\circ/\text{с}$	0,0042	0,007	0,007	0,02
Назначенный ресурс, лет	5	5	5	15
Дискретность измерения угла для управления приводом, угл. с	40	1,2	3	20

Выводы

Многолетний опыт НИИ командных приборов по разработке силовых гироскопических комплексов позволяет определить основные научно-технические решения, которые закладываются в основу большинства современных гиродинов:

1. В качестве двигателей гиromотора используются бесконтактные двигатели постоянного тока с дублированными обмотками без датчика положения ротора, что позволяет избежать наличия слаботочных линий в устройстве трансляции сигналов с неподвижной на подвижную часть подвеса гиromотора, повысить ресурс и надежность изделия, улучшить его массогабаритные характеристики. Возможность длительного ресурса работы гиromотора на шарикоподшипниковой опоре с одноразовой закладкой смазки подтверждена испытаниями семи гиromоторов с наработкой более чем по 20 лет и девяти – с наработкой более чем по 15 лет.
2. В исполнительном электроприводе используются низкоскоростные бесконтактные двигатели постоянного тока без датчика положения ротора в составе двигателя. Информация об угле поворота ротора двигателя формируется по сигналам с датчика угла на оси подвеса гиromотора. Для гиродинов с кинетическим моментом $30 \div 1000$ Н·м·с оптимален одноступенчатый редуктор с передаточным числом $10 \div 20$.
3. Для управления скоростью вращения привода подвеса гиromотора, измерения угла поворота подвеса гиromотора и в качестве датчика положения ротора двигателя привода используется резервированный многополюсный индуктивный датчик угла, устанавливаемый на оси подвеса гиromотора, и 20-разрядный цифровой преобразователь «угол-код». Это позволяет обеспечить высокие точностные и динамические характеристики скорости поворота подвеса гиromотора (момента управления) и уменьшить массогабаритные характеристики привода.
4. Цифровые системы управления частотой вращения ротора гиromотора и скоростью вращения привода подвеса гиromотора построены на основе современных микроконтроллеров, цифроаналоговых и аналого-цифровых преобразователей, других модулей и микросхем и в последних разработках интегрированы с блоками оконечных устройств мультиплексного канала обмена по ГОСТ Р52070-2003.

Направления развития силовых гироскопических комплексов связаны с расширением ряда типонаименований СГК по значению кинетического момента; с дальнейшим улучшением параметров исполнительного электропривода; со снижением уровней собственных вибраций; с изменением схемотехнических решений, построенных на цифровых элементах импортного производства, с максимально возможным использованием разрабатываемых отечественных ЭРИ с повышенной радиационной стойкостью и стойкостью к воздействию тяжелых заряженных частиц, что в перспективе приведет к повышению конкурентоспособности разрабатываемых отечественных СГК на мировом рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Liska, D.J.** A Two-Degree-of-Freedom Control Moment Gyro for High-Accuracy Attitude Control // AIAA Journal, Vol. 3, No. 3, March, 1968.

2. **Раушенбах, Б.В.** Управление ориентацией космических аппаратов/ Б.В. Раушенбах, Е.Н. Токарь // М.: Наука, 1974, 600с.
3. **Токарь, Е.Н.** Управление избыточными гиросиловыми системами. / Токарь Е.Н., Легостаев В.П., Михайлов М.В., Платонов В.Н. // Космические исследования. Т. XVIII, вып. 2, 1980.
4. **Шереметьевский, Н.** В чем сила гиродинов / Н. Шереметьевский, Б. Черток // газета «Правда» № 249 от 6 сент. 1987 г.
5. **Branets, V. N.**, Development experience of the attitude control system using single-axis control moment gyros for long-term orbiting space station. / Branets V. N., Weinberg D. U., Verestchagin V. P., Danilov-Nitusov N. N., Legostaev V. P., Platonov V. N., Semenov U. P., Semyachkin V. S., Chertok B. E., Sheremetevsky N. N. // Acta Astronautica. Vol. 18, № 1, 1988.
6. **Арефьев, В.П.** Инерционные исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов / В.П. Арефьев, А.В. Сорокин, Н.И. Башкеев, О.А. Кондратьев // Гироскопия и навигация. - 1995. - № 2. - С. 7-11.
7. **Сорокин, А.В.** Гиросиловая система ориентации космического аппарата «Ресурс-ДК» / А.В. Сорокин, Н.И. Башкеев, В.В. Яременко, Ю.Г. Антонов, Н.А. Куроедов, Б.К. Сучков, Е.И. Сомов // IX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: - СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2002. - С. 268-274.
8. **Сорокин, А.В.** Сравнительный анализ силовых гироскопических комплексов высокودинамичных космических аппаратов / А.В. Сорокин, Н.И. Башкеев // X Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2003. - С. 272-277.
9. **Somov, Ye. I.** Steering the Control Moment Gyroscope Clusters Outboard High-Agile Spacecraft/ Somov Ye. I., Platonov V. N., Sorokin A. V. // 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. Reprints. Vol.1, S-Petersburg, Russia, 2004.
10. **Петров, П.П.** Цифровой исполнительный электропривод гироина / П.П. Петров, О.Б. Яковец // XIX Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов: Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. - Королев: РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2012. - С. 50-54.
11. **Акашев, Д.И.** Перспективный силовой гироскопический комплекс для высокоманевренных космических аппаратов / Д.И. Акашев, О.Б. Яковец // VI научно-техническая конференция молодых специалистов: Ракетно-космическая техника. - Вып. 1. - Екатеринбург: ФГУП «НПО автоматики им. академика Н.А. Семихатова», 2013. - С. 34-38.

Abstract. Principal Russian technologies in the sphere of power gyroscopic systems for spacecraft attitude control systems are presented since the emergence of this technology till the present time. Design and circuit features, specifications of the up-to-date power gyroscopic systems are described. Scientific and technical solutions are considered, which critically improve dynamic and accuracy parameters of new solutions. The principles of designing the modern power gyroscopic systems and prospects of their development are summarized.

Key words: power gyroscopic systems, gyrodynes, angular momentum, attitude control system, spacecraft