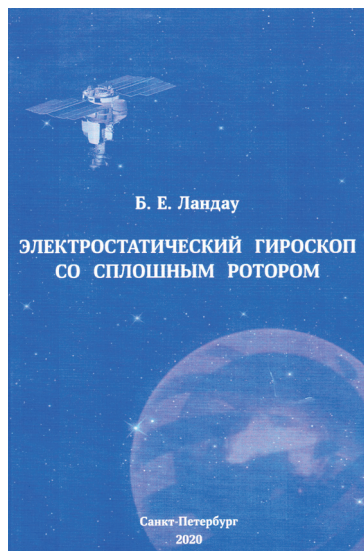


◆ НОВЫЕ КНИГИ ◆

О книге Б. Е. Ландау «Электростатический гироскоп со сплошным ротором»

В январе 2021 года ушел из жизни Борис Ефимович Ландау, доктор технических наук, автор более 100 патентов и свыше 200 научных публикаций. В течение многих лет он входил в состав редколлегии журнала «Гироскопия и навигация», был членом международной общественной организации «Академия навигации и управления движением», ученого и диссертационного советов ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Главным делом его жизни стало создание бескарданного электростатического гироскопа со сплошным ротором. За несколько месяцев до смерти Бориса Ефимовича вышел из печати его последний научный труд – монография «Электростатический гироскоп со сплошным ротором», которая была очень важна для него. Представляем эту книгу вниманию читателей.



Различные исследования последнего времени указывают на то, что основными факторами, определяющими состав и структуру построения навигационного оборудования (НО) для большинства подвижных объектов, будет ужесточение требований по точности, информационной автономности в условиях действия естественных и искусственных радиопомех, стоимости, массогабаритным характеристикам и энергопотреблению.

Как известно, исходя из стоимости и необходимости обеспечения высоких эксплуатационных характеристик, основу современного НО подвижных объектов в большинстве случаев составляют бескарданные инерциальные навигационные системы (БИНС).

Выполнение требований к БИНС по точности навигационного обеспечения современных и перспективных объектов приводит к необходимости суще-

ственного улучшения характеристик инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ), прежде всего гироскопов, что является сложной проблемой, решение которой требует значительных финансовых и временных затрат.

Работы по совершенствованию существующих и созданию новых типов гироскопов продолжаются, и рассматриваемая монография призвана этому способствовать.

Книга содержит введение, пять разделов, заключение и перечень литературы из 108 наименований.

Во введении приводится история создания одного из прецизионных современных гироскопов – электростатического (ЭСГ), содержащего вращающийся сферический ротор, взвешенный в вакууме силами Кулона. Описываются структура построения и задачи, которые необходимо было решить при разработке ЭСГ.

Отмечается, что проектированием и производством электростатических гироскопов занималось в мировой практике ограниченное число компаний: в США – Honeywell, Autonetics Rockwell, во Франции – Sagem, в России – ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург), МИИЭА и НИИПМ (Москва), РПКБ (г. Раменское).

В России определяющий вклад в развитие технологий ЭСГ и их теоретической базы, как справедливо замечает автор, внесли коллективы, возглавляемые к.ф.-м.н. О.Ф. Орловым (НИИПМ), главным конструктором В.Н. Брюшковым (МИИЭА), д.т.н. Ш.Ф. Чарышевым (РПКБ), д.т.н., профессором МЭИ Ю.Г. Мартыненко. При этом практические результаты в ходе разработки и внедрения в эксплуатацию ЭСГ с полым и сплошным ротором получены только в ЦНИИ «Электроприбор» при создании прецизионных инерциальных систем (ИНС) для автономной навигации и управления движением подвижных объектов. Этими работами руководит генеральный директор института академик РАН В.Г. Пешехонов.

Основные результаты при разработке ЭСГ с полым ротором для карданных ИНС были получены под руководством главного конструктора д.т.н. А.С. Анфиногенова, а ЭСГ со сплошным ротором для бескарданных ИНС – главного конструктора д.т.н. Б.Е. Ландау.

В последующих разделах излагаются результаты исследований под руководством автора в области проектирования и изготовления бескарданного ЭСГ (БЭСГ) со сплошным ротором, а также разработки и эксплуатации бескарданной инерциальной системы ориентации (БИСО) на его базе для орбитальных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли.

В первом разделе рассматриваются основные технические решения, принятые при создании БЭСГ в части выбора ротора гироскопа, его электростатического подвеса, системы обеспечения и контроля вакуума, магнитного экранирования гироскопа, системы разгона и демпфирования нутационных колебаний ротора и системы съема информации об угловом положении ротора гироскопа.

В итоге была выбрана конструкция со сплошным бериллиевым ротором Ø10 мм с несферичностью не более 0,02 мкм, взвешенным в электрическом поле, создаваемом тремя парами ортогональных электродов. Система управления электростатическим подвесом позволила обеспечить собственную частоту подвеса не менее 1 кГц. В наземных условиях напряжения на электродах управляемо изменяются относительно опорного значения 450 В, что обеспечивает перегрузочную способность электростатического подвеса 12-14 g. Для повышения точности гироскопа в условиях невесомости, например в установившемся режиме полета орбитального КА, удерживаются напряжения на электродах подвеса на минимальном уровне. В то же время на период воздействия ускорений, связанных, в частности, с маневрированием КА на орбите, напряжения на электродах подвеса увеличиваются, что обеспечивает его необходимую перегрузочную способность.

Разгон ротора до частоты около 3 кГц и демпфирование его нутационных колебаний обеспечивается шестью симметричными катушками. Привод используется только для раскрутки ротора до необходимой угловой скорости, после чего он отключается. Стабилизация частоты вращения ротора осуществляется электрическими силами подвеса. Поддержание и контроль уровня вакуума в приборе обеспечивается магнито-разрядным насосом, который создает в рабочем зазоре остаточное давление не выше 10^{-5} – 10^{-7} мм рт. ст. Информация об угловом положении ротора в связанной системе координат в неограниченном диапазоне углов считывается шестью ортогонально размещенными оптическими датчиками по растровому рисунку на роторе.

Первые партии БЭСГ были изготовлены в начале 1990-х годов и прошли длительные испытания, по результатам которых была осуществлена, как утверждает автор, значительная доработка конструкции прибора.

Во втором разделе кратко приведены основные особенности ЭСГ со сплошным ротором, которые позволяют обеспечить его высокие точностные и эксплуатационные характеристики, такие как высокая тепловая стабильность формы ротора в широком диапазоне температурных воздействий; стабилизация скорости вращения ротора с использованием остаточного радиального дисбаланса; стабильность геометрических параметров сплошного ротора от запуска к запуску гироскопа; устойчивость гироскопа к аварийным посадкам и др.

В третьем разделе излагаются теоретические положения в построении модели дрейфа БЭСГ. В основу положен метод силовых функций для потенциальных и соленоидальных полей. Зависимости строятся с учетом произвольного положения корпуса гироскопа относительно оси кинетического момента ротора, а проекции ускорений характеризуются управляющими напряжениями, которые являются реакцией подвеса на силовые воздействия.

Утверждается, что основные моменты сил, действующих на сферический ротор, взвешенный в поле электрического подвеса, обусловлены отклонением формы ротора от правильной сферы, осевой и радиальной составляющими дисбаланса, неравножесткостью каналов подвеса, остаточными магнитными полями.

При описании силовой функции консервативных моментов, связанных с дисбалансом и несферичностью ротора, использовалось разложение формы ротора по полиномам Лежандра в виде ряда сферических гармоник.

В результате проведенных исследований и полученных экспериментальных данных была принята детерминированная модель дрейфа БЭСГ, которая представляется в виде аналитических функций, связывающих геометрические параметры несферичного и несбалансированного ротора с параметрами физических полей – источниками возмущающих моментов. Данная модель несравнимо сложнее модели дрейфа ЭСГ в кардановом подвесе. Приведены методы идентификации параметров модели при полярной и экваториальной ориентациях вектора кинетического момента ротора гироскопа.

Следует отметить, что используемая в настоящее время расчетная модель дрейфа БЭСГ требует совершенствования, так как не в полной мере описывает дрейф гироскопа при больших углах отклонения его корпуса от оси вектора кинетического момента ротора. По всей видимости, в этих условиях имеют место некие нелинейные эффекты в подвесе ротора гироскопа, которые не описаны в модели и приводят к непрогнозируемому дрейфу.

Одной из принципиально новых и сложных задач было создание системы съема информации об угловом положении ротора БЭСГ относительно связанной с его корпусом системы координат (система съема угла – ССУ) в неограниченном диапазоне углов, включая модель погрешностей этой системы, методы и средства идентификации ее параметров.

В данном разделе рассмотрены также способы построения математических моделей тепловых процессов, температурных возмущающих факторов и приведены результаты анализа температурных погрешностей БЭСГ. Как следует из полученных аналитических соотношений, внешние температурные градиенты влияют на динамические характеристики металлического ротора, при этом градиенты температуры в роторе весьма малы (за счет высокого вакуума в зазоре и хорошей теплопроводности ротора). Это обуславливает минимальные температурные погрешности БЭСГ на уровне $-10^{-4} \dots 10^{-6}$ град/час/°С.

Для частного случая полярной ориентации корпуса и вектора кинетического момента ротора гироскопа получены аналитические решения уравнений движения ротора БЭСГ при наличии модуляционного вращения его корпуса и при его отсутствии. Приведены результаты стендовых испытаний. Показана эффективность использования автокомпенсационного вращения корпуса БЭСГ. В частности, модуляционное вращение корпуса гироскопа в данном случае обеспечивает: наблюдаемость погрешностей ориентации измерительных осей гироскопа на фоне его дрейфа, обусловленного осевым дисбалансом ротора; минимизацию моментов от четных гармоник формы ротора, а также диссипативных моментов и возмущений, не учитываемых в принятой расчетной модели дрейфа БЭСГ.

Четвертый раздел посвящен описанию результатов использования БЭСГ в системах управления ориентацией орбитальных КА дистанционного зондирования Земли.

Приведены: принципы работы и структура построения бескарданной инерциальной системы ориентации на базе БЭСГ (БИС-ЭГ); особенности ее программно-математического обеспечения, в том числе в части решения задач калибровки БЭСГ и привязки их измерительных осей к измерительным осям блока определения координат звезд (БОКЗ) – астрокорректора непосредственно на борту орбитального КА; основные результаты эксплуатации системы. Рассмотрены также особенности движения роторов БЭСГ при работе гироскопов на борту КА и вопрос использования наблюдаемых параметров этого движения для уточнения модели дрейфа гироскопов. В частности показано, что для гироскопа, вектор кинетического момента которого лежит в плоскости орбиты, моменты консервативной природы (моменты от взаимодействия нечетных гармоник формы ротора с электрическим полем подвеса) вызывают уход в плоскости орбиты, а моменты диссипативной природы (от остаточных магнитных полей и др.) приводят к выходу из плоскости орбиты.

Показаны направления проведенной модернизации БЭСГ по результатам первых этапов летных испытаний с целью повышения точности, надежности и удобства эксплуатации системы.

Отмечается также, что анализ специфики использования БЭСГ в космических условиях позволяет сделать ряд выводов о преимуществах этого гироскопа, которые заключаются не только в повышении точности БИСО на ЭСГ, но и в большей эффективности работы КА дистанционного зондирования Земли. Так, точностные харак-

теристики системы БИС-ЭГ позволяют планировать астрокоррекции в удобное для работы БОКЗ время с точки зрения возможных засветок, полноты карты звездного неба и т.д. Использование БЭСГ в системе ориентации КА позволяет снять ограничения на угловую скорость КА практически без потери точности, так как задача ориентации здесь решается без интегрирования кинематических уравнений вращательного движения объекта. Это дает возможность реализовать специальные режимы съемки: по площадям, с произвольным азимутом, стереосъемку.

В пятом разделе кратко обсуждаются направления развития БЭСГ, такие как повышение точности измерения и устранения дисбаланса ротора путем создания более точного специального оборудования; повышение точности нанесения рисунка, отработка технологии повышения контраста рисунка на роторе при нанесении антифрикционных износостойких покрытий с использованием ионно-плазменных технологий; усовершенствование системы съема угловой информации ЭСГ и др. Следует также добавить и необходимость совершенствования расчетной модели дрейфа БЭСГ для минимизации его непрогнозируемого ухода при больших углах рассогласования корпуса и ротора гироскопа.

Заключение

В рассматриваемой книге собран обширный теоретический и экспериментальный материал по одной из сложнейших основополагающих проблем в области инерциальной навигации – созданию нового гироскопа.

Для книги характерен широкий охват всех проблем, которые стояли перед разработчиками ЭСГ со сплошным ротором и бескарданным съемом информации, а также бескарданной системы ориентации на его основе для орбитальных КА дистанционного зондирования Земли.

Книга содержит значительное число экспериментальных данных и их анализ как в процессе разработки собственно БЭСГ, так и по результатам летных испытаний и первых этапов эксплуатации системы ориентации на его основе на борту различных орбитальных КА.

Материал данной книги безусловно будет полезен специалистам в области инерциальной навигации и управления движением орбитальных КА, разработчикам гироскопов и систем ориентации и навигации, а также студентам и аспирантам соответствующих специальностей в университетах.

*Г. И. Емельянцев, д.т.н., профессор,
АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»*