

◆ СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ ◆

УДК 531.383  
DOI 10.17285/0869-7035.0021

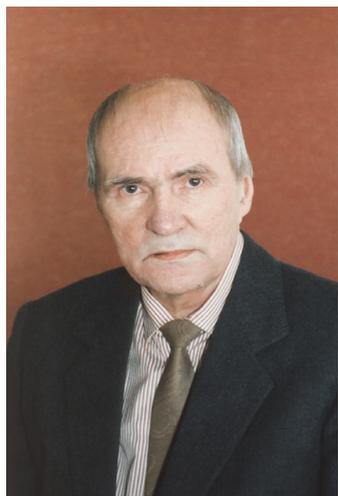
В.Г. ПЕШЕХОНОВ

**СОЗДАТЕЛЬ ПРЕЦИЗИОННОГО ГИРОСКОПА**

*Приведена краткая история создания прецизионного гироскопа с электростатическим подвесом ротора, рассмотрены основные проблемы построения гироскопа с полым ротором и их решения главным конструктором А.С. Анфиногеновым.*

**Ключевые слова:** электростатический гироскоп, инерциальная навигация, полый ротор.

**Введение**



А.С. Анфиногенов

Исполнилось девяносто лет со дня рождения Анатолия Сергеевича Анфиногенова (1930–2003 гг.), создателя прецизионного гироскопа с электростатическим подвесом сферического ротора (ЭСГ). Это единственный гироскоп, которому уже сорок лет нет альтернативы, уникальный по точности и технологическим решениям.

Задача настоящей статьи – рассказать о проблемах создания ЭСГ и их преодолении главным конструктором гироскопа Анфиногеновым и его командой. Подробнее о жизни и творчестве Анатолия Сергеевича можно прочитать в сборнике [1], включающем статьи Анфиногенова и его сотрудников, а также воспоминания о нем.

Биография Анфиногенова внешне небогата событиями. Родился и всю жизнь прожил в Ленинграде–Петер-

---

**Пешехонов** Владимир Григорьевич. Академик РАН, генеральный директор, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Директор, Институт информационно-навигационных систем Университета ИТМО (С.-Петербург). Президент международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

бурге. В блокаде – от первых до последних дней. В 1948 году поступил в Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ), учился хорошо и одновременно добился выдающихся спортивных успехов – в составе знаменитой баскетбольной команды ЛЭТИ выиграл первенство Ленинграда, в составе сборной команды города участвовал в первенстве страны.

В 1954 году окончил ЛЭТИ по специальности инженер-электрофизик и был направлен на работу в СКБ Государственного союзного завода, но через несколько месяцев перевелся в НИИ-303 (впоследствии ЦНИИ «Электроприбор») и приступил к работе в лаборатории гироскопической техники. С тех пор направление своей деятельности не менял.

Уже первые работы молодого инженера имели явно выраженный новаторский характер. Он разработал серию усилителей на полупроводниковых элементах, заменивших ламповые усилители. Следующей была разработка гироскопических следящих систем, в том числе безредукторных, нашедших широкое применение. В середине шестидесятых годов Анатолий Сергеевич приступил к главному делу своей жизни – созданию ЭСГ.

### История создания ЭСГ

Идея ЭСГ была предложена А. Нордсиком (США) в 1954 году. Потенциальное преимущество ЭСГ перед другими видами механических гироскопов было очевидным – благодаря бесконтактному подвесу ротора в электрическом поле отсутствовало трение в опоре ротора – один из основных факторов, ограничивающих точность роторных гироскопов.

Это преимущество было востребовано десятилетие спустя, когда гироскописты ряда стран приступили к решению задачи создания прецизионной инерциальной навигационной системы (ИНС). В ЦНИИ «Электроприбор» исследование проблемы создания прецизионного ЭСГ начал Анфиногенов с несколькими сотрудниками. Он имел лишь самые общие сведения о работе в этой области в США [2]. Как известно, технологическими решениями в гироскопии не делятся, и весь путь Анатолий Сергеевич прошел самостоятельно.

Предстояло исследовать задачи теории электромагнитного поля применительно к механике быстро вращающегося твердого тела. Впервые в истории гироскопии конструировался вакуумный высоковольтный прибор и разрабатывался комплекс технологических и метрологических решений, обеспечивающих производство гироскопа с ранее недостижимыми точностными характеристиками. На этой основе предстояло создать новый производственный комплекс.

В обеспечение создания ЭСГ в 1966 году вышло специальное решение Военно-промышленной комиссии Совета Министров СССР, на основании которого к решению проблемы было привлечено 28 специализированных организаций. Первым этапом стало выполнение поисковой НИР (1966–1968 гг.), результаты которой частично отражены в публикациях [3–7]. Эксперименты проводились на лабораторной установке, собранной из имевшихся приборов и материалов. Эта громоздкая конструкция меньше всего была похожа на гироскоп, но тем не менее обеспечила проверку ряда идей.

Разработка гироскопа началась в рамках ОКР (1969–1973 гг.) и продолжалась немногим менее двадцати лет. Условно этот период можно разделить на два этапа. Первый этап (1969–1979 гг.) был посвящен проектированию ЭСГ и созданию технологической и метрологической базы. Этап завершился началом промышленного выпуска гироскопов. В обеспечение производства ЭСГ было сформировано и оснащено более десяти новых подразделений – отделов, лабораторий, производственных участков.

На втором этапе решались задачи повышения точности и надежности ЭСГ. Работа велась параллельно с поставками гироскопов, и каждый новый результат внедрялся в очередной поставочной партии. Итогом стало создание прецизионного ЭСГ и прецизионной ИНС на его основе.

Поистине титанический труд А.С. Анфиногенова и его команды увенчался одним из крупнейших успехов отечественной гироскопии.

Для справки отметим, что в нашей стране и за рубежом многие крупные компании начинали разработку ЭСГ, но только две из них справились с задачей: ЦНИИ «Электроприбор» в России и Honeywell в США.

### Проблемы создания ЭСГ и их решения

Принцип действия ЭСГ основан на известном соотношении электродинамики

$$\vec{f} = \frac{E^2}{8\pi} \vec{n},$$

где  $\vec{f}$  – вектор плотности пондеромоторных сил электрического поля на поверхности идеального проводника,  $E$  – напряженность электрического поля у поверхности проводника,  $\vec{n}$  – единичный вектор нормали к этой поверхности. Если однородный проводник имеет форму идеального шара и его окружает сферический статор, то момент действующих на ротор сил равен нулю. Применительно к гироскопу это означает, что его скорость ухода будет равна нулю.

Однако электростатический подвес без принятия специальных мер неустойчив – в соответствии с теоремой Ирншоу [8] проводящее тело не может находиться в устойчивом равновесии в электростатическом поле. Поэтому необходима следящая система, которая измеряет смещение ротора и восстанавливает его положение, управляя полем подвеса.<sup>1</sup> Опыт Анфиногенова в области разработки гироскопических следящих систем обеспечил решение этой задачи.

Пондеромоторная сила, определяемая приведенной выше формулой, невелика, и для обеспечения приемлемой несущей силы подвеса необходима значительная величина напряженности поля у поверхности ротора. В связи с этим ЭСГ – высоковольтный прибор с малым расстоянием между статором и ротором.

В условиях малого расстояния между ротором и статором уравнение для изотропного линейного подвеса имеет решение при числе электродов подвеса, равном 6, 8, 12, 20. Этим определяется структура подвеса, обладающего максимальной жесткостью. Если выполняются указанные выше условия, то проблема построения ЭСГ сво-

<sup>1</sup>Строго говоря, при этом подвес перестает быть электростатическим, но скорость смещения ротора пренебрежимо мала по сравнению со скоростью электромагнитных волн и статическое приближение оправдано.

дится к созданию ротора, максимально приближенного к идеальному – сферически однородному.

Материал ротора должен обладать высокой электропроводностью, близкой к единице магнитной проницаемостью, малой плотностью (из-за ограниченной несущей силы подвеса), минимальным отношением плотности к модулю Юнга (для минимизации деформации ротора при вращении). Наилучшим образом этим требованиям отвечает бериллий. В обеспечение однородности ротора бериллиевые заготовки изготавливаются из порошка методом изостатического прессования. Эта технология была разработана специально для ЭСГ.

Из возможных конструкций ротора (сплошной или полый ротор) А.С. Анфиногенов выбрал более перспективную с точки зрения достижения высокой точности, но и значительно более сложную в реализации – полый ротор, собираемый из двух полусфер. Необходимо было создать тонкостенную электрически однородную конструкцию, которая при вращении с угловой скоростью порядка десятков тысяч оборотов в минуту сохраняет сферическую форму с погрешностью не более 0,1 мкм и имеет дисбаланс менее 0,05 мкм.

Для ориентации ротора должен быть сформирован эллипсоид инерции путем утолщения стенок от полюса к экватору. Для компенсации деформации ротора при вращении, вызванной центробежными силами, необходимо придать ему форму эллипсоида, вытянутого к полюсам.

Сварка полусфер ротора не должна приводить к его неоднородности. На любой неоднородности концентрируются электрические заряды, что приводит к снижению постоянной времени гироскопа по углу рассогласования. Попытки заимствовать опыт у организаций, разрабатывающих технологии сварки, к успеху не привели. Более того, ведущая организация страны в этой области – Институт электросварки им. Е.О. Патона – дала заключение, что требуемое неразъемное соединение реализовать невозможно.

Обширные исследования, выполненные учеными-технологами ЦНИИ «Электроприбор», обеспечили решение проблемы – методом диффузионной сварки с использованием уникального нестандартного оборудования получено вакуум-плотное неразъемное соединение, не нарушающее электрической однородности ротора.

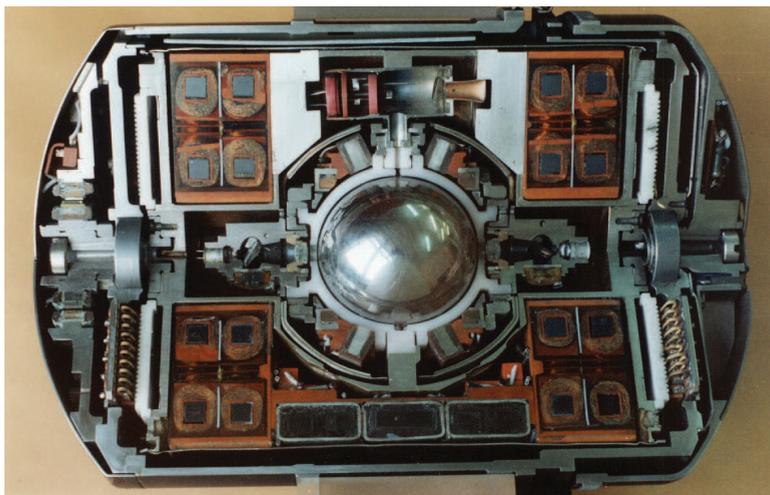
В целом создание ротора было обеспечено разработкой большого числа оригинальных технологических процессов и специального оборудования. Об их научном уровне свидетельствует защита сотрудниками ЦНИИ «Электроприбор» докторской и более десяти кандидатских диссертаций, посвященных технологическим проблемам создания ЭСГ.

Создание статора также потребовало нетривиальных решений. Система электродов должна размещаться на диэлектрической несущей конструкции, вакуум-плотной, обеспечивающей прочную адгезию электродов и имеющей внутреннюю поверхность, отличающуюся от сферической не более чем на 1 мкм. Было организовано производство особо чистой корундовой керамики, большинство технологических процессов формирования статора было заимствовано из электровакуумного производства, но с одной принципиальной разницей – технологические процессы обработки несущей конструкции и напыления электродов выполнялись не на плоской, а на сферической поверхности.

Важной особенностью процесса создания ЭСГ, во многом определившей конечный положительный результат, была согласованность этапов конструкторской разработки

и процессов развития средств технологического обеспечения. При этом технология изготовления узлов и элементов ЭСГ отличалась большим количеством неочевидных, на первый взгляд парадоксальных технических решений, широким использованием нестандартных приемов, методов и средств оснащения, апробацию которых поддерживал А.С. Анфиногенов.

Ряд узлов, встраиваемых в ЭСГ, был разработан специализированными организациями: автоколлимационный датчик, определяющий угловое положение ротора с погрешностью менее 1 угловой секунды, – Ленинградским оптико-механическим объединением (ЛОМО); геттерно-ионный насос, обеспечивающий поддержание вакуума не хуже  $10^{-7}$  Торр в процессе эксплуатации ЭСГ, разработал Институт вакуумной техники имени С.А. Векшинского.



ЭСГ в разрезе

Поэтапно выполнялись работы по повышению эксплуатационной надежности ЭСГ. Как высоковольтный прибор, гироскоп уязвим при пробое между статором и ротором. Вакуумирование, тщательная очистка деталей, высокая адгезия электродов к керамическим полусферам, исключая отрыв частиц электродов под действием поля подвеса, решили проблему пробоя.

Следующим шагом стало обеспечение высокой надежности электроники подвеса, потребовавшее в том числе миниатюризации, перекомпоновки и перемещения блоков электроники из приборного шкафа непосредственно в кожух гироскопа. Во избежание разрушения гироскопа при аварийном отключении электропитания решена задача безаварийной посадки ротора. На основании изучения трибоскопических свойств различных материалов подобрана пара с невысоким коэффициентом трения: нитрид-титановое покрытие ротора и алмазоподобное покрытие посадочных площадок на статоре. Создание соответствующих технологий покрытий, обеспечивающих сохранение сферической формы и балансировки ротора, решили проблему безаварийной посадки.

Для анализа влияния элементов конструкции ЭСГ на точностные характеристики построена математическая модель, в соответствии с которой скорости ухода гироскопа по осям, перпендикулярным вектору кинетического момента, определяются гармоническими рядами, аргументом тригонометрических функций которых явля-

ется угол между вектором силы тяжести и вектором кинетического момента гироскопа. Данная модель справедлива при установке гироскопа в следящий карданов подвес, обеспечивающий согласование одной из осей корпуса ЭСГ с осью вращения ротора, и вращении корпуса вокруг этой оси. В первом приближении ряды сводятся к трехчленам, коэффициенты которых имеют ясный физический смысл. Не зависящие от силы тяжести первые коэффициенты ряда определяются связью ротора с корпусом (т.е. постоянной времени гироскопа). По мере совершенствования технологии бесшовной сварки полусфер ротора эти коэффициенты снижались. Для современных ЭСГ один из этих коэффициентов пренебрежимо мал, так же как коэффициенты, определяемые электрическими потерями в роторе и касательными силами, действующими на ротор. Оставшиеся коэффициенты пропорциональны ускорению силы тяжести и определяются балансировкой ротора, с одной стороны, и несферичностью поверхности ротора на рабочей частоте вращения при нежестком подвесе ротора – с другой.

Построение модели, коэффициенты которой однозначно связаны с физическими факторами, в данном случае с параметрами ротора, – характерный пример подхода А.С. Анфиногенова к решению любой новой сложной задачи. Модель используется уже более сорока лет.

Разработка технологий производства ЭСГ не всегда вписывалась в директивные сроки, и главному конструктору А.С. Анфиногенову не раз приходилось отстаивать свое детище. Его уверенность в том, что все проблемы будут решены, убедительность аргументов в конце концов всегда находили поддержку.



На стенде ЦНИИ «Электроприбор». А.С. Анфиногенов докладывает главнокомандующему ВМФ результаты испытаний ЭСГ

### Заключение

А.С. Анфиногенов и его команда вплотную приблизились к осуществлению мечты гироскопистов со времен Л. Фуко – созданию свободного (неуправляемого) ги-

роскопа. Уже сорок лет ЭСГ остается самым точным гироскопом, и сегодня, когда завершается замена большинства механических гироскопов волновыми оптическими, ЭСГ не видно замены.

Тем не менее А.С. Анфиногенов мало известен среди гироскопистов. По-видимому, это объясняется локальными применениями ЭСГ и завесой строгой секретности, когда создавался этот гироскоп. Такое положение не угнетало Анатолия Сергеевича, он был человек непубличный и не искал широкого признания.

Анфиногенов безусловно знал себе цену, знал, что работающие с ним ученые и специалисты безоговорочно верят и поддерживают его, что его уважают коллеги-электроприборовцы, и этого было для него достаточно. Большого труда стоило уговорить Анатолия Сергеевича представить свои труды на суд научной общественности. Он блестяще защитил кандидатскую диссертацию в 1990 году и докторскую в 1993 году.

Спокойно относился А.С. Анфиногенов и к наградам. Он был награжден орденом Трудового Красного Знамени в 1971 году и стал лауреатом Государственной премии в 1984 году. Только ему одному дважды, в 1979 и 1996 годах, присуждалась премия имени Н.Н. Острякова, первого главного конструктора гироскопических приборов в нашей стране. Похоже, больше всего он ценил звание «Заслуженный изобретатель РФ», присвоенное ему указом Президента РФ в 2001 году. 142 авторских свидетельства на изобретения и 4 патента наиболее полно отражали его творческие достижения при создании ЭСГ.

ЦНИИ «Электроприбор» бережно хранит память об Анатолии Сергеевиче Анфиногенове. Уже упоминалась посвященная его деятельности книга [1], с 2005 по 2010 год действовал Фонд поддержки студентов и аспирантов имени А.С. Анфиногенова, в 2011 году учреждена премия его имени, которая присуждается за лучший доклад в области гироскопии на ежегодной крупной конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». В связи с девяностолетием со дня рождения Анатолия Сергеевича в музее института открыт посвященный ему зал. Мы, немногие еще работающие в «Электроприборе» коллеги Анфиногенова и электроприборовцы нового поколения, стараемся сохранить память о нем и его выдающихся достижениях.

### Благодарность

Выражаю искреннюю благодарность за ценные советы Ю.А. Литмановичу, О.И. Парфенову, А.Г. Щербаку и Н.И. Беляеву, работавшим с Анатолием Сергеевичем Анфиногеновым и продолжающим его дело.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (грант №08-08).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. **История создания** электростатического гироскопа. Памяти главного конструктора А.С. Анфиногенова / Под редакцией В.Г. Пешехонова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2011. 202 с.
2. **Khoebel Howard**, The electric vacuum gyro, *Control Engineering*, 1964, vol. 11, no. 2, p. 70.
3. **Анфиногенов А.С.,<sup>1</sup> Парфенов О.И.** Способ уменьшения деформаций внешней поверхности тонкостенных сферических роторов гироскопов // *Морское приборостроение*. 1969. №1. С. 114–119.

<sup>1</sup>Работы 3–7 также вновь опубликованы в [1].

4. Анфиногенов А.С., Парфенов О.И. Расчет уходов электростатического гироскопа, вызванных действием ускорений на деформируемый центробежными силами ротор // Морское приборостроение. 1969. №2. С. 13–20.
  5. Анфиногенов А.С. Гироскоп с электростатическим подвесом ротора // Морское приборостроение. 1971. №6. С. 64–73.
  6. Мартыненко Ю.Г. Уходы электростатического гироскопа, вызываемые несферичностью ротора // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1970. №1. С. 10–18.
  7. Гусинский В.З., Парфенов О.И., Сорин В.М. О стабилизации скорости вращения электростатического гироскопа // Морское приборостроение. 1972. №7. С. 71–77.
  8. Мартыненко Ю.Г. Движение твердого тела в электрическом и магнитных полях. М.: Наука. 1988. 368 с.
- 

**Peshkhonov, V.G.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

Author of Precision Gyroscope, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 121–128.

**Abstract.** The paper presents the brief history of development of a precision gyroscope with electrostatic suspension of rotor; the main problems of constructing a gyro with a hollow rotor, as well as their solutions found by the chief designer A.S. Afinogenov are discussed.

**Key words:** electrostatic gyroscope, inertial navigation, hollow rotor.

Материал поступил 02.03.2020