

УДК 658.512.2

Современный подход к конструированию навигационных приборов

Евстифеев М.И. *, Елисеев Д.П. **

Концерн ЦНИИ «Электроприбор»,

ул. Малая Посадская, 30, Санкт-Петербург, 197046, Россия

**e-mail: evstifeevm@mail.ru*

***e-mail: eliseev.dp@gmail.com*

Аннотация

Современные системы автоматизированного проектирования позволяют создавать трехмерные модели узлов и деталей в процессе конструирования различных технических систем, в том числе и навигационных приборов. Разработанные трехмерные модели могут быть использованы для проведения расчетов механических характеристик методом конечно-элементного анализа, а также для быстрого прототипирования с использованием аддитивных технологий. В статье рассматривается методика конструирования навигационных приборов с учетом описанных преимуществ трехмерного моделирования. Рассмотренная методика может быть рекомендована для обучения студентов основам конструирования.

Ключевые слова: 3D моделирование, конечно-элементный анализ, быстрое прототипирование, аддитивные технологии, системы автоматизированного проектирования.

Введение

Системы автоматизированного проектирования (САПР) широко используются при проектировании различных технических систем. Опыт использования САПР *Pro/Engineer*, в современной версии *Creo Elements* (далее – *Creo*) [1], фирмы *PTC* показал эффективность применения 3D моделирования при проектировании перспективных навигационных приборов. Это позволило не только повысить производительность и сократить время разработки приборов за счет параллельной работы исполнителей над проектом, но и повысить качество выпускаемой продукции. Использование 3D моделирования при создании гироскопических устройств как наиболее сложных навигационных приборов на сегодняшний день является стандартом проектирования, а разработанные трехмерные модели могут быть использованы для проведения расчетов механических характеристик методом конечно-элементного анализа (КЭА) и для быстрого прототипирования приборов.

Настоящая статья посвящена рассмотрению методики конструирования навигационных приборов с учетом преимуществ 3D моделирования. Отличительной особенностью предлагаемой методики является внедрение быстрого прототипирования на основе аддитивных технологий.

Методика конструирования навигационных приборов

В современном мире перед наукоемким производством стоит очень важная задача – разработка инновационной и конкурентоспособной продукции. В этой связи при конструировании навигационных приборов должны быть применены смелые и, отчасти, рискованные решения. Правильность принятых решений, а, следовательно, и работоспособность всего изделия, могут быть проверены двумя способами: расчетами и макетированием. Для проведения расчетов повсеместно используются методы КЭА как безальтернативный метод предсказательного моделирования. В последние годы в связи с развитием аддитивных технологий макетирование, а в некоторых случаях и создание готового прибора, может и должно выполняться с использованием трехмерной печати. Представленная последовательность разработки конструкций позволяет осуществить системный подход к проектированию на основе современных технологий и предложить следующую методику конструирования навигационных приборов.

1. Разработка трехмерных моделей деталей и узлов.
2. Расчет механических характеристик методом КЭА.
3. Изготовление макета прибора с использованием аддитивных технологий.
4. Выявление недостатков конструкции в процессе пп. 2 и 3 и их устранение при разработке конструкторской документации.

Рассмотрим детально особенности приведенных этапов.

Разработка трехмерных моделей приборов

Система *Creo* относится к САПР высокого уровня и имеет преимущества перед аналогичными пакетами. Следующие основные особенности программ семейства *Creo* позволяют разработчику создавать оптимальный вариант конструкции прибора в самые короткие сроки:

1. Параметрическое моделирование и интеллектуальные объектно-ориентированные операции, на которых базируется система, позволяют инженерам легко проектировать конструкции приборов.

2. Уникальная единая структура данных обеспечивает полную двунаправленную ассоциативность для всех инженерных приложений и тесное взаимодействие между участниками процесса проектирования, что позволяет одновременно работать над проектом и использовать коллективный опыт.

При работе с *Creo* какие-либо изменения, произведенные в области конструкторской разработки детали, автоматически переносятся на все остальные области – сборочные узлы и чертежи. Полная взаимосвязь и взаимозависимость всех этапов разработки, от создания модели изделия до получения чертежа и изготовления, дает конструкторам возможность менять конфигурацию детали буквально «на лету», что способствуют оптимизации цикла проектирования.

Разработка конструкций с использованием *Creo* требует освоения следующих компетенций:

– владение процессом создания сборочных единиц, как при нисходящем, так и при восходящем проектировании;

– понимание особенностей сборки деталей, имеющих взаимное перемещение (на примере карданова подвеса);

- максимальное использование ассоциативности при разработке чертежей на основе построенных моделей;
- умение компоновать различные варианты сборочных единиц.

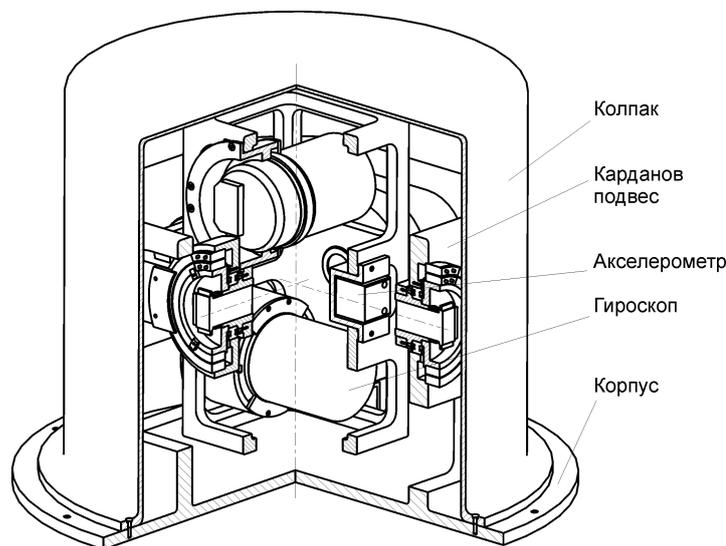


Рисунок 1. Трехмерная модель гироскопического прибора с кардановым подвесом.

Перечисленные компетенции позволяют специалистам конструировать навигационные приборы, в том числе гироскопические, с различных составом чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров) и с учетом взаимного перемещения частей конструкции в кардановом подвесе (рис. 1).

Проведение расчетов методом КЭА

Конструирование навигационных приборов с использованием *Creo* позволяет получать трехмерные модели деталей и узлов, пригодные для расчетов методами КЭА. В состав *Creo* поставляется пакет *Creo Elements\Pro Mechanica* (далее – *Mechanica*), который позволяет проводить следующие расчеты: анализ собственных частот, расчет прочности при статических и динамических нагрузках (вибрации и

удары), построение амплитудно-частотных характеристик, оптимизация конструктивных параметров по различным критериям. Основное отличие *Mechanica* от других аналогичных пакетов (например, *Ansys Workbench* [2]) заключается в том, что трехмерная модель, разрабатываемая в процессе конструирования для производства, и трехмерная модель, используемая в расчетах, – это одна и та же модель. Таким образом, использование этого пакета позволяет в кратчайшие сроки проводить необходимые инженерные расчеты для подтверждения работоспособности изделия (рис.2).

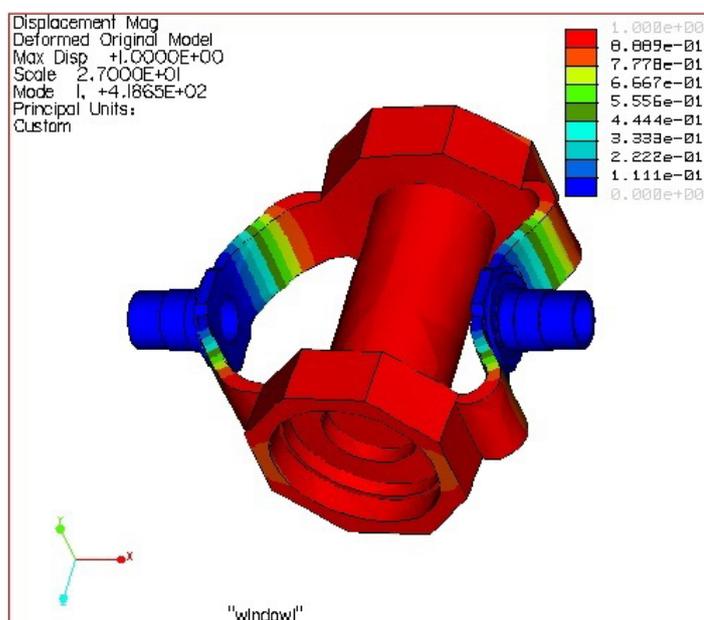


Рисунок 2. Собственные колебания карданного кольца (частота 418 Гц).

Особенность проведения расчетов навигационных приборов с использованием КЭА удобно продемонстрировать на примере микромеханического гироскопа (ММГ) *RR*-типа [3 – 6] (рис. 3, а). Особенность проектирования таких датчиков заключается в прямом влиянии на конечную точность и эксплуатационные показатели изделия частотных характеристик подвеса дискового ротора ММГ, которые зависят в большей степени от вариаций геометрических размеров.

Методика расчета и анализа конструктивной схемы ММГ с использованием модулей *Creo* и *Mechanica* включает следующие этапы [7].

1. Разработка вариантов конструкции. На этом этапе разрабатываются варианты принципиального построения ротора ММГ, количество и форма упругих элементов подвеса, расположение элементов гребенчатого двигателя и т.д.

2. Определение собственных частот. Проводится КЭА с целью определения собственных частот конструкции.

3. Подбор параметров. Производится подбор параметров упругого подвеса, чтобы первые две собственные частоты конструкции совпали, а остальные собственные частоты были бы значительно больше первых двух.

4. Определение характеристик. Для полученной конструкции определяется амплитудно-частотная характеристика подвеса ротора, максимальные напряжения в конструкции, кинетический момент.

5. Варьирование геометрических размеров. Изменение геометрических размеров конструкции с целью выявления параметров, имеющих наибольшее влияние на собственные частоты. При изменении одного из геометрических параметров конструкции остальные принимаются постоянными и проводится оценка соответствующего изменения собственных частот.

6. Оптимизация по полученным данным. Проводится оптимизация конструкции с целью уменьшения возникающих напряжений, изменения амплитудно-частотной характеристики и т.д.

7. Выбор наиболее приемлемого варианта конструкции. По полученным данным проводится сравнение различных конструкций и выбор наиболее приемлемого варианта конструкции.

На основе модели, полученной в *Creo*, в модуле *Mechanica* в автоматическом режиме создается конечно-элементная модель (рис. 3, б). Из объемной модели транслируются параметры материала, условий закрепления, области приложения нагрузок.

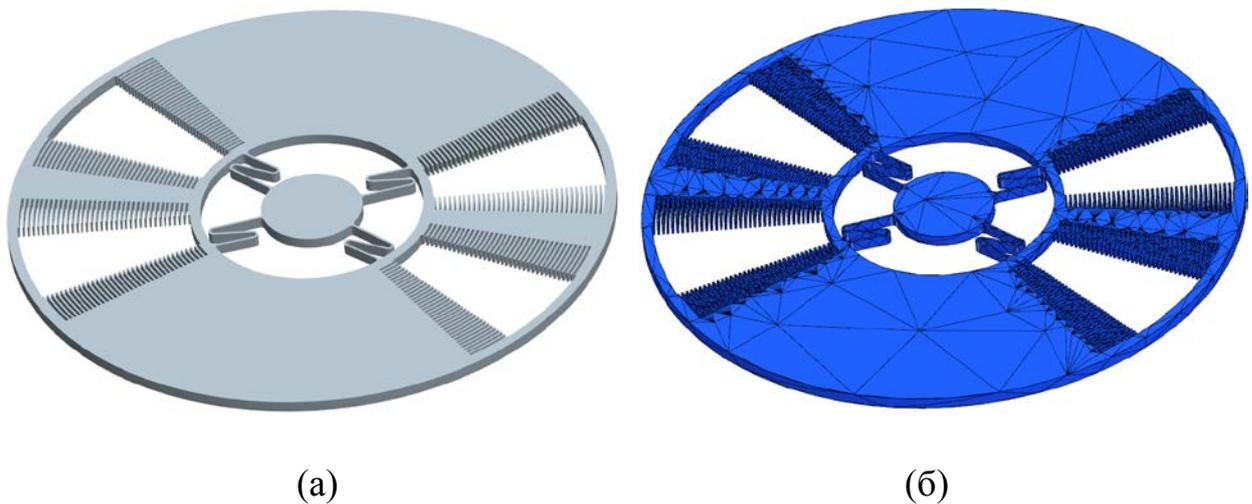


Рисунок 3. Инерционное тело микромеханического гироскопа RR-типа

(а) Трехмерная модель; (б) Конечно-элементная модель

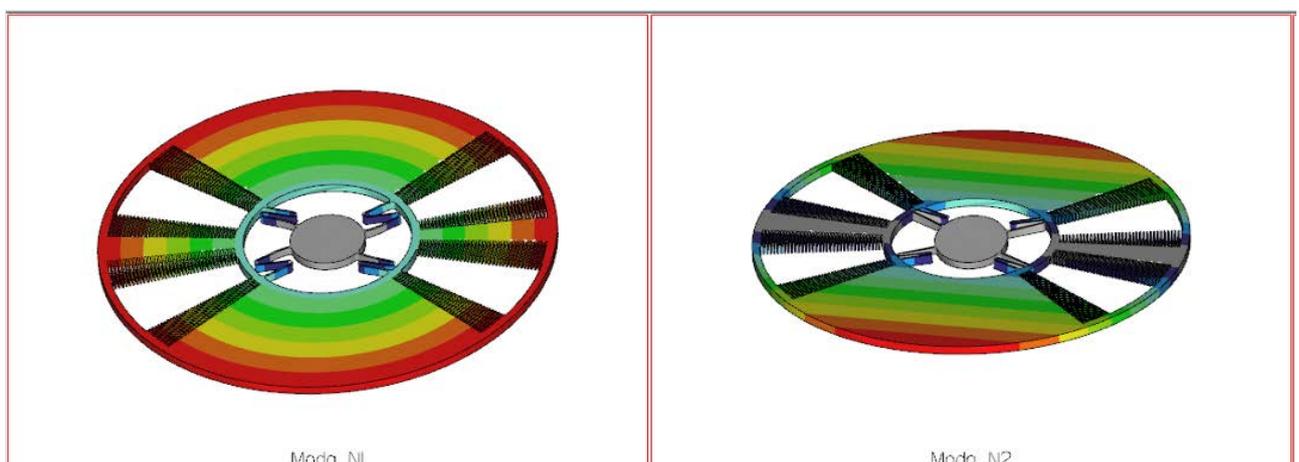


Рисунок 4. Результаты расчетов собственных частот с использованием КЭА
(частоты 3020 Гц и 3180 Гц).

Достижение наилучших показателей эксплуатационных характеристик датчика, осуществляется при определенных значениях низшей собственной частоты подвеса инерционного тела. Для получения требуемых частот необходимо выполнение серии оптимизационных расчетов (рис.4) [8] и выполнение варьирования геометрических параметров по критерию достижения заданного значения точности прибора.

Аддитивные технологии в конструировании

Мощный инструментарий, предоставляемый компьютерными программами 3D моделирования и КЭА, не позволяет решить все проектные проблемы, возникающие на этапах разработки конструкций. Создание полноразмерных макетов из металлических материалов является чрезвычайно дорогим, трудоемким и длительным этапом. Для проверки функционирования приборов и обоснования принятых конструктивных решений необходимы средства создания макетов максимально быстро и экономично. В этом помогают чрезвычайно быстро развивающиеся аддитивные технологии. В дальнейшем при развитии технологии 3D печати на основе металлических порошков возможно создание готовых приборов.

Следующий этап рассматриваемой методики посвящен работе на 3D-принтере и макетированию разрабатываемой конструкции. Для навигационных приборов трехмерная печать наиболее часто используется в следующих случаях:

- проверка сложного кинематического движения узлов приборов с целью определения силовых параметров приводов;

– макетирование каркасов и кронштейнов для крепления чувствительных элементов (например, моделирование каркасов катушек волоконно-оптических гироскопов, используемых для беспилотных летательных аппаратов [9]);

– проверка правильности принятых конструктивных решений, в том числе по обеспечению требований по эргономичности и дизайну;

– создание 3D-макетов приборов в заданном масштабе для представительских целей при выполнении исследовательских работ;

– создание 3D-макетов различных навигационных комплексов для изучения визуального состава и алгоритмов работы комплекса, что может быть полезно как для экипажей отечественных и зарубежных кораблей, так и для обучения студентов.

Подготовка к печати происходит в определенной последовательности:

1. Адаптация спроектированной модели для трехмерной печати – должны быть учтены особенности применяемого оборудования и материалов.

2. Конвертация разработанных моделей в специальный формат, воспринимаемый конкретным принтером.

3. Запуск печати и, при необходимости, механическая обработка полученных деталей и сборочных единиц.

В ходе проведения расчетов методом КЭА, а также при прототипировании, могут быть выявлены недостатки конструкции, которые следует устранить. Иногда для этого следует выполнять многократные оптимизационные расчеты и макетирование улучшений. После устранения всех недостатков, оформляется конструкторская документация.

Применение методики в образовательном процессе

Одной из отличительной особенностей предложенной методики является возможность ее использования в качестве основы при обучении студентов конструированию навигационных приборов. Такой подход вносит существенный вклад в развитие способностей к инновационной инженерной деятельности студентов [10, 11] и освоение на современном уровне замкнутого процесса «проектирование, моделирование, производство». В процессе обучения по предложенной методике, студенты создают несложные трехмерные модели в *Creo* на основе выданных им бумажных чертежей, а затем изучают процесс создания электронных чертежей на основе трехмерных моделей. После усвоения в достаточной степени механизма проектирования деталей в *Creo*, студенты обучаются правилам построения узлов из нескольких деталей и выполняют контрольное задание, включающее в себя компоновку различных вариантов сборочных единиц. Используя разработанные модели деталей и сборочных единиц, студенты учатся проводить модальный и прочностной расчеты конструкции.

Кроме того, студентами изучаются основы аддитивных технологий, объясняются базовые принципы 3D-печати и различия таких технологий, как SLA, SLS, FDM и пр. [12]. После чего студенты приступают к выполнению курсового проекта, цель которого заключается в составлении трехмерной модели гироскопического прибора, пригодной для печати. Используя принтер *ZPrinter 450* фирмы *3D Systems* [13] (рис. 5), студенты выполняют курсовой проект (рис. 6).



Рисунок 5. 3D-принтер *ZPrinter 450* фирмы *3D Systems*



а)



б)

Рисунок 6. Модели микромеханического гироскопа RR-типа (а) и гиростабилизированного гравиметра (б), воспроизведенные на 3-D принтере.

Курсовой проект заканчивается представлением пояснительной записки, чертежей гироскопического прибора, результатов КЭА и модели 3D-печати. На рисунке 6а представлен результат описанного курсового проекта, выполненного студентами в 2016 г., – модель микромеханического гироскопа [3]. На рисунке 6б – модель гиростабилизированного гравиметра [14, 15], подготовленная и напечатанная студентами в 2017 г.

Заключение

Рассмотрена методика конструирования навигационных приборов, включающая в себя разработку трехмерных моделей, которые потом используются для проведения расчетов методами КЭА и для быстрого прототипирования с использованием аддитивных технологий. Описанная методика отличается осуществлением замкнутого процесса «проектирование, моделирование, производство», что повышает качество проектируемых изделий и производительность труда. Показано, что использование предложенной методики в качестве основы при обучении студентов конструированию приборов вносит существенный вклад в развитие способностей к инновационной инженерной деятельности.

Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в организации исследований коллективу международной научной лаборатории «Интегрированные системы ориентации и навигации» на базе кафедры Информационно-навигационных систем Университета ИТМО и лично ее руководителю О.А. Степанову.

Библиографический список

1. PTC: Technology Solutions for Ongoing Products & Service advantage, available at: <http://www.ptc.com>

2. ANSYS - Simulation Driven Product Development, available at:
<http://www.ansys.com>
3. Пешехонов В.Г., Несенюк Л.П., Грязин Д.Г. Микромеханические инерциальные преобразователи. Современное состояние и перспективы развития // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 3. С. 28 - 32.
4. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Оптимизация конструкции подвижного электрода микромеханического гироскопа RR-типа // Гироскопия и навигация. 2017. № 1. С. 13 – 23.
5. Микромеханический вибрационный гироскоп. Патент РФ № 2561006 МПК G01C 19/56 / Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» / Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Заявка № 2014123821/28 от 10.06.2014, Бюл. № 23, 20.08.2015
6. Северов Л.А. Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии, пути развития // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1998. Т. 41. № 1 - 2. С. 57 - 73.
7. Евстифеев М.И. Проблемы расчета и проектирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2004. № 1. С. 26 - 39.
8. Евстифеев М.И., Унтилов А.А. Конечно-элементный анализ конструкции микромеханического гироскопа // Материалы III конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», Санкт-Петербург, октябрь 2001. – Спб.: ЦНИИ «Электроприбор. С. 101 - 108.
9. Пронькин А.Н., Кузнецов И.М., Веремеенко К.К. Интегрированная навигационная система БПЛА: структура и исследование характеристик // Труды МАИ. 2010. № 41. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23811>

10. Наумкин Н.И. Методическая система формирования у студентов технических вузов способностей к инновационной инженерной деятельности в процессе обучения общетехническим дисциплинам: автореферат дис. ... докт. пед. наук. – М.: 2009. – 69 с.
11. Наумкин Н.И., Кильмяшкин Е.А., Ломаткин А.Н. Обучение аддитивным технологиям как способ формирования конструкторских компетенций у студентов технических ВУЗов // VIII международная конференция «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы». Сборник трудов. Саранск, 2016, С. 536 – 540.
12. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. – М.: НАМИ, 2015. - 220 с.
13. 3D Printers, 3D Scanning, Software, Manufacturing, available at: <http://www.3dsystems.com>.
14. Пешехонов В.Г., Степанов О.А. и др. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. – СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2017. – 390 с.
15. Krasnov A.A., Sokolov A.V., Evstifeev M.I., Starosel'tseva I.M., Elinson L.S., Zheleznyak L.K., Koneshov V.N. New Generation of Gravimetric Sensors // Measurement Techniques, December 2014, vol. 57, no. 9, pp. 967 - 972.