

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Кузнецов Евгений Викторович,
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха";
Инженерная академия Российского университета дружбы народов,
Москва, Россия, bereg@niipolyus.ru

Ермаков Дмитрий Николаевич,
Инженерная академия Российского университета дружбы народов;
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия,
dermakow@mail.ru

Самусенко Олег Евгеньевич,
Инженерная академия Российского университета дружбы народов,
Москва, Россия, samusenko@rudn.ru

Голяев Юрий Дмитриевич,
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

Соловьева Татьяна Ивановна,
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха";
Инженерная академия Российского университета дружбы народов,
Москва, Россия

Кузнецов Никита Евгеньевич,
АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-12-31-43

Manuscript received 05 September 2021;
Accepted 16 November 2021

Ключевые слова: лазерный гироскоп, компьютерное тепловое моделирование, метод электротепловых аналогий, метод поэтапного разукрупнения (масштабирования – zooming), метод конечных разностей, метод сеток, метод графов

В статье рассматриваются пути повышения качества и экономической эффективности разработки и производства сложных инновационных электронных приборов, к которым относятся лазерные гироскопы (ЛГ). Описаны проблемы, возникающие при обеспечении надежной работы ЛГ в широком диапазоне температур, связанные с плотной компоновкой прибора. Детально рассмотрены теоретические принципы и математический аппарат, которые используются при построении тепловых моделей трехосных ЛГ с электроникой. Приводится разработанный алгоритм построения тепловой модели ЛГ, предусматривающий процедуру поэтапного разукрупнения (масштабирования – zooming). Описан процесс моделирования ЛГ с помощью системы АСОНИКА, представлена построенная тепловая модель ЛГ, а также тепловое поле одного из печатных узлов ЛГ. Указаны обнаруженные теплонагруженные электронные компоненты. Приведены результаты экспериментальной проверки точности моделирования посредством реального измерения термодатчиками температур в узлах модели, подтвердившие достоверность теплового моделирования с помощью системы АСОНИКА. Подчеркивается, что стоимость изготовления и испытаний ЛГ является достаточно высокой. Поэтому задача поиска путей снижения стоимости на этапах разработки и производства ЛГ с одновременным обеспечением повышения качества и надежности выпускаемых приборов является крайне актуальной. Точное тепловое моделирование на ранних стадиях разработки является эффективным способом решения этой задачи благодаря экономии средств на испытания и реконструирование, а также благодаря применению недорогой отечественной компьютерной системы моделирования АСОНИКА.

Информация об авторах:

Кузнецов Евгений Викторович, д.т.н., профессор, Генеральный директор АО "НИИ "Полюс" им. М.Ф. Стельмаха"; Руководитель Центра НТИ "Фотоника" Инженерной академии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия

Ермаков Дмитрий Николаевич, доктор политических наук, доктор экономических наук, кандидат исторических наук, профессор, Академик РАЕН, Магистр технических наук, профессор Департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности Инженерной академии Российского университета дружбы народов, главный научный сотрудник научно-технического отдела АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

Самусенко Олег Евгеньевич, к.т.н., доцент, Директор Департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности Инженерной академии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия

Голяев Юрий Дмитриевич, д.т.н., профессор, начальник ИПК-470 АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

Соловьева Татьяна Ивановна, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", доцент Инженерной академии Российского университета дружбы народов, Москва, Россия

Кузнецов Никита Евгеньевич, аспирант АО "НИИ "Полюс" имени М.Ф. Стельмаха", Москва, Россия

Для цитирования:

Кузнецов Е.В., Ермаков Д.Н., Самусенко О.Е., Голяев Ю.Д., Соловьева Т.И., Кузнецов Н.Е. Особенности применения средств компьютерного моделирования для совершенствования процессов изготовления лазерных гироскопов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №12. С. 31-43.

For citation:

Kuznetsov E.V., Ermakov D.N., Samusenko O.E., Golyaev Yu.D., Solovyeva T.I., Kuznetsov N.E. (2021) Features of the use of computer modeling tools for improving the manufacturing processes of laser gyroscopes. *T-Comm*, vol. 15, no. 12, pp. 31-43. (in Russian)

1. Введение

Старт большой технологической гонки дали в Кремле 10 июля 2019 года. В присутствии президента с госкомпаниями подписаны контракты на исследования в самых передовых областях. Искусственный интеллект, квантовые технологии – то, что на острие прогресса и что обеспечит лидерство нашей стране.

Для успеха, по словам Владимира Путина, все есть: выдающиеся умы, богатая научная база. Нужна еще четкая организация. И кому как не корпорациям, развивающим банковские услуги, транспорт, энергию, связь, поработать на будущее.

«Мы ожидаем от наших крупнейших компаний настоящего лидерства – технологического, кадрового, финансового. Мировой опыт показывает, что до 80 процентов успешных исследований и разработок обеспечивается именно корпоративным сектором. Я вчера в Екатеринбурге говорил, вы, может быть, обратили внимание: в Италии только что был, разговаривал с коллегами, они пошли именно по такому пути. Прямо за рабочим обедом мне об этом в свободной беседе и сказали: мы нацеливаем наши крупнейшие компании с госучастием именно на такую работу», — сказал Президент РФ Владимир Владимирович Путин.

Российский лидер справедливо отметил: "Глобальная конкуренция за обладание технологиями будущего развернулась уже сейчас. Наша задача, не теряя времени, сделать все, чтобы войти в число лидеров, гарантировать России технологический суверенитет, достойное место среди ведущих игроков на перспективных новых рынках» [https://www.1tv.ru/news/2019-07-10/368378-vladimir_putin_postavil_zadachu_dobitsya_liderstva_rossii_v_sfere_tehnologiy_budushego (Дата обращения: 20.07.2021)].

Одним из путей организации высокоэффективного производства ЭП с улучшенными параметрами качества является создание «умных заводов» с системами автоматизации управления производством (в зарубежной терминологии ERP-systems) [26]. Нами рассматривались пути создания таких автоматизированных компьютерных систем, включающих контроль качества ЛГ на разных стадиях их производства [3, 4].

Рассматриваемый в данной работе трехосный лазерный гироскоп (ЛГ) является сложным электронным прибором (ЭП), состоящим из трех лазерных датчиков (He-Ne кольцевых лазеров) и электроники обеспечения их функционирования и обработки сигналов. Производством ЛГ овладели всего несколько фирм в мире, так как оно является комплексным, включающим в себя одновременно целый ряд разнородных технологий и процессов: технологию механической обработки металлических и стеклокерамических материалов; вакуумные, оптические, электронные, компьютерные технологии, нанотехнологии; всесторонние испытания на устойчивость к внешним воздействующим факторам. Вследствие этого стоимость изготовления ЛГ является достаточно высокой. Поэтому задача поиска путей повышения экономической эффективности этапов разработки и производства ЛГ с одновременным обеспечением высокого качества и надежности выпускаемых приборов является крайне актуальной.

В данной работе мы продолжаем исследования, направленные на повышение качества и экономической эффектив-

ности разработки и производства ЛГ, используя компьютерные методы моделирования поведения ЛГ с учетом условий реальной эксплуатации в широком температурном диапазоне.

Экономическая эффективность и качество новой техники закладываются на стадиях научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР). Именно здесь имеются наибольшие возможности в реализации прогрессивных идей по созданию технологичных в изготовлении, надежных и долговечных образцов техники. К числу таких прогрессивных идей относится использование компьютерного моделирования.

Затраты на подготовку и многократные испытания ЛГ занимают существенную часть бюджета, выделяемого на НИОКР. Часто после первых испытаний обнаруживаются чрезмерные тепловые нагрузки на электронные компоненты (ЭК). В данной работе рассмотрена возможность повышения надежности ЛГ и экономической эффективности их разработки и производства за счет сокращения (а фактически сведения к нулю) количества изменений, вносимых в конструкцию ЛГ после испытаний готовых макетов или опытных образцов. Этого можно добиться, если необходимые изменения внести на ранних этапах проектирования ЛГ путем выявления перегруженных ЭК на печатных узлах в процессе компьютерного моделирования ЛГ на тепловые воздействия. Сокращается объем необходимых испытаний, исключается необходимость многократных повторных испытаний. Средства, сэкономленные благодаря этому, могут быть направлены на развитие предприятия.

В последние годы в мировой практике при конструировании ЭП с целью сокращения сроков и затрат на создание конкурентоспособной аппаратуры предварительное тепловое моделирование используется все шире [5, 21]. Оно позволяет уже на ранних этапах проектирования до изготовления макетов и опытных образцов определить фактические температуры на компонентах ЭП, оптимизировать схемотехнические решения и конструкцию для обеспечения работы прибора в пределах допустимых тепловых нагрузок, сократить сроки проведения испытаний готовых приборов и практически исключить доработки из-за погрешностей конструирования.

Анализ особенностей разработки ЭП показал, что большинство инженеров понимают, какое существенное влияние оказывает температура на работу приборов. Но из-за недостаточного внимания к тепловому проектированию они чаще всего обнаруживают перегревы слишком поздно, что приводит к дорогостоящему устранению ошибок [2, 30]. По представленной статистике 40% инженеров считают тепловое проектирование низким приоритетом при разработке своих устройств. Для многих из них главными приоритетами являются соответствие требованиям технического задания, использование инноваций и обеспечение надежности приборов. Но именно точное тепловое проектирование на ранних стадиях разработки позволяет в конечном итоге достичь всего этого.

Миниатюризация и повышение плотности компоновки ЭП, к числу которых относятся ЛГ, сопровождаются ростом плотности внутреннего тепловыделения, в результате температура в ЭП повышается. Вызванные этим отклонения электрических параметров ЭК приводят к отклонениям выходных параметров ЭП. К тому же повышение температуры

ускоряет процесс необратимых физико-химических изменений в материалах, использованных для построения ЭП, особенно критичным является материал ПП, в результате резко увеличивается интенсивность отказов ЭК и, следовательно, снижается надежность ЭП. Установлено, что повышение температуры с 20 до 80 С приводит к увеличению интенсивности отказов полупроводниковых приборов в 3-4 раза, резисторов в 2-3 раза, конденсаторов в 6-8 раз, интегральных микросхем – в 6-10 раз [29].

Вступают в противоречие требования потребителей по увеличению функциональных возможностей изделия, сокращению его габаритно-массовых характеристик, обеспечению высокой надежности и безотказности работы ЭП и в то же время – снижению стоимости изделия и его обслуживания при эксплуатации. При этом уровень температуры в ряде случаев является решающим фактором, ограничивающим эксплуатационные характеристики ЭП [20].

В литературе описаны примеры применения для анализа тепловых процессов в механических системах и в электронике отечественных и зарубежных программных комплексов (ПК), таких как ANSYS, SIGMA, COMSOL, STF-ElectronMod, [6; 7, 8; 22; 24].

Мы провели анализ возможностей применения зарубежных ПК для моделирования теплового поведения ЛГ, содержащих кольцевые лазерные датчики и набор электронных ПУ, и пришли к выводу, что рассмотренные ПК не могут быть в полной мере применены по следующим причинам.

Использование зарубежных ПК требует адаптации их к применяемым в России элементной базе и типовым конструкциям, а также к стандартам. В итоге высокая стоимость зарубежных ПК и время, затраченное на их адаптацию, заметно увеличат стоимость разработок и время их проведения. Применение ПК, не опробованных на подтверждение достоверности моделирования экспериментальными измерениями, недопустимо при проектировании ЛГ, устанавливаемых в том числе в навигационных системах самолетов, в которых отказ из-за ошибок проектирования может привести к гибели десятков людей.

Особые проблемы анализа тепловых процессов в ЭП возникают в случае сложных многослойных конструкций этажерочного и кассетного типов, содержащих большое количество ЭК. Российские конструкторы обычно для каждой мощной космической ракеты, выводящей на орбиту несколько геофизических и связных спутников, проектируют систему из совокупности сложных взаимосвязанных ЭП, которые включают в себя до 1 млн. ЭК с плотной компоновкой на печатных платах, работающих в широком температурном диапазоне.

Для теплового моделирования подобных сложных конструкций успешно применяется российская автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА, основанная на теории проектирования надежных ЭП [9]. Система АСОНИКА не уступает по возможностям зарубежным ПК [27].

В данной статье мы рассматриваем возможности теплового моделирования комплексных ЭП, к которым относятся ЛГ, содержащие в едином корпусе датчики угловых поворотов на основе кольцевых лазеров, а также электронику обеспечения их функционирования и обработки сигналов. Электроника ЛГ – это этажерочный набор электронных печатных

узлов (ПУ), которые представляют собой печатные платы (ПП) с установленными на них ЭК.

По перечисленным выше причинам мы выбрали для анализа теплового поведения ЛГ российскую систему АСОНИКА, которая много лет широко применяется на российских предприятиях, разрабатывающих сложные ЭП. Более чем 30-летний опыт использования системы АСОНИКА, в том числе для анализа многокомпонентной аппаратуры космических аппаратов, подтвердил достоверность и высокую точность получаемых при моделировании результатов, а также удобство пользования и меньшее по сравнению с другими ПК время, затрачиваемое на создание моделей [10, 11, 25]. Использование системы АСОНИКА позволяет реализовать современные методы проектирования ЭП, основанные на CALS-технологиях [27]. За прошедшие годы CALS-технологии получили широкое развитие при разработке и производстве инновационной продукции; по приведенным данным это позволило ускорить выполнение НИОКР на 30-40%, уменьшить стоимость продукции на 30%, а также в 9 раз сократить время на корректировку проектов для адаптации под новые задачи.

Это связано с возможностями CALS-технологий по применению автоматизированных систем в организации этапов проектирования и контроля на всех стадиях, позволяющих оперативно находить и исправлять дефекты, производить изменения в проекте, например, заменить ЭК от одного производителя на аналогичный от другого, без внесения существенных изменений в проект, получить новый уровень гибкости и приспособляемости производимого продукта, проверяя возможность его применения в разных системах и при различных условиях эксплуатации. Таким образом, подобные технологии с применением автоматизированных систем, среди которых АСОНИКА, обеспечивают минимизацию времени на разработку и постановку на производство новых образцов наукоемкой продукции.

В статье о проведенных ранее исследованиях по компьютерному моделированию трехосных ЛГ [22] описаны результаты механического моделирования только резонатора (датчика) трехосного моноблочного ЛГ без какой-либо электроники, выполнявшегося с целью определения его резонансных частот. В статье [1, 15] приведены результаты теплового моделирования только резонатора (датчика) одноосного ЛГ.

В нашей работе объект и объем исследований были другими – необходимо было провести тепловое моделирование трехосного ЛГ из трех датчиков с полным комплектом электронных блоков, надежная работа которых в широком температурном диапазоне в значительной мере определяет надежность всего прибора. Начало этих исследований отражено в статьях [12, 13, 14].

Базовые методы, которые мы используем при компьютерном моделировании с помощью системы АСОНИКА: метод электротепловых аналогий, метод поэтапного разукрупнения, метод конечных разностей, метод сеток, метод графов. Полезность подобных методов подтверждена в работах других ученых. Метод электротепловых аналогий дает возможность в случае трудностей с определением искомых параметров изучаемого процесса перейти к анализу другого процесса, который эквивалентен изучаемому, но свободен от его недостатков. Электротепловая аналогия основана на формальном сходстве математических описаний процессов

теплопроводности и электропроводности [18]. Важно еще, что инженеру-электронщику гораздо легче представить тепловые процессы, пользуясь привычными для него терминами, схожими с терминами электротехники. Полезным признан и используется нами метод поэтапного масштабирования («zooming»), описанный в статье [23], при котором анализ объекта моделирования происходит с последовательным увеличением степени дискретизации, то есть с ростом пространственного разрешения всего объекта или его частей, что обеспечивает повышение точности моделирования.

В данной статье детально описаны теоретические принципы и математический аппарат, которые используются при построении тепловых моделей трехосных ЛГ с электроникой, алгоритм и процесс построения тепловой модели, результаты моделирования ЛГ с помощью системы АСОНИКА, доработки прибора, необходимые для исключения тепловых перегрузок и обеспечения надежной работы прибора, а также экспериментальные проверки точности этого моделирования.

2. Особенности поведения ЛГ при тепловых воздействиях и цель данной работы

Трехосный малогабаритный ЛГ [19] имеет плотную компоновку. В общем внешнем кожухе размещены датчики таким образом, чтобы они обеспечивали измерения угловых перемещений в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а в свободных зонах предельно компактно установлены электронные ПУ. Такая плотная компоновка приводит к повышенному тепловыделению во внутреннем объеме ЛГ. Для обеспечения надежной работы ЛГ в широком диапазоне температур нужно проконтролировать отсутствие локальных перегревов и заметных градиентов температур в тепловых полях прибора. Единственным и эффективным способом проанализировать тепловое поведение ЛГ на этапе разработки прибора является тепловое моделирование. В данной работе была поставлена задача разработать метод, устанавливающий алгоритм полной последовательности компьютерного теплового моделирования ЛГ, и провести такое моделирование. Для этого необходимо на первом этапе в подсистеме АСОНИКА-Т отработать тепловую макро модель ЛГ для типовой конструкции, показанной на рисунке 1.

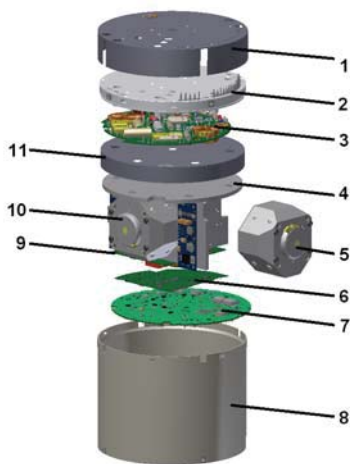


Рис. 1. Составные части компоновки лазерного гироскопа: 1 – крышка внешнего кожуха-экрана; 2 – диск с контактами-шттырьками; 3, 6, 7, 9 – печатные узлы; 4 – несущий каркас; 5, 10 – датчики; 8 – внешний кожух-экран; 11 – внутренний экран

При построении тепловой модели требуется предусмотреть интерфейсную связь, с одной стороны, с программой электрического моделирования для передачи вычисленных мощностей тепловыделений в ЭК, а с другой стороны, с подсистемой АСОНИКА-ТМ, позволяющей на втором этапе теплового моделирования провести поэлементное моделирование всех ПУ, входящих в ЛГ. Такая последовательность моделирования даст возможность в конечном итоге получить на выходе подсистемы АСОНИКА-ТМ все реальные тепловые нагрузки на каждом ЭК.

3. Теоретические принципы и математический аппарат, которые используются при построении тепловых моделей лазерных гироскопов

3.1. Принцип унификации тепловых и электрических процессов на основе электротепловой аналогии и его использование при тепловом моделировании лазерных гироскопов с использованием ненаправленных графов

Тепловое моделирование ЛГ осуществляется с использованием принципа электротепловой аналогии.

Моделирование с использованием принципа электротепловой аналогии требует унификации топологических моделей на основе математических описаний разнородных физических процессов. Такая унификация приведена в таблице 1. Она позволяет сделать более понятной методику проведения анализа тепловых процессов в ЛГ и расчета выходных параметров модели – температур частей и компонентов ЛГ.

Таблица 1

Унификации разнородных физических процессов для учета их взаимосвязи

Унифицированные переменные и параметры моделей физических процессов	Электрическая модель	Тепловая модель
Переменная функциональная величина узла модели, φ	Электрический потенциал узла электрической схемы, φ	Температура изотермической области конструкции, T
Переменная функциональная величина ветви модели, ψ	Ток ветви электрической схемы, I	Тепловой поток между изотермическими областями (мощность тепловыделения), P_T
Диссипативный параметр ветви, α	Проводимость (разность потенциалов постоянна при постоянном токе), G_E	Тепловая проводимость (разность температур между изотермическими областями постоянна при постоянном тепловом потоке между ними), G_T
Консервативный параметр ветви (1-го рода), β	Емкость (разность потенциалов возрастает при постоянном токе), C_E	Тепловая емкость (разность температур между изотермическими областями возрастает при постоянном тепловом потоке между ними), C_T
Консервативный параметр ветви (2-го рода), γ	Индуктивность (ток возрастает при постоянной разности потенциалов), L_E	Тепловая индуктивность (конвективный тепловой поток возрастает в переходном процессе между изотермическими областями), L_T
$\alpha (\varphi_1 - \varphi_2) = \psi$	$G_E (\varphi_1 - \varphi_2) = I$	$G_T (T_1 - T_2) = P_T$

При тепловом моделировании ЛГ мы используем ненаправленные графы, которые позволяют построить структурную топологическую модель прибора в виде узлов, соответствующих частям и компонентам прибора, и показать связи между ними, иллюстрируя происходящие в приборе тепловые процессы. Метод графов используется также для последующего поэлементного анализа каждого печатного узла и построения виртуальной карты его теплового поля.

Унифицированные переменные функциональные величины и параметры электрических и тепловых моделей приведены в первом столбце таблицы 1. Функциональными величинами описываются, прежде всего, входные и выходные сигналы. Первые задаются перед или при моделировании, а вторые получаются в результате моделирования. Их связь между собой определяется структурой модели и значениями параметров ветвей графа.

Параметры ветвей часто являются постоянными величинами, но иногда могут быть и зависимыми от некоторых переменных величин φ и ψ .

Формулы, приведенные в нижней строке таблицы 1, иллюстрируют единообразие математических уравнений разнородных электрических и тепловых процессов и уравнения в унифицированной форме.

Важнейшими параметрами в данном рассмотрении будут температура, тепловой поток (мощность тепловыделения) и тепловая проводимость.

3.2. Этапы моделирования и математический аппарат, который используется при построении тепловых моделей лазерных гироскопов

В ЛГ, представленном на рис.1, присутствуют тепловые процессы между элементами конструкции в виде кондукции, конвекции и излучения.

Построение тепловой модели ЛГ, отражающей эти процессы, происходит в два этапа: 1-й этап – макромоделирование ЛГ с использованием подсистемы АСОНИКА-Т, 2-й этап поэлементное моделирование каждого ПУ ЛГ – с использованием подсистемы АСОНИКА-ТМ. Обе системы построены на основе уравнений классической теории теплообмена.

На первом этапе моделирования мы осуществляем макромоделирование ЛГ, разбивая его на условно изотермические объемы (части), которыми являются датчики ЛГ, все ПУ, элементы конструкции, воздушные полости внутри ЛГ. Исходные данные (чертежи, материалы элементов конструкции) вводятся в подсистему АСОНИКА-Т. Мощность тепловыделений каждого ПУ задается в подсистеме АСОНИКА-Т как сумма мощностей тепловыделения всех ЭК, расположенных на ПП, с использованием данных проведенного при проектировании принципиальных схем ПУ электрического моделирования (в нашем случае – с помощью программы PSpice). По данным о мощностях тепловыделения подсистема АСОНИКА-Т рассчитывает средние температуры частей ЛГ, в том числе каждого ПУ.

Приведем формулы, используемые в программах моделирования АСОНИКА-Т и АСОНИКА-ТМ для расчета тепловых проводимостей для различных видов теплообмена: кондукции, конвекции и излучения.

В общем случае тепловая проводимость G_T участка определяется как отношение теплового потока Q_T , протекающего

через данный участок, то есть мощности тепловыделения P_T к разности температур ΔT между концами этого участка:

$$G_T = \frac{P_T}{\Delta T}. \quad (1)$$

Тепловая проводимость кондукции G_{Tcd} участка с постоянным сечением S , имеющего длину L и коэффициент теплопроводности λ , определяется формулой:

$$G_{Tcd} = \frac{\lambda \cdot S}{L}. \quad (2)$$

Тепловая проводимость конвективной теплоотдачи равна

$$G_{Tcn} = \alpha_{cn} \cdot S, \quad (3)$$

где α_{cn} – коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности площадью S в окружающий воздух.

Тепловая проводимость излучения:

$$G_{Tr} = \frac{\varepsilon_{пр} \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}, \quad (4)$$

где T_1 и T_2 – температуры противоположно расположенных и взаимно связанных излучательным теплообменом двух поверхностей площадью S ; $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты обеих поверхностей; σ – коэффициент Стефана-Больцмана, характеризующий удельную энергетическую светимость абсолютно черного тела.

По аналогии с электрической проводимостью обратная величина тепловой проводимости участка, состоящего из нескольких участков, равна сумме обратных величин тепловых проводимостей отдельных участков.

Расчет суммарных проводимостей для каждой из выделенных частей ЛГ и определение температуры каждой части производится с помощью подсистемы АСОНИКА-Т.

На втором этапе тепловое моделирование осуществляется с использованием метода конечных разностей (МКР), который называют также методом сеток. В этом методе происходит замена непрерывной задачи математической физики ее дискретным аналогом – «разностной схемой», как это будет показано далее. Фактически область непрерывного изменения аргументов заменяется конечным набором точек – узлов, совокупность которых образует сетку. Такая сетка может быть рассмотрена как ненаправленный граф.

В ряде случаев при моделировании используется метод конечных элементов (МКЭ). Классический метод конечных элементов обычно требует построения сетки из большого числа элементов, в результате объем памяти компьютера оказывается недостаточным или вычисления будут слишком медленными и длительными [17].

Нужно отметить важное преимущество МКР по сравнению с МКЭ: МКР характеризуется относительной простотой решающего алгоритма и его программной реализации. По этим причинам мы используем тепловое моделирование на основе МКР.

На рисунке 2 приведен пример участка графа (сетки) для ПУ при наличии всех видов теплообмена.

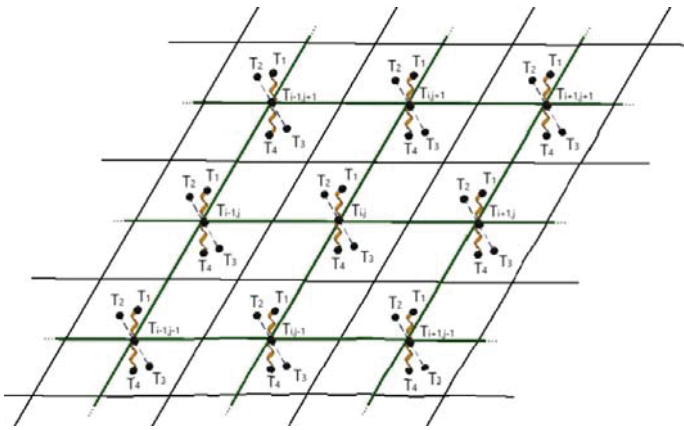


Рис. 2. Общий вид части тепловой модели печатного узла: $T_{i,j}$, $T_{i-1,j}$, $T_{i+1,j}$, $T_{i,j-1}$, $T_{i,j+1}$ – температуры в узлах сетки, i и j – номера узлов сетки по осям x и y , T_1 , T_4 – температуры деталей конструкции ЛГ над и под печатным узлом; T_2 , T_3 – температуры воздуха над и под печатным узлом

В таблице 2 приводятся обозначения ветвей графа в зависимости от вида тепловой проводимости, соответствующей данной ветви.

Таблица 2

Тепловые процессы и их обозначения

Обозначение ветвей тепловой модели	Название вида теплового процесса
	Кондукция
	Излучение
	Контактный теплообмен
	Естественная конвекция

Граф в виде сетки строится по всей поверхности ПУ автоматически с помощью системы АСОНИКА-ТМ, при этом шаг сетки задается проектировщиком.

В вершинах графа при моделировании вычисляются температуры $T_{i,j}$, соответствующие температурам ПП и ЭК в этих ячейках.

Покажем, как происходит построение тепловой модели ПУ ЛГ с использованием метода конечных разностей.

Построим топологическую тепловую модель ПУ, имея в виду, что по его площади тепловой поток, исходящий из ЭК, распространяется кондукцией, а с одной и второй сторон ПУ тепловой поток уходит в окружающий воздух путем конвекции, а также путем излучения на соседние к ПУ конструктивные части ЛГ.

Мощность потока тепловой энергии P_{cd} , передающейся посредством кондукции, определяется законом Фурье, который может быть представлен формулой:

$$P_{cd} = -\lambda S \nabla T, \tag{5}$$

где P_{cd} – мощность теплового потока за счет тепловыделения ЭК, расположенных на ПУ, λ – коэффициент теплопроводности, S – площадь, ∇ – оператор Лапласа, T – температура.

Для того, чтобы представить уравнение (5) в конечных разностях, нужно от непрерывного описания перейти к дискретному. Разделим ПУ на дискретные объемы $V_i = \Delta x \cdot \Delta y \cdot h$,

где Δx и Δy – размеры ячейки сетки по осям x и y , h – толщина ПП (обычно h существенно меньше Δx , Δy , поэтому теплообмен вдоль оси z мы не рассматриваем). Каждый объем считаем изотермическим, то есть в каждой точке объема температуру считаем одинаковой, в том числе в частях ЭК, размещенных на поверхности данного объема (в ячейке).

Теперь перейдем к дифференциальному уравнению теплопроводности Фурье в виде:

$$\lambda \nabla^2 T + p_{cd} = 0, \tag{6}$$

где p_{cd} – удельная тепловая мощность, выделяемая в ячейке ПУ за счет кондукции. Приведем это уравнение к конечно-разностной форме, заменив частные производные в $\nabla^2 T$ конечными разностями:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{\Delta^2 x}, \tag{7}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}}{\Delta^2 y},$$

где i и j – номера узлов сетки по осям x и y .

После проведения ряда преобразований получим следующее выражение:

$$G_{Tcdi}(T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}) + G_{Tcdj}(T_{i,j-1} - 2T_{i,j} + T_{i,j+1}) + P_{cdi,j} = 0, \tag{8}$$

где G_{Tcdi} – тепловая проводимость за счет кондукции между соседними ячейками сетки по оси x ;

$$G_{Tcdi} = \lambda \cdot h \cdot \Delta y / \Delta x;$$

G_{Tcdj} – тепловая проводимость за счет кондукции между соседними ячейками сетки по оси y ;

$$G_{Tcdj} = \lambda \cdot h \cdot \Delta x / \Delta y;$$

$P_{cdi,j}$ – тепловая мощность, выделяемая в ячейке сетки (параметр присутствует только при наличии в ячейке ЭК, выделяющих тепло).

Вид (8) имеет любое уравнение, входящее в систему уравнений для ячеек сетки (см. рис. 2). Эта система уравнений решается в подсистеме АСОНИКА-ТМ для кондуктивного теплообмена. Топологическая модель представляет собой двумерную сетку из тепловых проводимостей кондукции G_{Tcd} , расположенных между узлами сетки.

Кроме того, в ЛГ присутствуют конвективный и излучательный теплообмены. При подготовке тепловой сетки к расчету указываются также граничные условия теплообмена между поверхностями ПУ и окружающим воздухом, а также с соседними платами или со стенками корпуса и другими частями ЛГ. Тогда в тепловую модель ЛГ добавляются тепловые проводимости конвекции и излучения (G_{Tcn} и G_{Tr}).

Конвекция с поверхностями ПП и других частей ЛГ происходит в соответствии с уравнением Ньютона-Рихмана (в зарубежной терминологии – «законом охлаждения Ньютона»):

$$P_{cn} = G_{Tcn}(T_s - T_A), \tag{9}$$

где P_{cn} – мощность тепловыделения за счет кондукции, T_s – температура поверхности, T_A – температура окружающей среды.

Закон охлаждения Ньютона также может быть использован для определения количества тепла, выделенного за счет теплового излучения:

$$P_r = G_{Tr}(T_1 - T_2), \quad (10)$$

Все приведенные выше формулы являются основой для выполнения расчетов по программе АСОНИКА-ТМ.

Полученные на первом этапе моделирования данные используются на втором этапе для моделирования каждого ПУ в отдельности. А именно, при тепловом моделировании каждого ПУ мощности тепловыделений в каждом ЭК этого ПУ, совместно со средней его температурой, температурами воздуха с одной и другой стороны ПУ, а также температурами других конструктивных частей ЛГ позволяют получить с помощью программы АСОНИКА-ТМ температуры всех ЭК данного ПУ.

4. Алгоритм метода обеспечения режимов работы лазерных гироскопов в пределах допустимых тепловых нагрузок

При моделировании теплового поведения ЛГ одной из рассматриваемых характеристик является его устойчивость как к внешним тепловым воздействиям, так и к внутренним, возникающим за счет собственного тепловыделения в ЭК. Фактическое распределение теплового поля в ЛГ определяется совокупностью этих факторов. Особенно опасным является наличие локальных перегревов отдельных ЭК, расположенных на ПП, так как они могут привести к изменению параметров и/или отказу ЭК в процессе работы прибора. К сожалению, разработчики часто уделяют основное внимание достижению заданных параметров прибора, но пренебрегают тщательным анализом его теплового поведения.

Как было неоднократно подтверждено результатами применения системы АСОНИКА для анализа сложных многокомпонентных ЭП, тепловое моделирование с помощью этой системы создает возможность контроля тепловых нагрузок при проведении исследований работы ЭП, имитируя различные режимы рабочей эксплуатации, выдавая выходные данные по температурам как частей ЭП, так и всех ЭК в виде таблиц, в которых указаны также заданные и фактические коэффициенты тепловой нагрузки и дана оценка соответствия или превышения заданных значений. Вот почему система АСОНИКА была выбрана для моделирования теплового поведения ЛГ.

Принимая во внимание отмеченную важность влияния тепловых процессов на работоспособность ЭК, мы в данной работе разработали метод, устанавливающий алгоритм полной последовательности компьютерного теплового моделирования ЛГ (рис. 3).

В алгоритме отражен предложенный двухэтапный метод моделирования «сверху вниз» или метод разукрупнения (zooming): на первом этапе проводится макро моделирование ЛГ с анализом тепловых процессов в частях ЛГ, включая ПУ, а затем производится увеличение степени дискретизации анализа вплоть до определения температурных режимов каждого ЭК (рис.3). Коэффициент фактической тепловой нагрузки рассчитывается по следующей формуле:

$$k_i^T = T_i^{\Phi} / T_i^{TV}, \dots, i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

где T_i^{Φ} – температура i -го ЭК, которая определяется в результате расчета в подсистеме АСОНИКА-ТМ; T_i^{TV} – предельная допустимая температура ЭК по ТУ, n – количество ЭК. В соответствии с типичными требованиями коэффициенты фактических тепловых нагрузок должны быть не менее 0,8.

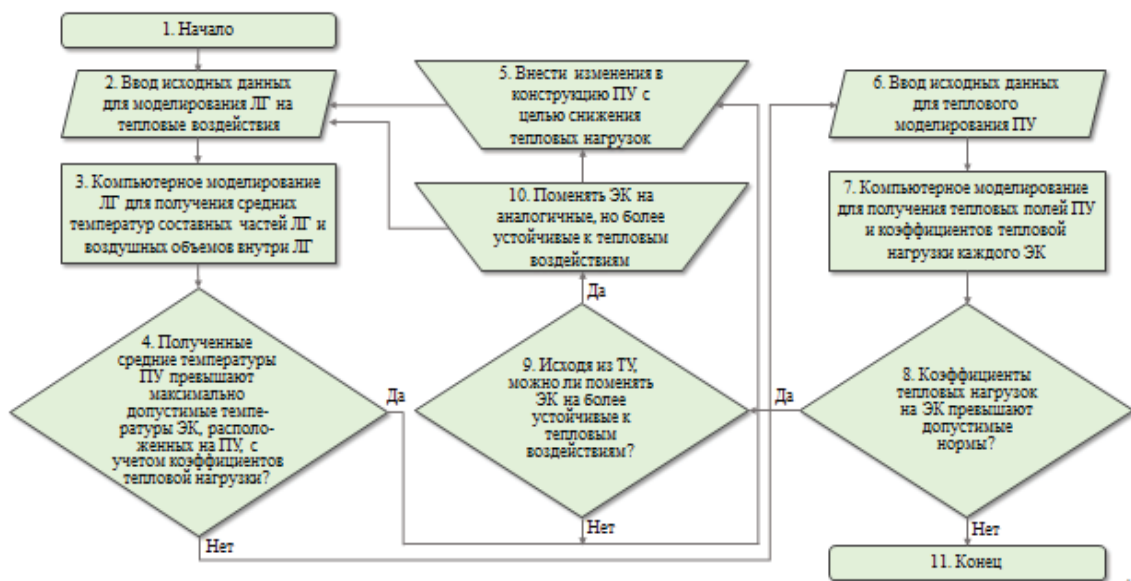


Рис. 3. Алгоритм метода обеспечения режимов работы лазерных гироскопов в пределах допустимых тепловых нагрузок, реализуемый с помощью подсистем АСОНИКА-Т (блоки 1-4) и АСОНИКА-ТМ (блоки 6-8, 11)

5. Процесс и результаты моделирования тепловых режимов в лазерном гироскопе

5.1. Тепловое макро моделирование лазерного гироскопа

При компьютерном моделировании ЛГ с помощью системы АСОНИКА был использован принцип разукрупнения или поэтапного масштабирования (zooming), при этом на первом этапе проводилось макро моделирование ЛГ. Как отмечено в разделе 2.2, на первом этапе моделирования прибор разбивается на условно изотермические части, а именно: датчики ЛГ (датчик X, датчик Y, датчик Z), все ПУ (ПУ цифрового блока и других электронных блоков ЛГ), элементы конструкции (крепёжная система – «крестовина» из двух деталей, кожух-экран и др.), воздушные полости внутри ЛГ.

Тепловая макро модель ЛГ строилась в подсистеме АСОНИКА-Т как модель тепловых потоков в виде ненаправленного графа. Узлы такого графа моделируют условно изотермические части ЛГ, ветви графа отображают тепловые потоки между этими частями. В подсистеме АСОНИКА-Т предусмотрена возможность учета видов тепловых воздействий, имеющих в ЛГ, поэтому мы могли их смоделировать и построить ветви графа, соответствующие виду воздействий.

Подсистема АСОНИКА-Т автоматически формирует модели типовых конструкций, а для нетиповых конструкций существует графический интерфейс, в котором проектировщик сам строит топологическую модель. При моделировании ЛГ мы использовали оба варианта, так как часть элементов конструкции ЛГ имеет типичную форму, а часть – нетипичную.

В процессе моделирования мы пользовались информацией о тепловых параметрах материалов конструктивных элементов ЛГ (теплопроводность, теплоемкость), взятой из баз данных подсистемы АСОНИКА-Т и технических условий.

Для пояснения процесса моделирования на рисунке 4 показан эскиз зоны внутреннего объема ЛГ, соответствующий фрагменту модели (нумерация элементов начинается с цифры 11, так как показанный фрагмент рассматривался в ряду других фрагментов).

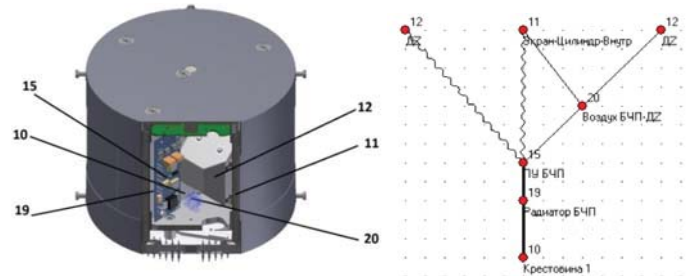


Рис. 4. Эскиз зоны внутреннего объема лазерного гироскопа и фрагмент его тепловой модели, где части прибора – узлы графа, соединенные ветвями с соответствующим видом теплопередачи: 10 – вертикальная часть несущего каркаса («крестовина 1»); 11 – внутренний цилиндрический экран; 12 – датчик оси Z (ДЗ); 15 – печатный узел блока частотной подставки (ПУ БЧП); 19 – радиатор блока частотной подставки (БЧП); 20 – воздушный зазор между ПУ БЧП и датчиком оси Z (ДЗ)

На рисунке 5 представлена полная модель тепловых процессов в ЛГ, построенная в подсистеме АСОНИКА-Т.

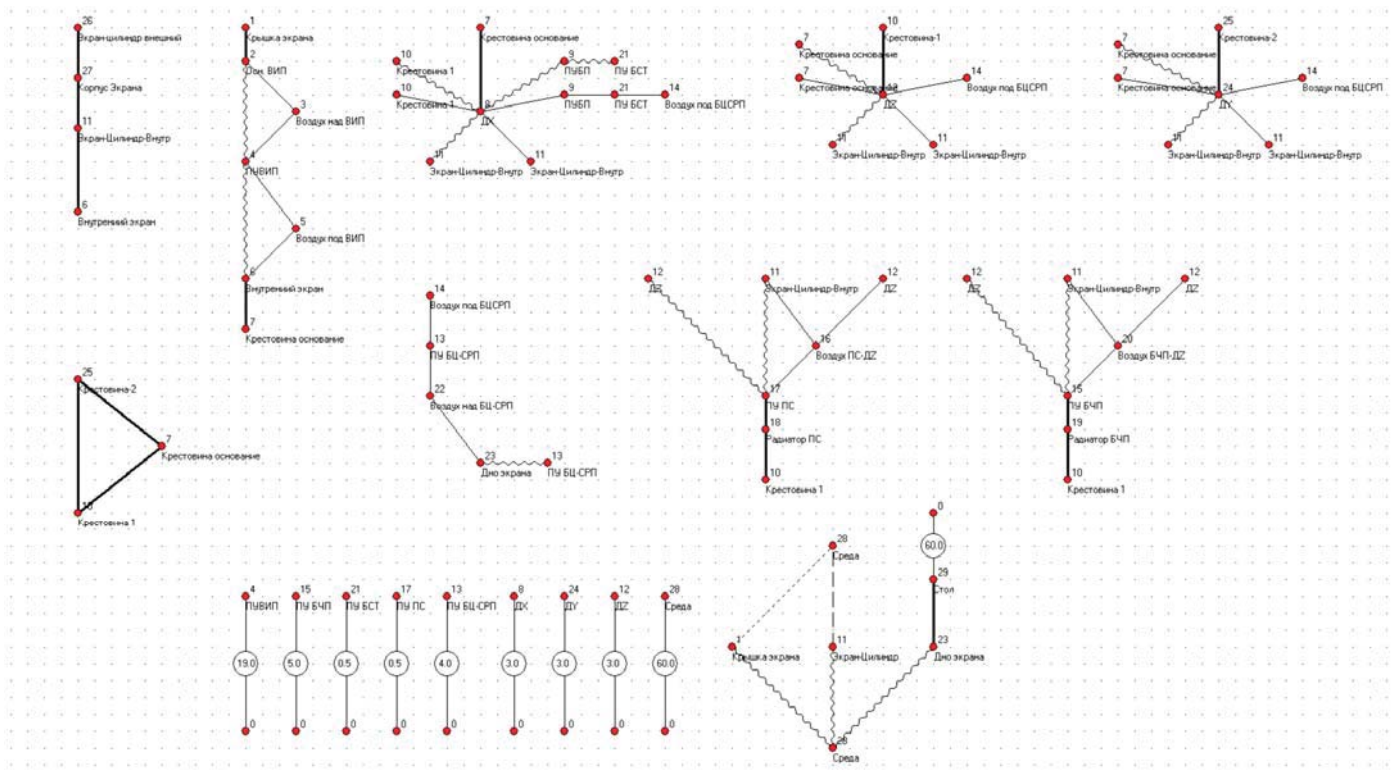


Рис. 5. Топологическая модель тепловых процессов в лазерном гироскопе, построенная с помощью подсистемы АСОНИКА-Т

В качестве входных данных мы вводили температуру окружающей среды, мощности тепловыделений датчиков и всех ПУ, просуммировав мощности тепловыделений расположенных на них ЭК, получаемые как результаты электрического моделирования принципиальной схемы ЛГ. В левом нижнем углу рисунка 5 показаны в виде источников ЭДС источники мощности тепловыделения, соответствующие каждому ПУ, окружающая среда моделируется в виде источника температуры с возможностью ее изменения в соответствии с реальными условиями эксплуатации.

Выходные данные – температуры частей конструкции, всех ПУ, датчиков.

Отметим, что топологическая модель, представленная на рисунке 5, разделена на части в целях упрощения и наглядности, поэтому ряд узлов дублируются. При расчетах в подсистеме АСОНИКА-Т их объединение происходит автоматически.

По результатам расчета выводятся данные в виде таблицы температур в узлах модели ЛГ. Таких узлов в нашей модели было 27. В самом неблагоприятном случае – при температуре окружающей среды $+60^{\circ}\text{C}$ температуры большинства частей ЛГ оказались в диапазоне от 70 до 80°C , но температуры двух ПУ достигли 92 и 94°C , что не превышает допустимые максимальные температуры установленных на них ЭК (причем с учетом коэффициента тепловой нагрузки), однако требует дальнейшего анализа температурных режимов каждого ЭК для оценки возможности его надежной работы при повышенной температуре.

5.2. Моделирование тепловых режимов в печатных узлах лазерного гироскопа

На втором этапе моделирования в соответствии с принципом разукрупнения (или zooming) мы перешли к моделированию каждого ПУ в отдельности с целью определения температур всех установленных на нем ЭК. При этом мы использовали подсистему АСОНИКА-ТМ, в которой автоматически строится сетка – ненаправленный граф на основе МКР (см. рис. 2).

Далее приводятся результаты моделирования одного из ПУ ЛГ – цифрового блока. Он является удачным выбором для иллюстрации результатов моделирования из-за большого количества установленных на нем ЭК: около 200 интегральных схем, транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов размещены с двух сторон ПП. На рисунке 6 приводится изображение теплового поля для ПУ этого блока.

Отметим, что резкие границы между этими элементами и окружающей зоной ПП обусловлены тем, что в подсистеме АСОНИКА-ТМ имеется возможность определения и индикации средней температуры каждого ЭК, что позволяет оценить соответствие требованиям по максимально допустимому коэффициенту тепловой нагрузки.

Как хорошо видно на рисунке 6, наиболее теплонагруженными являются ПЛИС D9 и диоды D7, D8. Несмотря на то, что по этим ЭК не зафиксировано превышение максимально допустимого коэффициента тепловой нагрузки, это требует внимательного рассмотрения особого внимания.

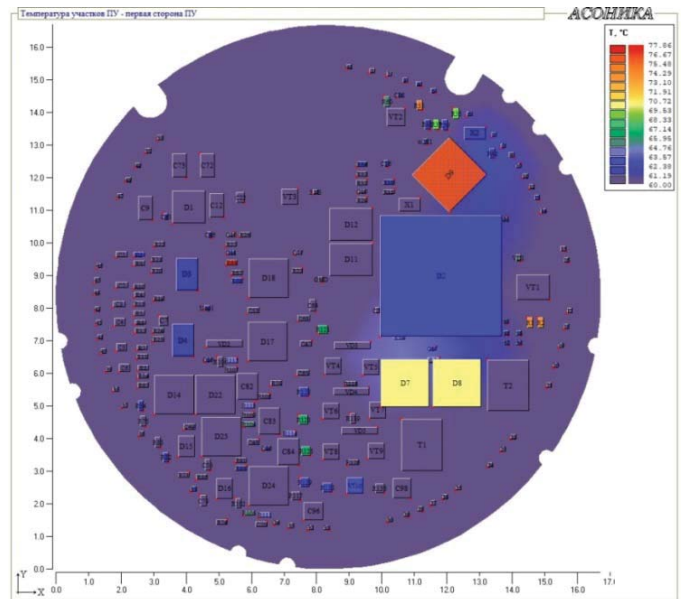


Рис. 6. Тепловое поле печатного узла ЛГ в подсистеме АСОНИКА-ТМ после моделирования тепловых процессов с индикацией температуры каждого ЭК

Среди всех ЭК этого ПУ превышение обнаружено у 5 резисторов (в диапазоне 0.85-0.88), что составляет 1,4 % от общего количества ЭК.

Вместе с тем необходимо отметить, что при температуре внешней среды $+60^{\circ}\text{C}$ часть ЭК данного блока (примерно 10%) работают при повышенных температурах (до $+100^{\circ}\text{C}$), что, как известно, приводит к увеличению интенсивности отказов ЭК.

Подчеркнем, что еще более чувствительными к работе при повышенной температуре являются интегральные схемы, у которых повышение температуры с 20 до 80°C может привести к увеличению интенсивности отказов на порядок, как об этом написано в разделе 1. Избыточно теплонагруженным является важный ЭК цифрового блока – ПЛИС: при температуре внешней среды $+60^{\circ}\text{C}$ температура ПЛИС по результатам моделирования составляет около $+76^{\circ}\text{C}$, а по результатам натурного эксперимента (см. раздел 5.3) еще выше, а именно $+79^{\circ}\text{C}$, на что следует обратить особое внимание с учетом наблюдавшихся отказов этих интегральных схем.

Таким образом, при дальнейших разработках ЛГ с увеличенным временем непрерывной работы следует принять меры по снижению тепловых нагрузок на теплонагруженные ЭК.

5.3. Экспериментальная проверка результатов моделирования

С целью определения точности моделирования был поставлен ряд экспериментов, в которых на прибор была установлена совокупность датчиков измерения температуры. Термодатчики были расположены в 15 точках конструкции, соответствующих узлам (вершинам графа) в тепловой модели. В таблице 5 приводятся результаты для наиболее теплонагруженных деталей, ПУ, ПП, ЭК.

Таблица 5

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

Название части конструкции, на которую установлен термодатчик	Температура, °С		Разность температур при моделировании и при эксперименте	Погрешность моделирования, %
	Результат моделирования	Результат измерения		
Микроконтроллер цифрового блока	81.88	78	3.88	5.0
ПЛИС на цифровом блоке	88.68	85.13	3.55	4.2
Печатная плата цифрового блока	80		2	2.56
Резистор на цифровом блоке	80		4	5.3
Нижняя плоскость корпуса	81	75	5.6	7.4
Основание ВИП	75.3	74.2	1.1	1.4
Транзистор стабилизатора тока	89.8	93	3.2	3.7
Воздух рядом с датчиком Z	82.2	84.1	1.9	2.26

В первую очередь мы размещали датчики в наиболее теплогруженных местах конструкции. Были проведены испытания, в которых прибор помещался в камеру теплехолода, где непрерывно работал на протяжении 120 мин при постоянной температуре в камере +60°С. Данные датчиков температур в точках конструкции при этом регистрировались в непрерывном режиме. В течение 120 мин температуры в точках измерения постоянно повышались, однако за период измерений не достигли установившихся значений. Для их определения была проведена экстраполяция, и таким образом определены температуры насыщения для каждой исследуемой точки.

При сравнении полученных в эксперименте результатов измерения температуры термодатчиками с результатами теплового моделирования с помощью системы АСОНИКА было установлено, что погрешность тепловой модели находится в пределах 1,4-7,4% (точность термодатчиков 0,5°С). Авторы статьи солидарны с мнением Президента Российской Федерации Владимира Владимировича Путина, подчеркивающего, что России «некогда принохиваться к теме, к проблеме» и нужно активно работать над развитием новых технологий.

[<https://riafan.ru/1194363-putin-prizval-aktivno-rabotat-nad-novymi-tekhnologiyami> (Дата обращения: 12.07.2021)].

Заключение

1. Разработана методика и алгоритм построения тепловой модели ЛГ, обеспечивающие проведение компьютерного моделирования ЛГ в два этапа: 1-й этап – макромоделирование ЛГ с использованием подсистемы АСОНИКА-Т, 2-й этап – элементное моделирование каждого ПУ ЛГ – с использованием подсистемы АСОНИКА-ТМ.

2. Проведено компьютерное моделирование ЛГ по предложенной методике. При этом на 1-м этапе моделирования получены средние температуры частей и ПУ ЛГ, а

также воздушных полостей внутри ЛГ, на 2-м этапе – температуры на каждом ЭК.

3. Проведена оценка соответствия полученных коэффициентов тепловых нагрузок ЭК заданным предельно допустимым значениям 0,8. В результате моделирования с помощью системы АСОНИКА было обнаружено, что при температуре окружающей среды +60°С на печатном узле ЛГ имеются избыточно теплогруженные ЭК, у которых коэффициент тепловой нагрузки превышает 0,8. Также было установлено, что некоторые ЭК работают при повышенных температурах (до +100°С), что, как известно, приводит к увеличению интенсивности отказов. Таким образом, при дальнейших разработках ЛГ следует принять меры по снижению тепловых нагрузок на эти ЭК, что позволит повысить надежность и качество ЛГ.

4. В работе проверены работоспособность методики и алгоритма в процессе проектирования реального ЛГ и проведена оценка точности моделирования экспериментально с помощью термодатчиков, размещенных в 15 точках конструкции, соответствующих вершинам графа. При сравнении полученных в эксперименте результатов измерения температуры термодатчиками с результатами теплового моделирования с помощью системы АСОНИКА было установлено, что погрешность тепловой модели находится в пределах 1,0-7,8%.

5. Результатами работы подтверждено, что тепловое моделирование с помощью системы АСОНИКА создает возможность контроля тепловых нагрузок при проведении исследований работы ЛГ, имитируя различные режимы рабочей эксплуатации. Таким образом, используя моделирование, удастся сократить расходы на проведение многочисленных испытаний и доработки прибора, а значит повысить экономическую эффективность разработок и производства ЛГ. Дополнительный выигрыш в стоимости обеспечивает применение отечественной системы АСОНИКА вместо дорогостоящих и требующих адаптации к отечественной элементной базе и стандартам зарубежных компьютерных программ теплового моделирования.

6. Разработанная методика обладает хорошей универсальностью и может быть применена к виртуальному компьютерному моделированию с помощью системы АСОНИКА при проектировании сложных киберфизических приборов.

7. Продолжение исследований будет направлено на развитие применяемого метода моделирования, а также на определение экономических показателей повышения эффективности выполнения проектов по разработке новых приборов в случае применения автоматизированных систем моделирования.

Литература

1. Abaturov V.V., Savelyev I.I.; Skopin C.A. Thermal model of Zeeman ring laser // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2019), Prague, Czech Republic.
2. Aldham C. Five Common Misconceptions about Thermal Design. 2017. <https://thermalconference.com>.
3. Belov A., Soloveva T. Intellectual Ring Laser Quality Control System – Key Component of Ring Lasers Science-Based Production // 20th International Conference KES-2016 on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems (York, England, September 4-7 2016). *Procedia Computer Science: Vol. 96*. Amsterdam: Elsevier B.V., pp. 456-464.

4. *Belov A., Vnukov A., Soloveva T.* Complex education program “Project Seminar” to meet today and tomorrow needs of fast developing optical-electronic industry // ISSE 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Red Hook, USA: IEEE Computer Society, pp. 1-7.
5. *Cook B.* Slashing PCB Design Cycle Time Using Real-time PCB Thermal Analysis Tools. 2017. <https://thermalconference.com>.
6. *Cheng H.C., Yu C.Y., Chen W.H.* An Effective Thermal-mechanical Modeling Methodology for Large-scale Area Array Typed Packages // Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2005, vol. 7, no. 1, pp. 1-17.
7. *Chirkin M.V., Klimakov V.V., Ulitenko A.I., Molchanov A.V.* Passive controlling of a temperature field inside strapdown inertial navigation system // Proceedings of 18th S-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, S-Pb, Russia, 30 May-1 June, 2011. pp. 122-124.
8. *Kandalov P.I., Madera A.G.* Mathematical and computing modeling of temperature fields in electronic modules // Proc 16th Intern. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC). IEEE. Barcelona, Spain, October 6-8, 2010.
9. *Kofanov Yu.N.* Theoretical basement of designing, technology and reliability of radioelectronic devices. Moscow: Radio i svyaz. 1991. 360 p. (in Russian)
10. *Kofanov Yu.N.* Automated system ASONIKA in designing of radioelectronic devices. Moscow: MIEM NRU HSE. 2012. 58 p. (in Russian)
11. *Kofanov Y.N., Sotnikova S.Y., Lemanskiy D.* Method of computer modelling accuracy increase for electronic means based on interconnection of different physical processes proceeding, in: Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific-practical conference. / Ed. by S. U. Uvaysov. Part 2. Moscow: HSE. 2014, pp. 616-620.
12. *Kofanov Y.N., Vinokurov Y.A., Sotnikova S.Y.* Optoelectronic Devices' Thermal Working Modes Providing Method // 2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2019), Prague, Czech Republic. 2019.
13. *Kuznetsov E. Kolbas Y., Kofanov Y., Kuznetsov N., Soloveva T.* Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation // ICCES'2019 International Conference on Computational&Experimental Engineering and Sciences (Tokyo, Japan, 24-28 March, 2019). Conference Abstract. Co-sponsored by Tech Science Press, 2019. ID:5268.
14. *Kuznetsov E., Kolbas Y., Kofanov Y., Kuznetsov N., Soloveva T.* Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation. In: Okada H., Atluri S. (eds) Computational and Experimental Simulations in Engineering // ICCES 2019. Mechanisms and Machine Science, vol 75. Springer, Cham. Pp.295-300.
15. *Li Geng, Zhang Pengfei, Wei Guo, Xie, Yuanping, Yu Xudong, Long Xingwu.* Multiple-Point Temperature Gradient Algorithm for Ring Laser Gyroscope Bias Compensation // Sensors (Basel). 2015 Dec; 15 (12): 29910-29922.
16. *Li J., Ma Y., Xiyuan Ch.* Error Modeling, Calibration, and Non-linear Interpolation Compensation Method of Ring Laser Gyroscope Inertial Navigation System // Abstract and Applied Analysis. Vol.2013, Hindawi Publishing Corp., Article ID 359675. 2013. Pp.1-7.
17. *Liu D.S., Chen Y.W.* (Application of a new infinite element method for free vibration analysis of thin plate with complicated shapes. In: Okada H., Atluri S. (eds) Computational and Experimental Simulations in Engineering // ICCES 2019. Mechanisms and Machine Science, vol 75. Springer, Cham. 2020. Pp. 295-300.
18. *Man L., Man E.* Electro-thermal analogies for temperature calculation // Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). (Tratanska Lomnica, Slovakia, 11-15 May, 2011).IEEE. Pp. 358-362.
19. *Lukyanov D., Filatov Yu., Golyaev Yu., Kuryatov V., Soloveva T.* et al. 50th Anniversary of the Laser Gyro // 20th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2013, St. Petersburg. P. 36-49.
20. *Madera A.G.* The concept of mathematical and computer simulation of thermal processes in electronic systems // Software&Systems. №4 (112). 2015. Pp.79-86.
21. *Miyazaki N., Ikeda T.* Application of Computational Mechanics to Reliability Studies of Electronic Packaging. Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC X), Aug.21-23, 2006. Hainan, China. Tsinghua University Press&Springer.
22. *Naveen S., Siva Rama Krishna A., Konayya D., Gupta M.K., Rambabu K.* Modeling and Analysis of Monolithic Tri-Axial Ring Laser Gyro // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 3, issue 9. 2013. Pp.145-148.
23. *Okada H., Liu C., Ninomiya T., Fukui Y., Kumazawa N.* Analysis of particulate composite materials using an element overlay technique, CMES: Computer Modeling in Engineering&Sciences, vol.6. №4. 2004. Pp. 333-348.
24. *Raja B., Praveenkumar V., Leelaprasad M., Manigandan P.* Thermal Simulations of an Electronic System using Ansys Icepak // Int. Journal of Engineering Research and Applications, vol.5, issue 11, (Part-1). 2015. Pp.57-68.
25. *Shalumov A.S., Kofanov Yu.N., Uvaysov S.U.* et al. Automated system ASONIKA for modeling of physical processes in radioelectronic devices with considering of outer influences. Moscow: Radiotekhnika. 2013. 424 p. (in Russian)
26. *Shafic S.I., Velez G., Toro C., Sanin C., Szczerbicki E.* Designing Intelligent Factory: Conceptual Framework and Empirical Validation. ISSE 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology. Red Hook, USA: IEEE Computer Society. 2-17. Pp. 1801-1808.
27. *Stroganov A., Zhadnov V., Poleskii S.* Review of software complexes for reliability calculation of complicated technical systems // Components and technologies. № 5. 2007. Pp. 183-190.
28. *Sukhanov V.O., Kukartsev V.V.* Actuality of CALS-technologies application at the engineering enterprises of Russia // Actual problems of aviation and cosmonautics, volume 1, № 7. 2011. C. 466-467.
29. *Udalov A.I.* Thermal designing of radioelectronic devices. Moscow: MIREA. 2007. 211 p. (in Russian)
30. *Yovanovich M.M.* Four decade of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics // IEEE Trans. CPMT, 28. 2005. Pp. 182-206.

FEATURES OF THE USE OF COMPUTER MODELING TOOLS FOR IMPROVING THE MANUFACTURING PROCESSES OF LASER GYROSCOPES

Evgeny V. Kuznetsov, JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh";
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia, bereg@niipolyus.ru

Dmitry N. Ermakov, Peoples' Friendship University of Russia;
JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia, dermakow@mail.ru

Oleg E. Samusenko, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia, samusenko@rudn.ru

Yuri D. Golyaev, JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

Tatyana I. Solovyeva, JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh";
Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Nikita E. Kuznetsov, JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

Abstract

The article discusses ways to improve the quality and economic efficiency of the development and production of complex innovative electronic devices, which include laser gyroscopes (LG). The problems that arise when ensuring reliable operation of the LG in a wide temperature range, associated with the dense layout of the device, are described. The theoretical principles and mathematical apparatus that are used in the construction of thermal models of triaxial LG with electronics are considered in detail. The developed algorithm for constructing a thermal model of the LG is presented, which provides for a step-by-step unbundling (zooming) procedure. The process of modeling LG using the ASONIKA system is described, the constructed thermal model of LG is presented, as well as the thermal field of one of the printed nodes of LG. The detected heat-loaded electronic components are indicated. The results of experimental verification of the simulation accuracy by means of real measurement of temperatures in the model nodes by thermal sensors are presented, which confirmed the reliability of thermal modeling using the ASONIKA system. It is emphasized that the cost of manufacturing and testing of LG is quite high. Therefore, the task of finding ways to reduce the cost at the stages of development and production of LG while ensuring the improvement of the quality and reliability of manufactured devices is extremely relevant. Accurate thermal modeling at the early stages of development is an effective way to solve this problem due to cost savings on testing and redesign, as well as due to the use of an inexpensive domestic computer modeling system ASONIKA.

Keywords: laser gyroscope, computer thermal modeling, electrothermal analogies method, step-by-step scaling (zooming) method, finite difference method, grid method, graph method.

References

1. V.V. Abaturon, I.I. Savelyev, C.A. Skopin (2019). Thermal model of Zeeman ring laser, *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2019)*, Prague, Czech Republic.
2. A. Aldham (2017). Five Common Misconceptions about Thermal Design. <https://thermalconference.com>.
3. A. Belov, T. Soloveva (2016). Intellectual Ring Laser Quality Control System – Key Component of Ring Lasers Science-Based Production. *20th International Conference KES-2016 on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems* (York, England, September 4-7 2016). *Procedia Computer Science*: Vol. 96. Amsterdam: Elsevier B.V., pp. 456-464.
4. A. Belov, A. Vnukov, T. Soloveva (2017). Complex education program "Project Seminar" to meet today and tomorrow needs of fast developing optoelectronic industry. *ISSE 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology*. Red Hook, USA: IEEE Computer Society, pp. 1-7.
5. B. Cook (2017). Slashing PCB Design Cycle Time Using Real-time PCB Thermal Analysis Tools. <https://thermalconference.com>.
6. H.C. Cheng, C.Y. Yu, W.H.Chen (2005). An Effective Thermal-mechanical Modeling Methodology for Large-scale Area Array Typed Packages. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. 1-17.
7. M.V. Chirkin, V.V. Klimakov, A.I.; Ulitenko, A.V. Molchanov (2011). Passive controlling of a temperature field inside strapdown inertial navigation system. *Proceedings of 18th S-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, S-Pb, Russia, 30 May-1 June, 2011. pp. 122-124.
8. P.I. Kandalov, A.G. Madera (2010). Mathematical and computing modeling of temperature fields in electronic modules. *Proc 16th Intern. Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*. IEEE. Barselona, Spain, October 6-8, 2010.
9. Yu.N. Kofanov (1991). Theoretical basement of designing, technology and reliability of radioelectronic devices. Moscow: Radio i svyaz. 360 p. (in Russian)
10. Yu.N. Kofanov (2012). Automated system ASONIKA in designing of radioelectronic devices. Moscow: MIEM NRU HSE. 58 p. (in Russian)
11. Y.N. Kofanov, S.Y. Sotnikova, D. Lemanskiy (2014). Method of computer modelling accuracy increase for electronic means based on interconnection of different physical processes proceeding, in: *Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific-practical conference*. / Ed. by S. U. Uvaysov. Part 2. Moscow: HSE, pp. 616-620.
12. Y.N. Kofanov, Y.A. Vinokurov, S.Y. Sotnikova (2019). Optoelectronic Devices' Thermal Working Modes Providing Method. *2019 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED 2019)*, Prague, Czech Republic.
13. E. Kuznetsov, Y. Kolbas, Y. Kofanov, N. Kuznetsov, T.Soloveva (2019). Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation. *ICCES'2019 International Conference on Computational&Experimental Engineering and Sciences* (Tokyo, Japan, 24-28 March, 2019). Conference Abstract. Co-sponsored by Tech Science Press. ID:5268.
14. E. Kuznetsov, Y. Kolbas, Y. Kofanov, N. Kuznetsov, T. Soloveva (2020). Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation. In: Okada H., Atluri S. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering. ICCES 2019. Mechanisms and Machine Science*, vol 75. Springer, Cham. P. 295-300.

15. Li Geng, Zhang Pengfei, Wei Guo, Xie Yuanping, Yu Xudong, Long Xingwu (2015). Multiple-Point Temperature Gradient Algorithm for Ring Laser Gyroscope Bias Compensation. *Sensors* (Basel). 2015 Dec; 15 (12): 29910-29922.
16. J. Li, Y. Ma, Ch. Xiyuan (2013). Error Modeling, Calibration, and Nonlinear Interpolation Compensation Method of Ring Laser Gyroscope Inertial Navigation System. *Abstract and Applied Analysis*. Vol. 2013, Hindawi Publishing Corp., Article ID 359675. P.1-7.
17. D.S. Liu, Y.W. Chen (2020). Application of a new infinite element method for free vibration analysis of thin plate with complicated shapes. In: Okada H., Atluri S. (eds) *Computational and Experimental Simulations in Engineering. ICCES 2019*. Mechanisms and Machine Science, vol 75. Springer, Cham. P. 295-300.
18. L. Man, E. Man (2011). Electro-thermal analogies for temperature calculation. *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*. (Tratanska Lomnica, Slovakia, 11-15 May, 2011). IEEE. P. 358-362.
19. D. Lukyanov, Yu. Filatov, Yu. Golyaev, V. Kuryatov, T. Soloveva, et al. (2013). 50th Anniversary of the Laser Gyro. *20th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. ICINS 2013*, St. Petersburg. P. 36-49.
20. A.G. Madera (2015). The concept of mathematical and computer simulation of thermal processes in electronic systems. *Software&Systems*. No.4 (112). Pp. 79-86.
21. N. Miyazaki, T. Ikeda (2006). Application of Computational Mechanics to Reliability Studies of Electronic Packaging. *Computational Methods in Engineering and Science (EPMESC X)*, Aug.21-23, 2006. Hainan, China. Tsinghua University Press&Springer.
22. S. Naveen, A. Siva Rama Krishna, D. Konayya, M.K. Gupta K. Rambabu (2013). Modeling and Analysis of Monolithic Tri-Axial Ring Laser Gyro. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 3, issue 9. Pp. 145-148.
23. H. Okada, C. Liu, T. Ninomiya, Y. Fukui, N. Kumazawa (2004). Analysis of particulate composite materials using an element overlay technique, *CMES: Computer Modeling in Engineering&Sciences*, vol.6. No. 4. Pp. 333-348.
24. B. Raja, V. Praveenkumar, M. Leelaprasad, P. Manigandan (2015). Thermal Simulations of an Electronic System using Ansys Icepak. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, vol.5, issue 11, (Part-1). Pp. 57-68.
25. A.S. Shalumov, Yu.N.Kofanov, S.U. Uvaysov, et al. (2013). Automated system ASONIKA for modeling of physical processes in radioelectronic devices with considering of outer influences. Moscow: Radiotekhnika. 424 p. (in Russian)
26. S.I. Shafic, G. Velez, C.Toro, C. Sanin, E. Szczerbicki (2017). Designing Intelligent Factory: Conceptual Framework and Empirical Validation. *ISSE 2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology*. Red Hook, USA: IEEE Computer Society. Pp. 1801-1808.
27. A. Stroganov, V. Zhadnov, S. Poleskii (2007). Review of software complexes for reliability calculation of complicated technical systems. *Components and technologies*. No. 5. Pp. 183-190.
28. V.O. Sukhanov, V.V. Kukartsev (2011). Actuality of CALS-technologies application at the engineering enterprises of Russia. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. Vol. 1. No. 7. Pp. 466-467.
29. A.I. Udalov (2007). Thermal designing of radioelectronic devices. Moscow: MIREA. 211 p. (in Russian).
30. M.M. Yovanovich (2005). Four decade of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics. *IEEE Trans. CPMT*, 28. Pp. 182-206.

Information about authors:

Evgeny V. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh"; Head of the Center of NTI "Photonics" of the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Dmitry N. Ermakov, Doctor of Political Sciences, Doctor of Economics, Candidate of Historical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Master of Technical Sciences, Professor of the Department of Innovation Management in Industries of the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia; Chief Researcher of the Scientific and Technical Department of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

Oleg E. Samusenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Department of Innovation Management in Industries of the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Yuri D. Golyaev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of IPK-470 of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia

Tatyana I. Solovyeva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading researcher of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh"; Associate Professor of the Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

Nikita E. Kuznetsov, postgraduate student of JSC "Research Institute" Polyus "named after M. F. Stelmakh", Moscow, Russia