

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Е.В. Кузнецов, Ю.Д. Голяев, Ю.Ю. Колбас, Н.Е. Кузнецов, Ю.А. Винокуров, Т.И. Соловьева (АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха»), Ю.Н. Кофанов (НИУ «Высшая школа экономики»), Д.Н. Ермаков, О.Е. Самусенко (Инженерная академия Российского университета дружбы народов)

Тепловое моделирование на ранних стадиях проектирования лазерных гироскопов (ЛГ), работающих в широком диапазоне температур, позволяет снизить общие затраты за счет заметной экономии расходов на многократные лабораторные испытания разрабатываемого прибора и его переконструирование из-за перегрева. В статье приводится разработанный алгоритм построения тепловой модели сложных компактных трехосных ЛГ с электроникой, предусматривающий процедуру поэтапного разукрупнения. Описан процесс моделирования ЛГ с помощью отечественной компьютерной системы АСОНИКА, представлена построенная тепловая модель ЛГ. Приведены результаты экспериментов, подтвердившие высокую точность моделирования.

Ключевые слова: лазерный гироскоп, компьютерное моделирование, метод электротепловых аналогий, метод конечных разностей, метод сеток, метод графов, метод масштабирования.

### Введение

Рассматриваемый в данной работе трехосный лазерный гироскоп (ЛГ) является сложным электронным прибором (ЭП), состоящим из трех лазерных датчиков (He-Некольцевых 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 разработки и производства ЛГ с одновременным обеспечением высокого качества и надежности выпускаемых приборов является крайне актуальной.

Экономическая эффективность и качество новой техники закладываются на стадиях научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР). 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 рассматривается возможность повышения надежности ЛГ и экономической эффективности их разработки и производства за счет практически полного устранения необходимости переконструирования 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 построения тепловых моделей ЛГ для заданного диапазона температурных воздействий.

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. 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 [1].

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

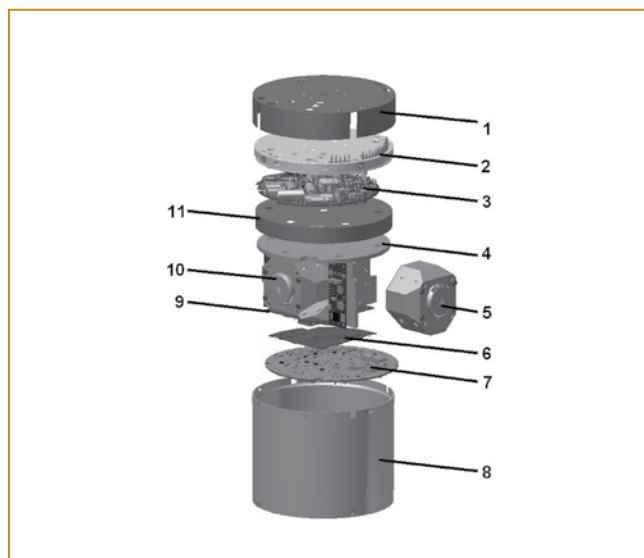


Рис. 1. Составные части компоновки лазерного гироскопа, где 1 – крышка внешнего кожуха-экрана; 2 – диск с контактами-штырьками; 3, 6, 7, 9 – печатные узлы; 4 – несущий каркас; 5, 10 – датчики; 8 – внешний кожух-экран; 11 – внутренний экран

эксплуатации. При этом уровень температуры в ряде случаев является решающим фактором, ограничивающим эксплуатационные характеристики ЭП [2].

В нашей работе рассматриваются 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.

Цель работы – 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. В данной работе продолжаются исследования, начатые в [3, 4], с целью построения полной завершенной тепловой модели ЛГ и ее экспериментальной проверки.

Для теплового моделирования выбирается отечественный программный комплекс – автоматизированная система обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА (Россия, <https://asonika-online.ru/>), которая много лет широко применяется на отечественных 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 программными комплексами время, затрачиваемое на создание моделей, благодаря наличию баз данных отечественных ЭК и конструктивно-технологических стандартов [5 - 7]. Использование АСОНИКА позволяет реализовать современные методы проектирования ЭП, основанные на CALS-технологиях. 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.

Базовые методы, используемые при компьютерном моделировании с помощью АСОНИКА: метод электротепловых аналогий, метод поэтапного укрупнения, метод конечных разностей, метод сеток, метод графов. Метод электротепловых аналогий дает возможность в случае трудностей с определением искомого параметра 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. Важно, что инженеру-электронщику гораздо легче представить тепловые

процессы, пользуясь привычными для него терминами, схожими с терминами электротехники. При моделировании мы будем использовать метод поэтапного масштабирования, при котором анализ объекта моделирования проводится с последовательным увеличением степени дискретизации, то есть с ростом пространственного разрешения всего объекта или его частей, что обеспечивает повышение точности моделирования.

#### Особенности поведения ЛГ при тепловых воздействиях

Трехосный малогабаритный ЛГ [8] 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. На рис. 1 приведена типовая конструкция ЛГ.

#### Унификации тепловых и электрических процессов

Тепловое моделирование ЛГ осуществляется с использованием принципа электротепловой аналогии, который требует унификации топологических моделей на основе математических описаний разнородных физических процессов. Такая унификация приведена в табл. 1. Она позволяет сделать более понятной методике проведения анализа тепловых процессов в ЛГ и расчета выходных параметров модели – значений температуры частей и компонентов ЛГ.

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 и параметры электрических и тепловых моделей приведены в первом столбце табл.1. Функциональными величинами описываются, прежде всего, входные/выходные сигналы. Первые задаются перед моделированием или в процессе моделирования, 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  $\varphi$  и  $\psi$ .

Формулы, приведенные в нижней строке табл. 1, иллюстрируют единообразие математических

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, $\varphi$	Электрический потенциал узла электрической схемы, $\varphi$	Температура изотермической области конструкции, $T$
Переменная функциональная величина ветви модели, $\psi$	Ток ветви электрической схемы, $I$	Тепловой поток между изотермическими областями (мощность тепловыделения), $P_T$
Диссипативный параметр ветви, $\alpha$	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), $\beta$	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), $\gamma$	Индуктивность (ток возрастает при постоянной разности потенциалов), $L_E$	Тепловая индуктивность (конвективный тепловой поток возрастает в переходном процессе между изотермическими областями), $L_T$
$\alpha(\varphi_1 - \varphi_2) = \psi$	$G_E(\varphi_1 - \varphi_2) = I$	$G_T(T_1 - T_2) = P_T$

уравнений разнородных электрических и тепловых процессов и уравнения в унифицированной форме.

Отметим, что важнейшими параметрами являются температура, тепловой поток (мощность тепловыделения) и тепловая проводимость.

**Этапы построения тепловых моделей лазерных гироскопов**

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

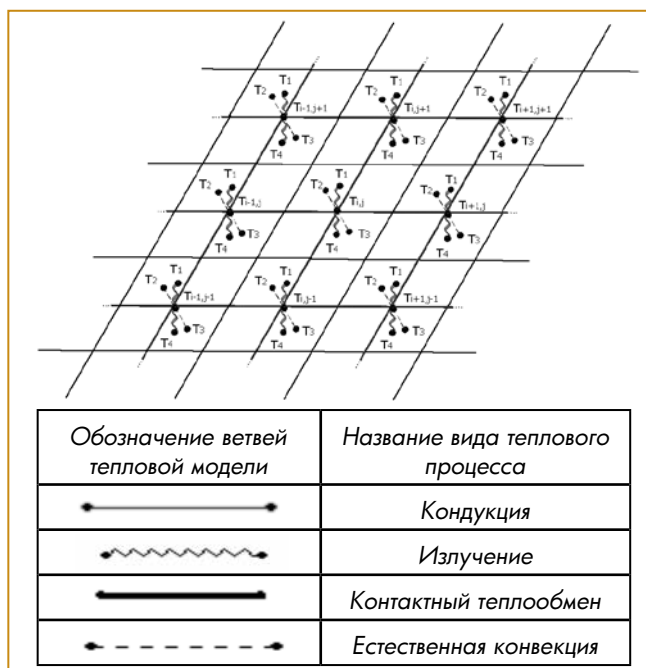


Рис. 2. Общий вид части тепловой модели печатного узла:  $T_{i,j}, T_{i-1,j}, T_{i+1,j}, T_{i,j-1}, T_{i,j+1}$  – температуры в узлах сетки,  $i$  и  $j$  – номера узлов сетки по осям  $x$  и  $y$ ,  $T_1, T_4$  – температуры деталей конструкции ЛГ над и под печатным узлом;  $T_2, T_3$  – температуры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

Построение тепловой модели ЛГ, отражающей эти процессы, происходит в два этапа:

- 1) макромоделирование ЛГ с использованием подсистемы АСОНИКА-Т,
- 2) поэлементное моделирование каждого ПУ ЛГ с использованием подсистемы АСОНИКА-ТМ.

Обе подсистемы построены на основе уравнений классической теории теплообмена.

На первом этапе мы осуществляем макромоделирование ЛГ путем разбиения 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.

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». 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

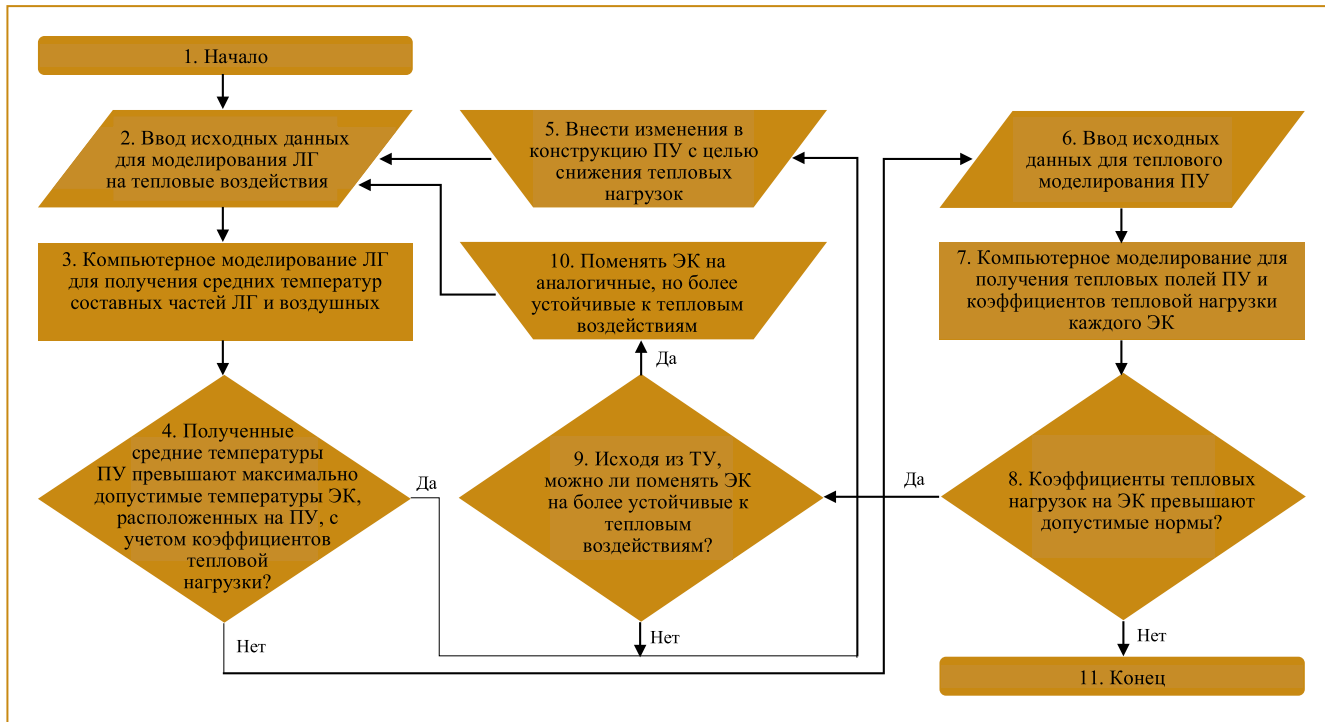


Рис. 3. Алгоритм поддержания режимов работы лазерных гироскопов в пределах допустимых тепловых нагрузок, реализуемый с помощью подсистем АСОНИКА-Т (блоки 1-4) и АСОНИКА-ТМ (блоки 6-8, 11)

памяти компьютера оказывается недостаточным или вычисления будут слишком медленными и длительными. Отметим важное преимущество МКР по сравнению с МКЭ: МКР характеризуется относительной простотой решающего алгоритма и его программной реализации. По этим причинам в АСОНИКА используется тепловое моделирование на основе МКР.

На рис. 2 приведен пример участка графа (сетки) для ПУ при наличии всех видов теплообмена, а также обозначения ветвей графа в зависимости от вида тепловой проводимости, соответствующей данной ветви.

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

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.

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 подсистемы АСОНИКА-ТМ температуры всех ЭК данного ПУ.

#### Алгоритм поддержания 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.

Принимая во внимание важность влияния тепловых процессов на работоспособность ЭК, мы разработали алгоритм поддержания режимов работы лазерных гироскопов в пределах допустимых по техническим условиям (ТУ) тепловых нагрузок (рис. 3).

Отметим, что АСОНИКА создает возможность контроля тепловых нагрузок при проведении исследований работы ЭП, имитируя различные режимы работы эксплуатации, выдавая выходные данные по температуре как частей ЭП, так и всех ЭК в виде таблиц, в которых указаны заданные и фактические коэффициенты тепловой нагрузки и приведена оценка соответствия или превышения заданных значений.

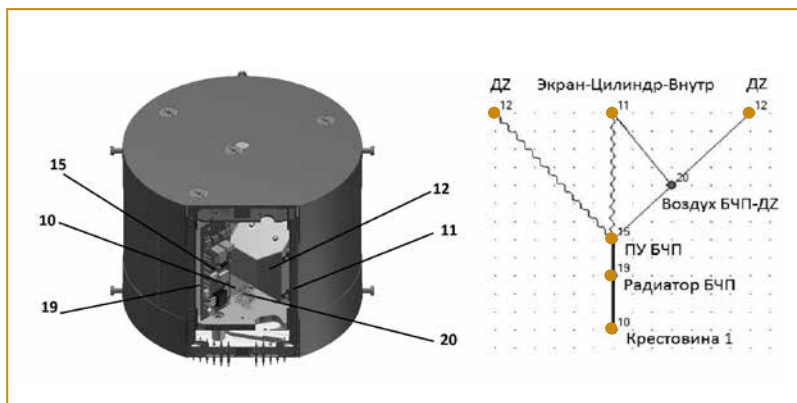


Рис. 4. Эскиз зоны внутреннего объема лазерного гироскопа и фрагмент его тепловой модели, где части прибора – узлы графа, соединенные ветвями с соответствующим видом теплопередачи: 10 – вертикальная часть несущего каркаса («крестовина 1»); 11 – внутренний цилиндрический экран; 12 – датчик оси Z (ДЗ); 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)

В алгоритме отражен предложенный двухэтапный метод моделирования «сверху вниз» или метод разукрупнения: 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  $k_i^T$  рассчитывается по следующей формуле:

$$k_i^T = T_i^Ф / T_i^{TV}, i=1, \dots, n,$$

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

#### Тепловое макро-моделирование лазерного гироскопа

При двухэтапном компьютерном моделировании ЛГ с помощью АСОНИКА на первом этапе проводилось макро-моделирование ЛГ следующим образом: прибор разбивался 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, имеющихся в ЛГ, что позволяет 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) из баз данных подсистемы АСОНИКА-Т и технических условий.

Для пояснения процесса моделирования на рис. 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).

На рис. 5 представлена полная модель тепловых процессов в ЛГ, построенная в подсистеме АСОНИКА-Т. В качестве входных данных мы вводили значения температуры окружающей среды, мощности тепловыделений датчиков и всех ПУ, просуммировав мощности тепловыделений расположенных на них ЭК. В левом нижнем углу рис. 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 – значения температуры частей конструкции, всех ПУ, датчиков.

Отметим, что топологическая модель, представленная на рис. 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 температуры в узлах модели ЛГ. В нашей модели было 27 узлов. В самом неблагоприятном случае – при температуре окружающей среды  $60^\circ\text{C}$  температуры большинства частей ЛГ оказались в диапазоне  $70...80^\circ\text{C}$ , но температуры двух ПУ достигли  $92^\circ\text{C}$  и  $94^\circ\text{C}$ , что не превышает допустимые максимальные значения 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.

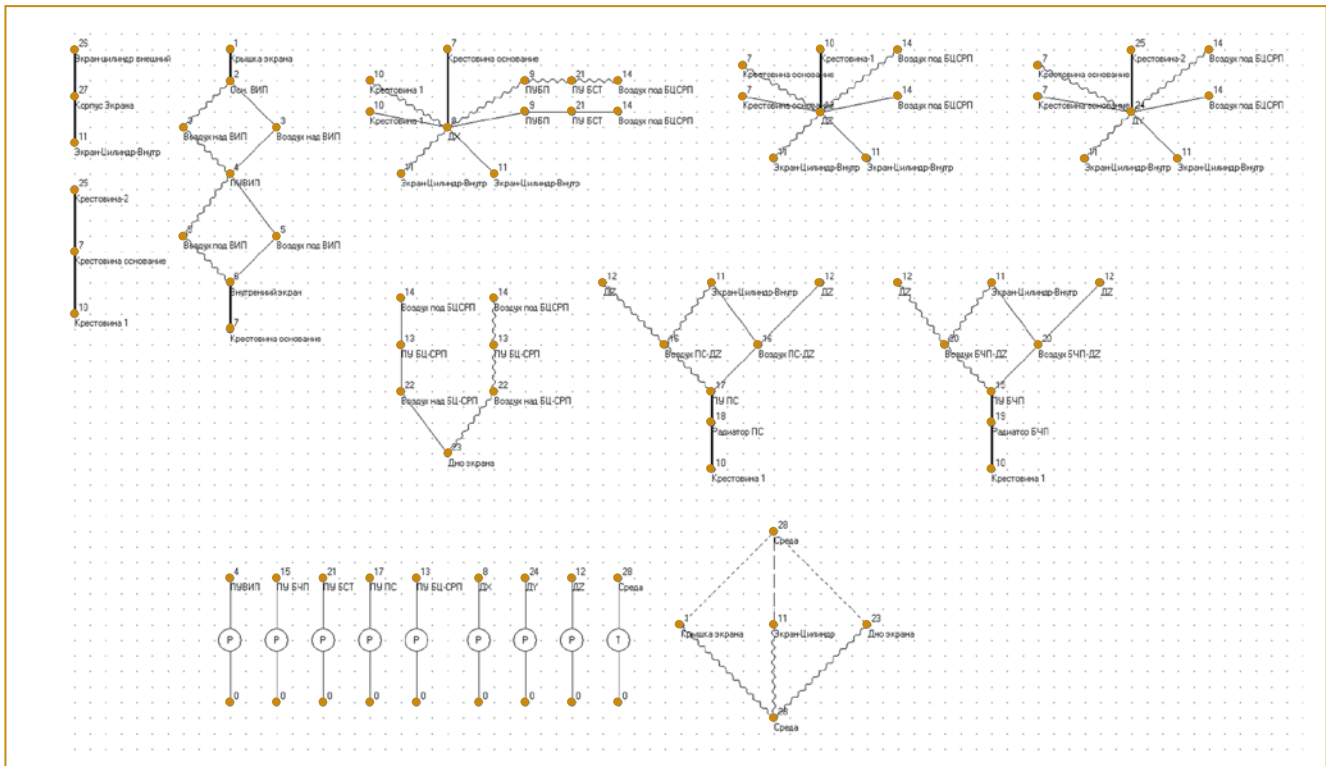


Рис. 5. Топологическая модель тепловых процессов в лазерном гироскопе, построенная с помощью АСОНИКА-Т

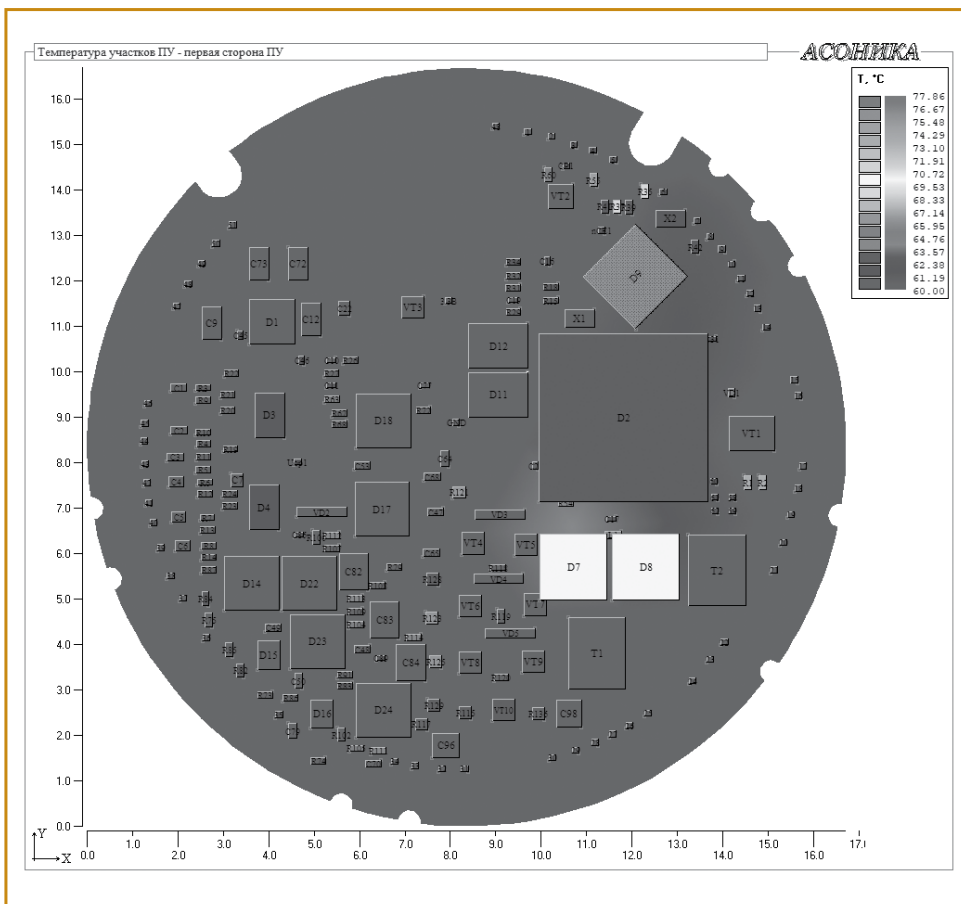


Рис. 6. Тепловое поле печатного узла ЛГ в АСОНИКА-ТМ после моделирования тепловых процессов с индикацией температуры каждого ЭК

### Моделирование тепловых режимов в печатных узлах лазерного гироскопа

На втором этапе моделирования в соответствии с принципом разукрупнения мы перешли к моделированию каждого ПУ в отдельности с целью определения значений температуры всех установленных на нем ЭК. При этом мы пользовались подсистемой АСОНИКА-ТМ, в которой автоматически строится сетка — ненаправленный граф на основе МКР (рис. 2).

Далее приводятся результаты моделирования одного из ПУ ЛГ — цифрового блока. Он является удачным выбором для иллюстрации результатов моделирования из-за большого числа установленных на нем ЭК: около 350 интегральных схем, транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов размещены с двух сторон ПП.

Таблица 2. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

Название части конструкции, на которую установлен термодатчик	Температура, °С		Разность температур при моделировании и при эксперименте, °С	Погрешность моделирования, %
	Результат моделирования	Результат измерения		
Микроконтроллер цифрового блока	75,8	78,0	2,2	2,8
ПЛИС на цифровом блоке	87,9	85,1	2,8	3,3
Печатная плата цифрового блока	78,8	78,0	0,8	1,0
Резистор на цифровом блоке	78,8	76,0	2,8	3,7
Нижняя плоскость корпуса	72,2	75,4	3,2	4,2
Транзистор стабилизатора тока	92,1	93,0	0,9	1,0
Воздух рядом с датчиком Z	82,3	84,1	1,8	2,1

На рис. 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.

На рис. 6 видно, что наиболее теплонагруженными являются ПЛИС D9 и диоды D7, D8 (на рисунке эти ЭК выглядят более светлыми). Несмотря на то, что по этим ЭК не зафиксировано превышение максимально допустимого коэффициента тепловой нагрузки, это требует особого внимания.

Среди всех ЭК этого ПУ превышение обнаружено у пяти резисторов (коэффициенты тепловой нагрузки в диапазоне 0,85...0,88), что составляет 1,4 % от общего числа ЭК.

Вместе с тем необходимо отметить, что при температуре внешней среды 60° С часть ЭК данного блока (примерно 10%) работают при повышенных температурах (до 100° С), 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 в диапазоне 20...80° С может привести к увеличению интенсивности отказов на порядок. Избыточно теплонагруженным является важный ЭК цифрового блока – ПЛИС: при температуре внешней среды 60° С температура ПЛИС по результатам моделирования составляет около 88° С, а по результатам натурального эксперимента

около 85° С, 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.

#### 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 табл. 2 приводятся результаты для наиболее теплонагруженных деталей, ПУ, ПП, ЭК.

В первую очередь мы размещали датчики в наиболее теплонагруженных местах конструкции. Были проведены

испытания, в которых прибор помещался в камеру теплохолода, где непрерывно работал на протяжении 120 мин при постоянной температуре в камере 60° С. Данные датчиков температуры в точках конструкции при этом регистрировались в непрерывном режиме. В течение 120 мин значения температуры в точках измерения постоянно повышались, однако за период измерений не достигли установившихся значений. Для их определения была проведена экстраполяция, и таким образом определились значения температуры насыщения для каждой исследуемой точки.

При сравнении полученных в эксперименте результатов измерения температуры термодатчиками с результатами теплового моделирования с помощью АСОНИКА было установлено, что погрешность тепловой модели в среднем составляет 3,4 % (точность термодатчиков 0,5° С).

#### 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 – поэлементное 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 значения температуры частей и ПУ ЛГ, а также воздушных полостей внутри ЛГ, на 2-м этапе – температура на каждом ЭК.

3. Проведена оценка соответствия полученных коэффициентов тепловых нагрузок ЭК заданным

предельно допустимым значениям 0,8. В результате моделирования с помощью АСОНИКА было обнаружено, что при температуре окружающей среды 60° С на печатном узле ЛГ имеются избыточно теплонагруженные 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 в среднем составляет 3,4 %.

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

6. Разработанная методика является универсальной и может быть применена при проектировании сложных киберфизических приборов.

#### Список литературы

1. *Удалов А.И.* Тепловое проектирование радиоэлектронных средств. Учебное пособие. — М.: МИРЭА, 2007 — 212 с.
2. *Мадера А.Г.* Концепция математического и компьютерного моделирования тепловых процессов в электронных системах // Программные продукты и системы. — 2015 — №4 (112) — С.79-86.
3. *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.
4. *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 — 2020 — vol. 75 — Springer, Cham — P.295-300.
5. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Т.1. / под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. — М.: Энергоатомиздат, 2007 — 367 с.
6. *Кофанов Ю.Н.* Моделирование и обеспечение надежности технических систем. — М.: Энергоатомиздат, 2011 — 319 с.
7. *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 — P. 616-620.
8. *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: Concern CSRI Elektropribor, JSC — P. 36-49.

**Кузнецов Евгений Викторович** — д-р техн. наук, проф., ген. директор АО «НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха»; руководитель Центра НТИ «Фотоника» Инженерной академии Российского университета дружбы народов (РУДН);

**Голяев Юрий Дмитриевич** — д-р техн. наук, начальник

НПК АО «НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха»;

**Колбас Юрий Юрьевич** — д-р техн. наук, зам. начальника АО «НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха»;

**Кузнецов Никита Евгеньевич** — аспирант АО «НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха»;

**Винокуров Юрий Андреевич** — начальник лаборатории

АО «НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха»; **Соловьева Татьяна Ивановна** — канд. техн. наук, доцент,

ведущий научный сотрудник АО «НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха», доцент Инженерной академии РУДН;

**Кофанов Юрий Николаевич** — д-р техн. наук, проф., проф. НИУ «Высшая школа экономики», ведущий научный

сотрудник АО «НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха»;

**Ермаков Дмитрий Николаевич** — д-р полит. наук, д-р эконом. наук, проф., магистр техн. наук, проф.

Департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности Инженерной академии РУДН,

главный научный сотрудник научно-технического отдела

АО «НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха»;

**Самусенко Олег Евгеньевич** — канд. техн. наук, доцент, директор Департамента инновационного

менеджмента в отраслях промышленности Инженерной академии РУДН.

E-mail: [momentmail@mail.ru](mailto:momentmail@mail.ru)