

УДК 621.515

## КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ВЫСОКОБОРОТНОГО ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА

В.Я. Геча, А.Б. Захаренко,  
И.А. Мещихин, В.А. Пинскер  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

*Рассматривается первый этап создания комплексной математической модели электромагнитных, тепловых и механических процессов новой конструкции высокооборотного электрогенератора. Приведены численные результаты электромагнитного, теплового и механического расчётов.*

**Ключевые слова:** космический буксир, высокооборотный электрогенератор, роторная система, математическая модель.

Полёты к планетам Солнечной системы, в том числе к Марсу, являются давней мечтой человечества. Для реализации этой задачи в настоящее время проводится разработка «космического буксира». Головной организацией является ФГУП «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша». ФГУП «НПП ВНИИЭМ» поручено создание системы электроснабжения.

Источником энергии для космического буксира служит ядерный реактор. Для питания электрореактивных двигателей космического буксира применяется высокооборотный электрогенератор, приводимый во вращение турбокомпрессорной системой с частотой вращения около 60 000 об/мин. При этой частоте электрическая мощность электрогенератора составляет 250 кВт, выпрямлённое напряжение электрогенератора должно составлять 4,5 кВ. На турбокомпрессорную систему и генератор воздействует значительная доза излучения от ядерного реактора. Поглощённая доза гамма-излучения составляет не менее 109 рад.

### Компоновка турбокомпрессорной системы и конструкция электрогенератора

Ряд зарубежных фирм (Capstone, Elliott, Honeywell, Ingersoll Rand (США), Bowman (Великобритания), Turbec (Швеция) потратили десятки лет и сотни миллионов долларов на создание оптимальных турбокомпрессорных систем общепромышленного назначения с открытым тепловым контуром для «малой» энергетики (мощностью до 1 МВт). В агрегатах Capstone turbine corporation генератор охлаждается потоком воздуха (газа), который затем подается в компрессор (рис. 1, а) [1, 2]. Технологии Capstone позволили добиться высокой надёжности и экономичности за счёт отсутствия в конструкции турбины трущихся частей и использования лепестковых газодинамических подшипников [1 – 3], технические решения Capstone Turbine Corporation защищены более чем ста патентами.

Следует отметить, что в системе Capstone торсион работает как гибкий элемент для механической «развязки» соединённых валов, а также в качестве большого теплового сопротивления (рис. 1, а).

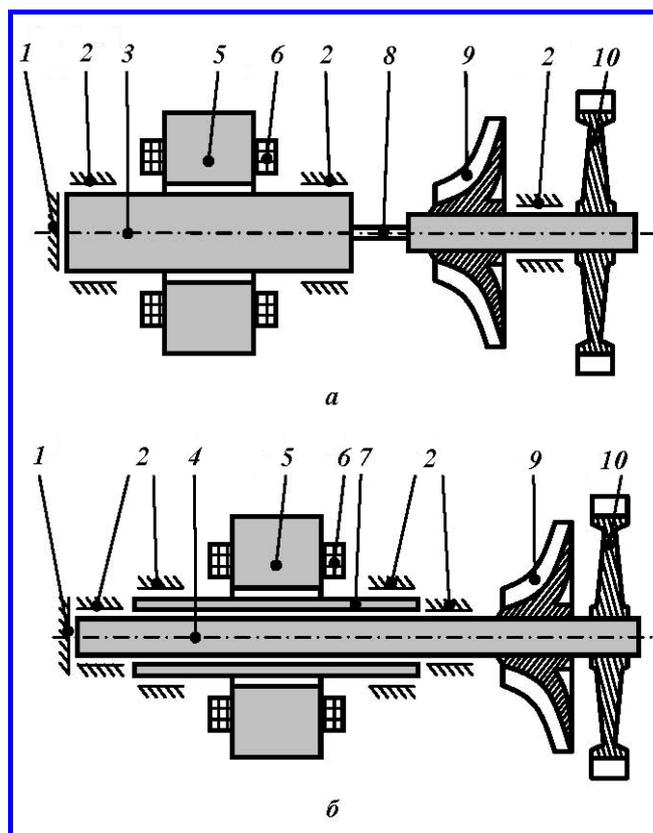


Рис. 1. Варианты компоновки турбокомпрессорной системы: а – один из традиционных – фирмы Capstone; б – вновь предлагаемый; 1 – упорный подшипник; 2 – опорный подшипник; 3 – ротор генератора; 4 – внутренний ротор генератора; 5 – сердечник статора генератора; 6 – обмотка статора генератора; 7 – внешний ротор генератора; 8 – торсион; 9 – компрессор; 10 – турбина

Поскольку циклограммой работы реактора космического буксира предусмотрены режимы прогрева и расхолаживания, генератор может длительно работать при частоте вращения меньше номинальной. В связи с этим к его ротору предъявляется требование «жёсткости», т. е. первая критическая частота вращения должна быть больше номинальной частоты вращения.

Отличительной особенностью вариантов компоновки турбокомпрессорной системы для космического буксира является наличие электромагнитной муфты, предназначенной для монтажа защитного экрана электрогенератора от воздействия высокой температуры гелий-ксеноновой смеси (1250°C), подаваемой под давлением 12 атм на лопасти турбины. Температура газовой смеси, подаваемой на компрессор и охлаждающей генератор, составляет 50°C.

Ниже рассмотрена конструкция роторной системы с консольным размещением турбины и компрессора на валу электрогенератора, при которой усилия воспринимают подшипники электрогенератора (рис. 1, б). Данная конструкция предназначена для увеличения жёсткости роторной системы, уменьшения её длины, массы и момента инерции. При этом роль теплового сопротивления между турбиной и электрогенератором играет воздушный зазор между внутренним и внешним роторами. Магнитоэлектрические машины обладают наилучшими массогабаритными показателями, поэтому возбуждение генератора осуществляется от постоянных магнитов. Постоянные магниты размещены во внешнем роторе генератора. Внутренним ротором электрогенератора является полый вал из магнитомягкой стали, имеющий число зубцов, равное числу магнитов внешнего ротора. Взаимодействие внешнего и внутреннего роторов осуществляется силой магнитного притяжения.

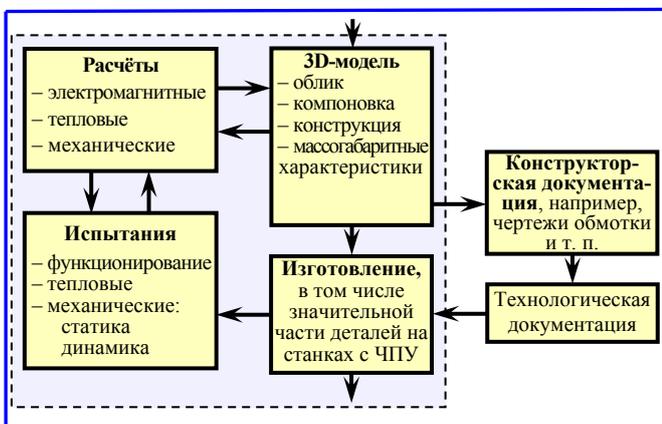


Рис. 2. Схема метода сквозного проектирования

Одной из частых причин отказов высоковольтных электрических машин является короткое замыкание в лобовых частях между фазами. В связи с этим в качестве обмотки статора выбрана дискретно распределённая трёхфазная обмотка статора с числом зубцов  $z = 9$  при числе пар полюсов ротора  $p = 3$ . В сочетании с применением радиационнстойкой пазовой изоляции слюдо-терм или микадур такое выполнение обмотки позволит исключить возможные короткие замыкания высоковольтной обмотки.

Сердечник статора, перемагничиваемый с частотой 3 кГц, может быть выполнен из высокочастотного нанокристаллического сплава с малыми удельными потерями («аморфной стали»). Технология шихтовки – нетрадиционная. Например при частоте 3 кГц и индукции 1 Тл удельные потери в собранном сердечнике составляют до 10 Вт/кг. Это позволяет получить высокий КПД генератора (до 97%) при относительно малых габаритах генератора и высокой надёжности обмотки якоря.

Предлагаемая конструкция электрогенератора является новой и поэтому требует особенно тщательного подхода к расчёту всех характеристик, в том числе теплового режима и первой критической частоты вращения вала.

Используемые во ВНИИЭМ программные средства позволяют в кратчайший срок разработать комплексную (мультифизичную) математическую модель генератора и провести оптимизацию конструкции генератора, в том числе проанализировать электромагнитное поле, тепловое поле, учитывающее собственные тепловые потери, а также теплообмен с турбиной, нагреваемой гелий-ксеноновой газовой смесью, собственные частоты колебаний ротора, усилия от центробежных сил, действующих на внешний ротор, аэродинамическое поле, обуславливающее механические потери.

Кроме того, желательно проанализировать радиационное поле, обусловленное ядерным реактором и космическими излучениями.

Решение поставленной задачи невозможно без применения современных электротехнических материалов, технологий и элементной базы электронных компонентов.

Разработка такой модели является составной частью метода сквозного проектирования [4] (рис. 2), используемого во ВНИИЭМ с целью сокращения времени между проведением расчётов и изготовлением изделия. Средой разработки исходной 3D-модели может являться, например, программное обеспечение SolidWorks.

### Математическая модель расчёта электромагнитного и теплового полей, резонансных частот вращения роторной системы

Для стационарного магнитного поля может быть записано уравнение Пуассона, описывающее магнитное поле в электрической машине для областей с токами [5]:

$$\nabla^2 \bar{A} = -\mu \bar{J},$$

в том числе в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \bar{A}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left( \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial z^2} = -\mu \bar{J},$$

а также уравнение Лапласа, описывающее магнитное поле в поперечном сечении электрической машины для областей без токов:

$$\nabla^2 \bar{A} = 0,$$

где  $\bar{A}$  – векторный магнитный потенциал;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\bar{J}$  – плотность тока;  $r$ ,  $\varphi$ ,  $z$  – координаты.

Уравнение Лапласа для стационарного теплового поля записывается аналогичным образом [6]:

$$\nabla^2 T = 0,$$

в том числе в цилиндрических координатах при осесимметричной задаче [ $T(\varphi) = \text{const}$ ]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где  $T$  – температура, К.

Согласно методу конечных элементов [7], в пределах каждого элемента искомая функция, например, векторный магнитный потенциал, аппроксимируется полиномом  $n$ -й степени координат. Число коэффициентов аппроксимирующего полинома равно числу узлов используемого конечного элемента. Полиномы и расположение узлов элемента должны быть такими, чтобы сохранилась непрерывность искомой функции вдоль границ

элемента. В матричной форме для линейной аппроксимации искомой функции уравнение конечного элемента имеет вид:

$$A(r, \varphi, z) = \{a\}^T \{x\}, \quad (2)$$

где  $\{a\}^T$  – транспонированный вектор-столбец коэффициентов полинома конечного элемента;  $\{x\}$  – вектор-столбец координат. Формула (2) преобразуется для выбранного конечного элемента в уравнение

$$\{A_e\} = [y] \{a\}, \quad (3)$$

где  $\{A_e\}$  – вектор-столбец векторных магнитных потенциалов в узлах элемента;  $[y]$  – матрица координат узлов элемента. После дальнейших преобразований уравнения (3) получаем уравнение конечного элемента:

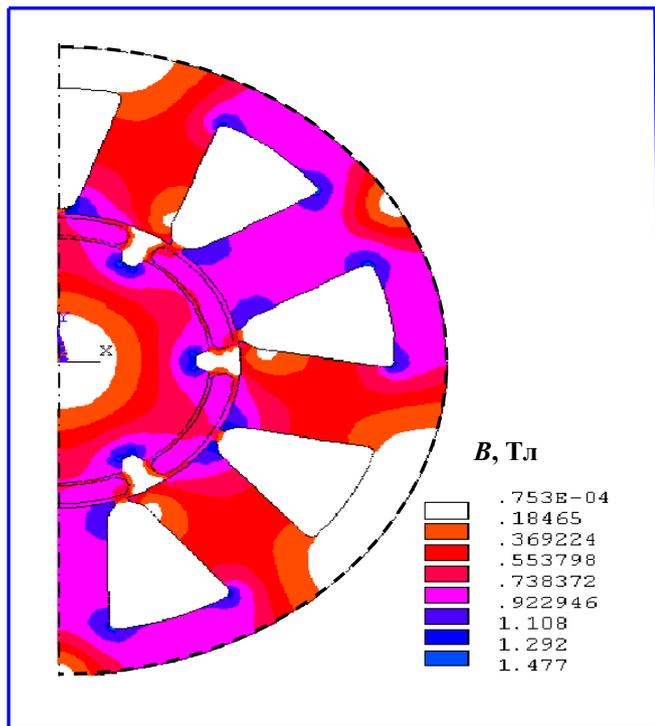
$$\bar{A}(r, \varphi, z) = \{\beta_e\}^T \{A_e\}, \quad (4)$$

где  $\{\beta_e\}^T$  – транспонированный вектор-столбец интерполяционных функций или функций формы конечного элемента, зависящих от координат узлов данного элемента. Интерполяционные функции  $\{\beta_e\}$  и узловые значения каждого элемента  $\{A_e\}$  представляют в общей для всей области расчёта системе координат при общей нумерации узлов и элементов. Для этого проводят упорядоченную сквозную нумерацию всех узлов и элементов. Аналогичное (4) уравнение может быть записано для всей расчётной области  $D$ :

$$\bar{A}(r, \varphi, z) = \{\beta\}^T \{A\}, \quad (5)$$

где  $\{\beta\}^T$  – транспонированный вектор-столбец интерполяционных функций для расчётной области  $D$ , зависящих от числовых значений координат узлов расчётной области;  $\{A\}$  – вектор-столбец векторных магнитных потенциалов в узлах расчётной области  $D$ . Система алгебраических уравнений для потенциалов всех узлов имеет вид:

$$[L] \{A\} = \{i\}, \quad (6)$$



**Рис. 3. Распределение магнитной индукции в поперечном сечении электрогенератора**

где  $[L]$  – матрица коэффициентов;  $\{i\}$  – вектор-столбец, определяемый сторонними источниками тока и граничными условиями с известными значениями потенциалов.

Система уравнений (6) решается с помощью любой стандартной процедуры, в результате чего находится распределение векторного потенциала  $\bar{A}$  (или температуры  $T$ ) в узлах, а по (4) и (5) и во всех элементах расчётной области  $D$ .

Уравнение механических напряжений для статического режима имеет вид аналогичный (6):

$$[K]\{U\} = \{f\}, \quad (7)$$

где  $[K]$  – матрица жёсткости;  $\{f\}$  – вектор сил;  $\{U\}$  – вектор механических перемещений.

Уравнение механических напряжений для динамического режима записывают следующим образом:

$$[M]\{U''\} + [C]\{U'\} + [K]\{U\} = \{f\}, \quad (8)$$

где  $[M]$ ,  $[C]$  и  $[K]$  – матрицы масс, демпфирования и жёсткости, а  $\{f\}$  – вектор приложенных сил. С

учётом гироскопических эффектов  $[G]$ , основное уравнение имеет вид

$$[M]\{U''\} + ([C] + [G])\{U'\} + [K]\{U\} = \{f\}. \quad (9)$$

Так как значения матрицы  $[G]$  зависят от частоты вращения, то и значения критических частот будут также функциями от частоты вращения.

Основное уравнение при нахождении собственных частот конструкции без демпфирования можно записать следующим образом:

$$[K]\{\phi_i\} = \omega_i^2 [M]\{\phi_i\}, \quad (10)$$

где  $[M]$  и  $[K]$  – матрицы жёсткости, а  $\{\phi_i\}$ ,  $\omega_i$  – собственный вектор и угловая частота.

Уравнения (7) – (10) решаются с применением стандартных математических методов. В результате находится распределение механических перемещений, а также собственные (резонансные) частоты колебаний.

### **Расчёт электромагнитного и теплового полей, а также поля механических напряжений**

Конечно-элементная модель электромагнитного расчёта построена как двумерная. При расчёте было принято, что направление наилучших магнитных свойств нанокристаллического сплава совпадает с направлением магнитного потока, что обеспечивается специальной технологией шихтовки. В качестве граничного условия принято, что на внешней границе, показанной на рис. 3 пунктирной линией,

$$\bar{A}_z = 0.$$

В результате расчёта магнитного поля (см. рис. 3) получена максимальная индукция в зубце 1 Тл, что допустимо для используемого нанокристаллического сплава при частоте 3 кГц. При этом суммарный КПД электрогенератора в номинальном режиме будет не менее 97%.

Наибольший интерес представляет тепловой расчёт роторной системы электрогенератора, где размещение турбины и компрессора выполнено на внутреннем роторе. Движение охлаждающего газа

обычно моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих законы сохранения массы, импульса и энергии при нестационарном пространственном течении, включая также и уравнение состояния. Однако для оценки установившегося температурного поля генератора достаточно ограничиться расчётом, согласно уравнению (1).

При построении расчётной модели приняты следующие граничные условия:

– на внешнем и внутреннем радиусах  $R$  ротора:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} + \alpha [T(R, z) - \Theta] = 0;$$

– на торцевых оконечностях расчётной модели:

$$\partial T / \partial z = 0,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\Theta$  – температура газовой струи, К.

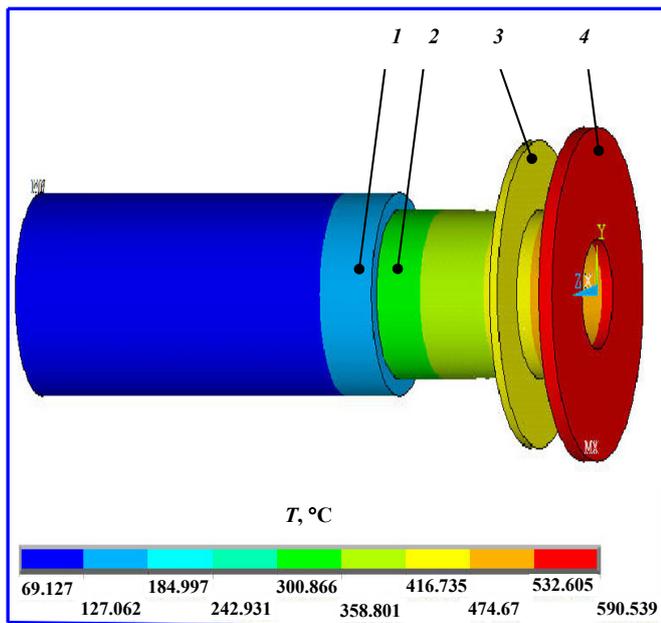


Рис. 4. Распределение температуры ротора электрогенератора: 1 – внешний ротор; 2 – внутренний ротор; 3 – компрессор; 4 – турбина

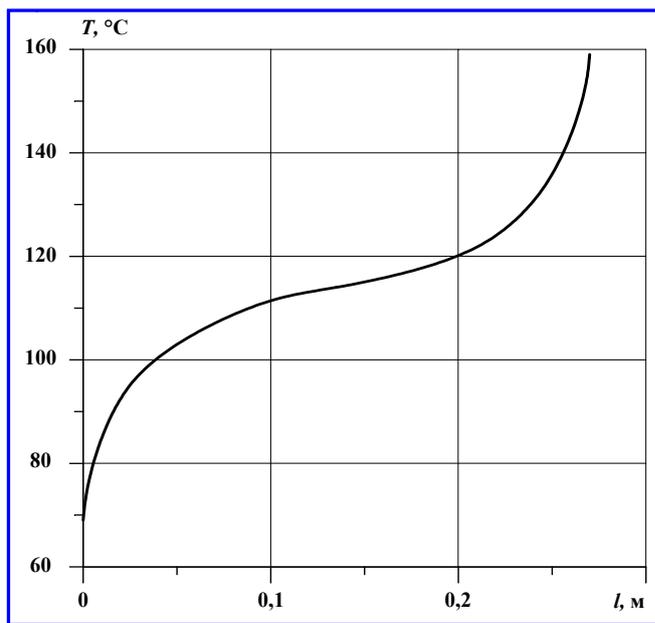


Рис. 5. Температурный профиль на внешней поверхности внешнего ротора

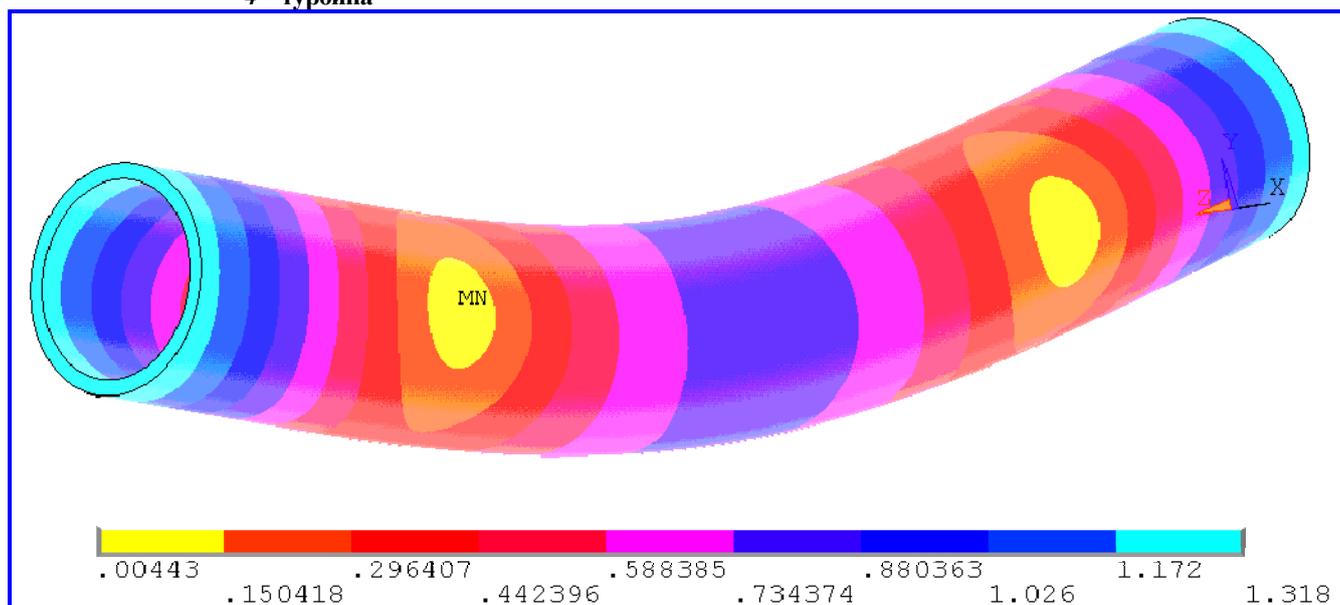
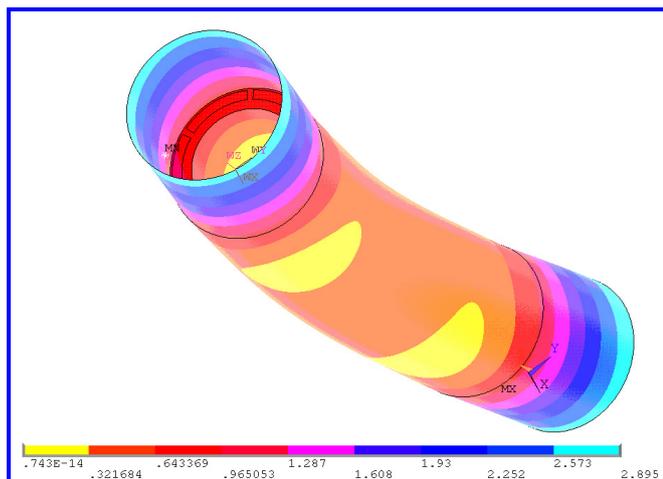


Рис. 6. Первая собственная форма колебаний внутреннего ротора при частоте 1266 Гц и распределение механических перемещений



**Рис. 7. Первая собственная форма колебаний внешнего ротора при частоте 2860 Гц и распределение механических перемещений**

Данные температуры обдува  $\Theta$ , измеренные в  $^{\circ}\text{C}$ :

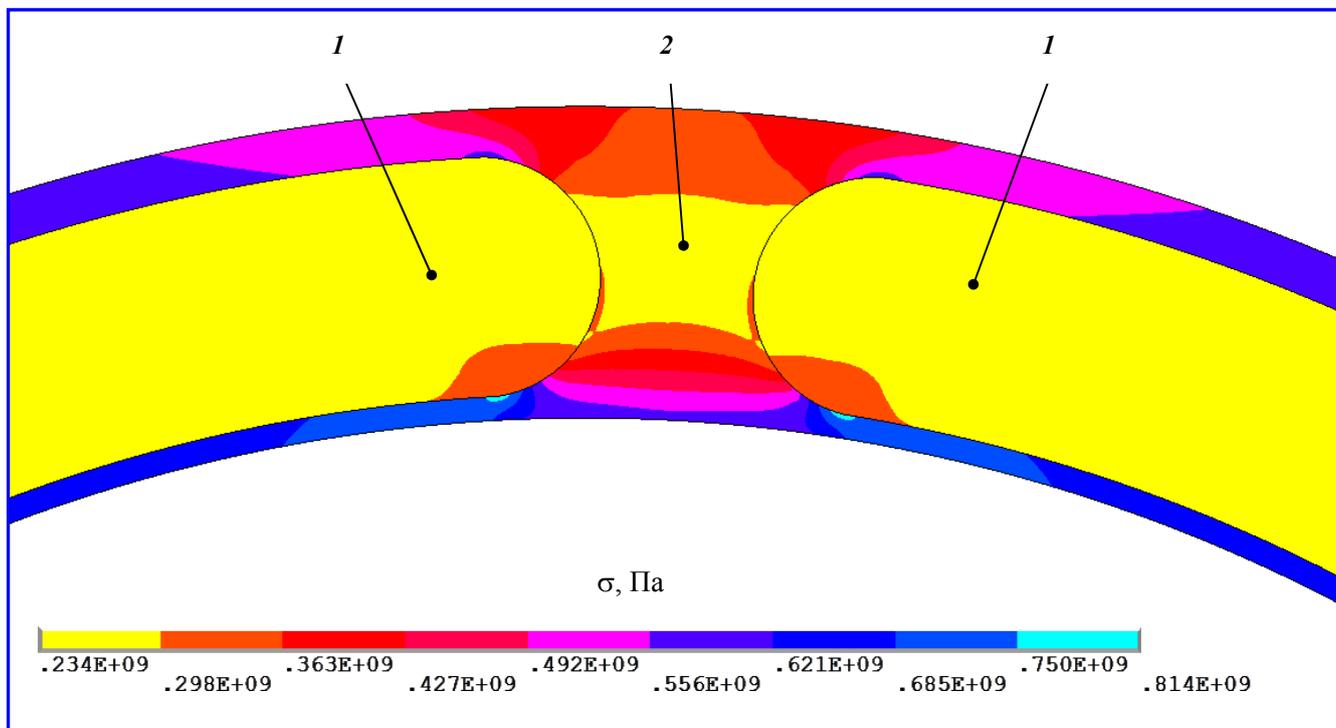
- для турбины – 1250;
- для компрессора – 50.

Распределение температуры в роторной системе электрогенератора представлено на рис. 4. Максимальная температура модели достигается на внешней поверхности турбины и составляет  $591^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 5 приведён температурный профиль на внешней поверхности внешнего ротора с магнитами, где  $l$  – осевая координата, отсчитываемая от левой оконечности внешнего ротора  $l$  на рис. 4.

Максимальная температура нагрева ротора составляет  $159^{\circ}\text{C}$  и является удовлетворительной для нормального функционирования магнитов из материала Nd-Fe-B с легирующими добавками, обеспечивающими рабочую температуру  $170 \div 180^{\circ}\text{C}$ .

Весьма важным является расчёт первой собственной частоты вращения каждого из роторов, поскольку она должна быть больше номинальной частоты вращения. При анализе было установлено, что первая резонансная частота внутреннего ротора с учётом насаженных на ротор колёс турбины и компрессора составляет 1266 Гц (рис. 6), а первая собственная частота колебаний внешнего ротора 2860 Гц (рис. 7), что больше механической частоты вращения ротора равной 1000 Гц. Для удобства обозрения формы колебаний роторов (см. рис. 6, 7) перемещения найдены с точностью до постоянного коэффициента, прогиб вала во много раз увеличен по сравнению с его действительным значением.



**Рис. 8. Картина механических напряжений наиболее нагруженного фрагмента конструкции внешнего ротора: 1 – постоянный магнит; 2 – материал бандажа**

### Основные размеры внешнего ротора

Толщина бандажа, мм	
– внешнего	1
– внутреннего	0,5
Высота постоянного магнита, мм	5
Длина активной части, мм	270

Таким образом, ограничение на величину низшей собственной частоты ротора, а именно отсутствие резонансных частот в диапазоне до 1 кГц (0 – 60 000 об/мин) выполнено.

Следует отметить, что при высоких скоростях вращения значительное влияние на величину собственных изгибных колебаний могут оказать гироскопические силы. Данный анализ можно осуществить с помощью диаграммы Кембелла. В результате проведенного расчёта было установлено, что в данной модели гироскопические силы не оказывают заметного влияния.

При расчёте центробежных усилий было выявлено, что наиболее нагруженным элементом конструкции является внешний ротор электрогенератора. Картина поля механических напряжений приведена на рис. 8.

Анализ показывает, что механические напряжения в бандаже внешнего ротора электрогенератора находятся в допустимых пределах. Параметры конечной системы были получены в результате итерационной оптимизации. Увеличение толщины бандажа ведёт к снижению максимальных напряжений с одной стороны, но к ухудшению электромагнитных свойств роторной системы и энергетических показателей генератора с другой. В результате проведения серии расчётов была найдена конфигурация, при которой удовлетворяются как электромагнитные, так и механические требования к конструкции ротора.

В рассмотренном случае

$$\sigma = 26,4 \text{ МПа} \ll [\sigma],$$

где  $[\sigma]$  – предел прочности, МПа.

Таким образом, максимальные напряжения в конструкции возникают во внешнем роторе, а наиболее опасным с точки зрения значений критических частот является внутренний вал,

имеющий наименьшую изгибную жёсткость. Наличие численной модели позволило осуществить комплекс расчётов конструкции на прочность и собственные частоты при различных параметрах, таких как длина валов, внутренние и внешние диаметры. Анализ полученных решений позволил сформировать конструкцию, которая удовлетворяет поставленным требованиям.

Таким образом, проведённые электромагнитный, тепловой и механический расчёты показали удовлетворительные результаты.

### Выводы

1. Создан первый этап математической модели электромагнитных, тепловых и механических процессов электрогенератора системы электроснабжения космического буксира. Модель позволит на этапе эскизного и технического проектов отработать требуемые характеристики электрогенератора и системы электропитания космического буксира в различных режимах работы.

2. При достаточно жёстких требованиях по внешним воздействующим факторам удалось предложить вариант электрогенератора с высоким КПД (до 97%). Первые резонансные частоты вращения роторной системы выше значения номинальной механической частоты. Конструкция электрогенератора удовлетворяет требованиям прочности, температура генератора находится в допустимых пределах.

### Литература

1. US Pat. 6,239,520. Permanent magnet rotor cooling system and method. Stahl D. A., Vessa P. B. Capstone turbine corporation. 29.05.2001.
2. WO 2005/046021. Rotor and bearing system for a turbomachine. D. Lubell, D. Weissert. Capstone turbine corporation. 19.05.2005.
3. Пожидаев В. У. Микрогазотурбинные электрогенераторы – новое направление в малой энергетике / В. У. Пожидаев // Академия энергетика. – М., 2005. – № 4 (06). – С. 26 – 33.
4. Каверин В. В., Пугач И. Ю. Применение современных методов при проектировании и отработке прочности малого космического аппарата / В. В. Каверин, И. Ю. Пугач // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 109. – № 2. – С. 21 – 27.
5. Брынский Е. А. Электромагнитные поля в электрических машинах / Е. А. Брынский, Я. Б. Данилевич, В. И. Яковлев. – Л. : Энергия, 1979. – 176 с. : ил.

6. Бухгольц Ю. Б. Основы аэродинамических и тепловых расчётов в электромеханике : учебное пособие для студентов вузов / Ю. Б. Бухгольц, В. А. Тюков, Т. В. Честюнина. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2008. – 196 с. : ил.

7. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева; предисловие Шадского А. С. – М. : Книжный дом «Либроком», 2009. – 272 с. : ил.

*Поступила в редакцию 05.07.2011*

**Владимир Яковлевич Геча**, д-р техн. наук, главный конструктор,  
начальник отдела, т. (495) 365-26-69.

**Андрей Борисович Захаренко**, д-р техн. наук, зам. начальника отдела, т. (495) 366-26-44.

**Илья Александрович Мецихин**, инженер.

**Виктор Александрович Пинскер**, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник.

E-mail: [vniiem@vniiem.ru](mailto:vniiem@vniiem.ru), т. (495) 366-33-61.