

4. Копылов Ю.М. Тенденции развития и потенциал системы местного самоуправления. – Владивосток, 2002. – 74 с.
5. Борисов А.Н., Крумберг О.А., Федоров И.А. Принятие решений на основе нечетких моделей. – Рига: Зинатне, 1990. – 180 с.
6. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 368 с.: ил.

Захарова Александра Александровна

ст. преподаватель кафедры ИС Юргинского технологического института
Томского политехнического университета
Телефон: (384-51) 6 49 42
Эл. почта: zaharova@list.ru

Мицель Артур Александрович

д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления ТУСУРа
Телефон: (3822) 41 31 57
Эл. почта: e-mail maa@asu.tusur.ru

A.A. Zacharova, A.A. Mitsel

Model of the integrated estimation of strategic development of city

The model of an integrated estimation of social and economic development of city as an element of strategic planning is offered. Methods of the theory of fuzzy sets are used. It is given an example uses of model on the data of the city of Yurga.

УДК 621.365.5

С.К. Земан, С.Н. Владимиров, Е.В. Крохмаль, А.В. Крахмаль

Программный комплекс анализа температурных полей, наведенных индукционными источниками

Обсуждается разработанный авторами программный комплекс для исследования тепловых и деформационных процессов в композиционных твердотельных объектах, нагреваемых индукционными источниками. Прикладная направленность предлагаемой системы связана с компьютерным моделированием и оптимизацией технологических процессов сборки-разборки узлов и механизмов, сопрягаемых посредством горячей посадки.

1. Введение

Напряженные посадки давно вошли в практику машиностроения. Они имеют важное значение при решении целого ряда технических вопросов. Их давно применяют в машиностроении и станкостроении, на железнодорожном транспорте, при проектировании артиллерийских систем и в других областях техники. На практике напряженные соединения деталей в основном осуществляются разными способами [1]. Один из них — предварительный нагрев наружной детали, в результате чего ее размеры по поверхности контакта увеличиваются и она может быть легко соединена с внутренней деталью. Наиболее современным и высокотехнологичным средством проведения операций по сборке узлов и механизмов, сопрягаемых посредством горячей посадки, является высокочастотный индукционный нагрев. Этим способом можно осуществить не только сборку, но и разъединение сопряженных деталей — путем интенсивного нагрева наружной детали, при котором температура внутренней детали остается неизменной.

С помощью индукционного нагрева не всегда удается разъединить детали, иногда возможно лишь уменьшение их напряженного состояния, что позволяет снизить усилие пресса. В случае неправильно спроектированного индуктора можно получить обратную ситуацию, т.е. увеличение усилия пресса. Исходя из этого, особого внимания при разработке такого

оборудования заслуживает индукторная система. Спроектировать индуктор для разъединения деталей сложнее, чем для сопряжения, так как при сопряжении деталей достаточно лишь нагреть наружную деталь до установленной температуры, а в случае разъединения нагрев наружной детали необходимо осуществить таким образом, чтобы максимально уменьшить напряженное состояние, которое зависит от нестабильных во времени тепловых полей.

На практике встречаются задачи съема тел сложной конфигурации, причем подведение индуктора зачастую возможно лишь в ограниченной области. Например, при расформировании колесных пар грузовых вагонов расположить индуктор можно лишь с внешней стороны. В этом случае нельзя оценить положительный эффект от того или иного расположения как самого индуктора, так и его витков, поэтому единственный способ проверить правильность выбранного решения — проведение натурального эксперимента. Экспериментальные исследования обычно требуют значительных материальных и временных затрат и не всегда позволяют определить даже направление поиска. Следовательно, задача компьютерного моделирования процессов нагрева и оптимизации индукторной системы для разъединения деталей на начальных этапах проектирования является чрезвычайно актуальной.

Коммерческие программные комплексы моделирования тепловых полей не позволяют решать поставленные задачи. Поэтому перед разработчиками ФГНУ «НИИ АЭМ» была поставлена задача разработать программный комплекс, позволяющий производить следующие операции:

- 1) моделирование теплового поля при индукционном нагреве;
- 2) моделирование деформаций, возникающих в области соприкосновения деталей при полученном тепловом поле;
- 3) моделирование усилия, необходимого для разъединения деталей;
- 4) поиск оптимального профиля мощности индукторной системы, предназначенной для разъединения сопряженных деталей.

Далее в работе рассмотрена математическая модель, на базе которой построен комплекс, представлена его структура и некоторые программы. Также описана реализация некоторых промышленных образцов при использовании комплекса.

2. Математическая модель

Для реализации программного комплекса необходимо наличие математических моделей поглощения электромагнитного поля средой и распространения теплового поля, а также модель перемещения материальных точек объектов при неравномерном тепловом поле. Первые две модели рассмотрены в [2, 3, 4]. Последняя, ввиду ее отсутствия в открытой печати, была предложена авторами в [5], на ее базе построено несколько целевых функций, адекватно отражающих особенности задачи. Одна из них основывается на оценке усилия пресса, другая — на основе свертывания системы неравенств. Исходя из материалов перечисленных источников, ниже приведены основные их результаты.

2.1. Математическая модель динамики теплового поля

Будем считать, что исследуемые объекты, сопряженные горячей посадкой, являются цилиндрическими и обладают осевой симметрией ($\partial/\partial\varphi = 0$). С учетом этого уравнение теплопроводности, преобразованное для использования в технических расчетах сложных объектов, в неоднородной изотропной среде в цилиндрической системе координат r, φ, z принимает вид

$$\frac{\partial\Theta}{\partial t} = \frac{1}{\gamma c} \left[\left(\frac{\partial\lambda}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} \right) \frac{\partial\Theta}{\partial r} + \lambda \frac{\partial^2\Theta}{\partial r^2} + \frac{\partial\lambda}{\partial z} \frac{\partial\Theta}{\partial z} + \lambda \frac{\partial^2\Theta}{\partial z^2} + \frac{P(r, z, t)}{V_n} - \left(\frac{\alpha S_T}{V_T} + \frac{\varepsilon \sigma S_L}{V_L} \Theta^3 \right) \Theta \right], \quad (1)$$

где Θ — температурный напор, т.е. превышение температуры нагреваемого объекта над температурой окружающей среды; t — текущее время нагрева; γ, c, λ — соответственно плотность нагреваемого вещества, его теплоемкость и коэффициент теплопроводности; $P(r, z, t)$ — мощность, приходящая в точку с заданными координатами; V_n — объем нагреваемого тела; α — коэффициент теплопередачи между средами; V_T — объем излучающего тела; S_T — площадь излучающей поверхности; ε — коэффициент, характеризующий степень черноты тела (0...1); $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана — Больцмана; V_L — объем излучающего тела; S_L — площадь излучающей поверхности.

Параметры уравнения (1) в общем случае зависят от координат и температур, поэтому соответствующее уравнение является нелинейным неоднородным дифференциальным уравнением в частных производных, для его решения необходимо применять численные методы. Сложность границ нагреваемого объекта, кусочная неоднородность его физических характеристик, их зависимость от времени и температуры, а также многообразие форм и профилей мощности индукторов обуславливают постановку адекватных граничных условий при формулировании краевой задачи.

2.2. Математическая модель изменения геометрии сопряженных тел при неравномерном температурном поле

Рассмотрим типичный для практики случай разъединения двух осесимметричных деталей, соединенных горячей посадкой с использованием высокочастотного индукционного нагрева (рис. 1).

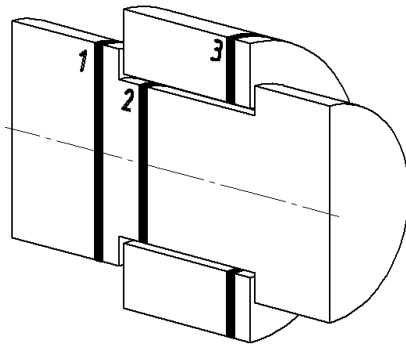


Рис.1 – Осесимметричные детали, объединенные способом термической посадки: 1,2,3 — типичные положения элементарных колец

Индуктор, положение которого может быть произвольным в допустимой области, создает в нагреваемых объектах неравномерное температурное поле, определяемое при известном профиле мощности источника электромагнитного излучения путем решения уравнения теплопроводности (1) с соответствующими граничными условиями.

Под воздействием тепла, выделяющегося за счет протекания индукционных токов, в нагреваемых объектах развиваются температурные напряжения, приводящие к деформации деталей. В силу неоднородности теплового поля и сложной формы деталей поставленная задача не может быть решена аналитически. В этом случае удобно получать решения, разбивая нагреваемые объекты на элементарные участки — тонкие кольца, внутренний диаметр которых может быть и равен нулю. Толщина этих колец должна быть выбрана из условия возможности пренебрежения неравномерностью температурного поля в продольном направлении.

В этом случае необходимо учитывать неравномерность теплового поля только в радиальном и азимутальном направлениях.

На рис. 1 представлены три типичных положения таких элементарных колец. Первое из них соответствует случаю, когда внутренняя деталь предоставлена сама себе и не подвергается механическому воздействию со стороны внешней детали. Второе возможное состояние возникает, когда элементарное кольцо подвержено механическому воздействию внешнего объекта. Третье состояние реализуется для внешней детали, подверженной давлению со стороны внутренней детали.

Деформация при неравномерном температурном поле рассчитывается соответственно для первого, второго и третьего типа колец по следующим формулам:

$$U_1(R_1) = \frac{2\alpha_1}{R_1} \int_0^{R_1} r\Theta(r)dr; \quad (2)$$

$$U_2(R_1) = \frac{2\alpha_1}{R_1} \int_0^{R_1} r\Theta(r)dr - (1 - \mu_1)R_1 \frac{P_k}{E_1}; \quad (3)$$

$$U_3(R_1) = -\frac{R_1}{R_2^2 - R_1^2} \left\{ \frac{P_k}{E_2} \left[(1 - \mu_2)R_1^2 + (1 + \mu_2)R_2^2 \right] + 2\alpha_2 \int_{R_1}^{R_2} r\Theta(r)dr \right\}, \quad (4)$$

где E — модуль Юнга; μ — коэффициент Пуассона; $\Theta(r)$ — температура в точке с радиусом r ; R — радиус детали; α — коэффициент теплового расширения; P_k — давление в зоне контакта двух деталей; индекс 1 соответствует внутренней детали, 2 — наружной. При известном температурном поле в представленных формулах остается неизвестным лишь давление в зоне контакта двух деталей, значение которого можно рассчитать по формуле

$$P_k = \frac{\frac{\Delta_0}{2R_1} + \frac{2\alpha_1}{R_1^2} \int_0^{R_1} r\Theta(r)dr - \frac{2\alpha_2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} r\Theta(r)dr}{\frac{(1-\mu_2)R_1^2 + (1+\mu_2)R_2^2}{(R_2^2 - R_1^2)E_2} + \frac{1-\mu_1}{E_1}}, \quad (5)$$

где Δ_0 — исходный натяг.

Приведенные формулы позволяют сформулировать условие беспрепятственного съема детали, а также рассчитать усилие пресса, необходимое для разъединения.

3. Программный комплекс «Термический анализ»

На основе представленной математической модели разработан программный комплекс «Термический анализ», функционирующий в операционной среде Windows. Программы комплекса реализованы с использованием COM-технологии, с помощью пакета Visual Studio.

Комплекс содержит:

- программу управления библиотеками материалов;
- программу «Нагрев»;
- программу локальной оптимизации профиля мощности индуктора;
- программу глобальной оптимизации профиля мощности индуктора.

На структурной схеме, представленной на рис. 2, отражено взаимодействие модулей между собой при использовании общих файлов. Программный комплекс работает с двумя типами файлов собственного формата: библиотекой материалов **.mtb* и файлом проекта **.htg*.

Библиотека материалов представляет собой файл, в котором содержится необходимая для моделирования информация о свойствах материалов. Для редактирования этих файлов разработана специальная программа управления.

Для проведения численного эксперимента изображение исследуемой конструкции готовится с помощью стандартных редакторов и сохраняется в формате *bmp*. В случае наличия готового чертежа конструкции можно произвести его сканирование и полученное изображение довести до необходимого вида. Каждое тело конструкции должно быть закрашено в определенный цвет (рис. 3, в). В цилиндрической системе координат рисунки следует рассматривать как сечение половины исследуемого объекта плоскостью, проходящей через ось симметрии. Этапы создания изображения конструкции показаны на рис. 3.

При создании нового проекта (файл **.htg*) с помощью программы «Нагрев» пользователю предлагается задать файл изображения конструкции, после чего он, выбирая необходимую, заранее подготовленную библиотеку материалов, задает соответствие *цвет — материал* и устанавливает дополнительные параметры.

Для расчета тепловых полей используется метод конечных разностей, а сетка реализуется в виде растрового изображения, каждая точка — узел с определенными свойствами. Поэтому особое внимание необходимо уделить заданию шага сетки, размеру одной точки изображения.

При построении исследуемой модели в программе «Нагрев» пользователю необходимо установить индуктор (несколько индукторов). Индуктор располагается по доступной, с точки зрения пользователя, поверхности детали. С помощью специальных средств его можно разбить на зоны (рис. 4). Считается, что внутри зоны выделяемая мощность распределена равномерно, а мощность разных зон может отличаться. Таким образом, задавая мощность зон, можно формировать профиль мощности индуктора.

Введя профиль мощности и время нагрева, выбрав соответствующий пункт меню, можно произвести моделирование нагрева (см. рис. 5, где результат нагрева представлен в виде изотермических линий). Далее можно оценить полученное температурное поле с точки зрения съема наружной детали, направление съема задается программным путем.

Очевидно, что для дальнейшей реализации модели необходимо получить оптимальный профиль мощности — такое распределение излучаемой мощности по поверхности нагреваемого тела, чтобы в течение определенного времени создавалось тепловое поле, при котором разъединение сопряженных деталей будет происходить с наименьшими усилиями вследствие развития температурных напряжений. Добиться этого результата возможно в

интерактивном режиме путем многократного изменения входных данных и проведения численного эксперимента. Такой процесс трудоемок и не гарантирует положительного результата. Поэтому необходимы программы оптимизации профиля мощности.

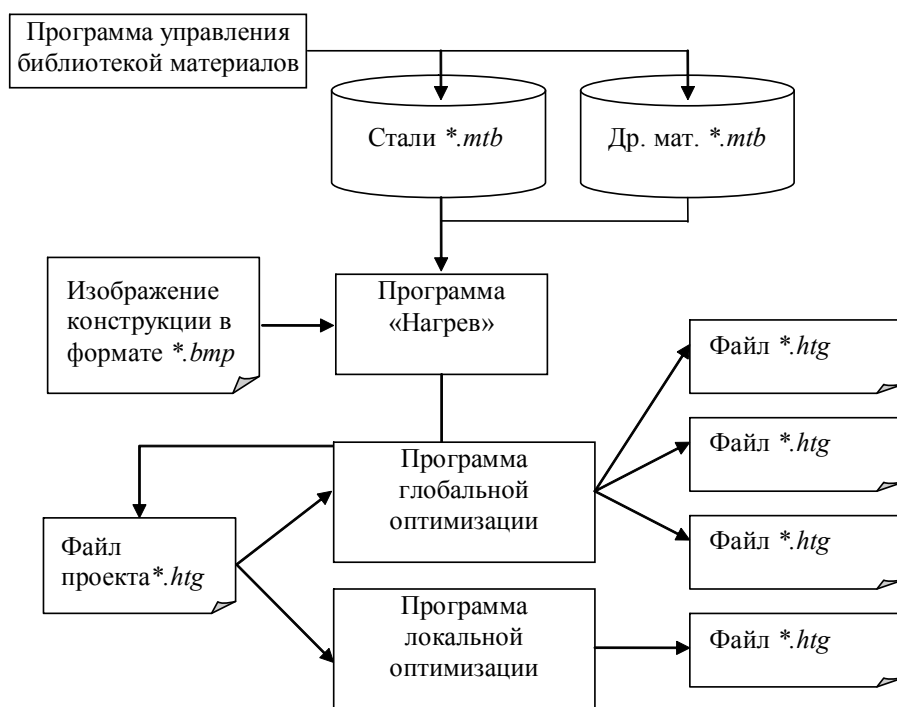


Рис. 2 — Структура программного комплекса «Термический анализ»

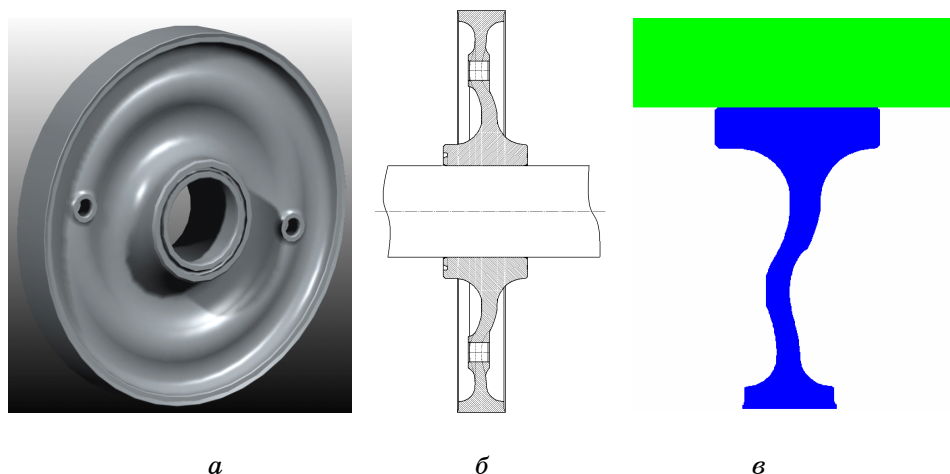


Рис. 3 — Этапы подготовки изображения конструкции

На вход программы оптимизации подается файл исследуемой модели **.htg* с подведенным, разбитым на зоны индуктором и его начальным профилем мощности. На выходе программы получается такой же файл, но с оптимальным профилем мощности индуктора в зависимости от выбранных ограничений и критерия оптимизации. В технических задачах всегда учитывается возможность существования нескольких локальных экстремумов, поэтому существует потребность в реализации метода глобального поиска. Реализовав разные методы поиска, мы предоставляем пользователю возможность их чередовать для достижения необходимого результата.

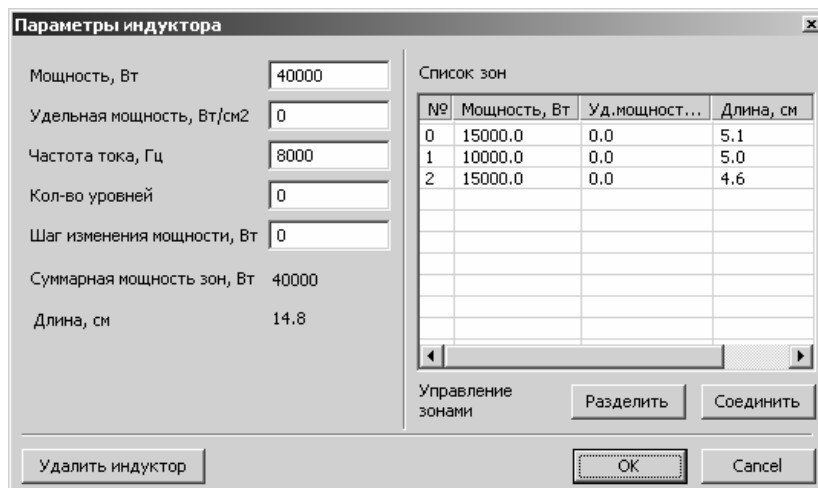


Рис. 4 — Настройки индуктора

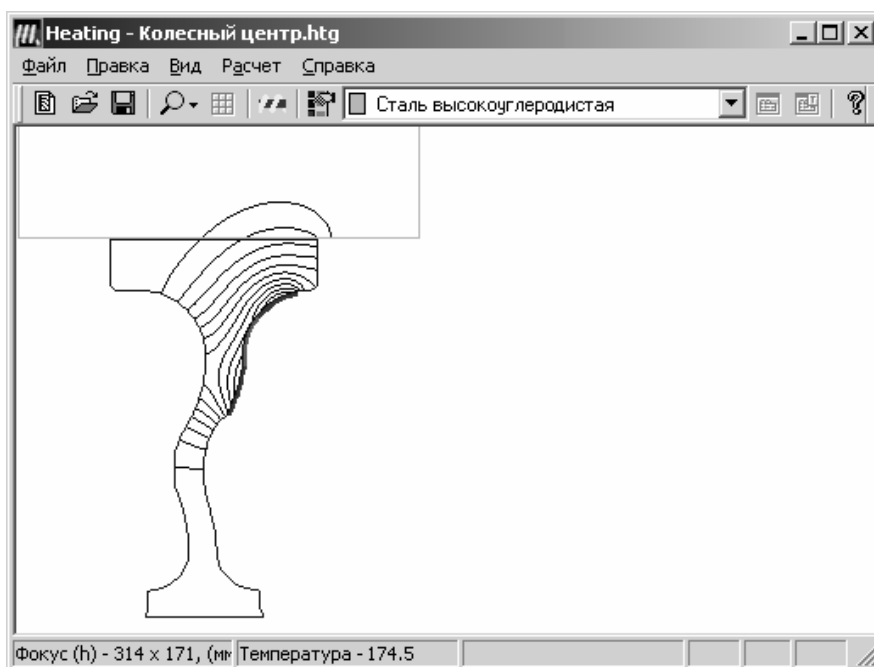


Рис. 5 — Экранная форма программы «Нагрев»

4. Разработка промышленных образцов

С помощью созданного программного комплекса находится оптимальный профиль мощности для каждого конкретного случая. По полученному профилю мощности охватываемая индуктором нагреваемая поверхность разбивается на ряд зон, в которых пропорционально величине мощности, излучаемой индуктором в каждой зоне, укладывается соответствующее количество витков.

Одним из примеров практической реализации результатов, полученных с помощью предлагаемой методики проектирования, является создание опытных образцов индукционно-нагревательных устройств для технологических комплексов по распрессовке с одновременным нагревом напряженно посаженных цельнокатаных колес, колесных центров и шестерен с оси колесной пары железнодорожных вагонов и локомотивов. Оптимальные профили мощности, излучаемые индукторами, позволили снизить в 3–5 раз прессовое усилие, исключив при этом возможность возникновения задир на шейке оси. Так, например, на опытных

испытаниях, проводимых в депо ВЧД – 15 Октябрьской ж/д г. Тосно и в вагонном депо «Узловая» Тульского отделения Московской ж/д, были расформированы так называемые «проблемные» колесные пары, которые не удавалось распрессовать усилием 250–300 кг/см². Усилие распрессовки таких колесных пар при одновременном нагреве не превышало 70 кг/см², что не является пределом и при дальнейшей доработке может быть значительно снижено.

Испытания проводились по следующей схеме. На внешнюю сторону ступичной части колеса, со стороны плунжера прессы распрессовки, крепился индуктор (рис. 6), и в течение 2 мин осуществлялся нагрев от установки индукционного нагрева УИН 006-50-Т-001 мощностью 50 кВт, после чего создавалось прессовое усилие и производился съем колеса.

Расчет ожидаемого экономического эффекта, проводимый на базе статистических данных, полученных в этих депо, показал, что только при исключении возможности появления задир срок окупаемости внедряемой установки высокочастотного индукционного нагрева колес перед распрессовкой колесной пары составляет около 5 месяцев при ее цене 360 тыс. р.

Причем если вагонно-колесные мастерские комплектовать новыми прессами, то разница в стоимости прессов с усилием в 300–400 кг/см² и 70 кг/см² превосходит стоимость требуемого индукционно-нагревательного комплекса.

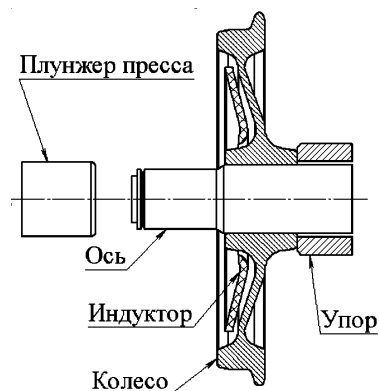


Рис. 6 – Схема распрессовки

5. Заключение

В настоящей работе представлены математические модели для компьютерного исследования процессов индукционного нагрева композиционных объектов. Модели ориентированы на решение прикладной задачи разъединения деталей, сопряженных горячей посадкой. На базе разработанных моделей создан программный комплекс «Термический анализ». Комплекс позволяет решать задачи моделирования и оптимизации индукционного нагрева сложных объектов и давать экспертные оценки для технических приложений. Система хорошо зарекомендовала себя при проведении практических расчетов, позволяя резко снизить материальные и трудовые затраты, избежать которых не удастся при проведении физического моделирования.

Литература

1. Берникер Е.И. Посадки с натягом в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1966.
2. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 416 с.
3. Немков В.С., Полеводов Б.С., Гуревич С.Г. Математическое моделирование устройств высокочастотного нагрева. – Изд. 2-е. – Л.: Политехника, 1991. – 79 с.
4. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
5. Владимиров С.Н., Земан С.К. Теоретические основы индукционного способа разъединения деталей, сопряженных термической посадкой // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2002.

Крохмаль Евгений Витальевич

Аспирант кафедры информационно-измерительной техники ТУСУРа
Телефон: (3822) 56 34 38
greenke@yandex.ru

Земан Святослав Константинович

Зам. дир. ФГНУ «НИИ АЭМ», канд. техн. наук
Телефон: (3822) 56 34 38

Владимиров Сергей Николаевич

Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоэлектроники Томского государственного университета
Телефон: (3822) 41 39 64