

2. При сравнении рассчитанных характеристик преобразования в MathCad с полученными в результате моделирования в EWB 5.12 PRO установлено, что разработанные математические модели адекватны реальным измерительным каналам с ошибкой, значение которой не превышает (0,5...1) %.

3. Алгоритм имитационного моделирования измерительного канала температуры позволяет производить альтернативный выбор вариантов схемных решений и возможность подбора наиболее приемлемых элементов структуры для различных измерительных каналов информационно-измерительных приборов и систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль.– М: Высшая школа, 1991. – 283 с.
2. Зорі А.А. Електронні системи вимірювання і контролю параметрів водних середовищ: [навчальний посібник] /А.А. Зорі, В.Д. Коренев, М.Г. Хламова. – Донецьк: РВА Дон-НТУ, 2002. –352 с.
3. Геращенко О.А. Справочник: [температурные измерения]. – К.: Наукова думка, 1984. – 495 с.

Вовна Александр Владимирович

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет».

E-mail: Vovna_Alex@ukr.net.

83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, Украина.

Тел.: +380623040108.

Зори Анатолий Анатолиевич

E-mail: zori@kita.dgtu.donetsk.ua.

Тел.: +380623045571; +380623010942.

Тарасюк Виктория Павловна

E-mail: vita_post@mail.ru.

Vovna Aleksander Vladimirovich

Higher Educational Establishment «Donetsk National Technical University».

E-mail: Vovna_Alex@ukr.net.

58, Artyom street, Donetsk, 83001, Ukraine.

Phone: +380623040108.

Zori Anatolii Anatolievich

E-mail: zori@kita.dgtu.donetsk.ua.

Phone: +380623045571; +380623010942.

Tarasyuk Victoria Pavlovna

E-mail: vita_post@mail.ru.

УДК 621.313

А.В. Пашковский

МЕТОД СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССАМИ ТЕРМООБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Иллюстрируются возможности разработанного комбинированного метода стандартных и конечных элементов, обладающего повышенной точностью решения при небольшой степени дискретизации расчетной среды, наличии в ней точек с особенностями решения, тонких включений, осцилляции решения в кусочно-однородных двух- и трехмерных средах. Приведены результаты прикладного расчета температурного поля якоря тя-

гового электродвигателя в процессе его термообработки. Расчетные значения сопоставлены с экспериментальными.

Метод конечных элементов; метод стандартных элементов; краевые полевые задачи; численное решение.

A.V. Pashkovsky

STANDARD ELEMENTS METHOD IN MANAGEMENT OF PROCESSES OF HEAT TREATMENT OF ELECTROMECHANICAL DEVICES

Opportunities of the developed combined method of the standard and final elements possessing raised{increased} accuracy of the decision at a small degree of digitization of the settlement environment, presence in her of points with features of the decision, thin inclusions, осциллирующие decisions in кусочно-homogeneous two and three-dimensional environments are illustrated. Results of applied calculation of a temperature field of an anchor of the traction electric motor are resulted during his{its} heat treatment. Settlement values are compared with experimental.

Method of final elements; method of standard elements; regional field problems; the numerical decision.

Развитие практически любой отрасли современного производства в значительной мере зависит от степени автоматизации инженерных разработок, гибкости технологий производства и присутствия в них обратной связи по контролю качества продукции. Именно поэтому в одном ряду по важности создания стоят системы диагностики, контроля качества, автоматизированные системы управления технологическими процессами и другие подобные системы. Значительная роль, определяющая качество функционирования систем, принадлежит математическим методам, используемым в мониторинге, диагностике и управлении технологическими процессами.

Так, например, при проектировании технологического процесса производства некоторых типов электромеханических устройств (ЭУ) значительное внимание уделяется контролю тепловых нагрузок, которым подвергается ЭУ в процессе производства и возможности их коррекции. Ведь именно они во многом определяют качество внутренней и внешней изоляции ЭУ, а следовательно, надежность и качество самого изделия, срок его эксплуатации. Так известно, что превышение изоляцией максимально допустимой для нее температуры более чем на 8°C , приводит к сокращению ее срока службы от полутора до двух раз. Очевидно, что контроль теплового состояния изоляции, особенно внутренней, недоступной для непосредственного контроля, возможно только на основе решения внутренних граничных краевых задач тем или иным численным методом, с учетом внутренней структуры ЭУ.

Современные численные методы позволяют осуществлять разнообразные типы прикладных расчетов, однако использование новых технологий и научных разработок в производстве ЭУ определили целый ряд задач, в которых существующие методы не могут обеспечить достаточной точности. В частности, это относится к расчёту полей, особенно трехмерных, в ЭУ, которые рассматриваются как неоднородные или кусочно-однородные среды (КОС) с включениями не гладкой формы, имеющими узкие поры, тонкие плёнки или мелкозернистую структуру. Прогнозируемо усугубление ситуации при использовании в производстве ЭУ микро-, микро- и нанотехнологий.

Существующие численные методы решения, такие как метод конечных элементов (МКЭ), граничных элементов (МГЭ), комбинированный метод граничных и конечных элементов (КМГиКЭ) и др., характеризуются целым рядом особенностей, оказывающих негативное влияние на их точность и производительность. В качестве

основных достаточно отметить следующие недостатки методов: применение линейной аппроксимации решения, использование для аппроксимации неполных систем функций (сходимость рядов, по которым она достаточно не исследована), неудовлетворительную склейку нормальных производных решения на границах разнородных сред, специальные приемы по формированию многомерных матриц алгебраических систем уравнений, особые методы их решения для приемлемой скорости сходимости итерационных процессов. Важно, что особо значительные потери точности вышеперечисленных методов возникают при наличии особенностей решения в окрестностях угловых точек сред, многофазных сред с тонкими включениями, осцилляции и неудовлетворительных свойств решений в расчетных средах и их границах. Именно поэтому разработка новых математических, в том числе численных методов, способных с высокой точностью решать полевые задачи, оперативно выдавать рекомендации по корректировке технологического процесса и изменению параметров контроля, является насущной задачей.

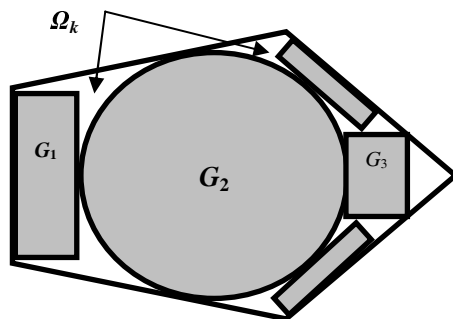


Рис. 1. Пример заполнения расчетной среды

Основная идея разрабатываемого автором метода стандартных элементов на основе рядов Фурье (МСЭФ) состоит в совместном использовании аналитических и численных методов решения. Ее суть – выделение совокупности G_1, G_2, \dots стандартных элементов (СЭ) в КОС, для которых известны аналитические решения краевых задач, найденные классическими методами и подобласти Ω_k . Исследование МСЭФ в [1]-[3] на модельных задачах показало, что он позволяет:

- ◆ резко сократить степень дискретизации КОС благодаря ее заполнению (рис.1) стандартными элементами (СЭ) различной геометрии;
- ◆ обеспечить высокую точность при наличии тонких включений и особенностей решения в окрестностях угловых точек КОС, осцилляции решения в расчетных средах;
- ◆ при высокой точности сократить вычислительные затраты и не менять методику при изменении размерности задачи;
- ◆ варьировать степень дискретизации расчетной области на СЭ той или иной геометрии, выбирать соответствующий требуемой точности решения метод аппроксимации решения в каждом СЭ;
- ◆ получать непрерывные распределения решения в СЭ, непрерывно дифференцируемые внутри СЭ.

Проиллюстрируем заявленные преимущества МСЭФ на технологическом процессе термообработки якорей тяговых электродвигателей (ТД), предусматривающим контроль температуры на внешней границе якоря для оценки состояния внутренней изоляции. Многолетний опыт эксплуатации ТД показывает, что пробой изоляции обмоток якоря является частым видом отказов и достигает 30% и выше от общего количества двигателей, утративших работоспособность [4]. Для повышения качества изоляции широко внедрены электромагнитные индукторы. В качестве основных факторов, определяющих качество термообработки, принимаются: равномерность нагрева массы якоря ТД; существование незначительного градиента температуры от меди якорной обмотки к стали пакета. Задача учета первого фактора успешно решена при проектировании индукционного нагревателя в [5]. Достигнутая от-

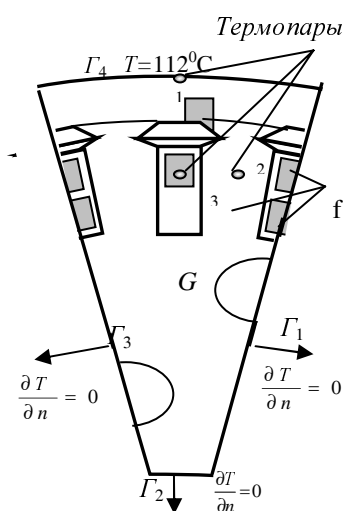


Рис. 2. Сектор якоря

носительная равномерность нагрева якоря по длине позволяет уточнить распределение температурного поля в сечении, для определения точек изоляции, имеющих превышения максимально допустимой температуры термообработки, с целью коррекции режима индукционного нагревателя. Используем для этого комбинирование МСЭФ и хорошо известного метода конечных элементов (МКЭ), которое позволит: оценить точность, достигаемую при комбинировании методов на основе значений температур, полученных экспериментально; оценить равномерность прогрева якоря в сечении; оценить градиент температуры между медью якорной обмотки и сталью пакета.

С учетом осесимметричности якоря ТД, в качестве расчетной области рассмотрим сектор, выделенный в поперечном сечении якоря (рис. 2). Постановка краевой задачи, соответствующая условиям эксперимента, имеет вид

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = f, T|_{\Gamma_4} = C_4, \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3} = 0, \quad (1)$$

где f – функция плотности потерь; T – функция решения; C_4 – значение температуры, поддерживаемой индуктором на границе. Расчетная область G (рис. 2) рассмотрена как совокупность пазовой области, области воздушной прослойки и области стали якоря, с вентиляционными каналами. На серийном якоре тягового двигателя в процессе его термообработки в опытно-промышленном образце индукционного нагревателя проведены экспериментальные исследования. Их целью явились:

1. Оценка равномерности прогрева сечения.
2. Определение граничных данных для (1).
3. Оценка точности вводимого комбинированного метода стандартных и конечных элементов (КМСФКЭ) на основе экспериментальных значений температур.

Для контроля температурного поля в каждом из четырех контрольных сечений якоря ТД и условий на внешней границе использовано по три термопары (рис. 2). На внешней границе Γ_4 якоря по технологическому процессу индуктором первоначально поддерживается температура 112°C . Процесс термообработки характеризуется следующими значениями установившихся температур в сечении якоря (рис. 3). Как показали результаты экспериментальных исследований, наличие вентиляционных каналов не оказывает сколько-нибудь значительного влияния на распределение температуры в якоре, при отсутствии его принудительной продувки. В связи с этим дискретизацию якоря КМСФКЭ можно упростить, используя в качестве СЭ, лишь: сектор кольца, сектор кольца с нижней границей (рис. 4). В качестве конечных элементов для дискретизации пазо-

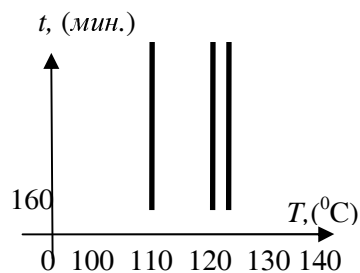


Рис.3. Экспериментальные значения температур

вой области якоря использованы треугольные конечные элементы с прямолинейными границами. Отметим, что дискретизация КОС КМСФикЭ содержит 2 СЭ, 420 конечных элементов и 240 узлов, выделенных только пазовой области, а дискретизация МКЭ – 708 конечных элементов и 383 узла. Комбинированное заполнение расчетной области G стандартными и конечными элементами представлено на рис. 4.

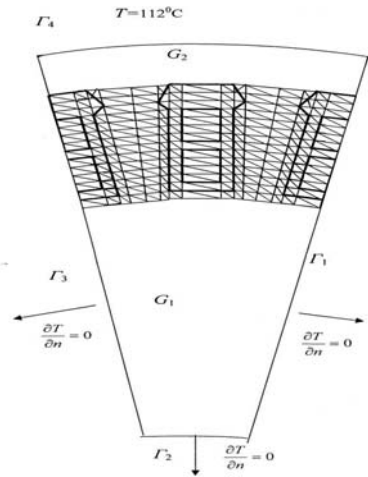


Рис. 4. Конечные и СЭ в секторе якоря

Необходимо отметить, что разбиение пазовой области на конечные элементы проведено с учетом ее значительной неоднородности, имеющей место в реальном якоре. Потери, выделяемые в обмотке якоря, рассчитаны на основе экспериментально полученных значений токов, индуцируемых полем индуктора. Распределение потерь в стали шихтованного пакета якоря рассчитано в соответствии с [6]. Сформулированная краевая задача (1) при использовании КМСФикЭ сводится к задаче минимизации функционала по узловым значениям, выделенным только в пазовой части расчетной области.

Результаты расчета значений температуры КМСФикЭ в узлах конечно-элементной сетки в стали и изоляции (по высоте паза) пазовой области приведены на рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений температур в контрольных точках сечения якоря (рис. 2) приведено в табл. 1. На основании результатов, полученных КМСФикЭ, сделаем выводы:

1. Использование СЭ в виде секторов исключает дискретизацию воздушного зазора и стали якоря на конечные элементы, что повышает точность расчета и сокращает вычислительные затраты.

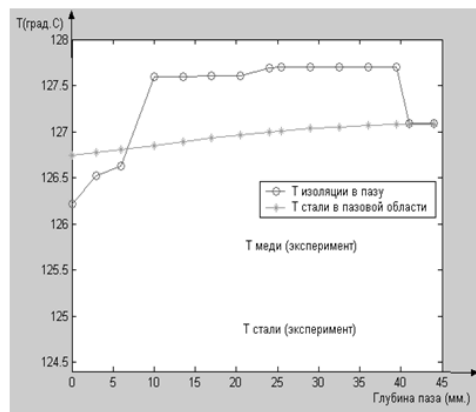


Рис. 5. Температура в узлах сетки (вдоль паза)

2. КМСФ и КЭ позволяет в 1,5 раза снизить размерность системы алгебраических уравнений, соответствующей решаемой краевой задаче.

3. Отклонения расчетных значений температур, полученных КМСФ и КЭ, от экспериментально измеренных значений в контрольных точках не превышают 1,6-2,4⁰С, что составляет 1,3-1,9 % от измеренных значений.

4. Обеспечен необходимый градиент температуры при термообработке от меди якорной обмотки к стали пакета якоря, составляющий 1,0-1,5⁰С.

Таблица 1

№ точки	2 – сталь в зубцовой зоне	3 – медь обмотки
Эксперимент	124,5 ⁰ С	126 ⁰ С
КМСФ и КЭ (2СЭ+420КЭ)	126,9	127,6
$\delta_{\text{КМСФ и КЭ}}$ (%)	1,9	1,3

5. Использование КМСФ и КЭ позволяет оптимизировать управление технологическим процессом термообработки якоря ТД как по времени принятия решений, так и качеству внутренней изоляции.

6. Повышенная точность КМСФ и КЭ в определении нормальной производной решения, позволяет более точно определять тепловые потоки при заданных источниках, что важно при оптимизации технологии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пашковский А.В., Пашковская И.В. МСЭФ в моделировании стационарного поля в области с П-образным сердечником // Изв. вузов. Электромеханика. –2009. – № 2. – С. 10-12.
2. Пашковский А.В. Решение тестовых полевых задач в кусочно-однородной области методом стандартных элементов // Научно-технические ведомости. – СПб.: ГПУ. – 2009. – № 6. – С. 147-151.
3. Пашковский А.В. МСЭФ в решении задач магнитостатики при особенностях в окрестностях угловых точек // Научно-технические ведомости. – СПб.: ГПУ. – 2010. – № 1. – С. 18-22.
4. Курочка А.Л., Моисеенко А.Ф. Расчет температурного поля обмотки якоря – путь к повышению надежности // Электровозостроение: сб. науч. тр. ОАО “ВЭЛНИИ”. – 1980. – Т.12. – С. 249-265.
5. Пашковский А.В. Расчет температурных полей в элементах электрических машин и аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук. – Новочеркасск. 1989. – 216 с.
6. Березинец Н.И. Математическое моделирование квазистационарного электромагнитного поля в шихтованных сердечниках электрических машин при индукционном нагреве: Автореф. дис.... канд. техн. наук. – Новочеркасск, 1988. – 16 с.

Пашковский Александр Владимирович

Невинномысский технологический институт (филиал Северо-Кавказского государственного технического университета).

E-mail: alecsandr_607@rambler.ru.

357100, г. Неинномысск, ул. Гагарина, 1.

Тел.: 88655471335.

Pashkovsky Alexander Vladimirovich

Nevinnomyssk institute of technology (branch North Caucasian state technical University).

E-mail: alecsandr_607@rambler.ru.

1, Gagarina street, Nevinomisk, 357100, Russia.

Phone: +78655471335.