

УДК 519.673

ПРИМЕНЕНИЕ ЯЧЕЕК ОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ШУМОВЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЕЙВЛЕТ-СПЕКТРА

А.А. Хамухин

Томский политехнический университет

E-mail: aaxtpu@tpu.ru

Отмечено, что в задаче обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра значительное время занимает вычисление непрерывного вейвлет-преобразования, что приводит к запаздыванию обнаружения. Предложена модифицированная схема однородной вычислительной структуры для распараллеливания и ускорения вычисления. Представлены результаты компьютерного моделирования тестовой задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра с помощью ячеек однородной структуры.

Ключевые слова:

Вычислительная ячейка, однородная вычислительная структура, параллельные вычисления, шумовые гидроакустические сигналы, вейвлет-спектр, непрерывное вейвлет-преобразование.

Key words:

Computing cell, homogeneous computing structure, parallel computation, noise hydroacoustic signals, wavelet spectrum, continuous wavelet transform.

Введение

Задача обнаружения шумовых гидроакустических сигналов, излучаемых движущимися в воде объектами (подводными лодками или надводными судами), остается актуальной на протяжении десятилетий. Это связано, с одной стороны, с непрерывной работой специалистов над снижением излучаемых объектами шумов и, с другой стороны, с развитием аппаратуры и методов обработки шумовых сигналов [1–3]. В работе [4] подробно рассматривается решение этой задачи на основе одного из новых и относительно недавно разработанных методов вычисления интегрального вейвлет-спектра шумового гидроакустического сигнала. Приводится функциональная схема устройства и результаты компьютерного моделирования, показывающие преимущество предлагаемого метода над традиционно используемым для решения этой задачи методом преобразования Фурье.

Следует отметить, что вычисление интегрального вейвлет-спектра основано на непрерывном вейвлет-преобразовании (НВП) анализируемого сигнала, которое требует больших вычислительных затрат [5]. Алгоритм задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра основан на многократном повторении вычисления НВП. В результате весь расчет в задаче обнаружения движущегося в воде объекта занимает значительное время, что приводит к запаздыванию обнаружения и возможной потере его актуальности.

Для ускорения вычисления вейвлет-преобразования (ВП) разработано и продолжает разрабатываться множество методов: ВП на основе быстрого преобразования Фурье, дискретное вейвлет-преобразование, диадное ВП и др. [5]. Но все эти методы связаны с частичной потерей информации при вычислении, что также может снизить эффективность обнаружения шумовых гидроакустических сигналов. Поэтому для данной задачи важно сохранить класси-

ческое непрерывное вейвлет-преобразование и сокращать время его расчета за счет других средств.

Объект и цель исследования

Основными источниками шумовых гидроакустических сигналов являются: энергетическая установка, гребные винты, вспомогательные механизмы (насосы, генераторы и т. п.), гидродинамические эффекты, формирующиеся обтеканием жидкости корпуса объекта. Итоговый шум считают состоящим из двух компонент: широкополосный шум с непрерывным спектром частот и узкополосный шум, имеющий прерывистый (линейчатый) спектр. В задаче обнаружения вторую составляющую гидроакустического шума считают полезным сигналом на фоне аддитивной помехи (первой составляющей гидроакустического шума) [1].

Узкополосный шум состоит из отдельных тональных (синусоидальных) компонент, называемых дискретными составляющими (ДС) спектра шума. Характеристики ДС, обусловленные работой вспомогательных механизмов, обычно стабильны и не зависят от скорости объекта. Частоты и амплитуды дискретных составляющих, вызванные энергетической установкой и гребными винтами, изменяются вместе со скоростью движения объекта. В некоторых случаях дискретные составляющие, инициированные от одного источника, образуют звукоряды, т. е. наборы ДС, частоты которых кратны друг другу [4].

Эти особенности усложняют задачу обнаружения и обуславливают проведение новых исследований и применение новых методов. В частности, высокую эффективность показывает метод, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании шумового гидроакустического сигнала [4], главным недостатком которого являются большие вычислительные затраты.

С другой стороны, известно, что однородные вычислительные структуры (ОВС), основанные на

синхронно работающих вычислительных ячейках одинакового типа, позволяют добиваться максимального увеличения производительности при распараллеливании операций. Специфика применения ОВС состоит в том, что требуется изменение структуры ячейки в зависимости от решаемой задачи. В настоящее время разработано несколько схем ячеек для решения дифференциальных уравнений в частных производных [6–9], а также схемы для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования [10, 11].

Цель настоящей работы – рассмотреть особенности применения ОВС в задаче обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра.

Модификация схемы однородной вычислительной структуры

Алгоритм обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра состоит из следующих этапов [4]:

1. Измерение шумового гидроакустического сигнала, который может состоять из нескольких узкополосных полезных сигналов с центральными частотами 1...20 Гц и аддитивной широкополосной помехи.
2. Оцифровка по времени t поступающего входного сигнала $S(t)$ с шагом дискретизации Δt , который должен удовлетворять требованию теоремы Котельникова–Найквиста:

$$f_d = \frac{1}{\Delta t} \geq 2f_{\max},$$

где f_d – частота дискретизации входного сигнала, f_{\max} – максимальная частота, которой ограничен спектр полезной составляющей входного сигнала.

3. Непрерывное вейвлет-преобразование оцифрованного входного сигнала $S(t)$ и получение значений $W(a_j, b_k)$, где i, j, k – индексы по времени t по масштабу a , по сдвигу по времени b ; N – количество шагов по времени i ; M – количество масштабов j .
4. Вычисление интегрального вейвлет-спектра (ИВС):

$$\widehat{W}(a_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |W(a_j, b_k)|^2 \Delta t. \quad (1)$$

5. Определение местоположений локальных максимумов ИВС, которые и являются обнаруженными полезными сигналами.

В работе [4] пункт 3 вышеизложенного алгоритма реализуется через целый ряд операций: вычисление спектра Фурье входного сигнала, перемножение полученного спектра Фурье с сопряженным базисом отмасштабированных спектров аналитических вейвлетов, вычисление обратного преобразования Фурье от результата последнего перемножения. Такое усложнение предпринято ради применения алгоритма БПФ (быстрого преобразования Фурье), ускоряющего процесс вычисления на последовательном процессоре. Но при распараллеливании вычисления НВП и реализации этого вы-

числения с помощью однородной вычислительной структуры можно избежать этого усложнения и применять прямую формулу [12]:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

или для дискретизированного входного сигнала:

$$W(a_j, b_k) = \frac{1}{\sqrt{a_j}} \sum_{i=0}^N S(t_i) \Psi\left(\frac{t_i - b_k}{a_j}\right) \Delta t_i,$$

где $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ – некоторая функция с определенными свойствами (вейвлет).

В работе [12] представлены схемы ячейки и однородной вычислительной структуры, состоящей из таких ячеек для вычисления НВП. Но для задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов кроме вычисления НВП требуется вычисление интегрального вейвлет-спектра и определение максимумов этого спектра, которые соответствуют обнаруженным дискретным составляющим входного сигнала.

Анализируя возможные схемные решения этой задачи, мы пришли к выводу, что схему самой ячейки для вычисления НВП следует оставить без изменений, а модификацию внести в схему ОВС. Такой подход позволит использовать одни и те же вычислительные ячейки для решения других задач путем перенастройки и дополнения схемы всей однородной вычислительной структуры.

Значения непрерывного вейвлет-преобразования $W(a_j, b_k)$ при вычислении на ОВС получаются в матрице ячеек размером $M \times N$. Количество масштабов M значительно меньше, чем количество отсчетов N анализируемого входного сигнала. Поэтому целесообразно связать ОВС с устройством управления (УУ) параллельно по M каналам.

Можно возложить операции вычисления ИВС по формуле (1) на само УУ, но такой объем вычислений существенно увеличит общее время решения задачи обнаружения. Поэтому на M каналах между устройством управления и ОВС требуется поставить блок для параллельного вычисления интегрального вейвлет-спектра. Таким образом, ввод блока вычисления ИВС на каждом канале позволит передавать в устройство управления массив размером M вместо массива размером $M \times N$. Это возможно в рамках настоящей задачи, поскольку сами значения $W(a_j, b_k)$ после вычисления интегрального вейвлет-спектра для задачи обнаружения не нужны.

Такое решение сократит объем передаваемой для обработки в УУ информации и ускорит весь цикл расчета, поскольку в качестве УУ применяется обычный микропроцессор (с контроллером) и повышенная вычислительная нагрузка на него может снизить эффект от распараллеливания операций в ОВС [9]. Таким образом, на УУ добавляется незначительная нагрузка вычисления локальных максимумов на M числах. Модифицированная схема ОВС представлена на рис. 1.

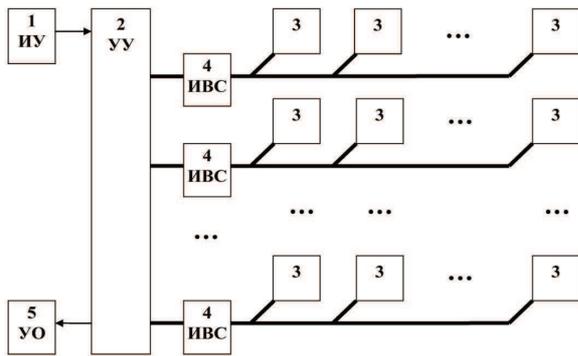


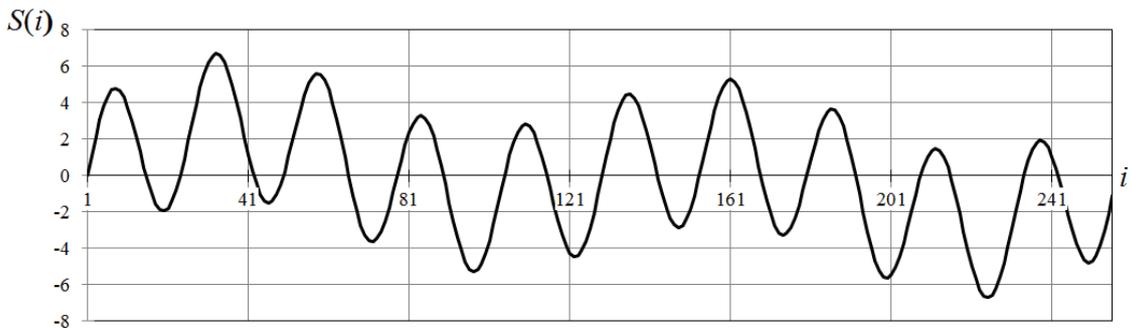
Рис. 1. Функциональная схема однородной вычислительной структуры для решения задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра: 1) устройство измерения анализируемого сигнала – ИУ; 2) устройство управления – УУ; 3) ячейка однородной вычислительной структуры; 4) блок вычисления интегрального вейвлет-спектра – ИВС; 5) устройство отображения обнаруженных шумовых гидроакустических сигналов – УО

Анализируемый входной сигнал $S(i)$ измеряется в ИУ и в оцифрованном виде передается в УУ. Устройство управления распределяет этот сигнал по M каналам для передачи их в ячейки однородной вычислительной структуры 3.

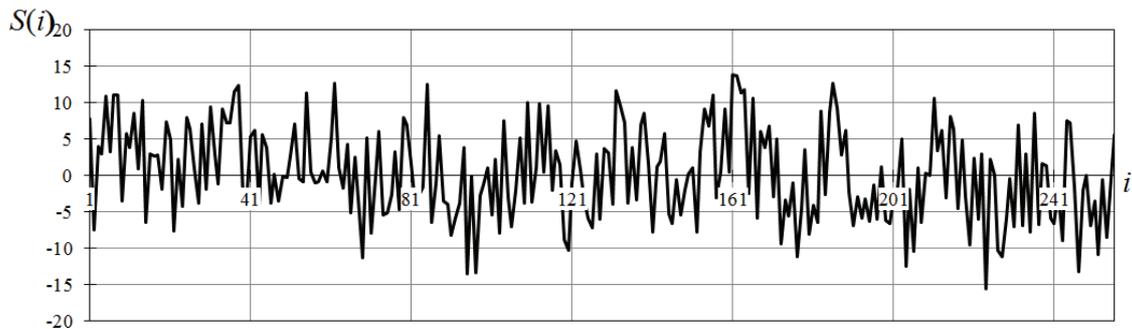
При передаче данных от УУ к ячейкам 3, блоки ИВС не производят вычислений и пропускает данные в каналы доступа к ячейкам 3. При передаче данных от ячеек в УУ (а это результат вычисления НВП) блоки ИВС на каждом из M каналов, соединяющих их с линиями из N ячеек, производят операции в соответствии с формулой (1) и передают результаты в УУ. Устройство управления из полученных N чисел определяет локальные максимумы и передает их в устройство отображения обнаруженных шумовых гидроакустических сигналов.

Моделирование задачи обнаружения шумовых гидроакустических сигналов

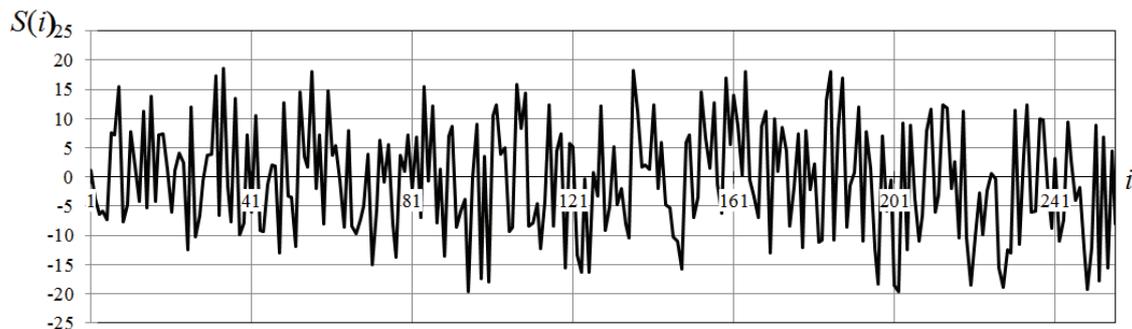
Компьютерная модель представленной на рис. 1 схемы создана в среде Excel с программиро-



а



б



в

Рис. 2. Анализируемый входной сигнал: а) без помехи; с помехами по амплитуде б) 6; в) 8 дБ

ванием на языке *VBA*. Для тестирования алгоритма был выбран входной сигнал с тремя дискретными составляющими, подлежащими обнаружению. Было выбрано количество отсчетов входного сигнала $N=256$, количество масштабов $M=16$, шаг $\Delta t=1$ с.

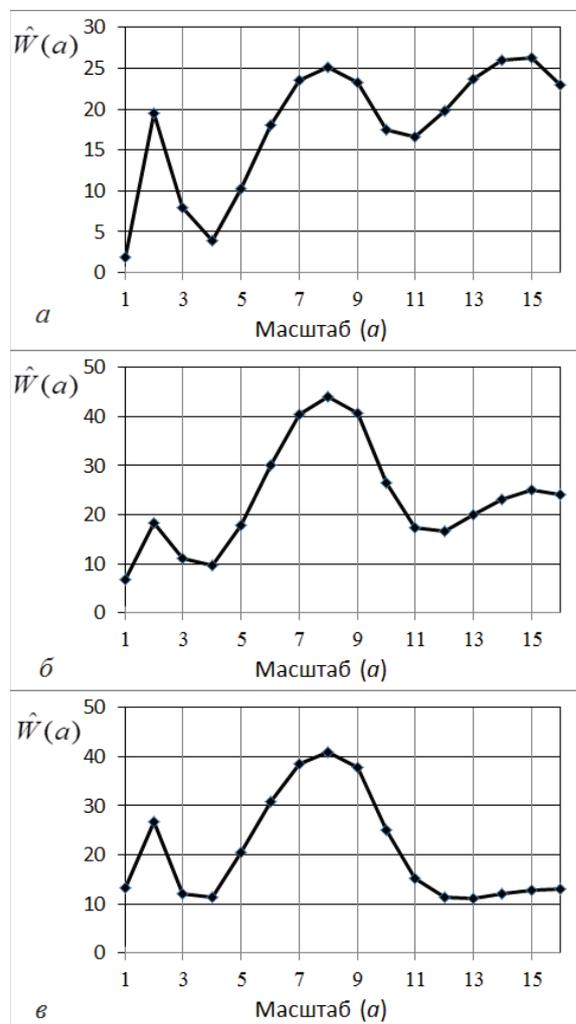


Рис. 3. Расчетный интегральный вейвлет-спектр для входных сигналов: а) без помехи; б) с помехами по амплитуде 8 дБ; в) 8 дБ

Реальная задача обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе интегрального вейвлет-спектра решается при нескольких больших количествах ДС, масштабов и отсчетов, но для проверочного тестирования работоспособности схемы мы сочли эти значения достаточными. В качестве материнского вейвлета ис-

пользовалась функция, известная под названием «мексиканская шляпа» (*MHAT*) [11].

Таким образом, моделируемая схема ОВС состояла из матрицы одинаковых вычислительных ячеек размером 16×256 и 16 блоков вычисления интегрального вейвлет-спектра. Расчеты производились на микропроцессоре *Intel Core i7* 3,40 GHz под управлением *Windows 7* (64).

Входной сигнал $S(t)$ моделировался в виде суммы трех гармоник (с частотами 1, 2 и 10 Гц) с аддитивной помехой в виде модели дискретного белого шума. Вид анализируемых входных сигналов с различным уровнем помехи представлен на рис. 2.

Вид полученного на моделируемой схеме ОВС интегрального вейвлет-спектра для представленных выше входных сигналов показан на рис. 3.

Как видно из графиков, расчетный интегральный вейвлет-спектр входного сигнала без помехи содержит три максимума, соответствующих трем гармоникам, из которых он состоит. С увеличением уровня помехи резкость максимумов несколько уменьшается, и при уровне помехи в 8 дБ третьего максимума уже практически нет, т. е. низкочастотная дискретная составляющая спектра входного сигнала не обнаруживается. Такой результат характерен в целом для метода обнаружения дискретных составляющих на основе интегрального вейвлет-спектра и не является следствием параллельного вычисления непрерывного вейвлет-преобразования по предложенной в данной работе схеме.

Выводы

1. Предложена модифицированная схема однородной вычислительной структуры для распараллеливания и ускорения вычисления непрерывного вейвлет-преобразования в задаче обнаружения шумовых гидроакустических сигналов.
2. Модификация заключается в дополнении схемы однородной вычислительной структуры блоками вычисления интегрального вейвлет-спектра, что позволяет сократить объем передаваемой в устройство управления информации и ускорить весь цикл расчета в задаче обнаружения шумовых гидроакустических сигналов.
3. Результаты моделирования на примере решения тестовой задачи обнаружения трех дискретных составляющих шумовых гидроакустических сигналов подтвердили работоспособность и эффективность предложенной схемы.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурдик В.С. Анализ гидроакустических систем. – Л.: Судостроение, 1988. – 392 с.
2. Калью В.А. Автоматический мониторинг подводного шума судов с помощью искусственной нейронной сети // Российский фонд фундаментальных исследований, грант № 11–08–00402. 2011. URL: http://www.rfbr.ru/rffi/ru/contest/n_549/o_41432 (дата обращения: 11.09.2012).
3. Калью В.А., Неворотин В.Ю., Правдин А.А. Повышение точности локализации дискретных составляющих спектра шума движущегося транспортного средства // Техническая акустика. – 2012. – № 3. URL: <http://www.ejta.org> (дата обращения: 11.09.2012).
4. Устройство обнаружения узкополосных шумовых гидроакустических сигналов на основе вычисления интегрального вейвлет-спектра: пат. 2367970 Рос. Федерация. № 2007145474/28; заявл. 28.11.07; опубл. 20.09.09, Бюл. № 26. – 27 с.

5. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
6. Хамухин А.А. Ячеечная модель устройства для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 63–67.
7. Хамухин А.А. Реконфигурирование однородной вычислительной структуры с непрограммируемыми ячейками для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 68–72.
8. Хамухин А.А. Модификация ячейки однородной структуры для решения дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 37–41.
9. Хамухин А.А. Адресуемая ячейка однородной вычислительной структуры для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 5. – С. 25–30.
10. Хамухин А.А. Математическая модель ячейки однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Проблемы информатики. – 2011. – № 5. – С. 87–93.
11. Хамухин А.А. Применение ячеек однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 149–153.
12. Устройство для вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования: пат. 2437147 Рос. Федерация. № 2010127068/08; заявл. 01.07.10; опубл. 20.12.11, Бюл. № 35. – 9 с.

Поступила 21.09.2012 г.

УДК 621.312/313: 621.317.31

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КООКСИАЛЬНОГО ШУНТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Е.В. Бедарева, Е.В. Костин

Томский политехнический университет
E-mail: bedareva@tpu.ru

Проведен анализ распределения температурного поля коаксиального шунта в программном пакете ANSYS. Установлено, что температурное поле коаксиального шунта имеет неравномерный характер из-за теплоемкости материалов и свободной конвекции. Предложено использовать систему принудительного охлаждения шунта, которая позволит уменьшить внутренние механические напряжения резистивного элемента и улучшить метрологические характеристики шунта в целом.

Ключевые слова:

Коаксиальный шунт, распределение температурного поля, температура перегрева резистивного элемента, метод конечных элементов, ANSYS.

Key words:

Coaxial shunt, temperature field distribution, superheat temperature of resistance element, finite-element method, ANSYS.

При испытаниях электроэнергетического оборудования, такого как мощные трансформаторы, силовые размыкатели, коммутаторы, защитные устройства, а также при контактной сварке и нанесении покрытий методом микродугового оксидирования применяют резистивные преобразователи тока. Предпочтения отдают коаксиальной конструкции шунтов, обладающих наиболее стабильными метрологическими характеристиками [1–3]. Коаксиальный шунт состоит из двух вложенных друг в друга цилиндров, по которым протекает ток в противоположных направлениях. Внутренний цилиндр является резистивным элементом, выполненным из материала с малым удельным сопротивлением, например манганин, а внешний — из материала с большим удельным сопротивлением, например медь.

Расчет параметров коаксиальных шунтов состоит в определении оптимальных размеров и рациональном выборе материала резистивного элемента, которые должны обеспечивать заданные технические и метрологические характеристики шунта при минимальных габаритах.

Основным фактором, определяющим размер резистивного элемента, является пропускаемый им ток и, следовательно, мощность рассеиваемого им тепла. Поэтому при выборе его габаритных размеров необходимо учитывать температуру перегрева [4]. Под температурой перегрева понимается разность между температурой поверхности резистивного элемента и температурой окружающей среды.

Температурное поле коаксиального шунта описывается сложными дифференциальными уравнениями, получение аналитического решения которых вызывает затруднения, особенно при рассмотрении трехмерного случая. Целью данной статьи является исследование температурного поля коаксиального шунта с помощью разработки модели в программном пакете ANSYS.

В настоящее время существует множество программных продуктов, позволяющих провести сложные модельные эксперименты по расчету распределения температурного поля резистивных шунтов и уменьшить трудоемкость натурных экс-