3. *Баланкин А. С.* Фрактальная динамика деформируемых сред // Письма ЖТФ. – 1991. – Т. 17, № 6. – С. 84–100.

4. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой : пер. с англ. Ю. А. Данилова ; общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича и Ю. В. Сачкова. – М. : Прогресс, 1986. – 432 с.

5. *Климонтович Ю. Л.* Проблемы статистической теории открытых систем: критерии относительной степени упорядоченности состояний в процессах самоорганизации // Успехи физ. наук. – 1989. – Т. 158, вып. 1. – С. 59–91.

6. *Золотухин И. В.* Фракталы в физике твердого тела // Сорос. образоват. журн. – 1998. – № 7. – С. 108–113.

7. *Сантало Л.* Интегральная геометрия и геометрические вероятности. – М. : Наука, 1983. – 358 с.

8. *Федер Е.* Фракталы : пер. с англ. Ю. А. Данилова, А. М. Шукурова. – М. : Мир, 1991. – 254 с.

* * *

А. И. Мурынов, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

V. V. Belykh, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Izhevsk State Technical University

V. A. Stepanov, Head of Laboratory, Izhevsk State Technical University

Determination of Fractal Dimension and Informational Entropy of Planar Lines

The fractal approach to calculations of flat lines dimension based on computation of number of its crossings by a system of parallel lines is considered. The usability of fractal geometry and synergetic methods for research of complicated modes generated by nonlinear dynamic systems is analyzed. By an example of the analysis of an electrocardiogram signal structure, results of use of entropy as complex criterion of diagnostics of a cardiac muscle condition are presented, and its relationship with fractal dimension of a signal is shown.

Keywords: fractal approach, flat lines, system of parallel lines, dynamic systems, analysis of electrocardiogram signal structure, diagnostics, cardiac muscle, synergetics, complex criterion

Получено 02.11.10

УДК 621.317.7

К. А. Никитин, магистрант;
В. А. Куликов, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАДИЕНТНОГО ДАТЧИКА МАЛЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ГРУНТЕ

Представлены модель системы датчик – среда на основе электротепловой аналогии и результаты моделирования процесса измерения плотности теплового потока в грунте градиентным методом.

Ключевые слова: электротепловое моделирование, тепловой поток, плотность теплового потока, датчик

Датчики теплового потока классифицируются по методам измерений. Различают калориметрические датчики, градиентные и основанные на скин-эффекте. Широкое применение получили датчики первых двух типов. Они обладают высокой точностью и компактностью.

© Никитин К. А., Куликов В. А., 2010

В калориметрических датчиках с помощью подогрева нагревательным элементом компенсируется измеряемый тепловой поток. По потребляемой нагревателем мощности судят о плотности теплового потока. Калориметрические датчики обладают существенным недостатком, который ограничивает их применение в ряде задач – не сохраняется «тепловая история» потока [1]. В связи с этим предпочтительнее использовать градиентные датчики.

Градиентные датчики основаны на законе теплопроводности Фурье и состоят из двух датчиков температуры, подключаемых к среде. Различают два типа градиентных датчиков. В датчиках первого типа средой является промежуточный теплоизолирующий материал с известным коэффициентом теплопроводности. Датчики второго типа не используют промежуточный материал, подключаясь напрямую к исследуемой среде. Это позволяет с их помощью измерять потоки внутри среды путем погружения в нее. Следовательно, они могут быть использованы для измерения тепловых потоков в грунте, что является актуальным при анализе теплопотерь в процессе транспортировки тепловой энергии по заглубленным в грунт трубопроводам.

Для исследования процессов, происходящих в системе датчик – среда, с целью выявления возможности применения градиентных датчиков конкретной конструкции использован метод моделирования на основе электротепловой аналогии [2]. Для системы датчик – среда, где датчиком (рис. 1) являются объединенные в единый конструктив два термопреобразователя сопротивления (ТПС) с чувствительными элементами в виде катушки из медного микропровода, намотанной на каркасе, были разработаны электрические модели для пяти типов сред с различным коэффициентом теплопроводности. Фрагмент одной модели представлен на рис. 2.

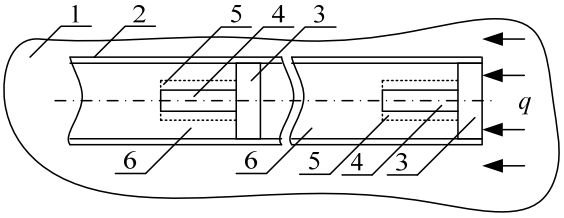

Рис. 1. Конструкция градиентного датчика: *1* – среда; *2* – стальная защитная трубка диаметром 3 мм и толщиной 0,1 мм; *3* – медный теплоприемник датчика температуры диаметром 1,4 мм и длиной 5 мм; *4* – медный каркас диаметром 0,8 мм и длиной 20 мм; *5* – катушка чувствительного элемента из медного микропровода диаметром 0,04 мм; *6* – воздушная прослойка

Первоначально исследовалась зависимость разности температуры чувствительных элементов датчика от плотности теплового потока. Было получено выражение

$$\Delta T = A(\lambda)q + B(\lambda), \tag{1}$$

где ΔT – разность температуры чувствительных элементов; q – плотность теплового потока; $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ – зависимые от теплопроводности среды λ коэффициенты.

В таблице представлены значения коэффициентов $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$.

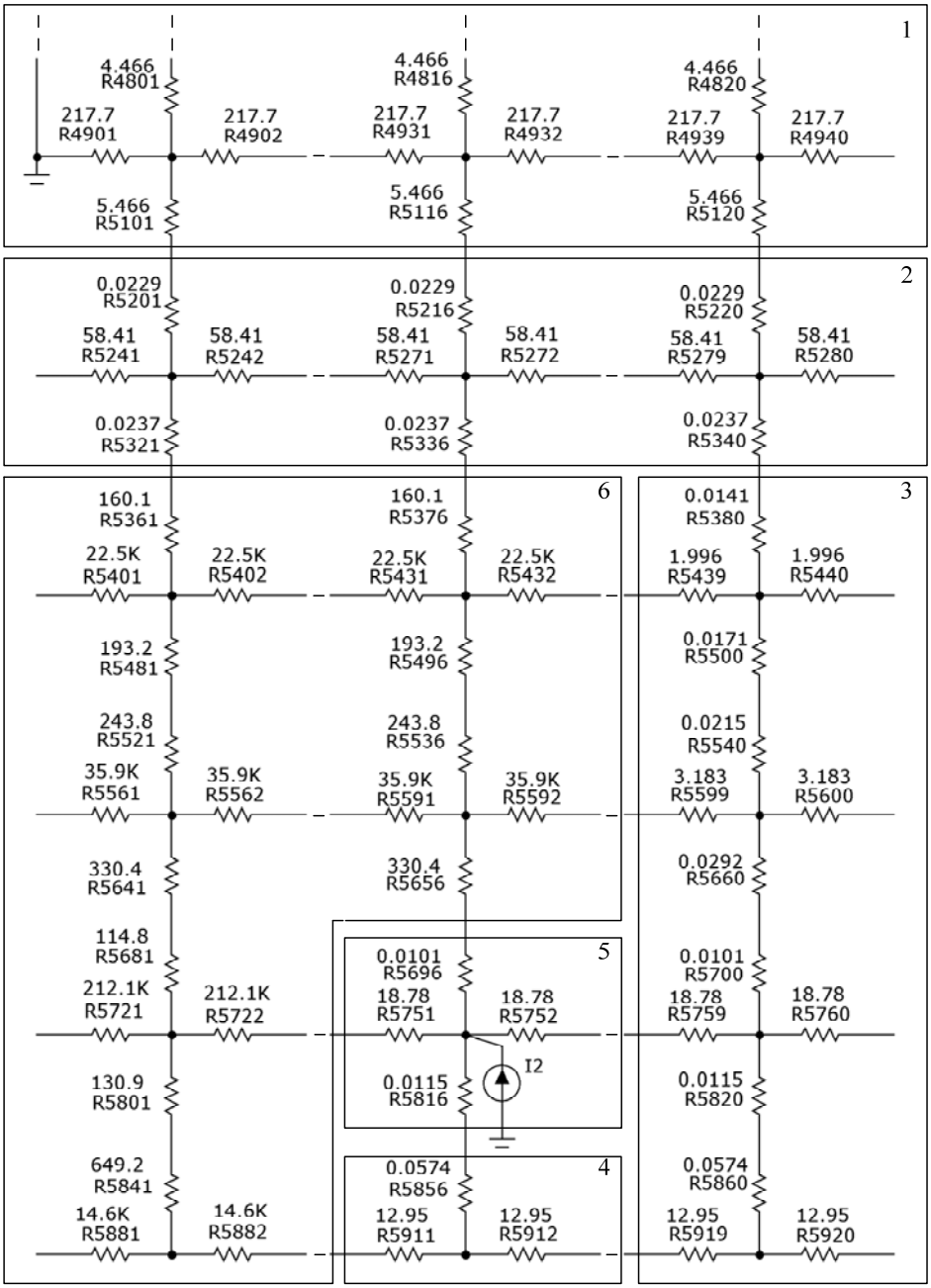

Рис. 2. Фрагмент электрической модели системы датчик – среда:
1 – среда; *2* – стальная защитная трубка; *3* – теплоприемник ТПС; *4* – каркас катушки ТПС;
5 – катушка ТПС; *6* – каркас катушки ТПС

Коэффициенты $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$

λ, Вт/м^2	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$
0,02	3,627	0,259
0,3	0,318	0,021
0,8	0,122	0,006
1,5	0,065	0,002
2	0,049	0,001

Для установления вида зависимостей $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ были построены графики (рис. 3) с аппроксимацией степенными функциями.

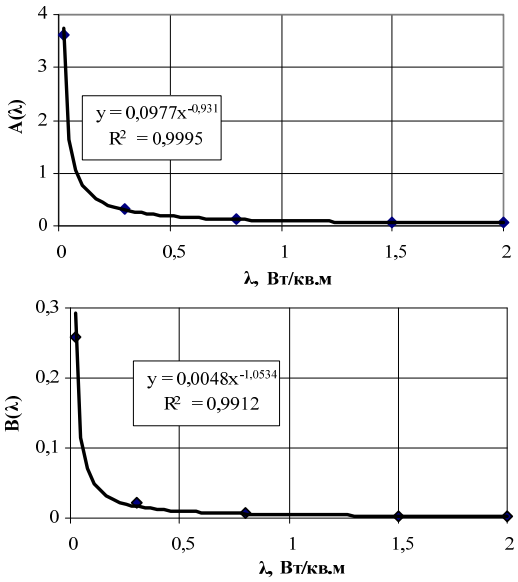

Рис. 3. Графики зависимостей $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$

В результате подстановки аппроксимирующих выражений рис. 3 в формулу (1) получена зависимость, представляющая собой функцию преобразования датчика теплового потока

$$\Delta T = 0{,}0977\lambda^{-0{,}931}q + 0{,}0048\lambda^{-1{,}0534}. \qquad (2)$$

Из формулы (1) и данных таблицы видно, что при нулевой плотности теплового потока значение $\Delta T = B(\lambda) \neq 0$. Из этого можно сделать вывод о том, что система датчик – среда несимметрична, и присутствует начальный разбаланс, который определяется саморазогревом чувствительных элементов ТПС и конструкцией датчика. При увеличении коэффициента теплопроводности среды уменьшается значение $B(\lambda)$, а следовательно, в меньшей степени проявляется несимметричность системы датчик – среда.

На рис. 4 и 5 представлены температурные поля системы датчик – среда при плотности теплового потока 0,1 Вт/м^2 и 1 Вт/м^2, коэффициенте теплопроводности среды 0,3 Вт/м·К и токе ТПС 5 мА.

Видно, что при меньшем значении плотности теплового потока (рис. 4) влияние ТПС на температурное поле среды проявляется сильнее. Это, по-видимому, ограничивает нижний предел измеряемых значений плотности теплового потока. Для определения этого предела требуется проведение экспериментов на специальной установке [3].

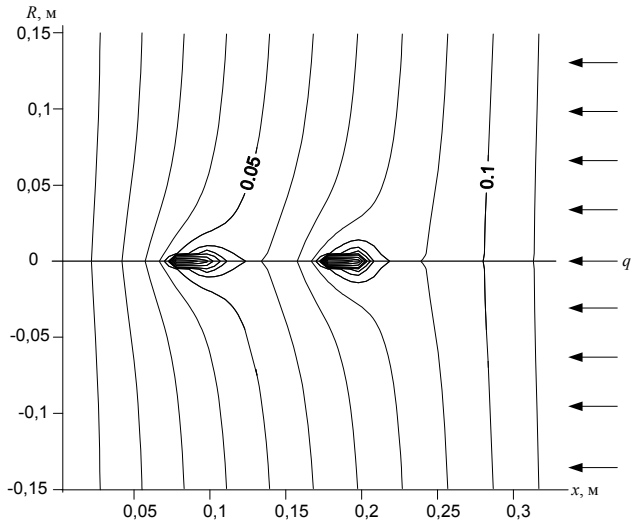

Рис. 4. Температурное поле системы датчик – среда при плотности теплового потока 0,1 Вт/м^2

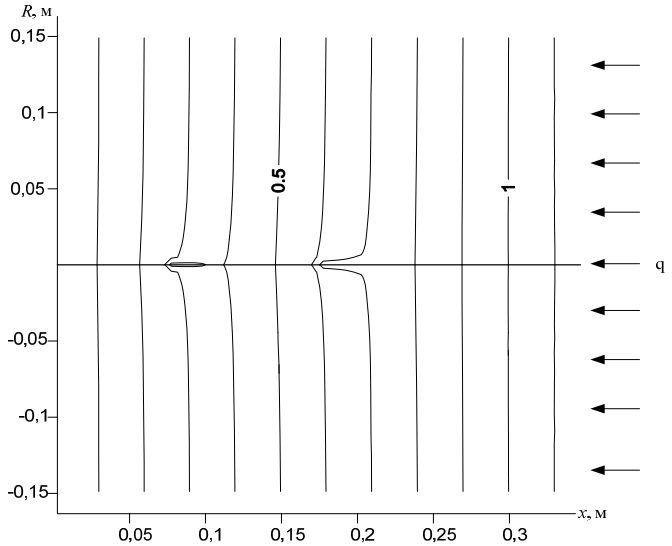

Рис. 5. Температурное поле системы датчик – среда при плотности теплового потока 1 Вт/м^2

На рис. 6 представлено температурное поле нагревания среды с $\lambda = 0{,}3\text{Вт/м}\cdot\text{К}$ измерительным током ТПС. Видно, что изотермы вытянуты вдоль оси и по мере удаления от нее приобретают форму круга. Близкая к круговой форма внешней изотермы позволяет судить о том, что при моделировании учтена достаточная часть пространства вокруг датчика и полученные в процессе моделирования результаты достоверны.

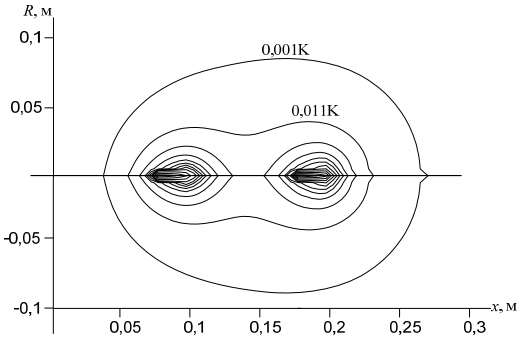

Рис. 6. Температурное поле нагрева среды измерительным током ТПС 5 мА

При практическом использовании датчика больший интерес представляет зависимость плотности теплового потока от измеренного значения разности температуры чувствительных элементов и коэффициента теплопроводности среды, которую можно представить в виде

$$q = A'(\lambda)\Delta T + B'(\lambda). \tag{3}$$

Для получения значений коэффициентов $A'(\lambda)$ и $B'(\lambda)$ использовались данные таблицы. На рис. 7 представлены графики зависимостей $A'(\lambda)$ и $B'(\lambda)$ с аппроксимацией линейными функциями.

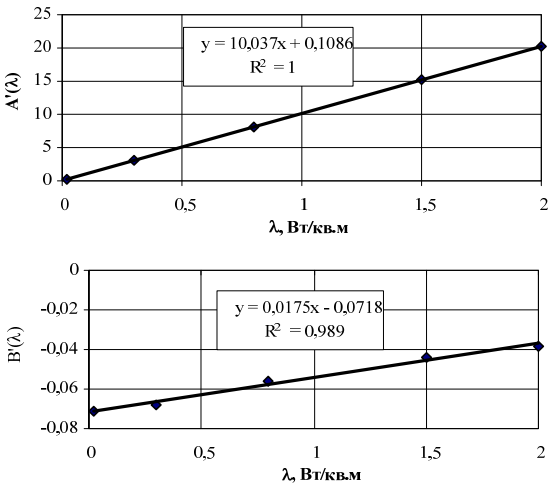

Рис. 7. Графики зависимостей $A'(\lambda)$ и $B'(\lambda)$

В результате подстановки аппроксимирующих выражений рис. 7 в формулу (3) получено выражение, представляющее собой градуировочную характеристику датчика,

$$q = \left(10{,}037\lambda + 0{,}1086\right)\Delta T + 0{,}0175\lambda - 0{,}0718\,. \qquad (4)$$

Проверка адекватности выражения (4) производилась на модели системы датчик – среда с коэффициентом теплопроводности среды, отличающимся от использованных при получении выражений (1) и (4), и показала, что расчетные значения плотности тепловых потоков отличались от эталонных не более чем на 2 %.

Таким образом, на модели показана возможность применения представленного датчика для измерения плотности теплового потока в грунте и получена зависимость между разностью температуры чувствительных элементов датчика и плотностью теплового потока при известном коэффициенте теплопроводности среды, которая представляет собой функцию преобразования датчика. Получена градуировочная характеристика датчика и путем моделирования проверена ее адекватность. При точной градуировке датчика на специальном оборудовании несимметричность системы датчик – среда может быть скомпенсирована, что дает возможность применять представленный датчик для измерения тепловых потоков малой плотности. Также полученные в процессе моделирования данные могут быть использованы при разработке модификаций конструкции датчика, а методика исследования путем электротеплового моделирования может быть использована в дальнейших исследованиях.

Список литературы

1. *Геращенко С. А., Федоров В. Г.* Тепловые и температурные измерения : справ. рук. – Киев : Наук. думка, 1965. – 304 с.

2. *Кузьмин М. П.* Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. – М. : Энергия, 1974. – 416 с.

3. *Куликов В. А., Никитин К. А., Сяктерева В. В*. Информационно-измерительная система для исследования термопреобразователей сопротивления высокого разрешения // Электронные устройства и системы : межвуз. науч. сб. – Уфа : УГАТУ, 2010. – С. 56–60.

* * *

K. A. Nikitin, Magistrand, Izhevsk State Technical University

V. A. Kulikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University

Investigation of the Gradient Sensor of Small Heat Flow in Soil

A model of a sensor-medium system on the basic of electrothermal analogy and results of heat-flux density measuring process modeling by gradient method are presented.

Keywords: electrothermal modeling, heat flow, heat flow density, sensor

Получено 12.10.10