

ИМПЕДАНСНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ СКИН-ЭФФЕКТА В ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

И.Д. Шафигуллин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

Аннотация. Представлен новый импедансный метод измерения и контроля поверхностной температуры и нестационарного теплового потока в электропроводящих теплофизических объектах. Особенность метода заключается в использовании электрического скин-эффекта, позволяющего использовать электропроводящий объект контроля в качестве чувствительного элемента, что увеличивает быстродействие измерений за счёт отсутствия дополнительных датчиков в области измерения. Путём электронного (частотного) управления толщиной скин-слоя имеется возможность изменения чувствительной области и чувствительности измерений. Применение математического аппарата дробных операторов позволяет связать нестационарный тепловой поток с поверхностной температурой, что даёт возможность одновременно измерить две теплофизические величины – поверхностную температуру и нестационарный тепловой поток. Разработан соответствующий алгоритм численного расчёта нестационарного теплового потока с использованием дробных производных половинного порядка. Проведены экспериментальные исследования предложенного импедансного метода и показаны его преимущества.

Ключевые слова: скин-эффект, поверхностная температура, нестационарный тепловой поток, дробные производные.

Введение

Количественная оценка поверхностной температуры и нестационарного теплового потока является важной задачей при контроле и диагностике теплофизических объектов. Для этого применяются контактные и бесконтактные методы измерения поверхностной температуры. При этом высокая точность измерений поверхностной температуры достигается применением контактных методов измерения на основе термоэлектрических преобразователей [1, 2], термометров сопротивления [1, 3], волоконно-оптических датчиков температуры [4-6] и другие [7]. Для измерения и контроля нестационарного теплового потока широкое применение нашли градиентные методы [8, 9].

Особенностью современных методов измерения и контроля поверхностной температуры является использование датчиков, вносимых в область измерения, что непосредственно искажает температурное поле и является основным источником инерционности измерений. Повысить быстродействие измерений поверхностной температуры можно путём использования самого объекта контроля в качестве чувствительного элемента. Такой функционал в электропроводящих объектах позволяет реализовать электрический скин-эффект, физическое явление оттеснения высокочастотного переменного тока к поверхности электропроводящего материала. В радиотехнике скин-эффект принято рассматривать как нежелательное явление и применяются соответствующие методы его минимизации. Однако, скин-эффект может найти применение при реализации датчиков физических полей, например, датчиков

концентрации газа [10], датчиков растяжения и сжатия [11], а также для радиочастотного зондирования неоднородных электропроводящих структур [12], измерения толщины защитных покрытий [13], определения шероховатости поверхности [14] и др.

В работах [15, 16] предложены способы измерения нестационарного теплового потока на основе скин-эффекта. В данной работе представлены результаты практической разработки и экспериментального исследования импедансного метода измерения и контроля поверхностной температуры и нестационарного теплового потока.

Импедансный метод измерения и контроля поверхностной температуры

Импедансный метод измерения и контроля поверхностной температуры $T_S(t)$ и нестационарного теплового потока $q(t)$ основан на применении свойств электрического скин-эффекта. В зависимости от частоты f электромагнитного сигнала изменяется толщина δ скин-слоя согласно следующему соотношению:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\mu_a \cdot \omega}} \quad (1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала, Ом·м; $\mu_a = \mu \cdot \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость материала, Гн/м; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, 1/с. С увеличением частоты f электрического тока, протекающего по материалу, плотность тока будет сосредоточена на поверхности в тонком приповерхностном скин-слое толщиной δ . На рис. 1 представлены зависимости толщины скин-слоя δ от частоты электрического тока f для распространённых электропроводящих теплофизических объектов.

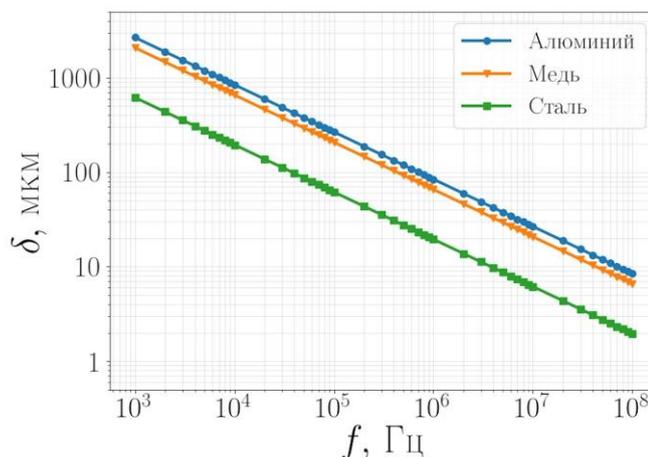


Рис. 1. Зависимость толщины скин-слоя от частоты переменного тока

На графике (рис. 1) видно, что в диапазоне частот от единиц кГц до сотен МГц толщина скин-слоя изменяется от единиц мм до единиц и долей мкм. Применением переменного электрического тока соответствующей частоты можно добиться требуемой толщины скин-слоя, которая характеризуется электрическим импедансом $Z_S(j\omega)$.

Суть импедансного метода (рис. 2) измерения и контроля поверхностной температуры заключается в установке электродов на поверхности электропроводящего объекта, через которые пропускается измерительный ток высокой частоты ω , формирующий тонкий приповерхностный электрический скин-слой δ между электродами в самом объекте.

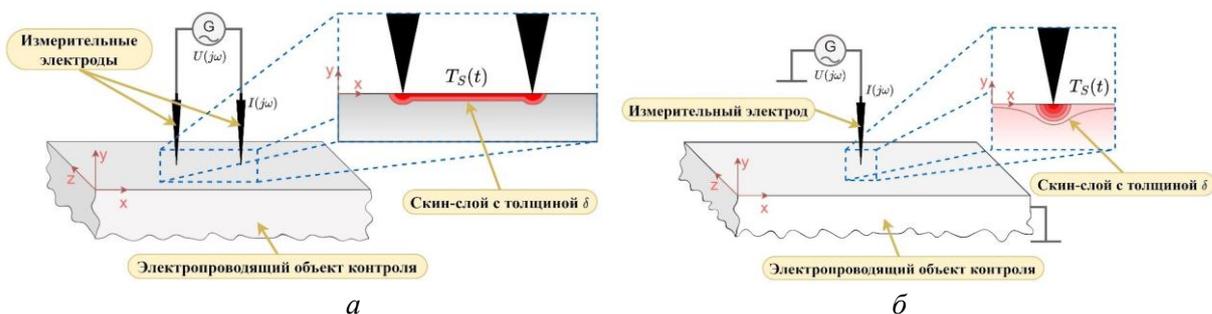


Рис. 2. Схема измерения поверхностной температуры с использованием двух (а) и одного (б) измерительных электродов

При этом сформированный скин-слой характеризуется электрическим импедансом $Z_S(j\omega)$, который имеет функциональную связь от поверхностной температуры (рис. 3). Это обусловлено тем, что электрофизические свойства (удельное электрическое сопротивление – ρ ; относительная магнитная проницаемость – μ) материала зависят от температуры объекта [17], что в свою очередь влияет на электрический импеданс $Z_S(j\omega)$ приповерхностного скин-слоя.

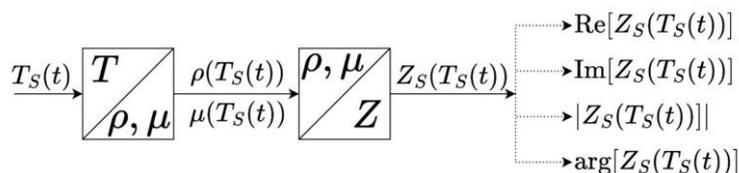


Рис. 3. Импедансный метод измерения поверхностной температуры

Так как электрический импеданс Z_S является комплексной величиной, то зависимость выражается через: резистивную составляющую $T_S(t)=f(\text{Re}(Z_S))$; реактивную составляющую $T_S(t)=f(\text{Im}(Z_S))$; модуль $T_S(t)=f(|Z_S|)$ или фазу $T_S(t)=f(\arg(Z_S))$.

При использовании двух измерительных электродов (рис. 2а) обеспечивается возможность измерения интегральной поверхностной температуры между электродами непосредственно в самом электропроводящем объекте контроля. Для локальных (точечных) измерений применима система с одним измерительным электродом (рис. 2б), при этом вторым (общим) электродом является электропроводящий объект контроля. В данном случае основная плотность электрического тока сосредоточена в точке контакта измерительного электрода с поверхностью электропроводящего объекта контроля.

Преимуществом предложенного метода является использование самого электропроводящего объекта в качестве чувствительного элемента, что позволяет снизить инерционность по сравнению с традиционными контактными методами. Оценку постоянной времени отклика на температурное воздействие можно выполнить согласно (2), полученному из выражения для темпа нагрева тела в регулярном режиме [18].

$$\tau \approx \frac{y^2}{a}, \tag{2}$$

где y – характерный размер чувствительной области, м; a – температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$.

Сравнение импедансного метода с традиционным контактным методом (рис. 4) показывает, что при использовании отдельных датчиков температуры общее время отклика измерительной системы равно $\tau_{\text{конт.}} = \tau_s + \tau_{\text{д}}$ сумме постоянных времени отклика поверхности

исследуемого объекта τ_S и самого датчика τ_D . Время отклика импедансного метода определяется только постоянной времени отклика поверхности исследуемого объекта τ_S , так как чувствительным элементом является сам электропроводящий объект контроля, а именно область между электродами.

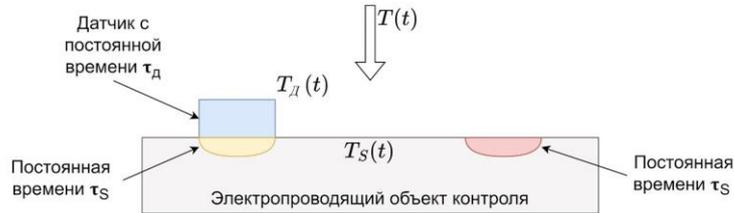


Рис. 4. Оценка быстродействия предложенного метода

Численную оценку повышения быстродействия предложенного метода по сравнению с традиционными методами можно выполнить по следующему соотношению:

$$K_B \approx \frac{\tau_{\text{конт.}}}{\tau_{\text{импед.}}} = \frac{\tau_S + \tau_D}{\tau_S} = 1 + \frac{\tau_D}{\tau_S}. \quad (3)$$

Из (3) видно, что коэффициент быстродействия для предложенного импедансного метода всегда больше 1.

Импедансный метод измерения и контроля нестационарного теплового потока

В последние годы для описания тепловых процессов широкое применение нашли дробные операторы [19]. Нестационарный тепловой поток $q(t)$ связан с поверхностной температурой $T_S(t)$ через математический аппарат дробного дифференцирования, а именно, через дробную производную половинного порядка от $T_S(t)$ по времени:

$$q(t) = -(\lambda \rho c)^{1/2} \cdot \frac{\partial^{1/2} T_S(t)}{\partial t^{1/2}}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); ρ – плотность материала, кг/м³; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); $\partial^{1/2} T_S(t)/\partial t^{1/2}$ – дробная производная половинного порядка по времени от $T_S(t)$, которая описывается интегродифференциальным уравнением Римана-Лиувилля:

$$\frac{\partial^\alpha T_S(t)}{\partial t^\alpha} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{T_S(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau, \quad (5)$$

где $0 < \alpha < 1$ – дробный порядок дифференцирования; Γ – гамма-функция.

Из (4) следует возможность измерения теплового потока $q(t)$ через измерение поверхностной температуры $T_S(t)$. Таким образом, для измерения $q(t)$ достаточно измерения $T_S(t)$. Такая особенность позволяет одновременно измерять две теплофизические величины: поверхностную температуру $T_S(t)$ и нестационарный тепловой поток $q(t)$. Однако для определения величины $q(t)$ необходимо вычисление дробной производной половинного порядка. Операция численного дифференцирования относится к некорректным задачам

и требуются специализированные методы сглаживания данных. Для этого в работе применена процедура оптимального линейного сглаживания [20]. Численный расчёт согласно (5) является неоптимальным, так как интеграл на верхнем пределе интегрирования является расходящимся.

Дробная производная половинного порядка может быть численно рассчитана с использованием свойства преобразования Фурье [21, 22] путем обобщения оператора дифференцирования $(j\omega)^\alpha$ в частотной области для дробного порядка α . Для этого предложен алгоритм (рис. 5) вычисления нестационарного теплового потока $q(t)$ при помощи соотношения (4) с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) для расчёта дробной производной половинного порядка.

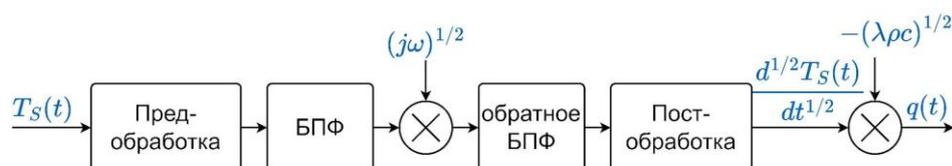


Рис. 5. Алгоритм вычисления нестационарного теплового потока

Особенностью данного алгоритма (рис. 5) является применение предобработки (экстраполяции и модифицированных оконных функций), позволяющей исключить осцилляции Гиббса при расчётах. Также предложенный алгоритм учитывает производную от постоянной составляющей, являющуюся не нулевой в случае дробных производных. Результаты оценки работы алгоритма на тестовых данных показали высокую точность, при этом относительная погрешность численного расчёта дробных производных половинного порядка не превышает 1%.

Экспериментальное исследование и результаты

Для экспериментального исследования предложенного импедансного метода измерения и контроля поверхностной температуры и нестационарного теплового потока разработана экспериментальная установка, функциональная схема которой представлена на рис. 6. В эксперименте используется точечный измерительный электрод [23], установленный на поверхности электропроводящего объекта контроля. Измерительный электрод подключен в одно из плеч измерительного моста переменного тока для формирования скин-слоя заданной толщины и измерения его импеданса. С целью увеличения чувствительности измерений применен дифференциальный и резонансный усилители. Так как импеданс скин-слоя сопоставим с импедансом соединительных проводов, применена процедура калибровки [24], позволяющая уменьшить влияние соединительных проводов и входных сопротивлений измерительных цепей. Кроме этого, на погрешность измерения предложенным методом могут оказывать влияние электромагнитные помехи, формируемые собственными электродами и соединительными проводами системы, а также другими устройствами. Поскольку конфигурация электродов и соединительных проводов не меняется в процессе измерений, их влияние компенсируется в процессе калибровки. Влияние электромагнитных помех от других устройств минимизируется за счёт узкой полосы пропускания резонансного усилителя. Подробнее экспериментальная установка и методика калибровки описаны в работах [24, 25].

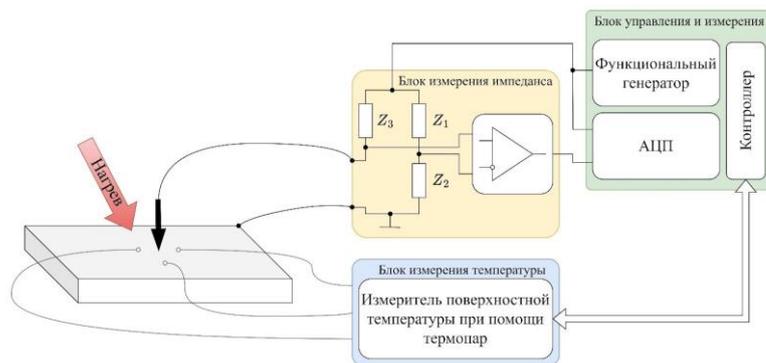


Рис. 6. Функциональная схема экспериментального стенда

Для независимого контроля поверхностной температуры исследуемого объекта установка оснащена термопарами с погрешностью менее 1°C в диапазоне температур от 0°C до 200°C . Погрешность измерения импеданса скин-слоя составляет менее 2%.

На рис. 7 представлена экспериментальная установка и измерительный электрод на поверхности электропроводящего объекта контроля. Исследуемый объект контроля – стальная пластина марки Ст3 толщиной 3мм. Источником нагрева является фен паяльной станции. Измерительный сигнал – гармоническое напряжение с частотой 1МГц, при котором образуется скин-слой толщиной менее 25мкм в электропроводящем объекте контроля. Измерительный электрод выполнен из медной проволоки диаметром 0,5мм.

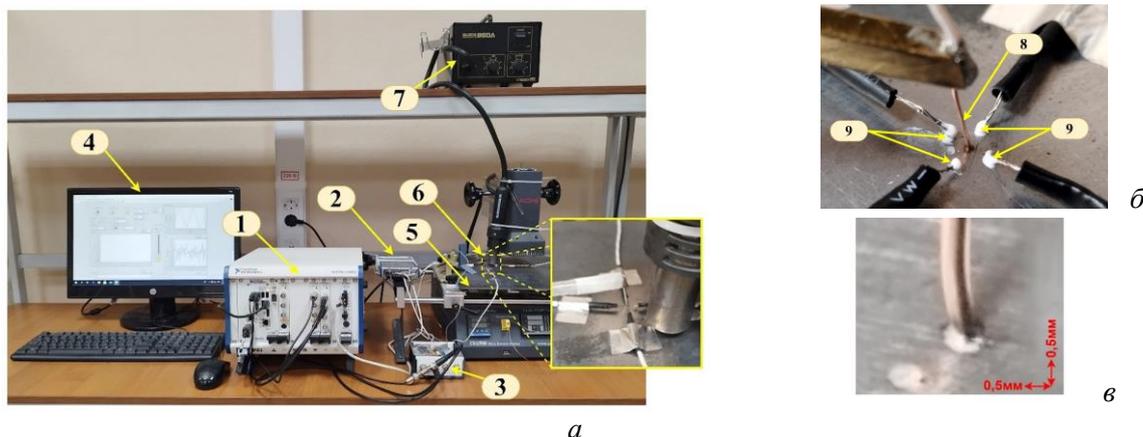


Рис. 7. Экспериментальная установка (а) и измерительный электрод на поверхности электропроводящего объекта (б и в) (1 – шасси NI PXIe-1062Q с модулями NI PXIe-8840, NI PXI-5402, NI PXI-5122 и NI PXI-4110; 2 – блок измерения температуры, на основе шасси NI USB-9162 с модулем NI cRIO-9211; 3 – блок измерения импеданса; 4 – монитор; 5 – электропроводящая исследуемая пластина; 6 – измерительный электрод и термопары; 7 – источник нагрева; 8 – медный измерительный электрод; 9 – термопары)

В ходе экспериментальных исследований определено, что резистивная составляющая электрического импеданса скин-слоя является более стабильной и имеет явный отклик на изменение поверхностной температуры. На рис. 8 представлены результаты экспериментального исследования отклика измерительной системы на скачкообразный нагрев исследуемого объекта контроля. Проведены многократные измерения для рассмотрения повторяемости измерений и получены экспериментальные характеристики преобразования (рис. 9).

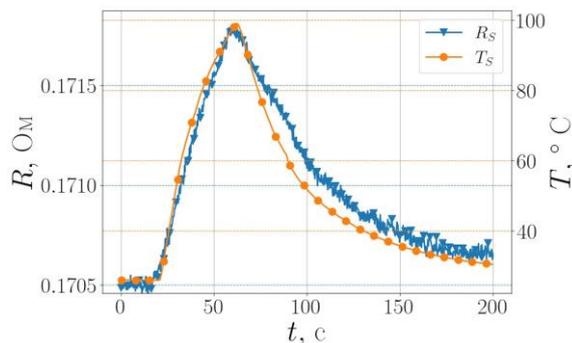


Рис. 8. Временной отклик резистивной составляющей импеданса скин-слоя на скачкообразный нагрев (кривая R_s – результаты полученные предложенным импедансным методом; кривая T_s – результаты измерения поверхностной температуры при помощи термопар)

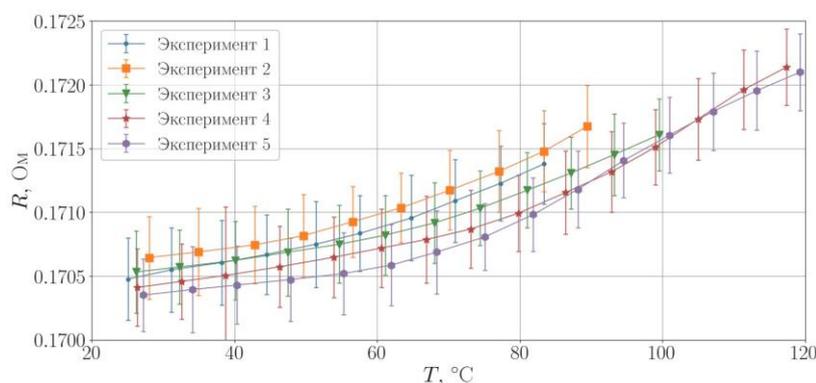


Рис. 9. Экспериментальные характеристики преобразования

По результатам эксперимента (рис. 9) определено, что коэффициент корреляции между резистивной составляющей электрического импеданса скин-слоя и поверхностной температурой объекта более 0,98. При этом чувствительность составила 0,05 мОм/°С в диапазоне температур от 20°С до 70°С и 0,07 мОм/°С в диапазоне температур от 70°С до 120°С. Расхождение (не более 10%) показаний (рис. 8) при остывании (после 60с) между результатами импедансного метода и непосредственной оценкой поверхностной температуры при помощи термопар объясняется наличием теплового сопротивления в месте контакта термопар и исследуемой пластины, из-за которой охлаждение термопар происходит быстрее, чем охлаждение самой пластины.

Проведено экспериментальное исследование импедансного метода измерения и контроля нестационарного теплового потока (рис. 10). В процессе эксперимента одновременно и независимо измерялся тепловой поток методом вспомогательной стенки.

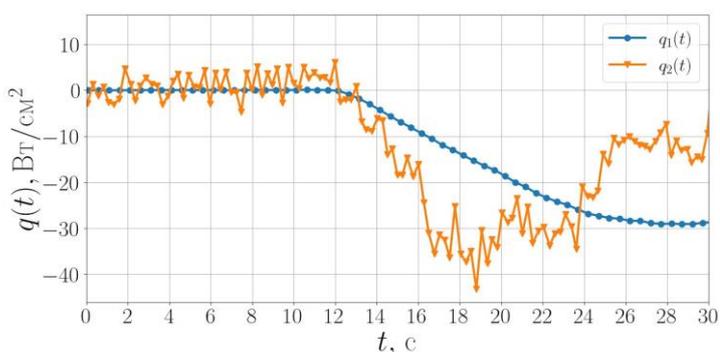


Рис. 10. Нестационарный тепловой поток, измеренный предложенным импедансным методом (кривая $q_2(t)$) и методом вспомогательной стенки (кривая $q_1(t)$)

Анализ результатов (рис. 10) показывает, что быстродействие отклика импедансного метода лучше более чем на 45% по сравнению с традиционным методом вспомогательной стенки, что наблюдается в виде ускоренной реакции на нагрев (временной интервал от 12с).

Заключение

Предложен и научно-обоснован импедансный метод измерения и контроля поверхностной температуры и нестационарного теплового потока в электропроводящих теплофизических объектах, который основан на использовании электрического скин-эффекта. Показано, что предлагаемый импедансный метод имеет расширенные функциональные возможности, а именно: а) использование самого электропроводящего объекта контроля в качестве чувствительного элемента, что позволяет повысить быстродействие измерений; б) электронное (частотное) управление толщиной δ чувствительной области (в диапазоне частот от единиц кГц до сотен МГц толщина скин-слоя изменяется от единиц мм до единиц и долей мкм), при этом появляется возможность электронного управления чувствительностью измерения; в) одновременное измерение двух физических величин – поверхностной температуры и нестационарного теплового потока; г) локальное и интегральное измерение поверхностной температуры и нестационарного теплового потока на малой и большой измерительной базе.

Экспериментальная верификация предложенного импедансного метода с использованием медного измерительного электрода показала высокую корреляцию (более 0,98) между поверхностной температурой и реальной составляющей электрического импеданса скин-слоя. Получены временные функции отклика системы на скачкообразный нагрев, а также экспериментальные характеристики преобразования. По результатам измерений нестационарного теплового потока определено, что предложенный метод имеет отклик на 45% быстрее на изменение теплового потока по сравнению традиционным методом вспомогательной стенки.

Предложенный и разработанный импедансный метод измерения и контроля поверхностной температуры и нестационарного теплового потока в электропроводящих теплофизических объектах может найти широкое применение при разработке теплофизических приборов и средств измерения, контроля и диагностики, а также в научных исследованиях.

***Благодарность.** Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю доктору технических наук, профессору Евдокимову Юрию Кирилловичу за ценные советы и оказанную помощь при выполнении исследования.*

Список литературы

1. Дивин, А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Часть 3. Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин: учеб. пособие / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, ЭБС АСВ, 2013. – 117 с.
2. Sabitov, A. F. Up-to-Third-Order Determination of Time Constants of Models of Avionics Thermocouples in Gas Temperature Control Loop of Automatic Control System of Gas Turbine Engine / A. F. Sabitov, I. A. Safina // Journal of Engineering Thermophysics. – 2024. – Vol. 33, No. 2. – P. 376-383. – DOI 10.1134/S1810232824020127.
3. Бондарь, О. Г. Исследование метода измерения температуры при двухпроводном подключении термометра сопротивления / О. Г. Бондарь, Е. О. Брежнева, К. А. Ботиков // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2024. – Т. 28, № 1. – С. 71-87. – DOI 10.21869/2223-1560-2024-28-1-71-87.

4. Щетка как интеллектуальный узел электродвигателя / О.Г. Морозов, В.И. Артемьев, А.А. Кузнецов и др. // Инженерный вестник Дона. – 2016. – №1(40). – С. 18.
5. Четырехкомпонентные адресные волоконные брэгговские структуры – новый элемент радиофотонных многосенсорных сетей / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахабутдинов, И.И. Нуреев и др. // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 6. – С. 43-65.
6. Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review / X. Zhang, H. Zhu, X. Jiang, W. Broere // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2024. – Vol. 16, No. 9. – P. 3841-3863. – DOI 10.1016/j.jrmge.2024.01.008.
7. Evdokimov, Y. K. One-dimensional continuously distributed sensors for thermophysical fields: Method of measurement, model, and numerical algorithm / Y.K. Evdokimov, E.S. Denisov, L.Y. Fadeeva // Measurement. – 2021. – Vol. 186. – P. 110082. – DOI 10.1016/j.measurement.2021.110082.
8. Сапожников, С.З. Основы градиентной теплотометрии / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2012. – 203 с. – ISBN 978-5-7422-3854-6.
9. Hofmeister, A.M. Theory and Measurement of Heat Transport in Solids: How Rigidity and Spectral Properties Govern Behavior / A.M. Hofmeister // Materials. – 2024. Vol. 17. No.18. – P.4469. DOI 10.3390/ma17184469.
10. Патент № 2739719 С1 РФ, МПК G01N 27/12. Способ определения концентрации газа: № 2020126167: заявл. 03.08.2020: опубл. 28.12.2020 / Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева, Е.С. Денисов; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ». – 11 с. – Бюл №1.
11. Broadband mechanoresponsive liquid metal sensors / Md. S. Rahman, Ju. E. Huddy, A. B. Hamlin, W. J. Scheideler // npj Flexible Electronics. – 2022. – Vol. 6, No. 1. – P. 71. – DOI 10.1038/s41528-022-00206-3.
12. Евдокимов, Ю.К. Метод и алгоритм радиочастотного зондирования неоднородных электропроводящих структур / Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2023. – Т. 26, № 2. – С.94-102. – DOI 10.22213/2413-1172-2023-2-94-102.
13. Timmerberg J. The use of skin effect for measurement of thickness of sputtered protective-coatings / J. Timmerberg, A. Martinovs // Transport and aerospace engineering. - 2014.- Vol. 1. - P. 37-42.
14. Евдокимов, Ю.К. Импеданс длинной линии с микрорельефной неоднородной поверхностью с учетом скин-эффекта / Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2019. – Т. 75, № 3. – С. 169-173.
15. Патент № 2787300 С1 РФ, МПК G01K 17/08. Способ определения нестационарного теплового потока: № 2022113215: заявл.17.05.2022: опубл.09.01.2023 / Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева, И.Д. Шафигуллин и др.; заявитель КНИТУ-КАИ». – 11 с. – Бюл. № 1.
16. Патент № 2787301 С1 РФ, МПК G01K 17/06. Способ определения нестационарного теплового потока: № 2022113216: заявл. 17.05.2022: опубл. 09.01.2023 / Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева, И.Д. Шафигуллин, Е.С. Денисов; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ». – 16 с. – Бюл. № 1.
17. Седалищев, В. Н. Физические основы получения информации. Ч.1. Генераторные и параметрические измерительные преобразователи: учебное пособие / В.Н. Седалищев – Барнаул: Изд-во АлтГТУ. – 2014. – 283 с.
18. Кондратьев, Г. М. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении: Серия «Выдающиеся ученые ИТМО». / Г.М. Кондратьев, Г.Н. Дульнев, Е.С. Платунов, Н.А. Ярышев – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2003. – 560 с.
19. Бабенко Ю.И. Метод дробного дифференцирования в прикладных задачах теории тепломассообмена / Ю.И. Бабенко. – Санкт-Петербург: НПО «Профессионал». – 2009. – 584 с.

20. Nigmatullin, R.R. On fractional filtering versus conventional filtering in economics / R.R. Nigmatullin, T. Omay, D. Baleanu // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – 2010. – Vol. 15, No. 4. – P. 979-986. – DOI 10.1016/j.cnsns.2009.05.027.

21. Реализация операции дробного дифференцирования на языке программирования Python / И.Д. Шафигуллин, Е.С. Денисов, Ю.К. Евдокимов, Л.Ю. Фадеева // *Нигматуллинские чтения - 2023: Сборник докладов Международной научной конференции, Казань, 09–12 октября 2023 года*. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2023. – С. 73-78.

22. Шафигуллин, И.Д. Оценка времени расчета производной половинного порядка, основанного на алгоритме быстрого преобразования Фурье / И.Д. Шафигуллин // VI Научный форум "Телекоммуникации: теория и технологии" ТТТ-2023 : Материалы XXV Международной научно-технической конференции, Казань, 22–24 ноября 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 2023. – С. 449-450.

23. Евдокимов, Ю.К. Частотные характеристики импеданса планарных и сферических электродных систем в электропроводящих средах / Ю.К. Евдокимов, И.Д. Шафигуллин // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. – 2024. – №10. – С. 13-22. – DOI 10.25791/pribor.10.2024.1527.

24. Шафигуллин, И.Д. Метод балансировки измерительного моста переменного тока для разработки устройства измерения нестационарного теплового потока / И.Д. Шафигуллин // *Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Чебоксары, 22 ноября 2024 года*. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2024. – С. 191-196.

25. Шафигуллин, И.Д. Система измерения и контроля поверхностной температуры электропроводящих объектов на основе импеданса скин-слоя / И.Д. Шафигуллин // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2025. – № 2(60). – С. 59-65.

IMPEDANCE METHOD BASED ON THE SKIN EFFECT FOR CONTROLLING SURFACE TEMPERATURE AND NON-STATIONARY HEAT FLOW IN ELECTRICALLY CONDUCTIVE THERMOPHYSICAL OBJECTS

I.D. Shafigullin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, K. Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. A new impedance method for measuring and monitoring surface temperature and non-stationary heat flow in conductive thermophysical objects is presented. The peculiarity of the method is the use of the electric skin effect, which allows using the conductive control object as a sensitive element, which increases the speed of measurements due to the absence of additional sensors in the measurement area. By electronic (frequency) control of the skin layer thickness, it is possible to change the sensitive area and sensitivity of measurements. The use of the mathematical apparatus of fractional operators allows us to relate the non-stationary heat flow to the surface temperature, which makes it possible to simultaneously measure two thermophysical quantities – surface temperature and non-stationary heat flow. A corresponding algorithm for numerically calculating the non-stationary heat flow using fractional derivatives of half order has been developed. Experimental studies of the proposed impedance method have been carried out and its advantages have been shown.

Keywords: skin effect, surface temperature, non-stationary heat flux, fractional derivatives.

Статья представлена в редакцию 12 марта 2025 г.