

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 624.37.328

С. С. КОЛМОГорова
С. В. БИРЮКОВ

Омский государственный
технический университет

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СФЕРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА И ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

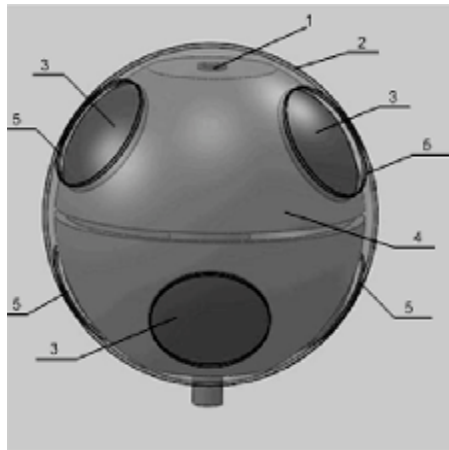
В статье описываются конструктивные особенности изотропного трехкоординатного электроиндукционного сферического датчика напряженности электростатического поля, приводятся результаты моделирования и анализ взаимодействия датчика с полями различных источников.

Ключевые слова: электростатическое поле, напряженность, сферический датчик, неоднородность.

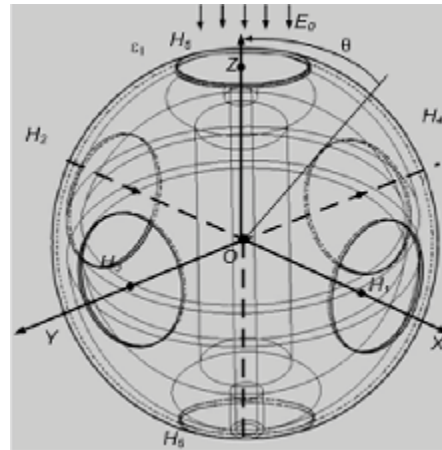
При анализе работы изотропных трехкоординатных электроиндукционных сферических датчиков (ИТЭСД) напряженности электростатического поля (ЭП) [1, 2] возникает необходимость в определении распределения напряженности ЭП на проводящей поверхности датчика. Любое проводящее тело, внесенное в ЭП, искажает его. В связи с этим датчик преобразовывает уже «искаженное» ЭП, что является причиной возникновения погрешности измерения напряженности ЭП. И чем сильнее искажения, тем больше погрешность измерения.

На примере полей различной неоднородности, вблизи источников которых помещается ИТЭСД, необходимо показать, в каких пределах можно получить измеряемые величины с точки зрения минимума погрешности.

Датчик (ИТЭСД) [1] напряженности электростатического поля (рис. 1) состоит из полой проводящей сферы радиуса R , на поверхности которой расположены три пары диаметрально противоположных круглых окон. Каждая пара круглых окон расположена на соответствующих координатных осях X , Y , Z



а



б

Рис. 1. Конструкция ИТЭСД (прозрачное изображение датчика использовано для удобства представления его внутреннего исполнения):
 1 — ось датчика; 2 — защитный кожух; 3 — чувствительный элемент;
 4 — вращающийся челнок, на котором расположены чувствительные элементы;
 5 — круглые окна;
 а — внешний вид конструкции ИТЭСД,
 б — конструктивная модель ИТЭСД с тремя парами отверстий (H_1-H_6) по осям X, Y, Z относительно оси Z

с радиусом $r_{ок}$. Внутри сферы расположен вращающийся на валу челнок. Ось вала или «ось датчика» проходит через центр сферы и располагается на равных угловых расстояниях от координатных осей круглых окон. На челноке изолированно друг от друга находятся три пары диаметрально противоположных проводящих сферических чувствительных элементов (ЧЭ) S_1-S_2, S_3-S_4 и S_5-S_6 , радиусы которых совпадают с радиусами окон $r_{ок}=r_{чэ}$ ($H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$). ЧЭ в общем случае выполняются в форме сферического сегмента, с внешним угловым размером θ_0 , являющимся его конструктивным параметром. ЧЭ располагаются по трем ортогональным осям X, Y, Z декартовой системы координат, начало которой совпадает с центром сферы.

Измерение напряженности ЭП с помощью ИТЭСД предполагается в условиях высоковольтных изоляторов, вводов-выводов, линий электропередач и высоковольтных подстанций, а также вблизи различного рода проводящих конструкций. Поэтому целесообразно смоделировать ЭП различной неоднородности. В качестве источников таких ЭП выберем электрические поля точечного заряда, диполя и заряженной проводящей линии и рассмотрим взаимодействие ИТЭСД с полями этих источников.

Для анализа вносимых искажений будем рассматривать ИТЭСД в ЭП как изолированную сферу, а датчик называть сферическим.

Согласно [3–5] для различных источников полей можно рассчитать возмущение поля, вызванное внешним сферическим датчиком. Пусть сферический датчик (рис. 1б) расположим по отношению к источнику поля так, как изображено на рис. 2. В качестве источника поля будем рассматривать точечный заряд, электрический диполь, заряженную линию.

Для изолированной проводящей сферы нормальная составляющая напряженности ЭП E_r в однородном поле будет определяться выражением [3]:

$$E_r(u) = -3E_0 \cos(u). \quad (1)$$

В поле точечного источника [3]:



**Рис. 2. Схематическое изображение сферического датчика относительно некоторого источника поля с указанием направления оси сферического датчика Z , где d — расстояние от источника ЭП до центра сферического датчика;
 R — радиус сферического датчика;
 θ — широтный угол сферической системы координат**

$$E_r(\theta) = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{1-a^2}{\sqrt{1-2a \cos \theta + a^2}} \right) \cdot E_0. \quad (2)$$

В поле электрического диполя, расположенного на одной оси со сферическим датчиком [4]:

$$E_r(\theta) = -E_0 \cdot \frac{\left(1 - \frac{c^2}{4}\right)^2}{2ac} \times \left[\frac{1 + \frac{c^2}{4} + c - a^2}{\left[\left(1 + \frac{c^2}{4} + c + a^2 - 2a \cos \theta \cdot \left(1 + \frac{c}{2}\right)\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} - \frac{1 + \frac{c^2}{4} - c - a^2}{\left[\left(1 + \frac{c^2}{4} - c + a^2 - 2a \cos \theta \cdot \left(1 - \frac{c}{2}\right)\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{c}{1 - \frac{c^2}{4}} \right]. \quad (3)$$

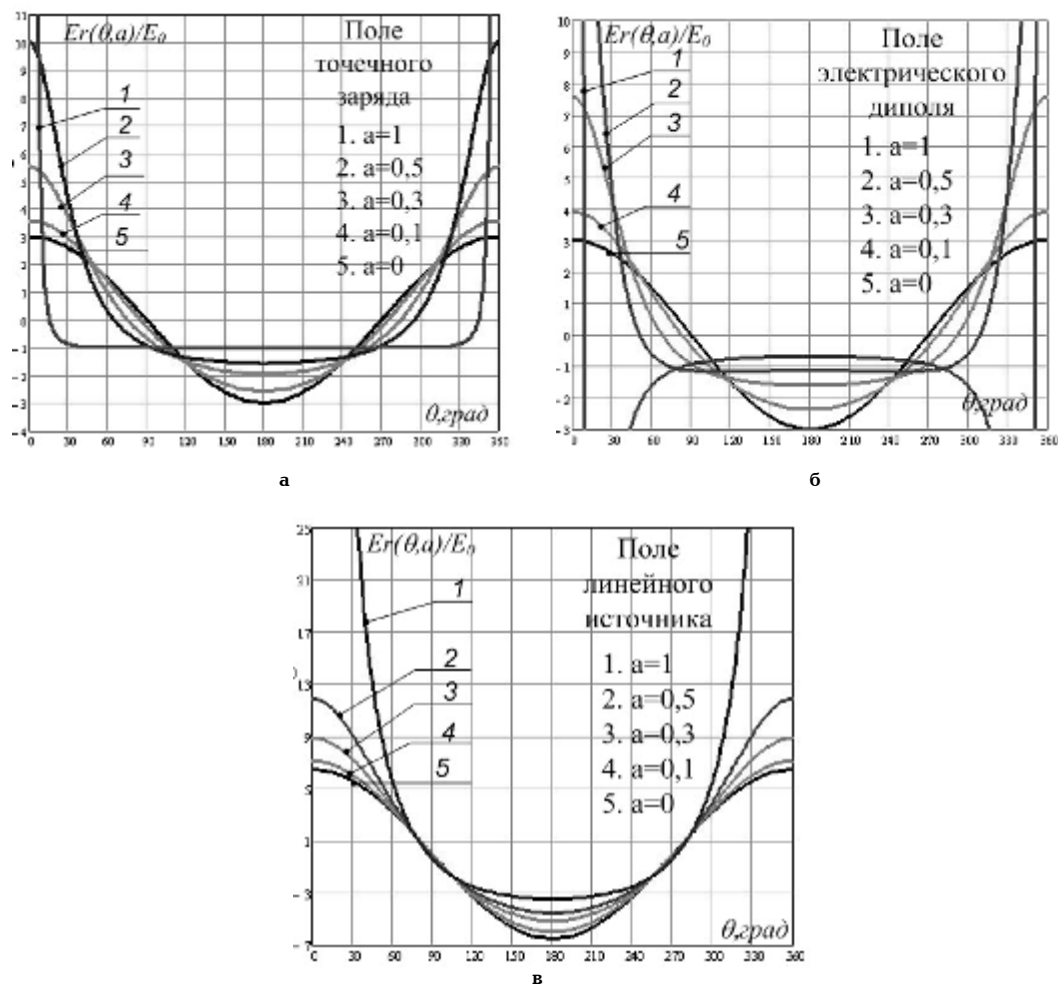


Рис. 3. Графики зависимости нормальной составляющей напряженности ЭП на поверхности сферического датчика в: а) поле точечного источника б) поле электрического диполя; в) поле линейного источника

В поле линейного источника [5]:

$$E_r(\theta) = E_0 \cdot \frac{\sqrt{1+c^2}}{2ac} \times \left(\int_{-\arctg(l/d)}^{+\arctg(l/d)} \left(\frac{1}{\cos \psi \cdot (1+a^2 \cos^2 \psi)^2} - \frac{1-a^2 \cos^2 \psi}{-2a \cos \psi \cdot \cos(\theta-\psi)^{3/2}} - \frac{1}{\cos \psi} \right) d\psi \right) \quad (4)$$

В формулах (1–4): $a=R/d$ — относительное расстояние; R — радиус корпуса сферического датчика; d — расстояние от центра датчика до источника поля; $c=l/d$, l — длина линии в случае с полем линейного источника или расстояние между точечными источниками в случае поля электрического диполя; τ — линейным зарядом постоянной плотности; θ — широтный угол сферической системы координат от оси z ; ψ — угол между центром сферы и элементарным зарядом на линии.

Выражения (1–4) были промоделированы с помощью математического пакета *Mathcad*. В результате математического моделирования были получены следующие графические зависимости нормированного значения нормальной составляющей напряженности $E_r(\theta, a)/E_0$, представленные на рис. 3.

Графическое моделирование дает наглядную картину изменения электрического поля позволяет по-



Рис. 4. Силовые линии потенциала однородного поля при внесении в него модели изолированного сферического датчика

строить в любой плоскости векторы напряженности ЭП в различных расчетных областях, а также распределение напряженности ЭП вблизи проводящих поверхностей.

С помощью программы *Elcut*, базирующийся на принципе МКЭ (метод конечных элементов), позволяющая рассчитывать ЭП с высокой точностью. С использованием *Elcut* произведено моделирование изолированного сферического датчика в полях различных источников ЭП, результаты которого представлены на рис. 4–8. В качестве окружающей среды выступает воздух.

В связи с отсутствием математического выражения нормальной составляющей напряженности ЭП

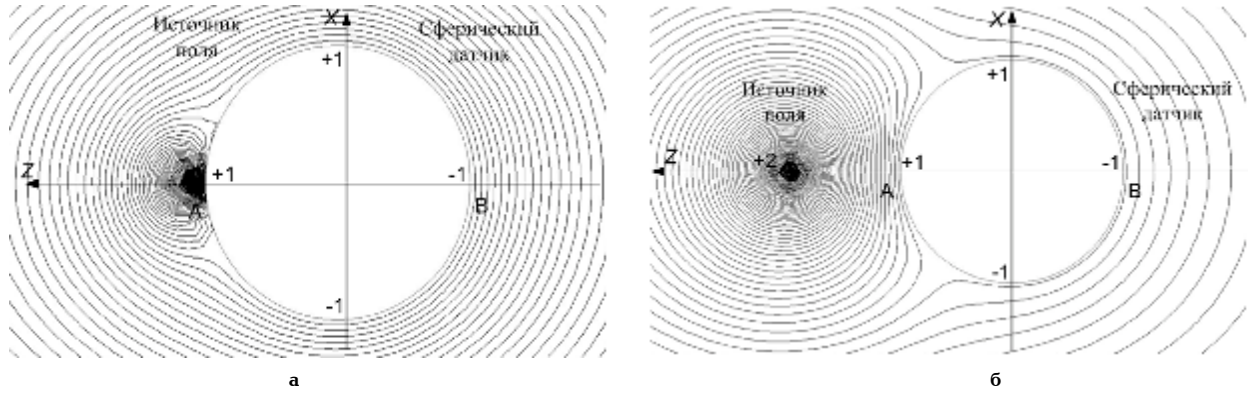


Рис. 5. Модель изолированного сферического датчика в поле точки.
Силловые линии потенциала поля точечного заряда, рассчитанные в приложении *Elcut*.
Показатель неоднородности: а — $a=1$; б — $a=0,5$

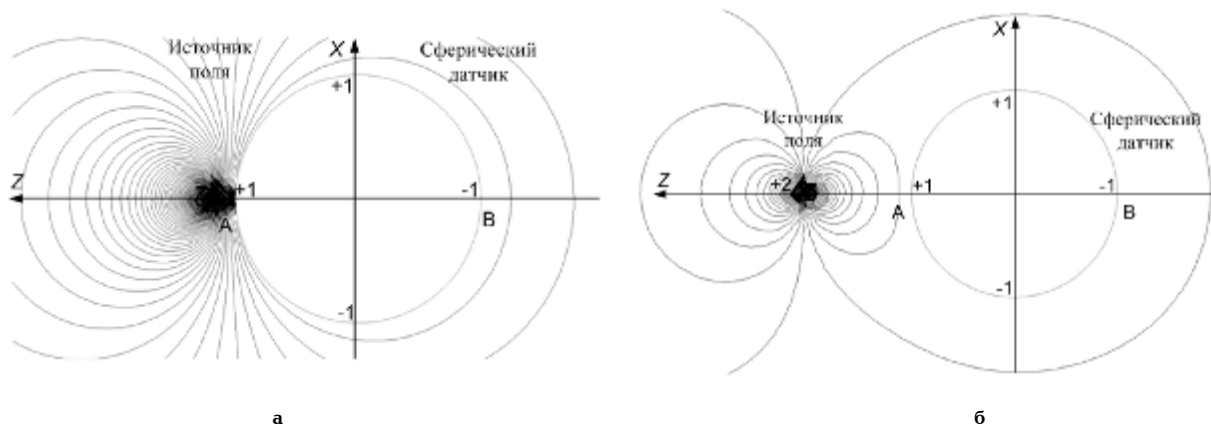


Рис. 6. Модель изолированного сферического датчика в поле электрического диполя.
Силловые линии потенциала поля электрического диполя, рассчитанные в приложении *Elcut*.
Показатель неоднородности: а — $a=1$; б — $a=0,5$

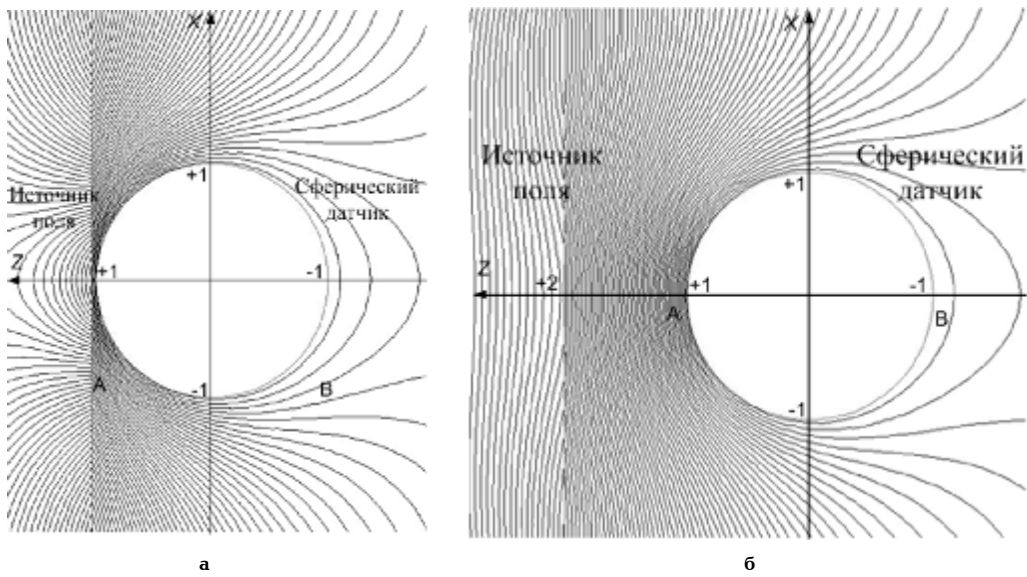


Рис. 7. Модель изолированного сферического датчика в поле линейного источника.
Силловые линии потенциала поля линейного источника, рассчитанные в приложении *Elcut*.
Показатель неоднородности: а — $a=1$; б — $a=0,5$

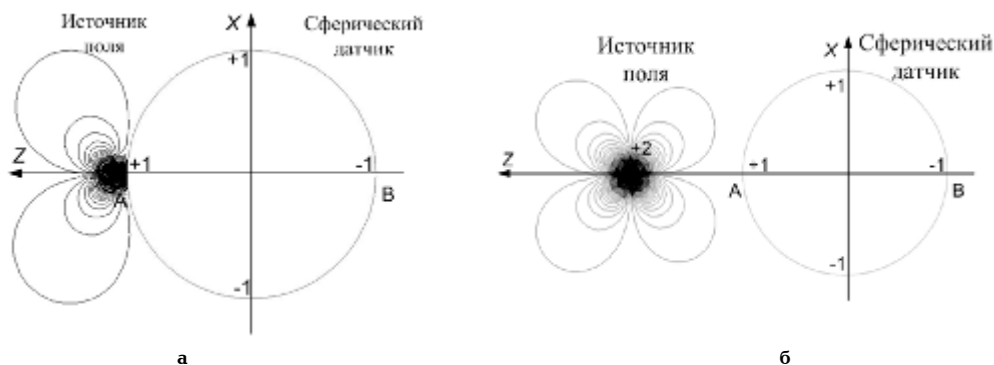


Рис. 8. Модель изолированного сферического датчика в поле электрического квадруполя. Силовые линии потенциала поля электрического квадруполя, рассчитанные в приложении *Elcut*. Показатель неоднородности: а — $a=1$; б — $a=0,5$

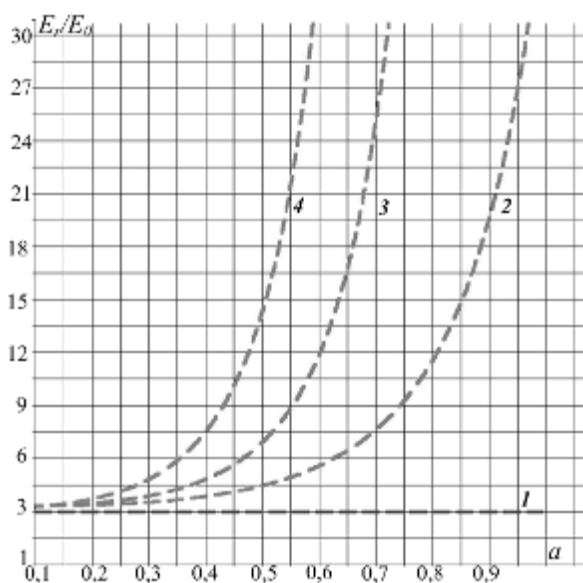


Рис. 9. Графики зависимостей полученных значений в программе *Elcut* отношения напряженностей ЭП E_r/E_0 в зависимости от показателя неоднородности a :
1 — однородное поле; 2 — поле точечного источника;
3 — поле электрического диполя, расположенного на одной оси со сферическим датчиком;
4 — поле электрического квадруполя

квадруполя и высокой сложностью вывода выражения, для анализа взаимодействия сферического датчика и этого вида источника ЭП используются модель, созданная в *Elcut*, а также аналитические данные, рассчитанные этим программным продуктом в процессе моделирования.

Результаты приведены на рис. 9. Для полюса сферического датчика $Z = +1$, обращенного к источнику ЭП, на рис. 9 показано отношения зависимости напряженности возмущенного поля E_r на поверхности изолированного сферического датчика к напряженности невозмущенного случая в геометрическом центре сферы E_0 от показателя неоднородности $a = R/d$ (d — расстояние от источника ЭП до центра сферического датчика; R — радиус сферического датчика). Для анализа взяты случаи с наибольшей плотностью распределения силовых линий, а именно поля точечного источника, электрического диполя, расположенного на одной оси со сферическим датчиком, и квадруполя.

Из графиков, представленных на рис. 9, видно, что поле квадруполя и диполя обладает большей неод-

нородностью, чем поле точечного заряда. Поэтому применимость сферического датчика в этих полях ограничивается узким диапазоном измерения, поскольку на малых расстояниях от источника ЭП возникает вероятность электрического пробоя воздуха.

Выводы и заключение

В работе проанализировано поведение сферического датчика в однородном поле, поле точечного источника, электрического диполя и квадруполя (с использованием программы *Elcut*). По плотности распределения силовых линий на рис. 4–8, соответствующие однородному полю, полю точечного источника, электрического диполя и квадруполя, можно судить о распределении напряженности на поверхности сферического датчика. Из анализа, например, рис. 4 и 5 следует, что в поле точечного заряда при показателе неоднородности $a \approx 1$ (рис. 5) прежде всего со стороны точки полюса сферического датчика, обращенной к заряду, наблюдается заметное увеличение напряженности поля (область А), тогда как с

противоположной стороны (область Б) напряженность поля уменьшается. Таким образом, в области А результаты измерений могут быть получены с наименьшей погрешностью в области с большим значением a , в то время как вблизи источника ЭП возникает максимальная неоднородность.

Исходя из полученных результатов можно увидеть, что поведение сферического датчика в полях электрического диполя, квадруполь и точечного источника отличаются. Отличие заключается в том, что поля диполя и квадруполь, обладающие по сравнению с полем точечного источника более сильной неоднородностью в области полюса сферы, обращенной к источнику поля, однако напряженность поля от источника до поверхности сферы у них убывает соответственно обратно пропорционально третьей степени расстояния от источника (в случае поля электрического диполя), пятой степени расстояния от источника (в случае поля квадруполь) и второй степени расстояния от источника (в случае точечного источника).

Область поля с сильной неоднородностью для электрического диполя и квадруполь либо соизмерима, либо значительно меньше размера датчика. Поэтому сферический датчик, попадая в поля диполя и квадруполь находится в области поля, близкой к однородному.

С ростом напряженности ЭП на полюсах сферического датчика увеличивается вероятность электрического пробоя среды, в которой находится датчик в процессе измерения. В качестве такой среды в нашем случае выступает воздух. Электрическая прочность воздуха зависит от многих параметров (в т.ч. температура, влажность, давление и др.), то электрический пробой воздуха будет зависеть от сочетания указанных параметров в момент измерения. Таким образом, ограничение использования ИТЭСД происходит, с одной стороны, за счет увеличения напряженности ЭП на полюсах сферического датчика, а с другой — за счет наличия конечного значения электрической прочности воздуха.

Книжная полка

Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин : учеб. пособие для вузов по направлению 200100 «Приборостроение» и приборостроит. специальностям / В. Н. Костюков, А. П. Науменко ; ОмГТУ, Науч.-произв. центр «Динамика». — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. — 360 с. — ISBN 978-5-8149-1101-8.

Рассмотрены теоретические и практические основы виброакустической диагностики неисправности машин и механизмов, методы анализа виброакустических сигналов. Главное внимание уделено анализу параметров виброакустического сигнала.

Галимов, Э. Р. Материалы приборостроения : учеб. пособие для вузов / Э. Р. Галимов, А. С. Маминов, А. Г. Аблясова. — М. : КолосС, 2010. — 284 с. — Гриф УМО МО РФ. — ISBN 978-5-9532-0743-0.

Приводятся общие сведения о строении, составе, структуре, технологических, эксплуатационных и специальных свойствах широкого круга электротехнических, конструкционных и других видов материалов, используемых при разработке и эксплуатации приборов, автоматов и электронных устройств. Рассматриваются способы целенаправленного регулирования структуры и свойств материалов, а также методы переработки (обработки) с учетом их функционального назначения. Рекомендовано для подготовки бакалавров, магистров и дипломированных специалистов всех форм обучения по направлениям «Приборостроение», а также «Химическая технология высокомолекулярных соединений», «Материаловедение».

Библиографический список

1. Колмогорова, С. С. Изотропный электроиндукционный сферический датчик напряженности электростатического поля / С. С. Колмогорова, С. В. Бирюков // Измерение. Контроль. Информатизация ИКИ-2011 : матер. 12-й Междунар. науч.-практ. конф. — Барнаул, 2011. — С. 105–108.
2. Баранова, С. С. Расчет напряженности электрического поля сферическим датчиком / С. С. Баранова, С. В. Бирюков // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2010 : материалы X Межд. конф. — Новосибирск, 2010. — Т. 2. — С. 87–90.
3. Бирюков, С. В. Анализ работы электроиндукционных сферических датчиков напряженности электрического поля в полях различной неоднородности / С. В. Бирюков // Магнитные и электрические измерения : межвузов. сб. науч. тр. — Омск : ОмПИ, 1983. — С. 3–5.
4. Бирюков, С. В. Расчет напряженности электрического поля на поверхности сферического датчика, находящегося в поле диполя / С. В. Бирюков, Е. В. Тимонина // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — Омск : ОмГТУ, 2007. — № 3 (60). — С. 91–93.
5. Расчет электрического поля на поверхности сферического датчика напряженности, находящегося в поле проводящей линии / С. В. Бирюков, Е. В. Тимонина // Динамика систем, механизмов и машин : матер. VI Межд. науч.-техн. конф., посвященной 65-летию ОмГТУ. — Омск : ОмГТУ, 2007. — Кн. 1. — С. 258–262.

КОЛМОГОРОВА Светлана Сергеевна, аспирантка кафедры «Системы автоматизированного проектирования машин и технологических процессов».

Адрес для переписки: e-mail: lightsun@mail.ru

БИРЮКОВ Сергей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированного проектирования машин и технологических процессов».

Статья поступила в редакцию 16.11.2011 г.

© С. С. Колмогорова, С. В. Бирюков

ВИБРОДИАГНОСТИКА МЕТОДОМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Приводятся результаты исследования применения метода фрактального анализа для классификации данных, полученных с датчика вибраций авиационного двигателя. Исследования проводятся с целью изучения возможности идентификации сигналов методами, основанными на нахождении фрактальной клеточной размерности и высоты «неровностей» сигнала по десяти точкам.

Ключевые слова: вибрация, диагностика, идентификация, коэффициент, размерность, сигнал, фрактал.

Объектом исследования послужили 13 сигналов, полученных с датчика вибрации. Анализируемые сигналы представляют собой выборки данных, полученные с датчика вибраций самолетного двигателя, проходящего полетные испытания. Достоверно известно, что первый файл представляет полет, проходящий в штатном режиме, т.е. параметры виброданных в пределах нормы — двигатель исправен. Также известно, что 13-й файл — это данные с последнего, аварийного полета, где испытание было прервано по каким-то кардинальным причинам (рис.1), а остальные 11 файлов представляют промежуточные между этими крайними значениями полеты, отражающие динамику разрушения двигателя.

Цель проведения исследования: изучить возможность классификации сигналов с датчика вибраций с помощью представленных методов. Выяснить, позволяют ли приведенные методы реализовать дальнейшую задачу диагностирования исследуемых

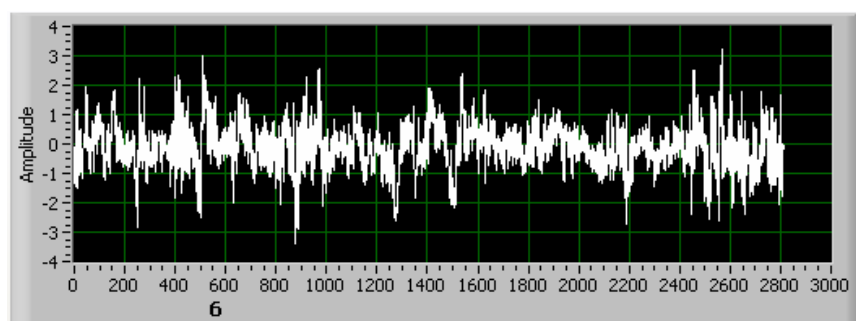
объектов. Определить, какой метод лучше производит классификацию вибросигналов.

Базовым методом, взятым за основу, является метод измерения длины береговой линии, например, Норвегии по топографической карте способом наложения сетки, описанный в [1], но используемый с некоторыми доработками и ограничениями. Для его реализации необходимо подготовить исследуемый сигнал, как описано ниже.

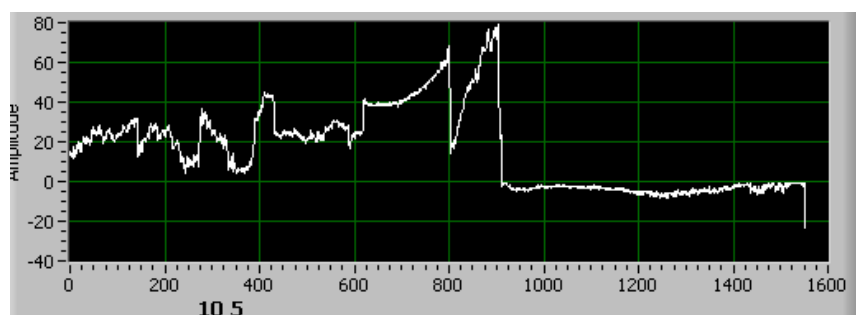
Для нахождения фрактальной клеточной размерности было применено программное обеспечение (ПО), описанное в [2], которое считывает данные из указанного файла и анализирует их по заданному алгоритму, находя D_c . Дальнейшие исследования по применению D_c и R_z проверялись с помощью электронных таблиц Excel.

Описание метода нахождения фрактальной клеточной размерности D_c .

Первый этап: подготовка сигнала.



Сигнал 1



Сигнал 13

Рис. 1. Граничные сигналы: 1 — норма, 13 — аварийный

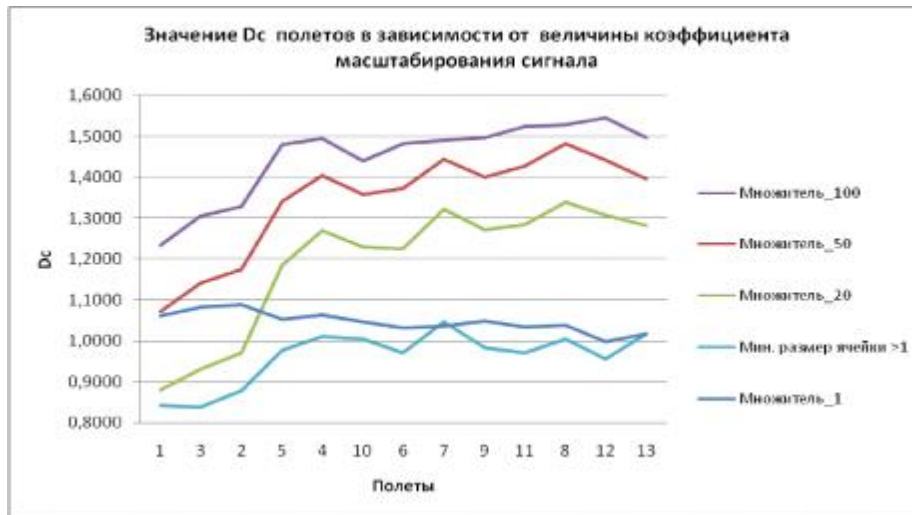


Рис. 2. Зависимость Dc от значения множителя

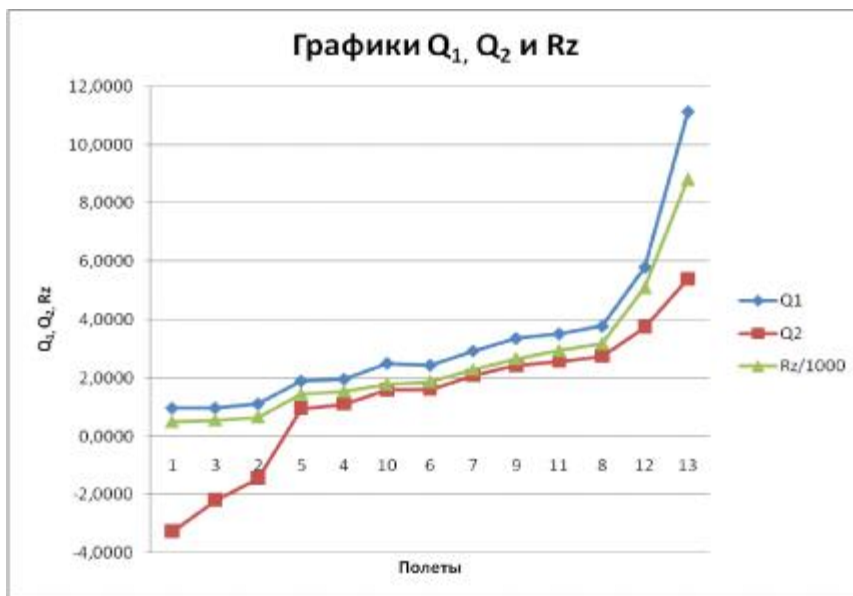


Рис. 3. Сравнение стандартной величины Rz и коэффициентов Q1 и Q2

Вводится длина сигнала в единицах измерения (Length), ограничение по максимальному количеству накладываемых сеток (Limit), и массив исследуемых данных.

Затем находится количество элементов массива (n), размер шага между отсчетами ($Sh_{min} = L/n$). Находится количество таких шагов входящих в размах сигнала (Sh). Если шагов входит больше, чем указано в значении Limit, то производится ограничение до этого значения, если меньше — то до расчетного значения Sh. После этого находится минимальный размер ячейки при наложении заданного количества сеток — Size hutch.

Второй этап: производится анализ данных по следующему алгоритму:

А) Вычисляется текущий размер ячейки сетки (hutch), равный размаху, деленному на номер итерации: $R/1, R/2, R/3 \dots R/Sh = hutch$.

Б) Сигнал покрывается сеткой с квадратной ячейкой со стороной, равной hutch.

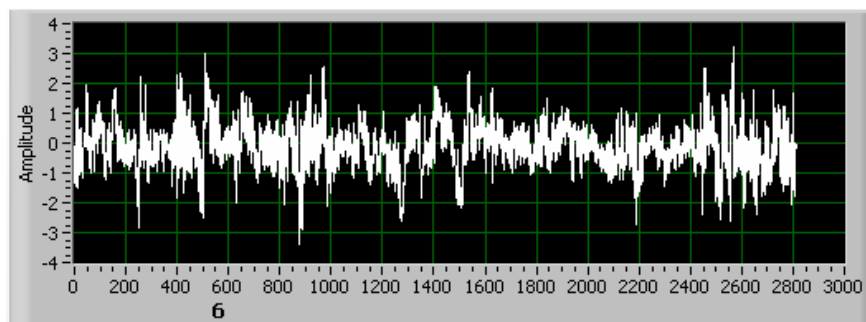
В) Подсчитывается количество ячеек, в которое попало хотя бы одно значение из выборки сигнала, и заносится в выходной массив q.

Г) Пункты Б, В повторяются для каждого значения hutch, пока выполняется неравенство $hutch \geq Sh_{min}$.

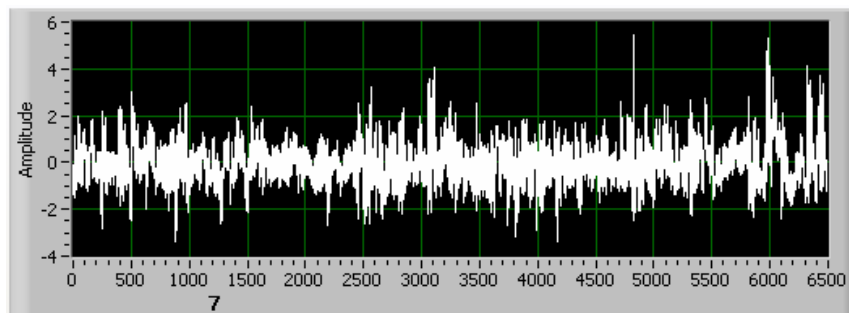
Далее, находится десятичный логарифм каждого значения массива q и массива k (последовательность 1, 2, 3 ... n).

Затем находится коэффициент наклона кривой q, который и является значением Dc.

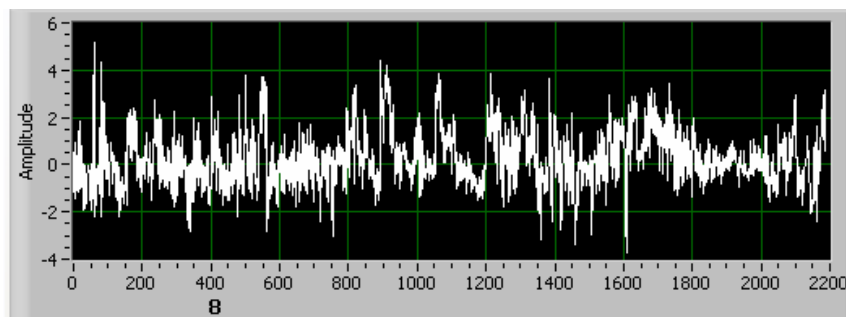
Ограничения метода. Перед нахождением Dc необходимо провести исследование группы сигналов на величину минимального размера ячейки Sh_{min} . Если величина Sh_{min} получается меньше единицы, то необходимо масштабировать сигнал по оси абсцисс, т.к. ячейка сеток квадратная, а выборка данных представляется в виде массива с элементами, увеличивающимися на единицу. Таким образом, при ячейке со стороной меньше 1, теоретически получается, что ячейка попадает между отсчетами, что приводит к ошибке метода. Соответствующие исследования были проведены, зависимости Dc сигналов полетов от множителя представлены на рис. 2. В эксперименте использовались значения Dc при множителе 100.



Сигнал 1



Сигнал 2



Сигнал 3

Рис. 4. Нормальные сигналы, равные по амплитуде, разные по Dc

Следующим этапом находится значение высоты неровностей сигнала по десяти точкам R_z [3], которое равно сумме средних арифметических (абсолютных) отклонений точек пяти наибольших максимумов и пяти наибольших минимумов данных в пределах длины сигнала.

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |y_{p_{mi}}| + \sum_{i=1}^5 |y_{v_{mi}}| \right),$$

где $y_{p_{mi}}$ — отклонение пяти наибольших максимумов сигнала; $y_{v_{mi}}$ — отклонение пяти наибольших минимумов сигнала.

После нахождения этих двух величин выполняются некоторые вычисления по следующим формулам:

$$Q_1 = \frac{(2 - Dc) \cdot R_z}{400}, \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{\log_{Dc} R_z}{1000}, \quad (2)$$

где деление на константу введено для масштабирования графиков на рис. 3.

Для сравнения классификационных возможностей, получившиеся зависимости коэффициентов

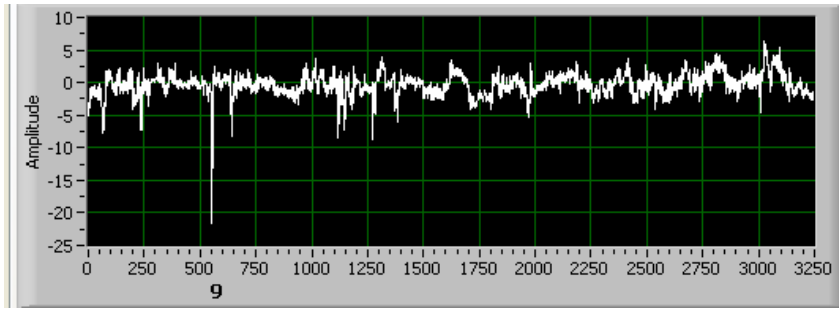
Q_1 , Q_2 и R_z от номера полета, представлены на графике (рис. 3).

При детальном рассмотрении полученных кривых видно, что стандартная величина R_z , показывающая размах сигнала, не может идентифицировать сигналы с равной амплитудой, но разной плотностью неровностей (сигналы 1, 2, 3 (рис. 4)).

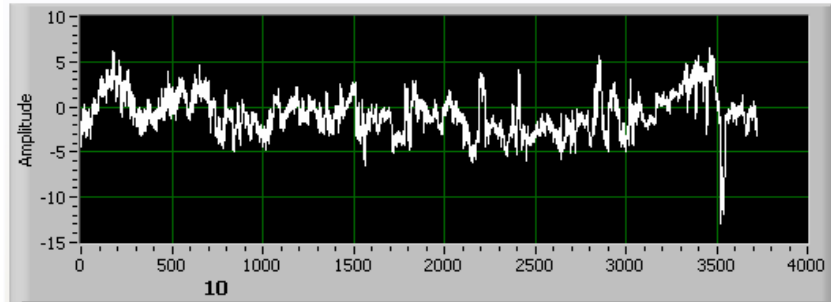
Коэффициент Q_1 практически полностью совпадает с R_z и имеет те же недостатки, что и величина R_z . (Ранее данный метод был исследован для оценки качества поверхности бумаг и описан в [4]).

Коэффициент Q_2 справляется с задачей разделения сигналов с равной амплитудой лучше, чем R_z и Q_1 , опираясь при этом на показания фрактальной клеточной размерности. Данная особенность особенно видна на первых трех сигналах (рис. 4), имеющих примерно одинаковую амплитуду.

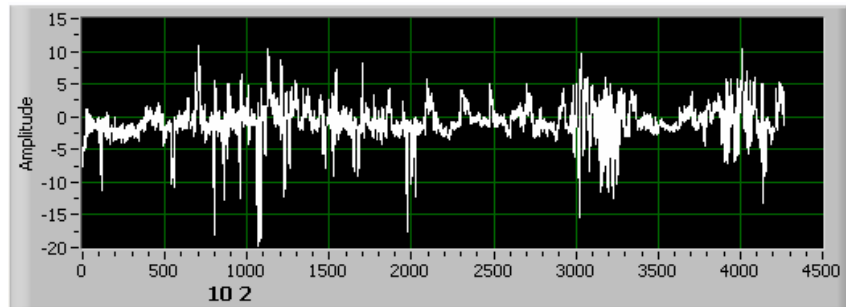
Результаты исследования. Проведя анализ всех сигналов с помощью методик, описанных выше, получилось, что оба коэффициента Q_1 и Q_2 определяют граничные полеты (1 и 13), но чувствительность этих методов различна. Коэффициент Q_1 больше подвержен влиянию параметра R_z и на графике (рис. 3) почти полностью совпадает с графиком R_z , т.е. при таком вычислении (формула 1) и разности в абсолютных величинах, влияние фрактальной клеточной



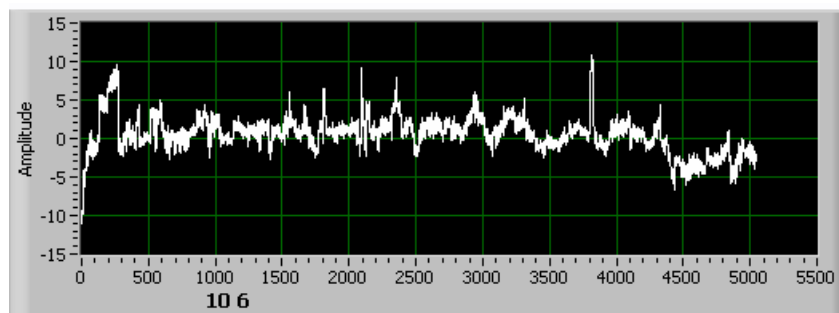
Сигнал 4



Сигнал 5



Сигнал 6



Сигнал 10

Рис. 5. Сигналы с помехами типа «всплеск»

размерности D_c на R_z полностью перекрывается значениями показателя R_z . Коэффициент корреляции рядов R_z и Q_1 равен 0,997, а рядов Q_1 и D_c — 0,52.

При нахождении коэффициента Q_2 происходят вполне видимые изменения в построении упорядоченного ряда (рис. 3). Это можно объяснить, опираясь на определение логарифма: логарифм числа b по основанию a определяется как показатель степени, в которую надо возвести основание a , чтобы получить число b . Т.е. значение степени, в которую нужно возвести показатель фрактальной клеточной размерности, чтобы получить число R_z , и есть пока-

затель Q_2 . Коэффициент корреляции рядов Q_2 и R_z равен 0,84, а рядов Q_2 и D_c — 0,9.

Однако нужно отметить, что если сигнал содержит ярко выраженные одиночные «всплески» (рис. 5), то влияние величины D_c сокращается, и определяющим параметром становится величина R_z . Это происходит, потому что значение величины D_c уменьшается незначительно, а значение величины R_z увеличивается заметно. Кроме того, из-за одиночного «всплеска» площадь покрытия сигнала сеткой увеличивается, а основной сигнал на таком уровне отсутствует. И если внимательно проанализировать алго-



Рис. 6. Пример классификации полетов по значению Q_2

ритм нахождения D_s , то становится понятно, что при увеличении размаха увеличивается размер минимальной ячейки и, соответственно, уменьшается чувствительность метода.

На рис. 2 представлена зависимость показателя D_s от сигнала, где хорошо видно, что фрактальная клеточная размерность адекватно реагирует (относительно ранжирования по R_z) на сигналы, имеющие более-менее стабильное заполнение всей области покрытия сеткой (сигналы 1, 2, 3, 6, 10). Сигналы, имеющие одиночные «всплески», «выпадают» из виденной закономерности и стоят на 3–4 места дальше, если производить упорядочивание по D_s .

При этом нужно помнить об исключениях для логарифма и, соответственно, для данных при вычислении: основание не может быть равно 1 и должно быть больше нуля, число же должно быть строго больше нуля.

Пример классификации сигналов с вибродатчика по значению показателя Q_2 приведен на рис. 6. На графике четко можно выделить «нормальные» и «аварийные» полеты. Границы «удовлетворительных» и «неудовлетворительных» полетов проставлены условно, для более точного разделения необходимо провести анализ большего количества данных.

Выводы.

1. Фрактальная клеточная размерность D_s , при анализе сигналов с вибродатчика, помогает разделять сигналы равной амплитуды, но с разной интенсивностью изменения значений. Однако она не способна адекватно реагировать на стабильные сигналы с одиночными «всплесками».

2. Стандартная величина высоты неровностей сигнала по десяти точкам R_z , отражает средний размах сигнала и способна реагировать только на данную величину, не отражая степень заполнения пространства внутри максимальной и минимальной величины. Поэтому, использование исключительно показателя R_z для анализа вибросигналов недостаточно.

3. Совместное использование величин R_z и D_s показало свою эффективность при определенной комбинации.

4. Показатель Q_1 имеет коэффициент корреляции с показателем R_z 0,997, а с D_s — 0,52. Это говорит о том, что величина D_s при вычислении Q_1 , практически не влияет на конечный результат, и, следовательно, ее использование в таком виде неэффективно.

5. Коэффициент корреляции Q_2 с показателем R_z 0,84, а с D_s — 0,9. Это отражает обоюдное воздействие двух величин на конечный результат Q_2 . И позволяет произвести классификацию исследуемых сигналов на «нормальные», «удовлетворительные», «неудовлетворительные» и «аварийные».

6. На основании проведенных исследований можно утверждать, что предложенные методики комплексного использования классического и фрактального анализа могут быть применены для идентификации и классификации сигналов при вибродиагностике.

7. Проведенные исследования носили пробный характер и показали, что выбранное направление работ имеет перспективы дальнейшего развития.

Библиографический список

1. Федер, Е. Фракталы / Е. Федер // Пер. с англ. — М. : Мир, 1991. — 254 с.
2. Программа определения фрактальной размерности полиграфических материалов / А. В. Голунов, Л. Г. Варепко, С. З. Ихлазов. — М. : ОФЕРННО, 2010. — № 50201001494.
3. ГОСТ 2789–73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Дата введения 01.01.75 — М.: Стандартинформ, 2006. — 6 с.
4. Определение качества поверхности бумаги методом фрактального анализа / В. Ю. Кобенко, С. З. Ихлазов, А. В. Голунов // Омский научный вестник. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. — № 3(103). — С. 330–334.

ИХЛАЗОВ Сайдбек Зугумович, аспирант кафедры «Технология электронной аппаратуры». Адрес для переписки: ihlasov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.12.2011 г.

© С. З. Ихлазов

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ОСНОВЫ АНАЛИЗИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРИБОРАХ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В статье приводятся исследования, в результате которых созданы алгоритм и программное обеспечение, позволяющие выполнять идентификацию различных групп материалов при проведении спектрального анализа металлов и сплавов. Применение алгоритма позволило повысить точность и надежность при измерении интенсивностей спектральных линий, а следовательно, количественного содержания элементов примесей неизвестных материалов.

Ключевые слова: спектральный анализ, неизвестные материалы, эталонные спектры, реперные линии, идентификация.

Системы контроля качества материалов в настоящее время широко используются на транспорте, в промышленности и энергетике при изготовлении высокотехнологичной продукции и ремонте сложной техники. В условиях промышленных цехов и предприятий ежедневно приходится сталкиваться с деталями, выполненными из большого числа марок материалов. При этом недопустима подмена одной марки материала другой, поскольку возникает опасность невыполнения заложенных физико-механических свойств, таких как прочность, упругость, коррозионная стойкость и других.

Использование автоматизированных систем контроля налагает особые требования принятия решения без участия человека. Большое значение уделяется переносу накопленного опыта специалистов и его воплощению в методическом и программном обеспечении автоматизированных систем контроля. Используя опыт внедрения приборов и технологий контроля материалов на предприятиях транспорта, энергетике, приборостроения авторами были выработаны предложения по расширению функциональных возможностей оборудования [1].

В работе приведены исследования и рекомендации по автоматическому определению типа основы анализируемых материалов в приборах спектрального анализа. Спектры различных материалов получены при помощи отечественного спектрометра типа «Аргон-5СФ», выполненного на уровне современных зарубежных аналогов. Спектрометр содержит методики для определения количественного состава материалов с различными основами. Задача контроля неизвестных материалов является актуальной и на сегодняшний день до конца не решенной.

Наборы одинаковых элементов могут встречаться в различных материалах [2]. Для правильного распознавания марки определяемого материала необходимо на первом этапе определить, к какой группе относится материал, другими словами, определить тип основы сплава (железо, медь, алюминий, никель, цинк, титан и др.). Далее по регламентируемому на-

бору возможных элементов примесей следует измерить интенсивности и выполнить определение их количественного состава по имеющейся методике и подобрать наиболее подходящую марку материала [3].

Сущность предлагаемого метода заключается в сравнении спектров материала с неизвестным составом со спектрами, полученными расчетным путем, имеющим отличительные признаки известных групп сплавов.

На первом этапе решается задача качественного анализа с определением типа основы и легирующих элементов примесей. На рис. 1 и 2 представлены спектры стандартных образцов (СО) стальных сплавов. Образцы имеют одинаковую основу (Fe), но разное количество легирующих элементов, что выражается в различном количестве и интенсивностях линий в спектре. Для сравнения СО IARM27D (близкий к чистому железу) имеет 3655 спектральных линий против 3973 у образца лг34а (хромоникелевая сталь). Из чего следует, что 318 спектральных линий приходится на линии легирующих элементов.

Как видно из рисунков, общее количество спектральных линий в представленных спектрах различно, однако имеются общие характерные линии основы материала (Fe), всегда присутствующие в спектрах стандартных образцов и определяемых марок материалов, называемые реперными.

Количественное содержание элементов примесей для сталей представлено в (табл. 1). Содержание основы материала получают из выражения:

$$C_{oc} = 100 - \sum_{i=1}^n C_i ; \quad (1)$$

где C_i — содержание элементов примесей легирующих элементов, %; n — количество легирующих элементов в сплаве.

Как видно из таблиц, представлены данные чистых металлов с содержанием элементов от 0,001 % и образцов с содержанием легирующих элементов до 40 %.

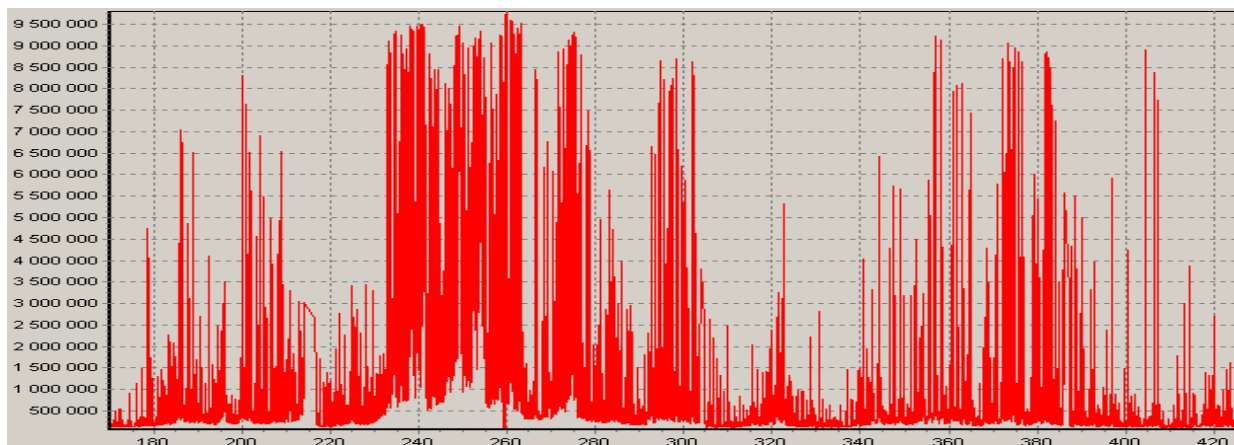
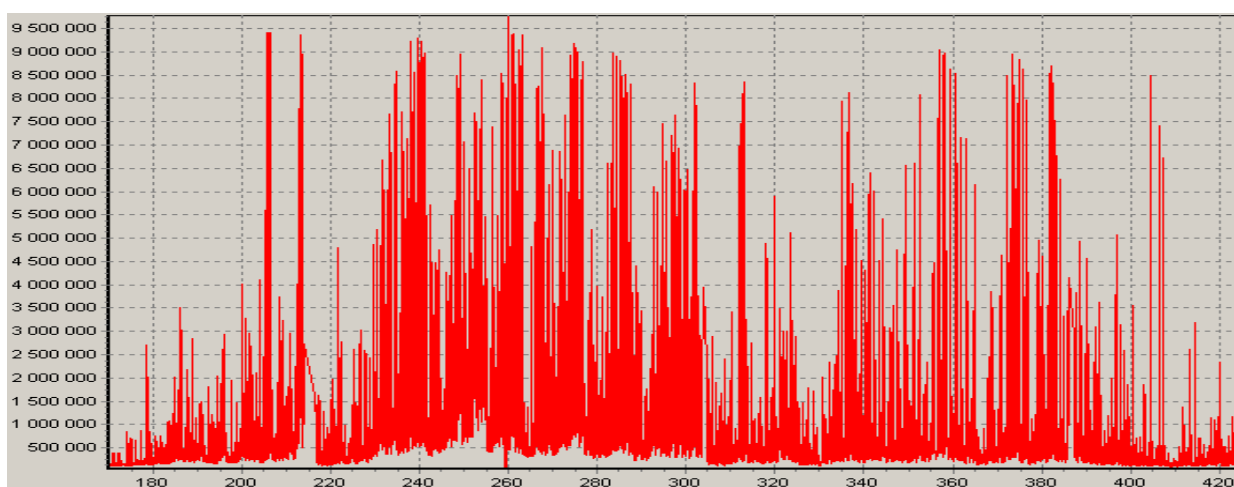
Рис. 1. Спектр СО IARM27D (содержание основы $C_{Fe}=99,97\%$)Рис. 2. Спектр СО лг34а (содержание основы $C_{Fe}=69,49\%$)

Таблица 1
Количественное содержание элементов основы и примесей
в стандартных образцах методик «Низколегированные стали»
и «Хромоникелевые стали»

| Элемент | Стандартные образцы | | |
|---------|---------------------|--------|--------|
| | IARM27D | угби | лг34а |
| Si | 0,003 | 0,404 | 0,8 |
| Ni | 0,003 | 0,328 | 9,67 |
| Mn | 0,001 | 0,366 | 0,376 |
| Cr | 0,002 | 1,79 | 17,44 |
| Mo | 0,001 | 0,205 | 0,282 |
| V | — | 0,351 | 0,209 |
| Ti | 0,001 | 0,015 | 0,93 |
| Cu | 0,001 | 0,239 | 0,234 |
| Al | 0,001 | 0,55 | 0,06 |
| W | 0,002 | 0,136 | 0,31 |
| Fe | 99,973 | 95,221 | 69,490 |
| C | 0,002 | 0,248 | 0,198 |
| S | 0,001 | 0,008 | 0,006 |
| P | 0,001 | 0,02 | 0,010 |

Таблица 2
Реперные линии методики низколегированных сталей (СО угби)

| № п/п | Номер ПЗС | Номер участка | Элемент | Длина волны, нм | Интенсивность, ×1000 |
|-------|-----------|---------------|---------|-----------------|----------------------|
| 1 | 2 | 1 | Fe | 232,739 | 8349 |
| 2 | 2 | 1 | Fe | 233,131 | 8512 |
| 3 | 2 | 1 | Fe | 233,280 | 9030 |
| 4 | 2 | 2 | Fe | 243,007 | 7601 |
| 5 | 2 | 2 | Fe | 244,451 | 7907 |
| 6 | 2 | 2 | Fe | 244,556 | 6318 |
| 7 | 2 | 2 | Fe | 245,878 | 7546 |

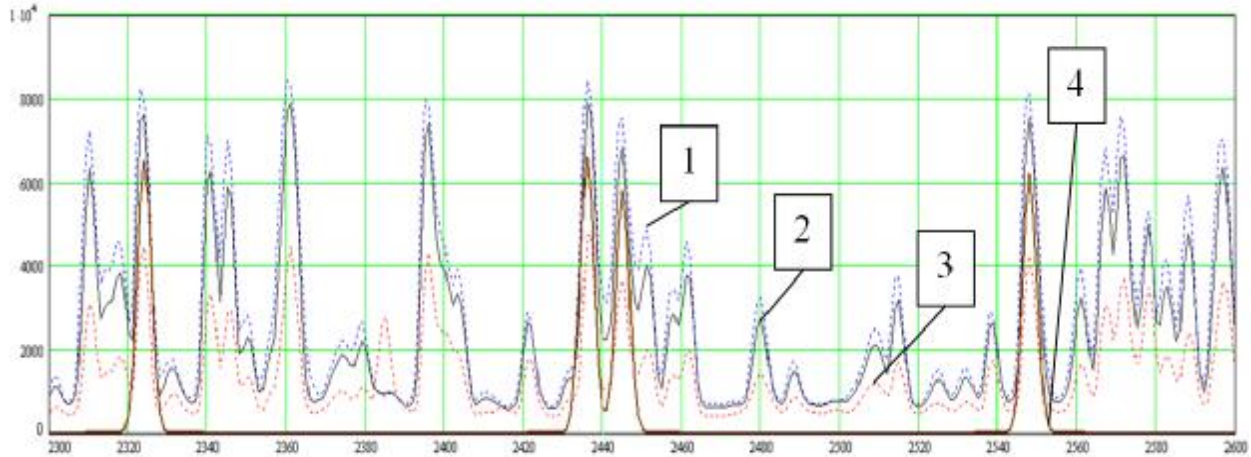


Рис. 3. Формирование эталонного спектра по реперным линиям 243,007; 244,451; 244,556; 245,878 нм:
1 — спектр образца IARM27D, 2 — угби, 3 — лг34а, 4 — эталонного спектра

В спектрометре типа «Аргон-5СФ» для регистрации оптического спектра используются шесть твердотельных детекторов излучения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Спектральный диапазон, приходящийся на вторую диодную линейку и реперные линии на двух анализируемых участках, используемые методикой низколегированных сталей приведены в табл. 2.

Для различных материалов с разными основами (для стали — Fe, бронзы и латуни — Cu, никелевые сплавы — Ni, цинковые сплавы — Zn и др.) существуют свои наборы реперных линий, по положению которых можно идентифицировать основу того или иного сплава.

На рис. 3 показан эталонный спектр, построенный по измеренным спектрам трех стандартных образцов сталей IARM27D, угби, лг34а с различной степенью легирования. Концентрация элемента основы (Fe) изменяется от 69,49 до 99,97 %. Спектры зарегистрированы вторым приемником ПЗС спектрометра «Аргон-5СФ». Согласно табл. 2, на втором анализируемом участке второго приемника ПЗС, число реперных равняется 4, длины волн, соответственно, равны 243,007; 244,451; 244,556; 245,878 нм. По вертикальной оси отложены абсолютные интенсивности излучения спектральных линий, по горизонтальной — порядковый номер фотодиода (пиксель) на рассматриваемом ПЗС.

Для представления эталонного спектра используют моделирование участков, содержащего реперные линии, всегда присутствующие в спектре рас-

сматриваемого материала, математическим выражением. Математическое выражение эталонного спектра принято с целью экономии вычислительных ресурсов управляющего компьютера.

Для построения эталонного спектра использовалась упрощенная функция Гаусса, обоснованная ранее в работе [4]:

$$\Psi(t) = f + \sum_{j=0}^{k-1} I_j \cdot \text{Gauss} \left(\frac{t - L_j}{\sqrt[n]{I_j}} \right)^n, \quad (2)$$

где $\text{Gauss}(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)$; t — аргумент функции, вы-

ражающий изменение длины волны в спектре; L — длина волны максимума интенсивности заданной линии; I — максимум интенсивности реперной линии; n — коэффициент разрешения спектрального прибора; k — число характерных линий «окна» текущего ПЗС; f — пороговое значение фона при сканировании спектра.

При определении интенсивностей реперных линий в эталонном спектре использовалось выражение (3), учитывающее среднестатистическое значение возможных интенсивностей аналогичных линий более чем в 90 стандартных образцах, используемых при калибровке методик низколегированных и хромоникелевых сталей:

$$I_{ej} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{rij} \cdot P_{ij}, \quad (3)$$

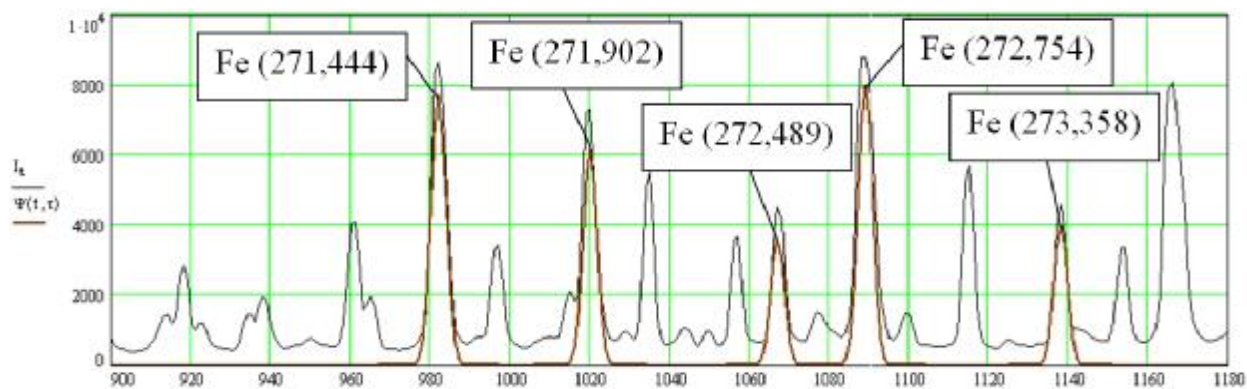


Рис. 4. Сравнение эталонного и измеренного спектра СО угли по реперным линиям

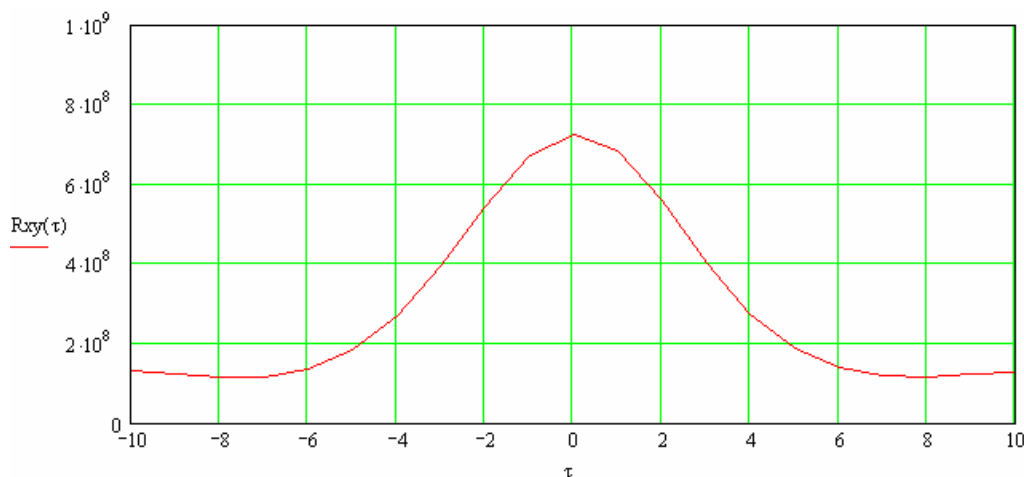


Рис. 5. График взаимнокорреляционной функции для реперных линий третьей ПЗС

I_{rij} — интенсивности реперных линий измеренных спектров СО; p_{ij} — статистический вес интенсивности реперной линии для каждого измеренного спектра; n — количество измеренных спектров; j — индекс реперной линии.

Для идентификации основы материала используют моделирование участков при помощи эталонного спектра, содержащего набор характерных реперных линий, всегда присутствующих в спектре рассматриваемого материала. Эталонный спектр предлагается представлять в виде математического выражения. На этом шаге выполняется совмещение мгновенных значений измеренного спектра и аналитического выражения эталонного спектра. Степень соответствия оценивается взаимнокорреляционной функцией (4) при смещении эталонного спектра, относительно измеренного, на величину интервала поиска τ .

В качестве примера на рис. 4 показан эталонный спектр для идентификации основы сталей на третьем ПЗС спектрометра «Аргон-5СФ» и измеренный спектр СО углеродистой стали угли. В качестве реперных показаны линии железа с длинами волн 271,444; 271,902; 272,489; 272,754 и 273,358 нм.

Взаимнокорреляционная функция для распознавания нужных аналитических линий, их наличия в спектре и дальнейшего определения максимума рассчитывается согласно выражению:

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=1}^n (\Psi(t, \tau) \cdot Ysm_i), \quad (4)$$

где Ysm_i — значения вектора измеренных мгновен-

ных интенсивностей, сглаженные методом скользящей медианы.

Наличие максимума вблизи нулевого значения указывает на правильность поиска и наличия нужных реперных линий в спектре (качественный показатель идентификации). График взаимной корреляционной функции (4) для реперных линий первой ПЗС с параметром смещения $\tau = \pm 10$ пикселей, показан на рис. 5.

Количественная оценка правильности идентификации найденных аналитических линий оценивалась путем расчета коэффициента корреляции ρ_{xy} , и остаточного стандартного отклонения σ_{xy} для измеренного и эталонного спектров:

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(\Psi(t), Ysm_t)}{\sigma_{\Psi} \sigma_y}; \quad (5)$$

$$\sigma_{xy}^2 = \frac{\sum (Ysm_i - \Psi(i))^2}{n - 1}, \quad (6)$$

где n — число пикселей в окне поиска линий; $\text{cov}(\Psi(t), Ysm_t)$ — ковариация значений $\Psi(t)$ и Ysm_t ; σ_{Ψ} , σ_y — стандартные отклонения значений $\Psi(t)$ и Ysm_t от среднего.

Предлагаемый способ обеспечивает повышение точности идентификации типа основы анализируемого материала. Применение двухступенчатого алгоритма позволяет существенно повысить достоверность автоматизированного поиска нужных аналитических линий, особенно для материалов с насыщенными спектрами (стали, никелевые сплавы и др.)

и уменьшить влияние мешающих факторов (температура, нестабильность разряда плазмы и др.). Достоверная идентификация и последующее измерение параметров спектральных линий были получены во всех случаях при $\rho_{xy} > 0,9$ и $\sigma_{\text{отн}} < 10\%$.

Способ реализован в виде процедуры, работающей совместно со штатным программным обеспечением спектрометра типа «Аргон-5СФ», включающим блок регистрации спектров на линейных ПЗС.

Библиографический список

1. Кузнецов, А. А. Модернизация оборудования для диагностирования и ремонта подвижного состава [Текст] / А. А. Кузнецов, О. Б. Мешкова, В. А. Слептерев, А. В. Шахов // Транспорт-2009 : сб. тр. Междунар. научн. конф. — Ростов н/Д, 2009. — С. 46–50.
2. Нахмансон, М. С. Диагностика состава материалов рентгенодифракционными и спектральными методами [Текст] / М. С. Нахмансон, В. Г. Фекличев. — Л. : Машиностроение, 1990. — 357 с.

3. Серебренников, И. В. Новые возможности пакета АТОМ: модуль для проведения автоматического качественного анализа [Текст] / И. В. Серебренников, В. И. Вершинин // Применение анализаторов МАЭС в промышленности : сб. тр. IX Междунар. симпозиума. — Новосибирск : Академгородок, 2008. — С. 51–55.

4. Зажирко, В. Н. Способ идентификации и измерения параметров спектральных линий в автоматизированных системах контроля / В. Н. Зажирко, А. А. Кузнецов, С. М. Овчаренко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2006. — № 5. — С. 39–45.

ШАХОВ Андрей Владимирович, аспирант кафедры «Теоретическая электротехника».

КУЗНЕЦОВ Андрей Альбертович, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника».

Адрес для переписки: ShahovAV@omgups.ru

Статья поступила в редакцию 27.01.2012 г.

© А. В. Шахов, А. А. Кузнецов

Информация

Конкурс на соискание премий за выдающиеся научные результаты

Российская академия наук (РАН) и Национальная академия наук Украины (НАН Украины) объявляют конкурс на соискание трех премий за выдающиеся результаты, полученные российскими и украинскими учеными при проведении совместных исследований в области естественных, технических, гуманитарных и общественных наук и имеющие важное научное и практическое значение.

Присуждение премии будет осуществлено в 2012 году.

В конкурсе на соискание премий могут участвовать только российские и украинские ученые, которые являются гражданами Российской Федерации и Украины и работают в научных учреждениях РАН и НАН Украины.

На конкурс могут быть представлены работы или серии совместных работ, выполненные коллективами ученых из научных учреждений РАН и НАН Украины. Число участников, выдвигаемых на конкурс, не должно превышать трех человек с каждой стороны, при этом количество участников совместных исследований с российской и украинской стороны может быть неодинаковым.

Право выдвижения работ на соискание премий предоставляется научным учреждениям РАН и НАН Украины, а также действительным членам и членам-корреспондентам обеих академий по их специальности.

Работы (циклы совместных публикаций, разработок, изобретений), представляемые на конкурс, должны одновременно направляться в президиумы двух академий с пометкой «На соискание премии РАН и НАН Украины». К комплекту совместных публикаций, представляемых в трех экземплярах, прилагаются: аннотация, характеризующая выдвигаемую на конкурс работу, ее значимость, подписанная авторами; выписка из протокола заседания ученого совета научного учреждения о выдвижении или рекомендация академика либо члена-корреспондента академий, включающая аргументированную оценку результатов совместных исследований, их значение для науки и практики; копии технической документации других материалов, свидетельствующих о важности полученных результатов; сведения об организациях-партнерах и условиях сотрудничества; сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, краткая научная биография (Curriculum Vitae), место работы, должность, информация о вкладе каждого из авторов в совместную работу.

Срок представления работ, выдвигаемых на конкурс, истекает **30 июня 2012 года**.

Работы с российской стороны вместе с перечисленными документами следует представлять в Президиум Российской академии наук по адресу: 119991, ГСП Москва, Ленинский проспект, 14, корпус 1, Евсееву В. В. Контактный телефон (499) 237-69-68.

Сообщение о конкурсе на сайте РАН: <http://www.ras.ru/>

Источник: http://www.rsci.ru/grants/grant_news/297/231918.php (дата обращения: 10.04.2012)