

Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

УДК 681.785

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ФЛУОРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В.С. Куликов¹, В.Н. Гришанов², К.В. Черепанов²

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Самарский национальный исследовательский университет имени С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

***Аннотация.** Разработана математическая модель, позволяющая оценивать энергетические характеристики информационно-измерительной флуорометрической системы, предназначенной для измерений интенсивности флуоресцентного излучения кожного покрова человека *in vivo*. Модель реализована в пакете компьютерной математики *Mathcad* и состоит из блоков, моделирующих энергетические характеристики пассивных оптических элементов, излучателей и фотоприемников на основе законов фотометрии. Для построения моделей элементов используются справочные, литературные и экспериментальные данные по ним. Основное назначение модели – оперативное количественное сравнение конструктивных решений прибора по энергетическому критерию (выходному сигналу фоточувствительного элемента – фотодиода). Заданные явно математические функции обеспечивают открытость модели и доступность ее модификации пользователем.*

***Ключевые слова:** математическая модель, поток излучения, лазер, светодиод, фотодиод, светофильтр, флуориметр, фотометрия.*

Введение

Кожа человека является наиболее доступным объектом диагностики *in vivo*. Кожный покров – это своеобразный аккумулятор продуктов, отражающих процессы, которые происходят в организме. Измерение автофлуоресценции кожи (АФК) востребовано в медицине для оценки содержания конечных продуктов гликирования (КПГ). По их содержанию прогнозируются осложнения при диабете, ишемической болезни сердца, операциях по пересадке почек и хроническом гемодиализе [1–4]. Измерение содержания КПГ по уровню АФК используется в дерматологии для определения биологического возраста кожи [5] и оценки ак-

Куликов Виктор Сергеевич, аспирант.

Гришанов Владимир Николаевич (к.т.н.), доцент кафедры «Лазерные и биотехнические системы».

Черепанов Константин Владимирович, аспирант.

тивности процессов биоокисления в тканях [6]. Флуоресценция КПП возбуждается излучением в спектральном диапазоне 300–420 нм, а свечение излучения флуоресценции продуктов КПП наблюдается в спектральном диапазоне 420–600 нм.

Измерение содержания КПП по уровню АФК в настоящее время принято в качестве одного из обязательных параметров для прогнозирования риска осложнений в сердечно-сосудистой системе диабетика [7] и получило приборное обеспечение в форме семейства приборов AGE Reader компании DiagnOptics Technologies B.V. [8]. С их помощью выполнены исследования, результаты которых приведены в [1–3]. Приборы AGE Reader имеют размеры нетбука и просты в эксплуатации. Сама процедура диагностики не превышает 5 минут и состоит в том, что пациент прикладывает внутреннюю сторону предплечья к оптическому окну прибора, а оператор нажимает кнопку «Пуск». Результаты диагностики отображаются на табло прибора и фиксируются в его памяти. Флуоресценция КПП возбуждается ртутной лампой, а излучение, упруго рассеянное кожей, т. е. его часть, отразившаяся от кожи человека, а также флуоресцентное излучение, достигающие входного торца приемного оптоволоконка, передаются в компактный спектрометр. Диагностическим параметром в приборах AGE Reader выступает интегральный критерий уровня АФК [1, 2]:

$$AU = \frac{\int_{420}^{600} I_f(\lambda) d\lambda}{600 - 420} \times \frac{420 - 300}{\int_{300}^{420} I_{bs}(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $I_f(\lambda)$ – спектр интенсивности флуоресцентного излучения кожи в диапазоне длин волн (420–600) нм;

$I_{bs}(\lambda)$ – спектр интенсивности упруго отраженного кожей излучения возбуждения флуоресценции в диапазоне длин волн (300–420) нм.

Экспериментальные спектры $I_f(\lambda)$ и $I_{bs}(\lambda)$ регистрируются спектрометром, входящим в состав AGE Reader.

Из-за отсутствия доступного большинству медицинских учреждений оборудования типа AGE Reader в России подобные работы проводятся лишь на исследовательском уровне [4–6, 9]. Сами исследования проводятся на оригинальных универсальных спектрофлуориметрах [10–14], эксплуатация которых предполагает участие в ней высококвалифицированного персонала; не сложилось и единого мнения по диагностическому критерию [9].

В Самарском университете при участии авторов настоящей работы создается диагностический флуориметр, способный решать задачу измерения АФК, обусловленной КПП, и реализующий интегральный диагностический критерий (1). От оригинальных, универсальных, исследовательских спектрофлуориметров он должен отличаться компактностью, простотой конструкции и эксплуатации за счет оптимизированных под решение поставленной выше задачи оптической, электронной и алгоритмической структур, а от приборов семейства AGE Reader – бюджетной элементной базой и легкой тиражируемостью. Коллективу удалось создать два прототипа флуориметра [15, 16], удовлетворяющих выдвинутому критерию, первый из которых, одноканальный, позволил экспериментально подтвердить правильность принятых схемотехнических решений путем убедительной демонстрации его способности регистрировать весьма слабое излучение АФК при наличии дестабилизирующих эксплуатационных факторов, а второй,

будучи двухканальным, – как в лабораторных условиях, так и при апробации в областной клинической больнице им. В.Д. Середавина проявил способность регистрировать возрастные особенности АФК и патологические процессы у пациентов, страдающих ишемической болезнью сердца.

В связи с тем, что разработка в настоящее время находится в стадии завершения конструкторских решений, необходимо создание простых математических моделей основных структурных компонентов диагностического флуориметра для оперативного сравнения возможных модификаций оптических и оптико-электронных элементов и их взаимного расположения.

Объект моделирования

Оптическая схема диагностического флуориметра [16] представлена на рис. 1. Возбуждение флуоресценции КПП, содержащихся в коже – объекте исследования 5, осуществляется излучением ближнего ультрафиолетового или фиолетового светодиода или полупроводникового лазера 1, которое проходит через коллимирующую оптику 2 и очищающий светофильтр 3. Спектр излучения возбуждения АФК 350–415 нм обусловлен флуоресцентными свойствами КПП [1–2, 17], причем внутри указанного диапазона не отмечается заметной спектральной неравномерности эффективности возбуждения АФК, что обуславливает конструкторскую степень свободы в выборе излучателя. Требования компактности и малого энергопотребления ограничивают выбор излучателя полупроводниковым источником. Однако если для решения основной задачи удастся подобрать светодиод или полупроводниковый лазер массового производства, то по совокупности оптических, эксплуатационных и экономических параметров это и будет оптимальным конструкторским решением [18].

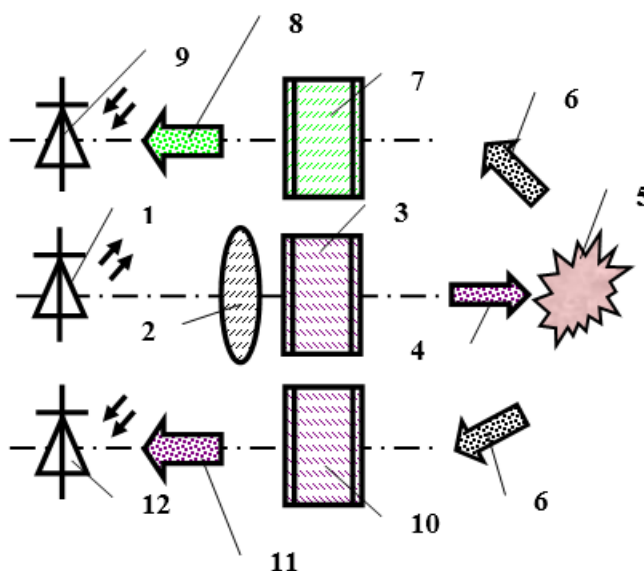


Рис. 1. Оптическая схема диагностического флуориметра:

1 – источник излучения; 2 – коллимирующая оптика; 3 – очищающий светофильтр; 4 – поток излучения возбуждения автофлуоресценции; 5 – исследуемый объект; 6 – смесь упруго рассеянного и флуоресцентного излучений; 7 – светофильтр, отсекающий излучение возбуждения флуоресценции; 8 – поток флуоресцентного излучения; 9 – фотодиод канала измерения интенсивности флуоресцентного излучения; 10 – светофильтр, отсекающий флуоресцентное излучение; 11 – поток упруго рассеянного излучения; 12 – фотодиод канала измерения интенсивности упруго рассеянного излучения

Назначение очищающего светофильтра 3, установленного в возбуждающей ветви оптической схемы, состоит в подавлении паразитного длинноволнового излучения, спектр которого накладывается на спектр АФК [19]. Наличие дополнительного длинноволнового излучения характерно для коммерческих светодиодов УФ и синего диапазона спектра, природа его описана в [20]. Оно обусловлено излучательной рекомбинацией в верхнем слое р-GaN гетероструктуры светодиода. Интенсивность пика паразитного длинноволнового излучения светодиодов LEUVS33G10TZ00, FYL-5013UVC, T5F36, EOLD-365-525 ультрафиолетового и фиолетового диапазонов спектра по экспериментальным оценкам [19] составила от 1×10^{-3} до $7,5 \times 10^{-3}$ от интенсивности основного пика излучения с максимумом на длине волны, принадлежащим интервалу (560; 580) нм. Элементы 1–3 образуют оптический канал возбуждения АФК.

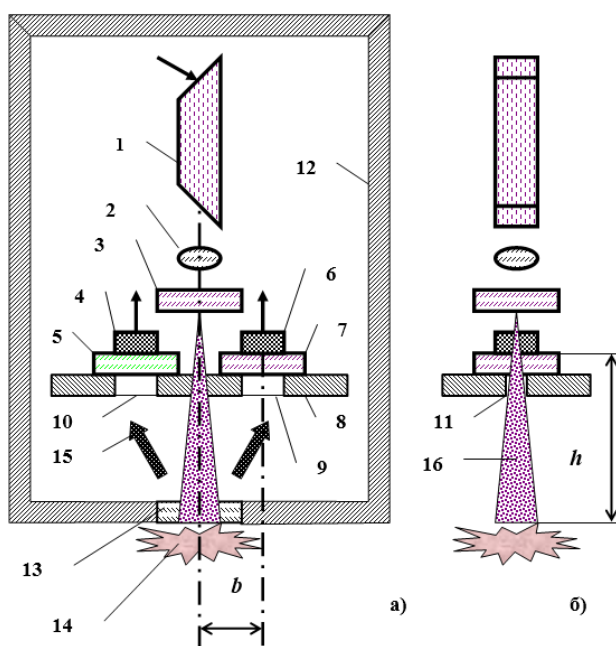


Рис. 2. Конструкция оптической системы диагностического флуориметра:

a – фронтальный вид; *б* – вид сбоку; 1 – источник излучения; 2 – коллимирующая оптика; 3 – очищающий светофильтр; 4 – фотодиод канала измерения интенсивности флуоресцентного излучения; 5 – светофильтр, отсекающий излучение возбуждения флуоресценции; 6 – фотодиод канала измерения интенсивности упруго рассеянного излучения; 7 – светофильтр, отсекающий флуоресцентное излучение; 8 – монтажная плата; 9, 10, 11 – отверстия в монтажной плате; 12 – светонепроницаемый кожух; 13 – оптическое окно; 14 – объект исследования; 15 – смесь упруго рассеянного и флуоресцентного излучений; 16 – поток излучения возбуждения автофлуоресценции; *b* – расстояние между оптическими осями источника возбуждения флуоресценции и фотодиода; *h* – расстояние между поверхностью исследуемого объекта и входным окном фотодиода

Часть рассеянного кожей излучения *б* через отсекающий возбуждающее излучение светофильтр 7 падает на фотодиод 9 канала измерения интенсивности АФК. Сигнал фотодиода 9 пропорционален числителю выражения (1). Другая часть рассеянного кожей излучения через отсекающий флуоресцентное излучение

ние светофильтр 10 падает на фотодиод 12 канала измерения интенсивности упруго рассеянного излучения. Его сигнал пропорционален знаменателю выражения (1).

Эскиз оптической системы флуориметра представлен на рис. 2.

Объектом моделирования является информационно-измерительная система, представленная на рис. 1 и 2. В силу геометрической симметрии конструкции относительно каналов измерения интенсивности упругого и флуоресцентного излучений математическая модель энергетических характеристик должна описывать зависимость потока излучения, падающего на фоточувствительную площадку одного из фотодиодов, а следовательно, и величину его выходного сигнала, от пространственно-энергетических параметров излучения возбуждения АФК, совокупности таких параметров самого фотодиода, как размеры его фоточувствительной площадки и индикатрисы чувствительности с учетом рассеивающих свойств объекта исследования. Оптимизируемыми с помощью модели энергетических характеристик будут два основных конструктивных параметра оптической системы: расстояние между оптическими осями источника возбуждения флуоресценции и фотодиода b и расстояние между поверхностью исследуемого объекта и входным окном фотодиода h .

Математическая модель спектральных характеристик должна обеспечивать оценку пригодности фотодиодов по их спектральной чувствительности; подбор типа, материалов и толщин светофильтров по спектральным зависимостям их коэффициентов поглощения или синтез спектральной характеристики пропускания интерференционного светофильтра. Таким образом, с ее помощью также решаются важные проектные и конструкторские задачи.

Математическая модель энергетических характеристик

Продемонстрируем структуру и работу модели энергетических характеристик на задаче оптимизации конструктивных параметров b и h . В качестве источника излучения в разрабатываемой конструкции предполагается использовать лазерный модуль с полупроводниковым лазером SLD3233VF [21] и встроенным регулируемым коллиматором. Его пиковая длина волны излучения равна 405 нм, а максимальная мощность излучения в непрерывном режиме составляет 65 мВт. За счет регулируемого коллиматора плотность мощности излучения на исследуемом участке кожи и эффективный характерный размер пучка можно изменять в пределах порядка величины. Потому источник возбуждающего АФК излучения в настоящей работе моделируется распределением плотности мощности – облученностью – по объекту исследования $E(x, y)$.

В качестве приемника излучения предполагается использовать кремниевый фотодиод BPW21R со встроенным светофильтром, смещающим максимум его спектральной чувствительности на длину волны 560 нм, что лучше согласуется со спектром флуоресценции КПП. Поскольку производители фотодиода приводят его индикатрису чувствительности [22] $S(\alpha)$, то в качестве его модели для анализа энергетики флуориметра логично принять модель точечного фотоприемника с заданным направлением оси индикатрисы чувствительности, вдоль которой чувствительность достигает своего максимального значения $S_{max} = 1$ и от которой отсчитывается угол α , определяющий направление на источник излучения. Анализ угловой зависимости $S(\alpha)$, приведенной в графической форме в [22], показал ее малое отличие от косинусоидальной:

$$S(\alpha) = \cos \alpha . \quad (2)$$

Геометрия модели оптической системы представлена на рис. 3. Объект исследования считается плоским и расположенным в плоскости xOy . Исследуемый участок кожи имеет форму квадрата со стороной a . Начало системы координат совпадает с геометрическим центром исследуемого участка. Фотодиод находится в точке P , принадлежащей плоскости yOz , на расстоянии b от оси z , равном длине отрезков PH или OB , и на высоте h от плоскости xOy , равной длине отрезков PB или HO . Ось индикатрисы чувствительности направлена вертикально вниз вдоль отрезка PB .

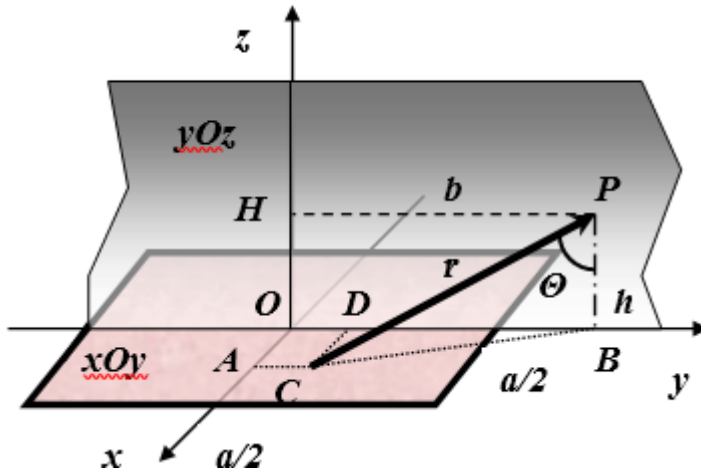


Рис. 3. Геометрия математической модели энергетических характеристик

Элементарным источником излучения для фотодиода является элемент поверхности рассеяния $dx \times dy$ с центром в точке C – граничной точке отрезка CP , соединяющего элемент поверхности с фотодиодом. Точки A и D являются проекциями точки C на соответствующие оси координат. Отрезок CB является проекцией отрезка CP на плоскость xOy .

Поскольку поверхность исследуемого объекта – кожи – при углах падения излучения и его рассеяния до 70° в первом приближении можно принять ламбертовской [23] с коэффициентом отражения ρ , то ее энергетическая яркость L не будет зависеть от угла рассеяния, а само значение яркости элемента поверхности будет определяться его облученностью [24]:

$$L(x, y) = \rho E(x, y) / \pi . \quad (3)$$

Тогда элемент $dx \times dy$ будет иметь нормальную энергетическую силу излучения:

$$I_0(x, y) = L(x, y) dx dy = (\rho / \pi) E(x, y) dx dy , \quad (4)$$

а сама энергетическая сила излучения будет меняться по косинусоидальному закону:

$$I(x, y, \theta) = I_0(x, y) \cos \theta = (\rho / \pi) E(x, y) \cos \theta \cdot dx dy , \quad (5)$$

где θ – угол между отрезком CP и нормалью к плоскости xOy .

Обозначив длину отрезка CP через r , получим облученность, которую создает элемент $dx \times dy$ в точке расположения фотодиода P :

$$E_p(x, y, \theta) = I(x, y, \theta) / [r(x, y)]^2. \quad (6)$$

Обозначив коэффициент преобразования облученности в электрический сигнал на выходе фотодиода k , с учетом его индикатрисы чувствительности $S(\alpha)$ будем иметь следующую зависимость выходного сигнала U от конструктивных параметров:

$$U = (\rho k / \pi) \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-a/2}^{a/2} \{E(x, y) / [r(x, y)]^2\} \cos \theta \cdot \cos \alpha \cdot dx dy. \quad (7)$$

Так как ось индикатрисы чувствительности перпендикулярна плоскости xOy , то $\alpha = \theta$, и из $\triangle CPB$ получаем:

$$\cos \alpha = PB / PC = h / r. \quad (8)$$

Из $\triangle CPB$ и $\triangle CDB$ определяется в явном виде зависимость $r(x, y)$:

$$r(x, y) = \sqrt{CB^2 + PB^2} = \sqrt{DB^2 + CD^2 + PB^2} = \sqrt{x^2 + (b - y)^2 + h^2}, \quad (9)$$

которая, будучи подставлена в (8) и (7), приводит к выражению для выходного сигнала фотодиода U

$$U = (\rho k / \pi) \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-a/2}^{a/2} \{E(x, y) \cdot h^2 / [x^2 + (b - y)^2 + h^2]^2\} dx dy, \quad (10)$$

удобному для расчетов в пакете компьютерной математики Mathcad.

Оптимизация конструктивных параметров флуориметра с помощью математической модели

Продemonстрируем оптимизационный потенциал модели на решении следующих задач: 1) использование широкого или узкого пучка для возбуждения АФК, т. е. выбор размера окна a ; 2) изучение влияния видов пространственного распределения плотности мощности по объекту $E(x, y)$ на величину выходного сигнала; 3) определение интенсивности изменения выходного сигнала от изменения расстояния между фотодиодами $2b$; 4) подбор оптимальной высоты их расположения над исследуемым объектом h .

Поскольку речь идет об оптимизации конкретной конструкции, представленной на рис. 2, при выбранном типе фотодиода BPW21R, диаметр корпуса которого [22] составляет 9 мм, то $b \geq 4$ мм; уменьшить высоту h до значений, меньших 10 мм, без усложнения оптической системы путем использования светоделителей, зеркал и т. п. тоже не удастся, поэтому принято $h \geq 10$ мм. Прошедшие клиническую апробацию приборы [8, 16] диагностируют участок кожи с характерным размером 6–10 мм, поскольку диагностируемый участок размером

менее 1 мм вряд ли может быть представительным. Поэтому диапазон варьирования параметра a допустимо ограничить отрезком [1; 10] мм.

Целью оптимизации является получение совокупности геометрических параметров a , b и h при оговоренных выше конструктивных ограничениях, не уменьшающих существенно величину выходного сигнала U при прочих равных условиях. Тогда значение постоянного множителя ($\rho k/\pi$) перед интегралом (10) принимается равным 1000 с целью получения однозначных целых чисел по оси ординат, значение мощности излучения источника возбуждения АФК P_u принимается равным 1, выходной сигнал U измеряется в условных единицах и используется условие нормировки

$$\int_{-a/2}^{a/2} \int_{-a/2}^{a/2} E(x, y) \cdot dx dy = 1. \quad (11)$$

Наиболее простым распределением плотности мощности с легко физически верифицируемыми результатами моделирования будет равномерное:

$$E(x, y) = E_0 = P_u / a^2 = Const. \quad (12)$$

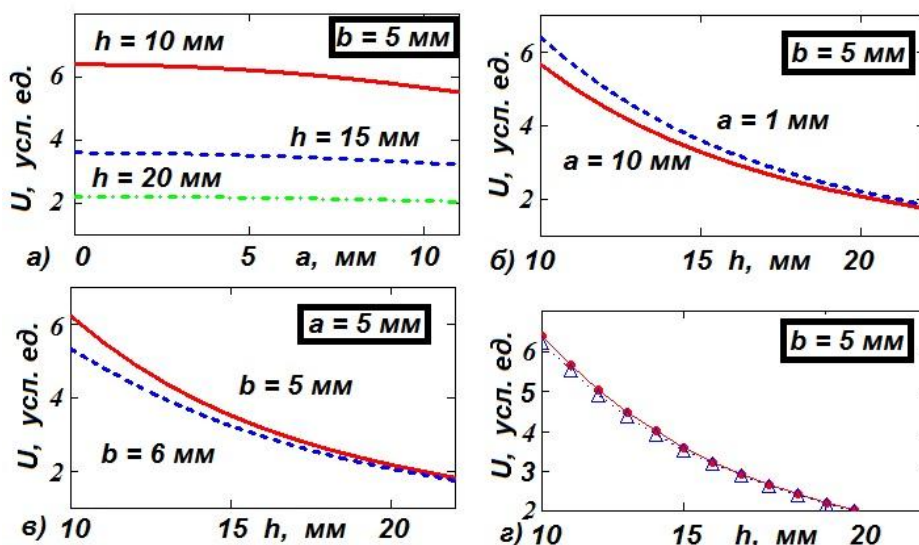


Рис. 4. Результаты моделирования (параметр в рамке имеет одно и то же значение для всех кривых графика):

a – влияние поперечного размера пучка на величину выходного сигнала; $б$ – зависимость выходного сигнала от высоты расположения фотодиода над объектом исследования; $в$ – влияние расстояния фотодиода от оптической оси зондирующего пучка; $г$ – влияние закона распределения плотности мощности излучения возбуждения АФК по объекту: $\Delta\Delta\Delta$ – равномерное распределение; $\bullet\bullet\bullet$ – гауссовское распределение

Результаты моделирования представлены на рис. 4. Из рис. 4а видно, что с точки зрения энергетики прибора формирование малоапертурного пучка ощу-

тимого преимущества не имеет. Более существенной является зависимость от высоты фотодиода над объектом исследования (рис. 4б). Видно, что это расстояние следует минимизировать; с другой стороны, небольшие ~1 мм вариации высоты, вызванные, например, необходимостью замены светофильтра на светофильтр другой толщины или погрешностями изготовления держателей оптических элементов, существенного влияния на величину выходного сигнала оказать не должны. Последнее замечание имеет отношение и к вариации конструктивного параметра b (рис. 4в).

Рис. 4г иллюстрирует влияние закона распределения плотности мощности $E(x, y)$ по площади объекта. Кроме равномерного распределения в модели используется и гауссовское распределение как характерное для лазерных источников излучения:

$$E(x, y) = M_0 \exp[-2(x^2 + y^2)/w^2], \quad (13)$$

где M_0 – плотность мощности на оси гауссовского пучка;
 w – радиус (параметр распределения) пучка.

Нормировка на полную мощность источника возбуждения АФК осуществляется с помощью выражения

$$M_0 = 2P_u / \pi \cdot w^2. \quad (14)$$

Сравнение на рис. 4г проводилось для следующих значений параметров: $a = 5$ мм и $w = 1,25$ мм. Выбор значения радиуса гауссовского пучка диктовался условием практически полного попадания всей мощности излучения источника на объект без диафрагмирования его выходным окном с характерным размером 5 мм, т. к. известно [25], что через поперечное сечение гауссовского пучка диаметром $2w$ проходит лишь 86,5 % полной мощности и для увеличения доли полной мощности до 99,99 % диаметр сечения должен составлять $4w$. Как и следовало ожидать из физических соображений по результатам прогонки модели с равномерным распределением плотности мощности разных поперечных сечений (рис. 4а), выходной сигнал малочувствителен к закону распределения плотности мощности, по крайней мере в классе радиально симметричных распределений. Относительная разность значений $(U_{\text{гаусс.}} - U_{\text{равном.}})/U_{\text{гаусс.}}$ не превышает 2,5 %, что убеждает в корректности используемого математического аппарата.

Заключение

Разработана математическая модель оптической системы флуориметра, позволяющая по техническим характеристикам производителя, литературным либо экспериментальным данным о параметрах компонент оптико-электронной системы проектируемого диагностического флуориметра и оптическим свойствам объекта диагностики прогнозировать энергетические характеристики прибора, автоматизируя расчет его конструкции.

Моделирование показало, что наиболее существенный вклад в энергетику прибора вносит расстояние между поверхностью диагностируемого объекта и фоточувствительной площадкой фотоприемника. Для получения максимального уровня выходного сигнала фотоприемника необходимо минимизировать это расстояние в рамках допустимых конструктивных ограничений. Малое влияние размера диагностируемого участка на выходной сигнал обеспечивает дополнительную степень свободы в медицинских приложениях.

Модель реализована в пакете компьютерной математики Mathcad, в который закладываются математические модели компонент оптической системы, описанные выше, количество компонент и их параметры и выражения, которым подчиняется трансформация спектра при прохождении излучения через оптический компонент. Заданные явно математические функции обеспечивают открытость модели в целом и доступность ее модификации пользователем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meerwaldt R., Graaff R., Oomen P.H.N. et al. Simple non-invasive assessment of advanced glycation endproduct accumulation // *Diabetologia*, 2004; 47: 1324–330.
2. Mulder D.J., van Haelst P.L., Graaff R. et al. Skin autofluorescence is elevated in acute myocardial infarction and is associated with the one-year incidence of major adverse cardiac events // *Netherlands Heart Journal*, 2009; 17(4): 162–168.
3. Meerwaldt R., Hartog J.W.L., Graaff R. et al. Skin Autofluorescence, a Measure of Cumulative Metabolic Stress and Advanced Glycation End Products, Predicts Mortality in Hemodialysis Patients // *Journal of the American Society of Nephrology*, 2005; 16: 3687–3693.
4. Голубев Р.В., Папаян Г.В., Глазунова А.А., Коростелева Н.Ю., Петрищев Н.Н., Смирнов А.В. Исследование автофлуоресценции кожи для определения содержания конечных продуктов гликирования у больных, находящихся на хроническом гемодиализе // *Терапевтический архив*. – 2016. – № 88 (6). – С. 65–72.
5. Папаян Г.В., Петрищев Н.Н., Крылова Е.В. и др. Метод оценки биологического возраста кожи с помощью флуоресцентного мультиспектрального видеодерматоскопа // *Оптический журнал*. – 2010. – № 77(2). – С. 60–67.
6. Блюмин Р.Б., Наумова Э.М., Хадарцев А.А. Технологии бесконтактной диагностики // *Вестник новых медицинских технологий*. – 2008. – № 15(4). – С. 146–149.
7. Lutgers H.L., Gerrits E.G., Graaff R. et al. Skin autofluorescence provides additional information to the UK Prospective Diabetes Study (UKPDS) risk score for the estimation of cardiovascular prognosis in type 2 diabetes mellitus // *Diabetologia*, 2009; 52: 789–797.
8. age reader brochure: www.dianoptics.com | www.age-reader.com
9. Дунаев А.В., Дрёмин В.В., Жеребцов Е.А. и др. Анализ индивидуальной вариабельности параметров в лазерной флуоресцентной диагностике // *Биотехносфера*. – 2013. – № 2(26). – С. 39–47.
10. Uk Kang. Спектрометр для флуоресцентно-отражательных биомедицинских исследований // *Оптический журнал*. – 2013. – № 80 (1). – С. 56–67.
11. Папаян Г.В., Журба В.М., Кишалов А.А. и др. Волоконный флуоресцентно-отражательный спектрометр с многоволновым возбуждением // *Оптический журнал*. – 2014. – № 81(1). – С. 38–43.
12. Булгакова Н.Н., Смирнов В.В., Фабелинский В.И. и др. Спектрально-флуоресцентный кольпоскоп // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 2013. – № 4. – С. 42–49.
13. Новиков И.А., Груша Я.О., Кирющенко Н.П. Повышение эффективности флуоресцентной диагностики новообразований кожи и слизистых оболочек в офтальмоонкологии // *Вестник РАМН*. – 2012. – № 10. – С. 62–69.
14. Rogatkin D.A., Sokolovski S.G., Fedorova K.A., Stewart N.A., Sidorov V.V., Rafailov E.U. Basic principles of design and functioning of multifunctional laser diagnostic system for noninvasive medical spectrophotometry. *SPIE Proc*, 2011; 7890. 78901H: 1–7. doi: 10.1117/12.874258.
15. Kornilin D.V., Grishanov V.N. Portable fluorescence meter for medical applications. *Proc. of SPIE*, 2016; 9887 98871N-1: 1–7. doi: 10.1117/12.2227392.
16. Kornilin D.V., Grishanov V.N., Zakharov V.P., Burkov D.S. Portable fluorescence meter with reference backscattering channel. *Proc. SPIE*, 2016; 9961. 99610C: 1–8. doi:10.1117/12.2237135.
17. Koetsier M., Lutgers H.L., Smit A.J., Links T.P., de Vries R., Gans R.O.B., Rakhorst G., Graaff R. Skin autofluorescence for the risk assessment of chronic complications in diabetes: a broad excitation range is sufficient. *Opt. Express*, 2009; 17: 509–519.
18. Егорова О.В., Штейн Г.И. Сравнение осветительных систем люминесцентных микроскопов на основе светодиодов (LED) и ртутной лампы (НВО) // *Оптический журнал*. – 2011. – № 78(1). – С. 99–101.
19. Гришанов В.Н., Корнилин Д.В., Куликов В.С. Корректировка спектров излучения ультрафиолетовых светодиодов для возбуждения флуоресценции биообъектов // *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: материалы Всероссийской научно-технической конференции (13.05 – 15.05.2015, г. Самара)*. – Самара: Изд-во СНЦ, 2015. – С. 150–152.

20. Жмерик В.Н., Мизеров А.М., Шубина Т.В. и др. Квантово-размерные гетероструктуры на основе AlGaN для светодиодов глубокого ультрафиолетового диапазона, полученные методом субмонослойной дискретной молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота // Физика и техника полупроводников. – 2008. – № 42(12). – С. 1452–1457.
21. sld3233vf: www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/228445/ETC2/SLD3233VF.html
22. bpw21r: www.vishay.com
23. Барун В.В., Иванов А.П. Рассеяние света шероховатой поверхностью кожи человека. 1. Коэффициенты яркости отраженного света // Квантовая электроника. – 2013. – № 43(8). – С. 768–776.
24. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
25. Климов Ю.М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.

Статья поступила в редакцию 15 января 2019 г.

MATHEMATICAL MODEL OF OPTICAL CHANEL OF INFORMATION-MEASURING FLUOROMETRIC SYSTEM

V.S. Kulikov¹, V.N. Grishanov², K.V. Cherepanov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

² Samara University
34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation

Abstract. *A mathematical model for evaluation of power of information-measuring fluorometric system is developed. The main objective of fluorimeter is measurement of intensity of fluorescent radiation of human skin in vivo. The model is realized in a packet of computer mathematics Mathcad and consists of the units modeling energetic characteristics of passive optical elements, radiators and photodetectors on base of photometry laws. For creation of model elements reference, literary and experimental data on them are used. Basic purpose of model – operational quantitative comparing of constructive solutions for instrument by energetic criterion – photodiode's output signal. The given obviously mathematical functions provide openness of model and accessibility for modification by the user.*

Keywords: *mathematical model; radiation stream; laser; light-emitting diode; photodiode; light filter; fluorimeter; photometry.*

REFERENCES

1. Meerwaldt R. Simple non-invasive assessment of advanced glycation endproduct accumulation / R. Meerwaldt, R. Graaff, P.H.N. Oomen et al. // *Diabetologia*, 2004; 47: 1324–1330.
2. Mulder D.J. Skin autofluorescence is elevated in acute myocardial infarction and is associated with the one-year incidence of major adverse cardiac events / D.J. Mulder, P.L. van Haelst, R. Graaff et al. // *Netherlands Heart Journal*, 2009; 17(4): 162–168.
3. Meerwaldt R. Skin Autofluorescence, a Measure of Cumulative Metabolic Stress and Advanced Glycation End Products, Predicts Mortality in Hemodialysis Patients / R. Meerwaldt, J.W.L. Hartog, R. Graaff et al. // *Journal of the American Society of Nephrology*, 2005; 16: 3687–3693.
4. Golubev R.V., Papayan G.V., Glazunova A.A., Korosteleva N.Yu., Petrishchev N.N., Smirnov A.V. Examination of skin autofluorescence for the determination of glycation end-products in patients on chronic hemodialysis // *Therapeutic Archive*, 88(6), 65–77 (2016).

Viktor S. Kulikov, Postgraduate Student.
Vladimir N. Grishanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Konstantin V. Cherepanov, Postgraduate Student.

5. *Papayan G.V., Petrishchev N.N., Krylova E.V. et al.* Method of estimating the biological age of skin by means of a fluorescence multispectral video dermatoscope // *Journal of Optical Technology* 77(2), 60–67 (2010).
6. *Blyumin R.B., Naumova E.M., Khadartsev A.A.* The Technologies of Non-Contact Diagnostics, *Journal of New Medical Technologies* 15(4), 146–149 (2008).
7. *Lutgers H.L.* Skin autofluorescence provides additional information to the UK Prospective Diabetes Study (UKPDS) risk score for the estimation of cardiovascular prognosis in type 2 diabetes mellitus / H.L. Lutgers, E.G. Gerrits, R. Graaff et al. // *Diabetologia*, 2009; 52: 789–797.
8. age reader brochure: www.diagnoptics.com | www.age-reader.com
9. *Dunaev A.V., Dremmin V.V., Zherebtsov E.A. et al.* Analysis individual variability of parameters of laser fluorescence diagnostics, *Biotechnosphere* 2(26), 39–47 (2013).
10. *Kang Uk, Papajan G.V., Berezin V.B. et al.* Spectrometer for fluorescence – reflective Biomedical Research // *Journal of Optical Technology*, 2013. V. 80. no 1. P. 56–67. (In Russ.)
11. *Papajan G.V., Gurba V.M., Kishalov A.A. et al.* Fiber – reflective fluorescent spectrometer with multiwavelength excitation // *Journal of Optical Technology*, 2014. V. 81. no 1. P. 38–43. (In Russ.)
12. *Bulgakova N.N., Smirnov V.V., Fabelinsky V.I. et al.* Laser spectral fluorescence colposcope: pre-clinical testing on experimental mice tumor // *Biomedical*, 2013. no 2. P. 108–122. (In Russ.)
13. *Novikov I.A., Grusha Y.O., Kiryushchenkova N.P.* Improving Efficacy of Fluorescent Diagnostics of Skin and Mucosal Tumors in Ocular Oncology // *Vestnik Rossiiskoi akademii meditsinskikh nauk. – Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*, 2012. no 10. P. 62–69. (In Russ.)
14. *Rogatkin D.A.* Basic principles of design and functioning of multifunctional laser diagnostic system for noninvasive medical spectrophotometry / D.A. Rogatkin, S.G. Sokolovski, K.A. Fedorova, N.A. Stewart, V.V. Sidorov, E.U. Rafailov // *SPIE Proc*, 2011; 7890. 78901H: 1–7. doi: 10.1117/12.874258.
15. *Kornilin D.V.* Portable fluorescence meter for medical applications / D.V. Kornilin, V.N. Grishanov // *Proc. of SPIE*, 2016; 9887 98871N-1: 1–7. doi: 10.1117/12.2227392.
16. *Kornilin D.V.* Portable fluorescence meter with reference backscattering channel / D.V. Kornilin, V.N. Grishanov, V.P. Zakharov, D.S. Burkov // *Proc. SPIE*, 2016; 9961. 99610C: 1–8. doi: 10.1117/12.2237135.
17. *Koetsier M.* Skin autofluorescence for the risk assessment of chronic complications in diabetes: a broad excitation range is sufficient / M. Koetsier, H.L. Lutgers, A.J. Smit, T.P. Links, R. de Vries, R.O.B. Gans, G. Rakhorst, R. Graaff // *Opt. Express*, 2009; 17: 509–519.
18. *Egorova O.V., Schtejn G.I.* Comparison of fluorescence microscope lighting systems based on LEDs (LED) and a mercury lamp (HBO) // *Journal of Optical Technology*, 2011. V. 78. no 1. P. 99–101. (In Russ.)
19. *Grishanov V.N., Kornilin D.V., Kulikov V.S.* Adjustment of the emission spectra of the ultraviolet light-emitting diodes to excite the fluorescence of biological objects // *Proc. of Actual problems of electronics and telecommunications: Russian Scientific and Technical Conference 13.05–05.15.2015, Samara*, 150–152 (2015).
20. *Jmerik V.N., Mizerov A.M., Shubina T.V. et al.* Deep UV AlGaIn quantum wells heterostructures grown by sub-monolayer digital molecular beam epitaxy with plasma-activated nitrogen // *Physics and Technology Semiconductors* 42 (12), 1452–1457 (2008).
21. [sld3233vf: www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/228445/ETC2/SLD3233VF.html](http://sld3233vf.www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/228445/ETC2/SLD3233VF.html)
22. [bpw21r: www.vishay.com](http://bpw21r.www.vishay.com)
23. *Barun V.V. et al.* Light scattering by a rough surface of human skin. 1. The luminance factor of reflected light. *Quantum Electronics* (2013), 43 (8): 768–776.
24. *Yakushenkov Yu.G.* Theory and calculation of optoelectronic devices. – Moscow: Logos, 1999. – 480 p.
25. *Klimkov Yu.M.* Applied laser optics. – Moscow: Mashinostroenie, 1985. – 128 p.

УДК 004

МОДЕРНИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕБАЛАНСА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА КУЙБЫШЕВСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

А.А. Молочков¹, А.А. Тюгашев², Д.Н. Франтасов², Ю.В. Кудряшова²

¹ Куйбышевская дирекция по энергообеспечению – структурное подразделение Трансэнерго – филиала РЖД
Россия, 443030, г. Самара, ул. Чернореченская, 29А

² Самарский государственный университет путей сообщения
Россия, 443066, г. Самара, ул. Свободы, 2 В

Аннотация. Рассматривается применение искусственной нейронной сети в информационно-измерительной системе учета электроэнергии для выявления и анализа факторов, влияющих на небаланс потребления электрической энергии. Рассмотрены эксплуатируемые информационно-измерительные системы коммерческого учета электроэнергии Куйбышевской железной дороги. Установлено, что коммерческие потери присущи розничному рынку, что связано с большим числом подключений к сети и сложностью выявления несанкционированного подключения. Изучена проблема измерения потерь и выявлено несоответствие класса точности существующего измерительного оборудования в точках учета электроэнергии. Рассмотрена возможность повышения точности учета за счет внедрения корректирующего устройства измерительных преобразователей. Для выявления участков сети со сверхнормативными потерями предложено использовать искусственную нейронную сеть. Описана структура входных и выходных данных и организация разработанной нейронной сети. Обучение нейронной сети проводилось на данных о потерях электроэнергии на тяговой подстанции «Жигулевское море» Куйбышевской железной дороги. Приведена общая структура информационно-измерительной системы для контроля небаланса электроэнергии. Показано, что использование нейросетевых технологий может обеспечить уменьшение небаланса до 5 %.

Ключевые слова: небаланс электроэнергии, коммерческие потери электроэнергии, информационно-измерительная система, измерительный трансформатор, искусственная нейронная сеть.

Введение

Концепция «умных электрических сетей» на сегодняшний момент является одним из направлений повышения эффективности использования энергосистемы страны. В рамках концепции предлагаются решения на стыке энергетических и информационных технологий, обеспечивающие эффективное управление на основе поддержания оперативной и достоверной информации о режимах ра-

Молочков Александр Алексеевич, зам. начальника.

Тюгашев Андрей Александрович (д.т.н.), доцент кафедры «Прикладная математика, информатика и информационные системы».

Франтасов Дмитрий Николаевич (к.т.н.), доцент кафедры «Прикладная математика, информатика и информационные системы».

Кудряшова Юлия Викторовна, преподаватель кафедры «Прикладная математика, информатика и информационные системы».

боты энергосистемы. Сегодня применяются отдельные технические решения и в области информационно-измерительных систем (ИИС) управления и учета электроэнергии. Однако эти решения используются локально для мониторинга или учета показателей отдельных узлов, таких как автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ), системы мониторинга силовых трансформаторов, автоматизированные системы управления резервным электропитанием и т. д.

АИИС КУЭ на Куйбышевской железной дороге играет ключевую роль в обеспечении деятельности ОАО «РЖД» по покупке электроэнергии и оказанию услуг по передаче электроэнергии сторонним потребителям по сетям ОАО «РЖД». Целью ее создания и эксплуатации является своевременное и достоверное обеспечение ОАО «РЖД» информацией об электропотреблении по точкам поставки (приема/передачи) электроэнергии на границах со смежными субъектами рынков электроэнергетики (а также по точкам поставки электроэнергии потребителям), по точкам технического учета электроэнергии [1, 2].

АИИС КУЭ состоит из трех подсистем:

- автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии оптового рынка электроэнергии ОАО «РЖД» – АСКУЭ ОРЭ;

- автоматизированная система контроля и учета электроэнергии розничных рынков электроэнергии ОАО «РЖД» – АСКУЭ РРЭ;

- автоматизированная система контроля и учета электроэнергии железнодорожных узлов ОАО «РЖД» – АСКУЭ ЖУ.

Все АИИС строятся на базе современного микропроцессорного оборудования и позволяют эксплуатировать надежные цифровые каналы связи.

В то же время существует ряд проблем, решение которых позволит снизить небаланс электроэнергии:

- точность, измеряемая информацией, обрабатываемая в каналах АИИС КУЭ, ниже, чем позволяют современные цифровые каналы;

- несвоевременность в принятии решений ведет к увеличению расхода мощности и энергии и, следовательно, к финансовым затратам [6];

- существуют исследования методов, позволяющие повысить точность АИИС КУЭ в широком диапазоне значений измеряемого тока.

В статье предлагается решение этих проблем с помощью интеллектуализации информационно-измерительной системы коммерческого учета на основе нейронной сети.

Структура потерь электроэнергии в электрических сетях железной дороги

Технологические потери включают в себя:

- технические потери в электрических сетях, обусловленные физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии;

- расход электроэнергии на собственные нужды подстанций;

- потери, обусловленные допустимыми погрешностями системы учета электроэнергии.

Они не являются убытками предприятия, так как стоимость их нормативного объема учитывается в тарифе на передачу электроэнергии. Средства на покрытие финансовых издержек, связанных с приобретением электроэнергии для компен-

сации технологических потерь в рамках установленного норматива, поступают в сетевую компанию в составе собранной выручки за передачу электроэнергии.

Технические потери электроэнергии можно рассчитать по законам электротехники, допустимые погрешности приборов учета – на основании их метрологических характеристик, а расход на собственные нужды подстанций – определить по показаниям электросчетчиков.

В то же время коммерческие потери невозможно непосредственно измерить приборами. Они определяются как разность между фактическими и технологическими потерями электроэнергии и, как правило, не подлежат включению в норматив потерь электроэнергии. Затраты, связанные с их оплатой, не компенсируются тарифным регулированием.

Таким образом, коммерческие потери электроэнергии в отличие от технологических являются прямым финансовым убытком сетевых компаний. Являясь, с одной стороны, причиной денежных расходов сетевого предприятия, они в то же время являются и его упущенной выгодой от неоплаченной передачи электроэнергии. Поэтому сетевые организации в большей степени, чем другие участники рынка электроэнергии, заинтересованы в максимально точном учете электроэнергии и правильности расчетов ее объемов в точках поставки на границах своей балансовой принадлежности.

На рис. 1 представлены факторы, вносящие наибольший вклад в коммерческую составляющую потерь электроэнергии.

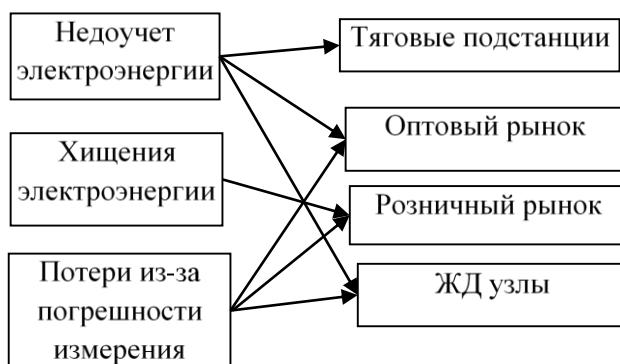


Рис. 1. Факторы, влияющие на коммерческую составляющую потерь электроэнергии

Следует обратить внимание также на высокий уровень отчетных потерь в сетях железнодорожных узлов. Небаланс $W_{НБ}$ между электроэнергией, принятой в сети районов электроснабжения и распределенной отраслевым предприятиям и посторонним железнодорожному транспорту потребителям, достигает 15–25 % и определяется как разность между показаниями счетчиков электроэнергии на входе и выходе участка электросети [3].

Проблема измерения потерь при учете электроэнергии и методы ее решения

Одной из причин потерь при учете электроэнергии являются погрешности систем учета электроэнергии, обусловленные низким классом точности и ненормированными условиями работы измерительных преобразователей и счетчиков,

в том числе их недогрузкой, перегрузкой, работой с ненормированным коэффициентом мощности и т. п.

Авторами был предложен способ коррекции погрешности измерения параметров энергоснабжения для уже эксплуатируемых систем учета. Он позволяет повысить класс точности без существенной модернизации компонентов системы, а только за счет применения корректирующего устройства совместно с уже эксплуатируемыми измерительными трансформаторами [4]. Система учета электроэнергии, построенная с использованием устройств коррекции, имеет более высокий класс точности при сравнимых финансовых затратах.

Рассмотрим измерение электрической энергии посредством ИИС, состоящей из измерительных преобразователей напряжения и тока, счетчиков электрической энергии, линий присоединения счетчиков к преобразователям. В этом случае расчет доверительных границ относительной погрешности δ_w измерений количества электрической энергии при доверительной вероятности, равной 0,95, выполняют по следующей формуле (предполагая, что все составляющие погрешности имеют равномерную функцию плотности вероятности):

$$\delta_w = \pm \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_\theta^2 + \delta_L^2 + \delta_{co}^2 + \sum_{i=1}^l \delta_{ci}^2}, \quad (1)$$

где δ_I – пределы допускаемой токовой погрешности преобразователя тока;

δ_U – пределы допускаемой погрешности напряжения преобразователя напряжения;

δ_θ – доверительные границы допускаемой погрешности трансформаторной схемы подключения счетчика (при измерениях активной или реактивной электроэнергии);

δ_L – погрешность из-за потери напряжения в линии соединения счетчика с преобразователем напряжения;

δ_{co} – пределы допускаемой основной относительной погрешности счетчика;

δ_{ci} – пределы допускаемой дополнительной погрешности счетчика от i -й влияющей величины;

l – число влияющих величин.

На рис. 2 представлены схемы накопления погрешностей измерительных каналов ИИС учета электроэнергии, включающих трансформатор тока (ТТ), трансформатор напряжения (ТН), корректирующие преобразователи (ПК) и счетчики электроэнергии.

При измерениях активной электрической энергии в предположении, что ИИС состоит из измерительных преобразователей напряжения и тока с коррекцией (класс точности 0,05) и цифрового счетчика электрической энергии с коррекцией (класс точности 0,05), при отсутствии потерь напряжения в линии соединения счетчика с преобразователем напряжения, а также отсутствии дополнительной погрешности счетчика (для нормальных условий эксплуатации счетчика) по (1) получим $\delta_w = 0,1$ %.

Если система предназначена для эксплуатации в сетях до 400 В, то погрешностями, вызванными трансформатором напряжения, можно пренебречь, и в результате получаем $\delta_w = 0,07$ %.

Значение результирующей погрешности ИИС учета электроэнергии с коррекцией может быть 4 раза меньше, чем у систем без коррекции [4, 5].

На сегодняшний день на всех тяговых подстанциях установлены электронные счетчики класса точности 0,5, применяемые для коммерческого расчета. На вводах 27,5 кВ применяются двунаправленные счетчики электрической энергии, которые учитывают перетоки, возникающие из-за разности напряжений на соседних тяговых подстанциях. Таким образом, исключается отнесение на тягу перетоков мощностей по контактной сети. Кроме того, на тяговых подстанциях переменного тока электронные счетчики класса 0,5 также установлены на фидерах, участвующих в расчете расхода электроэнергии на тягу.

За счет подключения счетчиков всех фидеров на тяговых подстанциях к АИИС КУЭ ежемесячно контролируется небаланс принятой и распределенной электроэнергии.

Одна из составляющих «условных» потерь определяется техническим состоянием учета электроэнергии на локомотивах, наличием неучтенного отбора электрической энергии от контактной сети, несанкционированным доступом к приборам учета.

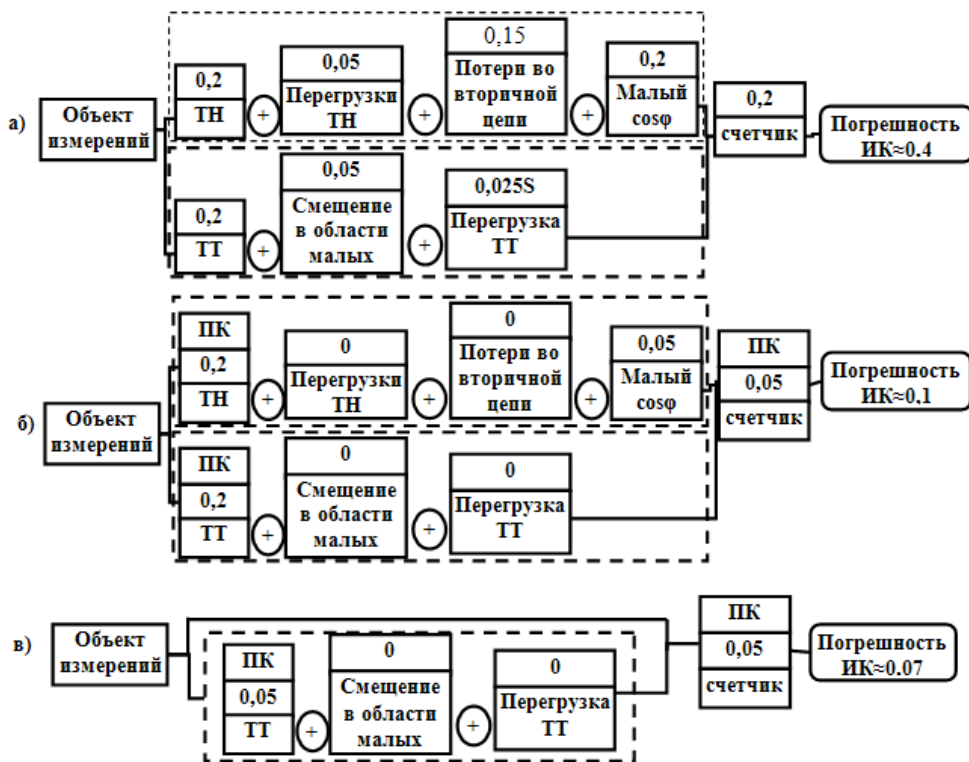


Рис. 2. Схема накопления погрешностей в измерительных каналах ИИС:

а – без коррекции погрешности; б – с коррекцией погрешности в сетях с напряжением свыше 400 В; в – с коррекцией погрешности в сетях с напряжением до 400 В

В результате проведения анализа на Куйбышевской ж. д. результатов поверки показателей приборов учета при токе 5 % номинального (75 А) выяснено, что лишь 9 приборов работают в классе точности. Относительный недоучет потребления электрической энергии более 20 % имеют 18 приборов. Для устранения таких нарушений необходимо установить контроль за качеством проведения калибровки счетчиков подвижного состава путем проведения ежемесячно выбо-

рочной калибровки по разным депо, рассмотреть возможность внедрения локомотивных счетчиков повышенного класса точности. Использование счетчиков класса точности 2,5 не обеспечивает должной достоверности учета на тягу поездов.

Анализ процессов расхода электроэнергии с помощью нейронной сети

Подход к построению информационно-измерительных систем с использованием элементов искусственного интеллекта на основе нейронных сетей успешно развивается в работах [14, 15]. С учетом возможности объединения информационных потоков, а также опыта анализа составляющих небаланса электроэнергии на полигоне Куйбышевской ж. д. авторами предложена структура информационно-измерительной системы, использующая нейронную сеть для определения небаланса расхода электроэнергии. Применение такой ИИС позволит доработать уже эксплуатируемые информационные системы и улучшить контроль небаланса путем экспертных решений [7].

На рис. 3 представлена структурная схема предлагаемой ИИС. Входной сигнал поступает на блок ТТ и БК, на блоке БК формируется корректирующий сигнал. Далее скорректированный сигнал поступает на счетчик. После сигнал передается через УПД либо по сети передачи данных, либо с помощью интернет-модемов. Вся информация поступает в ЭВМ и заносится в базу данных БД.

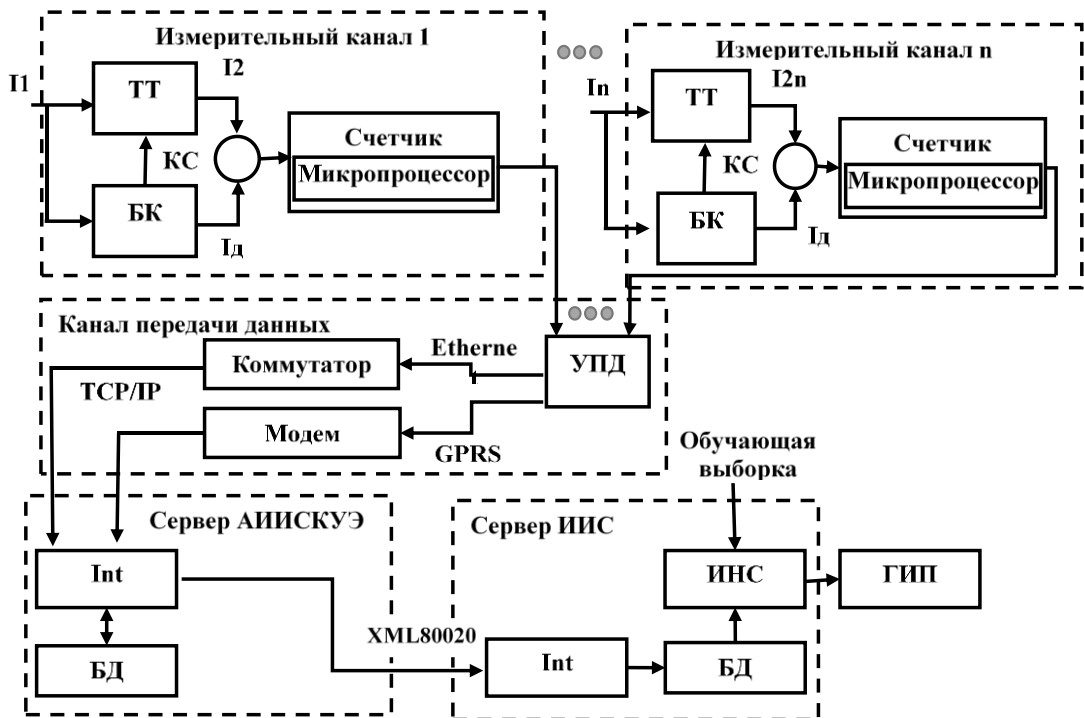


Рис. 3. Структурная схема информационно-измерительной системы:
 ТТ – трансформатор тока; БК – блок коррекции; КС – корректирующий сигнал; УПД – устройство передачи данных; ИНС – искусственная нейронная сеть; БД – база данных; ГИП – графический интерфейс пользователя; Int – интерфейс взаимодействия с БД; XML80020 – форма представления данных из АИISKУЭ

Для обучения нейронной сети были выбраны показатели по тяговой подстанции «Жигулевское море» КБШ ЖД за период I и II кварталов 2018 г. с экспертным анализом факторов небаланса. В качестве эксперта выступал специалист отдела эксплуатации АИИС КУЭ Куйбышевской дирекции по энергообеспечению.

Вначале готовится выгрузка из АИИС КУЭ значений показаний электросчетчиков на входе и выходе участка. Далее рассчитывается значение небаланса $W_{нб}$ как разница между показаниями на входе $W_{вх}$ и выходе $W_{вых}$ участка электросети в момент времени t . Полученное значение сравнивается с нормативным значением данного участка n . Если $W_{нб} > n$, то эксперт выявляет наличие дополнительных факторов, таких как наличие ремонтных работ h_i на участке и прохождение поезда m_i . При наличии одного из этих факторов небаланс считается допустимым, иначе делается вывод о наличии сверхнормативного небаланса и устанавливается признак $k = 1$.

Подготовленная обучающая выборка для обнаружения потерь электроэнергии имеет вид

$$P_i(t) = \{W_{iвх}, W_{iвых}, h_i, m_i, n, k_i\}, i = 1, \dots, I,$$

где P_i – наличие сверхнормативного небаланса электроэнергии;
 t – получасовые интервалы времени за время обучения нейросети;
 $W_{iвх}$ – показания счетчиков на входе участка в момент времени t ;
 $W_{iвых}$ – показания счетчиков на выходе участка в момент времени t ;
 h_i – признак, указывающий на проведение ремонтных работ на участке в момент времени t ;
 m_i – признак прохода поезда по участку в момент времени t ;
 n – норма потерь электроэнергии для данного участка сети;
 k_i – признак наличия сверхнормативного небаланса электроэнергии, выявленный экспертом ($k_i = 0$ при $W_{нб} \leq n$ и $k_i = 1$ при $W_{нб} > n$).

Нейронная сеть построена на компоненте MatLab для проектирования и обучения нейронных сетей Neural Time Series (ntstool) [8–10]. Использование функции PREPARETS позволяет оставить исходные временные ряды неизменными, легко настраивая их для сети с разными размерами задержек как для открытых, так и закрытых нейронных сетей.

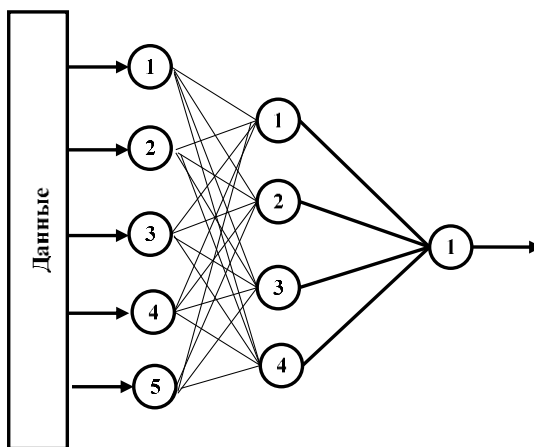


Рис. 4. Схема нейронной сети для выявления потерь электроэнергии

Структура нейронной сети для выявления потерь на участках электросети представлена на рис. 4. Она состоит из 5 входных нейронов первого слоя, 4 нейронов скрытого слоя и 1 выходного нейрона. Функция активации нейрона – сигмоид. Для настройки весов нейронной сети используется алгоритм обучения с учителем, известный как алгоритм обратного распространения ошибки. Количество нейронов входного слоя сети определяется входными параметрами $W_{ВХ}$, $W_{ВЫХ}$, h , m , n . Наилучший результат обучения достигнут при двухслойной нейронной сети при 4 нейронах в скрытом слое, т. к. ошибка в таком случае минимальна.

Обучение нейронной сети было остановлено на 225-й эпохе, и среднеквадратичная ошибка проверки достоверности результатов была равна 0,00501. Коэффициент корреляции R при обучении равен 0,9873, проверочный набор $R=0,9905$, тестовый $R=0,9939$, все наборы $R=0,9887$. Оценка качества обучения показала, что коэффициент корреляции R в среднем равен 0,9499, что свидетельствует о высокой точности работы построенной нейронной сети.

Эффективность использования нейронной сети

Средний небаланс по подстанции «Жигулевское море» в предыдущие годы составлял 20 %. Своевременное выявление с помощью искусственной нейронной сети текущего ненормированного небаланса на данном участке и проведение на основании этого анализа показателей потребления электроэнергии позволяет оперативно выдавать рекомендации о необходимых корректирующих действиях. За период функционирования в 2018 году ИИС с разработанной нейронной сетью и при проведении соответствующих организационных и технических работ небаланс на рассматриваемом участке был уменьшен до 5 %.

В дальнейшем полученные результаты можно использовать для решения задач контроля и прогнозирования потребления электроэнергии, а также для управления энергообъектами [11–16].

Заключение

Предлагаемый подход к интеллектуализации информационно-измерительной системы учета коммерческих потерь электроэнергии обеспечивает достоверный анализ ситуаций с несанкционированным отбором энергии, незаконными подключениями, исключает субъективизм операторов в оценке расхода электроэнергии.

Использование нейронных сетей в совокупности с оснащением измерительных каналов корректирующими устройствами позволяет провести модернизацию АИИС КУЭ без замены уже эксплуатируемых измерительных устройств. В результате повышается точность расчета коммерческой составляющей потерь без значительных финансовых затрат. Кроме того, использование методов искусственного интеллекта дает возможность повысить оперативность управленческих решений.

Объединение различных по назначению АИИС не потребует изменения аппаратной части, а затронет лишь программную составляющую, что уменьшит расходы на внедрение.

Предлагаемые изменения могут стать основой для формирования требований к модернизируемым или вновь вводимым в эксплуатацию элементам энергосистемы, обеспечивающим совместимость с уже эксплуатируемыми устройствами не только на физическом, но и на информационном уровне. Снижение небала-

ланса до 5 % позволит сэкономить в год по всей Куйбышевской железной дороге порядка 25 млн руб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Правительства РФ «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» (утв. 04.05.2012 № 442, ред. 22.02.2016).
2. Постановление Правительства РФ «Об утверждении правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности» (утв. 27.12.2010 № 1172, ред. от 29.02.2016).
3. *Франтасов Д.Н., Кудряшова Ю.В., Ефимов А.А.* Перспективные направления модернизации информационно-измерительных систем энергообъекта на транспорте // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 2. – С. 103–109.
4. *Тюгашев А.А., Франтасов Д.Н., Кудряшова Ю.В.* Информационно-измерительная система контроля потерь электроэнергии // Мягкие вычисления и измерения. – 2018. – № 3. – С. 25–29.
5. *Франтасов Д.Н., Митрофанов А.В.* Исследование новых методов и средств учета энергоресурсов на транспорте // Образование, наука, транспорт в XXI веке: опыт, перспективы, инновации: V Международная научно-практическая конференция. – Самара; Оренбург: СамГУПС, 2015. – С. 265–266.
6. *Шойшмова С.П.* Потери электроэнергии и способы борьбы с ними // Молодой ученый. – 2015. – № 23. – С. 278–280.
7. *Бильгаева Л.П., Власов К.Г.* Прогнозирование продаж в среде MatLab // Естественные и математические науки в современном мире: сб. ст. по матер. XLIX Междунар. науч.-практ. конф. – № 12(47). – Новосибирск: СибАК, 2016. – С. 64–76.
8. *Бабанова И.С., Абрамович Б.Н.* Разработка перспективного планирования энергосистемы на основе создания модели искусственной нейронной сети // Материалы XI Международной научной школы молодых ученых и специалистов, 24–28 ноября 2014 г. – М.: ИПКОН РАН, 2014. – 388 с.
9. *Ефименко Г.А., Сеница А.М.* Нейронные сети в MatLab [Электронный ресурс] // Digiratory. 2017 г. URL: <https://digiratory.ru/508> (дата обращения: 19.09.2018).
10. *Гаранин М.А., Блинкова С.А.* Статистический анализ факторов, определяющих энергообеспеченность перевозочного процесса // Образование, наука, транспорт в XXI веке: Материалы V международной научно-практической конференции. – Самара; Оренбург: СамГУПС, 2015. – С. 13.
11. *Давлетов Б.Б.* Методы снижения коммерческих потерь в электроэнергетике // Развитие и актуальные вопросы современной науки. – 2017. – № 6 (6). – С. 9–11.
12. *Воронина Е.В., Хлебникова М.В., Хлебникова Н.В.* Определение потерь электроэнергии в электрических сетях // Будущее науки – 2018: Сборник научных статей 6-й Международной молодежной научной конференции. В 4 т. Отв. ред. А.А. Горохов. – 2018. – С. 334–336.
13. *Крестов Д.А., Рузанов Р.В.* Прогнозирование электропотребления энергосбытовой компании с использованием искусственной нейронной сети // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 2.
14. *Галушка В.В., Фатхи В.А.* Формирование обучающей выборки при использовании искусственных нейронных сетей в задачах поиска ошибок баз данных // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2.
15. *Орлов С.П., Гирип Р.В.* Интеллектуализация контроля и диагностики электронных приборов на основе нейронных сетей // Труды XXI Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM–2018). – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. – С. 99–102.
16. *Хачкиев В.В.* Обзор создания искусственной нейронной сети в прикладном программном пакете MatLab // Студенческий электрон. научн. журн. – 2018. – № 10(30).

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2018 г.

MODERNIZATION OF INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM WITH USE OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES FOR ANALYSIS OF ELECTRICITY BALANCE ON KUIBYSHEV RAILWAY

A.A. Molochkov¹, A.A. Tyugashev², D.N. Frantsov², Yu.V. Kudryashova²

¹ Kuibyshev Energy Supply department – a structural unit of Transenergo – a branch of Russian Railways
29A, ul. Chernorechenskaya, Samara, 443030, Russian Federation

² Samara State Transport University
2V, Svoboda str., Samara, 443066, Russian Federation

Abstract. *The paper discusses the use of an artificial neural network in an information-measuring system for electricity metering to identify and analyze factors affecting the imbalance of electrical energy consumption. The exploited information-measuring systems for commercial metering of electric power of the Kuibyshev Railway are considered. It is established that commercial losses are inherent in the retail market, which is associated with a large number of network connections and the difficulty of identifying unauthorized connections. The problem of measuring losses has been studied and the discrepancy between the accuracy class of the existing measuring equipment at electricity metering points has been revealed. The possibility of increasing the accuracy of metering due to the introduction of a correction device of measuring transducers is considered. An artificial neural network is proposed to be used to identify sections of the network with excessive losses. The structure of the input and output data and the organization of the developed neural network is described. Training of the neural network was carried out on the data on electric power losses at the traction substation "Zhiguli Sea" of the Kuibyshev Railway. The general structure of the information-measuring system for controlling the imbalance of electricity is given. It is shown that the use of neural network technologies can reduce imbalance to 5%.*

Keywords: *power unbalance, commercial power losses, information-measuring system, measuring transformer, neural network, artificial neural network.*

REFERENCES

1. Resolution of the Government of the Russian Federation «On functioning of retail markets of electric energy, full and (or) partial restriction of the mode of consumption of electric energy» (app. 04.05.2012 g. № 442, ed. 22.02.2016 g.).
2. Resolution of the Government of the Russian Federation «On approval of the rules of the wholesale market of electric energy and power and on amendments to some acts of the Government of the Russian Federation on the organization of the wholesale market of electric energy and power» (approved. 27.12.2010 No1172, ed. by 29.02.2016 g.).
3. *Frantsov D.N., Kudryashov Yu., Efimov A.A.* Promising directions of modernization of information-measuring systems of the power facility transport // Bulletin of Rostov state University of railways. 2017. No. 2. Page 103–109.
4. *Tugashev A.A., Frantsov D.N., Kudryashova Yu.V.* Information-measuring system of control of nergy losses // Soft calculations and measurements. № 3, 2018. p. 25–29.
5. *Frantsov D.N., Mitrofanov A.V.* Research of new methods and means of energy accounting of transport // Education, science, transport in XXI century: experience, prospects, innovations. V international scientific and practical conference. Samara, Orenburg: Samara State, 2015. P. 265–266.
6. *Salimova S.P.* Energy loss and ways of dealing with them // a Young scientist. – 2015. – № 23. – P. 278–280.

Aleksandr A. Molochkov, Deputy Director.

Andrey A. Tyugashev (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

Dmitry N. Frantsov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Yulya V. Kudryashova Teacher.

7. *Beligaeva L.P., Vlasov K.G.* Sales forecasting in matlab // Natural and Mathematical Sciences in the modern world: collected articles on the mater. XLIX international. scientific.-prakt. Conf. № 12 (47). – Novosibirsk: Sibak, 2016. – P. 64–76.
8. *Babanova I.S., Abramovich B.N.* Development of long-term planning of the power system based on the creation of an artificial neural network model // Proceedings of the XI International scientific school of young scientists and specialists, November 24–28, 2014. – M: ipcon RAS, 2014. – 388 p.
9. *Efimenko G.A., Bird A.M.* Neural network in MatLab [Electronic resource] // Digiratory. 2017. URL: <https://digiratory.ru/508> (date accessed: 19.09.2018).
10. *Garanin M.A., Blinkov S.A.* Statistical analysis of the factors determining the energy supply of the transportation process // Education, science, transport in the XXI century: Materials of the international scientific and practical conference. – Samara: Orenburg, 2015. – p. 13.
11. *Davletov B.B.* The methods of reducing commercial losses in the power industry // Development and topical issues of modern science. 2017. No. 6 (6). P. 9–11.
12. *Voronina E.V., Khlebnikova M.V., Khlebnikova N.V.* In definition of losses of the electric power in electric networks // In the collection: the Future of science-2018 Collection of scientific articles of the 6th international youth scientific conference. In 4 volumes. The responsible editor of the peas. 2018. P. 334–336.
13. *Krestov D.A., Ruzanov R.V.* Forecasting of power consumption of an energy-saving company using an artificial neural network // Engineering Bulletin of the don, 2015, № 2.
14. *Galushka V.V., Fatkhi V.A.* Formation of a training sample in the use of artificial neural networks in the problems of search of errors in databases // Engineering Bulletin of the don, 2013, № 2.
15. *Orlov S.P., Girin R.V.* Intellectualization of monitoring and diagnostics of electronic devices based on neural networks // Proceedings of the XXI International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM–2018). – SPb.: SPbETU «LETI», 2018. – p. 99–102.
16. *Khackiew V.V.* Review of artificial neural network in the application software package Matlab // Student electron. scientific. journal. 2018. No. 10 (30).

УДК 681.391:543/545

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ЧЕБЫШЕВА – ЭРМИТА В ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Р.Т. Сайфуллин, А.В. Бочкарев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Цель работы заключается в разработке теоретических и прикладных подходов, которые позволяют синтезировать компактные и быстрые вычислительные алгоритмы оценки полезного сигнала, реализовать все потенциальные возможности аналитических приборов. Для достижения указанной цели выходной сигнал аналитического прибора представляется в виде разложения в базисе функций Чебышева – Эрмита: нахождение коэффициентов разложения – кодирование данных, восстановление сигнала по заданным коэффициентам в данном базисе – декодирование данных. Для оценки качества результатов восстановления использована приведенная погрешность. Даны примеры восстановления сигнала при различном количестве функций разложения Чебышева – Эрмита. Рассмотрены ограничения способа, связанные, во-первых, с несовпадением длительности локализации сигнала и базисных функций, во-вторых, с увеличением требуемого числа базисных функций при усложнении формы исследуемого сигнала. Для согласования длительностей сигнала и базисных функций предложен масштабный коэффициент, позволяющий сжимать или растягивать базисные функции во времени. При обработке сигналов сложной формы предложен алгоритм деления исходного сигнала на более простые фрагменты. Для модели аналитического пика в виде функции Гаусса представлена зависимость значений коэффициентов разложения от изменения параметров пиков (ширины и положения пиков на оси развертки). Рассмотрена возможность восстановления сглаженных первой и второй производных исходного сигнала с использованием коэффициентов разложения по функциям Чебышева – Эрмита. Для этого сформирован базис декодирования производных соответственно первого и второго порядков. Приведены соответствующие примеры. Для вычислений и графического представления результатов использована система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica 11.3.

Ключевые слова: функции Чебышева – Эрмита, аналитический сигнал, аналитическое приборостроение, функция Гаусса, производная сигнала, преобразование сигналов, кодирование и декодирование сигнала.

Введение

Аналитическое приборостроение является интенсивно развивающейся областью измерительной техники, предназначенной для исследования состава и свойств веществ. Развитие этого направления идет по пути улучшения характеристик аналитических приборов и внедрения новых методов анализа результатов измерений. Среди задач аналитического приборостроения следует выделить функциональное преобразование, фильтрацию, детектирование и разделение

Сайфуллин Раухат Талгатович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Информационно-измерительная техника».

Бочкарев Андрей Владимирович, аспирант.

наложенных аналитических сигналов, устранение искажающего действия аппаратной функции прибора и т. д. [1].

Совершенствование вычислительных технологий обработки измерительной информации для сигналов сложной формы связано с развитием прикладных математических методов, лежащих в основе данных технологий, с внедрением новых программно-алгоритмических средств обработки данных. Таким образом, актуальной проблемой является разработка теоретических и прикладных подходов, которые позволяют синтезировать компактные и быстрые вычислительные алгоритмы оценки полезного сигнала, направленные на реализацию всех потенциальных возможностей аналитических приборов [2].

В этой связи в данной работе для математического описания сигнала $f(x)$ предлагается использовать проекционную схему кодирования-декодирования данных, основанную на разложении сигнала в ряд по функциям Чебышева – Эрмита [3–8]. Одновременная локализация этих функций как в частотном, так и во временном пространстве делает метод достаточно устойчивым к инструментальным погрешностям [9, 10].

Определение функций Чебышева – Эрмита

Разложение сигнала в ряд по функциям Чебышева-Эрмита позволяет производить анализ сигнала и его преобразование Фурье одновременно, поскольку функции Чебышева-Эрмита являются собственными функциями преобразования Фурье [11].

Функции Чебышева-Эрмита определяются следующим образом:

$$\varphi_n(x) = \frac{1}{\alpha_n} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot H_n(x), \quad (1)$$

где $\alpha_n = \sqrt{2^n n! \sqrt{\pi}}$ - нормирующая константа;

$H_n(x)$ – стандартизированный многочлен Чебышева-Эрмита степени n :

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \frac{d^n e^{-x^2}}{dx^n}.$$

При $x \rightarrow \infty$ функции Чебышева-Эрмита обращаются в нуль.

Пусть $F(\cdot)$ – оператор преобразования Фурье, тогда:

$$F(\varphi_n(x)) = i^n \cdot \varphi_n(x).$$

Для всех $n \geq 2$ функции Чебышева-Эрмита можно определить через рекуррентные формулы:

$$\varphi_n(x) = x \sqrt{\frac{2}{n}} \cdot \varphi_{n-1}(x) - \sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot \varphi_{n-2}(x), \quad (2)$$

$$\varphi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}},$$

$$\varphi_1(x) = \frac{\sqrt{2}x}{\sqrt{4\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}.$$

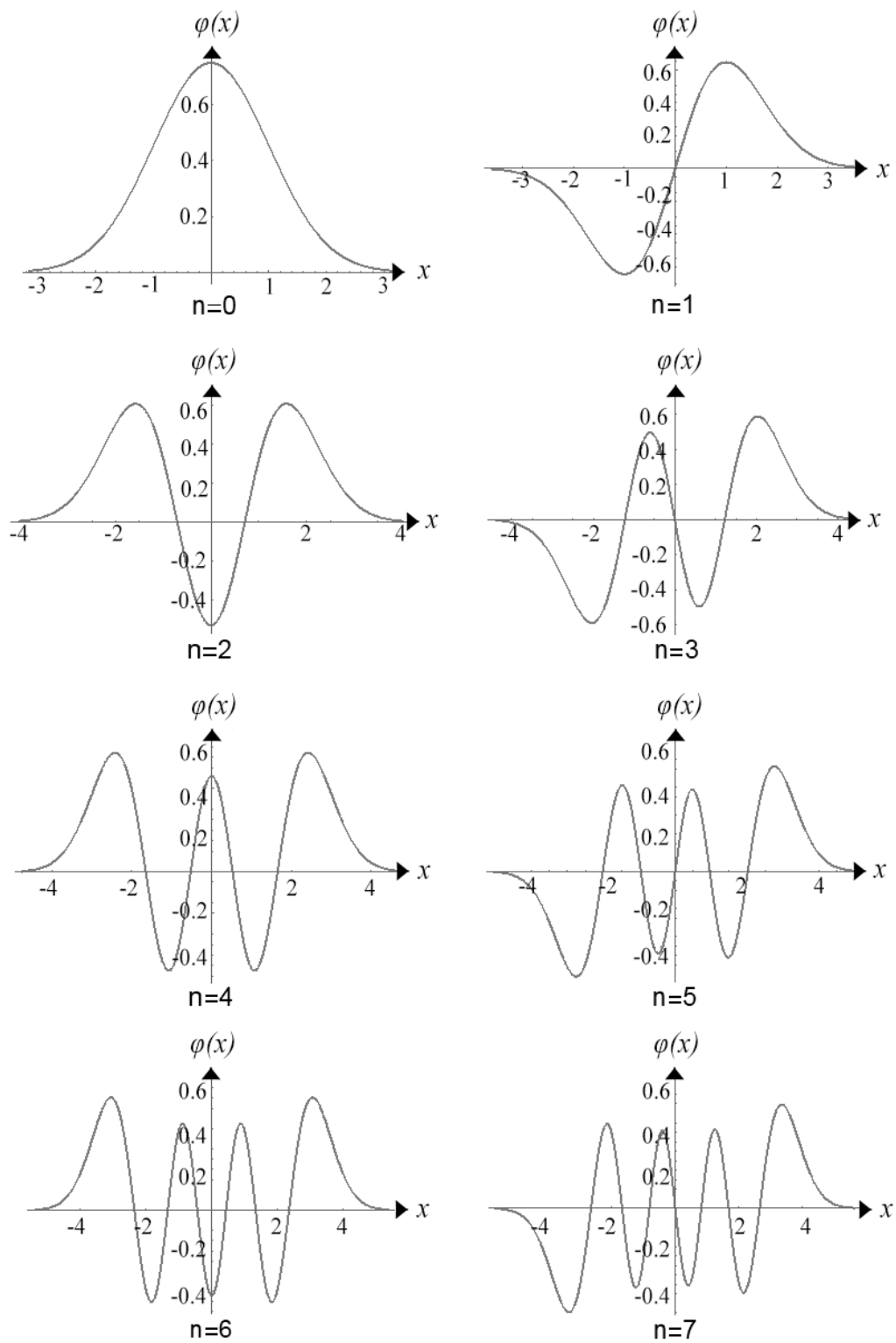


Рис. 1. Функции Чебышева-Эрмита для $n=0,1,\dots,7$

Каждая из функций $\varphi_n(x)$ локализована на некотором отрезке $[-\tau_n, \tau_n]$.

Функции Чебышева-Эрмита образуют на бесконечном интервале $-\infty < x < \infty$ полную ортогональную нормированную с единичным весом систему:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_n(x) \cdot \varphi_m(x) dx = \begin{cases} 0, m \neq n, \\ 1, m = n. \end{cases}$$

Четные и нечетные функции Чебышева-Эрмита также образуют полную ортогональную нормированную с единичным весом систему на интервале $0 < x < \infty$.

Примеры функций Чебышева-Эрмита $\varphi_n(x)$ для $n=0,1,\dots,7$ приведены на рис. 1.

Использование функций Чебышева-Эрмита для кодирования и декодирования сигналов

Набор функций $\varphi_n(x)$ (2) задает базис для кодирования и декодирования сигналов.

Представление сигнала $f(x)$ с помощью n функций разложения (алгоритм кодирования) заключается в нахождении коэффициентов c_n . В силу локализации функций Чебышева-Эрмита нахождение данных коэффициентов можно свести к формуле:

$$c_n = \int_{-\tau_n}^{\tau_n} f(x) \cdot \varphi_n(x) dx, \quad n = 0, 1, \dots, N. \quad (3)$$

где $[-\tau_n, \tau_n]$ – отрезок, на котором локализована функция $\varphi_n(x)$.

На практике в качестве $[-\tau_n, \tau_n]$ используют некоторый отрезок, который достаточно легко связать с номером полинома. Этот отрезок называют интервалом интегрирования, причем на нем локализована большая часть функции Чебышева-Эрмита порядка n . Наиболее простым способом задать границы интегрирования является выражение, характеризующее положение крайней точки перегиба в n -й базисной функции:

$$\tau_n = \sqrt{2n+1}.$$

Алгоритм декодирования с помощью n коэффициентов разложения выражается формулой:

$$\hat{f}(x) = \sum_{n=0}^N c_n \cdot \varphi_n(x). \quad (4)$$

Описанный алгоритм кодирования-декодирования обладает сглаживающим свойством [12], и позволяет получить не только сглаженный сигнал, но также и его сглаженную производную k порядка, при наличии соответствующего базиса. Формируя различные базисы перехода от коэффициентов разложения (3) к различным характеристикам, можно получить универсальный аппарат для быстрого получения также коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования, устранения аппаратной функции прибора и т.д.

При кодировании с использованием полиномов с номерами $n = 0, 1, \dots, N$ для различных N достигается различная точность восстановления, причем

с увеличением N точность повышается. Для численной оценки точности восстановления при использовании полиномов Чебышева-Эрмита можно воспользоваться наиболее простой из согласующихся с визуальной оценкой точности характеристик – максимальным значением приведенной погрешности $\hat{f}(x)$ относительно $f(x)$:

$$\gamma = \max \left(\frac{f(x) - \hat{f}(x)}{\max[f(x)]} \right) \cdot 100\%,$$

где $\max[f(x)]$ – максимальное значение функции на отрезке локализации.

При кодировании-декодировании сигналов важно учитывать область локализации функций Чебышева-Эрмита. Дело в том, что длительность исследуемого сигнала может быть значительно отличаться от области локализации используемых базисных функций. Если длительность сигнала меньше длительности локализации используемых базисных функций, результат декодирования будет иметь искажения, связанные с недостаточной детализацией. В случае же, когда локализация базисных функций меньше длительности сигнала, при восстановлении будут наблюдаться искажения, связанные с появлением отсутствующих в исследуемом сигнале высокочастотных составляющих. Для устранения данного недостатка можно ввести масштабный коэффициент k :

$$k_n = \frac{l}{2\tau_n},$$

где l – длительность исследуемого сигнала.

Данный коэффициент характеризует, во сколько раз длительность сигнала отличается от интервала интегрирования, принимаемого за область локализации функций Чебышева-Эрмита. При $k_n > 1$ функцию с номером n следует «растягивать» вдоль оси времени для согласования размеров с сигналом; при $k_n < 1$ функцию с номером n следует «сжимать» вдоль оси времени для согласования размеров с сигналом. Согласовывая область локализации базисных функций с длительностью сигналов, стоит учесть, что при формировании коэффициентов разложения согласно (3) следует полученный результат делить на k_n .

Также важно отметить, что масштабирование каждой из функции n порядка на соответствующий ей коэффициент k_n вызывает существенные погрешности восстановления из-за нарушения нормировки функций друг относительно друга. При этом, в случае масштабирования всех базисных функций на один и тот же коэффициент, такой погрешности не возникает.

Выбирать k_n следует, опираясь на число используемых функций для разложения сигнала. В общем случае достаточно, чтобы порядок коэффициента n не превышал половины от максимального значения коэффициента N :

$$k = k_{N/2}.$$

Таким образом, с учетом согласования локализации функций Чебышева-Эрмита и длительности исследуемого сигнала, можно записать (3) в следующем виде:

$$c_n = \frac{1}{k} \int_{-\tau_n}^{\tau_n} f(x) \cdot \varphi_n \left(\frac{x}{k} \right) dx, \quad n = 0, 1, \dots, N. \quad (5)$$

Пример кодирования с последующим декодированием представлен ниже. В качестве тестового сигнала используется сумма трех гауссовских пиков – по цен-

три пика с единичной амплитудой, симметрично ему слева и справа – пики с амплитудой 0,7. Среднеквадратичная ширина центрального пика – 2, боковых – 0,8.

На рис. 2 представлен сам исходный сигнал, а также полученные результаты при различном числе полиномов разложения N .

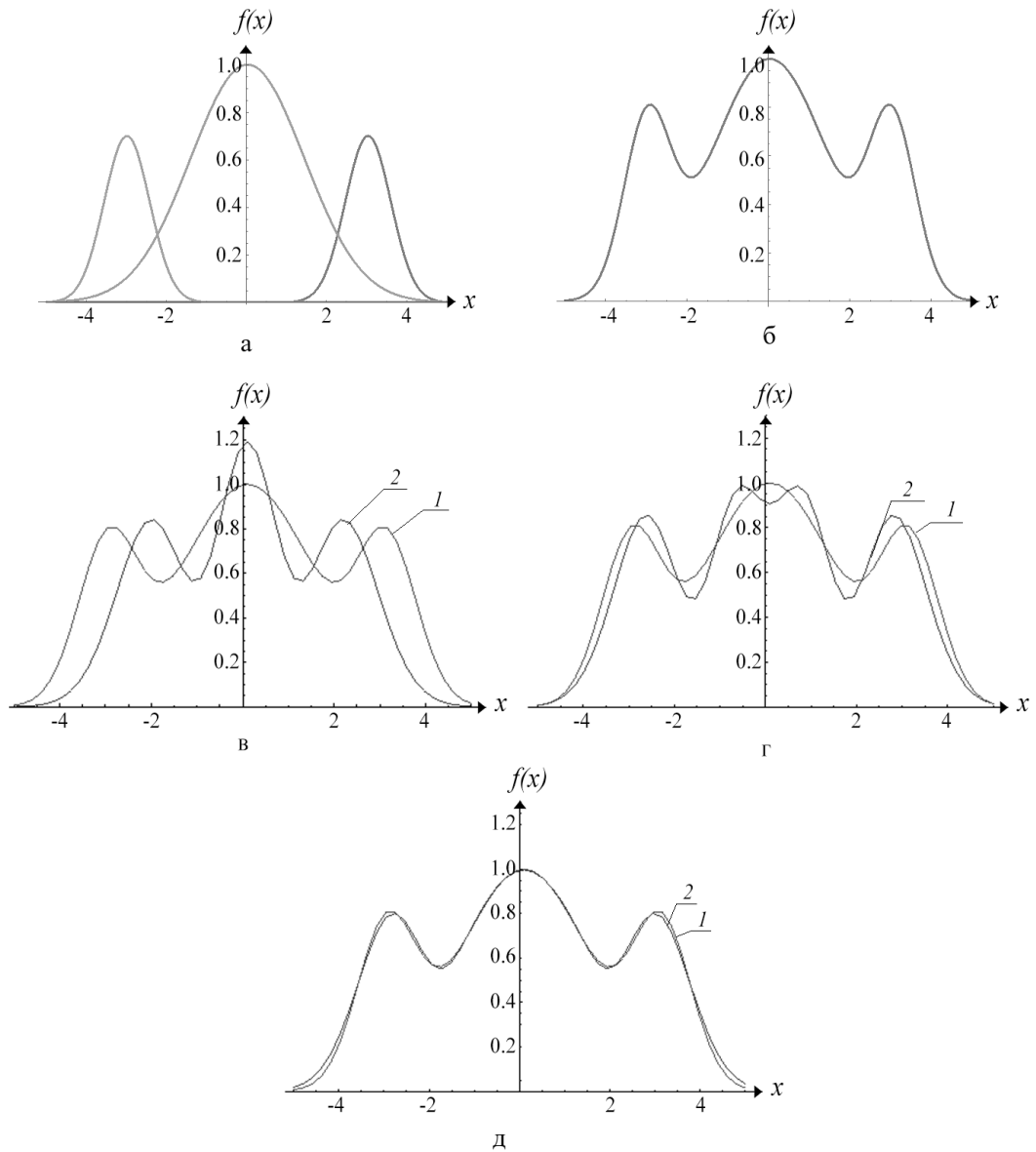


Рис. 2. Исходный и восстановленный сигнал
 1 – восстановленный сигнал, 2 – исходный сигнал,
 а – отдельные составляющие, б – исходный сигнал, в – при $N=5$, г – при $N=7$, д – при $N=9$

Численные оценки точности восстановления для некоторых $N \leq 30$ представлены в таблице.

Зависимость γ от N при восстановлении заданного сигнала

| | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| N | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 | 15 | 17 | 18 |
| $\gamma_N, \%$ | 27 | 12 | 4 | 1,7 | 0,58 | 0,19 | 0,16 | 0,15 |
| N | 19 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 29 | 30 |
| $\gamma_N, \%$ | 0,048 | 0,044 | 0,051 | 0,065 | 0,064 | 0,048 | 0,057 | 0,61 |

Необходимо заметить, что число используемых коэффициентов разложения будет зависеть от конфигурации исследуемого сигнала. В случае простой формы сигнала (к примеру, рис. 2, б) для обеспечения сравнительно высокой точности восстановления ($\gamma < 10\%$) достаточно $\sim 7-10$ базисных функций Чебышева-Эрмита, для более сложных форм сигнала их число увеличивается.

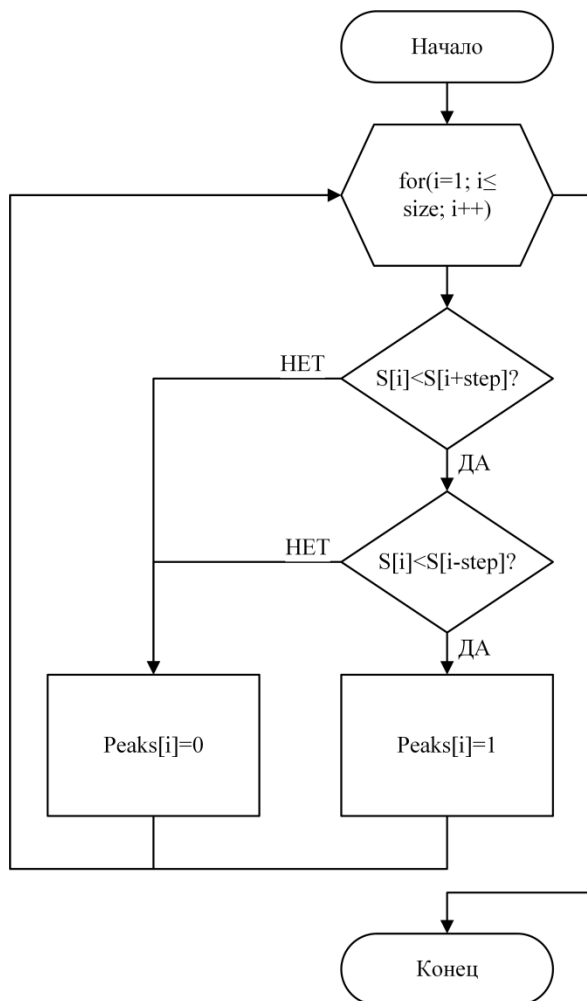
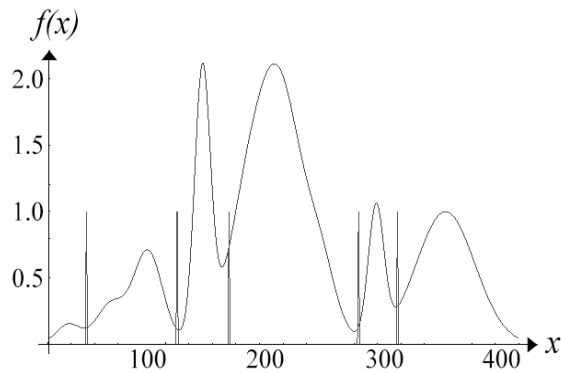
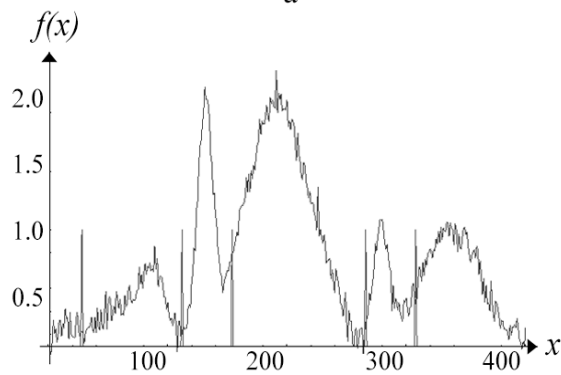


Рис. 3. Схема алгоритма разбиения сигнала на фрагменты по пикам

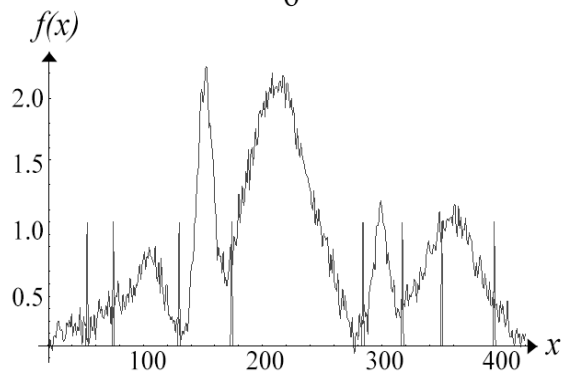
Для упрощения конфигурации произвольного сигнала можно разбить его на фрагменты. В данной работе, для решения этой задачи, предлагается проанализировать знак первой производной исходного сигнала. Поскольку аналитические данные представляют собой массивы чисел, для нахождения знака производной достаточно сравнить отстоящие друг от друга на некоторое значение отсчеты. Анализируя знак производной, можно обнаружить границы аналитических пиков, составляющих исходный сигнал. Эти границы предлагается использовать в качестве границ отдельных фрагментов. Описанную процедуру можно представить в виде алгоритма, изображенного на рис. 3.



а



б



в

Рис. 4. Результат определения границ фрагментов
 а – сигнал без помехи при step=10, б – с помехой при step=10, в – с помехой при step=5

Согласно данному алгоритму, создается массив Peaks, совпадающий по размеру с массивом исследуемого сигнала S и состоящий из нулей в тех точках, где границы пиков обнаружены не были, и единиц в тех точках, где были. Для приближенного обнаружения границ пиков i -й элемент должен быть меньше чем $i+step$ -й и $i-step$ -й элементы (положительная производная слева и отрицательная производная справа, соответственно). Константа $step \in \mathbb{N}$ задает шаг, на который отстоят друг от друга сравниваемые элементы. В общем случае, когда на исследуемый сигнал наложена помеха, $step$ не может быть равным 1, поскольку в этом случае массив Peaks будет характеризовать, по большей части, локальные максимумы помехи. Таким образом, сформированный алгоритм направлен, в первую очередь, на минимизацию ложных срабатываний из-за наличия помехи.

Для иллюстрации зависимости точности работы алгоритма (см. рис. 3), на рис. 4 представлены примеры определения границ пиков: для сигнала без наложенной помехи с параметром $step=10$, с помехой при значении $step=10$, с помехой при $step=5$. Помеха во всех случаях имеет нормальный закон распределения, нулевое среднее и СКО 0,08. Границы фрагментов обозначены дельта-функцией.

Данный алгоритм позволяет быстро разделить сигнал сложной конфигурации на более простые фрагменты, пригодные для дальнейшей обработки.

1. Вычисление коэффициентов разложения гауссовского пика

Для различных задач хроматографии, к примеру, для определения параметров совмещенных аналитических пиков, можно рассмотреть задачу кодирования сигнала с учетом модели пиков как функции Гаусса [13-15]. Эта функция может быть описана следующим выражением:

$$g(t) = a \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\beta^2}}, \quad (6)$$

где a – амплитудное значение пика,
 μ – смещение пика вдоль оси времени,
 β – среднеквадратическая ширина пика.

Подставляя в качестве $f(x)$ в выражение (5) функцию (6) получим:

$$c_n = \frac{a}{k} \int_{-\tau_n}^{\tau_n} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\beta^2}} \cdot \varphi_n\left(\frac{x}{k}\right) dx, \quad n = 0, 1, \dots, N, \quad (7)$$

- общий вид выражения для нахождения n -го коэффициента разложения в базисе Чебышева-Эрмита.

Можно заметить, что (7) зависит не только от координаты x , но и от параметров, задающих форму пика – a , μ и β . Следовательно, проинтегрировав данное выражение при некотором n можно получить зависимость n -го коэффициента разложения от a , μ и β . Поскольку a выступает в качестве константы, ее влияние на величину коэффициентов будет линейным, куда важнее рассмотреть зависимость коэффициентов от смещения μ и среднеквадратической ширины β , которые в качестве параметров находятся в степени экспоненты.

В сущности, выражение (7) представляет собой выражение для взаимной корреляции n -й функции Чебышева-Эрмита (1) с функцией Гаусса (6). Причем, с увеличением β данное выражение отражает взаимную корреляцию озвученных функций с уменьшением детализации, по аналогии с изменением параметра

масштаба для непрерывного вейвлет-преобразования. На рис. 5 графически проиллюстрирована зависимость коэффициентов разложения от β и μ при $n = 0, 1 \dots 5$. Для базисных функций более высоких порядков вычисление аналитических выражений при произвольных β и μ значительно усложняется.

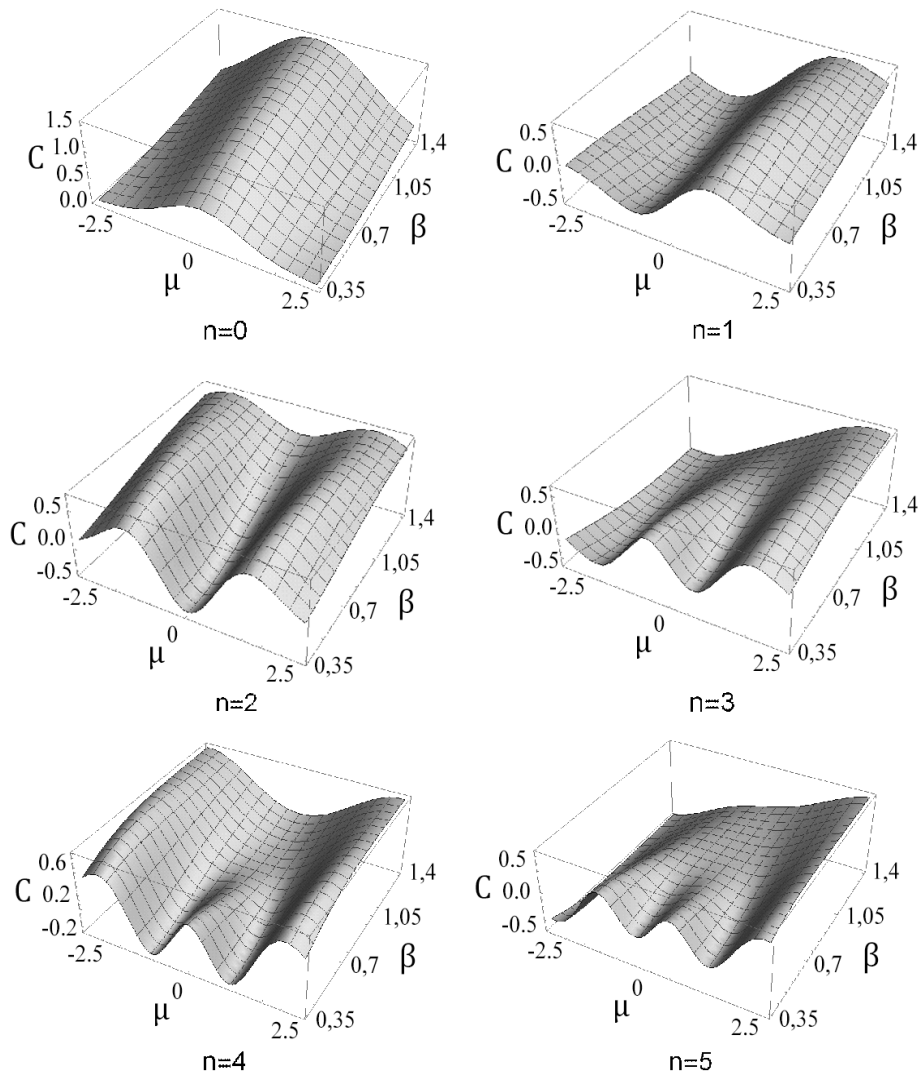


Рис. 5. Зависимость коэффициентов разложения от β и μ

Использование алгоритма кодирования-декодирования для вычисления производных различных порядков

Как было озвучено ранее, функции Чебышева-Эрмита могут быть использованы для перехода к различным преобразованиям исследуемого сигнала, при наличии соответствующих базисов. При обработке сигналов аналитических приборов важным является возможность нахождения их производной, причем не только первого, но и высших порядков.

Для быстрого перехода к производным исследуемого сигнала можно осуществить дифференцирование (1) для формирования соответствующего базиса,

производных функций Чебышева-Эрмита. Выражения для первой и второй производной могут быть описаны следующим образом:

$$\frac{\partial \varphi_n(x)}{\partial x} = x \cdot \varphi_n(x) - \sqrt{2(n+1)} \cdot \varphi_{n+1}(x), \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi_n(x)}{\partial x^2} = (1+x^2) \cdot \varphi_n(x) - \sqrt{4(n+1)} \left[\sqrt{2} \cdot x \cdot \varphi_{n+1}(x) - \sqrt{n+2} \cdot \varphi_{n+2}(x) \right]. \quad (9)$$

Таким образом, соотношения (8) и (9) задают базис для вычисления производных, соответственно, первого и второго порядка. Первые 4 базисные функции представлены на рис. 6.

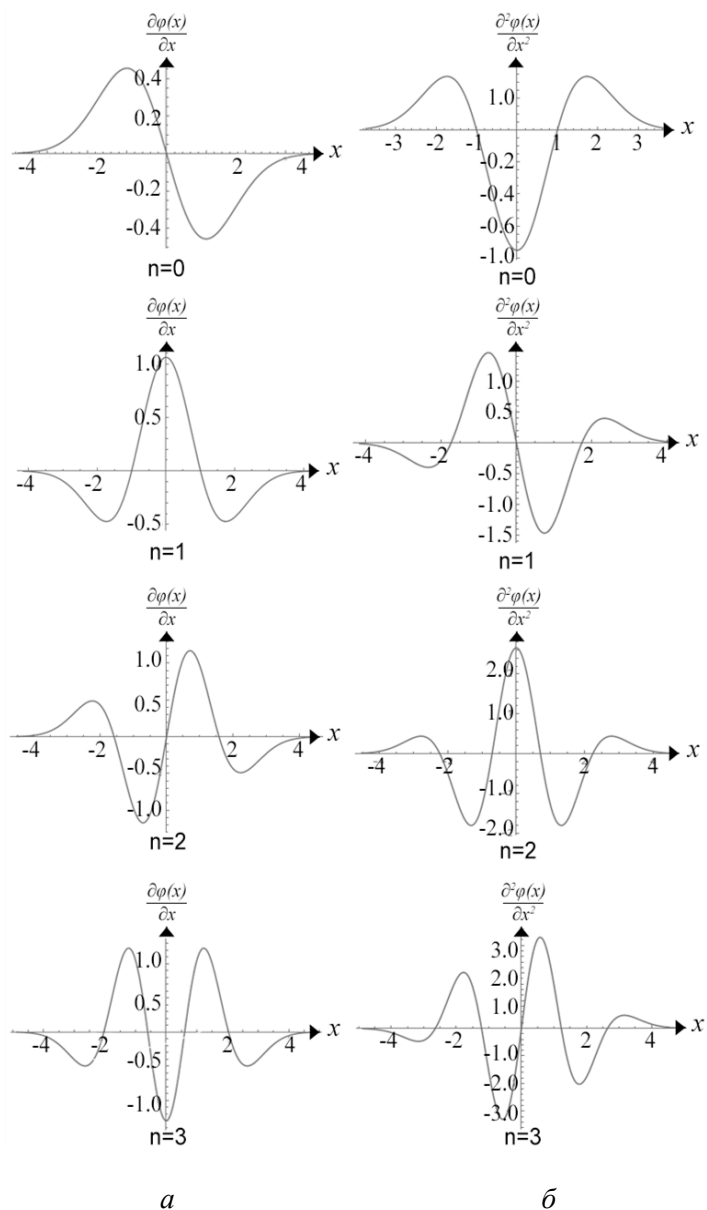


Рис. 6. Производные функций Чебышева-Эрмита: а – первого порядка, б – второго порядка

Полученные базисы позволяют восстанавливать первую, либо вторую производную исследуемого сигнала с помощью рассчитанных ранее коэффициентов разложения этого сигнала по самим функциям Чебышева-Эрмита. Для этого необходимо заменить в (4) $\varphi_n(x)$ на $\frac{\partial\varphi_n(x)}{\partial x}$ или $\frac{\partial^2\varphi_n(x)}{\partial x^2}$ соответственно:

$$\frac{\partial\hat{f}(x)}{\partial x} = \sum_{n=0}^N c_n \cdot \frac{\partial\varphi_n(x)}{\partial x},$$

$$\frac{\partial^2\hat{f}(x)}{\partial x^2} = \sum_{n=0}^N c_n \cdot \frac{\partial^2\varphi_n(x)}{\partial x^2}.$$

На рис. 7 показан пример осуществления восстановления производных сигнала при $N=7$. Очевидно, что производные восстанавливаются практически без искажений.

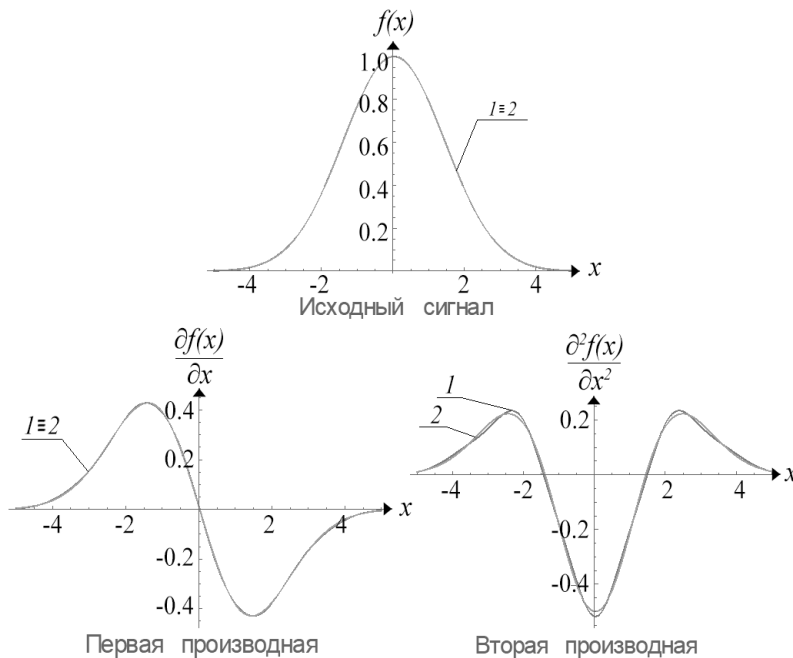


Рис. 7. Пример вычисления первой и второй производной анализируемого сигнала:
1 – восстановленный сигнал; 2 – исходный сигнал

Заключение

В качестве вычислительной технологии обработки аналитической информации целесообразно выбрать схему кодирования-декодирования сигналов в базисе функций Чебышева – Эрмита, на основе которой можно разрабатывать различные алгоритмы обработки в соответствии с поставленными задачами.

Приведены соотношения, позволяющие осуществить операцию кодирования сигнала и последующего его декодирования при восстановлении формы сигнала. Для кодирования сложных многокомпонентных сигналов предлагается алгоритм предварительного его разбиения на отдельные фрагменты. Для получения производных сигнала первого и второго порядков, используемых в алгоритмах обра-

ботки данных для локализации границ пиков, получен базис декодирования производных. Приведены примеры расчетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Русинов Л.А.* Автоматизация аналитических систем определения состава и качества веществ. – Л.: Химия, 1984. – 158 с.
2. *Гуревич А.Л., Русинов Л.А., Сягаев Н.А.* Автоматический хроматографический анализ. – Л.: Химия, 1980. – 192 с.
3. *Павельева Е.А., Крылов А.С.* Поиск и анализ ключевых точек радужной оболочки глаза методом преобразования Эрмита // Информатика и ее применения. – 2010. – № 1. – Т. 4. – С. 79–82.
4. *Martens J.B.* The Hermite transform-theory // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1595–1606.
5. *Martens J.B.* The Hermite transform-applications // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1607–1618.
6. *Estudillo-Romero A., Escalante-Ramirez B.* The Hermite transform: An alternative image representation model for iris recognition // LNCS, 2008. No. 5197. P. 86–93.
7. *Мамаев Н.В.* Алгоритм нелокального среднего на основе разложения по функциям Эрмита в задачах компьютерной томографии / Мамаев Н.В., Лукин А.С., Юрин Д.В., Глазкова М.А., Синицин В.Е. // ГРАФИКОН'2013. Труды конференции, 2013. – С. 254–258.
8. *Горлов В.А., Паришин Д.С.,* Разложение функции с экспоненциальным ростом в ряд Фурье по ортогональным полиномам Чебышева – Эрмита. // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – № 8–3 (19–3). – С. 245–248.
9. *Сега Г.* Ортогональные многочлены. – М.: Физматгиз, 1962. – 500 с.
10. *Суетин П.К.* Классические ортогональные многочлены. – М.: Физматлит, 2005. – 480 с.
11. Нейросетевой анализ и сопоставление частотно-временных векторов на основе краткосрочного спектрального представления и адаптивного преобразования Эрмита / Ю.М. Баяковский, А.О. Жирков, Д.Н. Корчагин, А.С. Крылов, А.С. Лукин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2001, 087.
12. *Балакин Д.А., Штыков В.В.* Построение ортогонального банка фильтров на основе преобразований Эрмита для обработки сигналов // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 9. – С. 1–15.
13. *Hongwei G.* A simple algorithm for fitting a Gaussian function // IEEE Sign. Proc. Mag. – 2011. – 28(9): P. 134–137.
14. *Ланге П.К., Унгаров М.Б.* Линейные аппроксимационные модели хроматографических сигналов // Информационно-измерительные и управляющие системы: сб. науч. статей. – 2014. – № 2(10). – С. 49–56.
15. *Хлопцев М.А.* Обработка плохо разделенных рентгеноспектральных флуоресцентных спектрограмм с использованием математической модели пиков // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2008. – № 1(21). – С. 201–203.

Статья поступила в редакцию 25 января 2018 г.

USING OF CHEBYSHEV-HERMITE FUNCTIONS FOR ANALYTICAL DEVICE SIGNALS PROCESSING

R.T. Sayfullin, A.V. Bochkarev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper deals with the development of theoretical and applied approaches for synthesis fast and compact analytical data processing algorithms which can be used to estimate analytical peaks parameters. These algorithms are based on analytical data decom-*

*Rauhat T. Sayfullin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Andrey V. Bochkarev, Postgraduate Student.*

position, the Chebyshev-Hermite polynomials are used as decomposition basis. The goal of using data decomposition is possibility of simple estimating of analytical peaks parameters by reconstructing different data transforms directly from decomposition coefficients. These transforms can be obtained by using corresponding bases. In this article considered following bases: basis for reconstruction initial data, bases for reconstruction smoothed first and second derivative of initial data. Examples of using these bases are given. Limitations of this approach are described. Relation between values of decomposition coefficients and modeled analytical peak parameters are obtained, Gauss function used for peak model. The Mathematica 11.3 computer algebra system was used to calculations and graph the results.

Keywords: Chebyshev-Hermite functions, analytical data, analytical instrumentation, Gauss function, derivative of the initial data, signal decomposition, signal reconstruction, signal processing.

REFERENSES

1. *Rusinov L.A.* Automation of analytical systems for determining the composition and quality of substances. – L.: Chemistry, 1984. – 158 p.
2. *Gurevich A.L., Rusinov L.A., Syagaev N.A.* Automatic chromatographic analysis. – L.: Chemistry, 1980. – 192 p.
3. *Paveleva E.A., Krylov A.S.* Search and analysis of key points of the iris by the Hermite transformation method // Informatics and its applications. 2010. № 1 v. 4. Pp. 79–82.
4. *Martens J.B.* The Hermite transform-theory // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1595–1606.
5. *Martens J.B.* The Hermite transform-applications // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1990. Vol. 38. No. 9. P. 1607–1618.
6. *Estudillo-Romero A., Escalante-Ramirez B.* The Hermite transform: An alternative image representation model for iris recognition // LNCS, 2008. No. 5197. P. 86–93.
7. *Mamaev N.V.* The non-local average algorithm based on the expansion of Ermit functions in computed tomography problems / Mamaev N.V., Lukin A.S., Yurin D.V., Glazkova M.A., Sinitin V.E. // GRAPHICON'2013. Conference proceedings, 2013, p. 254–258.
8. *Gorlov V.A., Parshin D.S.* Expansion of a function with exponential growth in a Fourier series in orthogonal Chebyshev-Hermite polynomials // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. 2015. Vol. 3. No. 8–3 (19–3). Pp. 245–248.
9. *Szego G.* Orthogonal polynomials. – M.: Fizmatgiz, 1962. – 500 p.
10. *Suetin P.K.* Classical orthogonal polynomials. – M.: Fizmatlit, 2005. – 480 s.
11. Neural network analysis and comparison of time-frequency vectors based on the short-term spectral representation and adaptive Hermite transform. Yu.M. Bayakovskiy, A.O. Zhirkov, D.N. Korchagin, A.S. Krylov, A.S. Lukin. Preprints IPM them. M.V. Keldysh, 2001, 087.
12. *Balakin D.A., Shtykov V.V.* Construction of an orthogonal filter bank based on Hermite transformations for signal processing // Journal of Radio Electronics, № 9, 2014, p. 1–15.
13. *Hongwei G.* A simple algorithm for fitting a Gaussian function // IEEE Sign. Proc. Mag. – 2011. – 28(9): P. 134–137.
14. *Lange P.K., Ungarov M.B.* Linear approximation models of chromatographic signals // Information and measuring and control systems: Sat. scientific articles, № 2 (10). – 2014, p. 49–56.
15. *Khloptsev M.A.* Processing of poorly separated X-ray fluorescence spectra using a mathematical model of peaks // Bulletin of the Samara State Technical University. Series: Technical Sciences, No. 1 (21). – 2008, p. 201–203.

УДК 681.51 (075.4)

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ХРОНОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ СРЕДСТВАМИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ*

В.Н. Яшин, А.Е. Колоденкова

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с применением аппарата корреляционных и спектральных функций для диагностики технических средств хронометрии, а также с применением информационных технологий для автоматизации процессов нахождения, построения и анализа корреляционных и спектральных функций. Сформулированы основные подходы, позволяющие проводить диагностику технических средств хронометрии, в частности механического хронометра, на основе применения аппарата корреляционных и спектральных функций, а также использования средств информационных технологий для автоматизации процессов нахождения статистических характеристик. На основе анализа существующих методов и средств диагностики технических средств предложен метод диагностики технических средств хронометрии, основанный на формировании информационных моделей, привязанных к определенным дефектам механического хронометра.

Ключевые слова: диагностика, технические средства хронометрии, погрешность измерения, интервалы времени, корреляционная функция, спектральная функция.

Введение

Аппарат корреляционных и спектральных функций широко используется в научных исследованиях и практической деятельности для анализа различных процессов: информационных, технологических, физиологических и т. д. С его помощью становится возможным решение многих важных научно-технических задач: выявление статистической связи между отдельными отсчетами случайных процессов [1–5]; выявление периодических составляющих, присутствующих в случайном процессе [6, 7]; выявление стационарности случайных процессов в широком и узком смысле [1, 2, 8, 9]; анализ знака значений корреляционной функции [9]; изучение смеси случайного и детерминированного процессов (сигнал/шум) [2, 3, 7]; построение оптимальных фильтров, отклик которых представляет собой корреляционную функцию входного сигнала [10, 11]; проведение частотного анализа исследуемого процесса [8, 12, 13, 19, 20]; диагностика различных технических средств [14, 15] и ряда других задач. При этом если на теоретическом уровне общие алгоритмы нахождения и анализа корреляционных и спектральных функций достаточно хорошо освещены в соответствующей отечественной и зарубежной литературе [1–13], то вопросам автоматизации их нахож-

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-08-00152.

Яшин Владимир Николаевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Информационные технологии».

Колоденкова Анна Евгеньевна (д.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Информационные технологии».

дения, построения и анализа с помощью современных информационных технологий для диагностики технических средств хронометрии (ТСХ) уделено значительно меньше внимания. ТСХ [16] представляют собой технические средства получения, отображения, обработки или передачи на расстояние хронометрической информации, которая, в свою очередь, означает измерительную информацию, получаемую в результате измерения интервалов времени. Измерение интервалов времени с помощью ТСХ представляет собой реальный физический процесс, зависящий как от метрологических характеристик ТСХ, так и от внешних воздействий.

Постановка и пути решения задачи

Целью работы является реализация метода быстрого (оперативного) процесса диагностирования дефектов ТСХ средствами информационных технологий, позволяющими автоматизировать процесс диагностики ТСХ.

В качестве объекта исследования рассмотрен механический хронометр, являющийся разновидностью ТСХ; при этом учитывалось, что полученные результаты исследования могут быть использованы и для других видов ТСХ.

Механический хронометр является сложным механическим устройством для измерения временных интервалов и относится к классу измерительных приборов. Механический хронометр состоит из достаточно большого количества деталей, входящих в соответствующие узлы: осциллятора, системы привода и системы освобождения, зубчатой передачи, двигателя и т. д. Дефекты, возникающие в механическом хронометре, приводят к функциональным и метрологическим отказам.

Функциональные отказы связаны в первую очередь с некачественным изготовлением деталей хронометра, обусловленным технологическими нарушениями в процессе производства. Функциональные отказы и связанные с ними дефекты достаточно просто обнаруживаются при входном контроле деталей и контроле качества сборки механизма хронометра. Однако и здесь имеются проблемы из-за возникновения при контроле ошибок первого и второго рода [13].

Метрологические отказы присущи всем средствам измерения, в том числе и механическим хронометрам. Фиксируются метрологические отказы тогда, когда гарантированная погрешность измерения выходит за пределы допуска [14]. Причиной таких отказов в механических хронометрах являются скрытые дефекты. К таким дефектам в первую очередь можно отнести старение деталей, обусловленное физико-химическими процессами, протекающими в них, а также дефекты, связанные с неправильной регулировкой механизма хронометра. Выявить такие дефекты достаточно сложно, что подчеркивает актуальность решения данной задачи.

В статье предлагается к рассмотрению метод, позволяющий идентифицировать ряд дефектов, приводящих к метрологическим отказам механических хронометров, и автоматизировать процесс диагностики средствами информационных технологий.

Общие сведения

Процесс измерения интервалов времени в механическом хронометре можно описать, например, с помощью математической модели вида

$$T_n = T_{\text{нач}} + \sum_{j=1}^n T_j,$$

где $T_{\text{нач}}$ – начальное показание механического хронометра;
 T_n – конечное показание механического хронометра в точке n конца измерения;
 $j = 1, 2, \dots, n$.

Приведенная выше математическая модель описывает процесс суммирования интервалов времени (показаний) механического хронометра в некоторой конечной точке n и в данном случае не учитывает погрешность измерений хронометра. Для механического хронометра как средства измерения интервалов времени погрешность измерения можно представить в следующем виде:

$$\Delta_i = T_i - T_n,$$

где T_i – текущий период колебания осциллятора механического хронометра;
 T_n – номинальный период колебания осциллятора эталонной хронометрической системы, $i = 1, 2, \dots$.

Погрешность измерений Δ_i является дискретной функцией; кроме того, значения $\Delta_i = T_i - T_n$ являются первыми приращениями значений T_i , T_n и характеризуют абсолютную погрешность измерения интервалов времени механического хронометра. Погрешность измерения интервалов времени является важнейшей метрологической характеристикой любой хронометрической системы. Для оценки погрешности измерений Δ_i на практике используются разные способы: фотоэлектрические, акустические, оптические и т. д. В данной статье данные для оценки Δ_i были получены с помощью акустического способа [15]. Механический хронометр устанавливался на пьезоэлектрический датчик с формирователем импульсов, который преобразовывал звуковые (акустические) шумы, возникавшие при функционировании спускового механизма хронометра, в электрические сигналы с периодом, пропорциональным текущему периоду колебания осциллятора механического хронометра.

Дискретная функция Δ_i представляет собой дискретный случайный процесс [9, 17, 18], который обладает свойствами стационарности, в отличие от последовательности значений T_i , которые этим свойством не обладают. По этой причине статистические оценки, получаемые при обработке значений Δ_i , не зависят от времени, т. е. являются стационарными и могут быть подвергнуты статистическому анализу с использованием средств информационных технологий для автоматизации самого анализа.

В ходе такого анализа может быть выявлена стационарность данного процесса в «широком» или «узком» смысле, определена дисперсия процесса, позволяющая указать некоторые вполне определенные границы для дисперсий при наличии ярко выраженных дефектов в механическом хронометре, а также получены корреляционные и спектральные функции, дающие более детальную оценку характера случайного процесса Δ_i . Следует также отметить, что в случае отсутствия стационарности в широком смысле слова функции Δ_i можно использовать стационарные функции более высоких порядков Δ_{2i} , Δ_{3i} и т. д. Данные функции являются вторыми, третьими и т. д. приращениями функции Δ_i [14].

Методы решения поставленной задачи

В статье предложен метод, позволяющий идентифицировать ряд дефектов механизма хронометра, приводящих к его метрологическим отказам, и автоматизировать процесс диагностики средствами информационных технологий. Реали-

зацией данного метода является разработанная методика идентификации дефектов.

В отличие от прямых методов диагностики, когда для выявления дефектов необходимо вскрывать корпус механического хронометра, предлагается к рассмотрению косвенный метод, позволяющий производить диагностику с помощью ряда информационных характеристик. Основной информационной характеристикой для получения в дальнейшем статистических характеристик, используемых при диагностировании дефектов в механическом хронометре, была выбрана дискретная функция Δ_i . Выбор данной функции был обусловлен причинами, описанными ранее.

Рассмотрим несколько возможных случаев изменения функции Δ_i от отсчетов времени i , которые можно принять в качестве информационных моделей поведения функции Δ_i на интервале измерения. Кроме того, для решения поставленной задачи, т. е. идентификации дефектов, установим зависимость между предполагаемой теоретической моделью поведения этой функции и конкретным дефектом.

1. $\Delta_i > 0$ на интервале измерения, функция принимает значение, равное $\Delta_i = a = \text{const}$.

В этом случае $T_i > T_n$ и показания механического хронометра отстают по времени от показаний эталонного хронометра. Отставание в конце интервала измерения $0-n$ (n – отсчетов времени, значение n принималось равным 30) составит $\Omega_n = a \cdot n$, т. е. погрешность измерения интервала времени будет нарастать по линейному закону. Данная модель характерна для дефекта механического хронометра, который является следствием неправильной регулировки механизма хронометра и подтверждается оценкой на ее адекватность данному дефекту. Так, для экспериментального подтверждения адекватности данной модели партия хронометров подверглась неправильной регулировке механизма, т. е. механизмы хронометров были установлены на отставание во времени относительно эталонного измерителя интервалов времени, а затем проводились измерения Ω_n в конце интервала измерения. Для оценки адекватности модели поведения функции Δ_i установленному дефекту сравнивались теоретические и экспериментально полученные значения Ω_n . При совпадении теоретических и экспериментальных значений Ω_n принималось решение об адекватности модели.

2. $\Delta_i > 0$ на интервале измерения $0-n$, функция принимает положительные переменные значения, подчиняясь некоторому периодическому закону, например

$\Delta_i = a \sin \frac{2\pi i}{k} + 2a$, где k – период функции $\sin \frac{2\pi i}{k}$. В этом случае будет также

выполняться условие $T_i > T_n$ и механический хронометр будет отставать по времени от эталонного хронометра, но отставание будет носить переменный характер и погрешность составит в конце интервала времени $0-n$ величину, равную

$$\Omega_n = \left(a \sin \frac{2\pi i}{k} + 2a \right) \frac{n}{k}.$$

Данная теоретическая модель поведения функции Δ_i характерна для дефекта, проявляющегося в виде незначительного повреждения анкерного колеса механического хронометра. Для экспериментального подтверждения адекватности данной модели партия хронометров подверглась испытаниям с заранее установленным дефектом в виде незначительного повреждения анкерного колеса. Оценка адекватности модели поведения функции Δ_i установленному дефекту проводилась аналогично предыдущему случаю.

3. $\Delta_i > 0$ на интервале измерения 0- n , функция Δ_i принимает положительные переменные значения на интервале, подчиняясь некоторому случайному закону. В этом случае также выполняется условие $T_i > T_n$ и механический хронометр отстает по времени от эталонного хронометра, но отставание носит случайный характер. В случае стационарности этого процесса значение погрешности в конце интервала времени 0- n будет равно $\Omega_n = \sum_{i=1}^n \Delta_i + a$.

Значения Δ_i для построения такой модели выбирались случайным образом, с помощью генератора случайных чисел; полученные значения Δ_i подчинялись нормальному закону распределения вероятностей.

Данная теоретическая модель поведения функции Δ_i характерна для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра. Для экспериментального подтверждения адекватности данной модели партия хронометров подверглась испытаниям с заранее установленным дефектом, который проявлялся в виде биения анкерного колеса. Оценка адекватности модели поведения функции Δ_i установленному дефекту проводилась аналогично предыдущему случаю.

4. $\Delta_i = 0$ на интервале измерения 0- n .

В этом случае $T_i = T_n$ и показания механического хронометра равны показаниям эталонного хронометра (идеальный случай), т. е. дефекты отсутствуют.

5. $\Delta_i < 0$ на интервале измерения 0- n , функция принимает значение $\Delta_i = -a = \text{const}$. В этом случае $T_i < T_n$ и показания механического хронометра опережают показания эталонного хронометра. При этом опережение в конце интервала 0- n составит $\Omega_n = -a \cdot n$. Данный дефект так же, как и в первом случае, является следствием неправильной регулировки механизма хронометра. Оценка адекватности модели поведения функции Δ_i установленному дефекту проводилась аналогично первому рассмотренному случаю.

6. $\Delta_i < 0$ на интервале измерения 0- n , функция может принимать переменные значения, подчиняясь некоторому детерминированному закону, например

$\Delta_i = -\left(a \sin \frac{2\pi i}{k} + 2a\right)$, при этом механический хронометр «опережает» по времени эталонный хронометр, но опережение носит переменный (гармонический) характер и составит в конце интервала времени 0- n величину, равную

$$\Omega_n = -\left(a \sin \frac{2\pi i}{k} + 2a\right) \frac{n}{k}.$$

Данный дефект так же, как и во втором случае, является следствием незначительного повреждения анкерного колеса механического хронометра. Оценка адекватности модели поведения функции Δ_i установленному дефекту проводилась аналогично второму рассмотренному случаю.

7. $\Delta_i < 0$ на интервале измерения 0- n , функция может принимать переменные значения на интервале, подчиняясь некоторому случайному закону. При этом будет выполняться условие $T_i < T_n$ и механический хронометр будет опережать по времени эталонный хронометр, но это опережение носит случайный характер. В случае стационарности этого процесса погрешность в конце интервала времени 0- n будет равна $\Omega_n = -\sum_{i=1}^n \Delta_i - a$.

Данная теоретическая модель поведения функции Δ_i характерна для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Значения Δ_i для построения такой модели выбирались случайным образом, с помощью генератора случайных чисел; полученные значения Δ_i подчинялись нормальному закону распределения вероятностей. Оценка адекватности модели поведения функции Δ_i установленному дефекту проводилась аналогично третьему рассмотренному случаю.

8. $0 < \Delta_i < 0$ на интервале измерения $0-n$, функция Δ_i может принимать как положительные, так и отрицательные значения. При этом закон изменения функции Δ_i может подчиняться некоторому детерминированному закону, например

$$\Delta_i = a \sin \frac{2\pi i}{k}, \text{ т. е. механический хронометр за один период будет отставать}$$

от эталонного, а за другой – опережать его, но опережение или отставание будет носить переменный (гармонический) характер и составит в конце интервала вре-

мени $0-n$ величину, равную $\Omega_n = \left(a \sin \frac{2\pi i}{k} \right) \frac{n}{k}$. При этом если укладывается целое

число периодов k на интервале $0-n$, то $\Omega_n = 0$, в противном случае Ω_n может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Данная теоретическая модель поведения функции Δ_i характерна для дефекта, проявляющегося в виде неправильной установки палеты анкерного колеса механического хронометра. Оценка адекватности модели поведения функции Δ_i установленному дефекту проводилась аналогично второму и пятому рассмотренным случаям.

9. $0 < \Delta_i < 0$ на интервале измерения $0-n$, функция может принимать как положительные, так и отрицательные значения, подчиняясь некоторому случайному закону. При этом механический хронометр внутри интервала измерения может как опережать по времени эталонный хронометр, так и отставать от него, но это опережение или отставание будет носить случайный характер. В случае стационарности этого процесса значение погрешности в конце интервала времени

$0-n$ будет равно $\Omega_n = \sum_{i=1}^m \Delta_i - \sum_{i=1}^{n-p} \Delta_i$, где p – число отсчетов Δ_i , принявших поло-

жительные значения.

Данная теоретическая модель поведения функции Δ_i характерна для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Значения Δ_i для построения такой модели выбирались случайным образом с помощью генератора случайных чисел, полученные значения Δ_i подчинялись нормальному закону распределения вероятностей. Оценка адекватности модели поведения функции Δ_i установленному дефекту проводилась аналогично третьему рассмотренному случаю.

Рассмотренные выше теоретические модели поведения функции Δ_i от отсчетов времени i позволяют сделать следующие предварительные выводы:

1. Отличие моделей 1–3, 5–9 от модели 4 свидетельствует о наличии дефектов в механизме хронометра, которые приводят к метрологическим отказам.

2. Установлена связь между определенным видом модели и конкретным дефектом на основе экспериментальных исследований.

3. Рассмотренные модели поведения функции Δ_i от отсчетов времени i можно принять в качестве базовых моделей при нахождении, построении и анализе корреляционных и спектральных функций.

4. Количество моделей не является окончательным и может быть расширено, что позволит в дальнейшем выявлять скрытые дефекты и прогнозировать их появление.

Построение графиков корреляционных и спектральных функций

Как уже отмечалось, предлагается к рассмотрению косвенный метод, позволяющий производить диагностику с помощью ряда информационных характеристик: среднего ожидания функции Δ_i , дисперсии Δ_i , корреляционной и спектральных функций.

Определим средние значения и дисперсии, а также построим графики корреляционных и спектральных функций для ранее рассмотренных моделей поведения функции Δ_i от отсчетов времени i .

Для автоматизации процесса нахождения средних значений, дисперсий, корреляционных и спектральных функций, а также построения графиков корреляционных и спектральных функций используем средства информационных технологий: язык программирования VBA (*Visual Basic for Application*) в среде *Microsoft Excel* (лента «Разработчик»).

Для нахождения перечисленных характеристик – среднего значения погрешности Δ_{cp} , дисперсии D , нормированной корреляционной функции K и спектральной функции C – применим следующие формулы [1–7]:

$$\Delta_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i, \quad D = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n (\Delta_i)^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \Delta_i \right)^2}{n} \right], \quad K_i = \frac{\sum_{j=1}^{n-i} (\Delta_j - \Delta_{cp})(\Delta_{j+i} - \Delta_{cp})}{(n-i) D},$$

$$C_i = \frac{1}{m+1} \left[0,5K(0) + \sum_{j=1}^{m-1} K(j) \cos \frac{j\pi}{m} i + 0,5K(m)(-1)^m \right],$$

где n – интервал задания функции Δ_i ;
 m – интервал определения корреляционной функции;
 C_i – энергия;
 i – гармоники.

Для нахождения спектральной функции (спектральной плотности мощности) по известной корреляционной функции применялось дискретное преобразование Фурье.

Расчитанные по выше приведенной формуле значения спектральной плотности мощности для получения уточненных значений C_i сглаживались с помощью интерполяционных полиномов по формуле [9, 10]

$$\tilde{C}_i = \frac{C_{i-1} + 2C_i + C_{i+1}}{4}.$$

За исходные параметры при нахождении и построении указанных выше статистических характеристик были приняты следующие: период колебания механического хронометра $T_n = 400000$ мкс, число отсчетов $n = 30$.

Для первой модели значение параметра a принималось равным 10 мкс, т. е. $\Delta_i = a = 10$ мкс. В этом случае среднее значение погрешности будет равно

$$\Delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = 10 \text{ мкс}, \text{ дисперсия будет равна}$$

$$D = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n a^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n a \right)^2}{n} \right] = \frac{1}{n-1} \left(a^2 n - \frac{a^2 n^2}{n} \right) = 0,$$

нормированная корреляционная функция будет равна $K_i=1$, спектральная функция $C_i=0$. Полученные расчетным путем значения характеристик свидетельствуют о наличии регулировки механизма хронометра.

Для второй модели, когда Δ_i представляет детерминированную функцию, аппарат корреляционных и спектральных функций может быть формально применен к ней. Это в дальнейшем позволит с помощью корреляционных и спектральных функций выявить периодические составляющие, присутствующие в случайном стационарном процессе Δ_i , и значительно повысить их роль при обнаружении многих дефектов в механическом хронометре, приводящих к метрологическим отказам.

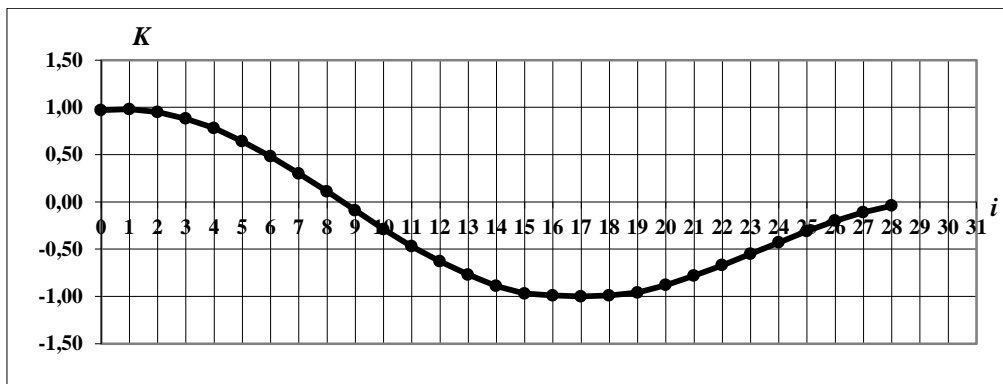


Рис. 1. График функции K_i

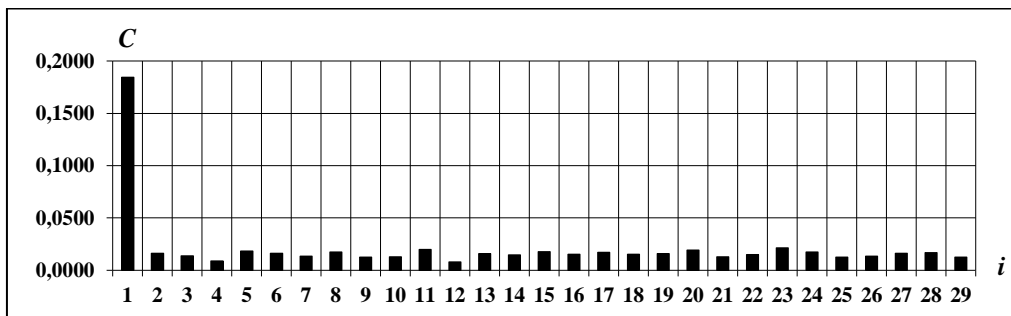


Рис. 2. График функции C_i

При условии, что $a = 10$ мкс, найдем среднее значение $\Delta_{\text{ср}} = 20$ мкс и дисперсию $D = 51,75$ мкс²; нормированная корреляционная и спектральная функции, вычисленные по вышеприведенным формулам и представленные в виде графиков, построенных с помощью средств информационных технологий, будут иметь вид, показанный на рис. 1 и 2.

Полученный график корреляционной функции K_i показывает детерминированный характер исходной функции Δ_i , что также подтверждается графиком функции C_i , т. е. в спектре преобладает одна гармоника. Вид этих графиков характерен для дефекта, проявляющегося в виде незначительного повреждения анкерного колеса механического хронометра.

Для третьей рассмотренной ранее модели при $a = 10$ мкс среднее значение $\Delta_{\text{ср}} = 24,83$ мкс, дисперсия $D = 9,97$ мкс²; вычисленные и представленные в виде графиков нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, показанный на рис. 3 и 4.

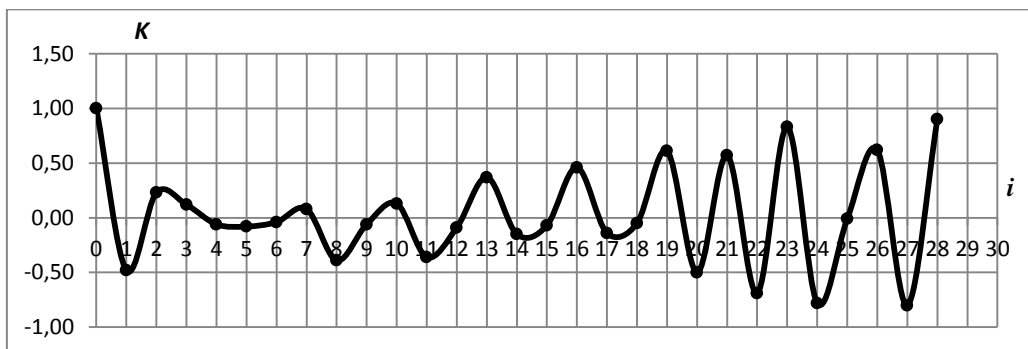


Рис. 3. График функции K_i

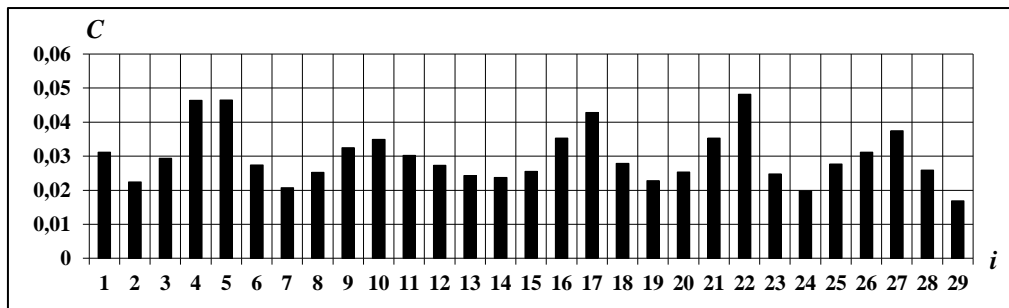


Рис. 4. График функции C_i

Полученный график корреляционной функции K_i показывает наличие некоторой периодичности, при этом распределение частот на графике спектральной плотности мощности C_i показывает относительную их равномерность, что характерно для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Для четвертой рассмотренной модели среднее значение погрешности будет равно $\Delta_{\text{ср}} = 0$ мкс, дисперсия равна $D = 0$, нормированная корреляционная функция будет $K_i = 1$, спектральная функция $C_i = 0$, что свидетельствует об отсутствии дефектов в механическом хронометре.

Для пятой модели значение параметра a примем равным 10 мкс, т. е. $\Delta_i = -a = -10$ мкс, тогда среднее значение погрешности будет равно $\Delta_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i = -10$ мкс, дисперсия будет равна $D = 0$, нормированная корреляционная функция $K_i = 1$, спектральная функция $C_i = 0$. Полученные значения характеристик будут свидетельствовать о неправильной регулировке механизма хронометра.

Для шестой модели при условии $a = 10$ мкс среднее значение $\Delta_{\text{ср}} = -20$ мкс, дисперсия $D = 51,75$ мкс², нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, аналогичный виду, представленному на рис. 1 и 2.

Вычисленный и построенный график корреляционной функции K_i показывает ее детерминированный характер, что подтверждается графиком C_i , т. е. преобладает в спектре одна гармоника. Вид этих графиков также характерен для дефектов, проявляющихся в виде незначительного повреждения анкерного колеса и палеты механического хронометра.

Для седьмой из рассмотренных моделей среднее значение $\Delta_{\text{ср}} = -14,97$ мкс, дисперсия $D = 8,72$ мкс², рассчитанные и построенные нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, аналогичный виду, представленному на рис. 3 и 4.

Построенный график корреляционной функции K_i показывает ее случайный характер, при этом корреляционная функция не убывает с увеличением числа отсчетов, что свидетельствует о наличии некоторых гармонических составляющих. При этом распределение частот на графике спектральной плотности мощности C_i показывает относительную их равномерность, что характерно для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Для восьмой модели при условии $a = 10$ мкс среднее значение $\Delta_{\text{ср}} = 0,67$ мкс, дисперсия $D = 78,81$ мкс², рассчитанные и построенные нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, аналогичный виду, представленному на рис. 1 и 2.

Построенный график корреляционной функции K_i показывает ее детерминированный характер, что подтверждается также графиком C_i , т. е. преобладает в спектре одна гармоника. Однако дисперсия будет превосходить значения, характерные для второго и шестого случаев, и в спектре амплитуда частотных составляющих будет превосходить амплитуду частотных составляющих для второй и шестой моделей. Вид этих графиков будет характерен для дефекта палеты механического хронометра.

Для девятой модели среднее значение $\Delta_{\text{ср}} = 1,89$ мкс, дисперсия $D = 41,26$ мкс², рассчитанные и построенные нормированная корреляционная и спектральная функции будут иметь вид, аналогичный виду, представленному на рис. 3 и 4.

Построенный график корреляционной функции K_i показывает ее случайный характер, при этом корреляционная функция, так же как в третьем и седьмом случаях, не убывает с увеличением числа отсчетов, что свидетельствует о наличии некоторых гармонических составляющих. При этом распределение частот на графике спектральной плотности мощности C_i показывает относительную их равномерность, что характерно также для дефекта, проявляющегося в виде биения анкерного колеса механического хронометра.

Как уже отмечалось, ранее рассмотренные теоретические модели изменения функции Δ_i , привязанные к конкретным дефектам, не являются исчерпывающими. Однако эти модели можно принять за основу при составлении библиотеки возможных моделей и связанных с ними дефектов. Найденные для таких моделей корреляционные и спектральные функции, представленные в виде графиков, могут выступать в качестве шаблонов (масок) при идентификации дефектов механического хронометра. Для более детальной диагностики механического хронометра или при отсутствии стационарности в широком смысле слова функции Δ_i можно использовать стационарные функции более высоких порядков Δ_{2i} , Δ_{3i} и т. д. Данные функции являются вторыми, третьими и т. д. приращениями функции Δ_i и подробно рассмотрены в соответствующих работах [13, 14].

Рассмотрим возможность использования полученных шаблонов корреляционных и спектральных функций для диагностики реальных дефектов механических хронометров. Для этого из партии механических хронометров выбирались отдельные экземпляры, которые подвергались диагностическим испытаниям. С этой целью механический хронометр устанавливался в специальное устройство [15, 16], на выходе которого с помощью акустического метода формировались электрические импульсы, длительность которых была равна текущим значениям T_i . Далее из последовательности импульсов T_i аппаратным способом формировались электрические импульсы, пропорциональные разности $\Delta_i = T_i - T_n$, и затем эти импульсы с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразовывались в цифровой код. Из оцифрованной последовательности импульсов Δ_i формировалась выборка, содержащая $n = 30$ значений Δ_i . Полученная выборка проверялась на статистическую однородность, поскольку в процессе измерения Δ_i из-за внешних и внутренних помех [13–15] могут возникать грубые ошибки. Наличие грубых ошибок в выборке, т. е. значений Δ_i , сильно отличающихся от среднего значения Δ_i , приводит к искажению статистических характеристик выборки в целом. Они должны быть исключены из дальнейшего рассмотрения. Статистическая однородность выборки проверялась на основе критерия Шовене [16]. В результате проделанного эксперимента были получены значения Δ_i ($n = 30$), представленные в таблице.

Зависимость Δ_i от числа отсчетов i

| | | | | | | | | | | |
|------------------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|------|-------|
| i | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Δ_i , мкс | 6,1 | -0,1 | 11,5 | 12,2 | 19,1 | 4,4 | 4,7 | 1,2 | 11,2 | 12,5 |
| i | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Δ_i , мкс | 15,5 | 8,4 | -0,2 | -0,1 | 5,0 | 9,1 | -0,3 | -11,9 | 1,2 | -18,3 |
| i | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Δ_i , мкс | -2,2 | -19,2 | -18,9 | -4,9 | -2,2 | -18,9 | 1,1 | 5,1 | -7,9 | -1,8 |

График зависимости Δ_i от числа отсчетов i представлен на рис. 5. По результатам эксперимента были вычислены следующие статистические характеристики: $\Delta_{cp} = 0,71$ мкс, дисперсия $D = 96,17$ мкс², а также построены графики норми-

рованной корреляционной и спектральной функций, которые представлены соответственно на рис. 6 и 7.

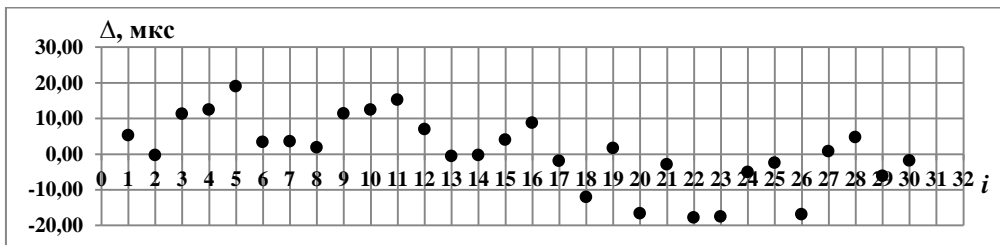


Рис. 5. График функции Δ_i

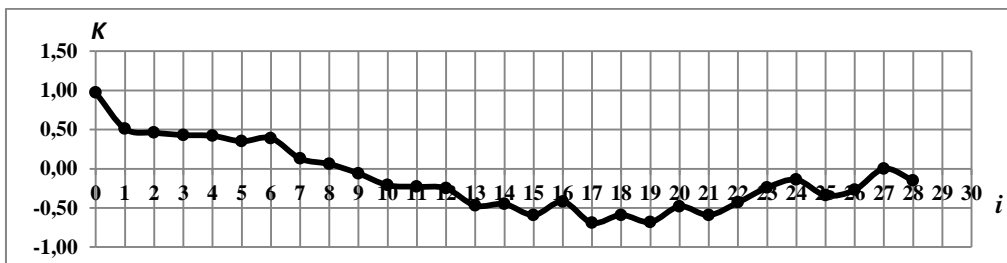


Рис. 6. График функции K_i

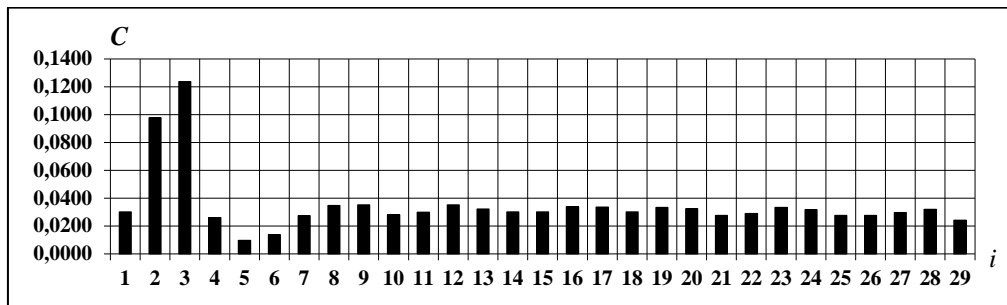


Рис. 7. График функции C_i

Полученное в результате обработки экспериментальных данных среднее значение $\Delta_{cp} = 0,71$ мкс показывает, что механический хронометр будет отставать от эталонного на интервале, равном 0–30 отсчетов на величину 0,71 мкс. Величина дисперсии $D = 96,17$ мкс² будет характеризовать значительный разброс Δ_i относительно среднего значения Δ_{cp} , что свидетельствует о наличии определенных скрытых дефектов механического хронометра. Для более детальной оценки состояния механизма хронометра с целью выявления дефектов проведем анализ полученных корреляционной и спектральной функций.

Полученный график корреляционной функции K_i показывает ее случайный характер, при этом корреляционная функция не убывает с увеличением числа отсчетов, что свидетельствует о наличии в ее составе некоторых ярко выраженных гармонических составляющих. При этом распределение частот на графике спектральной плотности мощности C_i показывает их смещение в область нижних частот и относительную их равномерность в области верхних частот, что может

свидетельствовать о дефектах палеты спускового механизма и незначительном биении анкерного колеса механического хронометра.

На основе предложенного метода идентификации скрытых (неявных) дефектов механических хронометров, приводящих к их метрологическим отказам, авторами была разработана методика обнаружения и идентификации дефектов, представленная ниже.

1. На основе предполагаемой теоретической модели поведения функции Δ_i от отсчетов времени i экспериментальным путем устанавливается связь между моделью и определенным дефектом механического хронометра, которая затем проверяется на адекватность.

2. Вычисляются и строятся с помощью средств информационных технологий графики корреляционной и спектральной функций, которые принимаются в качестве шаблонов (масок) для идентификации дефектов.

3. Формируется библиотека шаблонов из полученных графиков корреляционных и спектральных функций, которые соответствуют определенным дефектам часового механизма.

4. На основе сформированной библиотеки шаблонов осуществляется сравнение шаблонов с полученными характеристиками диагностируемого механизма: корреляционной и спектральной функций. Результатом сравнения является идентификация дефектов, приводящих к метрологическим отказам механического хронометра.

Выводы

1. Предложен метод диагностики, позволяющий идентифицировать скрытые дефекты механических хронометров, приводящих к их метрологическим отказам.

2. На основе предложенного метода разработана и апробирована методика выявления скрытых дефектов механических хронометров.

3. Использование разработанной методики диагностики обеспечивает достаточно высокий уровень выявления дефектов механического хронометра. В частности, при диагностировании партии из 100 механических хронометров, имеющих скрытые дефекты, в 98 случаях дефекты классифицировались правильно.

4. Полученные в статье результаты диагностики могут быть распространены и на другие виды ТСХ [21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974. – 464 с.
2. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
3. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
4. Прикладной анализ случайных процессов: Под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2007. – 582 с.
5. Прохоров С.А. Моделирование и анализ случайных процессов. Лабораторный практикум. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2002. – 277 с.
6. Аврамчук В.С., Чан Вьет Тъяу. Частотно-временной корреляционный анализ цифровых сигналов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 112–115.
7. Аврамчук В.С. Определение наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе автокорреляционной функции // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 113–117.
8. Прохоров С.А., Графкин В.В. Структурно-спектральный анализ случайных процессов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2010. – 128 с.

9. *Вашкевич Н.П., Домнин Л.Н., Сорокин В.Н., Чернягин Б.М.* Машинный анализ диаграмм хода часов // Часы и часовые механизмы: Сб. трудов НИИЧаспрома. – Вып. 8. – М., 1971. – 144 с.
10. *Дьяконов В.П.* Справочник по алгоритмам и программам на языке бейсик для персональных ЭВМ: Справочник. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 240 с.
11. *Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г.* Синтез фильтров для восстановления смазанных изображений с использованием методов регуляризации // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конференции, ИПУСС РАН. – Самара, 2013. – С. 615–618.
12. *Батищев В.И., Волков И.И., Золин А.Г.* Синтез цифровых КИХ-фильтров для решения задач восстановления сигналов с использованием критерия моментов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – Вып. 36. – С. 98–105.
13. *Яшин В.Н.* Методологические подходы при измерении и контроле основных метрологических характеристик технических средств хронометрии // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – Вып. 43. – С. 63–72.
14. *Яшин В.Н.* Информационно-измерительные подходы для оценки технических средств хронометрии: монография. – М.: ИНФРА-М, 2017. – 120 с.
15. *Миронов В.П., Яшин В.Н.* А.с. 1205126 СССР, МКИЗ G 04 D 7/12 Устройство для формирования временных интервалов хода балансовых часов. СССР. № 3762203/24-10; заявл. 02.07.84; опубл. 15.01.86, Бюл. № 2.
16. *Яшин В.Н.* Повышение помехозащищенности канала измерения метрологических характеристик технических средств хронометрии // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. – С. 125–128.
17. *Якимов В.Н.* Цифровой комплексный статистический анализ на основе знакового представления случайных процессов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18. – № 7. – С. 1346–1353.
18. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V.* Modern approaches to risk situation modeling in creation of complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 209–217.
19. *Kolodenkova A.E., Dolgii A.I.* Diagnosing of devices of railway automatic equipment on the basis of methods of diverse data fusion // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 277–283.
20. *Якимов В.Н., Батищев В.И., Машков А.В.* Модульный подход к разработке информационно-измерительной системы цифрового оценивания спектральной плотности мощности: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2016». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. – С. 84–86.
21. *Шполянский В.А.* Хронометрические системы. – М.: Машиностроение. 1980. – 584 с.

Статья поступила в редакцию 23 января 2018 г.

DIAGNOSIS OF TECHNICAL MEANS OF CHRONOMETRY BASED ON THE ANALYSIS OF CORRELATION AND SPECTRAL FUNCTIONS BY MEANS OF INFORMATION TECHNOLOGY

V.N. Yashin, A.E. Kolodenkova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper deals with the problems of using of correlation and spectral functions apparatus for technical means of chronometry diagnosing as well as using of information technologies for automatization of finding, constructing and analyzing processes of correlation and spectral functions. The paper presents the main approaches to diagnosis of technical means of chronometry, the mechanical chronometer in particular, based on using the correlation and spectral functions apparatus, as well as using information technology to automate the processes of finding statistical characteristics. On the basis of existing methods and means of diagnostics analyzing the diagnostics method of technical means of chronometry is offered. It is based on working out the information models attached to certain defects of the mechanical chronometer.*

Keywords: *diagnostics, technical means of chronometry, measurement error, time intervals, correlation function, spectral function.*

REFERENCES

1. *Bendat George, Piersol A.* Measurement and analysis of random processes. – M.: Mir, 1974. – 464 p.
2. *Mirsky G.Ya.* Characteristics of stochastic interrelation and their measurements. – M.: Energo-published, 1982. – 320 p.
3. *Tikhonov V.I.* Statistical radio engineering. – Moscow: Radio and communication, 1982. – 624 p.
4. Applied analysis of random processes. Edited by Prokhorova S.A. / scientific centre of RAS, 2007. – 582 p.
5. *Prokhorov S.A.* Modeling and analysis of random processes. Laboratory practice. SCIENTIFIC CENTRE OF RAS, 2002. – 277 p.
6. *Avramchuk V.S., Chan Viet Tiau.* Frequency-time correlation analysis of digital signals // Proceedings of Tomsk Polytechnic University. – 2009. – Vol. 315. – № 5. – P. 112–115.
7. *Avramchuk V.S.* Determination of the presence of the harmonic components and their frequencies in a discrete signal on the basis of the autocorrelation function // News of Tomsk Politechnical universities. – 2012. – Vol. 321. – № 5. – P. 113–117.
8. *Prokhorov S.A., Grafkin V.V.* Structural-spectral analysis of random processes / SNC RAS, 2010. – 128 p.
9. *Vashkevich N.P., Domnin L.N., Sorokin V.N., Chernyagin B.M.* Machine analysis of diagrams of the clock // Sat. works of Niichasprom «Clock and clockwork». – M.-Issue. 8. – 1971. – 144 pp.
10. *Diakonov V.P.* Reference book on algorithms and programs in basic language for personal computers. Handbook. – M.: Science. GL. ed. Fiz. – Mat. lit., 1987. – 240 p.
11. *Batishchev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Synthesis of control to restore the blurred image using the regularization methods // problems of control and modeling in complex systems: proceedings of the XV International conference, IPUSS RAN. – Samara, 2013. – P. 615–618.
12. *Batishchev V.I., Volkov I.I., Zolin A.G.* Synthesis of digital FIR filters for solving problems of signal recovery using the criterion of moments // Bulletin of Samara state technical University. Ser. Technical science. – 2012. – Issue 36. – P. 98–105.
13. *Yashin V.N.* Methodological approaches for measuring and control of major metrological characteristics of technical means of timekeeping // Vestnik of Samara state technical University. Ser. Technical science. – 2014. – Issue 43. – Pp. 63–72.

Vladimir N. Yashin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Anna E. Kolodenkova (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

14. *Yashin V.N.* Information-measuring approaches for chronometer technical means estimation. – Moscow: INFRA-M, 2017. 120 p.
15. *Mironov V.P., Yashin V.N.* A.S. 1205126 of the USSR, MKIZ G 04 D 7/12 A device for balance chronometer time intervals forming. USSR. No. 3762203/24-10; ref. 02.07.84; publ. 15.01.86, bul. No. 2.
16. *Yashin V.N.* Increase of noise immunity channel of measurement of metrological characteristics of technical means of chronometry: Methods, means and technologies of receiving and processing of measuring information: proceedings of International. Science-tech. Conf. "Shlyandinskie readings-2016". – Penza: publishing house of PSU, 2016. – P. 125–128.
17. *Yakimov V.N.* Digital integrated statistical analysis based on the symbolic representation of random processes // Proceedings of the Samara scientific center of RAS. – 2016. – Vol. 18. – No. 7. – Pp. 1346–1353.
18. *Kolodenkova A.E., Muntyan E.R., Korobkin V.V.* Modern approaches to risk situation modeling in creation of complex technical systems // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 209–217.
19. *Kolodenkova A.E., Dolgiy A.I.* Diagnosing of devices of railway automatic equipment on the basis of methods of diverse data fusion // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 277–283.
20. *Yakimov V.N., Batishchev V.I., Mashkov A.V.* A modular approach to the development of information-measuring system for digital estimation of power spectral density: collection of scientific works. V. International. science.-tech. Conf. "Shlyandinskie reading-2016". – Penza: publishing house of PSU, 2016. – Pp. 84–86.
21. *Shpolyansky V.A.* Chronometric systems. – M.: Mechanical Engineering. 1980. – 584 p.