№ 1 (23), 2018

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Бержинская М. В., Голубинский Ю. М., Назарова И. Т.
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРЕПОДАВАНИЯ МЕТРОЛОГИИ. ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ В ДИСЦИПЛИНЫ ИНЖЕНЕРНОГО НАПРАВЛЕНИЯ 5

Чернецов М. В., Чураков П. П.
ИНВАРИАНТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ 11

Ординарцева Н. П.
КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ 18

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Ярославцева Д. А.
ПРИМЕР ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОБЪЕКТАХ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ КОСМОДРОМА 24

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Бастрыгин К. И.
СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА БЫСТРОПЕРЕМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВИБРАЦИИ 32

Мурашкина Т. И., Мотин А. В., Чукарева М. М., Торгашин С. И.
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УСКОРЕНИЯ 38

Глубоков А. В., Тверитнев И. О.
ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА БАЗЫ ДЛЯ ОТСЧЕТА ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПЛОСКОСТНОСТИ НА МЕТОДИЧЕСКУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ 45

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Эминов Р. А., Исмаилов М. М., Асадов Х. Г., Исмаилов К. Х.
МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ШУМОВОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОЙ МОРСКОЙ ВОДЫ 51

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Солодимова Г. А., Спиркин А. Н.
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ 57

Волчихин В. И., Иванов А. И., Малыгина Е. А., Серикова Ю. И.
ОБУЧЕНИЕ СЕТЕЙ КВАДРАТИЧНЫХ ФОРМ НА МАЛЫХ ВЫБОРКАХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕДУРЫ СИММЕТРИЗАЦИИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ 66

Спиркин А. Н., Авдеева Н. В.
ВЫЯВЛЕНИЕ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ПО АНАЛИЗУ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ 75

№ 1 (23), 2018

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNOLOGY

Berzhinskaya M. V., Golubinsky Yu. M., Nazarova I. T.
ACTUAL ISSUES OF TEACHING METROLOGY. INTRODUCTION OF THE CONCEPT OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN THE DISCIPLINE OF ENGINEERING DIRECTION 5

Chernetsov M. V., Churakov P. P.
INVARIANT TRANSFORMATION IN MEASURING SYSTEMS WITH PARAMETRIC SENSORS 11

Ordinartseva N. P.
CALIBRATION OF MEASURING CHANNELS MEASURING SYSTEMS IN WORKING CONDITIONS AS A WAY OF IMPROVING THE ACCURACY OF MEASUREMENTS 18

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Yaroslavtseva D. A.
CASE OF INTELLIGENT DATA-MEASURING SYSTEMS IMPLEMENTATION AT SPACE CENTER LAUNCHING FACILITIES 24

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Bastrygin K. I.
METHOD FOR COMPENSATING THE ERROR OF A PIEZOELECTRIC SENSOR OF A RAPIDLY CHANGING PRESSURE FROM THE EFFECTS OF TEMPERATURE AND VIBRATION 32

Murashkina T. I., Motin A. V., Chukareva M. M., Torgashin S. I.
TECHNOLOGY OF FABRICATION OF SENSITIVE ELEMENT
OF THE DIFFERENTIAL FIBER-OPTIC ACCELERATION SENSOR 38

Glubokov A. V., Tveritnev I. O.
INFLUENCE OF MEASUREMENT DATUM SELECTION
ON METHODICAL MEASUREMENT ERROR 45

RADIO MEASUREMENT

Eminov R. A., Ismailov M. M., Asadov Kh. G., Ismailov K. Kh.

METHOD FOR DECREASE OF IMPACT OF NOISY HYPER SPECTRAL
CHARACTERISTICS OF REFLECTION OF POLLUTED SEA WATER 51

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENT

Solodimova G. A., Spirkin A. N.
THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM BIONIC PROSTHESIS
OF THE LOWER LIMB 57

Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Malygina E. A., Serikova Yu. I.
TRAINING OF NETWORKS OF QUADRATIC FORMS ON SMALL
SAMPLES OF BIOMETRIC DATA USING THE PROCEDURE
OF SYMMETRIZATION OF CORELATION LINES 66

Spirkin A. N., Avdeeva N. V.
IDENTIFICATION OF PATHOLOGICAL STATES BY ANALYSIS
OF BIOELECTRIC ACTIVITY 75

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 621.317 DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-1

М. В. Бержинская, Ю. М. Голубинский, И. Т. Назарова

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРЕПОДАВАНИЯ МЕТРОЛОГИИ. ВВЕДЕНИЕ ПОНЯТИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ В ДИСЦИПЛИНЫ ИНЖЕНЕРНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

M. V. Berzhinskaya, Yu. M. Golubinsky, I. T. Nazarova

ACTUAL ISSUES OF TEACHING METROLOGY. INTRODUCTION OF THE CONCEPT OF MEASUREMENT UNCERTAINTY IN THE DISCIPLINE OF ENGINEERING DIRECTION

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели.*** Использование выражения неопределенности измерения в качестве метода представления результата измерения при исследовании объектов рассматривается как альтернатива используемой в нашей стране концепции оценивания погрешностей. Переход на использование новой концепции требует осмысления и консенсуса не только со стороны метрологической общественности, но и всех заинтересованных в результатах измерений сторон. ***Материалы и методы.*** Показаны новые подходы, содержащиеся в концепции выражения неопределенности результатов измерения, примененные в версии стандартов ISO/IEC Guide 98-3:2008 и национальных стандартах, ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 «Неопределенность измерения», построенных на его основе. ***Результаты.*** 1. Одним из важнейших аспектов, влияющих на внедрение концепции неопределенности измерения, является увеличение объема изучения ее в программах подготовки специалистов неметрологических специальностей. Поскольку данная концепция содержит в себе инвариантные компоненты – инвариантные функции интеллектуальной деятельности, их развитие – некая гарантия будущей успешности выпускника. Усвоив методологию получения (нахождения) знаний, имея опыт их применения в деятельности, применять эту методологию можно уже далее в любой другой деятельности. 2. Подходы и модели концепции должны входить в изучение таких естественно-научных дисциплин как математика, физика, химия. Любая новация, как правило, проходит определенные стадии развития жизненного цикла. В абсолютном большинстве случаев первая стадия – это отрицание нового. Судя по количеству заинтересованных специалистов, освоивших и внедряющих концепцию в практику деятельности, первый этап пройден.

A b s t r a c t. ***Background.*** The use of the measurement uncertainty expression as a method of representing the measurement result in the study of objects is considered as an alternative to the concept of error estimation used in our country. The transition to the use of the new con-

cept requires reflection and consensus not only on the part of the metrological community, but also of all parties interested in the measurement results. ***Materials and methods***. Shown new approaches contained in the concept of expression of uncertainty of measurement results used in the standards ISO/IEC Guide 98-3:2008 and national standards GOST R 54500.3-2011/ Manual ISO/IEC 98-3:2008 "Uncertainty of measurement", built on its basis. ***Results***. 1. One of the most important aspects affecting the implementation of the concept of measurement uncertainty is the increase in the volume of its study in the training programs for specialists in nonmetrological specialties. As this concept contains invariant components-invariant functions of intellectual activity, their development – a certain guarantee of future success of the graduate. Having learned methodology of obtaining (finding) knowledge, having experience of their application in activity, it is possible to apply this methodology further in any other activity. 2. Approaches and models of the concept should be included in the study of such natural Sciences as mathematics, physics, chemistry. Any innovation, as a rule, passes certain stages of development of a life cycle. In the vast majority of cases, the first stage is a denial of the new one. Judging by the number of interested specialists who have mastered and implement the concept into practice, the first stage has been completed.

Ключевые слова: неопределенность результатов измерения, погрешность измерения.

Key words: uncertainty of measurement results, measurement error.

Получение измерительной информации является важной составляющей практических и лабораторных работ значительной части учебных дисциплин, входящих в программу подготовки специалиста. При проведении измерения необходимо получить выходную информацию об исследуемых объектах и процессах в удобной и общепринятой форме. Выполнение измерений в одних и тех же условиях, одним и тем же оператором, при достаточной разрешающей способности средства измерения сопровождается различными значениями показаний и приводит к необходимости проведения многократных измерений.

Привычным и понятным инструментом оценки отклонения результата является понятие *погрешности измерения*, под которой понимают разность между измеренным значением величины и опорным значением величины. Опорное значение величины может быть истинным значением величины, подлежащим измерению, в этом случае оно неизвестно, или принятым значением величины, в этом случае оно известно [1].

При проведении поверочных и калибровочных работ опорное значение ВСЕГДА известно как основная характеристика эталона, которая используется для целей сравнения. Тем не менее существует ряд областей деятельности, в которых понятие «опорное значение» не может быть использовано. Это такие области, как аналитическая химия, медицина, экология, испытания различных видов продукции и различных объектов. В них создание эталонов, стандартных образцов не имеет смысла, а в целом ряде случаев измеряемые величины могут полностью определяться методом анализа и условиями его реализации.

Для признания полученных результатов оказывается необходимым вместе с количественной оценкой объекта указывать меру надежности, характеризующую качество измерения. Это необходимо для создания возможности сличения результатов друг с другом, для сравнения их с допустимыми значениями, например, содержащимся в технических условиях.

Актуальная на сегодняшний день задача измерения заключается в том, чтобы наилучшим образом получить и представить информацию о самой измеряемой величине, а не о погрешности ее измерения. В соответствии с этой задачей неопределенность измерения оказывается наиболее подходящей характеристикой качества результатов измерений. В терминах VIM [1] (международный словарь по метрологии) под *неопределенностью измерения* понимают неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании используемой информации. Из определения следует, что для оценивания неопределенности не требуется знаний об опорном значении величины, а оцененная неопределенность измерения зависит от полученного объема информации об измеряемой величине и способах обработки этой информации.

В Руководстве по выражению неопределенности измерения (GUM) [2] приводится основополагающий постулат, обосновывающий применение понятия неопределенности измерения: нельзя установить, насколько хорошо известно единственное истинное значение величины, а можно только узнать, насколько велико доверие к тому, что оно известно. Такая позиция отражает неполное знание об измеряемой величине, а степень доверия является количественной вероятностной оценкой неопределенности измерения. Таким образом, понятие неопределенности измерения является новым с точки зрения понимания процесса измерения и оценки его результата.

В 1707 г. Исаак Ньютон во «Всеобщей арифметике» записал: «Число есть не столько совокупность нескольких единиц, сколько отвлеченное отношение какой-нибудь величины к другой, однородной с ней и принятой за единицу». А в 1768 г. Леонард Эйлер в «Алгебре» уточнил: «При определении или изменении величин всякого рода устанавливается некоторая известная величина этого же рода, именуемая мерой или единицей и зависящая исключительно от нашего произвола. Затем определяется, в каком отношении находится данная величина к этой мере, что всегда выражается через числа, так что число является не чем иным, как отношением, в котором одна величина находится к другой, принятой за единицу».

Отсюда следует принцип Ньютона – Эйлера: физический размер меры единицы измерения с ее номинальным значением не связан, физические размеры мер кратных и дольных единиц устанавливают калибровкой. Истинное значение физической величины является условным, поэтому утверждение о неизвестности истинного значения смысла не имеет.

Следствием принципа Ньютона – Эйлера является условность «погрешности», которая относится не к физическим, а к расчетным величинам, и по этой причине является только оценкой отклонения от такого же условного истинного значения.

Увеличение числа измерений не связано с уменьшением случайной погрешности. При отсутствии тренда и в условиях стохастической компактности (стохастической однородности относительно характеристики положения модели), т.е. в условиях сходимости, можно только уточнить, а не уменьшить оценку параметра модели.

Согласно п. 3.3.5 ГОСТ Р 54500.3–2011 «Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения» [3], «…стандартную неопределенность типа *A* рассчитывают по плотности распределения, полученной из распределения частот, а стандартную неопределенность типа *B* – по предполагаемой плотности распределения, отражающей степень уверенности в появлении… события [часто называемой субъективной вероятностью]». Алгебра всех этих вероятностей следует аксиоматике А. Н. Колмогорова.

Однако оценивание по типу *A* даже в случае «нормального» распределения по доверительной вероятности не согласуется с ГОСТ Р 50779.21–2004 «Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть I. Нормальное распределение». При этом вид распределения не всегда может быть описан нормальным законом распределения.

Корень проблемы – критерий лучшего или предпочтения, но в ГОСТ Р 54500.3–2011 эта проблема даже не упоминается. Поэтому мотивация внедрения «безопасных» оценок «неопределенностью последствий внесения поправок в оценки неопределенности» отвлекает внимание от собственно последствий. Фактически ситуация обратная – «реалистическими» оценками занижают «безопасные» оценки, что, как уже было известно по итогам расследования «катастрофического феномена 1985–1986 гг.», и ведет «к нежелательным и даже к роковым последствиям». Ведь доверительные интервалы уже толерантны.

Другими словами, неопределенность измерения – это только параметр (рассеяния – *dispersion*) распределения вероятностей искомой методом косвенного измерения величины. Но даже умножение u_c (y) на некоторый искомый коэффициент не дает новой информации, он остается точечной оценкой и без дефинициальной составляющей только создает иллюзию оценки генеральной совокупности.

Несмотря на то, что понятие выражения неопределенности измерения появилось в метрологической практике более 20 лет назад, сегодня даже на уровне Международного комитета мер и весов (МКМВ) признается, что в метрологии отсутствует международное единство по

этому вопросу [4]. В то же время существует общая потребность в согласовании подходов для методов оценки и выражения неопределенности измерения, которая удовлетворяется изданием новых рекомендаций и стандартов. Первым официальным документом была изданная МКМВ в 1980 г. Рекомендация INC-1 «Выражение экспериментальных неопределенностей», в которой были даны краткие предписания о составляющих неопределенности и способах их количественной оценки.

На сегодняшний день создана необходимая база стандартов для практического применения концепции неопределенности. В 1993 г. принято Руководство по выражению неопределенности измерения (GUM) и был образован Комитет по руководствам в метрологии (JCGM). На сегодняшний день принято пять документов, начинающихся с цифры 100 с общим названием «Оценивание данных измерений».

В качестве документа JCGM 100, принятого как международный стандарт ISO/IEC Guide 98-3:2008, выступает третья редакция GUM с минимальными поправками. В качестве дополнений к GUM выпущены документы JCGM 101:2008 «Оценивание данных измерений. Дополнение 1 к Руководству по выражению неопределенности измерения. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло (ISO/IEC Guide 98-3:2008/Supplement 1:2008)» и JCGM 102:2008 «Оценивание данных измерений. Дополнение 2 к Руководству по выражению неопределенности измерения. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин (ISO/IEC Guide 98-3:2008/Supplement 2:2011)».

Документ JCGM 104:2009 «Оценивание данных измерений. Введение в «Руководство по выражению неопределенности измерения» (ISO/IEC Guide 98-1:2009) по содержанию и смыслу предшествует GUM и является введением в концепцию неопределенности. В нашей стране действует национальный стандарт ГОСТ Р 54500.1-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009 «Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководство по неопределенности измерения» [5]. В нем содержатся обобщения описанных в GUM и дополнениях к нему способов вычислений стандартных неопределенностей измеряемой величины, называемые трансформированием распределений, а также уделено внимание составлению модели измерения, применению неопределенности для оценки соответствия и применению метода наименьших квадратов.

Документ JCGM 106:2009 «Оценивание данных измерений. Роль неопределенности измерений при оценке соответствия (ISO/IEC Guide 98-4:2012)» посвящен вопросам оценки соответствия исследуемого объекта (предполагается, что результат измерения уже получен) требованиям, заданным в технических регламентах, стандартах, технических условиях, договорах и др. Требования могут быть представлены в виде одной или двух границ, которые определяют предел допустимых значений измеряемого показателя, называемый полем допуска. Если значение свойства лежит внутри поля допуска, то делается вывод, что оно соответствует требованиям, если выходит за пределы – не соответствует. Неопределенность всегда создает риск принятия ошибочного решения в отношении соответствия или несоответствия продукции, процесса установленным требованиям на основании измеренного значения показателя и его сравнения с установленными критериями.

Методики, содержащиеся в JCGM 106:2009, могут быть использованы при построении интервала допустимых значений рассматриваемого показателя, называемого приемочным интервалом. Приемочные границы могут быть выбраны так, чтобы минимизировать риски, связанные с риском потребителя и риском производителя. Рассмотрены задачи оценки соответствия по каждому виду риска. Первый тип задач связан с установлением приемочных границ, обеспечивающих достижение желаемой вероятности соответствия для единичного измеряемого объекта. Второй тип позволяет устанавливать приемочные границы, которые способны обеспечить приемлемый уровень доверия к среднему арифметическому в том случае, когда измеряются показатели нескольких объектов.

Для продвижения концепции неопределенности измерений документы JCGM приняты в качестве национальных стандартов Российской Федерации:

1. ГОСТ Р 54500.3–2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения».

2. ГОСТ Р 54500.1–2011/Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009 «Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководство по неопределенности измерения».

3. ГОСТ Р 54500.3.1–2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008/Дополнение 1:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло» [6].

4. ГОСТ Р 54500.3.2–2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008/Дополнение 2:2011 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин [7].

Данный список стандартов будет дополняться и расширяться по мере введения новых документов JCGM и принятия национальных стандартов на их основе. В конечном итоге, несмотря на сопротивление части метрологической общественности, концепция неопределенности займет лидирующее место, создавая условия для отказа от использования двойных стандартов и повышения качества измерений. Косвенным подтверждением этого прогноза является постоянно возрастающий интерес к применению концепции неопределенности измерения, введение национальных стандартов и рост численности специалистов, владеющих и результативно применяющих концепцию в ряде областей деятельности в течение длительного периода времени.

При организации образовательного процесса основное внимание уделяется формированию компетенций. Поэтому в образовательной программе по направлению «Стандартизация и метрология» больше внимания необходимо уделить изучению и практическому применению «Введения в руководство по неопределенности измерения» [5], а для специалистов по направлению «Управление качеством» важным является документ «JCGM 106:2009 Оценивание данных измерений. Роль неопределенности измерений при оценке соответствия», позволяющий корректно решать вопросы оценки соответствия исследуемого объекта, а также построения интервала допустимых значений рассматриваемого показателя, называемого приемочным интервалом.

Библиографический список

1. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины : пер. с англ. и фр. / Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д. И. Менделеева. – СПб. : Профессионал, 2010.
2. Guide to the expression of uncertainty in measurement. – Geneva : ISO, 1993.
3. ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения».
4. Цуканова, Е. Г. «Погрешность» и «неопределенность»: сравнительный анализ двух подходов к выражению точности результатов измерений / Е. Г. Цуканова // Студенческий научный форум : VI Международная студенческая электронная научная конференция (15 февраля – 31 марта 2014 года).
5. ГОСТ Р 54500.1-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009 «Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководство по неопределенности измерения».
6. ГОСТ Р 54500.3.1-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008/Дополнение 1:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3 Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло».
7. ГОСТ Р 54500.3.2-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008/Дополнение 2:2011 «Неопределенность измерения. Часть 3 Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин.

Бержинская Марина Викторовна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Berzhinskaya Marina Viktorovna
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information
measurement technology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Голубинский Юрий Митрофанович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра общепрофессиональных дисциплин,
Пензенский филиал Военной Академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Пенза-5, Военный городок)
E-mail: golubinskij@mail.ru

Golubinskij Yury Mitrofanovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of fll-professional disciplines,
Penza branch of Military academy
of material-support logistics
named after army general A. V. Khrulev
(Military town, Penza-5, Russia)

Назарова Инна Таджиддиновна
кандидат технических наук, преподаватель,
кафедра общепрофессиональных дисциплин,
Пензенский филиал Военной Академии
материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева
(Россия, г. Пенза-5, Военный городок)
E-mail: uncate@yandex.ru

Nazarova Inna Tadzhiddinovna
candidate of technical sciences, teacher,
sub-department of fll-professional disciplines,
Penza branch of Military academy
of material-support logistics
named after army general A. V. Khrulev
(Military town, Penza-5, Russia)

УДК 621.317
Бержинская, М. В.

Актуальные вопросы преподавания метрологии. Введение понятия неопределенности измерения в дисциплины инженерного направления / М. В. Бержинская, Ю. М. Голубинский, И. Т. Назарова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 5–10. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-1.

УДК 621.317 DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-2

М. В. Чернецов, П. П. Чураков

ИНВАРИАНТНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

M. V. Chernetsov, P. P. Churakov

INVARIANT TRANSFORMATION IN MEASURING SYSTEMS WITH PARAMETRIC SENSORS

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели.*** Объектом исследования являются измерительные цепи с параметрическими датчиками, описываемые схемой замещения в виде двухполюсной электрической цепи, и математические модели алгоритма инвариантного преобразования, обеспечивающие независимость результата измерения информативного параметра датчика от неинформативных. Важным при этом является определение и математическое описание с общих позиций условий реализуемости инвариантного преобразования для датчиков, параметры которых в процессе измерительного эксперимента переменны и зависят как от измеряемой физической величины, так и от условий эксплуатации. Целью работы является формализация условий обеспечения инвариантности при измерении значения информативного параметра датчиков, описываемых электрической схемой замещения с переменными параметрами. ***Материалы и методы.*** Показано, что инвариантность преобразования обеспечивается в ограниченном интервале наблюдения с допустимой погрешностью аддитивного и мультипликативного характера, обусловленной влиянием неинформативных параметров. Проведен анализ данных погрешностей и возможные пути снижения их влияния на результат измерения в одноканальных и многоканальных структурах измерительных преобразователей. ***Результаты.*** Получены математические модели, описывающие алгоритмы инвариантного преобразования в одноканальных и многоканальных структурах измерителей с учетом погрешностей от влияния неинформативных параметров. Показана возможность упрощения алгоритмов преобразования, основанных на анализе амплитудно-временных характеристик составляющих напряжения измерительных цепей при использовании тестового воздействия в зависимости от топологии схемы замещения датчика. ***Выводы.*** Развиты положения теории инвариантного преобразования в части уточнения условий реализуемости при измерениях значений информативных параметров датчиков, описываемых двухполюсной электрической схемой замещения с изменяющимися параметрами. Формализован алгоритм проектирования схем измерительных цепей, обеспечивающих снижение погрешностей мультипликативного характера от влияния неинформативных параметров за счет выбора требуемого тестового воздействия на датчик. Анализ приведенных примеров построения схем измерительных цепей подтверждает полученные теоретические результаты.

A b s t r a c t. ***Background.*** The object of the study are measuring circuits with parametric sensors, described by the circuit of a two-pole electrical circuit, and mathematical models of the invariant transformation algorithm, ensuring the independence of the result of measuring the informative parameter of the sensor from non-informative ones. Important in this case is the definition and mathematical description from the general viewpoint of the realizability conditions of the invariant transformation for sensors whose parameters in the process of the measurement experiment are variable and depend on both the measured physical quantity and the operating conditions. The purpose of the work is to formalize the conditions for ensuring invar-

iance when measuring the value of the informative parameter of the sensors described by the electric circuit of substitution with variable parameters. ***Materials and methods***. It is shown that the invariance of the transformation is ensured in a limited observation interval with an admissible error of additive and multiplicative nature due to the influence of noninformative parameters. The analysis of the data of errors and possible ways of reducing their influence on the measurement result in single-channel and multichannel structures of measuring transducers is carried out. ***Results***. Mathematical models describing the algorithms of invariant transformation in single-channel and multichannel structures of meters with allowance for errors from the influence of non-informative parameters are obtained. The possibility of simplifying the algorithms for transforming the amplitude-time characteristics of the component voltages of the measuring circuits based on the analysis using the test action depending on the topology of the sensor replacement circuit is shown. ***Conclusions***. The positions of the theory of invariant transformation are developed in the part of refinement of the realizability conditions for measurements of the values of the informative parameters of the sensors described by a two-pole electrical substitution circuit with varying parameters. The algorithm for designing circuits of measuring circuits that reduce the errors of a multiplicative nature from the influence of non-informative parameters by selecting the required test action on the sensor is formalized. The analysis of the given examples of construction of circuits of measuring circuits confirms the obtained theoretical results.

Ключевые слова: инвариантное преобразование, параметрический датчик, схема замещения, измерительная цепь, измерительный преобразователь.

Key words: invariant transformation, parametric sensor, replacement circuit, measuring circuit, measuring transducer.

Растущие потребности по точности и достоверности получаемой информации вынуждают рассматривать параметрический датчик (ПД) в виде сложного объекта исследования, описываемого многоэлементной электрической схемой замещения (СЗ). Измеряемая физическая величина определяется, как правило, значением одного элемента СЗ (информативным параметром ПД), а остальные элементы принимают неинформативными. Учитывая, что ПД является первым звеном измерительного тракта, оказывающим наибольшее влияние на точность средства измерения в целом, а параметры ПД переменны и зависят не только от измеряемой физической величины, но и от условий эксплуатации, формализация требований, обеспечивающих инвариантность преобразования информативного параметра ПД [1] относительно неинформативных, является, несомненно, актуальной задачей.

В общем случае выходное напряжение измерительной цепи (ИЦ) определяется топологией СЗ и подаваемым на ИЦ тестовым воздействием $F(p)=F\left[Э_0(p),X_0(p)\right]$, обеспечивающим заданный энергетический режим в ПД, где $Э_0(p)$ – источник энергии (ток, напряжение), а $X_0(p)$ – пассивный эталонный электрический элемент, включаемый в ИЦ в качестве меры сравнения [2]. Полагая, что схема замещения ПД удовлетворяет условиям линейности, можем записать уравнение, описывающее выходное напряжение ИЦ

$$U_{ИЦ}(p)=U\left[Э_0(p),X_0(p),Z_{ПД}(p)\right]=U\left[F(p),Z_{ПД}(p)\right], \quad (1)$$

где $Z_{ПД}(p)=f_x(p,X_1,X_2,...,X_n)$ – функция, описывающая комплексное сопротивление или проводимость ПД; n – число элементов в схеме замещения ПД; p – оператор Лапласа.

В уравнении (1) n неизвестных и оно исходно неразрешимо относительно информативного параметра X_i.

Суть инвариантного преобразования в реализации такого алгоритма обработки $W(p)$ напряжения ИЦ, который обеспечивает получение сигнала Y, однозначно определяемого значением информативного параметра X_i, т.е.

$$Y = W(p)\left[U_{\text{ИЦ}}(p)\right] = KU\left[F(p), X_i(p)\right] = KU_{X_i}(p), \quad (2)$$

где K – размерный коэффициент; $U_{Xi}(p)$ – составляющая напряжения ИЦ, определяемая значением только информативного параметра ПД X_i [1–4].

Однако топология СЗ ПД может быть сложной и содержать более двух элементов, значения которых переменны и меняются случайным образом. Поэтому в общем случае инвариантное преобразование параметров ПД реализуется с допустимой погрешностью преобразования, обусловленной влиянием неинформативных параметров, и достигается в ограниченном интервале времени при обработке амплитудно-временных характеристик или в интервале частот (фаз) при обработке амплитудно-частотных (фазовых) характеристик напряжения ИЦ, который для удобства записи уравнений обозначим интервалом наблюдения $\Delta\Psi$. Соответственно, аддитивное влияние неинформативных параметров X_j в этом интервале $\Delta\Psi$ можно описать уравнением

$$N_a(p)\left\{U\left[F(p), f(x_j, p)\right]\right\} = \Delta a, \quad (3)$$

где $f(x_j, p)$ – функция, описывающая влияние неинформативных параметров x_j, $j = \overline{1, n-1}$, $N_a(p)$ – оператор алгоритма обработки ИП, Δa – допустимая погрешность преобразования, обусловленная влиянием неинформативных параметров. В идеальном случае, при $\Delta a = 0$ погрешность преобразования от влияния неинформативных параметров отсутствует. При $\Delta a \neq 0$ погрешность может быть либо постоянной, проявляясь как смещение результата преобразования (2) на величину $\Delta a = \text{const}$, которое легко устраняется при известном значении Δa, либо переменной, для устранения которой необходимо иметь математическое описание изменения погрешности Δa в пределах $\Delta\Psi$. Соответствующую операцию можно представить как вычитание погрешности Δa из результата преобразования.

Мультипликативное влияние неинформативных параметров и дестабилизирующих факторов в интервале $\Delta\Psi$ можно описать уравнением

$$N_m(p)\left\{U\left[F(p), f(x_j, p)\right]\right\} = \Delta m, \quad (4)$$

где Δm – допустимая погрешность преобразования. В идеальном случае, при $\Delta m = 1$ неинформативные параметры ПД не влияют на результат преобразования. Если $\Delta m \neq 1$, то для обеспечения инвариантности достаточно либо определить значение постоянной величины Δm, либо определить уравнение, описывающее изменение погрешности Δm в пределах интервала наблюдения $\Delta\Psi$. Соответствующая операция коррекции представляется как деление результата преобразования на Δm.

При комбинированном влиянии неинформативных и дестабилизирующих параметров приоритетность выполнения операций коррекции погрешностей (3) и (4) определяется принятым алгоритмом обработки напряжения ИЦ.

Следует отметить, что условие инвариантного преобразования параметров X_i во временной области можно сформулировать как условие обеспечения ортогональности [2], при выполнении которого влияние неинформативных параметров равно нулю, т.е.

$$\int_{t_i}^{t_i+\Delta T} U_{X_i}(t) U_{X_j}(t)\, dt \equiv 0, \text{ при } i \neq j. \quad (5)$$

В результате, если обеспечивается инвариантное преобразование, то

$$\int_{t_i}^{t_i+\Delta T} U_{X_i}(t) U_{X_j}(t)\, dt = \text{const} \neq 0, \text{ при } i = j. \quad (6)$$

Условия (5–6), в сущности, являются необходимыми для обеспечения измерения информативного параметра ПД независимо от значений неинформативных параметров. Соответ-

ственно, достаточное условие определяется возможностью реализации алгоритма преобразования (2) в интервале $\Delta\Psi$.

Отметим, что инвариантное преобразование информативного параметра X_i ПД, описываемое уравнениями (2)–(6), может быть реализовано методами прямого преобразования в одноканальных ИП.

При необходимости измерения нескольких параметров ПД организуются дополнительные каналы передачи напряжения ИЦ. При этом уравнение (1) можно переписать для каждого из каналов в удобной для анализа форме [1, 2]

$$U_{\text{ИЦ}k}(p) = \sum_{l=1}^{n} B_{kl}(p) X_l , \tag{7}$$

где $B_{kl}(p) = \sum_{r=0}^{q} b_{kl_r} p^r$ – полиномиальный коэффициент; $k = \overline{1,n}$ – номер канала передачи напряжения ИЦ; $l = \overline{1,n}$ – номер параметра ПД (элемента СЗ); $r = \overline{0,q}$ – порядок линейного дифференциального уравнения, b_{kl_r} – составляющая полиномиального коэффициента порядка *r*.

Решение системы уравнений (7) относительно искомого параметра X_i находится в виде [1]

$$X_i(p) = \frac{Det_i(p)}{Det(p)}, \tag{8}$$

где $Det(p) = \left\| B_{kl}(p) \right\|$, а $Det_i(p)$ – определитель, получаемый из $Det(p)$ заменой *i*-го столбца на столбец из результатов $U_{\text{ИЦ}k}(p)$ каждого канала (7).

При этом определитель, описывающий влияние *j*-го неинформативного параметра датчика на информативный, запишется в виде

$$Det_{ji}(p) = \sum_{k} B_{kj}(p) \cdot M_{ki}(p) = 0 , \tag{9}$$

так как коэффициенты *i*-го и *j*-го столбцов в идеальном случае должны быть равны, что определяет требования по идентичности параметров каналов передачи напряжения ИЦ. В уравнении (9) $M_{ki}(p)$ – минор, получаемый из определителя $Det(p)$ вычеркиванием *j*-й строки и *j*-го столбца.

Соответственно, условия инвариантного преобразования реализуются, если оператор преобразования по неинформативному *j*-му параметру ПД описывается уравнением

$$W(p) = \frac{Det_{ji}(p)}{Det(p)} = \left. \frac{D'_{ji}(p) - D''_{ji}(p)}{Det(p)} \right| = \left[W'(p) - W''(p) \right] = 0 , \tag{10}$$

где $Det(p) = Det'_{ji}(p) - Det''_{ji}(p)$.

Из уравнения (7) следует, что дополнительным условием физической реализуемости методов измерения более одного параметра ПД является наличие в ИП не менее двух каналов передачи напряжения ИЦ [1, 2, 4].

Достоинством многоканальных ИП является возможность определения значений нескольких элементов СЗ (по сути электрических параметров датчика) ПД [2–5].

Таким образом, инвариантное преобразование может быть достигнуто в одноканальных (2) и многоканальных (7) структурах ИП прямого преобразования на основе методов анализа амплитудно-временных [2–5], амплитудно-частотных и фазовых характеристик напряжения ИЦ [6]. Применение в многоканальных ИП методов уравновешивающего преобразования на основе регулируемых параметрических моделей элементов СЗ ПД [7] или компенсации составляющих напряжения ИЦ [8] ограничивается их невысоким быстродействием.

Наиболее простая схема ИЦ и алгоритм инвариантного преобразования реализуются, когда информативный элемент включен либо последовательно с остальными неинформативными элементами схемы замещения ПД, либо параллельно с ними. В этом случае в выходном

напряжении ИЦ может быть сформирована одна отдельная составляющая, определяемая однозначно значением только информативного параметра ПД. При этом существенное упрощение задачи проектирования схемы ИЦ достигается при использовании рекомендаций по выбору требуемого тестового воздействия $F(p)$, изложенных в работе [2], позволяющих комбинировать различные виды источника $Э_0(p)$ и эталонного электрического элемента $X_0(p)$.

В качестве примера рассмотрим алгоритм инвариантного преобразования параметров индуктивного ПД, включенного в активную ИЦ (рис. 1), построенную на базе операционного усилителя (ОУ). Трехэлементная СЗ составлена из информативного элемента L_x и неинформативных элементов: R_x, имитирующего сопротивление провода катушки индуктивности и вихревые потери ПД, и C_x, имитирующего совместное влияние распределенной межвитковой емкости и емкостей между выводами ПД и соединительными проводами от ПД к ИЦ. Из СЗ ПД следует, что для получения информативной составляющей напряжения ИЦ постоянной амплитуды целесообразно в качестве тестового воздействия использовать линейно изменяющийся ток, который наиболее просто задать с помощью входного напряжения U_0 и токозадающего эталонного элемента (меры сравнения) индуктивности L_0.

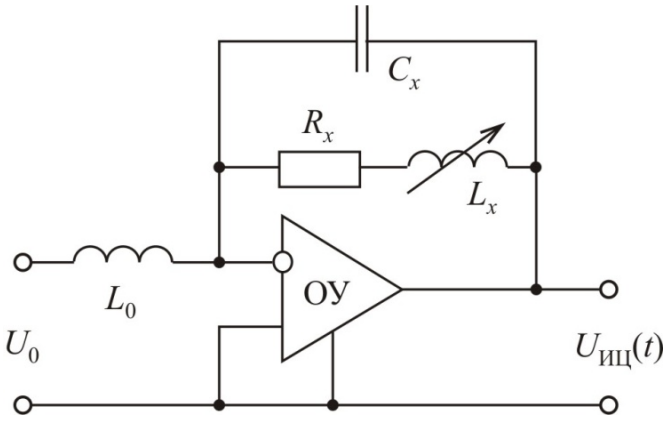


Рис. 1. Схема ИЦ с индуктивным ПД

В результате выходное напряжение ИЦ описывается выражением [2]:

$$U_{ИЦ}(t) = U_0\left[\frac{L_x}{L_0} - \frac{R_x^2 C_x}{L_0} + \frac{R_x t}{L_0} - \frac{L_x}{L_0} k e^{-\frac{t}{2L_x/R_x}} \sin(\omega t + \theta)\right]. \quad (11)$$

Из анализа уравнения (11) следует, что вторая составляющая $U_0 R_x^2 C_x / L_0$ не удовлетворяет условиям ортогональности (5–6), так как описывается одинаковой с информативной составляющей $U_0 L_x / L_0$ временной зависимостью, т.е. представляет собой аддитивную погрешность преобразования (3). Эта погрешность неразличима от информативной составляющей и методами прямого преобразования напряжения ИЦ не выделяется.

Применение методов уравновешивающего преобразования на уровне регулируемой модели элементов СЗ ПД решает задачу инвариантного преобразования, но ограничивается из-за низкого быстродействия.

По окончании времени $t_з$ затухания гармонической составляющей из (11) имеем

$$U_{ИЦ}(t)_{t>t_з} = U_0\left[\frac{L_x}{L_0} - \frac{R_x^2 C_x}{L_0} + \frac{R_x t}{L_0}\right]. \quad (12)$$

Если по истечении времени $t_з$ измерить мгновенные значения напряжения ИЦ в моменты времени T_1 и T_2, то получим два сигнала U_1 и U_2 (т.е. два канала преобразования), кото-

рые описываются уравнениями, получаемыми из уравнения (12) подстановкой вместо t значений T_1 и T_2, а вместо $U_{\text{ИЦ}}(t)$ измеренных значений U_1 и U_2 соответственно. Решение данной системы находится в виде

$$L_x = \frac{U_1T_2 - U_2T_1}{U_0(T_2 - T_1)}L_0 - R_x^2C_x \text{ и } R_x = \frac{(U_2 - U_1)L_0}{U_0(T_2 - T_1)}. \quad (13)$$

Погрешность $R_x^2C_x$ аддитивного характера обусловлена влиянием неинформативных параметров (3). Ее можно представить в виде суммы систематической Δ_c и случайной $\overset{o}{\Delta}_c$ погрешностей. Систематическую погрешность можно определить в ходе предварительных статических измерений параметров ПД, например, методами уравновешивающего преобразования и учесть при измерениях L_x в процессе эксплуатации ПД, а случайной погрешностью в виду малости можно пренебречь.

В рассмотренном примере не учтены динамические погрешности, обусловленные нестабильностью параметров ПД (значений элементов СЗ) в процессе эксплуатации в течение интервала наблюдения $\Delta\Psi$. Для снижения динамической погрешности следует, с одной стороны, уменьшать длительность измерительного эксперимента, а с другой – повышать быстродействие используемой элементной базы.

Проведенный анализ показал, что в общем случае инвариантное преобразование информативного параметра ПД, описываемого двухполюсной электрической СЗ, в ИП прямого преобразования реализуется в ограниченном интервале наблюдения $\Delta\Psi$ с погрешностью (3–4), определяемой влиянием неинформативных параметров ПД и их нестабильностью в процессе эксплуатации. В ИП уравновешивающего преобразования на основе регулируемой параметрической модели элементов СЗ ПД или компенсации составляющих напряжения ИЦ имеется возможность устранения погрешности, вносимой неинформативными параметрами, но низкое быстродействие ограничивает их применение. Синтез схемы ИЦ и алгоритма преобразования упрощается при выборе тестового воздействия с учетом топологии СЗ, при этом расширяются возможности выбора энергетического воздействия и типа образцового элемента сравнения в ИЦ.

Библиографический список

1. Петров, Б. Н. Принцип инвариантности в измерительной технике / Б. Н. Петров, В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. – М. : Наука, 1976. – 244 с.
2. Чернецов, В. И. Развитие теории и совершенствование унифицирующих измерительных преобразователей для параметрических датчиков : дис. … д-ра техн. наук / В. И. Чернецов. – Пенза, 2000. – 359 с.
3. Чернецов, М. В. Унифицирующие измерительные преобразователи физических величин на базе резистивно-емкостных датчиков : дис. … канд. техн. наук / М. В. Чернецов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2001. – 254 с.
4. Свистунов, Б. Л. Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности / Б. Л. Свистунов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 94–100.
5. Чернецов, М. В. Измерительные преобразователи параметров двухэлементных электрических цепей на основе методов амплитудно-временной селекции / М. В. Чернецов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 10. – С. 42–46.
6. Арш, Э. И. Автогенераторные методы и средства измерений / Э. И. Арш. – М. : Машиностроение, 1979. – 256 с.
7. Передельский, Г. И. Мосты с раздельным уравновешиванием по трем параметрам / Г. И. Передельский // Измерительная техника. – 1980. – № 9. – С. 49–50.
8. Мелик-Шахназаров, А. М. Компенсационные измерительные устройства систем автоконтроля на переменном токе / А. М. Мелик-Шахназаров, И. А. Шайн, Е. Г. Абаринов. – М. : Энергия, 1971. – 128 с.

Чернецов Михаил Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
технического управления качеством,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kafedratuk@yandex.ru

Chernetsov Mikhail Vladimirovich
candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of technical
quality management,
Penza State Technology University
(1a/11 Baydukova avenue/Gagarin street,
Penza, Russia)

Чураков Петр Павлович
доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Churakov Petr Pavlovich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information -measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317
Чернецов, М. В.
Инвариантное преобразование в измерительных системах с параметрическими датчиками / М. В. Чернецов, П. П. Чураков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 11–17. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-2.

УДК 621.317 DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-3

Н. П. Ординарцева

КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ В РАБОЧИХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

N. P. Ordinartseva

CALIBRATION OF MEASURING CHANNELS MEASURING SYSTEMS IN WORKING CONDITIONS AS A WAY OF IMPROVING THE ACCURACY OF MEASUREMENTS

Аннотация. ***Актуальность и цели***. Рассмотрено применение калибровки как метрологической процедуры по повышению точности измерений, выполняемых с помощью измерительных каналов измерительных систем в рабочих условиях эксплуатации. Цель статьи – показать одно из возможных решений задачи повышения точности измерительных систем. ***Материалы и методы***. В качестве метода исследования применен метод Монте-Карло. ***Результаты***. Представлены результаты экспериментального исследования способа калибровки измерительных каналов измерительных систем, основанного на применении переносного эталона, применяемого в сложившихся рабочих условиях эксплуатации измерительных каналов измерительных систем, и стационарного эталона, находящегося в лабораторных условиях. Дан анализ источников неопределенности измерений при калибровке. ***Выводы***. Доказана работоспособность и применимость калибровки измерительных каналов измерительных систем в рабочих условиях как способа повышения точности измерений, выполняемых измерительными системами.

Abstract. ***Background***. The use of calibration as a metrological procedure to improve the accuracy of measurements performed using the measuring channels of measuring systems in working conditions are considered. The purpose of this article is to show one of the possible solutions to the problem of improving the accuracy of measuring systems. ***Materials and methods***. As a method of research was had applied the method of Monte Carlo. ***Results***. The results of experimental research of method of calibration of measuring channels of measuring systems based on the use of portable standard used in the working conditions of measuring channels of measuring systems, and stationary standard located in the laboratory are given. The sources of measurement uncertainty during calibration are analyzed. ***Conclusions***. The efficiency and applicability of calibration of measuring channels of measuring systems in working conditions as a way to improve the accuracy of measurements and measuring systems have been proved.

Ключевые слова: калибровка измерительных каналов измерительных систем, метод повышения точности измерений, анализ неопределенности измерений.

Key words: calibration of measuring channels measuring systems, a method of increasing the accuracy of measurements, analysis of measurement uncertainty.

Введение. Важной метрологической процедурой, призванной обеспечить необходимый уровень точности показаний средств измерений, применяемых вне сферы государственного регулирования, является первичная и последующие калибровки средств измерений [1].

Широкое использование измерительных систем (ИС) в большинстве отраслей науки и техники обусловливает актуальность задачи повышения точности и обеспечения единства измерений ИС. Отличительной особенностью разрабатываемых и эксплуатируемых в последнее время ИС является большое количество измерительных каналов (ИК), исчисляемых в единицах, а иногда и десятках тысяч, рассредоточенных территориально. В большинстве случаев рассредоточенные территориально ИК ИС находятся в условиях, отличных от нормальных.

Демонтаж компонентов ИС с целью их транспортировки в нормальные условия калибровочной лаборатории в большинстве случаев не только нецелесообразен, но и невозможен. Существенными могут быть дополнительные затраты организационного характера, такие как остановка ИС (или отдельных ее ИК) или требование резервной замены компонентов ИК из обменного фонда (а также наличие этого обменного фонда), а также затраты, связанные с ожиданием очереди предъявления компонентов ИС на калибровку в калибровочной лаборатории. Возможны нежелательное воздействие на транспортируемые элементы ИС дорожной вибрационной тряски, изменение прежнего приработанного режима при новом монтаже ИК ИС. Встроенные меры для самокалибровки ИС подвержены временному дрейфу из-за старения и утраты своих первоначальных характеристик, и, кроме того, недопустимо, чтобы эталоны постоянно находились в тех же рабочих условиях, что и компоненты ИС. Поэтому встроенные меры не являются достаточными для автономного поддержания единства измерений ИС.

С потребительской точки зрения, немаловажным является и тот факт, что если калибруемый ИК эксплуатируется исключительно в рабочих условиях, зачастую существенно отличающихся от нормальных, то калибровочная характеристика ИК в нормальных условиях для пользователей не представляет никакого практического интереса. Пользователи ИС выражают свою потребность иметь калибровочную характеристику ИК именно для условий эксплуатации ИС, тогда они рассматривают калибровку как способ повышения точности ИС.

В статье предложено решение задачи повышения точности ИС путем калибровки в рабочих условиях их эксплуатации.

Нормальные условия при калибровке ИК ИС необходимы для передачи единицы величины. Однако передача единицы величины даже в нормальной области значений влияющих величин с использованием принятого опорного значения эталона без учета конкретных значений влияющих величин может быть причиной увеличения инструментальной составляющей погрешности до 35 % предела допускаемой основной погрешности ИК [2, п. 1.2]. Рисунок 1 иллюстрирует увеличение основной погрешности средства измерения, вызванной изменением температуры (θ) окружающей среды и атмосферного давления (*p*) в пределах нормальной области их значений.

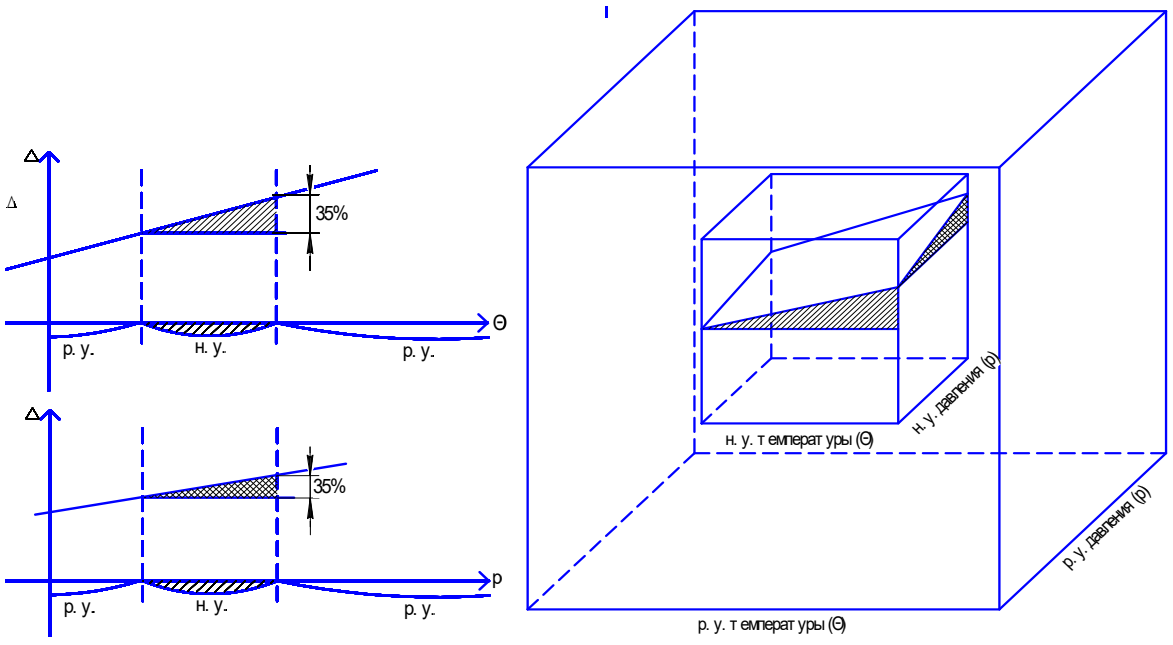


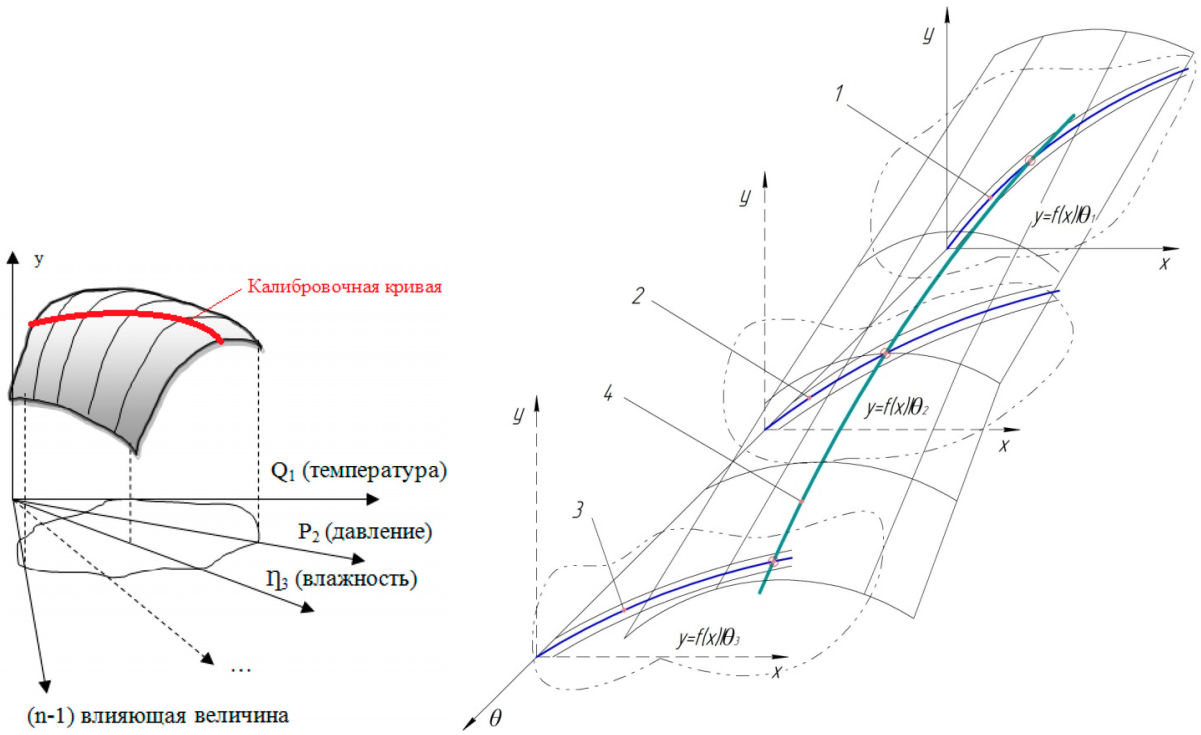
Рис. 1. Нормальные и рабочие условия влияющих величин температуры (θ) и атмосферного давления (*p*) и допускаемое увеличение основной погрешности средства измерения от влияющих величин в пределах нормальной области их значений согласно ГОСТ 8.395-80

Неучтенное действие совокупности влияющих величин рабочих условий эксплуатации ИК ИС, уникально сложившейся в момент калибровки ИК, может нивелировать все конструкторские, технологические, схемотехнические усовершенствования ИС в части повышения точности. И, напротив, не столько усилия по созданию нормальных условий, сколько учет конкретных значений влияющих величин, в которых осуществляется калибровка ИК ИС, является одним из возможных путей совершенствования обеспечения единства измерений ИС и повышения точности измерений, выполняемых ИК ИС в рабочих условиях эксплуатации ИС.

В работах [3–7] обоснована возможность и целесообразность проведения калибровки ИК ИС в рабочих условиях эксплуатации с использованием метода замещения, реализуемого с помощью переносного эталона, применяемого в указанных условиях, и стационарного эталона, находящегося в лабораторных условиях.

Предложенный метод отличается тем, что учитывает действие уникально сложившейся совокупности влияющих величин в момент передачи единицы величины калибруемому ИК. Метод, обеспечивающий учет конкретных значений влияющих величин, в которых осуществляется калибровка ИК ИС, и метрологическую прослеживаемость результатов измерений, является дальнейшим развитием методов обеспечения единства измерений ИС и международного признания получаемых результатов измерений [4, 6, 8]. Поправка к значению величины, воспроизводимой переносным эталоном, определяется сличением переносного эталона, помещенного в локально воспроизведенные в лаборатории те же рабочие условия калибровки ИК ИС, с находящимся в нормальных условиях стационарным эталоном. Применение предложенного метода [3–7] позволяет применять калибровку как способ повышения точности измерений именно в тех условиях действия влияющих величин, в которых эксплуатируется ИК, – только в этом случае калибровку следует рассматривать как способ повышения точности измерений ИК ИС.

Нахождение калибровочной кривой ИК ИС в рабочих условиях, а также зависимость передаваемой единицы величины от действия влияющей величины, иллюстрирует рис. 2.



а) *б*)

Рис. 2. Нахождение калибровочной кривой ИК ИС в рабочих условиях:
а – совокупность влияющих величин рабочих условий; *б* – калибровочные $y = f(x)|\Theta_1 \div \Theta_3$ кривые (*1–3*), полученные при температуре $\Theta 1 \div \Theta 3$ соответственно;
4 – зависимость передаваемой ИК *i*-й единицы величины от температуры Θ

Для подтверждения эффективности предложенного метода калибровки [3–7] выполнен вычислительный эксперимент с использованием метода Монте-Карло для случаев:

– комплектной калибровки простого ИК;

– комплектной калибровки сложного ИК в случае одной или двух влияющих величин.

Полученные результаты доказали его эффективность для решения задач калибровки ИК ИС в рабочих условиях эксплуатации, т.е. без демонтажа компонентов ИК ИС. Полученные результаты представлены в табл. 1. Под известным способом подразумевается способ, при котором поправка для переносного эталона определяется посредством его калибровки в нормальных условиях без учета совокупности действий влияющих величин.

Таблица 1

Полученные результатов экспериментальных исследований

Описание эксперимента		Расширенная неопределенность погрешности передачи единицы величины ИК в рабочих условиях, мА
Комплектная калибровка простого ИК в случае одной влияющей величины	Известный способ	0,0024
	Предложенный способ	0,00021
Комплектная калибровка простого ИК в случае двух влияющих величин	Известный способ	0,0032
	Предложенный способ	0,00021
Комплектная калибровка сложного ИК в случае одной влияющей величины	Известный способ	0,0042
	Предложенный способ	0,0035
Комплектная калибровка сложного ИК в случае двух влияющих величин	Известный способ	0,0044
	Предложенный способ	0,0039

При измерениях вообще и при калибровке, в частности, результат измерения полностью представлен тогда, когда содержит значение, приписанное измеряемой величине, и неопределенность измерения, связанную с этим значением. Источники неопределенности измерения при калибровке ИК в рабочих условиях эксплуатации ИС представлены в табл. 2.

Таблица 2

Источники неопределенности измерения при калибровке ИК в рабочих условиях эксплуатации ИС

Этап	Источники неопределенности измерения
1	2
Этап 1	Неопределенность значения переносного эталона: неопределенность измерений при его калибровке; нестабильность значения переносного эталона с момента времени с его калибровки до момента его использования в рабочих условиях калибровки ИК ИС; неопределенность измерений, обусловленная изменением значений влияющих величин рабочих условий в процессе выполнения калибровочных работ ИК. Неопределенности средств измерений, используемых для измерения значений влияющих величин рабочих условий эксплуатации ИК. Неопределенности измерений, обусловленные конечным значением учитываемых влияющих величин и округлением результатов измерений. Неопределенности измерений, обусловленные упрощением модели при составлении модельного уравнения и уравнений, применяемых при введении поправок.

Окончание табл. 2

1	2
Этап 2	Неопределенность воспроизведения локально в лаборатории значений влияющих величин: неопределенность установки влияющего фактора в испытательной камере; дискретность установки влияющего фактора в испытательной камере; неравномерность поля влияющего фактора по объему испытательной камеры. Неопределенность значения стационарного эталона: неопределенность измерений при его калибровке; неопределенность измерений, обусловленная отклонением условий, в которых проводилась его калибровка, от условий, в которых он передает единицу величины переносному эталону; нестабильность значения стационарного эталона с момента времени с его калибровки до момента его использования для передачи единицы величины переносному эталону. Неопределенность измерения, обусловленная случайной погрешностью переносного эталона. Неопределенность измерений, обусловленная погрешностью компаратора. Неопределенность измерений, обусловленная методикой измерений.

Выполнение калибровочных работ при нескольких влияющих факторах потребовало дальнейшего развития теории планирования эксперимента на интервальных переменных, которыми в действительности являются результаты измерений [9–12].

Планирование регрессионного эксперимента на интервальных переменных гармонизировано с международным GUM-подходом оценки неопределенности измерений при калибровке, но в отличие от традиционного планирования на числах, как отмечается в недостатках и причинах пересмотра «Руководства по выражению неопределенности измерения», позволяет иметь математически корректный аппарат. В интервале гарантированного нахождения результата измерения находится бесконечное число точек – это делает обоснованным применение метода наименьших квадратов, в основе которого лежит идея нормального распределения с бесконечным числом элементов в выборке.

Выводы. Сравнение полученных результатов эксперимента показало, что применение нового способа калибровки ИК позволяет уменьшить расширенную неопределенность измерений при калибровке ИК ИС в рабочих условиях эксплуатации. Способ особенно рекомендован для случая простого ИК с использованием одного переносного эталона. В случае сложного ИК увеличение точности не столь большое, а потребность использования нескольких переносных эталонов для калибровки сложного ИК является ограничивающим условием применения предложенного способа.

Библиографический список

1. Лукашов, Ю. Е. Сравнение процедур поверки и калибровки / Ю. Е. Лукашов // Метрологическое обеспечение измерительных систем : сб. докл. X Всерос. науч.-техн. конф. – Пенза, 2017. – С. 74–101.
2. ГОСТ 8.395-80. ГСИ. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования.
3. Данилов, А. А. Калибровка средств измерений в рабочих условиях / М. В. Бержинская, А. А. Данилов, Ю. В. Кучеренко, Н. П. Ординарцева // Метрология. – 2014. – № 1. – С. 19–22.
4. Danilov, A. A. Calibration of measuring instruments under working conditions / A. A. Danilov, Yu. V. Kucherenko, M. V. Berzhinskaya, N. P. Ordinartseva // Measurement Techniques. – New York : Springer, 2014. – Vol. 57, iss. 3. – P. 228–230.
5. Данилов, А. А. Способ калибровки измерительных каналов измерительных систем в рабочих условиях эксплуатации // А. А. Данилов, А. А. Баранов, Ю. В. Кучеренко, Н. П. Ординарцева // Законодательная и прикладная метрология. – 2017. – № 2. – С. 30–32.
6. Danilov, A. A. Calibration Method of Measuring Instruments in Operating Conditions / M. V. Berzhinskaya, A. A. Danilov, Yu. V. Kucherenko, N. P. Ordinartseva // Advanced Mathematical and Computational Tools in Me-trology and Testing X. – Singapore : World Scientific Publishing Company, 2015. – P. 149–156.
7. Danilov, A. A. Calibration method of measuring instruments in operating conditions / A. A. Danilov, Yu. V. Kucherenko, M. V. Berzhinskaya, N. P. Ordinartseva // Advanced Ma-

tematical and Computational Tools in Metrology and Testing (AMCTM 2014)» : proceedings of VNIIM IMEKO TC21 International conference. – St. Petersburg, Russia, 2014.
8. Budylina, E. A. Method of calibration measuring channels of measuring systems under operating conditions / E. A. Budylina, A. A. Danilov, N. P. Ordinartseva // Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing XI : International conference. – Glasgow, Scotland, UK, 2017. – P. 97–103.
9. Ординарцева, Н. П. Планирование эксперимента в измерениях / Н. П. Ординарцева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 78, № 3. – С. 72–76.
10. Ординарцева, Н. П. Градуировочные эксперименты при помощи метода гибридного регрессионного анализа / Н. П. Ординарцева // Измерительная техника. – 2013. – № 4. – С. 14–16.
11. Ordinartseva, N. P. Calibration experiments with hybrid regression analysis / N. P. Ordinartseva // Measurement Techniques. – New York : Springer, 2013. – Vol. 56, iss. 4. – P. 372.
12. Ординарцева, Н. П. Регрессионная модель на данных с интервальной неопределенностью / Н. П. Ординарцева // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 83–87. – URL: http://mca.altsu.ru/download/M12-2-1p3.pdf (дата обращения: 20.07.2012).

Ординарцева Наталья Павловна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: np_ordinartseva@mail.ru

Ordinartseva Natalia Pavlovna
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.317

Ординарцева, Н. П.

Калибровка измерительных каналов измерительных систем в рабочих условиях эксплуатации как способ повышения точности измерений / Н. П. Ординарцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 18–23. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-3.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518.3 DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-4

Д. А. Ярославцева

ПРИМЕР ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОБЪЕКТАХ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ КОСМОДРОМА

D. A. Yaroslavtseva

CASE OF INTELLIGENT DATA-MEASURING SYSTEMS IMPLEMENTATION AT SPACE CENTER LAUNCHING FACILITIES

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели.*** Показана общая проблема повышения безопасного функционирования космических ракетных комплексов и наземной космической инфраструктуры космодрома «Байконур». Целью работы является совершенствование системы безопасности космодрома «Байконур» с использованием нового класса информационно-измерительных систем – интеллектуальных систем мониторинга и контроля. ***Материалы и методы.*** Использованы методы математического и имитационного моделирования при создании информационно-измерительных систем нового поколения. Применено имитационное моделирование для анализа структурных схем интеллектуальных систем мониторинга и контроля. ***Результаты.*** Показаны базовые структуры интеллектуальных систем мониторинга и контроля, их технические характеристики и результаты внедрения на стартовых комплексах «Союз» космодрома. ***Выводы.*** Отмечено, что эксплуатация представленных интеллектуальных систем мониторинга и контроля позволит повысить безопасность боевого расчета и снизить риски аварий и техногенных катастроф. Представленные интеллектуальные системы мониторинга найдут широкое применение на космодромах «Плесецк» и «Восточный».

A b s t r a c t. ***Background.*** Shared problem of improving safe operation for both launch vehicles and ground-based space infrastructure of Baikonur Space Center has been presented. This paper objective includes development of the safety system at Baikonur Space Center by means of new-class data-measuring systems – intelligent monitoring and control systems. ***Matterials and methods.*** Mathematical and simulation model approaches have been used while developing next-gen data-measuring systems. Simulation modelling has been applied to analyze block diagram models of intelligent monitoring and control systems. ***Results.*** Basic structures of intelligent monitoring and control systems, their performance specifications and implementation results at Soyuz launching facilities have been presented. ***Conclusions.*** It is stated that operation of the presented intelligent monitoring and control systems will provide further safety for operational crew and risk mitigation of failures and technological disasters. The present-

ed intelligent monitoring and control systems will become widely used at Plesetsk and Vostochny Space Centers.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, интеллектуальная система мониторинга и контроля, наземная безопасность, космический ракетный комплекс, наземная космическая инфраструктура, стартовый комплекс.

Key words: data-measuring system, intelligent monitoring and control system, ground-based safety, launch vehicle, ground-based space infrastructure, launch facilities.

Задачи, стоящие перед ракетно-космической техникой (РКТ), год от года усложняются и, соответственно, значительно возрастает цена их решения. В связи с этим надежное и безаварийное функционирование технически сложных объектов (ТСО) космических ракетных комплексов (КРК) и наземной космической инфраструктуры (НКИ) космодромов приобрело одно из доминирующих значений в общей проблеме повышения безопасности КРК и НКИ [1, 2].

Анализ аварий и техногенных катастроф последних десятилетий показал, что традиционные информационно-измерительные системы (ИИС) не способны в полной мере обеспечить подготовку и принятие обоснованных управленческих решений в условиях неопределенности поведения ТСО и быстро меняющейся обстановки. Это объясняется применением разобщенных ИИС, когда излишняя локализация данных систем может привести к катастрофическим последствиям для ТСО КРК и НКИ космодрома.

Анализ основных тенденций развития современных ТСО КРК и НКИ показывает, что ТСО имеют целый ряд особенностей, среди которых следует выделить: многоаспектность, отсутствие строгой регламентации и структуризации технологий управления, избыточность основных элементов и подсистем, связей между ними, территориальную распределенность их компонент.

В настоящее время возросла потребность построения нового класса высокоэффективных и высоконадежных информационно-измерительных систем – интеллектуальных систем мониторинга и контроля технологических процессов, позволяющих обеспечивать и контролировать безопасность технологических операций при эксплуатации технических средств ТСО КРК и НКИ [3, 4].

Данная потребность определена следующими основными факторами:

– возросшими требованиями к повышению контроля безопасности технологического процесса;

– возросшей сложностью создаваемых технических средств;

– появлением мощных компактных и недорогих измерительных и управляющих устройств, обусловленных прогрессом в областях вычислительной техники, программного обеспечения и телекоммуникаций;

– повышением степени автоматизации и перераспределением функций между человеком и аппаратурой.

Впервые с учетом международного опыта, с целью совершенствования системы безопасности космодрома «Байконур» в ходе реализации государственных контрактов в АО «НИИФИ» на основе мониторинговых интеллектуальных датчиков физических величин созданы интеллектуальные системы мониторинга и контроля (СМиК) наземной безопасности стартовых комплексов (СК) «Союз». Интеллектуальные СМиК обеспечивают мониторинг и контроль выполнения опасных и особо опасных операций при подготовке ракет космического назначения (РКН) на стартовом комплексе к пуску с целью исключения нарушений технологической дисциплины персоналом расчета и снижения рисков возникновения инцидентов и аварий на стартовом комплексе, ведущих к гибели персонала и разрушению сложных инженерных сооружений [5].

На рис. 1 представлена обобщенная структура интеллектуальных СМиК, функционально разделяющаяся на три подсистемы:

– подсистема контроля процентного содержания кислорода и температуры трубопроводов с пероксидом водорода;

– подсистема контроля номеров расчета в опасных рабочих зонах СК;

– подсистема видеонаблюдения.

Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной СМиК

Интеллектуальные СМиК предназначены для:

– постоянного контроля процентного содержания кислорода в рабочих зонах стартового комплекса, передачи информации на дисплей оператора по наземной безопасности;

– выдачи светового и звукового сигнала для оповещения персонала о предельно допустимых значениях процентного содержания кислорода и необходимости немедленно покинуть аварийное помещение или сооружение;

– измерения температуры магистралей с перекисью водорода, передачи данных на дисплей оператора по наземной безопасности, выдачи предупреждения о превышении допустимой температуры;

– допуска номеров расчета в помещения стартового комплекса в соответствии с требованиями технологического графика подготовки РКН к пуску;

– контроля пребывания и позиционирования номеров расчета в опасных зонах стартового комплекса с использованием RFID-технологии;

– визуального контроля средствами промышленного телевидения номеров расчетов в опасных зонах стартового комплекса.

Реализация подсистемы контроля процентного содержания кислорода и температуры трубопроводов с пероксидом водорода

Структурная схема подсистемы контроля процентного содержания кислорода и температуры трубопроводов с пероксидом водорода представлена на рис. 2.

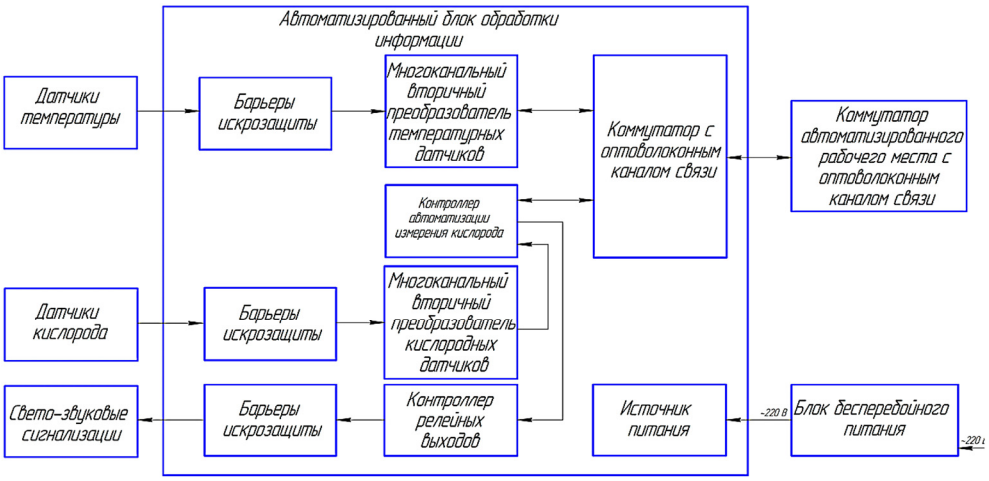


Рис. 2. Структурная схема подсистемы контроля процентного содержания кислорода и температуры трубопроводов с пероксидом водорода

Для данной подсистемы был разработан автоматизированный блок обработки информации, который обеспечивает работу подсистемы на СК [6, 7].

Данные с датчиков кислорода по интерфейсу 4–20 мА через барьеры искрозащиты поступают на многоканальный вторичный преобразователь кислородных датчиков, в котором данные преобразуются в цифровой вид и передаются по интерфейсу RS-485 на контроллер измерения кислорода. Контроллер измерения кислорода в свою очередь производит оценку значений измеренных величин и в зависимости от показаний дает команду на контроллер релейных выходов об активации сигнализаций в тех помещениях, где возникла опасность для жизни людей. Контроллер релейных выходов включает реле и подает питание на светозвуковые сигнализации через барьеры искрозащиты. Контроллер измерения кислорода отправляет данные на коммутатор с оптоволоконным выходом. Данные с датчиков температуры по интерфейсу 4–20 мА через барьеры искрозащиты поступают на многоканальный вторичный преобразователь температурных датчиков, в котором данные преобразуются в цифровой вид и передаются на коммутатор с оптоволоконным выходом. Данные с коммутатора по оптоволоконной линии связи отправляются на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора.

Датчики кислорода с цифровым выходом и встроенным реле производят измерения в удаленных точках. К релейным выходам датчиков подключены светозвуковые сигнализации, которые срабатывают при недопустимом значении процентного содержания кислорода в удаленных точках рабочей зоны СК.

Экранная форма представления данных по процентному содержанию кислорода и температуре трубопроводов с пероксидом водорода представлена на рис. 3.

Рис. 3. Экранная форма программного обеспечения контроля процентного содержания кислорода и температуры трубопроводов с пероксидом водорода

При возникновении опасности в помещениях рабочей зоны СК, связанной с недопустимой концентрацией кислорода, автоматизированный блок обработки информации выдает команду включения светозвуковых сигнализаций без участия оператора.

Реализация подсистемы контроля номеров расчета в опасных рабочих зонах СК

Для реализации данной подсистемы используются RFID-технологии (англ. *Radio Frequency IDentification* – радиочастотная идентификация). Данная технология имеет два типа элементов:

– пассивные;

– активные.

Пассивными элементами являются LF (Low Frequency) и RF (Radio Frequency) считыватели.

LF-считыватели – низкочастотные ультракоротковолновые (УКВ) излучатели малого радиуса действия, работают на частоте 125 кГц в радиусе 3 м с круговой диаграммой направленности, позволяют расширять функциональность RFID-системы и уточнять местоположение контролируемых объектов.

Установленные вблизи дверных проемов LF-считыватели фиксируют прохождение контролируемого объекта через дверной проем в ту или иную сторону. При попадании RFID-бейджа в электромагнитное поле LF-считывателя формируется сообщение об этом событии, которое передается на RF-считыватель и далее на АРМ оператора.

RF-считыватель – стационарный, устанавливаемый внутри помещений, работает на частоте 433 МГц. Считыватель предназначен для обнаружения и фиксации в режиме реального времени местоположения и состояния активных RFID-бейджей. Считыватель поддерживает стандартные сетевые соединения и протоколы и легко интегрируется в проводные и беспроводные Ethernet/Wi-Fi сети для передачи данных на сервер.

Считыватели поддерживают большое количество бейджей и принимают с них информацию на расстоянии до 30 м с круговой диаграммой направленности, легко конфигурируются для различных пользовательских применений.

RFID-бейдж (персональная карта) – унифицированное устройство для работы с LF- и RF-считывателями, имеет возможность нанесения на него фото и записи персональных данных.

Бейдж представляет собой радиопередатчик, работающий на частоте 433 МГц, который непрерывно направляет сообщения LF- и RF-считывателям.

Бейдж имеет две сигнальные программируемые кнопки, которые предназначены для отправления двух видов сообщений (тревожных или диагностических). При нажатии одной из кнопок номер расчета может проинформировать оператора АРМ о возникшей во время работы неисправности или аварийной ситуации на территории опасной зоны. Поэтому при возникновении аварийной ситуации оператор всегда имеет информацию о номерах расчета, находящихся на территории опасной зоны.

Реализация подсистемы видеонаблюдения

Долгое время все системы видеонаблюдения были исключительно аналоговыми. Их основными элементами являются камеры наблюдения – относительно простые оптические приборы без встроенных средств обработки информации. Видеорегистраторы, предназначенные для записи видеосигнала на кассету или жесткий диск, были, как правило, тоже аналоговые.

В IP-решениях сетевая камера превращается из пассивного «наблюдателя» в специализированный мини-компьютер, включающий в себя цифровую матрицу, процессор, твердотельный накопитель, сетевую карту, аудиосистему, операционную систему (ОС), специализированное программное обеспечение (ПО) для обработки видео, средства интеллектуального анализа и удаленного управления, всевозможные датчики и т.д.

Роль видеорегистратора в цифровых системах могут выполнять обычные компьютеры с установленным на них соответствующим ПО (как вариант – еще и со специальными платами, которые занимаются обработкой видео/аудиосигнала с камер, позволяя разгрузить собственные ресурсы персонального компьютера (ПК). Запись видеосигнала может осуществляться также на сетевой сервер (NAS) или на внутренний твердотельный накопитель самой IP-камеры.

Благодаря технологиям PoE (англ. Power over Ethernet – технология, позволяющая передавать удаленному устройству электрическую энергию вместе с данными через стандартную витую пару в сети Ethernet) IP-камера может получать питание по той же витой паре, по которой передается информация.

Немаловажную роль в работе систем видеонаблюдения, особенно цифровых, играет специальное ПО, устанавливаемое на компьютер. Именно оно дает в руки оператора инстру-

ментарий, позволяющий осуществлять эффективное видеонаблюдение, детальный анализ событий, управление и настройку целой сети видеокамер.

Подсистема видеонаблюдения предназначена для регистрации видеоинформации, поступающей от систем и агрегатов СК.

Подсистема видеонаблюдения должна обеспечить реализацию следующего набора функций:

– получение первичной видео- и аудиоинформации с удаленных объектов;
– возможность настройки продолжительности, скорости и режима видеозаписи;
– управление видеооборудованием с поддержкой графических представлений планов объекта;
– передача данных с объектов контроля на пункты контроля по каналам связи;
– регистрация видеоданных на жестких дисках (на серверах системы видеорегистрации);
– запись архивированных видеоданных на сменный носитель.

Подсистема видеонаблюдения АРМ оператора интеллектуальной СМиК представлена совокупностью видеоконтрольных устройств, каналов связи и видеокамер, управляемых с пульта руководителя работ.

Реализация автоматизированного рабочего места оператора представлена на рис. 4.

Рис. 4. Внешний вид автоматизированного рабочего места оператора интеллектуальной СМиК

По функциональным особенностям АРМ оператора интеллектуальной СМиК разделено на три составляющие:

– АРМ подсистемы контроля процентного содержания кислорода и температуры трубопроводов с пероксидом водорода;
– АРМ подсистемы контроля номеров расчета в опасных рабочих зонах СК;
– АРМ подсистемы видеонаблюдения.

АРМ оператора интеллектуальной СМиК выполняет следующие функции:

– цифровое и графическое отображения на экране мониторов ПЭВМ измеряемых параметров и сведений о номерах расчета;
– выдачу оператору световых и звуковых сигналов при отклонении значений измеряемых параметров от заданных требований;
– запись и хранение результатов всех измерений на жесткий диск ПЭВМ;
– распечатку при необходимости результатов измерений.

Операторы интеллектуальной СМиК при выполнении задач подготовки и пуска РКН обеспечивают:

– визуальный контроль средствами промышленного телевидения за номерами расчета в опасных рабочих зонах СК;

– допуск номеров расчета в помещения СК и контроль их пребывания в этих помещениях в соответствии с технологическим графиком подготовки РКН к пуску;

– контроль измерения данных по процентному содержанию кислорода в опасных зонах СК (с предупреждением персонала в помещениях СК о превышении допустимых значений процентного содержания кислорода);

– контроль измерения данных о температуре трубопроводов заправки пероксидом водорода, с предупреждением о превышении температуры трубопровода.

Технические характеристики интеллектуальных СМиК представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики интеллектуальных СМиК

Наименование	Единица измерения	Значение
Диапазон измерения температуры трубопровода с пероксидом водорода Абсолютная погрешность Сигнализация о превышении температуры от 30 до 35°С	°С	от –10 до 35 ±0,5 +
Диапазон измерений процентного содержания кислорода в воздухе Нижнее значение безопасного процентного содержания кислорода Верхнее значение безопасного процентного содержания кислорода Абсолютная погрешность Выдача сигнала для светового и звукового оповещения	%	от 15 до 25 19 23 ± 0,5 +
Сигнализация о проходе персонала в сооружениях и помещениях стартового комплекса		+
Отображение на экране монитора сведений о нахождении в сооружениях и помещениях стартового комплекса персонала с индивидуальными электронными пропусками		+
Визуальный контроль средствами промышленного телевидения действий персонала в опасных рабочих зонах		+
Потребляемая мощность	кВА	4,3
Диапазон рабочих температур: – на открытом воздухе – в закрытых помещениях	°С	 от –40 до 55 от 15 до 35
Назначенный ресурс	ч	50000
Срок службы	лет	10

По результатам анализа информации, полученной при выполнении операций технологических графиков подготовки и пуска РКН, оператору необходимо принимать своевременные соответствующие решения по обеспечению требований безопасности.

Интеллектуальные СМиК обеспечивают интегрированный контроль указанных выше параметров, что позволяет одному оператору адекватно принимать решения о приостановке работ или эвакуации обслуживающего персонала на основании полученных данных от датчиков кислорода (где утечка), видеонаблюдения, допуска и позиционирования номеров расчета, которые находятся в опасной зоне. Подсистема допуска и позиционирования имеет обратную связь (тревожная кнопка), которая позволяет в кратчайшие сроки эвакуировать конкретного человека.

Также интеллектуальные СМиК позволяют проверить, уполномочено или нет конкретное лицо находиться в определенной зоне в определенное время.

Персонализация нахождения номеров расчета в зоне выполнения работ позволяет оператору отслеживать в соответствии с технологическим графиком подготовки к пуску РКН правильность действий боевого расчета (конкретная операция, время, место, безопасность зоны).

Применение интеллектуальных СМиК позволило повысить безопасность обслуживающего персонала и снизить риск аварийных ситуаций на СК.

Представленные здесь интеллектуальные СМиК смонтированы, проведены автономные испытания, они введены в эксплуатацию на стартовых комплексах «Союз» космодрома «Байконур», сертифицированы в федеральной системе сертификации космической техники (№ ФССКТ 134.01.1.4.767800.123.14; № ФССКТ 134.01.1.4.767800.103.14) и в настоящее время успешно функционируют на стартовых комплексах «Союз» площадки № 1 и № 31 космодрома «Байконур».

Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Интеллектуальная система мониторинга состояния технически сложных объектов / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, А. В. Блинов // Современные информационные технологии : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : ПГТА, 2011. – Вып. 14. – С. 5–10.
2. Дмитриенко, А. Г. Распределенная интеллектуальная система мониторинга состояния объектов РКТ / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, А. В. Блинов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Сер.: Технические науки. – 2011. – № 04 (04). – С. 13–23.
3. Николаев, А. В. Комплексы и системы распределенных сетей интеллектуальных датчиков / А. В. Николаев, М. В. Тюрин, В. Н. Новиков // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. Сер.: Технические науки. – 2012. – С. 52–62.
4. Дмитриенко, А. Г. Обоснование метода прогнозирования технического состояния систем стартовых и технических комплексов космодрома с использованием мониторинговой информации / А. Г. Дмитриенко, А. В. Николаев, М. Ю. Михеев, М. В. Тюрин, И. Ю. Семочкина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 6–12.
5. Ярославцева, Д. А. Создание интеллектуальной системы мониторинга и контроля наземной безопасности стартового комплекса (площадка № 1) космодрома «Байконур» / Д. А. Ярославцева, Д. Д. Вязьмитинов // Всероссийская молодеж. науч.-практ. конф. «Орбита молодежи» и перспективы развития российской космонавтики» (8–9 сентября 2016 г.) : сб. материалов конф. – Самара, 2016. – С. 48–49.
6. Николаев, А. В. Применение имитационного моделирования для анализа структурных схем измерительно-вычислительных комплексов / А. В. Николаев, Б. В. Цыпин, М. В. Тюрин, Д. А. Ярославцева // Тр. Междунар. симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 58–62.
7. Николаев, А. В. Использование имитационного моделирования для анализа структурных схем информационно-измерительных и управляющих систем / А. В. Николаев, Б. В. Цыпин, Д. А. Ярославцева // Новые информационные технологии и системы : сб. науч. ст. XIV Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию кафедры «Вычислительная техника» и 30-летию кафедры «Системы автоматизированного проектирования» (г. Пенза, 22–24 ноября 2017 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2017. – С. 80–83.

Ярославцева Дарья Александровна
аспирант, инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: levik_92@mail.ru

Yaroslavtseva Daria Aleksandrovna
postgraduate student, design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.518.3

Ярославцева, Д. А.

Пример внедрения интеллектуальных информационно-измерительных систем на объектах стартовых комплексов космодрома / Д. А. Ярославцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 24–31. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-4.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 681.586’326’773:53.088 DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-5

К. И. Бастрыгин

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА БЫСТРОПЕРЕМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВИБРАЦИИ

K. I. Bastrygin

METHOD FOR COMPENSATING THE ERROR OF A PIEZOELECTRIC SENSOR OF A RAPIDLY CHANGING PRESSURE FROM THE EFFECTS OF TEMPERATURE AND VIBRATION

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели.*** Актуальность данной темы подтверждается повышенными требованиями к точности, надежности, стабильности метрологических характеристик, устойчивости к внешним воздействиям и расширенными условиями эксплуатации датчиковой аппаратуры со стороны современных систем контроля и управления техническими и производственными сложными изделиями. Целью работы является поиск и выбор конструкторских решений для снижения дополнительной погрешности пьезоэлектрического датчика давления. ***Материалы и методы.*** Изложены особенности построения пьезоэлектрического датчика быстропеременного давления для работы в системах измерения и мониторинга сложных объектов. Рассмотрены факторы, определяющие погрешность измерения быстропеременного давления. Проведен анализ амплитудно-частотной характеристики датчика. ***Результаты.*** Приведены схемотехнические решения, позволяющие скорректировать влияние внешних воздействующих факторов на датчик и достоверность показания изделия. ***Выводы.*** По результатам исследования представлена структура датчика, позволяющая скомпенсировать дополнительную погрешность от воздействия внешних факторов (температура от 196 до 800 °С и вибрации в диапазоне частот от 31,5 до 5000 Гц с ускорением до 4500 м/с^2) до 0,5 %.

Abstract. ***Background.*** The relevance of this topic is confirmed by the increased requirements for accuracy, reliability, stability of metrological characteristics, resistance to external influences and extended operating conditions of sensor equipment from modern control and management systems for technical and production complex products. The aim of the work is to find and select design solutions to reduce the additional error of the piezoelectric pressure sensor. ***Matterials and methods.*** The peculiarities of the construction of a piezoelectric sensor for high-speed pressure are described for working in systems for measuring and monitoring com-

plex objects. The factors determining the measurement error of the fast-changing pressure are considered. The analysis of the amplitude-frequency characteristic of the sensor is carried out. *Results.* Schematic solutions allowing to correct the influence of external factors affecting the sensor and the reliability of the product indication are given. *Conclusions.* Based on the results of the study, the structure of the sensor is shown that allows to compensate for the additional error caused by external factors (temperature from 196 to 800 °C and vibrations in the frequency range from 31,5 to 5000 Hz with acceleration up to 4500 m/s^2) to 0,5 %.

Ключевые слова: датчик, быстропеременное давление, пьезоэлектрический узел, амплитудно-частотная характеристика, компенсация погрешности.

Key words: sensor, high-pressure pressure, piezoelectric unit, amplitude-frequency response, error compensation.

Повышение точности, надежности, стабильности метрологических характеристик, устойчивости к внешним воздействиям и расширение условий эксплуатации является необходимыми требованиями к датчиковой аппаратуре со стороны современных систем контроля и управления техническими и производственными сложными изделиями. В настоящее время возникла необходимость разработки датчика, предназначенного для измерения быстропеременных давлений при воздействии вибраций, ударов, линейных ускорений и широкого диапазона температур окружающей среды [1].

Выбор конструкторских и технологических решений пьезоэлектрического датчика давления осуществлялся из условия получения заданной точности измерений, высокой стабильности, надежности, чувствительности, помехоустойчивости при длительном ресурсе работы, минимизации влияния дестабилизирующих факторов, особенно температуры и вибрации, минимальной температурной погрешности, минимальных габаритов и массы, нормированного выходного сигнала [2].

Особое внимание уделялось специализированной электронной аппаратуре, обеспечивающей компенсацию погрешностей, вызванных влияющими внешними воздействующими факторами.

Конструктивно датчик представляет собой сборку двух блоков, а именно: первичного измерительного преобразователя (ПИП) и вторичного измерительного преобразователя (ВИП), соединенных между собой кабельной перемычкой [3].

Рассмотрим структуру сигнала, возникающего на выходе ПИП датчика быстропеременных давлений, находящегося в реальных условиях эксплуатации. Известно, что мгновенное значение выходного электрического напряжения $U_{\text{вых}}$ ПИП описывается соотношением

$$U_{\text{вых}} = PK_p(f) + aK_a(f), \quad (1)$$

где P, a – соответственно значения давления и виброускорения датчика быстропеременного давления, воздействующие на пьезоэлектрический чувствительный элемент (ПЧЭ) ПИП; $K_p(f)$ – коэффициент преобразования (чувствительность) по давлению; $K_a(f)$ – коэффициент преобразования по виброускорению.

Соответственно, измеряемое быстропеременное давление будет равно

$$P = \frac{U_{\text{вых}} - aK_a(f)}{K_p(f)} = \frac{U_{\text{вых}} - U_a}{K_p(f)}, \quad (2)$$

где $U_a = aK_a(f)$ – напряжение на выходе ПИП, обусловленное наличием виброускорения a, воздействующего на ПЧЭ.

Как видно из соотношения (2), погрешность измерения мгновенных значений быстропеременного давления определяется погрешностью измерения вибрационной составляющей и погрешностью определения чувствительности по давлению.

С целью минимизации первого фактора в конструкцию датчика быстропеременного давления введен специальный дополнительный пьезоэлектрический узел (компенсирующий ПЧЭ), на который воздействует только вибрационная составляющая сигнала. Возникающее на

выходе этого компенсирующего ПЧЭ электрическое напряжение вычитается (с помощью пассивного сумматора) из $U_{вых}$, что предположительно в соответствии с формулой (2) должно обеспечить компенсацию вибрационной составляющей погрешности. Однако из-за фазового сдвига реализованная таким образом компенсация является неполной, поскольку на практике невозможно обеспечить равенство коэффициентов преобразования рабочего ПЧЭ ПИП датчика и вспомогательного пьезоэлектрического узла, измеряющего виброускорение. Очевидно, что операцию суммирования необходимо реализовывать после нормирования вибрационной составляющей сигнала. Следовательно, датчик быстропеременного давления в тракте виброкомпенсации должен иметь активное электронное устройство, выравнивающее вибрационные составляющие сигналов на выходе рабочего и компенсирующего ПЧЭ [4].

Второй фактор, определяющий погрешность измерения быстропеременного давления по формуле (2), имеет несколько составляющих, основные из которых:

– отклонение чувствительности $K_p(f)$ от постоянной величины, обусловленное необходимостью измерений в широкой полосе частот, для которой резонансными свойствами датчика нельзя пренебречь;

– технологический разброс $K_p(f)$;

– зависимость $K_p(f)$ от времени и температуры.

Из представленных рассуждений следует, что для минимизации погрешностей измерения быстропеременного давления P в состав датчика необходимо ввести электронные узлы, реализующие следующие функции:

– компенсацию нелинейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ);

– компенсацию воздействия вибрации;

– компенсацию температурной зависимости чувствительности;

– коррекцию по амплитуде и частоте сигнала на выходе рабочего ПЧЭ;

– коррекцию по амплитуде и частоте сигнала на выходе дополнительного виброизмерительного узла (компенсирующего ПЧЭ);

– суммирование сигналов с рабочего и компенсирующего ПЧЭ;

– формирование на выходе датчика сигналов, соответствующих P и a.

Анализ амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) первичного преобразователя показывает, что она подобна АЧХ высокодобротного звена второго порядка фильтра нижних частот. Подобные звенья используются при построении фильтров Чебышева более высоких порядков.

Данный факт подсказывает способ коррекции АЧХ ПИП путем дополнения ее звеньями фильтра Чебышева в количестве и качестве, необходимом и достаточном для получения результирующей АЧХ с заданной неравномерностью. Такие звенья активных фильтров первого и второго порядка достаточно легко реализуются, и их теория хорошо разработана. Достаточно широко распространены и компьютерные программы синтеза таких фильтров. Некоторая сложность заключается в том, что все известные нам методики проводят расчет всего фильтра в целом по заданным характеристикам, а в нашем случае одно звено фильтра уже задано в виде АЧХ ПИП. Расчеты показывают, что суммарный порядок, а соответственно, и количество звеньев фильтра определяются, в первую очередь, добротностью ПЧЭ ПИП и заданной результирующей неравномерностью [5, 6].

Например, для компенсации АЧХ ПЧЭ с добротностью до трех единиц с неравномерностью 1 дБ в полосе до 0,7 F_p достаточно одного звена второго порядка. Увеличение добротности до десяти или снижение неравномерности до 0,3 дБ требует применения уже двух звеньев, второго порядка каждое. Это обстоятельство требует для реализации корректирующего устройства применять легко перестраиваемые электронные схемы, позволяющие быстро и легко формировать из них звенья с параметрами, требующимися для данного экземпляра ПЧЭ. Желательно обеспечить возможность программирования заданных характеристик в уже изготовленном устройстве.

В простейшем случае коррекция по амплитуде может реализовываться с помощью предварительных усилителей с управляемым коэффициентом передачи. Компенсация частотной зависимости $K_p(f)$ требует применения более сложных аппаратных средств, построение которых вытекает из анализа АЧХ ПИП датчика.

Известно, что чувствительность датчика существенно зависит от температуры. В то же время известно, что эта зависимость достаточно стабильна. Поэтому возможна компенсация температурной зависимости введением мультипликативной поправки на изменение чувствительности путем внесения соответствующей поправки, взятой из зависимости (графика, таблицы) указанной поправки от температуры. Таблица составляется при испытаниях ПЧЭ. Таким образом, для осуществления температурной компенсации необходимы наличие таблицы поправок, знание текущего значения температуры ПЧЭ и соответствующие аппаратно-программные средства [7].

Определенную трудность представляет получение информации о текущей температуре ПЧЭ ПИП датчика, так как обычно ПЧЭ специальными термоэлектрическими преобразователями не оснащаются. Этот факт заставляет искать иные пути для измерения температуры.

Поскольку ПЧЭ представляет собой пьезоэлектрический преобразователь, емкость которого, как известно, так же, как и чувствительность, существенно зависит от температуры. Это означает, что если знать эту зависимость, то можно установить зависимость чувствительности ПЧЭ в соответствии с его емкостью и таким образом получить таблицу поправок чувствительности по текущим значениям его емкости.

Компенсация воздействия вибрации возможна, как уже было отмечено выше, при наличии в составе ПИП компенсирующего ПЧЭ, вырабатывающего так же, как и рабочий ПЧЭ, пропорциональный вибрации сигнал (рис. 1). Обычно фаза компенсирующего сигнала противоположна рабочему для удобства его использования. Необходимо учитывать, что чувствительность и выходное сопротивление компенсационного канала ПИП как правило отличаются от рабочего.

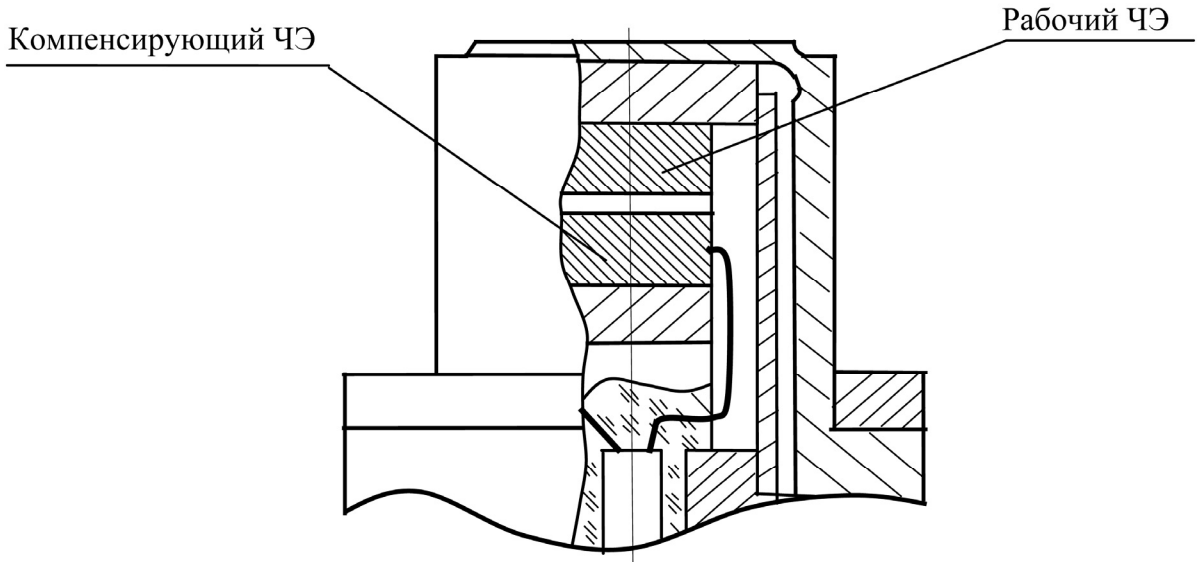


Рис. 1. Расположение рабочего и компенсирующего ЧЭ в корпусе первичного преобразователя

Следовательно, для осуществления компенсации воздействия вибрации модуль электронный должен, кроме усилителя рабочего канала, содержать еще и усилитель компенсационного канала с переменным коэффициентом передачи и сумматор.

Коэффициент передачи компенсационного канала должен быть таким, чтобы

$$M_в = K_р M_{вр} - M_{вк} K_к = 0, \quad (3)$$

где $M_в$ – чувствительность датчика к вибрации; $M_{вр}$ – чувствительность рабочего канала к вибрации; $M_{вк}$ – чувствительность компенсационного канала к вибрации; $K_р$ – коэффициент передачи усилителя рабочего канала; $K_к$ – коэффициент передачи усилителя компенсационного канала.

Для качественной компенсации требуется и обеспечение фазового соотношения между сигналами, для чего может потребоваться и фазовая коррекция.

Входящий в состав датчика ВИП обеспечивает одновременную выработку сигналов, соответствующих уровню быстропеременного давления и уровню вибрации. Конструктивно ВИП выполнено в виде выносного блока с разъемами, обеспечивающими подключение ПИП датчика, напряжения питания и снятие выходного сигнала. Выходной сигнал с ВИП передается по двухпроводной линии связи и соответствует интерфейсу связи RS485 [3].

Оценка массогабаритных параметров и удобств настройки и эксплуатации показывает, что наиболее перспективным является использование современных цифровых методов обработки информации и построение электронной части (микропроцессорного блока) ВИП, имеющего структуру, представленную на рис. 2.

Предварительные аналоговые усилители (ПУ) обеспечивают согласование высокоомных выходов пьезоэлектрических преобразователей датчика и входов аналого-цифровых преобразователей (АЦП) цифровой части микропроцессорного блока.

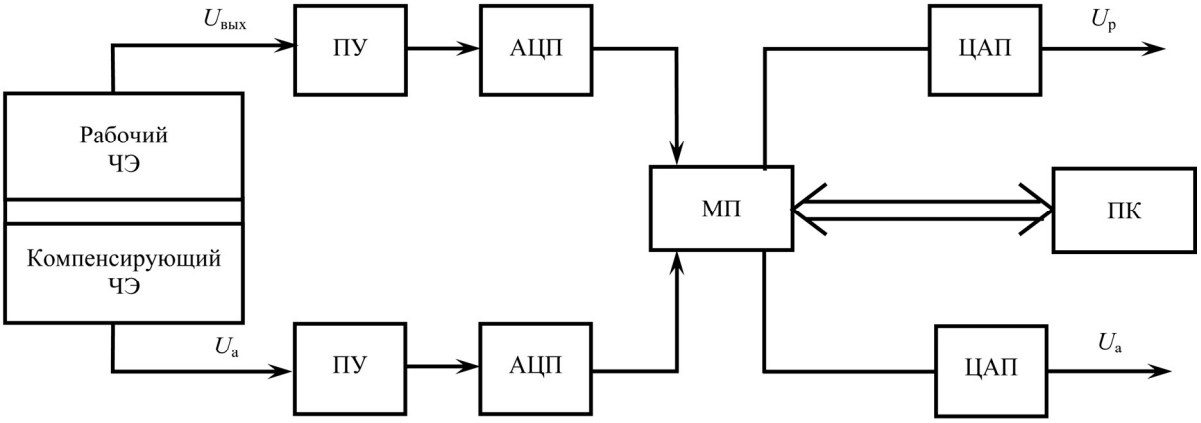


Рис. 2. Схема преобразователя датчика

Основные функции ВИП:

– прием, кодирование и ввод в процессор информации по основному рабочему и вспомогательному (вибрационному) каналам;

– ввод в процессор информации о конкретных величинах коэффициентов преобразования $K_a(f)$ по каждому каналу;

– компенсация температурной зависимости чувствительности;

– реализация функции разделения информации о величинах пульсации давления и виброускорения;

– формирование на выходе микропроцессорного блока аналоговых сигналов, пропорциональных величинам давления и ускорения;

– отладка микропроцессорного блока в диалоговом режиме.

Введение в состав разрабатываемого датчика измерительного преобразователя позволит компенсировать воздействие паразитных влияющих факторов и тем самым существенно повысить достоверность оценки измеряемой величины. Появляются возможности проведения предварительной обработки сигнала, проведения спектрального анализа, фильтрации и выдачи его в сеть в кодовом виде [8].

При воздействии вибрации разноименные сигналы с рабочей и компенсирующей секции пьезокерамического пакета обрабатываются микропроцессором и компенсируются.

Результирующий (скомпенсированный) сигнал от воздействия быстропеременного давления через токосъемники, контакты гермоввода и кабельную перемычку подается на вход нормализующего преобразователя (ВИП).

Представленная структура разрабатываемого датчика позволит скомпенсировать дополнительную погрешность от воздействия внешних факторов (температура от 196 до 800 °С и вибрации в диапазоне частот от 31,5 до 5000 Гц с ускорением до 4500 м/с^2) до 0,5 %, для сравнения: у датчиков, применяемых в составе измерительных систем сложных изделий в настоящий момент (ЛХ611АМ, Вт309 и т.д.), она доходит до 10 %.

Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Тенденции развития датчиковой аппаратуры и систем измерения, мониторинга, контроля и диагностики технически сложных объектов на ее основе / А. Г. Дмитриенко, В. И. Волчихин, А. В. Блинов, Е. А. Ломтев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 6–12.
2. Бастрыгин, К. И. К вопросу коррекции температурной погрешности в пьезоэлектрических датчиках давления / К. И. Бастрыгин, В. В. Кикот // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2. – С. 25–30.
3. Бастрыгин, К. И. Высокотемпературный пьезоэлектрический датчик пульсации давления / К. И. Бастрыгин // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 76–81.
4. Бастрыгин, К. И. Исследования температурной стабильности кристаллов для создания высокотемпературных пьезоэлектрических датчиков динамического давления / К. И. Бастрыгин, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2015. – № 11. – С. 56–59.
5. Каудман, М. Практическое руководство по расчетам схем в электронике : справ. : в 2 т. / М. Каудман, А. Г. Сидман : пер. с англ. ; под ред. Ф. Н. Покровского. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – Т. 2. – 288 с.
6. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хоровиц, Ул. Хилл. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Мир, 1993. – Т. 1. – 413 с.
7. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника : пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. – 12-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2017. – Т. 2. – 452 с.
8. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника : справочное руководство : пер. с нем / У. Титце, К. Шенк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.

Бастрыгин Кирилл Игоревич
начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: nik2@niifi.ru

Bastrygin Kirill Igorevich
head of laboratory,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 681.586’326’773:53.088

Бастрыгин, К. И.

Способ компенсации погрешности пьезоэлектрического датчика быстропеременного давления от воздействия температуры и вибрации / К. И. Бастрыгин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 32–37. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-5.

УДК 681.7.08 DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-6

Т. И. Мурашкина, А. В. Мотин, М. М. Чукарева, С. И. Торгашин

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УСКОРЕНИЯ

T. I. Murashkina, A. V. Motin, M. M. Chukareva, S. I. Torgashin

TECHNOLOGY OF FABRICATION OF SENSITIVE ELEMENT OF THE DIFFERENTIAL FIBER-OPTIC ACCELERATION SENSOR

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели.*** К современной информационно-измерительной технике, в частности к датчикам ускорений (линейных и вибрационных), применяющимся в ракетно-космической и авиационной отраслях, предъявляются строгие требования по метрологическим и эксплуатационным характеристикам, технологичности изготовления, массо-габаритным показателям, возможности работать в жесточайших условиях эксплуатации, например, в условиях сильных электромагнитных полей и достаточно часто искропожаро/взрывопожароопасности. Данным критериям в полной мере отвечают волоконно-оптические датчики ускорений дифференциального типа. В связи с этим разработка чувствительного элемента для данного типа датчиков является важной и актуальной на данный момент. ***Материалы и методы***. При разработке чувствительного элемента для дифференциального волоконно-оптического акселерометра использовались базовые принципы построения волоконно-оптических датчиков. Применены материалы, обеспечивающие прецизионность оптической и механической преобразующих систем, в частности сталь 36НХТЮ и кварцевое оптическое стекло. Применены способ изготовления упругого элемента методом анодно-катодного травления и несколько способов соединения упругого и оптического элемента в виде цилиндрической линзы. ***Результаты***. Приводятся результаты разработки конструктивно-технологических решений чувствительного элемента в виде пружины с двумя цилиндрическими линзами – базового элемента технических решений волоконно-оптических датчиков ускорений дифференциального типа, используемых в информационно-измерительной технике. ***Выводы***. Разработан чувствительный элемент волоконно-оптического датчика ускорения, реализующий дифференциальную схему преобразования оптического сигнала и предназначенный для использования в жестких условиях эксплуатации. Приведены технологические последовательности изготовления и варианты конструктивного исполнения чувствительного элемента, результаты изготовления такого чувствительного элемента для рабочего макетного образца датчика ускорения.

A b s t r a c t . ***Background***. To the modern information-measuring technique, in particular to sensors of accelerations (linear and vibration) used in the aerospace and aviation industries, strict requirements on metrological and operational characteristics, manufacturability, mass-dimensional indicators, the opportunity to work in the most severe operating conditions, for example in conditions of strong electromagnetic fields, and, often, intrinsically-fire-explosion and fire hazard. These criteria fully meet the fiber-optic sensors accelerations of the differential type. In this regard, development of a sensitive element of this type of sensors is important and relevant at the moment. ***Materials and methods***. When designing a sensing element for differential fiber-optic accelerometer has been used the basic principles of fiber-optic sensors. Applied materials, providing precision optical and mechanical conversion systems, in particular

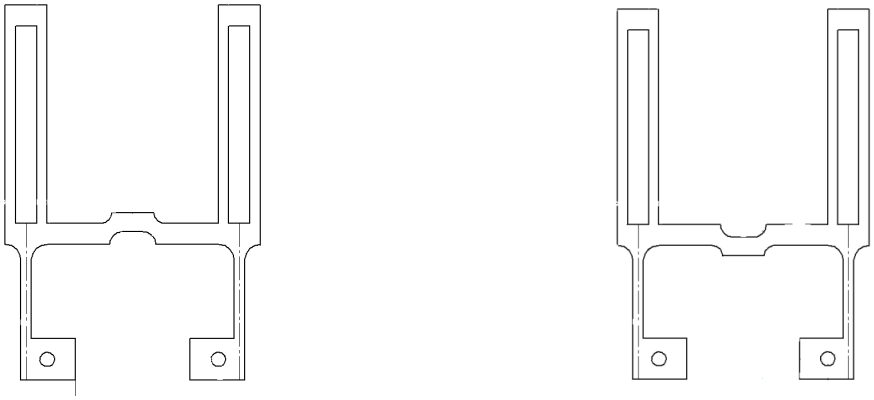
steel 36НХТЮ quartz and optical glass. Applied to a method of manufacturing the elastic element by the method of anodic-cathodic pickling and several ways of connecting the elastic and the optical element in the form of cylindrical lenses. ***Results.*** The results of the development of constructive-technological decisions of a sensitive element in the form of a spring with two cylindrical lenses – the basic element of technical solutions in fiber-optic sensors accelerations of the differential type used in information-measuring equipment. ***Conclusions***. Developed by the sensitive element of fiber-optic acceleration sensor that implements a differential conversion circuit of the optical signal and designed for use in harsh environments. The technological sequence of manufacture and construction of the sensing element, the results of manufacturing such a sensing element for the working of a model of the acceleration sensor.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик ускорения, чувствительный элемент, оптический модулирующий элемент.

Key words: fiber-optic acceleration sensor, sensing element, optical modulating element.

Важнейшей задачей при построении волоконно-оптических датчиков ускорения является обеспечение высоких метрологических характеристик при низких габаритно-массовых показателях.

В работах [1–4] рассмотрен разработанный авторами волоконно-оптический двухкоординатный акселерометр, предназначенный для измерения ускорения. Главной особенностью указанного датчика является применение двух чувствительных элементов в виде плоскопараллельных пружин Н-образной формы (рис. 1).



Упругий элемент оси *X* Упругий элемент оси *Y*

Рис. 1. Конструктивные схемы упругих Н-образных элементов

В двух верхних концах каждой пружины закреплены инерционные массы в виде оптических модулирующих элементов, представляющие собой прозрачные цилиндрические линзы. Ввиду особенностей расположения чувствительных элементов перпендикулярно друг другу они имеют пазы в средней части перемычки для беспрепятственного прохождения сквозь друг друга. Причем на перемычке упругого элемента оси *X* паз расположен по центру в нижней части, чтобы реализовать беспрепятственное перемещение упругого элемента оси *Y*, в свою очередь, на перемычке упругого элемента оси *Y* также выполнен паз, но выполнен он в верхней части. Нижние концы чувствительных элементов закреплены в четырех узлах юстировки и жестко с ними скреплены штифтом с развальцовкой. Узлы юстировки включают цилиндр, разделенный на две части для крепления упругого элемента. Использование упругого элемента разработанной конструкции дает существенные преимущества перед использованием одной плоскопараллельной пружины. Использование Н-образной пружины позволяет уменьшить габариты упругого элемента, а именно, длину и толщину пружины, что, несомненно, приведет к уменьшению габаритов самого датчика и возможности реализации улучшенной дифференци-

альной схемы преобразования оптического сигнала. Если использовать две плоскопараллельные пружины без перемычки, то существует вероятность отклонения их на неодинаковое расстояние при воздействии ускорения из-за погрешности и неточностей изготовления как самих пружин, так и линз. Внедрение перемычки компенсирует погрешности изготовления, улучшая синхронность перемещения оптических элементов, а также ограничивает перемещение линз в плоскости перпендикулярной колебательной, что, в свою очередь, ведет к улучшению метрологических характеристик.

Применение двух цилиндрических линз на одном чувствительном элементе обусловлено особенностью модуляции светового потока для реализации дифференциальной схемы преобразования и конструктивных особенностей расположения оптических волокон, при которых исключаются влияния изгибов оптических волокон и флуктуаций света на полезный сигнал. Линзы изготавливаются из прутка кварцевого стекла и обладают рядом ценных оптических свойств, необходимых для специальных, прецизионных оптических систем по сравнению с линзами из природного кварцевого стекла [5]. Размеры линз рассчитываются и выбираются исходя из конструктивных параметров акселерометра [6]. В конкретной конструкции используется заготовка цилиндрической линзы диаметром 3 мм и длиной 2 мм.

Технологические особенности изготовления чувствительного элемента

После выбора конструктивных параметров оптического элемента и расчета параметров упругого элемента переходят к этапу изготовления.

Для упругих элементов используется сталь 36НХТЮ.

Изготовление упругих элементов может проводиться двумя способами:

1) методом штамповки изготавливается плоскопараллельная пружина Н-образной конфигурации с заданными размерами.

После штамповки производится визуальный осмотр пружины на наличие дефектов. При наличии рисок, замятий и прочих механических повреждений пружина бракуется;

2) методом анодно-катодного травления.

На лист металла наносится защитная маска с размерами, равными размерам будущего упругого элемента. Затем деталь подключается к одному из контактов и опускается в раствор электролита. Травление производят током 2–3 А/дм^3. После травления деталь промывают, снимают защитный слой, проводят визуальный осмотр. В случае необходимости производят механическую доводку детали до заданных размеров. При наличии раковин и излишнего бокового подтравливания деталь бракуют.

На рис. 2 показан упругий элемент для рабочего макета датчика ускорения, полученный путем анодно-катодного травления (в данном случае необходимо доведение детали до требуемых размеров).

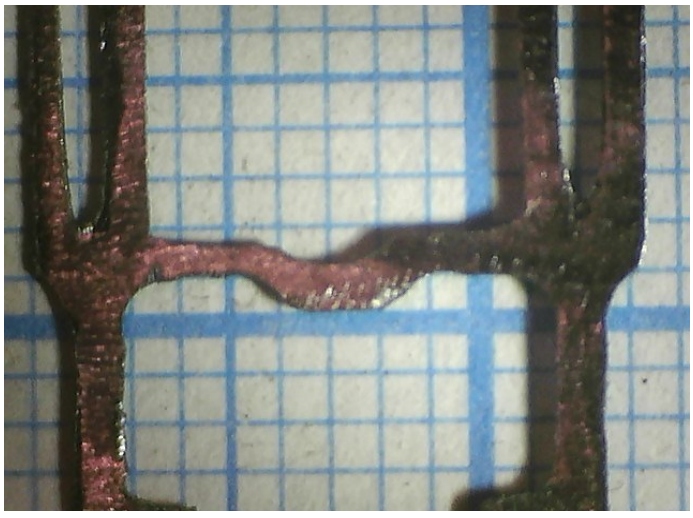


Рис. 2. Упругий элемент для рабочего макета датчика ускорения, полученный путем анодно-катодного травления

Сборку чувствительного элемента следует начать с соединения оптических элементов с упругими элементами. Перед сборкой чувствительного элемента необходимо убедиться, что на оптических и упругих элементах отсутствуют дефекты.

Верхние концы Н-образной пружины оборачивают вокруг цилиндрической линзы и сваривают точечно-импульсной сваркой (или пайкой с применением соответствующих паечных флюсов). Так как металл упругого элемента достаточно тонкий, необходимо подобрать значение сварочного тока и время импульса, чтобы добиться надежного соединения и предотвратить прогорание металла.

На одном упругом элементе необходимо разместить два оптических элемента. Очень важно в процессе сборки обеспечить соосность оптических элементов, чтобы предотвратить снижение чувствительности оптической системы. Для этих целей, а также для удобства подвода контактов сварочного аппарата используется специальная технологическая оправка.

Второй этап сборки чувствительного элемента – соединение упругого элемента с узлами юстировки. На нижние части чувствительного элемента с двух сторон устанавливаются половинки узлов юстировки, затем в отверстие устанавливается штифт и развальцовывается с двух сторон. Сделано это для удобства соединения нижних частей упругого элемента с узлом юстировки. Одновременно это снижает стоимость изготовления данных узлов, так как появляется возможность сделать узел юстировки, используя менее точное оборудование.

3D-модель и макетный образец чувствительного элемента, собранного данным методом пайки, приведены на рис. 3.

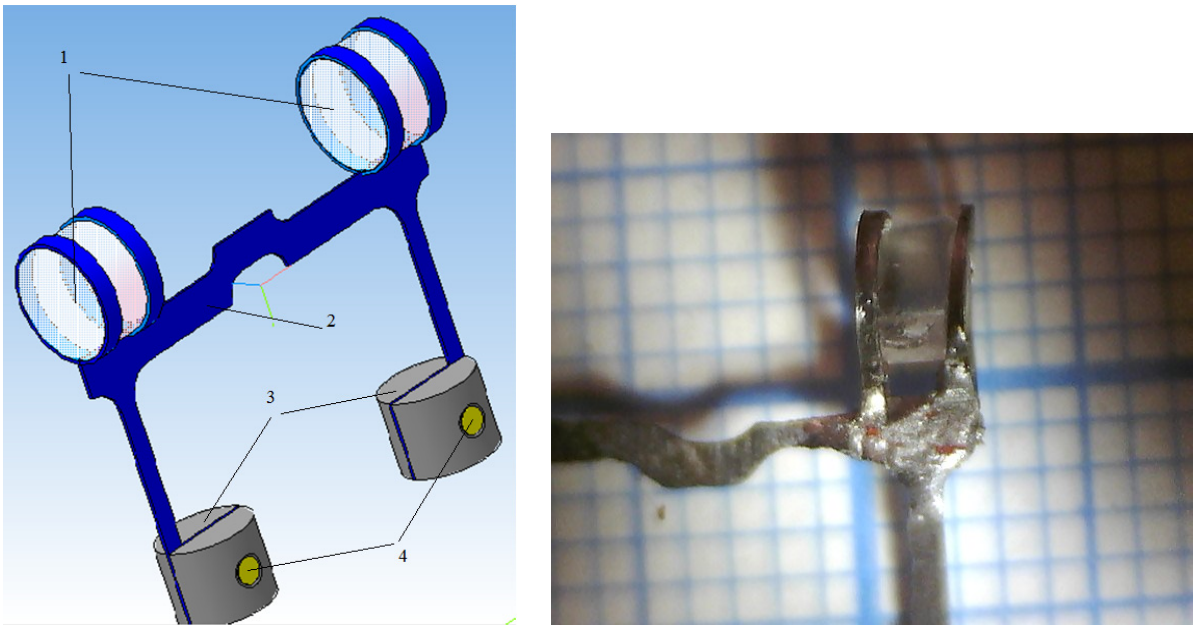


Рис. 3. 3D-модель и макетный образец чувствительного элемента:
1 – цилиндрические линзы; *2* – упругий элемент; *3* – узлы юстировки; *4* – штифты

Ввиду конструктивных особенностей датчика в зоне измерения задействованы только верхние части оптических элементов, поэтому может применяться альтернативный вариант чувствительного элемента, в котором крепление линзы на нем может осуществляться с применением синтетических (полимерных, эпоксидных) адгезивов.

Для изготовления такого варианта чувствительных элементов используется упрощенная конструкция упругого элемента без верхних концов. Упругие элементы изготавливаются теми же методами. Перед креплением линзы упругий элемент шлифуют, наносят обезжириватель и адгезив. Затем крепят специальные крепежные элементы линзы, выполненные из полимерного материала. После высыхания и проверки правильности установки крепежных элементов на них с помощью специального оптического адгезива закрепляются цилиндрические линзы (рис. 4).

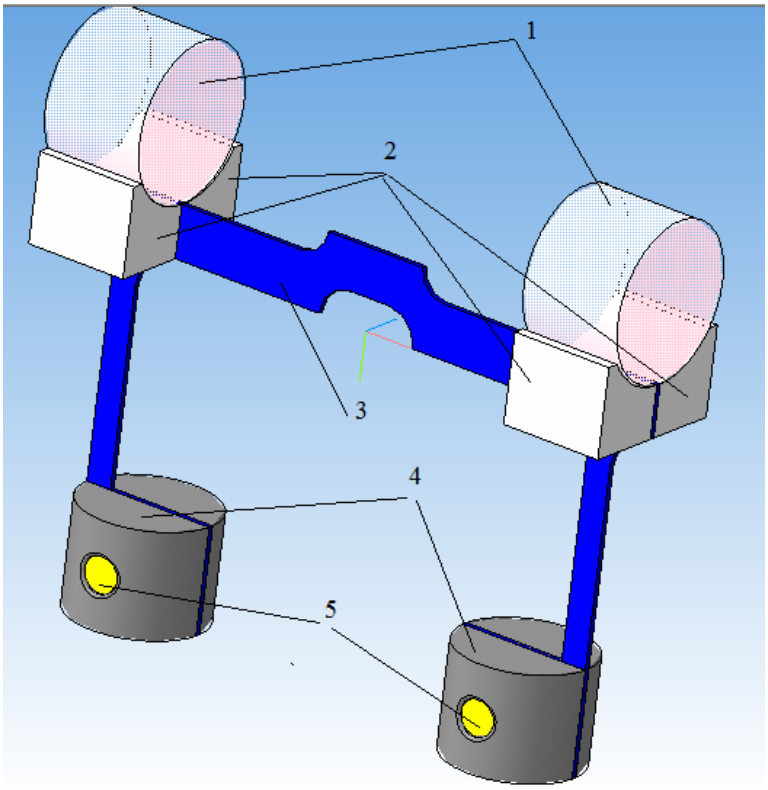


Рис. 4. Альтернативный вариант чувствительного элемента:
1 – цилиндрические линзы; *2* – полимерные крепежные элементы линз;
3 – упругий элемент; *4* – узлы юстировки; *5* – штифты

Технологический процесс крепления узлов юстировки такой же, как и в предыдущем варианте.

Альтернативный вариант чувствительного элемента имеет упрощенную технологию изготовления, однако имеет ограниченный температурный диапазон использования, обусловленный применением адгезивов.

Заключение

Разработанный чувствительный элемент волоконно-оптического датчика ускорения в полной мере реализует дифференциальную схему преобразования оптического сигнала и предназначен для использования в жестких условиях эксплуатации. Приведенные конструктивно-технологические последовательности изготовления и варианты исполнения чувствительного элемента позволяют изготовить чувствительный элемент с заданными характеристиками с высокой точностью.

Библиографический список

1. Мотин, А. В. Разработка волоконно-оптического акселерометра новой конструкции / А. В. Мотин, Т. И. Мурашкина // Студенческий научный форум : VII Междунар. студ. электрон. науч. конф. – 2015. – URL: http://www.scienceforum.ru/2015/15/12609
2. Мотин, А. В. Разработка конструкции волоконно-оптического акселерометра / А. В. Мотин, Т. И. Мурашкина // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации : сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. «Шляндинские чтения – 2014» (г. Пенза, 10–12 ноября 2014 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2014. – С. 106–109.
3. Мотин, А. В. Двухкоординатный волоконно-оптический акселерометр / А. В. Мотин, Т. И. Мурашкина // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне (г. Пенза, 19–21 мая 2015 г.). – Пенза, 2015. – С. 246–249.

4. Мотин, А. В. Разработка чувствительного элемента новой конструкции для волоконно-оптического акселерометра / А. В. Мотин, Т. И. Мурашкина // Студенческий научный форум : VII Междунар. студ. электрон. науч. конф. – 2015. – URL: www.scienceforum.ru/2015/1351/12715
5. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.
6. Мурашкина, Т. И. Mathematical simulation of the optical system of a fiber-optic measuring micro motion converter with a cylindrical lens modulation element / Т. И. Мурашкина, А. В. Мотин, Е. А. Бадеева // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). – 2016. – Vol. 803. – URL: http://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/803/1
7. Transformation of Signals in the Optic Systems of Differenzial-type Fiber-Optic Transducers / T. I. Murashkina, E. A. Badeeva, A. V. Motin [ent.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, iss. 13. – P. 2853–2857. – URL: https://elibrary.ru/
8. Технологические основы проектирования волоконно-оптического датчика ускорения / А. С. Щевелев, О. В. Юрова, Т. И. Мурашкина и [др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 8. – С. 39–43.
9. Волоконно-оптические датчики ускорений с цилиндрическими линзами, разработанные в НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева, А. В. Мотин и [др.] // Оптика – 2015 : сб. тр. IX Междунар. конф. молодых ученых и специалистов / под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С. А. Козлова. – СПб. : Университет ИТМО, 2015. – 717 с.
10. Некоторые способы снижения основной погрешности волоконно-оптических датчиков / Т. И. Мурашкина, Е. А. Бадеева, О. В. Юрова и [др.] // Труды Междунар. симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 2. – 387 с.

Мурашкина Татьяна Ивановна
доктор технических наук, профессор,
кафедра приборостроения,
директор НТЦ «Нанотехнологии
волоконно-оптических систем»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: timurashkina@mail.ru

Murashkina Tatiana Ivanovna
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of instrument engineering,
director of the STC «Nano technology
fiber-optic systems»,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Мотин Андрей Владимирович
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
e-mail: motin.andrey92@yandex.ru

Motin Andrey Vladimirovich
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Чукарева Мария Михайловна
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: marisavochkina@mail.ru

Chukareva Maria Mikhailovna
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Торгашин Сергей Иванович
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: rkap@pnzgu.ru

Torgashin Sergey Ivanovich
candidate of technical sciences,
head of syb-department of rocket-space
and aerospace instrumentation,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.7.08

Мурашкина, Т. И.

Технология изготовления чувствительного элемента дифференциального волоконно-оптического датчика ускорения / Т. И. Мурашкина, А. В. Мотин, М. М. Чукарева, С. И. Торгашин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 38–44. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-6.

УДК 681.2.083

DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-7

А. В. Глубоков, И. О. Тверитнев

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА БАЗЫ ДЛЯ ОТСЧЕТА ОТКЛОНЕНИЙ ОТ ПЛОСКОСТНОСТИ НА МЕТОДИЧЕСКУЮ ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

A. V. Glubokov, I. O. Tveritnev

INFLUENCE OF MEASUREMENT DATUM SELECTION ON METHODICAL MEASUREMENT ERROR

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели***. Объектом исследования является процесс измерения отклонений от плоскостности поверхностей координатным методом. Предметом исследования является методическая погрешность измерения, возникающая при обработке результатов измерений отклонений от плоскостности. При измерении отклонений формы методическая погрешность во многих случаях является доминирующей, поэтому ее исследование является актуальной задачей. Целью работы является определение предельных значений методической погрешности измерения отклонений от плоскостности, вызванной выбором базы для отсчета. ***Материалы и методы***. В качестве базы для отчета отклонений от плоскостности используются средняя и прилегающая плоскости. Для построения прилегающей плоскости используются как стандартные алгоритмы, так и алгоритмы, разработанные авторами. Разработано программное обеспечение, позволяющее реализовать все указанные алгоритмы и провести их сравнительный анализ. ***Результаты***. Проведены исследования методической погрешности измерения отклонений от плоскостности на основе экспериментальных данных и математического моделирования. Определены предельные значения методической погрешности измерения отклонений от плоскостности при использовании в качестве базы для отсчета средней и прилегающей плоскости. Выявлена зависимость между значением методической погрешности и характером расположения точек измерения. ***Выводы***. Проведенные исследования показали, что методическая погрешность, вызванная использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета вместо прилегающей плоскости, во многих случаях имеет значительную величину и приводит к завышению полученных значений отклонений от плоскостности, что необходимо учитывать при анализе результатов измерений.

A b s t r a c t. ***Background***. The paper considers flatness errors measurement by means of coordinate method. The methodical error of data processing is subject of investigation, because it is the most significant among other error components. The paper considers boundaries of error caused by measurement datum selection. ***Materials and methods***. Either least squares reference or minimum zone reference planes is used as measurement datum. In order to build the planes both standard and original algorithms are used. The authors have developed original software in order to realize the algorithms mentioned above and compare them. ***Results***. The paper studies the dependence of methodical error on datum selection based on experimental data and modeling. The error boundaries were determined for all data available. The dependence between error value and position of measuring points was determined. ***Conclusions***. The paper concludes the methodical error in case of least squares reference plane used as datum is significant is increases error measurement results. This should be taken into consideration during actual measurement.

Ключевые слова: отклонения формы, отклонения от плоскостности, методическая погрешность, координатно-измерительная машина.

Key words: deviations from form, deviations from flatness, methodical errors, coordinate-measurement machine.

В современной машиностроительной индустрии нашей страны и развитых в данном техническом аспекте зарубежных стран все большее внимание уделяется точности и надежности выпускаемых изделий в различных областях, таких так станкостроение, автомобилестроение, авиастроение [1–3]. Повышенное внимание к точностным параметрам изделий обусловлено зависимостью между точностью и функционально-эксплуатационными характеристиками изделий.

На данном этапе развития до сих пор остаются проблемы, связанные с обеспечением точности измерения размеров, отклонений формы и расположения поверхностей [4, 5]. Следует отметить, что часто погрешность средств измерения мала, а основное влияние оказывает методическая погрешность измерения. Одной из таких задач, где доминирующей является погрешность метода, является измерение отклонений от плоскостности.

Для измерения отклонений от плоскостности протяженных поверхностей широко применяются оптические и оптико-механические средства измерения (автоколлиматоры, интерферометры, зрительные трубы), различные виды уровней. Для деталей меньших размеров наиболее часто применяют координатно-измерительные машины (КИМ), обеспечивающие высокую производительность и точность измерения требуемых параметров деталей [6–8].

В прошлые десятилетия было разработано достаточное количество нормативной документации в области нормирования и измерения отклонений формы поверхностей [9, 10]. Разработанная документация содержала рекомендации по выбору методов и средств измерения, позволяющие уменьшить трудоемкость процесса обработки результатов измерения и влияющие на качество контроля отклонения от плоскостности исследуемого изделия. Существенным недостатком этих документов является их направленность на ручную обработку результатов измерений. Предложенные алгоритмы содержат существенные упрощения, которые могут вводить значительную методическую погрешность. Возникает необходимость обновления данных документов с учетом современных возможностей вычислительной техники.

Другой проблемой измерений отклонений формы на современном этапе является массовое использование универсальных средств измерений [11]. Наиболее востребованным становится координатный метод измерения, погрешность которого во многом определяется параметрами методики измерения и используемыми алгоритмами обработки результатов измерений. В программном обеспечении КИМ обычно применяют метод наименьших квадратов. Достоинством метода наименьших квадратов является понятный алгоритм определения неизвестных параметров по выборочным данным. Существенным недостатком использованного метода является зависимость методической погрешности от получаемых исходных данных [12].

Согласно нормативным документам базой для отчета отклонения от плоскостности является прилегающая плоскость, а не средняя плоскость, определенная по методу наименьших квадратов. В работе [13] проводилось изучения вопроса, связанного с методической погрешностью при координатном методе измерения отклонений от прямолинейности. Показано, что алгоритмы, используемые в программном обеспечении современных КИМ, вносят существенную методическую погрешность. Так, например, при использовании средней прямой в качестве базы для отсчета методическая погрешность может достигать 50 %.

Также для машиностроительных производств существенной является задача установления зависимости между производительностью и точностью измерения отклонения от плоскостности, т.е. определение таких значений производительности измерений, которые не приводят к существенному снижению точности измерения. Основным фактором, влияющим на эти параметры, является количество контрольных точек. Вопросы влияния числа контрольных точек на погрешность измерения прямолинейности исследованы в работе [14], в которой даны рекомендации по выбору оптимального количества точек при измерении отклонения от прямолинейности. Необходимо проведение аналогичных исследований при измерении отклоне-

ний от плоскостности, особенно учитывая тот факт, что количество контрольных точек значительно больше, чем при измерении отклонений от прямолинейности.

Основной целью данной работы является определение предельных значений методической погрешности измерения отклонений от плоскостности, вызванной выбором базы для отсчета, ее зависимостью от характера расположения точек на поверхности, и оценка влияния количества контрольных точек на эту погрешность.

В первой части исследования проводились измерения плоских поверхностей на координатно-измерительных машинах. В качестве объекта измерения использовались чугунные поверочные плиты размерами 250×250 мм и 400×400 мм, детали, полученные механической и аддитивной видами обработки. Количество продольных и поперечных сечений выбиралось в зависимости от вида и размеров деталей. Для некоторых деталей проведены измерения с различным количеством продольных и поперечных сечений. Обработка результатов измерений проводилась двумя способами: с помощью программного обеспечения КИМ (средняя плоскость, определенная по методу наименьших квадратов) и с помощью специального программного обеспечения, разработанного автором (прилегающая плоскость) [15]. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований значений отклонений от плоскостности

Деталь	Количество продольных и поперечных сечений	Отклонение от прилегающей плоскости, мкм	Отклонение от средней плоскости, мкм	Методическая погрешность, %
Плита 1	9 × 9	7,8	8,8	12,8
Плита 1	5 × 5	6,9	7,4	7,2
Плита 2	5 × 5	6,3	6,9	9,5
Плита 3	11 × 11	10,8	11,5	6,4
Деталь 1	5 × 9	23,2	24,8	6,9
Деталь 2	5 × 9	17,5	19,2	9,7
Деталь 3	4 × 4	8,5	9,2	8,2
Деталь 3	7 × 7	8,6	9,4	9,3
Деталь 4	4 × 4	7,6	8,8	15,8
Деталь 4	7 × 7	11,0	11,8	7,2

Среднее значение методической погрешности, вызванной использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета, составило 9,3 %. Минимальное значение погрешности равно 6,4 %.

Во второй части исследования проводилось математическое моделирование поверхностей с различным количеством продольных и поперечных сечений. Обработка результатов измерений проводилась также двумя способами: относительно средней плоскости и относительно прилегающей плоскости. В табл. 2 приведены значения методической погрешности измерения, вызванной выбором базы для отсчета отклонений.

Таблица 2

Значения методической погрешности при разном количестве сечений

Методическая погрешность	Количество продольных и поперечных сечений					
	5	7	9	11	13	15
Среднее значение погрешности, %	10,3	9,1	5,9	6,1	5,0	4,1
Наибольшее значение погрешности, %	28,2	23,6	19,0	15,0	18,4	9,2
Наименьшее значение погрешности, %	1,0	2,2	0,1	0,8	0,6	0,1

По результатам моделирования можно сделать вывод об уменьшении методической погрешности при увеличении количества продольных и поперечных сечений. Эта тенденция действительно наблюдается на практике, но необходимо сделать одно важное замечание. В данном случае при моделировании координаты точек задавались случайным образом.

При достаточно большом количестве сечений характер поверхности регулярно приобретал вид, который редко можно встретить на практике, а именно: для таких поверхностей наблюдается значительное снижение методической погрешности. Поэтому для практики более интересны результаты моделирования при пяти и семи сечениях, так как они приближены к реальным измерительным задачам. При этом увеличение продольных и поперечных сечений посредством добавления промежуточных точек к результатам моделирования по пяти и семи сечениям практически не приводит к изменению значений методической погрешности. На основании моделирования можно сделать вывод о том, что методическая погрешность, вызванная использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета, присутствует всегда и в среднем составляет 10 %. Значения погрешности менее 5 % встречаются крайне редко.

В третьей части исследования делалась попытка определить максимальные значения методической погрешности, вызванной использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета, и характер расположения точек поверхностей соответствующих максимальным значениям. Для решения поставленной задачи подход осуществлялся двумя способами.

Первоначально выбирались результаты математического моделирования поверхностей, которые соответствуют наибольшим значениям методической погрешности. Проводился анализ характера расположения точек на поверхности, и решалась задача максимизации значения погрешности путем изменения координат характерных точек. Результаты показывают, что в предельных случаях значение погрешности достигало 35–40 %. При этом нельзя говорить о выявлении определенного типа поверхности, у которой наблюдается максимальное значение погрешности, но, как правило, присутствуют резкие изменения координат точек в крайних сечениях. На практике подобные поверхности регулярно встречаются. Например, поверочные плиты часто имеют существенные занижения в угловых точках поверхности.

Также для выявления характера расположения точек поверхностей, соответствующих максимальным значениям методической погрешности, были использованы результаты аналогичных исследований для отклонений от прямолинейности [13]. Наибольшая погрешность возникает при наличии периодической составляющей (рис. 1).

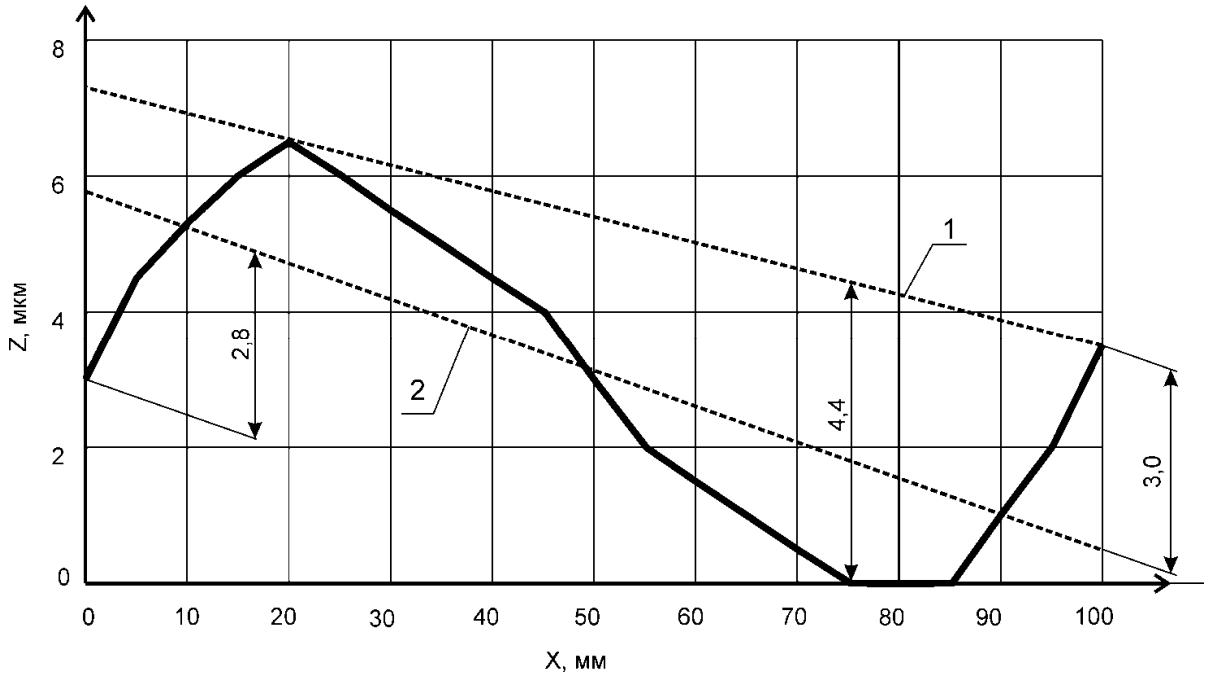


Рис. 1. Пример профиля с предельными значениями методической погрешности:
1 – прилегающая прямая; *2* – средняя прямая

Для профиля, изображенного на рис. 1, методическая погрешность при использовании средней прямой равна 32 %. В предельных случаях значение методической погрешности для средней прямой может достигать 50 %. При построении поверхности, у которой во всех про-

дольных сечениях профиль будет аналогичным профилю, приведенному на рис. 1, значение методической погрешности будет таким же, т.е. в предельных случаях будет достигать 50 %.

На основании анализа были смоделированы поверхности, которые могут реально встречаться на практике, с наибольшим значением методической погрешности, вызванной выбором базы для отсчета. Пример такой поверхности приведен на рис. 2.

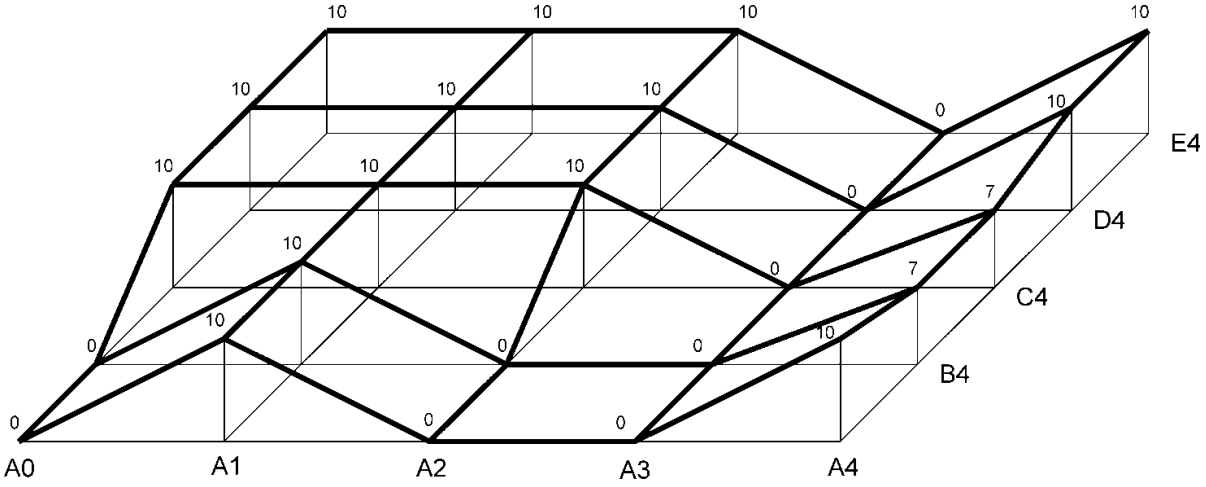


Рис. 2. Пример поверхности с предельными значениями методической погрешности

Методическая погрешность при использовании средней плоскости в качестве базы для отсчета для поверхности, изображенной на рис. 2, составляет 55 %.

Проведенные исследования показали, что методическая погрешность, вызванная использованием средней плоскости в качестве базы для отсчета вместо прилегающей плоскости, во многих случаях имеет значительную величину. Предельные значения данной погрешности превышают 50 %. При координатных методах измерения для обработки результатов в большинстве случаев используется программное обеспечение, поставляемое производителями измерительного оборудования, которое ориентировано на построение средней плоскости по методу наименьших квадратов. Это приводит к завышению полученных значений отклонений от плоскостности, что необходимо учитывать при анализе результатов измерений.

Работы проведены на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки РФ. Соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004.

Библиографический список

1. Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении / С. Н. Григорьев, В. И. Телешевский, А. В. Глубоков, С. Е. Педь, С. В. Глубокова // Измерительная техника. – 2012. – № 5. – С. 27–29.
2. Григорьев, С. Н. Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства / С. Н. Григорьев, Д. А. Мастеренко, В. И. Телешевский, П. Н. Емельянов // Измерительная техника. – 2012. – № 11. – С. 56–59.
3. Григорьев, С. Н. Развитие пространственной метрологии для обеспечения контроля сложных поверхностей в машиностроении / С. Н. Григорьев, С. Г. Конов // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 12. – С. 9–13.
4. Телешевский, В. И. Лазерная измерительная информационная система для повышения точности многокоординатных станков с ЧПУ / В. И. Телешевский, В. А. Соколов // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 4. – С. 8–10.
5. Телешевский, В. И. Повышение точности измерений линейно-угловых размеров изделий в интеллектуальной компьютерной микроскопии / В. И. Телешевский, А. В. Шулепов, Е. М. Роздина // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 4. – С. 35–38.
6. Разработка модельного ряда координатно-измерительных машин / Д. А. Мастеренко, П. Н. Емельянов, М. Г. Ковальский, А. Ю. Байковский, С. Ю. Алабин // Измерительная техника. – 2013. – № 12. – С. 23–27.

7. Емельянов, П. Н. Разработка эталонной координатно-измерительной машины с ЧПУ / П. Н. Емельянов, С. Е. Педь, И. Е. Холин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2012. – Т. 10, № 8. – С. 68–73.
8. Конов, С. Г. Разработка координатно-измерительной машины контактного типа на базе фотограмметрической системы / С. Г. Конов // Вестник МГТУ Станкин. – 2010. – № 2. – С. 119–121.
9. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении. Контроль деталей : справочное издание. – М. : Изд-во стандартов, 1989.
10. МИ 2007-89. ГСИ. Плиты поверочные и разметочные. Методика поверки.
11. Глубоков, А. В. Анализ методик измерения отклонений формы координатным методом / А. В. Глубоков // Вестник МГТУ Станкин. – 2017. – № 1. – С. 72–77.
12. Педь, С. Е. Исследование методической погрешности координатных измерений геометрических параметров деталей машин / С. Е. Педь // Измерительная техника. – 2014. – № 3. – С. 28–32.
13. Глубоков, А. В. Исследование методической погрешности измерения отклонений от прямолинейности / А. В. Глубоков, С. Е. Педь // Вестник МГТУ Станкин. – 2016. – № 2. – С. 71–75.
14. Глубоков, А. В. Влияние числа контрольных точек на погрешность измерения отклонений от прямолинейности / А. В. Глубоков, С. Е. Педь, С. В. Глубокова // Измерительная техника. – 2017. – № 2. – С. 24–27.
15. Телешевский, В. И. Компьютеризированная измерительная информационная система для контроля отклонений плоскостности на базе электронных уровней / В. И. Телешевский, А. В. Глубоков // Измерительная техника. – 2004. – № 11. – С. 15–18.

Глубоков Александр Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра измерительных
информационных систем и технологий,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
(Россия, г. Москва, Вадковский пер.,1)
E-mail: al-glubokov@yandex.ru

Glubokov Alexandr Vladimirovich
candidate of technical sciences, associate professor
sub-department of measuring
information systems and technologies,
Moscow State Technological University «STANKIN»
(1 Vadkovsky per., Moscow, Russia)

Тверитнев Илья Олегович
аспирант,
Московский государственный технологический
университет «СТАНКИН»
(Россия, г. Москва, Вадковский пер.,1)
E-mail: il.rabota2017@yandex.ru

Tveritnev Ilya Olegovich
postgraduate student,
Moscow State Technological University «STANKIN»
(1 Vadkovsky per., Moscow, Russia)

УДК 681.2.083

Глубоков, А. В.

Влияние выбора базы для отсчета отклонений от плоскостности на методическую погрешность измерения / А. В. Глубоков, И. О. Тверитнев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 45–50. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-7.

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 551.463

DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-8

Р. А. Эминов, М. М. Исмаилов, Х. Г. Асадов, К. Х. Исмаилов

МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ШУМОВОЙ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОЙ МОРСКОЙ ВОДЫ

R. A. Eminov, M. M. Ismailov, Kh. G. Asadov, K. Kh. Ismailov

METHOD FOR DECREASE OF IMPACT OF NOISY HYPER SPECTRAL CHARACTERISTICS OF REFLECTION OF POLLUTED SEA WATER

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели***. Высокая степень загрязненности морских вод в регионах морской нефтедобычи диктует необходимость проведения постоянного экологического контроля состояния моря. Контроль состояния морской воды осуществляется с помощью бортовой спектрорадиометрической аппаратуры, установленной на борту носителей, а для анализа полученных гиперспектральных данных широко используются методы производного анализа. При этом учитывается, что первая производная выделяет не только часть шумов, но и специфические спектральные черты изучаемого объекта. ***Материалы и методы***. Предложен метод, позволяющий оптимальным образом проводить предобработку гиперспектрального сигнала с помощью первой производной в случае преобладания в исходном измерительном сигнале шумовых составляющих. ***Результаты***. Преимущество предлагаемого метода заключается в возможности определения функции представления первой производной φ на основе вычисленной исходной спектральной характеристики оптимальной в смысле достижения экстремума условного информационного контента гиперспектральных данных. ***Выводы***. Предлагаемый метод может быть использован в технике дистанционного зондирования состояния морских вод для уменьшения влияния шумовой состовляющей гиперспектральных данных, получаемых с применением гиперспектральной аппаратуры.

A b s t r a c t. ***Background***. The high livel of pollution of sea waters in zones of sea oil production necessitates the carrying out of continual ecological control of sea waters condition. The control of sea waters condition is carried out by onboard spectroradiometric instruments installed on the board of carriers and for analysis of derived data the methods of derivative analysis is broadly used. In this method the feature taken into account is that the first derivative stresses out not only the part of noises, but also the specific spectral features of studied object. ***Materials and methods***. The method making it possible to carry out the preprocessing of hyper spectral signal using the first derivative in condition ühere the noisy components of the initial measuring signal is prevalent has been suggested. ***Results***. The pecularity of suggested method is that it make possible to define the function of representation of first derivative on the basis of

computed initial spectral characteristics which is optimum on criterion achieving the extremum by conditional information content of hyperspectral data. ***Conclusions***. The suggested method could be used in the technics of remote sensing of sea water condition to decrease the effect of noisy component of hyper spectral data obtained using the hyper spectral instruments.

Ключевые слова: гиперспектрометр, информация, производная характеристика, шумовые сигналы, дистанционное зондирование.

Key words: hyper spectrometer, information, derivative characteristic, noisy signal, remote sensing.

Хорошо известно, что морские воды в регионах морской нефтедобычи значительно загрязнены углеводородами, что диктует необходимость проведения постоянного контроля состояния поверхностного слоя моря. Дистанционный контроль состояния морской воды может быть осуществлен с помощью спектрорадиометрической аппаратуры, установленной на борту носителей. При этом для анализа гиперспектральных данных, полученных из измерителей, широко используются методы производного анализа. Как отмечено в работе [1], спектральные производные характеризуют форму спектра и поэтому могут быть использованы для выявлений спектральных свойств и деталей. Производная первого порядка спектра L(λ) определяется как

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} \approx \frac{L(\lambda_j) - L(\lambda_i)}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

где $\Delta\lambda = \lambda_j - \lambda_i$; $\lambda_j > \lambda_i$.

Вторая производная определяется как

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \lambda^2} \approx \frac{L(\lambda_k) - 2L(\lambda_j) + L(\lambda_i)}{\Delta\lambda^2}, \quad (2)$$

где $\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_j$; $\lambda_k > \lambda_j > \lambda_i$.

Как указывается в работе [2], анализ спектральных сигнатур гиперспектральных изображений в основном используется для классификации земельного покрытия. При этом производные спектральной характеристики наименее чувствительны к изменению освещенности объекта в дистанционном зондировании.

Согласно работе [3], использование методов производной спектроскопии может усилить абсорбционные свойства отражательного спектра. При том появляется возможность проведения как качественного, так и количественного анализа.

Как отмечается в работе [4], правильная идентификация сигнатурных диапазонов длин волн важна не только для геопространственной характеризации специфических свойств объекта исследования, но и для проведения предобработки гиперспектральных данных.

Согласно работе [4] сигнатурные диапазоны длин волн могут быть выделены с помощью двух фундаментальных групп методов:

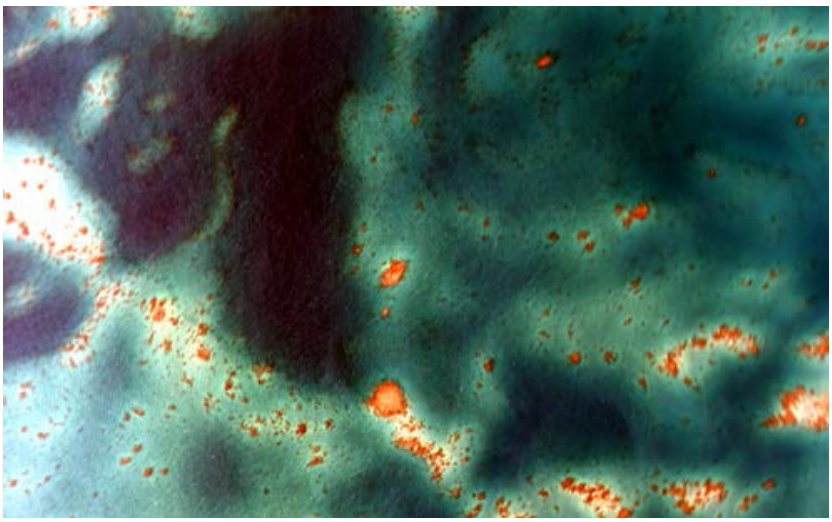
а) необучаемые методы;

б) обучаемые методы.

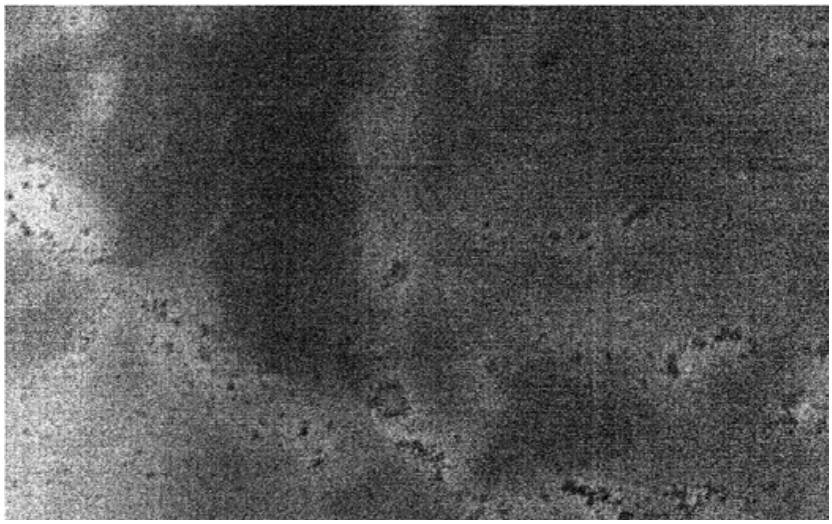
Необучаемые методы не зависят от сферы их применения и включают такие способы, как измерение информационной энтропии и метод производных. Обучаемые методы используют дополнительные базовые данные и включают такие способы, как метод главных компонент, метод искусственный нейронных сетей и др. Следовательно, данные методы не требуют предварительной обработки изображений.

Как отмечается в работе [5], производные спектральной характеристики позволяют удалить как аддитивные, так и мультипликативные воздействия на спектр. Известны такие методы вычисления производных, как метод Норриса – Уильямса, метод Савитского – Голея, комбинированные методы [5].

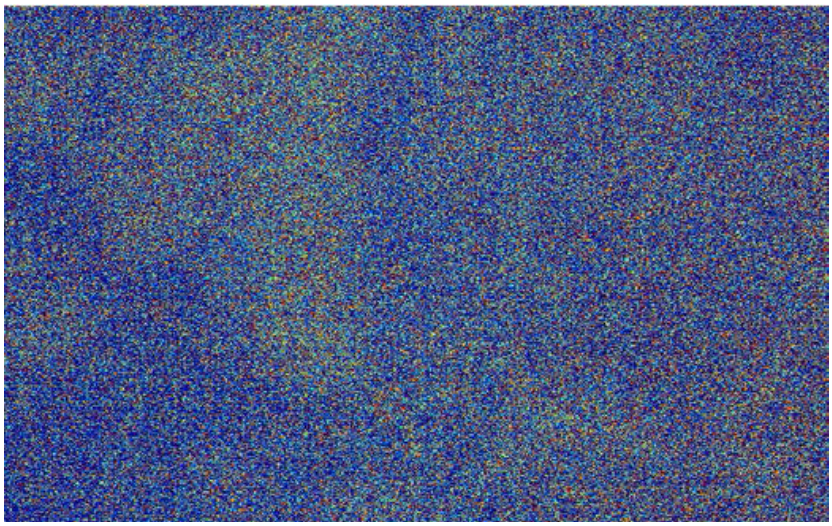
В качестве примера на рис. 1,*а–в* приведены изображения Красного моря, полученные с помощью «SpecTIR».



а)



б)



в)

Рис. 1. Изображения Красного моря: *а* – изображение из трех длин волн (640, 551 и 461 нм);
б – изображение первой производной между каналами 3 и 4;
в – изображение второй производной на длине волны 545 нм

Как видно из изображений, приведенных на рис. 1,*а–в*, первая производная показывает не только часть шумов, но и специфические спектральные черты изучаемого объекта. Такое свойство первой производной также отмечается в работе [6]. Следовательно, должен быть выработан метод, позволяющий оптимальным образом проводить предобработку гиперспектрального сигнала с помощью первой производной. Далее в настоящей статье предлагается метод оптимальной предобработки гиперспектральных данных, включающий следующие положения:

1) формирование информационного критерия M_1 – условного информационного контента гиперспектральных данных, определяемого как

$$M_1 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k_1(\lambda - \lambda_1)\log_2\left[L(\lambda)k_2\right]d\lambda; \tag{3}$$

2) формирование первой производной спектральной характеристики и функции ее представления φ

$$\phi = \phi[L'(\lambda)], \tag{4}$$

где $L'(\lambda)$ – первая производная спектра.

С учетом выражений (3) и (4) получаем

$$M_2 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k_1(\lambda - \lambda_1)\log_2\left[k_2(L(\lambda) + \phi[L'(\lambda)])\right]d\lambda, \tag{5}$$

где $k_1 = \text{const} = \Delta\lambda$; λ_1, λ_2 – границы интегрирования в (3) и (5); $k_2 = \text{const} = \Delta L$.

Отметим, что интегранты в функционалах (3) и (5) сформированы на базе известного определения количества информации

$$M_0 = \frac{\lambda - \lambda_1}{\Delta\lambda}\log_2\frac{L(\lambda)}{\Delta L} \tag{6}$$

для случая $\frac{L(\lambda)}{\Delta L} >> 1$;

3) нахождение при исходно заданной функции φ оптимальный функций $L(\lambda)$ и $L'(\lambda)$, при которых M_2 достиг бы минимума, т.е. ставится задача нахождения такой функции $L(\lambda)$, при функции представления φ которой прирост информативности из-за шумов был бы минимальным. В качестве примера рассмотрим задачу определения оптимальной функции $L(\lambda)$ при функции φ в виде возведения в квадрат, т.е. будем рассматривать функционал

$$M_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} k_1(\lambda - \lambda_1)\log_2\left[k_2(L(\lambda) + L'(\lambda)^2)\right]d\lambda. \tag{7}$$

Хорошо известно, что решение оптимизационной задачи (7) должно удовлетворить условию уравнения Эйлера – Лагранжа, т.е. уравнения [7]

$$\frac{\partial F}{\partial L(\lambda)} - \frac{dF}{d\lambda}\left(\frac{\partial F}{\partial L'(\lambda)}\right) = 0. \tag{8}$$

Из выражений (7) и (8) получим

$$\frac{k_1(\lambda - \lambda_1)k_2}{k_2(L(\lambda) + L'(\lambda)^2)\ln 2} - \frac{dF}{d\lambda}\left(\frac{2k_1(\lambda - \lambda_1)k_2L'(\lambda)}{(L(\lambda) + L'(\lambda)^2)\ln 2}\right) = 0. \tag{9}$$

Из выражения (9) находим

$$(\lambda - \lambda_1) - 2k_2L'(\lambda) = 0. \tag{10}$$

Из выражения (10) имеем

$$L'(\lambda) = \frac{\lambda - \lambda_1}{2k_2}. \quad (11)$$

Дифференциальное уравнение (11) имеет решение

$$L(\lambda) = \frac{\lambda^2}{4k_2} - \frac{\lambda\lambda_1}{2k_2}. \quad (12)$$

Исследуем (12) на экстремум от λ

$$\frac{dL(\lambda)}{d\lambda} = \frac{2\lambda}{4k_2} - \frac{\lambda_1}{2k_2} = 0.$$

Следовательно, при $\lambda_1 = \lambda$, $L(\lambda)$ достигает минимума, где $\frac{dL(\lambda)}{d\lambda} = 0$.

Практическая польза предложенного метода анализа гиперспектральных данных заключается в возможности исходного произвольного выбора функции представления первой производной φ и однозначного вычисления функции $L(\lambda)$, оптимального в смысле минимума условного информационного контента гиперспектральных данных. Предлагаемый метод может быть использован в технике дистанционного зондирования состояния морских вод для минимизации влияния шумовой состовляющей гиперспектральных данных, получаемых с применением гиперспектральной аппаратуры.

Библиографический список

1. Tsai, F. A derivative aided hyperspectral image analysis system for land cover classification / F. Tsai, W. D. Philpot // IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing. – 2002. – Vol. 40, № 2. – P. 416–424.
2. Hyperspectral image classification of grass species in northeast Japan / S. T. Monteiro, K. Uto, Y. Kosugi, K. Oda, Y. Lino, G. Saito // IGARSS. – 2008. – P. 399–402.
3. Derivative analysis of absorption features in hyperspectral remote sensing data of carbonate sediments / E. M. Louchard, R. P. Reid, C. F. Stephens, C. O. Davis, R. A. Leathers, T. V. Dowles, R. Maffione // Optics Express. – 2002. – Vol. 10, № 26. – P. 1574–1584.
4. Bajwa, S. G. Hyperspectral image Data, Mining for Band Selection in Agricultural Applications / S. G. Bajwa, P. Bajcsy, P. Groves, L. F. Tian // Transactions of the ASAE. – 2004. – Vol. 47(3). – P. 895–907.
5. Rinnan, A. Review of the most common pre – processing techniques for near – infrared spectra / A. Rinnan, F. Berg, S. B. Engelsen // Trends in Analytical Chemistry. – 2009. – Vol. 28, № 10. – P. 1201–1222.
6. Cerra, D. Unmixing-based denoising as a pre-processing step for coral reef analysis / D. Cerra, D. Traganos, P. Gege, P. Reinartz // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Hannover Workshop. – Hannover, Germany, 2017. – Vol. XLII-1/W1.
7. Эльсгольц, Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Е. Эльсгольц. – М. : Наука, 1974. – С. 434.

Эминов Рамиз Ахмед оглы
кандидат технических наук, доцент,
кафедра транспортировки и хранения нефти и газа,
Азербайджанский государственный университет
нефти и промышленности
(Азербайджан, г. Баку, пр. Азадлыг, 20)
E-mail: Eminov.ramiz@mail.ru

Eminov Ramiz Akhmed ogly
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of transportation
and storage of oil and gas,
Azerbaijan State University of Oil and Industry
(20 Azadlig avenue, Baku, Azerbaijan)

Исмаилов Магеррам Магомед оглы
аспирант,
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
(Азербайджан, г. Баку, пр. Азадлыг, 20)
E-mail: ismailovmm@mail.ru

Ismailov Magerram Magomed ogly
postgraduate student,
Azerbaijan State University of Oil and Industry
(20 Azadlig avenue, Baku, Azerbaijan)

Асадов Хикмет Гамид оглы
доктор технических наук, профессор,
начальник отдела НИИ Аэрокосмической информатики,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджан, г. Баку, ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: asadzade@rambler.ru

Asadov Hikmat Hamid oglu
doctor of technical sciences, professor,
head of department of research institute of aerospace informatics,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundov street, Baku, Azerbaijan)

Исмаилов Камал Хейраддин оглы
доктор технических наук, доцент,
Национальная академия авиации,
(Азербайджан, г. Баку, пос. Бина, 25-й км)
E-mail: kamal.ismaylov@mail.ru

Ismailov Kamal Kheyraddin oglu
doctor of technical sciences, associate professor,
National Academy of Aviation
(25-th km, Bina, Baku, Azerbaijan)

УДК 551.463
Эминов, Р. А.
Метод уменьшения влияния шумовой гиперспектральной характеристики отражения загрязненной морской воды / Р. А. Эминов, М. М. Исмаилов, Х. Г. Асадов, К. Х. Исмаилов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 51–56. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-8.

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 681.51:616-77

DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-9

Г. А. Солодимова, А. Н. Спиркин

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА БИОНИЧЕСКОГО ПРОТЕЗА НИЖНЕЙ КОНЕЧНОСТИ

G. A. Solodimova, A. N. Spirkin

THE INFORMATION-MEASURING SYSTEM BIONIC PROSTHESIS OF THE LOWER LIMB

Аннотация. ***Актуальность и цели.*** Объектом исследования являются бионические протезы нижних конечностей, максимально приближенные по конструкции к ампутированной конечности, для управления которыми используются биоэлектрические сигналы, возникающие в мышечных клетках и считываемые с мышц культи. Предметом исследования являются методы и алгоритмы управления протезом нижней конечности. Целью работы является разработка информационно-измерительной системы для управления бионическими протезами нижних конечностей, позволяющей распознавать сигналы мышечной активности и адаптироваться под конкретного пациента. ***Материалы и методы.*** Для решения поставленных задач в работе использовались методы структурного и функционального анализа, основных положений теории автоматического управления. ***Результаты.*** Предложена структурная схема системы управления бионическим протезом, отличающаяся простотой настройки, повышенной надежностью, удобством использования. ***Выводы.*** Использование предложенной системы в отечественных протезах позволит максимально заменить утраченную в результате ампутации конечность при значительно меньших по сравнению с зарубежными образцами затратах.

Abstract. ***Background.*** The object of the study are bionic prostheses of the lower limbs, as close to the design as possible to the amputated limb, for the control of which bioelectric signals appearing in muscle cells and read from the stump muscles are used. The subject of the study are methods and algorithms for controlling the prosthesis of the lower limb. The aim of the work is the development of an information and measurement system for the control of bionic prostheses of the lower extremities, which makes it possible to recognize the signals of muscle activity and to adapt to the specific patient. ***Materials and methods.*** To solve the set tasks, the methods of structural and functional analysis, the main provisions of the theory of automatic control, were used in the work. ***Results.*** A block diagram of the bionic prosthesis control system is proposed, which is characterized by simplicity of adjustment, increased reliability, convenience of use. ***Conclusions.*** The use of the proposed system in domestic prostheses with will make it possible to replace the lost extremity lost as a result of amputation with significantly lower costs compared to foreign samples.

Ключевые слова: ампутация, бионический протез, электрод, электромиография, акселерометр, датчик угла поворота, беспроводное управление, радиотрансивер.

Key words: amputation, bionic prosthesis, electrode, electromyography, accelerometer, angle sensor, wireless control, radio transceiver.

Ни одно общество не может избежать такого социального явления, как инвалидность. Ежегодно только в России признаются инвалидами свыше 1 млн человек, причем больше половины из них – это люди с ампутированными конечностями. Согласно статистическим данным, наиболее часто люди теряют ноги. К числу причин, приводящих к ампутации нижних конечностей, следует отнести военные конфликты, дорожный и производственный травматизм, стихийные бедствия и техногенные катастрофы, также такие заболевания, как облитерирующие поражения сосудов, атеросклероз и сахарный диабет.

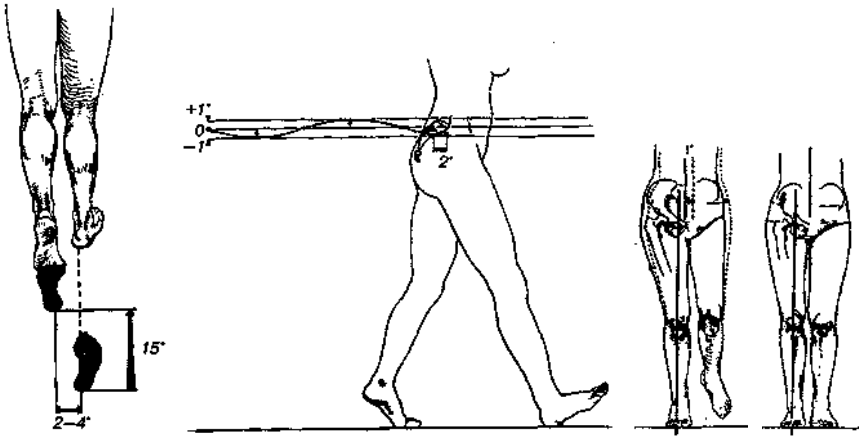
Практически до конца XX в. все изобретения в области протезирования были механического характера. Основными проблемами механических протезов были отсутствие какой-либо связи с организмом, негибкость и недолговечность. Протезы, заменяющие ампутированную конечность, не могли функционировать как полноценный их прототип – это всего лишь суррогат, заменяющий активные части тела, но неспособный приблизиться по возможностям к естественному аналогу. Это и есть главный минус протезов – их «внешний» характер и низкая функциональность. Все, что остается делать их обладателю, это использовать их как элемент гардероба, который со временем изнашивается и становится непригодным к дальнейшей эксплуатации.

В последние годы в сфере протезирования появилось такое направление, как «биомехатроника», которое представляет собой соединение робототехники и нервных клеток человека. Задачей научных исследований в этом направлении является разработка искусственных конечностей (бионических протезов), которыми можно будет управлять лишь силой мысли, а функциональность будет повторять заменяемую конечность человека с максимальной точностью. Бионические протезы ног – это модели со встроенными микропроцессорами, которые можно программировать для более естественной ходьбы и других движений. Сегодня на Западе существует целая индустрия [1], создающая протезы, которые позволяют человеку, потерявшему конечность, оставаться полноценным членом общества.

Отечественная реабилитационная техника предлагает, как правило, только косметические протезы, представляющие собой анатомические муляжи, которые не обеспечивают должного уровня реабилитационного эффекта. Стоимость зарубежных образцов бионических протезов слишком высока для отечественного потребителя. Таким образом, разработка отечественных протезов нижних конечностей с адаптивными информационно-измерительными системами управления является актуальной задачей, решение которой позволит улучшить качество функционирования протезов и значительно снизить их стоимость.

Протезы нижних конечностей должны обеспечивать выполнение двух базовых функций: функцию опоры (пациента на протез) и функцию крепления (протеза к телу пациента). За выполнение первой функции отвечает вся конструкция протеза, в том числе и культеприемная гильза, а за выполнение второй – система крепления, являющаяся частью культеприемной гильзы. Помимо этих функций, протезы нижних конечностей должны обеспечивать устойчивость во время стояния и во время движения (статическую и динамическую устойчивость соответственно), адекватную динамичность (подвижность его составных частей относительно друг друга), конструктивную (механическую) прочность, надежность и долговечность и косметичность (восполнение эстетических потерь из-за ампутации). По внешнему виду протез должен быть похож на здоровую конечность, а ходьба на нем по кинематическому рисунку должна (по возможности) приближаться к ходьбе здорового человека и не должна быть излишне утомительной [2, 3].

Ходьба является одним из основных и естественных видов перемещения тела человека в пространстве [4]. Она представляет собой сложное, разновременно симметричное, циклическое движение, связанное с отталкиванием тела от опорной поверхности и перемещением его в пространстве. Последовательность положения конечности взрослого человека при ходьбе показана на рис. 1. При ходьбе тело поочередно опирается то на правую, то на левую ногу. Акт ходьбы отличается точной повторяемостью отдельных его компонентов, т.е. каждый из них представляет точную копию в предыдущем шаге. В акте ходьбы деятельное участие принимают также верхние конечности человека: при выносе вперед правой ноги правая рука движется назад, а левая – выносится вперед, т.е. руки и ноги человека при ходьбе совершают движения в противоположных направлениях.



а) *б*) *в*)

Рис. 1. Ходьба в норме: *а* – ширина и длина шага; *б* – отклонение центра тяжести во время ходьбы по вертикальной оси на 5 см; *в* – отклонение центра тяжести в сторону на 2,5 см

Движение отдельных звеньев свободной ноги (бедра, голени и стопы) определяется не только сокращением мышц, но и инерцией. Чем ближе звено к туловищу, тем меньше его инерция и тем раньше оно может последовать за туловищем. Так, бедро свободной ноги перемещается вперед раньше всего, поскольку оно ближе всего к тазу. Голень, будучи дальше от таза, отстает, что ведет к сгибанию ноги в колене. Точно также отставание стопы от голени вызывает сгибание в голеностопном суставе (рис. 1,*б*).

Основным элементом ходьбы является шаг. Наименьшее время, прошедшее от данного положения до его повторения, является временем цикла. При ходьбе время цикла называют также «временем двойного шага»: каждая нога в своем циклическом движении находится либо на опоре, либо переносится на новое место опоры. Типичный цикл ходьбы схематично приведен на рис. 2. В каждом шаге, совершаемом правой и левой ногой, различают период опоры и период переноса. Наиболее характерной особенностью ходьбы является опорное положение одной ноги (период одиночной опоры) или двух ног (период двойной опоры). Как период опоры, так и период переноса может быть разделен на две основные фазы, а именно: период опоры – на фазы переднего толчка и заднего толчка, разделенные моментом вертикали; переноса – фазы заднего шага и переднего шага, между которыми также находится момент вертикали [4].

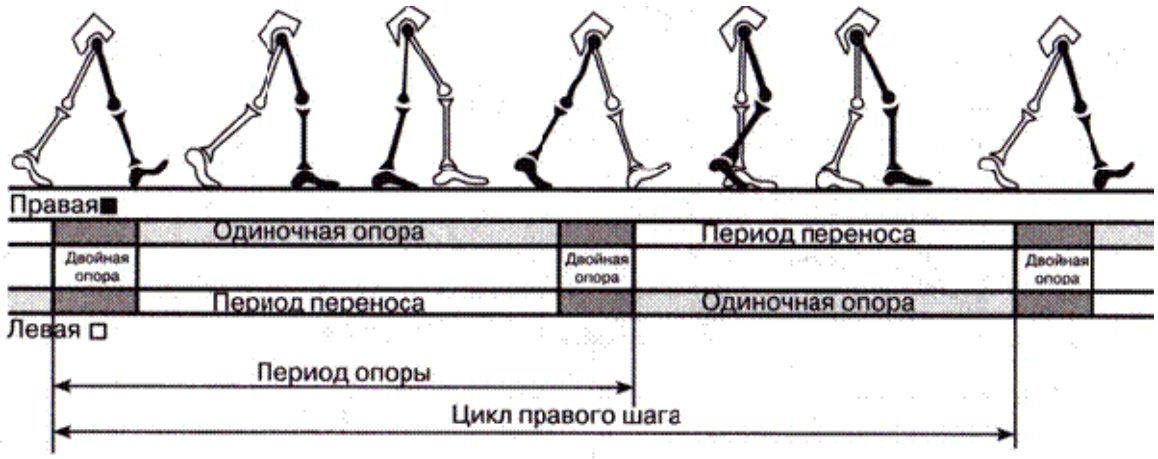
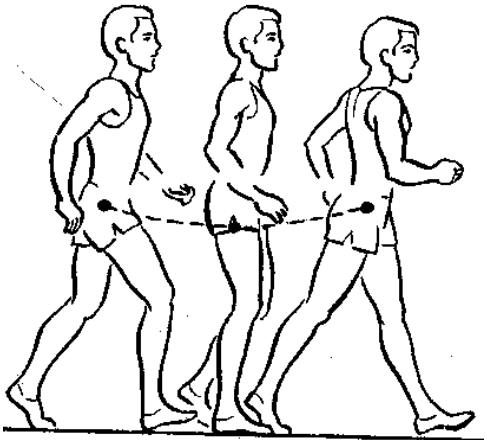


Рис. 2. Типичный цикл ходьбы человека

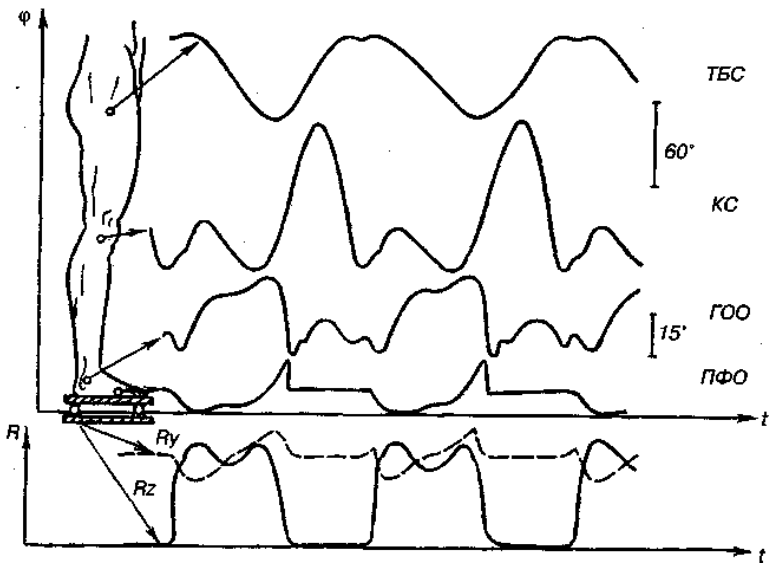
При ходьбе в среднем темпе фаза опоры длится примерно 60 % от цикла двойного шага, фаза переноса – примерно 40 %. Началом цикла ходьбы принято считать момент контакта

пятки правой ноги с опорой. В норме приземление пятки осуществляется на ее наружный отдел. С этого момента правая нога считается опорной. Иначе эту фазу ходьбы называют передний толчок – результат взаимодействия силы тяжести движущегося человека с опорой. Следующая фаза ходьбы – опора на всю стопу. Вес тела распределяется на передний и задний отдел опорной стопы. Другая, в данном случае – левая, нога сохраняет контакт с опорой. Примерно через 65 % времени двойного шага, в конце интервала опоры, происходит отталкивание тела вперед и вверх за счет активного подошвенного сгибания стопы – реализуется задний толчок. Центр масс перемещается вперед в результате активного сокращения мышц. Следующая стадия (фаза переноса) характеризуется отрывом ноги и перемещением центра масс под влиянием силы инерции. Цикл ходьбы завершается моментом контакта пятки с опорой [5].

Размер шага в среднем составляет 66 см, при спокойной ходьбе продолжительность его – около 0,6 с. В биомеханике принято измерять межзвенные углы человека между продольными осями смежных сегментов конечности.



а)



б)

Рис. 3. Перемещение ОЦТ тела при обычной ходьбе (*а*). Графики межзвенных углов и опорных реакций при ходьбе в норме: *Rz*, *Ry* – вертикальная и продольная компоненты опорной реакции (*б*)

На рис. 3,*б* приведены графики межзвенных углов в тазобедренном суставе (ТБС), коленном (КС), голеностопном (ГСС) и плюснефаланговом (ПФС) при ходьбе в норме. Характерной особенностью графиков этих углов (ангулограмм) является довольно стабильная периодичность. У разных людей меняются только продолжительность периода и диапазон

изменений угла (амплитуда). В норме эти амплитуды составляют: в ТБС 26– 30°; в КС в опорный период шага – 12–15°; в переносный период – 55–62°; в ГСС подошвенное сгибание равно 17–20°; тыльное – 8–10°. В ПФС при опоре сначала идет выпрямление до 0°, а при заднем толчке (от заднего толчка опорной ноги тело устремляется вперед) в ПФС снова происходит сгибание до 10–12°. Помимо мышц нижних конечностей, при ходьбе включаются в динамическую работу почти все мышцы туловища, шеи и верхних конечностей [4, 6].

При ходьбе человек взаимодействует с опорной поверхностью, при этом возникают силовые факторы, называемые главным вектором и главным моментом сил реакции опоры. Типичные графики вертикальной и продольной составляющих главного вектора опорной реакции при ходьбе в произвольном темпе в норме представлены на рис. 3,*в*. Для графика вертикальной составляющей главного вектора опорной реакции характерно наличие двух вершин, соответствующих переднему (опора на пятку) и заднему (отталкивание передним отделом стопы) толчкам. Амплитуды этих вершин превышают вес человека *P* и достигают 1,1–1,25*P*. Продольная составляющая главного вектора сил реакции опор имеет тоже две вершины разных знаков: первая, соответствующая переднему толчку, направлена вперед; вторая, соответствующая заднему толчку, направлена назад. Максимумы продольной составляющей главного вектора опорной реакции достигают 0,25P. Есть еще одна составляющая главного вектора опорной реакции – поперечная. Она возникает при переступании с одной ноги на другую и ее максимум достигает 8–10 % от веса человека [7].

Основной механизм, определяющий эффективность ходьбы, – это перемещение общего центра тяжести тела (ОЦТ). ОЦТ при ходьбе (рис. 3,*а*) наряду с поступательными движениями (вперед) совершает еще движения боковые и в вертикальном направлении. В последнем случае размах (вверх и вниз) достигает величины 4 см (у взрослого человека), при этом туловище опускается больше всего именно тогда, когда одна нога опирается всей подошвой, а другая вынесена вперед. Боковые движения (качания в стороны) центра тяжести доходят до 2 см. Колебания ОЦТ в стороны связаны с перемещением на опорную ногу всей массы тела, благодаря чему траектория ОЦТ проходит непосредственно над площадью опоры. Чем ходьба быстрее, тем эти колебательные движения меньше, что объясняется влиянием инерции тела. Перемещение ОЦТ представляет собой типичный синусоидальный процесс с частотой, соответствующей двойному шагу в медиолатеральном направлении, и с удвоенной частотой в переднезаднем и вертикальном направлении.

Ходьбу в биомеханике принято рассматривать с позиции модели прямого и обратного маятника, при этом тело и сегменты конечностей представляют как систему физических маятников (рис. 4). Известно, что маятник имеет максимум потенциальной энергии E_p в высшей точке и превращает ее в кинетическую E_k, отклоняясь вниз. При этом некоторая часть энергии расходуется на трение. Во время ходьбы, уже в самом начале периода опоры, как только ОЦТ начинает подниматься, кинетическая энергия движения превращается в потенциальную, и наоборот, переходит в кинетическую, когда ОЦТ опускается (рис. 5) [8, 9].

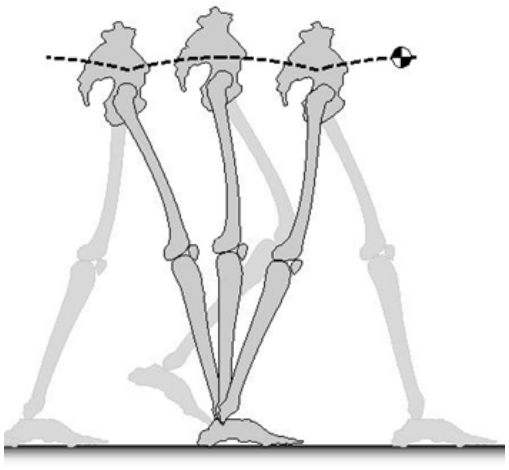


Рис. 4. Анализ процесса ходьбы с позиции теории перевернутого маятника

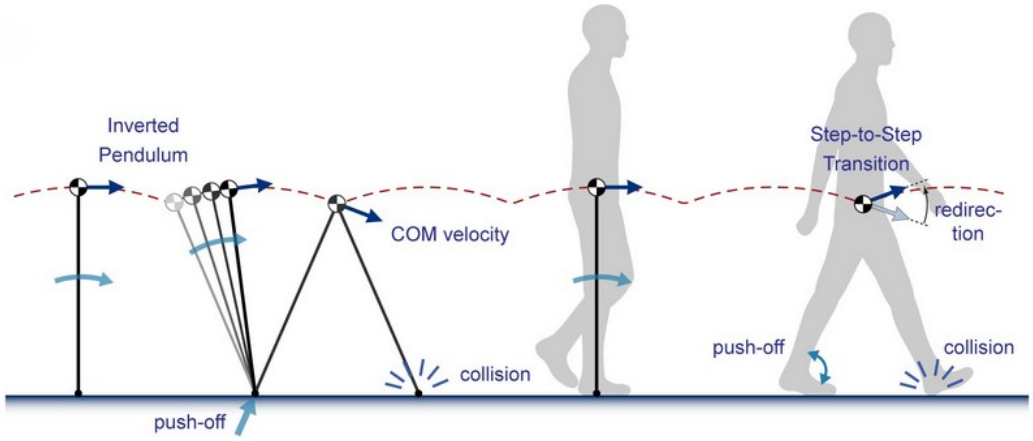


Рис. 5. Траектория движения ОЦМ человека при ходьбе

Мышцы должны постоянно компенсировать потерю энергии, которая составляет около 35 %. Мышцы включаются для перемещения центра масс из нижнего положения в верхнее, восполняя утраченную энергию. Эффективность ходьбы связана с минимизацией вертикального перемещения общего центра масс. Однако увеличение энергетики ходьбы неразрывно связано с увеличением амплитуды вертикальных перемещений, т.е. при увеличении скорости ходьбы и длины шага неизбежно увеличивается вертикальная составляющая перемещения центра масс. На протяжении опорной фазы шага наблюдаются постоянные компенсирующие движения, которые минимизируют вертикальные перемещения и обеспечивают плавность ходьбы (рис. 6).

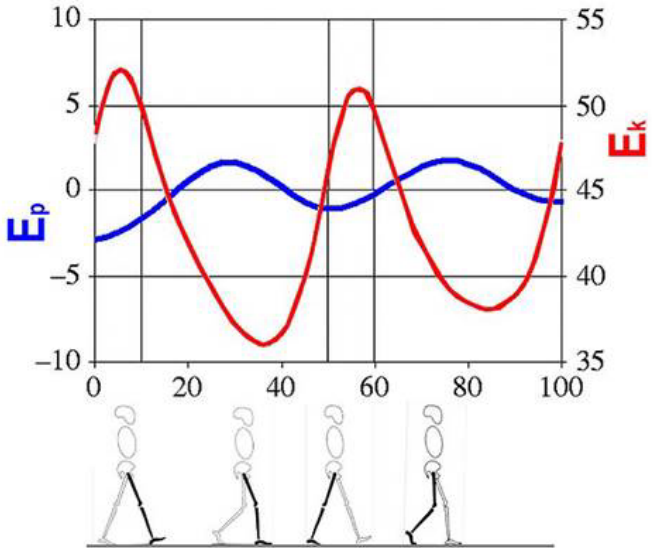


Рис. 6. Изменение энергии в процессе ходьбы

Анализ функций опорно-двигательного аппарата человека и процессов, протекающих при ходьбе [3, 10], позволил определить требования к конструкции и системе управления бионическим протезом:

– конструкция протеза должна быть изготовлена по блочно-модульному принципу с целью унификации протезов, так как уровни ампутации могут быть различны;

– протез должен обеспечивать как поступательное, так и вращательное движение в области лодыжки и колена;

– протез должен обеспечивать процесс преобразования потенциальной энергии в кинетическую, т.е. система управления протезом должна обеспечивать различие фаз переноса и опоры;

– система должна обеспечивать распознавание электромиографических сигналов с целью выделения двигательной активности мотонейронов.

В работе предлагается информационно-измерительная система (ИИС) управления бионическим протезом для трансфеморальной ампутации нижней конечности, т.е. при ампутации ноги выше колена. Структурная схема предлагаемой системы представлена на рис. 7. Система содержит канал распознавания биоэлектрической активности мотонейронов, канал контроля ускорения бедра, каналы контроля состояния колена и лодыжки, каналы выявления фазы опоры и переноса, а также беспроводной блок управления протезом для организации обратной связи системы управления протезом с человеком. В состав канала распознавания биоэлектрической активности входят электроды ЭМГ, нормирующий усилитель НУ, полосовой фильтр ПФ, аналого-цифровой преобразователь АЦП1. В состав канала контроля ускорения бедра входит датчик ускорения (акселерометр) ДУ, интегратор И, АЦП2. В состав каналов контроля угла колена и лодыжки входят соответственно датчик угла колена ДУК, датчик угла лодыжки ДУЛ, преобразователи сопротивления в напряжение для колена ПСНК и для лодыжки ПСНЛ и АЦП3 и АЦП4. В состав каналов контроля касания пятки и носка входят соответственно датчик касания носка ДКН, датчик касания пятки ДКП, преобразователи сопротивления в напряжение для носка ПСНН, для пятки ПСНП, а также АЦП5 и АЦП6.

Для ручного управления или корректировки движения протеза в системе используется беспроводный блок управления, в состав которого входят пульт управления ПУ, микроконтроллер МК, графический дисплей ГД, радиотрансивер РТ1. Сигналы с АЦП поступают на центральное процессорное устройство ЦПУ, которое служит для обработки информации и создания команд для управления исполнительными механизмами. Для управления электродвигателем ЭДК и редуктором РК колена, а также электродвигателем ЭДЛ и редуктором РЛ лодыжки используются соответствующие контроллеры КЭДК и КЭДЛ.

Схема расположения датчиков и конструкция бионического протеза приведены на рис. 8.

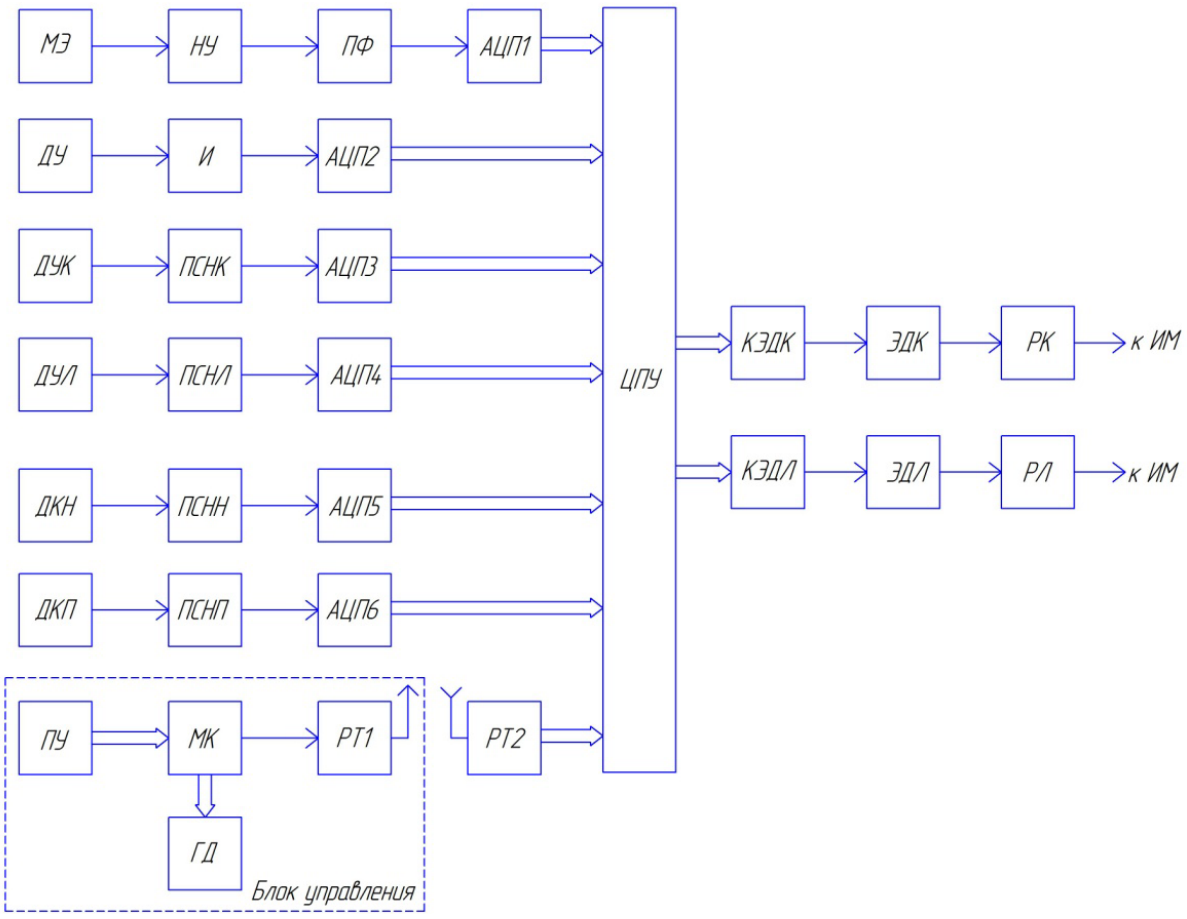


Рис. 7. Структурная схема управления бионическим протезом

Система работает следующим образом. Активный АЭ, пассивный ПЭ и индифферентный ИЭ электроды расположены в местах расположения мотонейронов (двигательных единиц). В момент возникновения намерения движения на электродах регистрируется биоэлектрическая активность, проявляющаяся ростом амплитуды сигнала ЭМГ. Сигнал ЭМГ усиливается усилителем НУ. Усиленный сигнал поступает на ПФ, полоса пропускания которого соответствует диапазону изменения сигнала ЭМГ. Далее сигнал оцифровывается с помощью АЦП и поступает для дальнейшей обработки на ЦПУ.

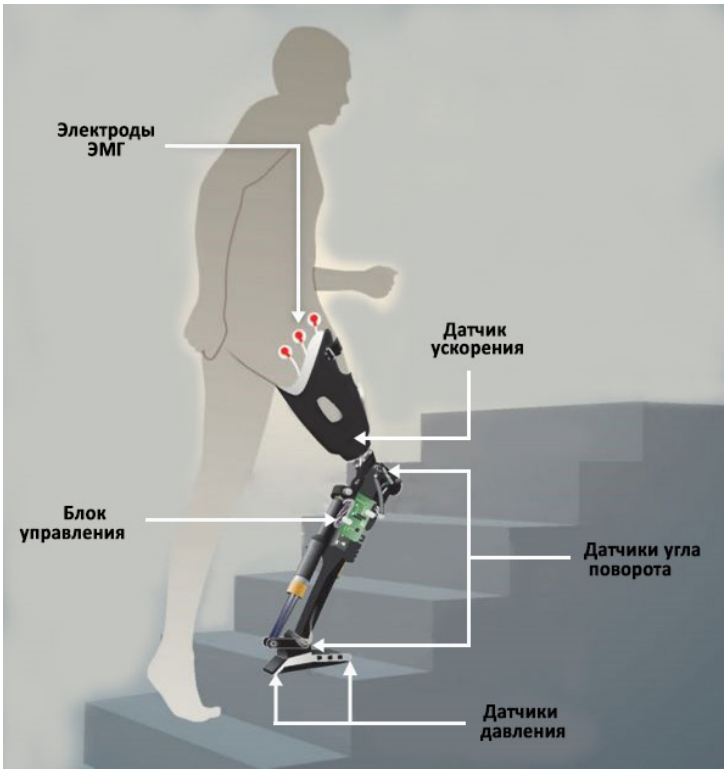


Рис. 8. Схема расположения датчиков

ДУ расположен на оставшейся части мышцы бедра. Сигнал с ДУ (акселерометра) поступает на интегратор, выходной сигнал которого пропорционален углу вращения бедра в сагиттальной плоскости (плоскости, делящей тело человека на левую и правую половину). Выходной сигнал блока интеграторов оцифровывается с помощью АЦП и поступает в ЦПУ.

Датчики угла вращения соответственно колена и лодыжки целесообразно реализовать с помощью потенциометрических датчиков угла, позволяющих преобразовать угол вращения колена (лодыжки) в напряжение. Далее напряжение, пропорциональное углу вращения колена (лодыжки), поступает на АЦП.

Датчики касания носка и пятки предназначены для определения фазы опоры и переноса и выполнены на основе тензометрических датчиков давления, выходной сигнал которых преобразовывается в сопротивление и далее оцифровывается АЦП.

ЦПУ принимает поступившие с АЦП сигналы, обрабатывает их и подает необходимые команды на исполнительные механизмы протеза, в результате чего выполняется определенная последовательность операций – поднятие протеза, его сгибание и выпрямление.

Предложенная система управления сочетает командное и автоматизированное управление, при этом приоритетной задачей является безопасность пользователя. Такое решение дает пользователю возможность не «задумываться» над тем, как выполнить движение, но в то же время дает возможность непосредственно влиять на параметры функционирования своей бионической интеллектуальной конечности. Наличие датчиков в системе управления позволит реагировать на внешние раздражители подобно человеку: противодействовать приложенной нагрузке, уменьшать вибрации, изменять форму и увеличивать плавность и естественность

передвижения. А создание отечественного бионического протеза с управлением на основе предложенной ИИС позволит приблизить ходьбу на протезе к естественному стереотипу движения при оптимальных энергозатратах ампутанта.

Библиографический список

1. Каталог продукции / разработчик и изготовитель Otto Bock Service Russia. – М., 2017. – URL: http://www.ottobock.ru/ (дата обращения 30.10.2017).
2. Витензон, А. С. От естественного к искусственному управлению локомоцией / А. С. Витензон, К. А. Петрушанская. – М., 2003. – 448 с.
3. Perry, J. Gait Analysis: Normal and Pathological Function / J. Perry. – New Jersey : Slack Incorporated, 1992. – Chapter 4. – P. 55–57.
4. Дубровский, В. И. Биомеханика : учебник / В. И. Дубровский, В. Н. Федорова. – М. : ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – 672 с.
5. Белецкий, В. В. Двуногая ходьба. Модельные задачи динамики и управления / В. В. Белецкий. – М. : Наука, 1982.
6. Формальский, А. М. Перемещение антропоморфных механизмов / А. М. Формальский. – М. : Наука, 1982. – 366 с.
7. Uustal, H. Essential Physical Medicine and Rehabilitation / H. Uustal, G. Cooper. – New Jersey : Humana Press, 2006.
8. Farry, K. A. Myoelectric teleoperation of a complex robotic hand / K. A. Farry // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 1996. – Vol. 12, № 5. – P. 775–788.
9. Kuo, A. D. Energetic consequences of walking like an inverted pendulum: Step-to-step transitions / A. D. Kuo, J. M. Donelan, A. Ruina // Exerc. Sport Sci. Rev. – 2005. – Vol. 33, № 2. – P. 88–97.
10. Au, S. K. Powered Ankle-Foot Prosthesis Improves Walking Metabolic Economy / S. K. Au, J. Webber, H. Herr // IEEE Trans. on Robotics. – 2009. – Vol. 25. – P. 55–66.

Солодимова Галина Анатольевна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: solodimova@mail.ru

Solodimova Galina Anatol'evna
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information-measuring technique and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Спиркин Андрей Николаевич
магистрант,
Пензенский государственный технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: Rakahanga10160@yandex.ru

Spirkin Andrey Nikolaevich
master degree student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova avenue / Gagarin street,
Penza, Russia)

УДК 681.51:616-77

Солодимова, Г. А.

Информационно-измерительная система бионического протеза нижней конечности / Г. А. Солодимова, А. Н. Спиркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 57–65. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-9.

УДК 519.24; 53; 57.017 DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-10

В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Е. А. Малыгина, Ю. И. Серикова

ОБУЧЕНИЕ СЕТЕЙ КВАДРАТИЧНЫХ ФОРМ НА МАЛЫХ ВЫБОРКАХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕДУРЫ СИММЕТРИЗАЦИИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ

V. I. Volchikhin, A. I. Ivanov, E. A. Malygina, Yu. I. Serikova

TRAINING OF NETWORKS OF QUADRATIC FORMS ON SMALL SAMPLES OF BIOMETRIC DATA USING THE PROCEDURE OF SYMMETRIZATION OF CORELATION LINES

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели.*** Целью работы является описание процедуры симметризации корреляционных связей многомерных биометрических данных через вычисление полной корреляционной матрицы и выбора ее элементов с одинаковыми значениями. ***Материалы и методы.*** Симметричные корреляционные матрицы не поддаются классической регуляризации по Тихонову, однако они обладают собственной «структурной» устойчивостью. Получается, что симметризация корреляционных связей есть не что иное, как некоторый метод структурной регуляризации решения многомерных задач линейной алгебры. ***Результаты.*** В работе показано, что переход к вычислению симметричных корреляционных функционалов порядка *n* эквивалентен повышению объема биометрических данных в $\sqrt{n(n-2)/2}$ раз по сравнению с вычислением обычных коэффициентов корреляции. Повышение размерности корреляционных функционалов приводит к монотонному снижению погрешности их вычисления, возникающей из-за недостатка исходных данных. ***Выводы***. Корреляционные функционалы есть не что иное, как многомерные свертки по пространству входных состояний доступных для наблюдения статистических данных. На практике широко используются только простейшие двухмерные корреляционные функционалы, так как применение корреляционных функционалов более высокого порядка слабо изучено. Барьером, мешавшим ранее начать исследования возможностей высокоразмерных корреляционных функционалов, были ожидания падения точности их вычисления. Подобные опасения справедливы только по отношению к асимметричным корреляционным функционалам.

A b s t r a c t. ***Background***. The aim of this work is to describe the procedure of symmetrization of the correlation of multidimensional biometric data through the computation of the full correlation matrix and elements with the same value. ***Materials and methods***. The symmetric correlation matrix are not amenable to classical regularization by Tikhonov, but they have their own structural stability. It turns out that the symmetrization of the correlation is not that other, as a certain method of structural regularization for the solution of multidimensional problems of linear algebra. ***Result***. It is shown that the transition to the calculation of the symmetric correlation functionals of order n equivalent to the increased volume of biometric data in $\sqrt{n(n-2)/2}$ times compared to the computation of conventional correlation coefficients. Increasing the dimensionality of the correlation functionals leads to a monotonous decrease of

the error of their calculations arising due to lack of source data. ***Conclusions***. Correlation functionals is not that other, as a multidimensional convolution in space of the input States are available for monitoring statistics. In practice widely used only the simplest two-dimensional correlation functionals, since the use of the correlation functionals of higher order is poorly studied. A barrier that prevented earlier, start researching possibilities vysokorazvityh correlation functionals were expectations for a decline of the accuracy of their calculations. Such concerns are valid only in relation to asymmetric correlation functionals.

К л ю ч е в ы е с л о в а: биометрические данные, корреляционные свертки высокой размерности, симметризация вычислений на малых выборках.

K e y w o r d s: biometric data, correlation and convolution high-dimensional, symmetrization of calculations on small samples.

Проблема вычисления корреляционных функционалов на малых выборках

Применительно к обработке биометрических данных могут быть использованы искусственные нейронные сети [1– 4]. Перед их использованием необходимо выполнить процедуру их обучения. Как правило, искусственные нейронные сети плохо учатся (имеют экспоненциальную вычислительную сложность обучения). Кроме того, для обучения «глубоких» нейронных сетей [1, 2] требуются очень большие выборки исходных данных (более 100 000 примеров, биометрических образов, размеченных в ручном режиме). Все это делает нейронные сети общего вида непригодными для биометрической аутентификации личности человека в защищенном исполнении. Под решение этой задачи приходится создавать специальные нейронные сети [5], имеющие стандартизованный алгоритм обучения [6] с линейной вычислительной сложностью.

Стандартизованный алгоритм обучения [6] построен на использовании младших одномерных статистических моментов. Используются математические ожидания $E(\nu)$ и стандартные отклонения – $\sigma(\nu)$ биометрических параметров. Как перспектива рассматривается возможность улучшения стандартного алгоритма обучения [7–9] через дополнительное применение коэффициентов корреляции $r(\nu_1,\nu_2)$. При этом основным препятствием является то, что корреляционный функционал двухмерен и накапливает погрешности $\Delta E(\nu_1)$, $\Delta E(\nu_2)$, $\Delta\sigma(\nu_1)$, $\Delta\sigma(\nu_2)$. В конечном итоге на малых выборках коэффициенты корреляции имеют недопустимо большую погрешность. Примеры распределения значений ошибок вычисления коэффициентов корреляции приведены на рис. 1.

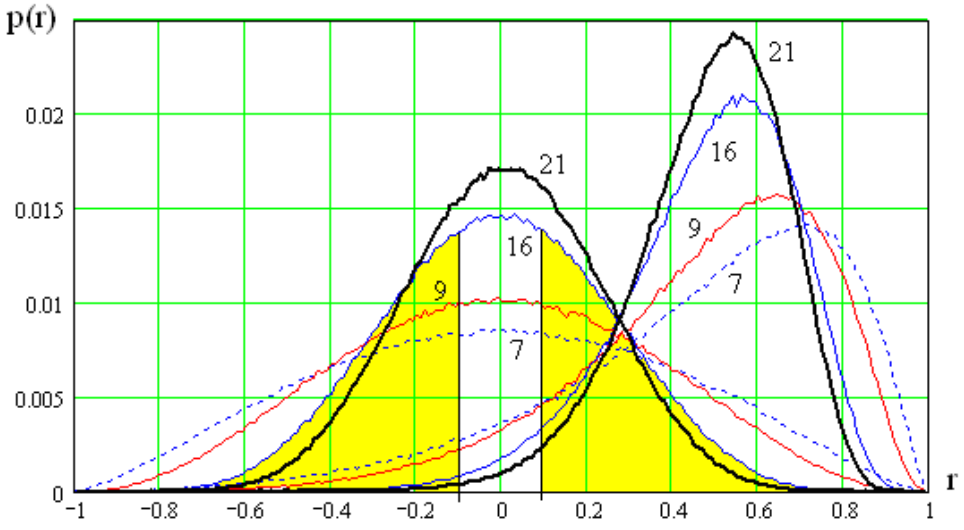


Рис. 1. Распределение значений коэффициентов корреляции для выборок из 7, 9, 16, 21 примеров при двух значениях коэффициентов корреляции $r = 0$ и $r = 0{,}5$

Из рис. 1 видно, что самая большая погрешность возникает при определении коэффициентов корреляции независимых данных. Так, для выборок из 16 независимых опытов вычисленный коэффициент корреляции попадает в интервал [–0,1; +0,1] с вероятностью только 0,2. Становится актуальной задача повышения точности вычисления коэффициентов корреляции на малых выборках.

Обычно с ростом размерности вычисляемого функционала растет влияние ошибок из-за недостаточного объема выборки исходных данных. Цель данной работы – показать, что повышение размерности корреляционных функционалов может рассматриваться как эффективный метод регуляризации их вычислений и что переход к вычислению корреляционных функционалов более высокой размерности снижает требования к размерам тестовой выборки, если вычислительные процедуры предварительно симметризованы.

Симметризация корреляционных связей биометрических данных

При необходимости может быть вычислена корреляционная матрица связей биометрических параметров. Например, как источник достоверных данных можно использовать среду моделирования «БиоНейроАвтограф» [10]. В этой программной среде любой введенный графическим планшетом или манипулятором «мышь» рукописный образ преобразуется в 416 биометрических параметров. Как следствие, мы можем воспользоваться данными среды моделирования [10], полученными для 21 примера некоторого рукописного образа, и вычислить корреляционную матрицу размерности 416×416.

Очевидно, что мы можем по этой корреляционной матрице отсортировать данные на группы одинаково коррелированных между собой биометрических параметров. Более того, каждая из таких групп может рассматриваться как система симметричных корреляционных функционалов с монотонно увеличивающейся размерностью:

$$\begin{bmatrix} 1 & r \\ r & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & r & r \\ r & 1 & r \\ r & r & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & r & r & r \\ r & 1 & r & r \\ r & r & 1 & r \\ r & r & r & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & r & r & r & r \\ r & 1 & r & r & r \\ r & r & 1 & r & r \\ r & r & r & 1 & r \\ r & r & r & r & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & r & r & r & r & r \\ r & 1 & r & r & r & r \\ r & r & 1 & r & r & r \\ r & r & r & 1 & r & r \\ r & r & r & r & 1 & r \\ r & r & r & r & r & 1 \end{bmatrix}, \ldots \quad (1)$$

Следует отметить, что моделировать исходные данные с симметричными корреляционными матрицами достаточно просто [11, 12]. Для этого достаточно от программного генератора получить вектор независимых псевдослучайных состояний $\overline{\xi}$ нужной размерности и умножить его на симметричную связывающую матрицу с одинаковыми элементами и единичной диагональю

$$\begin{bmatrix} 1 & a & a \\ a & 1 & a \\ a & a & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Очевидно, что для каждого показателя размерности – n значения параметра связывания данных является одномерной функцией коэффициента равной коррелированности

$$a = f(r, n). \quad (3)$$

На рис. 2 приведены примеры функций (3) для низких показателей размерности.

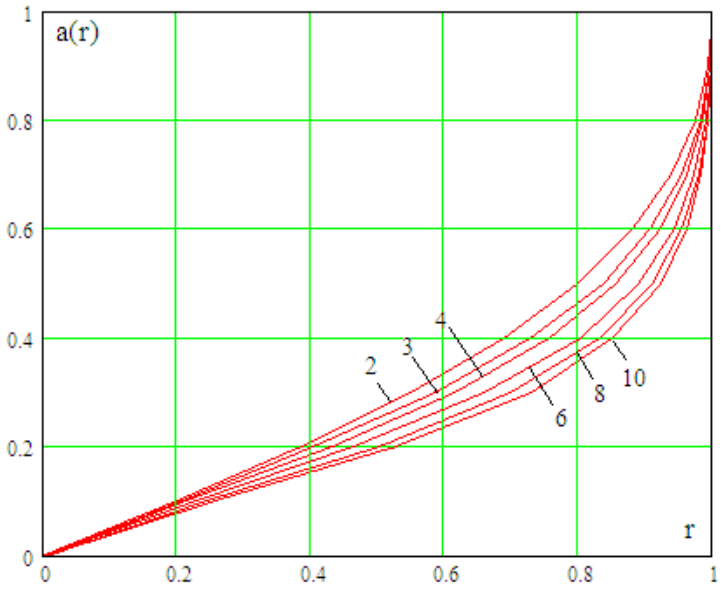


Рис. 2. Зависимость коэффициентов связывающих матриц
от коэффициентов равной коррелированности

Одномерность и монотонность функции (3) позволяет создавать очень точные таблицы преобразований $a \rightarrow r$, и наоборот, $r \rightarrow a$ для любых показателей размерности – n.

Рост точности вычислений коэффициентов равной коррелированности за счет усреднения близких данных

Выбирая одинаковые значения коэффициентов корреляции и создавая группы данных равной коррелированности, мы всегда имеем дело с ошибками их вычисления. Чем выше размерность симметризованной корреляционной матрицы, тем более точно мы можем вычислить коэффициент равной коррелированности через усреднение коэффициентов взаимной корреляции данных, объединенных в одну группу. Так, если мы имеем симметричную корреляционную матрицу размерности – n, то появляется возможность усреднять между собой $(n(n-2)/2)$ коэффициентов. Если считать, что ошибки вычисления коэффициентов корреляции Δr_i независимыми, то итоговая ошибка вычисления показателя равной коррелированности значительно снижается

$$\Delta E(r) \approx \frac{\Delta r\sqrt{2}}{\sqrt{n(n-2)}}. \qquad (4)$$

Это означает, что имитационное моделирование данных по формуле (2) может быть выполнено много точнее, чем ошибка реальных данных, вычисленных по малой выборке.

Регуляризация вычисления откликов квадратичных форм

В биометрии активно используется мера Махаланобиса [13]. Если выполнить центрирование и нормирование биометрических данных, то мера Махаланобиса может быть записана следующим образом:

$$e^2 = (\bar{v})^T [r]^{-1} \bar{v}. \qquad (5)$$

Основной проблемой вычислений по формуле (5) является проблема обращения плохо обусловленных корреляционных матриц. Чем выше размерность корреляционной матрицы, тем хуже их обусловленность. Для произвольно сформированных корреляционных матриц 4, 5 порядка число обусловленности может меняться в пределах от 1 до 200. Если же мы начнем специально подбирать одинаково коррелированные биометрические параметры, то, например,

для параметров $r_i \approx 0,0$ число обусловленности будет близко к единице при любой размерности. Формирование нескольких групп слабо коррелированных параметров является очень эффективным способом регуляризации. Более того, даже в случае не нулевых корреляционных связей $r \neq 0,0$ для симметричных матриц удается однозначно вычислить коэффициент обусловленности:

$$cond\left[r_n\right] = \frac{\max(\lambda_i)}{\min(\lambda_i)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \tag{6}$$

где λ_i – собственные числа любого типа корреляционной матрицы, только для симметричных корреляционных матриц $\lambda_1 = \max(\lambda_i)$ и $\lambda_2 = \lambda_3 =,..,= \lambda_n = \min(\lambda_i)$.

Следует отметить, что число обусловленности симметричных корреляционных матриц всегда меньше, чем число обусловленности близких к ним почти симметричных матриц с погрешностями вычисления каждого элемента:

$$cond\begin{bmatrix} 1 & r_{1,2} & r_{1,3} \\ r_{2,1} & 1 & r_{2,3} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & 1 \end{bmatrix} \geq cond\begin{bmatrix} 1 & E(r) & E(r) \\ E(r) & 1 & E(r) \\ E(r) & E(r) & 1 \end{bmatrix}. \tag{7}$$

На рис. 3 показаны функции роста минимального значения коэффициента обусловленности в зависимости от показателя равного значения коэффициентов корреляции и размерности матрицы.

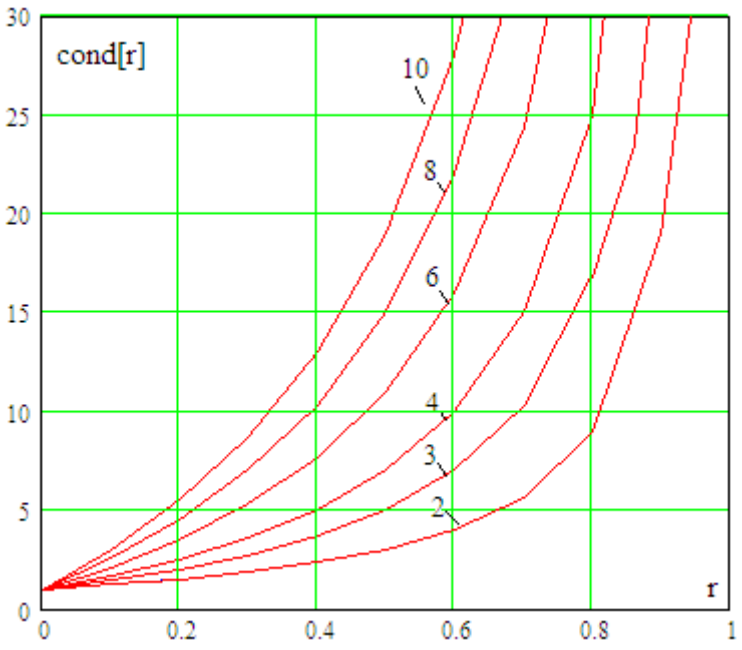


Рис. 3. Функции числа обусловленности симметричных матриц

На рис. 3 даны функции роста числа обусловленности в зависимости от коэффициентов коррелированности симметричных матриц только для малых размерностей *n* = 2, 3, …, 10. С ростом размерности функции обусловленности увеличивают свою крутизну, что отражает эффект «проклятия» размерности.

Исходя из соотношения (7) на рис. 3 отображены границы распределений минимально возможных значений коэффициентов обусловленности. Реальные значения коэффициентов обусловленности всегда выше кривых рис. 3. Для каждой размерности по аналогии с рис. 3 могут быть построены значения математических ожиданий чисел обусловленности и граница их максимумов. Соотношения этих кривых для выборки в 21 опыт показаны на рис. 4.

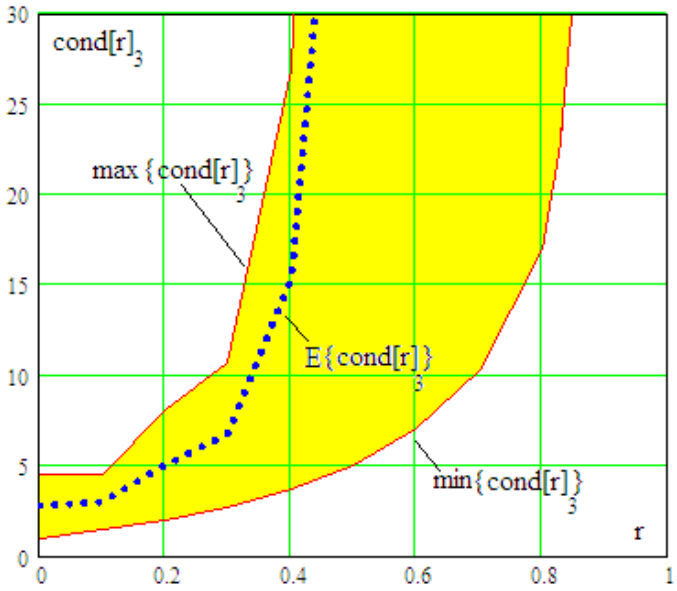


Рис. 4. Поле разброса чисел обусловленности для почти симметричных корреляционных матриц третьего порядка (более темная заливка) с асимметрией, обусловленной малой выборкой в 21 пример

Из данных рис. 4 видно, что даже относительно небольшие ошибки вычисления коэффициентов корреляции могут приводить к большим вариациям устойчивости обращения даже трехмерных корреляционных матриц. Естественно, что с ростом размерности обращаемых матриц верхняя и нижняя границы будут раздвигаться, увеличивая площадь множества допустимых вариаций чисел обусловленности. Наоборот, с ростом размеров обучающей выборки размеры наблюдаемых вариаций числа обусловленности сужаются, приближаясь к правым границам функций рис. 3.

Потенциальный выигрыш по затратам вычислительных ресурсов от замещения операции регуляризации по Тихонову на операцию симметризации

На практике при обращении матриц и решении систем линейных уравнений часто используется регуляризация вычислений по Тихонову [14]. Идея метода Тихонова состоит в том, что к нестабильной матрице добавляется стабильная единичная матрица:

$$[A1]=[A]+\mu[1], \tag{8}$$

для того, чтобы $cond[A1]\le cond[A]$.

При поиске коэффициента стабилизации – μ (8) может быть использована итерационная процедура подбора [14], при этом создается иллюзия низкой вычислительной сложности решаемой задачи. На самом деле задача регуляризации корреляционных матриц оказывается много сложнее. Возникает это из-за того, что стабилизирующих матриц может быть множество. Любая матрица с нулевыми элементами вне диагонали и элементами ±1 на диагонали предельно стабильна:

$$cond\begin{bmatrix}+1&0&0\\0&-1&0\\0&0&-1\end{bmatrix}=cond\begin{bmatrix}-1&0&0&0\\0&+1&0&0\\0&0&-1&0\\0&0&0&+1\end{bmatrix}=cond\begin{bmatrix}+1&0&0&0&0\\0&+1&0&0&0\\0&0&-1&0&0\\0&0&0&-1&0\\0&0&0&0&+1\end{bmatrix}=....=1. \tag{9}$$

Фактически вместо одного решения (7) необходимо проверять 2^n возможных решений

$$[A\pm1]=[A]+\mu[\pm1]. \tag{10}$$

Таким образом, полное решение задачи регуляризации матриц высокой размерности – n является задачей экспоненциальной вычислительной сложности. Если же мы пользуемся процедурами симметризации корреляционных матриц, то вычислительная сложность такой задачи близка к квадратичной. Получается, что, изменив условия решения задачи регуляризации под нейросетевой базис, удается получать технические решения с очень высокой устойчивостью.

Общие положения симметризации и ортогонализации нелинейных сверток

Когда осуществляется первичная обработка биометрических данных, ее стремятся сделать ортогональной. Как правило, используют ортогональные представления данных через их разложение в базисах Фурье, Уолша, Хаара. При этом устойчивость вычислений (обусловленность вычислений) повышается. Формально все процедуры ортогонализации при их программной реализации выполняются на дискретной сетке отсчетов (они дискретны), т.е. устойчивое преобразование из временной области в частотную и обратно дискретно, например, это могут быть свертки Фурье на сетках из 256 отсчетов:

$$[x(t_{256})] \to [x(jk\omega_{256})] \to [x(t_{256})]. \tag{11}$$

Для двухмерных преобразований Фурье, Уолша, Хаара свертки по интервалам превращаются в свертки по пространству состояний матриц 256×256. Трехмерное преобразование Фурье, Уолша, Хаара по своей сути является свертками по куб-матрицам исходных данных. Вычислительная сложность преобразований быстро увеличивается, однако их устойчивость остается высокой из-за ортогональности преобразований.

Выше мы показали, что симметризация корреляционных связей при вычислении квадратичных форм (например, меры Махаланобиса) также приводит к существенному росту устойчивости вычислений на малых выборках. При этом вычислительная сложность операций симметризации является квадратичной и формально записывается как простое понижение размерности

$$R(r_1, r_2, ..., r_n) \to R(r_1, r_1, ..., r_1) \to R_n(r). \tag{12}$$

К сожалению, симметризации вычислений уделено намного меньше внимания в сравнении с их ортогонализацией. Наиболее полно вопрос о симметризации вычислений исследован для приложений идентификации нелинейных динамических объектов [15]. Доказано, что отклики ядер Вольтерра в их симметричном и асимметричном варианте полностью совпадают. Сама же симметризация ядер Вольтерра может быть выполнена перестановкой асимметричных переменных с последующим усреднением:

$$h(\tau,\tau,\tau,) = h_3(\tau) = \frac{1}{6}\begin{Bmatrix} h(\tau_1,\tau_2,\tau_3,) + h(\tau_1,\tau_3,\tau_2,) + \\ h(\tau_2,\tau_1,\tau_3,) + h(\tau_2,\tau_3,\tau_1,) + \\ h(\tau_3,\tau_1,\tau_2,) + h(\tau_3,\tau_2,\tau_1,)) \end{Bmatrix}. \tag{13}$$

Уже после симметризации ядер Вольтерра может быть выполнена ортогонализация вычислений через применение полиномов Лагерра [15] или иными похожими методами ортогонализации [16–20].

Получается, что рассматриваемые в данной статье процедуры симметризации теоретически могут быть усилены процедурами ортогонализации. Тем не менее даже без ортогонализации и симметризации нейронные сети, обученные стандартизованным алгоритмом [6], позволяют получать рекордно устойчивые решения. Так удается решать обратную задачу нейросетевой биометрии для матриц нейросетевых функционалов размерности 416×256 при вариациях примеров биометрических данных порядка 20 % [21].

Заключение

Инженеров обычно удивляет та высокая точность решений управления, принимаемых людьми, опираясь на низкую точность датчиков или биометрических данных. Мы попытались показать, что устойчивость нейросетевых вычислений может быть многократно увеличена,

если отказаться от традиционного пути вычисления обычной меры Махалонобиса и перехода к специальному подбору одинаково коррелированных данных. Этот прием следует рассматривать как очень сильный метод структурной регуляризации. Как только мы отказываемся от того, что связи нейронов кем-то заданы и неизменны, мы получаем дополнительные возможности по структурной регуляризации. На данный момент симметризация связей нейросетевых многомерных преобразований гораздо более изучена, чем ортогонализация подобных преобразований.

Если опираться на положительный опыт идентификации нелинейных динамических объектов, то одновременное использование симметризации и ортогонализации вполне возможно. Одновременное использование симметризации и ортогонализации, видимо, является одним из перспективных направлений совершенствования нейросетевых преобразований.

Принципиально важным является то, что все нейросетевые преобразования являются свертками по пространству исходных данных. Именно это приводит к рекордным значениям устойчивости нейросетевых преобразований. В данной работе мы численно оценили эффективность процедуры симметризации корреляционных связей при обучении сетей квадратичных форм (5), что в конечном итоге должно дополнительно привлечь внимание исследователей и инженеров к процедурам симметризации.

Библиографический список

1. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвиль. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 652 с.
2. Вилзнер, Ю. В. Идентификация лиц в реальном времени с использованием сверточной нейронной сети и хэширующего леса / Ю. В. Вилзнер, В. С. Горбацевич, А. В. Воронков, Н. А. Костомаров // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 254–264.
3. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.
4. Галушкин, А. И. Нейронные сети: история развития / А. И. Галушкин, Я. З. Цыпкин. – М. : Радиотехника, 2001. – 840 с.
5. Волчихин, В. И. Быстрые алгоритмы обучения нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации : моногр. / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПензГУ, 2005. – 273 с.
6. ГОСТ Р 52633.5-2011 «Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа».
7. Волчихин, В. И. «Фрактально-корреляционный функционал, используемый при поиске пар слабо зависимых биометрических данных в малых выборках» / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Б. Б. Ахметов, Ю. И. Серикова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. – № 4. – С. 25–31.
8. Волчихин, В. И. Синтез и тестирование оракула, способного предсказывать асимметричные границы интервала действительного положения математического ожидания малых выборок биометрических данных / В. И. Волчихин, Н. А. Иванова, Ю. И. Серикова, А. Г. Банных // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 32–39.
9. Иванов, А. И. Снижение требований к размеру тестовой выборки биометрических данных при переходе к использованию многомерных корреляционных функционалов Байеса / А. И. Иванов, П. С. Ложников, А. Е. Сулавко, Ю. И. Серикова // Инфокоммуникационные технологии. – Т. 15, № 2. – С. 186–193.
10. Иванов, А. И. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф» / А. И. Иванов, О. С. Захаров. – URL: http://пниэи.рф/activity/science/noc.htm
11. Иванов, А. И. Нейросетевые технологии биометрической аутентификации пользователей открытых систем : автореф. дис. … д-ра техн. наук / А. И. Иванов. – Пенза, 2002. – 34 с.
12. Ахметов, Б. Б. Многомерные статистики существенно зависимых биометрических данных, порождаемые нейросетевыми эмуляторами квадратичных форм : моногр. / Б. Б. Ахметов, А. И. Иванов. – Алматы : Изд-во LEM, 2016. – 86 с.
13. Болл Руд. Руководство по биометрии : пер. с англ / Болл Руд, Коннел Джонатан Х., Панканти Шарат, Ратха Налини К., Сеньор Эндрю У. – М. : Техносфера, 2007. – 368 с.
14. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1979. – 248 с.

15. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 517 с.
16. Ли, Ю. Определение ядер Винера-Хопфа методом взаимной корреляции / Ю. Ли, М. Щецен // Техническая кибернетика за рубежом. – М. : Машиностроение, 1968.
17. Billings, S. A. Identification of nonlinear system (A survey) / S. A. Billings // Proc. IEEE, part D. – 1980. – Vol. 127, № 6. – P. 272–285.
18. Иванов, А. И. Быстрый синтез моделей нелинейных динамических систем с заданной погрешностью / А. И. Иванов // Измерительная техника. – 1995. – № 10. – С. 13–15.
19. Ivanov, A. I. Simple Numerical Method of Separabel Volterra Kernels Symmetrization / A. I. Ivanov // Engineering Simulation. – 1999. – Vol. 16. – P. 411–416.
20. Иванов, А. И. Одномерный аналог многомерной идентификации Ли-Щецена / А. И. Иванов // Управляющие системы и машины. – 1999. – № 2. – С. 16–21.
21. Волчихин, В. И. Нейросетевая молекула: решение обратной задачи биометрии через программную поддержку квантовой суперпозиции на выходах сети искусственных нейронов / В. И. Волчихин, А. И. Иванов // Вестник Мордовского университета. – 2017. – Т. 27, № 2. – С. 517–523.

Волчихин Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного университета
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: president@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich
doctor of technical sciences, professor,
president of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Иванов Александр Иванович
доктор технических наук, доцент,
начальник лаборатории биометрических и нейросетевых технологий,
Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Ivanov Alexander Ivanovich
doctor of technical sciences, associate professor,
head of biometric and neuronal nets technology laboratory,
Penza Scientific Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Малыгина Елена Александровна
кандидат технических наук, научный сотрудник,
межотраслевая лаборатория тестирования биометрических устройств и технологий,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mal890@yandex.ru

Malygina Elena Aleksandrovna
candidate of technical sciences, research assistant, interdisciplinary laboratory testing
of biometric devices and technologies,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Серикова Юлия Игоревна
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: julia-ska@yandex.ru

Serikova Yuliya Igorevna
postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.51:616-77
Волчихин, В. И.
Обучение сетей квадратичных форм на малых выборках биометрических данных с использованием процедуры симметризации корреляционных связей / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, Е. А. Малыгина, Ю. И. Серикова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 66–74. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-10.

УДК 615.471:616-073/97(075.8)

DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-11

А. Н. Спиркин, Н. В. Авдеева

ВЫЯВЛЕНИЕ ПАТОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ ПО АНАЛИЗУ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

A. N. Spirkin, N. V. Avdeeva

IDENTIFICATION OF PATHOLOGICAL STATES BY ANALYSIS OF BIOELECTRIC ACTIVITY

А н н о т а ц и я. ***Актуальность и цели.*** Объектом исследования являются параметры сигналов биоэлектрической активности головного мозга. Предметом исследования являются методы обработки данных электроэнцефалографии больных с группой риска по эпилепсии. Целью работы является разработка способа выявления патологических состояний биоэлектрической активности головного мозга, позволяющего прогнозировать возникновение эпилептических припадков. ***Материалы и методы.*** Для решения поставленных задач в работе использовались методы моделирования динамических систем Simulink. ***Результаты.*** Предложен способ выявления патологических состояний биоэлектрической активности головного мозга, позволяющий прогнозировать наступление эпилептического припадка. ***Выводы.*** Использование предложенного способа в системах мониторинга состояния больного эпилепсией позволяет автоматизировать процесс обработки большого объема ЭЭГ – информации и повысить достоверность выявления патологий у пациентов, входящих в группу риска с заболеванием эпилепсия.

A b s t r a c t. ***Background.*** The object of the study are the parameters of signals of brain bioelectric activity. The subject of the study are methods of processing data of electroencephalography of patients with a risk group for epilepsy. The aim of the work is to develop a method for detecting pathological states of brain bioelectric activity, which allows predicting the occurrence of epileptic seizures. ***Materials and methods.*** To solve the set tasks, Simulink simulation methods were used in the work. ***Results.*** A method is proposed for revealing the pathological states of the bioelectrical activity of the brain, which makes it possible to predict the onset of an epileptic fit. ***Conclusions.*** The use of the proposed method in the monitoring systems of the patient's state of epilepsy makes it possible to automate the process of processing a large volume of EEG information and to increase the reliability of pathology detection in patients at risk with epilepsy.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электроэнцефалография, биоэлектрическая активность головного мозга, паттерны, эпилептический очаг, спектральная плотность мощности.

K e y w o r d s: electroencephalography, bioelectrical activity of the brain, patterns, epileptic focus, spectral power density.

Есть такие заболевания, которые преследуют человечество на всем протяжении его развития. К числу таких заболеваний следует отнести эпилепсию. Наверное, многие из нас когда-нибудь в своей жизни, находясь в многолюдном месте, видели такую картину: рядомстоящий человек вдруг внезапно падает, его тело ломается в судорожном припадке, изо рта идет пена. Таков неприглядный облик эпилепсии. Эпилепсия – это хроническая неврологическая болезнь, для которой характерны приступы проявляющихся внезапно судорог. По современным представлениям, эпилепсия – это неоднородная группа заболеваний, клиника хронических

случаев которых характеризуется судорожными повторными приступами. Эпилептическое поражение головного мозга встречается у каждого сотого жителя Земли.

Для понимания причины возникновения эпилепсии необходимо рассмотреть природу возникновения эпилепсии. Передатчиком сигналов в пределах нервной системы является электрический импульс, генерируемый на поверхности нейрона. «Лишние» импульсы могут возникать и в нормальных условиях, но для этого в головном мозге предусмотрены специальные структуры, «гасящие» избыточную возбудимость клеток. Условием развития эпилепсии являются генетические дефекты этих самых структур, в результате чего мозг находится в постоянной судорожной готовности, которая в любой момент может «сдетонировать» приступом (рис. 1) [1, 2].

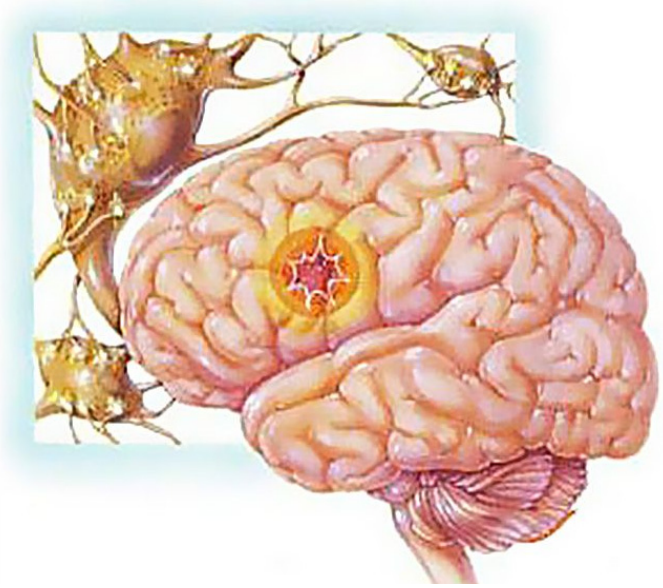


Рис. 1. Очаг эпилептической активности в коре головного мозга

Подобные генетические дефекты не развиваются на пустом месте. К числу факторов, которые могут спровоцировать появление эпилепсии, следует отнести следующие [3–5]:

– приобретенная во внутриутробный период недоразвитость отдельных мозговых структур, не рассматриваемая в рамках идиопатической эпилепсии;
– черепно-мозговые травмы;
– новообразования в головном мозге;
– хронический алкоголизм и наркомания;
– инфекционное поражение центральной нервной системы (менингит, энцефалит);
– побочный эффект некоторых препаратов (нейролептики, антидепрессанты, антибиотики);
– инсульт;
– рассеянный склероз.

В результате воздействия одного или нескольких перечисленных факторов в одном из полушарий головного мозга образуется конкретный эпилептический очаг, генерирующий избыточный электрический импульс. До определенного момента антиэпилептические структуры головного мозга способны нивелировать его, но в «час пик» электрический разряд все же «прорывается» сквозь защиту и проявляется первым припадком (рис. 2).

Эпилептический припадок представляет большую социальную опасность в силу внезапности его проявления, поэтому необходимо разработать методы и средства, позволяющее обнаружить надвигающийся припадок. Их наличие помогло бы изменить всю жизнь страдающих эпилепсией, так как пациенты будут уверены, что неожиданный приступ не поставит под угрозу их жизнь [4]. Хотя эпилептические приступы трудно предугадать заранее, простая электронная технология распознавания сигналов биоэлектрической активности могла бы оповещать близких, что больной в беде.

Рис. 2. Нейроны головного мозга при возникновении эпилептического припадка

Электроэнцефалография (ЭЭГ) – это единственный метод, который способен выявлять изменения, характерные лишь для эпилептических болезней. Суть ЭЭГ заключается в том, что пациенту на голову крепятся специальные электроды, с помощью которых регистрируют электрическую активность мозга в виде так называемых мозговых волн. При наличии на ЭЭГ высокоамплитудных вспышек активности (более 100 мкВ) – паттернов – судят об угрозе возникновения эпилептического припадка [10].

Современные достижения электроники позволяют регистрировать ЭЭГ в режиме реального времени (рис. 3). Это достигается путем размещения электродов в специальных устройствах, которые комфортно носить в течение длительного времени. Устройства обладают возможностью беспроводной передачи данных опекуну или лечащему врачу в случае приближения припадка. К сожалению, такие устройства пока выпускаются только за рубежом и не доступны отечественному пользователю.

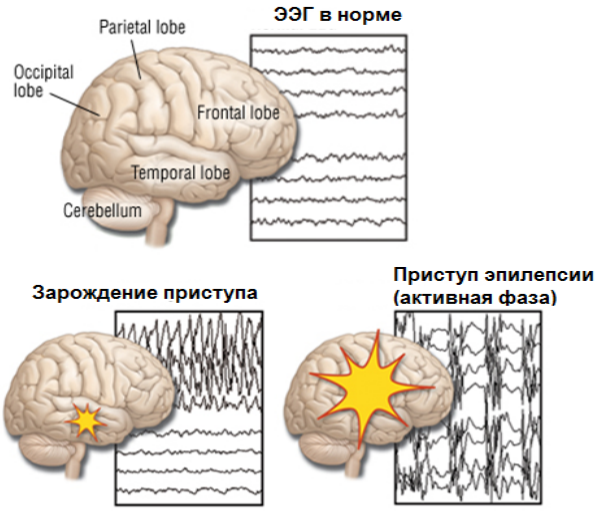
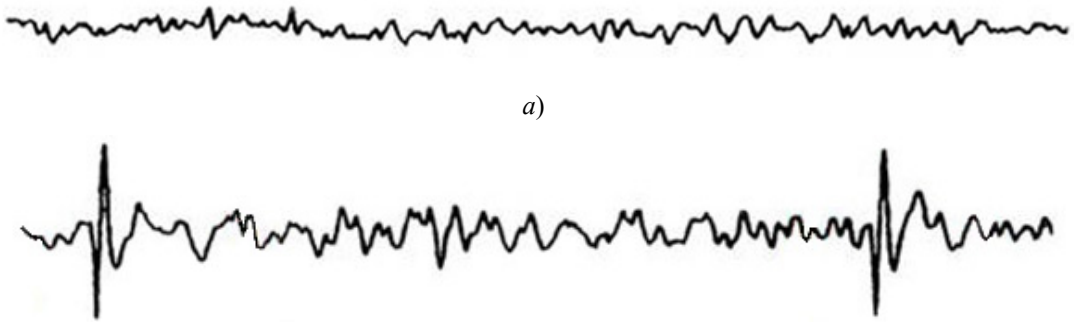


Рис. 3. Биоэлектрическая активность головного мозга при зарождении эпилептического припадка

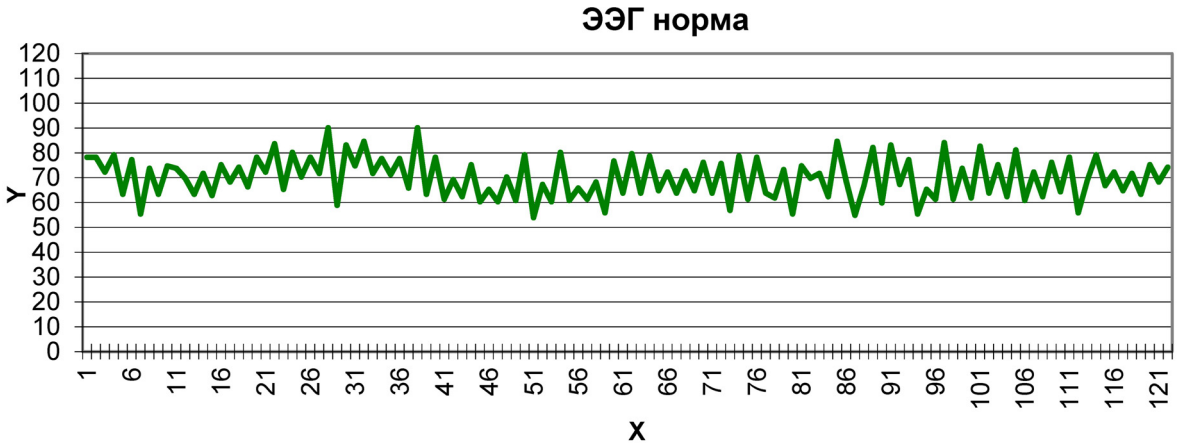
В данной статье предлагается способ выявления патологий путем анализа ЭЭГ, полученных при мониторинге состояния больного эпилепсией. На рис. 4 приведены сигналы ЭЭГ, соответствующие норме (*а*) и патологии (*б*). С помощью программы Graph2Digit [9] оцифровываем исследуемые сигналы, а в среде Microsoft Excel воссоздаем их графики (рис. 5).



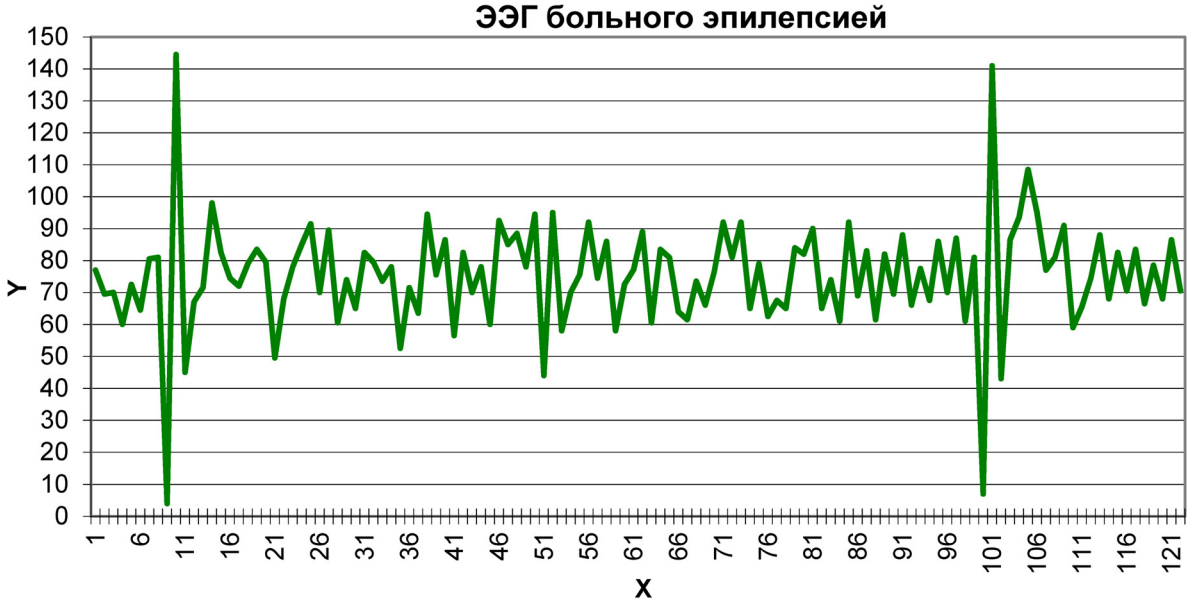
а)

б)

Рис. 4. Сигнал ЭЭГ: *а* – в норме; *б* – при патологии



а)



б)

Рис. 5. График ЭЭГ в среде Microsoft Excel:
а – при норме; *б* – при патологии

Далее числовые данные импортируем из среды Microsoft Excel в программу MATLAB, где формируем матрицу сигналов ЭЭГ (рис. 6), которую затем сохраняем в mat-файле.

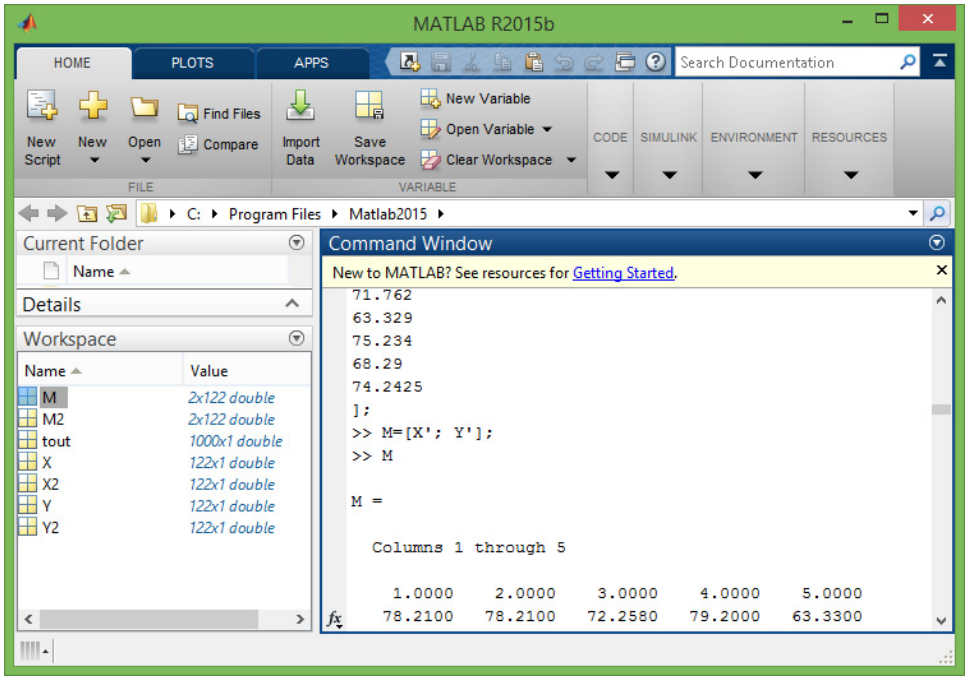


Рис. 6. Интерфейсное окно «Вывод матрицы ЭЭГ-сигнала»

На рис. 7 представлена разработанная авторами модель процедуры анализа сигнала ЭЭГ, созданная с помощью программного пакета Matlab – Simulink.

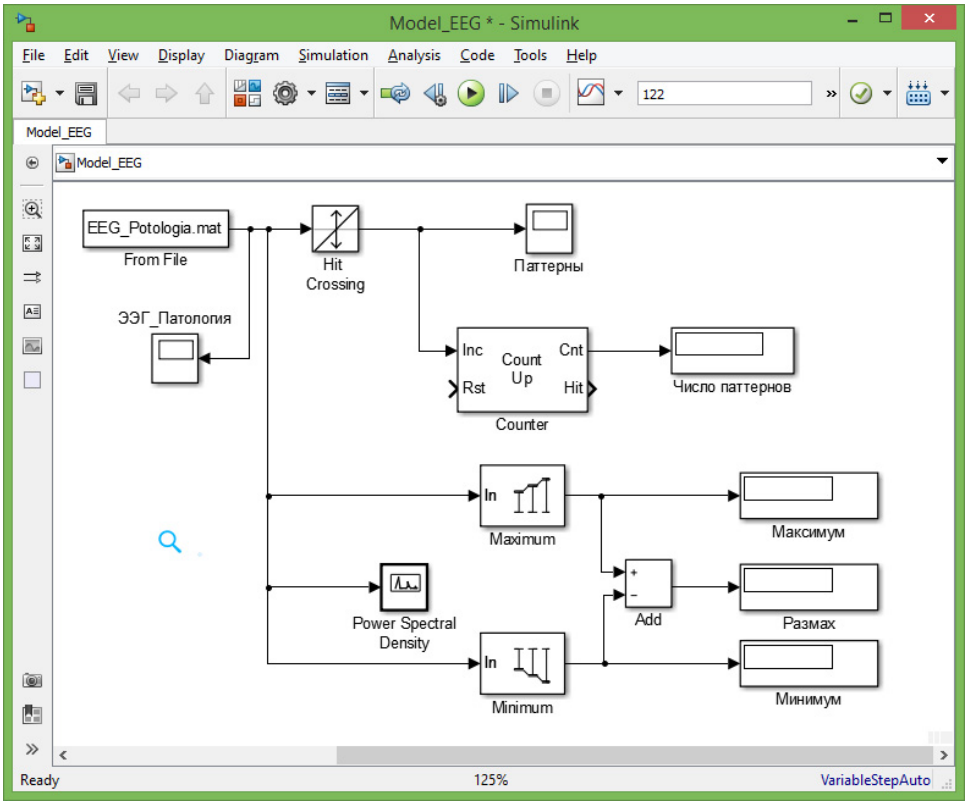


Рис. 7. Модель процедуры анализа сигнала ЭЭГ

В разработанной модели используется блок From File, с помощью которого можно импортировать исследуемый сигнал из сформированного ранее mat-файла. Параметры блока представлены на рис. 8.

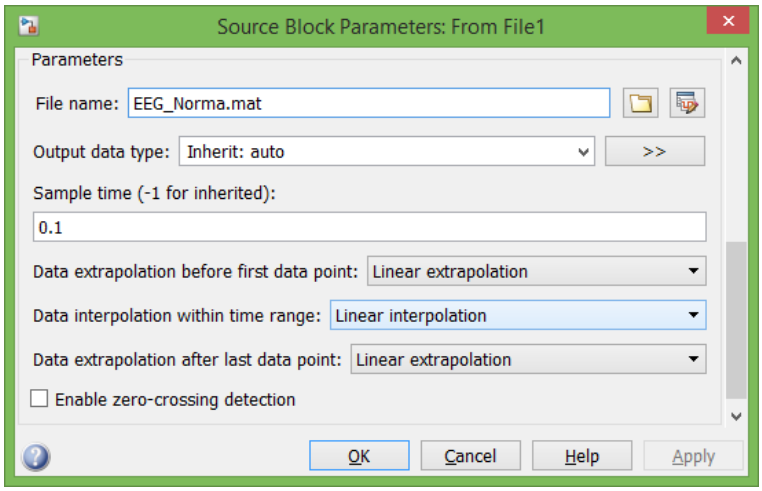
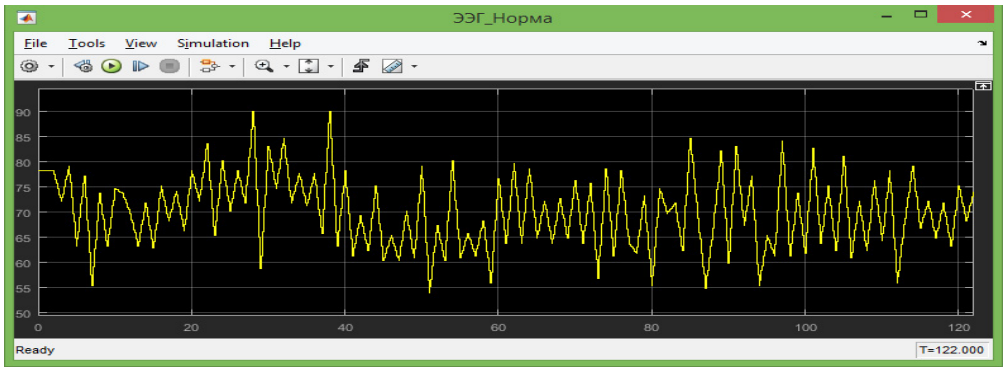
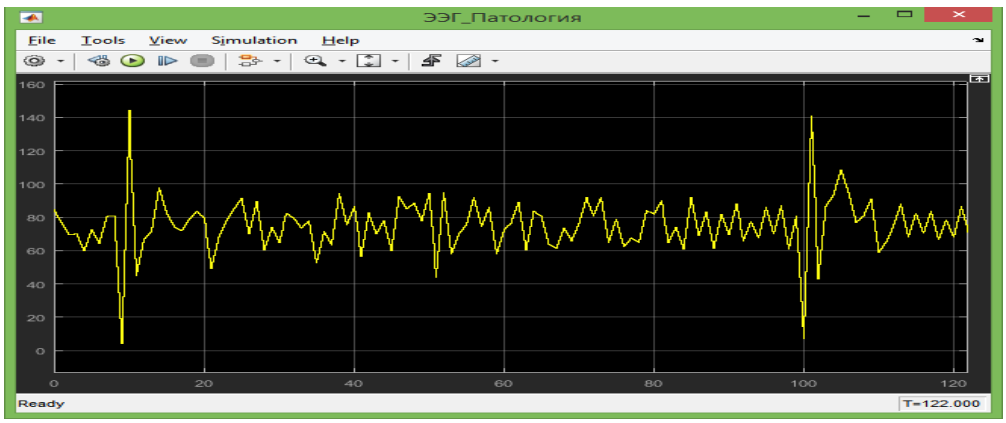


Рис. 8. Параметры блока From File

В качестве устройства вывода исследуемых сигналов в модели используется блок Scope. На рис. 9 приведены исследуемые сигналы в среде Simulink, полученные при использовании данного блока.



а)



б)

Рис. 9. Исследуемый сигнал ЭЭГ в среде Simulink:
а – в норме; *б* – при патологии

Определение в исследуемых сигналах ЭЭГ-паттернов, характерных для возникновения эпилептического припадка, в разработанной модели производится с помощью блока «Hit Crossing» [6]. Данный блок определяет моменты времени, когда входной сигнал пересекает пороговые значения. На рис. 10 показаны параметры блока «Hit crossing», выбранные нами для решения поставленной задачи:

– «Hit crossing offset» – 100 (значение, которое является пороговым для амплитуды биоэлектрического сигнала при угрозе возникновения эпилептического припадка);

– «Hit crossing direction»: either (параметр, фиксирующий любые пересечения порогового уровня).

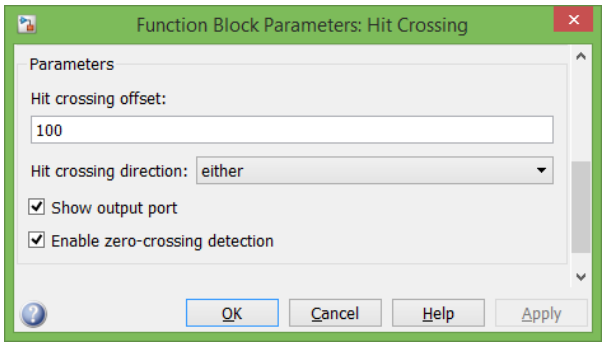


Рис. 10. Параметры блока Hit Crossing

Определение в исследуемых сигналах ЭЭГ-паттернов, характерных для возникновения эпилептического припадка, в разработанной модели производится с помощью блока Hit Crossing. Данный блок определяет момент времени, когда входной сигнал пересекает пороговые значения. В качестве параметров блока, представленных на рис. 10, направлением пересечения (Hit crossing direction) выбрано оба направления определения (either), а пороговое (Hit crossing offset) значение, пересечение которого исследуемым сигналом требуется идентифицировать, определено равным 100.

Подсчет количества ЭЭГ-паттернов производится с помощью счетчика (блок Counter), параметры которого приведены на рис. 11.

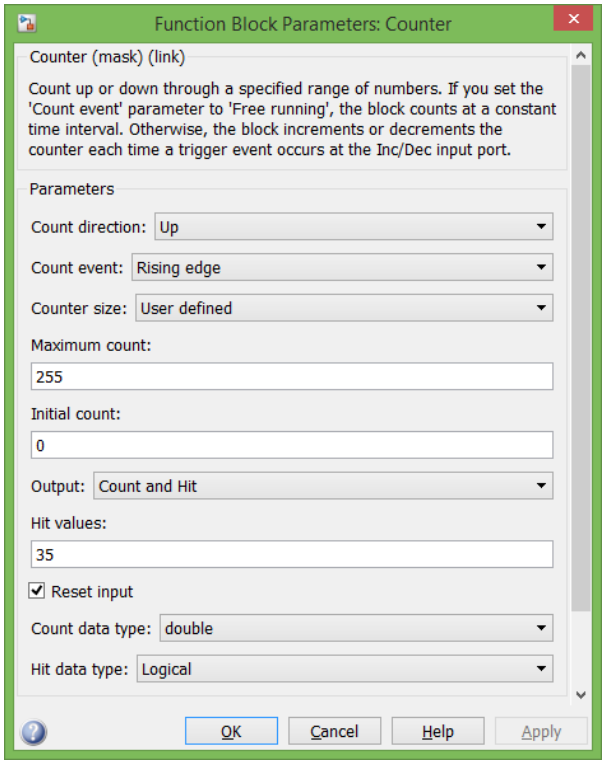


Рис. 11. Параметры блока Counter

С помощью блоков Maximum и Minimum можно определять максимальное, минимальное и размах значений сигнала ЭЭГ. Параметры блоков приведены на рис. 12.

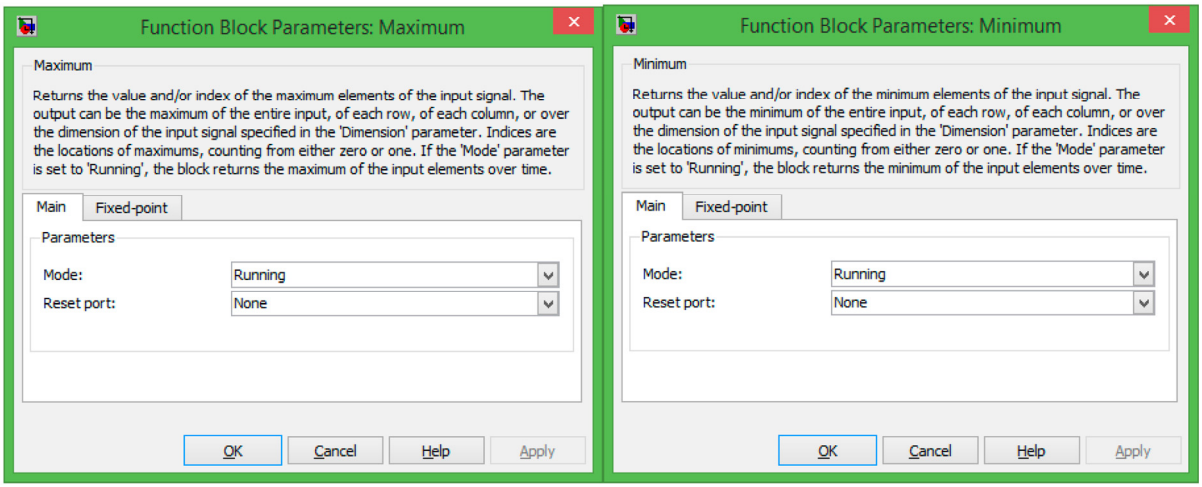


Рис. 12. Параметры соответственно блоков Maximum и Minimum

Для просмотра спектральной плотности сигнала был использован анализатор спектра Power Spectral Density. В окне настройки анализатора (рис. 13) задаем следующие параметры [7, 8]:

– Length of buffer – длина буфера (по умолчанию 128);

– Number of points for fft – число анализируемых точек (по умолчанию 512);

– Plot after how many points – количество точек, после которого производится построение графика (по умолчанию 64);

– Sample time – период дискретизации.

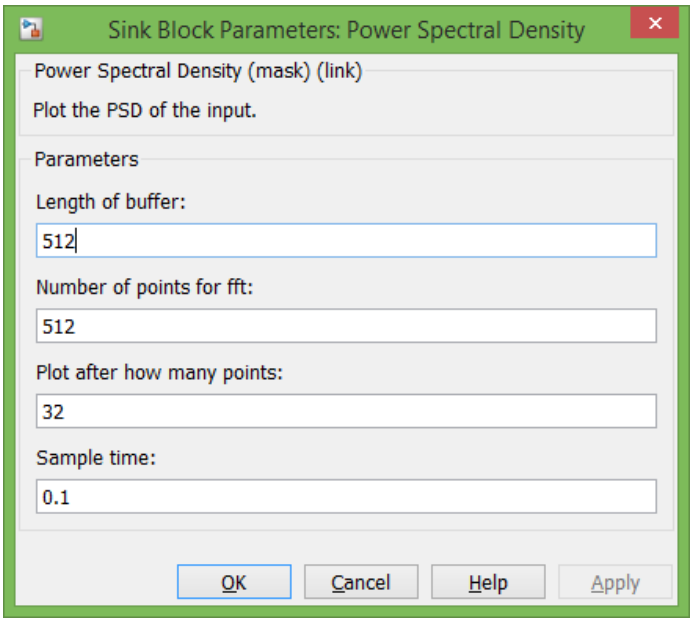
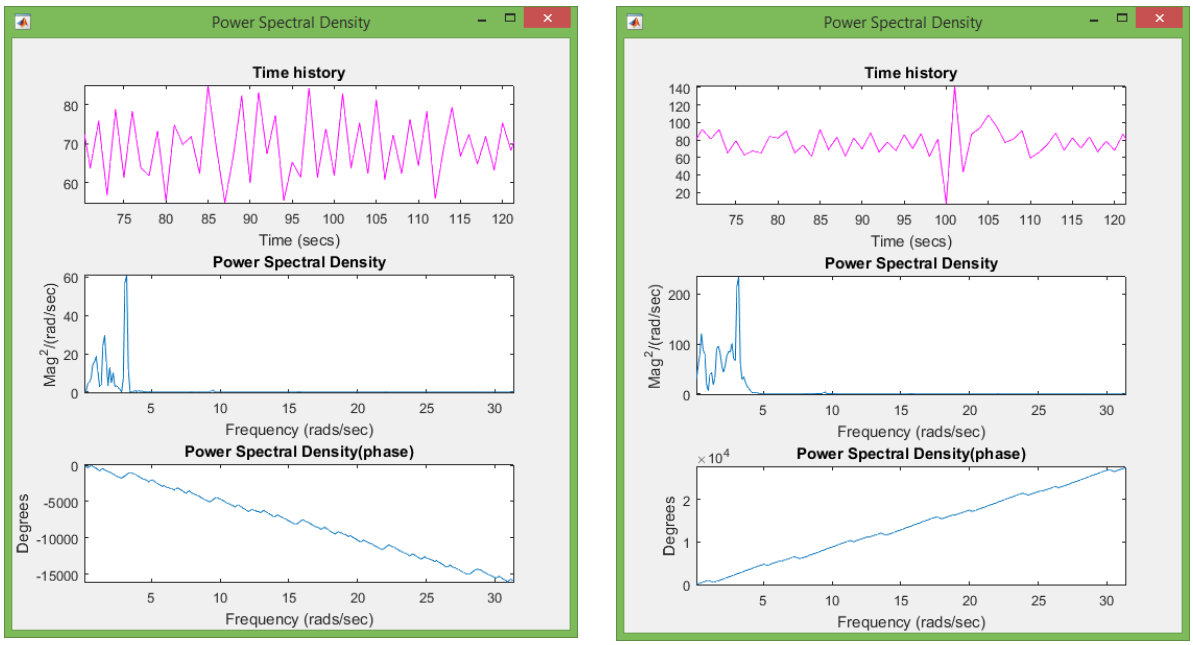


Рис. 13. Параметры блока Power Spectral Density

Результаты анализа спектра исследуемых сигналов представлены на рис. 14, где Time history – форма исследуемого сигнала, Power Spectral Density – плотность спектральной мощности (по амплитуде), Power Spectral Density (phase) – плотность спектральной мощности по фазе.

Из представленных результатов следует, что при наличии патологии происходит резкое возрастание амплитуды ЭЭГ-сигнала, изменяется частотный спектр и возрастает плотность спектральной мощности, следовательно, предложенная модель позволяет определить ЭЭГ-паттерны, свидетельствующие об угрозе возникновения эпилептического припадка.

Таким образом, при встраивании предложенной модели в систему мониторинга за состоянием больного эпилепсией можно значительно повысить достоверность предсказания припадка.



а) *б*)

Рис. 14. Результаты анализа спектральной плотности сигнала ЭЭГ:
а – в норме; *б* – при патологии

Библиографический список

1. Харчук, С. М. Лечение эпилепсии по принципам доказательной медицины / С. М. Харчук, Д. А. Молчанов. – М. : Здоровье, 2006. – 381с.
2. Напреенко, А. К. Психиатрия / А. К. Напреенко. – М. : Здоровье, 2001. – 359с.
3. Воронков, Г. Л. Справочник врача-психиатра / Г. Л. Воронков. – М. : Здоровье, 1991. – 563 с.
4. Тиганов, А. С. Руководство по психиатрии / А. С. Тиганов. – М. : Медицина, 1999. – 650 с.
5. Лудянский, Э. А. Руководство по заболеваниям нервной системы / Э. А. Лудянский. – Вологда : Полиграфист, 1995. – 257 с.
6. Рангайян, Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход : учеб. пособие / Р. М. Рангайян. – М. : Физматлит, 2010. – 436 с.
7. Дьяконов, В. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В. Дьяконов. – М. : Солон – Пресс, 2002. – 592 с.
8. Айфичер, Э. С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э. С. Айфичер, Б. У. Джервис. – М. : Вильямс, 2004. – 992 с.
9. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 758 с.
10. Файбушевич, А. Г. Применение методов клинической информатики в комплексных исследованиях и лечении больных : учеб. пособие / А. Г. Файбушевич, В. Д. Проценко. – М. : Изд-во РУДН, 2008. – 537 с.

Спиркин Андрей Николаевич
магистрант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: Rakahanga10160@yandex.ru

Spirkin Andrey Nikolaevich
master degree student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukova avenue / Gagarin street,
Penza, Russia)

Авдеева Надежда Владиславовна
магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: nad-avdeeva@mail.ru

Avdeeva Nadezhda Vladislavovna
master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 615.471:616-073/97(075.8)
Спиркин, А. Н.
Выявление патологических состояний по анализу биоэлектрической активности / А. Н. Спиркин, Н. В. Авдеева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 1 (23). – С. 75–84. DOI 10.21685/2307-5538-2018-1-11.