

Секция 07 «Новые задачи метрологии 21 века»

Содержание	стр.
Гнедых Д.С., Костромина С.Н. <i>Санкт-Петербургский государственный университет</i> , «Нейрофизиологические методы измерения психических явлений: проблемы и перспективы»	233
И.А. Николаева, <i>Курганский государственный университет</i> «Опыт использования неградуированной графической шкалы в определении оценочного стиля эксперта»	240
И.Ф. Шишкин, <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> «Парадигмы измерений»	247
К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов, Ю.В. Бакшеева, <i>ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения</i> «Прогнозирование состояния систем как актуальная задача метрологии»	261
Соколов Б.В., Бураков В.В, Микони С.В., Юсупов Р.М. <i>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН), Университет ИТМО</i> «Методы и алгоритмы оценивания и управления качеством моделей сложных объектов»	272
Г.Ф. Малыхина, <i>СПб политехнический университет Петра Великого</i> «Нейросетевой подход к измерениям в условиях неполной информации»	290
Л.А. Станкевич, К.М. Сонькин, Н.В. Шемякина, Ж.В. Нагорнова, Ю.Г. Хоменко, Ф.В. Гунделах, А.В. Чевыкалова, <i>СПб университет Петра Великого, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН</i> «Регистрация, преобразование и классификация ЭЭГ-паттернов воображаемых движений в реальном времени для интерфейса мозг-компьютер»	299
М.П. Генри, <i>Университет Оксфорда</i> «Введение в обработку сигналов PRISM»	305
В.С. Фетисов, З.И. Харисова, <i>Уфимский государственный авиационный технический университет</i> «Интеллектуальные измерительные системы для поточных измерений с функцией дообучения в процессе работы»	317

А.А. Калашников, <i>Московский филиал "ЦЕНТРАТОМТЕХЭНЕРГО"</i> <i>АО "АТОМТЕХЭНЕРГО"</i>	327
«Повышение метрологической достоверности многопараметрических измерений, выполняемых гидростатическими уровнемерами»	
В.М. Гуревич, <i>ЗАО «Центрприбор»</i>	338
«Оптимизация характеристик времяпролетных ультразвуковых расходомеров»	
Любимцев В.А., Холодкевич С.В., Дружинин И.И. <i>Санкт- Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербургский государственный университет, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»</i>	351
«Метрологическое обеспечение биоэлектронных систем диагностики острой токсичности воды»	
С.И. Рембеза, Н.Н. Кошелева, Е.С. Рембеза, Т.В. Свистова, <i>ФГБОУ ВО Воронежский государственный Технический университет, ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет</i>	360
«Электронный нос – мечта или реальность?»	
А. Лекосье, К. Ча-Токи, С. Ричир, <i>LAMPA laboratory, Arts et Métiers Paris Tech Angers</i>	366
«Важность измерения опыта пользователя в 21 веке: вызов инновационных технологий»	
Х.Л.Радев, В.Й.Богоев, В.А.Василев, И.Х.Благов, <i>Технический университет (София, Болгария)</i>	383
«Сравнительный анализ методов отклонения от постоянства оси вращения объектов, осуществляющих ротационные движения»	

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПСИХИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Гнедых Д.С., Костромина С.Н.

Санкт-Петербургский государственный университет

d.gnedyh@spbu.ru
s.kostromina@spbu.ru

Одна из ключевых методологических задач психологической науки – объективизация изучаемых психологических явлений. Решение этой задачи во многом определяет вектор принадлежности психологии к гуманитарному или естественно-научному знанию. На протяжении последних столетий психология упорно стремилась занять свое место среди естественно-научных дисциплин в том числе, за счет активного внедрения разнообразных математико-статистических программ и методов измерений. Современный же этап развития психологии во многом связан с активным внедрением методов нейровизуализации – электроэнцефалографии, магнитно-резонансной томографии, позитронно-эмиссионной томографии и др. В связи с чем, как никогда актуальным становится высказывание И.П. Павлова: «Я убежден, что приближается важный этап человеческой мысли, когда физиологическое и психологическое, объективное и субъективное действительно сольются, когда фактически разрешится или отпадет естественным путем мучительное противоречие или противопоставление моего сознания моему телу» (Павлов, XV Международный физиологический конгресс, Рим, 1932 г.).

И действительно, с того момента, как психологами была признана неразрывная связь физиологических процессов головного мозга и нервной системы в целом с психической деятельностью (мышлением, вниманием, восприятием, речью и др.), нейрофизиологические методы начали постепенно внедряться в психологические исследования, в настоящее время занимая там прочное место. На данный момент большинство направлений современной западной психологии развиваются в тесной связи с нейронауками, а подготовка специалистов идет с ориентацией на практику в организации междисциплинарных научных исследований [6].

Преимущества нейрофизиологических методов по сравнению с другими психодиагностическими методиками (например, тестами), очевидны – в отличие от субъективных отчетов испытуемых они дают информацию об объективных параметрах процесса, имеют возможность зафиксировать психофизиологическую реакцию до миллисекунд, выявить некоторые неосознаваемые нами процессы (которым мы сами не можем

дать отчет) и т.д. Объективизация измерения в психологии позволяет локализовать множество факторов, связанных с намеренным искажением или субъективной погрешностью фиксируемых данных. При этом, несмотря на перечисленные преимущества, изучение именно психических процессов и явлений с помощью данной группы методов имеет свои сложности. Основной проблемой является валидность результатов, полученных с использованием нейрофизиологических методов – действительно ли регистрируемые нейрофизиологические показатели релевантно характеризуют то психологическое явление, которое интересует исследователя? Возможно ли в принципе с помощью данных методов комплексное исследование психологических феноменов? Эти вопросы возникают в связи с тем, что, несмотря на прорыв в области нейрокогнитивных исследований, решение психофизиологической проблемы до сих пор остается открытым.

В ходе статьи мы кратко и последовательно раскроем сущность и роль нейрофизиологических методов в психологических исследованиях, а также обозначим ряд проблем в данной области и то, как мы видим перспективы их совместного с психологами, метрологами и нейрофизиологами решения.

Основная цель нейрофизиологических исследований психических явлений – поиск и объяснение физиологических закономерностей и механизмов, служащих основанием психической активности человека. Данная область исследований получила название «картирование мозга» (brain imaging), или «чтение мозга» (brain reading) [2, 11, 12]. Принцип работы таких измерительных приборов как фМРТ или ЭЭГ строится на измерении электромагнитных волн (для фМРТ) и электрических сигналов, исходящих с поверхности головы (для ЭЭГ). Другими вариантами выступают регистрация магнитных полей, генерируемых мозгом в результате его нейронной активности (МЭГ), а также фиксация изменения скорости обмена веществ в активированных зонах мозга, включенных в решение задачи (ПЭТ).

Наиболее часто данные технологии используются при изучении когнитивной активности мозга, результатом которого становится картирование зон мозга, ответственных за распознавание и восприятие различных объектов (лиц, цвета, речи, изображения тела человека или его частей и т.п.), анализ речи, решение разнообразных задач, научение, саморегуляцию, познавательную активность и т.д. Приведем несколько примеров.

Одним из вопросов психологической теории является наличие или отсутствие единого механизма внимания. Данный вопрос активно исследуется с помощью нейрофизиологических методов – ведется поиск зоны головного мозга для разных форм зрительного внимания [5, 9].

Другой пример. В результате исследований активности мозга с помощью фМРТ в ситуациях, когда человек говорил неправду, было выявлено, что разные типы лжи (о прошлом или будущем, о других, о себе) имеют некоторые отличия в паттернах активности мозга. При этом паттерны в целом при воспроизведении лжи сильно отличаются от паттерна активности мозга тогда, когда человек говорит правду [8, 14]. Еще пример. Для решения психологических проблем образования изучаются нейрофизиологические ресурсы рабочей памяти и механизмы социального поведения [10, 13]. Как следствие, формируется доказательная база для оптимизации процессов усвоения учебного материала и регуляции поведения школьников [3].

Таким образом, данные методы позволяют регистрировать ход переработки информации, а также получить схематизированное изображение когерентно работающих зон мозга в процессе решения определенной задачи.

Проведенный нами анализ исследований психических явлений с помощью нейрофизиологических методов позволил нам выделить ряд проблем и спорных моментов:

1. Выбор оптимального метода и средств измерения, который приведет к наиболее точным результатам. От средств, и, соответственно, методов измерений зависит правильное определение значения измеряемой величины [1]. Среди объективных недостатков ЭЭГ выделяют очень низкое пространственное разрешение (точность локализации «наблюдаемого явления» варьирует от 0,5 до 1,5 см). Таким образом, описание некоторых психических явлений с его помощью становится неполным, многое скрыто от исследователя, и вывод, который он делает на основе только этих данных, односторонний. Это может компенсироваться использованием других методов, например, МРТ (томографический срез достигает 1 мм), но у него тоже есть недостаток – низкое разрешение по времени. То есть исследователю нужно определиться, что более точно измерит интересующее его явление, оптимально отразит его сущность – и сделать выбор в пользу времени или же локализации. Неправильный выбор может привести к некорректным выводам.

2. Другая проблема, с которой сталкивается исследователь при определении средств измерений, это то, что многие психические явления носят комплексный характер, имеют сложные составляющие. Например, творческое мышление, которое в настоящее время активно изучается с помощью ЭЭГ, фМРТ (О. М. Разумникова, М. Г. Старченко, С. Г. Данько, О.С. Саакян, Д. В. Захарченко и Н.Е. Свидерской, R. Arden, Robert S. Chavez, R. Grazioplene, Rex E. Jung). А. Fink с коллегами (2007) было проведено исследование активности зон головного мозга в диапазоне альфа-ритма при решении творческих (изобретении необычного

использования обычных предметов) и нетворческих заданий (простая характеристика свойств предметов). Были выявлены следующие значимые различия – мощность альфа-ритма в правой затылочной области выше у более креативных участников исследования, чем у менее креативных. Но стоит отметить, что при решении данных задач была задействована совокупность процессов, сложно отделимых друг от друга – память, восприятие, речь, внимание, воображение. Целесообразно ли все это обобщить под названием «креативность»? Как их дифференцировать друг от друга и измерить, какой вклад вносит каждый из них в креативность на уровне нейрофизиологии? В настоящее время эта проблема остается нерешенной, что вносит определенные трудности в изучение сложных психических явлений с помощью нейрофизиологических методов.

Наличие данной проблемы выражается и в получении противоречивых данных при использовании одного и того же метода для изучения одного и того же явления. Например, обращаясь к другим исследованиям креативности: результаты одних из первых электрофизиологических исследований показали повышение активности лобных долей коры ГМ во время решения творческой задачи, других – снижение [4]. При объяснении подобных противоречий ученые сходятся во мнении, что, с одной стороны, существует локальная специализация мозга, а с другой – гибкий учет принципов его работы (К.С. Лешли, И.П. Павлов). Но это объяснение, на наш взгляд, не должно исключать устранение недостатков в нейрофизиологических измерениях и поиск лучшего доказательства соответствия физиологических процессов психическим.

3. Еще одна проблема – учет степени сложности и динамичности функциональной активности психической системы. Нейрофизиологическое измерение предполагает фиксацию последовательности изменений протекающих процессов и вариативность их изменчивости во временном диапазоне. Решение проблемы синхронизации одновременно активирующихся зон мозга решается на основе спектрального анализа, устанавливающего степень когерентности происходящих изменений между разными участками мозга (в интернейрональной сети). Однако, умственная активность характеризуется не только последовательным движением в домене (активированной зоне головного мозга) и взаимодействием между зонами, но и может протекать разными путями внутри домена, в результате образуя сложную внутреннюю (интранейрональную) сеть, изменчивость которой зависит от индивидуальной архитектоники и пластичности мозга. Дополнительными факторами выступают процессы развития и деградации нейрональной сети, рост активности которой отражает процессы реорганизации мозга на определенном этапе жизнедеятельности, свидетельствуя о возможностях в

определенном возрасте и контексте. На этом фоне представляется затруднительным учет всего спектра вариаций и повторение измерений для получения реплицируемого результата в имеющейся системе нейрофизиологических координат, не говоря уже о трансформации его на язык психометрии с целью последующей обработки. Как следствие, возникает сразу две проблемы. Во-первых, исследователям приходится упрощать интерпретацию данных, усредняя их и вынося за скобки принципы работы мозга как саморазвивающейся системы, например, такие как флуктуация и неравновесность. Во-вторых, данные нейрофизиологических измерений и психологические (поведенческие) данные обрабатываются раздельно, и их совместная интерпретация для более глубокого понимания природы психического явления крайне затруднительна.

4. Обеспечение точности измерений психических явлений на основе нейрофизиологических методов. Повышение «точности» измерений – это задача исследователей метрологов, психологов или нейрофизиологов?

Одна из основных трудностей, которая может возникнуть при решении данной проблемы, и на которую указывал Черноризов А.М., как нам кажется, это различие в терминологическом аппарате при описании психических явлений, мозговых механизмов и измерительных систем в разных науках. Черноризов А.М., иллюстрируя данную проблему, приводит следующий пример: в понятийном аппарате психологии доминируют качественные категории («смысл», «ценность», «Я-концепция»), а в понятийном аппарате естественно-научных дисциплин (в частности, нейронаук и метрологии) — количественные категории («масса», «энергия», «мощность», «электрический потенциал» и т.п.) [6]. Вследствие данных особенностей может возникать недопонимание между представителями разных наук при построении междисциплинарных исследований. Например, психологам нужно при описании психических явлений перейти на язык метрологии, то есть разложить психические явления на конкретные единицы величин (скорости, напряжения, объема и т.п.), которые можно объективно измерить. Найти корреляты нематериального, недоступного для прямого наблюдения психического явления с материальным, наблюдаемым. Это не всегда является очевидным, возможным и правомерным, исходя из вышесказанного. Можем ли мы измерить «объем» творческого мышления в принятых для этого единицах измерения – в метрах? Очевидно, что такое сопоставление невозможно. Тем не менее, единое понимание сущности какого-либо явления для представителей различных областей науки может помочь повысить понимание того, *что* именно нужно измерить, и как следствие, повысить точность измерения и интерпретации результатов.

Решение вопроса о том, что именно будет измеряться и какими методами, является принципиально важным для получения достоверного результата. Как правило, когда речь идет об исследовании психического явления нейрофизиологическими методами, то психологи прежде всего обращаются к знаниям нейрофизиологии. При этом важную роль играет обеспечение единства и точности измерений, что и является одной из задач метрологии.

Таким образом, для разрешения выявленных противоречий при измерении психических явлений с помощью нейрофизиологических методов требуется активное сотрудничество специалистов всех обозначенных областей (рис.1).



Литература

1. Бисерова В.А., Демидова Н.В., Якорева А.С. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: ЭКСМО. 2007. 10 с.
2. Иваницкий А.М. —Чтение мозга: достижения, перспективы и этические проблемы. Журнал высшей нервной деятельности. 2012. Т. 62, вып. 2. С. 133–142.
3. Костромина С.Н., Бордовская Н.В., Искра Н.Н., Чувгунова О.А., Гнедых Д.С., Курмакаева Д.М. Нейронаука, психология и образование: проблемы и перспективы междисциплинарных исследований. Психологический журнал. 2015. Том 36, №4, С. 61-70.
4. Маркина Н.В. Загадки и противоречия творческого мозга. Химия и жизнь. 2008. №11. URL: http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/430728/Zagadki_i_protivorechiya_tvorcheskogo_mozga
5. Фаликман М.В. Внимание. М.: АСАДЕМ'А, 2006. 453 с.

6. Черноризов А.М. «Проблемное поле» современной психофизиологии: от нанонейроники до сознания. Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2007. № 3. С. 15-43.
7. Fink A., Benedek M., Grabner R.H., Staudt B., Neubauer A.C. Creativity meets neuroscience: Experimental tasks for the neuroscientific study of creative thinking. *Methods*. 2007. № 42. P. 68–76.
8. Ganis G., Kosslyn S.M. fMRI studies of different types of deception. *International Journal of Psychophysiology*. 2006. Vol. 61, №3.
9. Kanwisher N, Wojciulik E. Visual attention: insights from brain imaging. *Nature Reviews: Neuroscience*. 2000. №1. P. 91–100.
10. Kegan R. What —forml transforms?: a constructive-developmental approach to transformative learning. In J. Mezirow and Associates (eds.). *Learning as transformation: critical perspectives on a theory in progress*. San Francisco: Jossey-Bass. 2000. P. 35–70.
11. Posner M.I., DiGirolamo G.J., Fernandez-Duque D. Brain mechanisms of cognitive skills. *Consciousness and cognition*. 1997. №6. P. 267– 290.
12. Rose N. Reading the human brain: how the mind became legible. *BODY & SOCIETY*. 2016. Vol. 22 (2). P.140-177.
13. Schrott L.M. Effect of training and environment on brain morphology and behavior. *Acta Paediatrica Scandanavia*. 1997. № 422 (Suppl). P. 45–47.
14. Vendemia, J.M.C. Detection of deception. *Polygraph*. 2003. №32(2). P. 97-106.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕГРАДУИРОВАННОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ОЦЕНОЧНОГО СТИЛЯ ЭКСПЕРТА

Николаева И.А.

Курганский государственный университет

nikolaeva-irina@yandex.ru

Точность экспертной оценки зависит от ряда факторов. В качестве наиболее сильных, влияющих на процесс оценивания, называют тип оценочной шкалы, способ представления объектов эксперту и заданный способ оценивания [6]. Это «внешние», заданные факторы. Наиболее весомым «внутренним» фактором следует считать *оценочный стиль* эксперта. Понятие «оценочный стиль» означает устойчивые предпочтения человека к использованию тех или иных *способов оценивания* [1, 2].

Оценочный стиль, с одной стороны, отражает индивидуальные эмоционально-когнитивные особенности эксперта, поэтому исследователи оценочного стиля утверждают наличие универсальных стилевых характеристик экспертов, проявляющихся в их оценках безотносительно к объектам оценки.

С другой стороны, оценочный стиль существует в рамках определенной *задачи и условий оценивания*, которые способствуют или препятствуют проявлению конкретных параметров оценочного стиля. Несмотря на внешне заданные условия, оценочная деятельность осуществляется по внутренним правилам субъекта, особенно если это касается оценки социальных объектов и явлений, других людей. ИмPLICITные правила обычно не осознаются самим экспертом. По мнению Р. Сесconi, F. Franceschini, M. Galetto, [7] общие имPLICITные процессы лежат в основе и предпочтения, и оценки, и измерения. Поэтому, обсуждая далее оценочный стиль эксперта, мы будем иметь в виду и стиль предпочтений.

Условия экспериментов, в которых моделируется оценочная деятельность, а также различные *способы обработки экспертных оценок* позволяют выявить определенные параметры оценочного стиля. В организации условий оценивания, в подборе оценочной шкалы возникает *проблема соответствия или совместимости (compatible)* [8] заданной шкалы способу мышления эксперта. Масштаб шкалы должен быть наиболее значим для эксперта. Кроме того, существует проблема кодификации субъективной информации.

Для объективации скрытых имPLICITных процессов используют различные приемы. Наиболее известным и точным средством фиксации имPLICITных предпочтений считается скорость реакции при выборе

предпочитаемого стимула в задаче оценки объекта на принадлежность той или иной категории (имплицитный ассоциативный тест, IAT). Ограничением данного метода является выявление имплицитных предпочтений по отношению только к отдельному объекту или отдельной категории.

В психосемантическом эксперименте также выявляются индивидуальные имплицитные предпочтения, которые влияют на оценки объектов. Н.Н.Батулин, И.В.Выбойщик, предлагали экспертам полярные психосемантические шкалы («тяжелый-легкий», «хороший-плохой» и пр.) для оценки искусственных объектов. После экспертизы шкалы градуировались по 10-балльной системе для последующей статистической обработки экспертных оценок, что позволило выделить целый ряд параметров оценочного стиля: *валентность, поляризация, детализация, изменчивость, оценочность, дифференцированность* [2].

В современных прикладных исследованиях широко используется шкала «best-worst», в том числе для оценки сложных многопараметрических объектов в условиях высокой неопределенности, а также для решения проблем совмещения экспертных оценок в групповых решениях [9]. Данная шкала предлагается в форме дискретного биполярного выбора.

В нашем эксперименте также была поставлена задача выявить оценочный стиль, обусловленный глобальными имплицитными представлениями о наилучшем и наихудшем.

Новизна нашей экспериментальной процедуры изучения оценочного стиля состоит в ряде свойств, которые мы внесли в использование шкалы «best-worst». Модификация шкалы обусловлена тем, что она предназначена для выявления оценочного стиля сложных социальных объектов и явлений, непосредственно связанных с личностными ценностями экспертов. В конструировании шкалы мы стремились решить вышеуказанные проблемы «совместимости» шкалы с имплицитными мерами экспертов и проблему кодификации субъективной информации.

Во-первых, шкала является континуальной и неградуированной, что дает возможность экспертам реализовать свой имплицитный способ оценки, не ограничивая его каким-либо масштабом. Во-вторых, социальные оценки всегда соотносятся с Я-системой как системой отсчета. Интуитивно субъект «примеряет на себя» лучшее или худшее, или равноценное себе. Поэтому на данной шкале присутствует «Я»-критерий (Self). Данный критерий вносится на шкалу перед процедурой оценки самим экспертом, поскольку критерии «best», «worst», «Self» имплицитно взаимосвязаны и взаимоопределяемы, и их соотношение индивидуально. Третье свойство шкалы – соответствие культурному стереотипу оценки социальных явлений в форме культурной метафоры «низшее – высшее».

Оценки «низшее – высшее» применяются во всех областях гуманитарной сферы и отражают фундаментальные ценностные отношения человека. Поэтому наша шкала «best – Self – worst» имеет форму вертикали: «низшее (наихудшее) – высшее (наилучшее)».

Проблема выбора значимых объектов для экспертной оценки решалась следующим образом: эксперты записывали всех людей, которые «приходили им в голову». Первоначально инструкция предусматривала выписать 100 человек. В последующих экспериментах формулировка была изменена на «не менее 50». В последних экспериментах инструкция стала еще более свободной: требуется, записывать людей «до тех пор, пока они приходят в голову». Таким образом, «вычерпывается» доступное для эксперта социальное содержание его сознания в виде образов других людей. Именно к другим людям у каждого субъекта имеется некоторое устойчивое пристрастное отношение в форме ценностной оценки. Совокупность этих оценок, которые в такой форме «хранятся» в сознании и могут быть эксплицированы, позволит нам выявить устойчивые свойства оценочной деятельности экспертов.

Проблема кодификации содержания информации, соответствия оцениваемых категорий имплицитному значению этих категорий у экспертов была решена тем, что в эксперименте мы могли исключить все другие оценочные категории помимо трех вышеуказанных. Категории «best», «worst», «Self» являются максимально обобщенными, самыми универсальными в человеческой культуре. С другой стороны, они подразумевают высокую индивидуализацию содержания для каждого субъекта. Таким образом, использование данных категорий позволяет снять противоречие между общим и индивидуальным, имплицитным. Для выявления оценочного стиля эксперта в данном случае мы можем обойтись без конкретизации индивидуального содержания этих общих категорий¹.

Процедура оценки заключается в том, что эксперт размещает на биполярной вертикальной шкале «наилучшее (best) – наихудшее (worst)» сначала себя (Self), затем последовательно всех других из своего списка под порядковыми номерами.

Ранее мы писали, что визуальная конфигурация распределения оценок на данной шкале является индивидуально устойчивой и сохраняется для разных массивов оценок в ретестовых исследованиях [3]. Можно выделить типы распределения оценок, которые свидетельствуют о различном использовании измерительных шкал разными субъектами.

¹ Если стоит задача выявления семантического стиля эксперта – т.е. задача выделения конкретных признаков социальных отношений, по которым эксперт преимущественно делает свои оценки, то описанная процедура может быть дополнена имплицитным словарем признаков. Соответствующая модификация экспериментальной процедуры в данной статье описана не будет.

1 тип – имеются 2-3 группы оценок на шкале, как правило, «привязанные» к полюсам. Данное распределение обусловлено использованием шкалы наименований.

2 тип – группировки отсутствуют, оценки распределены по шкале с равным интервалом между ними. Здесь типична порядковая шкала. Возможно совместное использование двух названных шкал, что проявляется в ранжировании «низших» и «высших» оценок.

3 тип – группировки и одиночные оценки на шкале разделены интервалами разной длины [4]. Этот тип распределения характерен для здоровых взрослых со сформированной способностью к оценке. Здесь явное использование всех типов измерительных шкал. Интервальная шкала здесь интуитивно используется для обозначения «едва заметного различия» между оценками – это минимальные интервалы на шкале. У разных экспертов они имеют разный размер и демонстрируют индивидуальный «масштаб» дифференциации оценок. Шкала отношений проявляется здесь как устойчивое соотношение интервалов разной длины между группировками оценок. Соотношение интервалов между группами оценок и полюсами сохраняется в ретестовых исследованиях [3]. Таким образом, результаты оценивания в нашем случае становятся доступными измерению! Мы можем зафиксировать числом наблюдаемое соотношение минимального интервала и других интервалов между группами оценок.

Изучая структуру 3-го типа, мы выявляем стилевые черты оценочной деятельности эксперта. Некоторые особенности широко известны и являются типичными в описании оценочной деятельности:

- общая позитивно-негативная асимметрия или валентность (частота оценок выше/ ниже среднего);
- степень экстремальности крайне высоких и крайне низких оценок;
- поляризация оценок (частота крайне позитивных и крайне негативных оценок);
- индивидуальный масштаб шкалы, который проявляется в пропорции минимального интервала к общей длине шкалы.

Кроме них, были выделены новые стилевые параметры, которые представлены устойчивой величиной интервалов между типичными группами оценок:

- величина интервала между группой «наивысших» оценок и нижестоящими оценками (степень противопоставления «лучшего» и «наилучшего»);
- величина интервала между группой «низших» оценок остальным (противопоставление «худшего» и «наихудшего»).

Также выделены параметры, связанные с Я-критерием: степень сближения себя с теми, кто «лучше», и с теми, кто «хуже»; склонность оценивать других как равноценных Я.

Необходимо уточнить психологическое содержание названных особенностей оценочной деятельности. Какую функцию они выполняют, какие процессы отражают?

Для ответа на этот вопрос были проведены корреляционные исследования с использованием методов психологической диагностики [3, 4, 5]. Обобщая результаты этих исследований, можно заключить, что выявленные устойчивые особенности оценочной деятельности являются результатом общих *установок* оценивания. Данные установки отражают обобщенные ценностные отношения эксперта и проявляются в особенностях его социального восприятия, в готовности выставить определенные оценки.

В таблице 1 представлено содержание установок, детерминирующих выявленные стилевые параметры оценочной деятельности.

Таблица 1 Содержание ценностных установок, имплицитные критерии и имплицитные условия оценки

Параметры оценочного стиля (или установки в оценочной деятельности)	Имплицитные критерии оценки и дополнительные имплицитные условия оценки
склонность давать максимально-позитивные оценки	интуитивный критерий «наилучшего»; условие: вероятность существования других, близких к «наилучшему»
склонность абсолютизировать максимальные оценки	интуитивный критерий «наилучшее»; условие: вероятность существования абсолютного «наилучшего» в реальности
склонность противопоставлять максимальные оценки другим (акцентирование исключительности «наилучших» оценок)	текущий критерий – текущие «наилучшие» оценки условие: ориентация на возможности (доступность/ недоступность), исключительности «наилучшего»
склонность давать минимальные (негативные) оценки	интуитивный критерий «наихудшее»; условие: вероятность существования других, близких к «наихудшему»
склонность абсолютизировать негативные оценки	интуитивный критерий «наихудшее», условие: вероятность существования «наихудшего» в реальности
склонность противопоставлять крайне негативные и другие негативные оценки (подчеркивать исключительность «наихудших»)	текущий критерий – «наихудшие оценки» условие: ориентация на нормы, на различие между допустимым и недопустимым

Параметры оценочного стиля (или установки в оценочной деятельности)	Имплицитные критерии оценки и дополнительные имплицитные условия оценки
склонность ценить других «выше среднего»	интуитивный критерий «золотой середины» условие: интуитивная вероятность «хорошего» или оптимизм/пессимизм
склонность сближать себя с теми, кто «выше»	«Я-критерий»; условие: ориентация на достижение, вероятность достижения
склонность сближать себя с теми, кто «ниже»	«Я-критерий»; условие: ориентация на предотвращение «худшего», вероятность ошибки в негативной оценке
склонность оценивать других равноценно себе	«Я-критерий»; условие: ориентация на равенство или на безоценочное принятие кого-либо в силу особой значимости

Практические следствия. Обнаружение естественных механизмов вынесения оценки позволяет выделить новые параметры оценочного стиля, которые могут иметь существенное значение в определенных областях экспертизы. Выделение ряда устойчивых параметров оценочного стиля позволяет предложить соответствующую типологию экспертной деятельности, которая может иметь практическое значение для определения эффективности оценочного стиля в данных сферах.

Назовем возможные сферы экспертной деятельности:

Оценка конкурсных социальных проектов или продуктов по критерию «идеального», например, для вознаграждения. Здесь возможны явные различия экспертов в стремлении оценить всех как достойных высших оценок и, наоборот, оценить всех как не заслуживающих высших оценок.

Оценка социальных объектов по критерию «наихудшего» и недопустимого касается сферы судебных решений, определение степени тяжести наказаний.

Оценка социальных объектов с условием возможности достижения идеала, связана с оценкой риска выполнения проекта в любом виде деятельности. Например, возможность медицинского вмешательства будет оцениваться позитивно экспертами с установкой «достижимости» наилучшего результата. Но эксперты с установкой «недостижимости наилучших результатов» перспективу медицинского вмешательства чаще оценят как негативную.

Оценка социальных объектов (других людей) в сфере социальной помощи. Для данной сферы значимой является установка к сближению себя с теми, кто «ниже». В этом случае другие с большей вероятностью будут оценены как «нуждающиеся в помощи».

В некоторых сферах деятельности – например, в педагогической, в управлении персоналом – важны все оценочные стили для оценки «человеческого фактора». Очевидно, что индивидуальный экспертный стиль в таких видах деятельности значительно определяет профессиональное общение, специфику и эффективность деятельности.

Литература

- 1 Батулин Н.А. Психология оценки: общие представления, дифференциация понятий и области изучения // Вестник ЮУрГУ. 2008. № 31, серия Психология, вып. 1, С. 17-31.
- 2 Выбойщик И.В. Оценочный стиль как один из факторов точности оценивания// Вестник ЮУрГУ. 2008. № 32. серия Психология, вып. 2, С.29-36.
- 3 Николаева И.А. Пространственное измерение ценностной сферы личности. Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2007. 166с.
- 4 Николаева И.А. Мир измерений. 2013, №11. - С.40-45.
- 5 Николаева И.А. Зайнулина Ю.И. Ценностное отношение и личностные качества педагога Психологическая наука и образование www.PSYEDU.RU. Изд-во Московский городской психолого-педагогический университет, Москва. Том 8. №1, 2016. С.11-23.
- 6 Серенков П.С., Романчук В.М., Иванова Н.Н. Исследование достоверности методов экспертного оценивания //Метрология и приборостроение. 2016. №1. С.22-30.
- 7 P. Cecconi, F. Franceschini, M. Galetto Measurements, evaluations and preferences: A scheme of classification according to the representational theory // Measurement 39 (2006) 1–11. - www.elsevier.com/locate/measurement. doi:10.1016/j.measurement.2005.10.012
- 8 R.M. Dawes, T.L. Smith, Attitude and opinion measurement, in: G. Lindzey, E. Aronson (Eds.), Handbook of Social Psychology, vol. 1, Random House, New York, 1985.
- 9 Mou Qiong, Xu Zeshui, Liao Huchang An intuitionistic fuzzy multiplicative best-worst method for multi-criteria group decision making. Information Sciences Volume 374, 20 December 2016, Pages 224-239. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.08.074>

ПАРАДИГМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Шишкин И.Ф.

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Многие годы ИЗМЕРЕНИЕМ называлось «Нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путем с помощью специальных технических средств» [1]. Под ФВ понималось «Свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта». По умолчанию предполагалось, что и сами объекты, и их свойства относятся к материальному миру. Измерения могли быть объективными (инструментальными) и субъективными (органолептическими), но ПАРАДИГМА измерений состояла в том, что

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ОБЪЕКТИВНЫМИ.
--

Это достигалось с помощью обеспечения ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, обуславливающего сходимость результатов измерений к объективному (истинному) значению физических величин и воспроизводимости их в разных условиях.

В 1968-м году появилась статья об измерении качества продукции [2]. Ее авторы предлагали показатели свойств **товарной продукции**, полученные путем прямых измерений, объединять в некоторые комплексные показатели, характеризующие ее качество. Они определили эту науку, получившую название *квалиметрия*, как научно-прикладную математическую дисциплину, не имеющую отношения к метрологии, хотя в такой постановке вопроса измерение качества является косвенным измерением. Свою точку зрения они отстаивают до сих пор [3].

Противоположная точка зрения, заключавшаяся в том, что *квалиметрия* – раздел метрологии, изучающий вопросы измерения качества, разрабатывалась параллельно в высшей школе. Она представлена работами [4-7]. В этом направлении были выполнены масштабные государственные проекты [8,9] по измерению качества **услуг**, подтверждавшие продуктивность и практическую значимость теоретических разработок.

В 2000-м году вышла новая версия международных стандартов ISO серии 9000, распространившая идеологию TQM (total quality management – всеобщее управление качеством) на системы менеджмента качества. Под

качеством стали понимать степень удовлетворенности продукцией и услугами потребителей и заинтересованных сторон. Удовлетворенность – не физическая величина. Это душевное состояние человека, нематериальное свойство (НМС) его натуры. Степень своей удовлетворенности человек определяет (измеряет) сам экспертным методом, а результат измерения формулирует в виде МНЕНИЯ. Можно сказать, что идеология TQM и стандарты ISO 9000:2000 поставили задачу прямого измерения НМС, а квалиметрия подсказала пути ее решения и подготовила для этого почву.

Под влиянием успехов квалиметрии в законодательной метрологии стали происходить постепенные изменения. Сначала из определения термина «измерение» исчезло слово «физическая» величина. В первой редакции закона «Об обеспечении единства измерений» [10] этого слова уже не было. Затем в ГОСТ Р 8.000–2000 «ГСИ. Основные положения» появилось определение: «нахождение значения величины опытным путём с помощью технических средств» [11]. Измерения НМС стали легитимными, но применение экспертных методов измерений еще долго оставалось вне закона [10]. Только с выходом новой редакции этого закона [12] положение изменилось. В ней содержалось следующее «основное понятие»: «Измерение – совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины», т.е. не было ни упоминания о технических средствах, ни прилагательного «физическая» величина. Наконец, теория индикатора как средства измерений по шкале порядка [13] перевела так называемую «квалиметрическую шкалу оценок» в разряд обычных измерительных шкал. Сложились все предпосылки для создания теории измерений НМС.

НМС существуют только в сознании людей. Проблема мозга и сознания (материальной и идеальной сущностей) является центральной проблемой философии. Она сводится к решению главного философского вопроса о том, что первично, а что вторично. Вопрос о реальности этих двух субстанций (материальной и идеальной) давно не стоит. Они получили название ОБЪЕКТИВНОЙ и СУБЪЕКТИВНОЙ реальностей [14].

По определению В.И. Ленина, «материя есть объективная реальность сформированное в СОЗНАНИИ людей. Она имеет нематериальный характер и состоит из представлений, мыслей и мнений о нематериальных свойствах объектов и явлений материального и идеального миров. Субъективная реальность является ОТРАЖЕНИЕМ объективной реальности. Материальным носителем ее является мозг человека. Субъективная реальность информационно изоморфна (идентична) состояниям мозга. Связь между объективной и субъективной реальностями

осуществляется посредством ИНФОРМАЦИИ, согласно принципу ее инвариантности по отношению к материальным и нематериальным носителям.

В дальнейшем под НМС будем понимать ОТРАЖЕНИЯ в субъективной реальности свойств объектов и явлений материального мира. Информация об объективной реальности поступает от рецепторов человека в мозг и отражается в СОЗНАНИИ с помощью МЫШЛЕНИЯ, способного выполнять такие мысленные операции, как «абстрагирование», «конкретизация», «обобщение», «анализ», «синтез» и «сравнение». С помощью трех первых операций в сознании формируются представления о простых НМС на основе их проявлений (признаков) в материальном мире (рис. 1).

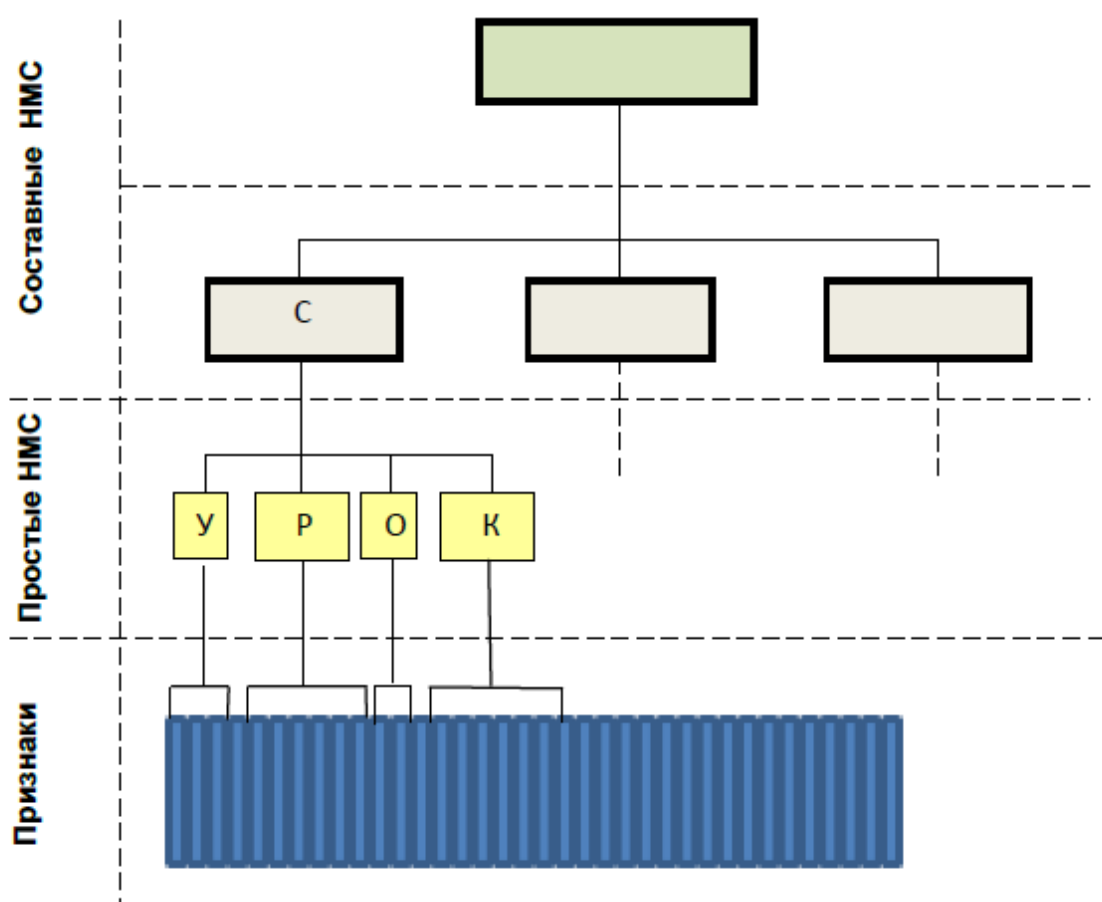


Рисунок 1. Формирование НМС

С помощью двух последующих осуществляется декомпозиция и комплексирование НМС на разных уровнях интеграции. Подобно тому, как ФВ подразделяются на основные и производные, НМС делятся на простые и составные. Простые НМС являются отдельными элементами составных; составные – состоят из набора простых или составных нижнего уровня. Например, такое составное НМС, как *самостоятельность* человека, включает в себя набор простых НМС: *уверенность*,

решительность, ответственность, компетентность. Составляющими *интеллигентности* человека являются простые НМС его натуры: *культурность, вежливость, воспитанность, тактичность.*

НМС могут быть выражены в большей или меньшей степени, т.е. имеют количественную характеристику, что предполагает возможность их измерения с помощью мысленной операции «сравнение».

При измерении ФВ по шкале порядка ее размер может сравниваться с размером, равным 0. Равенство измеряемого размера нулю означает отсутствие этого свойства, а положительный результат сравнения означает обнаружение этой ФВ [13]. Средства измерений, предназначенные для обнаружения ФВ, называются *индикаторами.*

При однократном измерении простого НМС, имеющего единственный признак, эксперт играет роль *индикатора.* «Измерительным инструментом» является его МЫШЛЕНИЕ. Он мысленно (с помощью мысленной операции «сравнение») сравнивает информацию о проявлении НМС, поступающую извне, с представлением о том, что этого признака **НЕТ**. Это представление хранится в его памяти как отражение жизненного опыта, или децентрализовано воспроизводится в его сознании посредством обучения. Тем самым он как *индикатор* решает задачу обнаружения НМС, сравнивая его размер с размером, равным 0, то есть, выполняя измерение по шкале порядка. Результатом измерения является МНЕНИЕ (решение) эксперта об обнаружении им НМС. Числовое значение результата измерения с помощью знака дизъюнкции \vee может быть записано следующим образом: $0\vee 1$. В дальнейшем МНЕНИЕ эксперта **об обнаружении** НМС будет использоваться в качестве ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ.

Многократное измерение простого НМС, имеющего единственный признак, выполняется членами экспертной комиссии. Предположим, что результат измерения представлен табл. 1.

Таблица 1 Результат измерения при равнозначимых мнениях

ЭКСПЕРТЫ	МНЕНИЯ
1	1
2	0
3	1
4	1
5	1
6	0
7	1
8	1
9	0
10	1
РЕЗУЛЬТАТ	0,7

Мнение каждого эксперта о наличии (обнаружении) НМС является единицей измерения. Если количественной характеристикой НМС считать показатель того, насколько общепринятым является это мнение, то числовым значением результата измерения может служить **доля** таких мнений от общего их числа. В данном случае она равна **0,7**. Показательно, что этот результат не совпадает с мнением ни одного из членов комиссии!

Из квалиметрии может быть заимствована идея учета **важности, значимости, авторитетности** или **весомости** мнений экспертов с помощью весовых коэффициентов. Эта процедура называется **РАССТАНОВКОЙ ПРИОРИТЕТОВ**. *Важность* сама по себе является НМС, и в качестве такового может быть измерена. Ниже будет использована такая возможность, а пока остановимся на случае, когда весовые коэффициенты мнений экспертов установлены **ДИРЕКТИВНО**, как это показано в табл. 2. Сумма весовых коэффициентов должна равняться 1. Тогда сумма весовых коэффициентов всех положительных мнений будет числовым значением результата измерения НМС экспертной комиссией (табл. 3).

Таблица 2

ЭКСПЕРТЫ	ВЕС.КОЭФ.
1	0,10
2	0,05
3	0,20
4	0,02
5	0,01
6	0,15
7	0,09
8	0,03
9	0,30
10	0,05
Σ ВЕС.КОЭФ.	1,00

Таблица 3

ЭКСПЕРТЫ	МНЕНИЯ
1	0,10
2	0
3	0,20
4	0,02
5	0,01
6	0
7	0,09
8	0,03
9	0
10	0,05
РЕЗУЛЬТАТ	0,5

Видно, что этот результат существенно (на 20 %) отличается от того, который был получен, когда все члены комиссии считались одинаково **квалифицированными и авторитетными** специалистами.

Использование МНЕНИЯ, не имеющего фиксированного размера, в качестве единицы измерения означает, что измерения НМС выполняются на основе **ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО** воспроизведения единицы измерения. Ничего необычного в этом нет. Такое уже было при использовании **антропометрических** мер.

При однократном измерении простого НМС, имеющего несколько признаков, экспертом выполняются однократные измерения каждого из

них. В табл. 4 проставлено мнение эксперта об обнаружении им III-го признака.

Таблица 4 - Обнаружение экспертом одного из признаков НМС IC

Признаки НМС	I	II	III	IV	Результат измерения НМС
Эксперт					
Иванов	0	0	1	0	0,25

Числовым значением результата измерения является **доля обнаружений** от общего числа мнений эксперта, выраженная в относительных единицах или в процентах.

При многократном измерении простого НМС, имеющего несколько признаков, всеми членами экспертной комиссии выполняются однократные измерения каждого из признаков, как это показано в табл. 5.

Таблица 5 - Многократное измерение экспертной комиссией простого НМС, имеющего несколько признаков

Признаки НМС	I	II	III	IV	Результат измерения НМС
Эксперт					
1	0	0	1	0	0,25
2	0	1	0	1	0,50
3	1	0	1	1	0,75
4	1	1	0	1	0,75
5	1	1	1	1	1,00
Доля обнаружений	0,6	0,6	0,6	0,8	0,65

Результат многократного измерения получается путем усреднения промежуточных данных по последнему столбцу или нижней строке табл. 5.

При однократном измерении составного НМС экспертом выполняются однократные измерения всех его составляющих. Единицей измерения служит МНЕНИЕ эксперта об обнаружении любой из них. Результатом измерения является **доля обнаружений** от общего числа мнений эксперта (см. табл. 6).

Таблица 6 Однократное измерение интеллигентности

Составляющие НМС Эксперт	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Результат измерения НМС
	Иванов	1	0	1	1

При многократном измерении составного НМС членами экспертной комиссии выполняются однократные измерения всех его составляющих. В правом столбце табл. 7 приведены результаты измерения интеллигентности каждым экспертом, что может иметь для них большое значение, если эксперты занимаются, например, набором персонала для предприятий и организаций различного профиля.

Измерение интеллигентности

Таблица 7

Признаки НМС Эксперты	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Доля обнаружений
	1	1	1	1	1,00
2	0	0	0	0	0,00
3	0	0	1	0	0,25
4	1	0	1	1	0,75
5	1	0	1	0	0,50
Результат измерения НМС					0,5

Таблица 8

Признаки НМС Эксперты	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Результат измерения НМС
	1	1	1	1	↓
2	0	0	0	0	
3	0	0	1	0	
4	1	0	1	1	
5	1	0	1	0	
Доля обнаружений	0,6	0,2	0,8	0,4	0,5

Результат измерения интеллигентности экспертной комиссии в целом получается путем усреднения этих результатов измерений, и равен в данном случае **0,5**, или **50 %**. Показательно, что этот результат не совпадает с результатами измерений большинства членов комиссии, что нередко бывает причиной конфликтов.

Другой алгоритм обработки экспериментальных данных показан в табл. 8. Он применяется тогда, когда представляет интерес вклад каждой составляющей в итоговый результат измерения НМС. Сам результат получается тем же самым, но по ходу обработки экспериментальных данных извлекается важная измерительная информация об отдельных чертах характера человека, представшего перед экспертной комиссией.

Если промежуточные данные не представляют интереса, а важен только конечный результат измерения НМС, то он может быть получен путем непосредственного подсчета **доли обнаружений** составляющих членами экспертной комиссии среди общего числа их мнений.

В рассматриваемом случае он равен $\frac{10}{4 \times 5} = 0,5$.

Точно так же, как учитывалась **авторитетность** мнений членов экспертной комиссии, можно дифференцированно подойти к **важности**, **значимости** или **весомости** составляющих НМС. Если эксперты по-разному оценивают важность составляющих, то свою точку зрения они могут представить **ранжированным рядом**, расставив (и пронумеровав) составляющие в порядке возрастания их предпочтительности. Сумма предпочтений называется **рангом**.

Пусть, предположим, точки зрения экспертов представлены ранжированными рядами, сведенными в табл. 9, где ранг 1 означает предпочтение по сравнению с отсутствием составляющей. Результат измерения *важности* отдельной составляющей каждым экспертом представляет собой **долю** набранных ею предпочтений в общей сумме рангов, равной 10. Эти результаты приведены в табл. 10. Их можно использовать в качестве весовых коэффициентов мнений экспертов и усредненного мнения экспертной комиссии относительно **важности**, **значимости** или **весомости** составляющих НМС.

Таблица 9 – Таблица рангов

Составляющие интеллигентности					
	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Сумма рангов
Эксперты					
1	4	2	3	1	10
2	4	1	3	2	10
3	3	4	1	2	10
4	4	1	2	3	10
5	4	3	2	1	10

Таблица 10 – Таблица весовых коэффициентов

Составляющие интеллигентности	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Сумма весовых коэффициентов
1	0,4	0,2	0,3	0,1	1,0
2	0,4	0,1	0,3	0,2	1,0
3	0,3	0,4	0,1	0,2	1,0
4	0,4	0,1	0,2	0,3	1,0
5	0,4	0,3	0,2	0,1	1,0
Усредненные весовые коэффициенты по мнению экспертной комиссии	0,38	0,22	0,22	0,18	1,0

Тогда результаты измерения *интеллигентности* будут выглядеть так, как это показано в табл. 11 и 12.

Таблица 11 – По мнениям экспертов

Составляющие интеллигентности	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Результат измерения интеллигентности
1	0,4	0,2	0,3	0,1	0,250
2	0	0	0	0	0,000
3	0	0	0,1	0	0,025
4	0,4	0	0,2	0,3	0,225
5	0,4	0	0,2	0	0,150
Результаты измере- ния составляющих интеллигентности	0,24	0,04	0,16	0,08	0,13

Таблица 12 – По мнению экспертной комиссии

Составляющие интеллигентности					
Эксперты	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Результат измерения интеллигентности
1	0,38	0,22	0,22	0,18	0,250
2	0	0	0	0	0,000
3	0	0	0,22	0	0,055
4	0,38	0	0,22	0,18	0,195
5	0,38	0	0,22	0	0,150
Результаты измерения составляющих интеллигентности	0,27	0,044	0,176	0,072	0,13

Они отличаются от результатов, приведенных в табл. 7 и 8.

Измерения НМС, как и органолептические, относятся к **ЭКСПЕРТНЫМ**, но имеют существенные отличия. Это в полном смысле слова уникальные и неповторимые измерения. Вполне уместно назвать их **ЭКСКЛЮЗИВНЫМИ**. Их результаты справедливы только **ЗДЕСЬ** и **СЕЙЧАС**. Они отражают индивидуальную точку зрения лица, их выполняющего, или поименного коллектива (экспертной комиссии) в текущий момент времени, в конкретном месте, при определенных обстоятельствах и условиях их получения. Результаты эксклюзивных измерений являются субъективными потому, что субъективным является сам размер измеряемой величины. Он не имеет объективного числового значения.

Представление о разновидностях экспертных измерений можно получить из табл. 13.

Таблица 13 – Экспертные измерения

ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	ИЗМЕРЕНИЯ НЕМАТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
Применяются при измерениях ФВ – свойств объектов и явлений материального мира.	Выполняются при измерениях НМС – нематериальных свойств объектов и явлений как материального, так и идеального мира.
Выполняются по измерительным шкалам интервалов и отношений .	Выполняются по измерительной шкале порядка .
Измерения представляют собой сравнения с размером, принятым за единицу .	Измерения представляют собой сравнения с размером, равным 0 , что эквивалентно отсутствию НМС, или с другими размерами.
Единица измерения воспроизводится эталоном .	Единицей измерения служит мнение одного человека – результат однократного измерения
Информация о размере единицы передается от эталона экспертам.	Мнение эксперта не имеет конкретного размера.
Измерения выполняются на основе централизованного воспроизведения единиц.	Измерения выполняются на основе децентрализованного воспроизведения единицы.
Результат измерения представляет собой число единиц .	Результат измерения представляет собой число мнений о наличии НМС, выраженное в процентах или относительных единицах.
Результаты измерений являются объективными . Они сходятся и воспроизводятся.	Результаты измерений являются субъективными . Они не сходятся и не воспроизводятся. Такие измерения называются эксклюзивными
Объективность результатов измерений обеспечивается ФЗ от 26.06.08 № 102.	Легитимность эксклюзивных измерений гарантируется Конституцией РФ.

ПАРАДИГМА измерений НМС формулируется следующим образом:

ИЗМЕРЕНИЯ НЕМАТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЯВЛЯЮТСЯ ЭКСКЛЮЗИВНЫМИ.

Требование обеспечения единства таких измерений несостоятельно. Их результаты субъективны, не сходятся и не воспроизводятся. Такие измерения выходят за рамки применимости ФЗ «Об обеспечении единства измерений», но не из правового поля законодательной метрологии, в которое входит Основной закон государства Конституция РФ. Легитимность (правомерность, законность) результатов эксклюзивных измерений гарантируется пунктом 3 статьи 29 этого закона: «Никто не может быть принужден к выражению своих мнений и убеждений или отказу от них». Аналогичная норма содержится в Международном праве: «Каждый человек имеет право на свободу убеждений и на свободное выражение их...» ст. 19 Всеобщей декларации прав человека, принятой Генеральной Ассамблеей ООН 10.12.1948 г.

С учетом измерений НМС структура общего пространства измерений может быть представлена такой, как это показано на рис. 2.

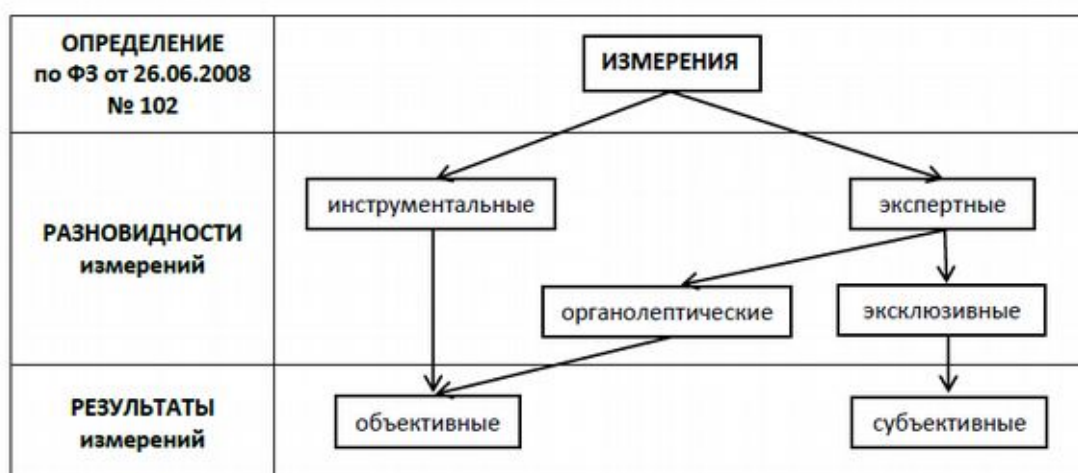


Рисунок 2. Пространство измерений

Здесь левая ветвь относится к метрологическому жизнеобеспечению в объективной реальности (с помощью материальных средств измерений), а правая к метрологическому жизнеобеспечению в субъективной реальности (с помощью нематериальных измерительных операций).

В заключение можно привести примеры, показывающие значение эксклюзивных измерений в жизни общества.

1. В июле 2002 г. над Боденским озером на юге Германии столкнулись два самолета. В авиакатастрофе архитектор из Северной Осетии Виталий Калоев потерял всю свою семью – жену, 10-летнего сына и 4-летнюю дочь. Через полтора года он убил диспетчера, по вине которого произошло столкновение авиалайнеров, нанеся ему 12 ножевых ранений. Суд Цюриха приговорил Калоева к 8 годам тюремного заключения.

В 2007 г. Калоева досрочно освободили за примерное поведение. На родине в Осетии его встретили как национального героя. Через год назначили заместителем министра строительства и архитектуры Осетии. В этой должности он проработал до выхода на пенсию.

В начале 2017 г. корреспонденты газеты «Комсомольская правда» обратились к Виталию Константиновичу по телефону с вопросом: «Не жалеете ли Вы сегодня о своем поступке?». «Не жалею» ответил Калоев.

Несоизмерима вина Калоева с точки зрения разных сообществ.

2. На рис.3 приведены данные социологического опроса, проведенного Левада-Центром 20-23 января 2017 г. по репрезентативной всероссийской выборке городского и сельского населения объемом 1600 человек в 137 населенных пунктах 48 регионов страны. Здесь же показаны результаты опросов за предыдущие годы. Вопрос, на который отвечали респонденты, формулировался так: «Какие чувства вызывает у вас личность И.В. Сталина?». Разброс мнений очевиден. Но общая тенденция изменения общественного мнения выражена четко: плохое забывается, а

признание хорошего возрастает. Казалось бы, ничего нового. То же самое можно сказать о памяти об Иване Грозном, Петре I, Николае II... Но одно дело сказать вообще, а другое дело оценить количественно. Измерения НМС позволяют поставить на строгую количественную основу многие гуманитарные, общественные и социальные науки. Появляется возможность интерполяции, предсказания обозримого будущего, что является одной из задач продуктивной научной деятельности.

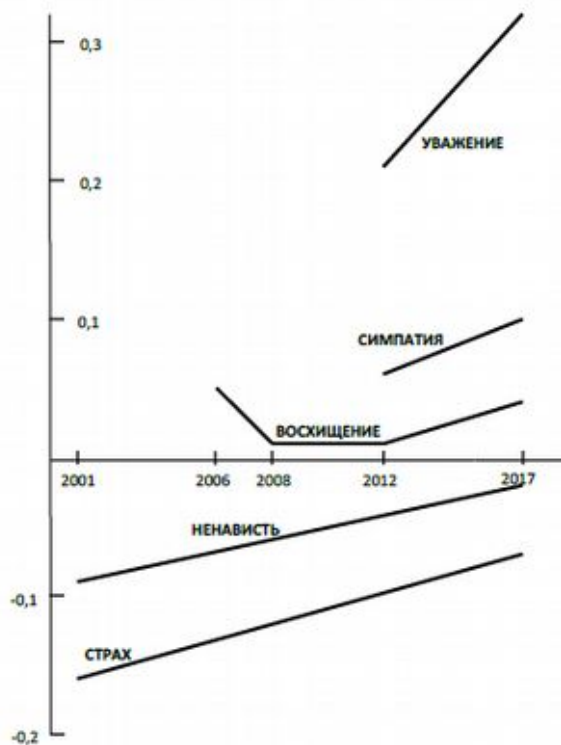


Рисунок 3. Результаты социологического исследования

3. В вузах нашей страны ведется подготовка бакалавров и магистров по направлению высшего профессионального образования «Конфликтология». Изданы учебники по дисциплине «Конфликтология: управление конфликтами». Любой конфликт начинается с расхождения во мнениях и переходит в стадию противостояния, противоборства, противодействия (вплоть до вооруженного). Управление конфликтами наиболее эффективно на стадии расхождения во мнениях. Известно (в изложении М.Ю. Лермонтова) к чему привел конфликт между общественным и личным мнениями:

«Не вынесла душа поэта
 Позора мелочных обид,
 Восстал он против мнений света
 Один, как прежде... и убит!».

Через 4 года в результате межличностного конфликта с Н.С. Мартыновым погиб и сам поэт.

Неумение управлять конфликтами на стадии расхождения во мнениях, являющихся результатами измерений НМС, привело ко многим кровопролитным войнам и продолжает сказываться на методах борьбы с инакомыслием и терроризмом. Поэтому возможность измерений НМС нельзя недооценивать.

Литература

- 1 ГОСТ 16263-70 «ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. МЕТРОЛОГИЯ. Термины и определения».
- 2 Азгальдов Г. Г., Гличев А. В., Крапивенский З. Н., Кураченко Ю. П., Панов В. П., Фёдоров М. В., Шпекторов Д. М. Квалиметрия наука об измерении качества продукции // Журнал Стандарты и качество, № 1, 1968 г. С. 34-35.
- 3 Азгальдов Г.Г., Костин А.В. Метрология и квалиметрия: вопросы идентификации // Мир измерений, № 1, 2010.
- 4 Шишкин И.Ф. Основы метрологии, стандартизации и контроля качества: Учеб. пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 320 с.
- 5 Шишкин И.Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством: Учебник для вузов/Под ред. акад. Н.С. Соломенко. – М.: Изд-во стандартов, 1990. 342 с.
- 6 Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.
- 7 Шишкин И.Ф., Станякин В.М. Квалиметрия и управление качеством: Учебник для вузов. – М.: Изд-во ВЗПИ, 1992. – 256 с.
- 8 Шишкин И.Ф. Измерения качества образования и образовательных услуг // Педагогические измерения, № 1, 2005. – С. 105-123.
- 9 Шишкин И.Ф. Экономическое управление качеством жилищно-коммунальных услуг // Электронный журнал «Экономика качества». URL: www.eq-journal.ru.–2015.–№2 (10).
- 10 Закон Российской Федерации от 27.04.1993 № 4871-1 «Об обеспечении единства измерений».
- 11 ГОСТ Р 8.000-2000 «ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. Основные положения».
- 12 Федеральный закон от 26.06 2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
- 13 Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Ч. 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Питер», 2010. – 192 с.
- 14 Дубровский Д.И. Гносеология субъективной реальности // Философские науки, № 4, 2011. С. 1-6.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ КАК АКТУАЛЬНАЯ ЗАДАЧА МЕТРОЛОГИИ

К.В. Сапожникова¹, Р.Е. Тайманов¹, Ю.В. Бакшеева²

¹ ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева»

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

k.v.s@vniim.ru

Актуальной метрологической задачей в эпоху Индустрии 4.0 является разработка методов и средств прогнозирования динамики процессов, проявления которых заметно через многие месяцы и годы. Эффективность таких разработок иллюстрирована примерами.

1. Введение

В развитии систем в биологии и технике есть общие закономерности.

В процессе эволюции животные приобретали способность адаптироваться к прогнозируемому изменению условий существования, ослабляя ожидаемые последствия нежелательных воздействий для популяции. Пример – суточные и сезонные изменения жизнедеятельности. В течение истории человечества потребность в прогнозировании возрастала, ее сфера и горизонт расширялись. В настоящее время остро ощущается потребность:

- диагностировать процессы износа компонентов технических средств и нештатные изменения условий их работы для предупреждения аварий и производственного брака;
- выявлять на ранних стадиях нежелательные изменения в физиологических системах человека, порождающие заболевания;
- прогнозировать динамику развития общества и идентифицировать в ней опасные тренды.

Речь идет о процессах, называемых далее медленными, последствия которых становятся заметными через многие месяцы и годы.

Со второй половины 20-го века быстро нарастает темп автоматизации в промышленности, на транспорте, в оборонной технике, коммунальном хозяйстве, быту, здравоохранении и т.д. Наступает новая, более высокая ступень развития автоматических систем управления (АСУ) – промышленная революция Индустрия 4.0 – с широким распространением роботов, Интернетом вещей, киберфизическими системами, «умными и безопасными» городами, «умным» здравоохранением, «умным» производством и т.д.

Поскольку работа АСУ опирается на информацию, поступающую от средств измерений (СИ), быстрое развитие автоматизации порождает

лавинообразный рост количества СИ и связанное с ним снижение субъективного контроля их метрологической исправности [1].

Потребность в автоматизации актуализируется в медицине применительно к диагностике заболеваний, что связано с относительно быстрым ростом продолжительности жизни и пенсионного возраста, а также с сопутствующим увеличением количества пациентов. Необходимость сокращения затрат на здравоохранение при увеличении нагрузки на врачей требует выявления заболеваний на возможно более ранней стадии, когда лечение более эффективно.

При сохранении практически неизменной метрологической надежности СИ растет опасность использования недостоверной измерительной информации, что повышает вероятность увеличения количества аварий и техногенных катастроф, трагических исходов в медицине и т.д. (Измерительную информацию трактуют как достоверную, если она является результатом измерений, погрешность которых находится в пределах, установленных в документации на методику выполнения измерений и/или на соответствующее СИ).

2. Прогнозирование развития медленных процессов

2.1. Увеличение интервала между операциями метрологического обслуживания

Традиционные методы метрологического обеспечения в период эксплуатации СИ не соответствуют требованиям Индустрии 4.0. По зарубежным данным, к концу межкалибровочного/межповерочного интервала (МКИ) длительностью 1-2 года у (10-15)% СИ погрешность превосходит допустимую [2], т.е. прогноз параметров процессов деградации во многих случаях недостоверен. С увеличением количества СИ пропорционально увеличивать количество метрологов, занимающихся периодической калибровкой поверкой, экономически неприемлемо. Традиционные методы метрологического обеспечения СИ на этапе эксплуатации умирают, но потребность, которую они удовлетворяли, лишь обостряется.

В этой связи к числу наиболее актуальных задач метрологии технических систем в 21-ом веке относятся:

увеличение МКИ СИ до срока службы, определяемого моральным старением;

обеспечение достоверности измерительной информации в течение этого срока.

При назначении первичного МКИ прогноз деградационных процессов обычно строят, опираясь на информацию, перечисленную в [3, 4]. Однако эта информация нередко отсутствует или отличается

значительной неопределенностью. Как следствие, длительность МКИ редко устанавливается более 2-3 лет.

В действительности ситуация сложнее. В ряде случаев в процессе эксплуатации СИ возникают «скрытые» составляющие погрешности результатов измерений, которые не выявляются при традиционных операциях метрологического обслуживания [5]. Характерны следующие примеры [5]:

- неоднородность плотности металла опоры струнного силоизмерительного преобразователя, в результате чего при нагрузках, близких к предельным, меняется наклон его оси относительно направления силы, которая должна быть измерена [6];
- изменение свойств СИ при смене поставщика компонента;
- изменение магнитных свойств мишени вихретокового преобразователя в процессе эксплуатации;
- изменение диэлектрических свойств воздуха между электродами емкостного преобразователя, например, при непредусмотренном увеличении влажности;
- изменение свойств топлива, расход которого измеряется, из-за намеренного добавления в топливо воздуха и воды.

Для обоснования МКИ и устранения погрешности, связанной с влиянием названных выше и подобных им причин, помимо [3, 4], необходимо опереться на [5, 7]:

- анализ данных об опыте эксплуатации аналогов с акцентом на возможные изменения условий эксплуатации;
- изучение технологии изготовления СИ с целью выявления требований к компонентам и операциям, некачественное выполнение которых может привести к заметному росту погрешности в процессе эксплуатации СИ;
- разработку программы и проведение ускоренных испытаний СИ или его блоков и/или узлов;
- ранжирование составляющих погрешности по степени опасности в процессе эксплуатации СИ и определение среди них критических составляющих, рост которых лимитирует длительность МКИ.

Выявление критических составляющих погрешности в некоторых случаях позволяет принять меры к их уменьшению за счет:

- изменения конструкции и технологии;
- введения простого, но частого обслуживания;
- введения периодической упрощенной калибровки с помощью оператора, а по ее результатам – коррекции.

2.2. Метрологический самоконтроль СИ как метод автоматического контроля процесса деградации

Конечно, не всегда выполненный прогноз изменения метрологических характеристик СИ дает основания назначить длительность МКИ не менее требуемой. Однако анализ динамики роста составляющих погрешности СИ дает возможность реализовать в СИ функцию метрологического самоконтроля. В большей части случаев эта функция позволяет автоматически оценивать рост уровня критической составляющей погрешности, осуществлять автоматическую коррекцию результатов измерений и многократно увеличивать МКИ. С учетом ГОСТ [8], СИ, включая датчики и измерительные системы с метрологическим самоконтролем, называются интеллектуальными. Они строятся на основе структурной, временной и/или информационной избыточности.

Например, в интеллектуальном СИ, предназначенном для определения положения штанги органа регулирования реактора ВВЭР-1000 [10], использована структурная и временная избыточность. Самоконтроль организован за счет:

- сравнения кода, поступающего от неподвижного набора катушек, находящегося внутри подвижной штанги, содержащей набор магнитных колец, с ожидаемым кодом штатной шкалы.

- сравнения количества поданных команд на перемещение и числа сделанных шагов;

- измерения сопротивления катушек на переменном и постоянном токе.

Идентификация положения штанги с допустимой точностью реализуется при обрыве любой катушки индуктивности или любого провода, а также при изменении сопротивления катушек из-за «старения» провода катушек и изменения температуры.

10-летняя эксплуатация нескольких таких СИ на Калининской АЭС показала, что с уверенностью можно прогнозировать их эффективную работу без метрологического обслуживания 60 лет и более.

В уровнемере с подобным типом шкалы, но упрощенного типа, на основе неподвижных герконов и подвижных магнитов, размещенных на поплавке, также организован метрологический самоконтроль. С учетом опыта эксплуатации для такого уровнемера обоснована длительность МКИ, равная восьми годам.

Еще один пример многоканальная система, предназначенная для измерения силы, включающая струнные преобразователи [6]. Доминирующая составляющая погрешности, упомянутая выше, приводит к наклону преобразователя. Она зависит от угла между его осью и струной, увеличивается с ростом силы и практически может превысить допустимое значение погрешности. Метрологический самоконтроль, позволяющий

выявить наклон преобразователя, было предложено организовать на основе структурной избыточности путем использования дополнительной струны (при крестообразной компоновке с основной струной).

Во ВНИИМ накоплен опыт организации метрологического самоконтроля в СИ перемещения, уровня, солесодержания, давления, расхода, силы, температуры, удельной электрической проводимости жидкости, других неэлектрических величин.

Трудности внедрения отчасти объясняются законом Куна – сопротивлением метрологов ожидаемым последствиям использования интеллектуальных СИ – значительным сокращением оплачиваемых поверок и калибровок СИ на этапе эксплуатации. Тем не менее, количество публикаций по этой проблеме непрерывно растет. Разработками в области метрологического самоконтроля в России, помимо ВНИИМ, занимаются и в других городах, а также в Украине, Великобритании, США, Германии, Китае и других странах. Для облегчения применения метрологического самоконтроля во ВНИИМ разработаны и вступили в силу три ГОСТ [7-9]. Ряд нормативных документов выпущен и за рубежом.

2.3. Исследование процессов изменения физиологических систем

Характерная черта медицины 21 века – поиск новых источников измерительной информации о состоянии здоровья, получаемой без участия медицинского персонала, в автоматическом режиме. В рамках этого поиска разрабатываются методы диагностирования заболеваний по мимике лица, пластике движений, кардиограммам, электро- и магнитоэнцефалограммам, звучанию голоса и т.д. Учитывая, что болезнь, характеризуется совокупностью параметров, ее удобно рассматривать как многопараметрическую величину.

Пример успешной работы в этом направлении – разработка диагностического аппарата на основе компьютеризованного кардиографа с расширенным диапазоном частот. С его помощью примерно за 10 минут оказывается возможным автоматически диагностировать более 40 заболеваний внутренних органов [11]. Набор особенностей кардиоциклов, идентифицирующих болезнь, определяется феноменологически [1], т.е. как набор, характерный для этого заболевания, диагностированного ранее классическими методами. Существенно, что диагноз определяется по результатам анализа примерно 600 циклов, а не за 5-10 циклов, как обычно.

Одно из наиболее актуальных направлений в формировании «умного здравоохранения» – разработка методов диагностирования отклонений в развитии мозга человека, причем как связанных с заболеваниями, так и с особой одаренностью, а также методов усиления влияния центральной нервной системы на сопротивляемость организма болезням. Особый

интерес в этой области представляет выявление отклонений на ранних стадиях развития мозга, когда оперативному дистанционному измерению доступны лишь мимика лица и пластика движений, а также предречевые вокализации ребенка: плач, «гуканье», «гуление» и т.д. Для исследования мозга в первые месяцы жизни младенцев метод измерения параметров вокализаций более эффективен.

В известных публикациях перечень информационных признаков, определяющих диагноз, формируется феноменологически на основании того факта, что именно эти признаки характерны для голосов младенцев, у которых соответствующий диагноз установлен. В числе основных информационных признаков – частота основного тона и ее статистические характеристики, форманты и их особенности, энергия в диапазоне частот до 1,0 кГц [12-14].

Однако на основании этих признаков удастся выявить лишь «грубые» нарушения сердечной деятельности, дыхания, работы мозга, аномалии кровообращения. Достоверность диагноза не превышает (60-70)%, что не позволяет вынести окончательное суждение о требуемом лечении. Перечисленные признаки существенно зависят от возраста ребенка, веса и причины плача; связь между изменением названных выше параметров спектра и определенными нейрофизиологическими отклонениями достоверно не установлена. В [15] предложено для диагностирования заболеваний мозга использовать дополнительные признаки, также обоснованные феноменологически (связь вдоха и выдоха с моментом возникновения плача, наличие модуляции звучания, наличие шумовых фрагментов в плаче, скрипучий характер плача и т.д.) Диагностирование по этим признакам предложено осуществлять путем их экспертной оценки, учитывая, по-видимому, нечеткость формализации.

Синтетический подход к модели измерения многопараметрической величины, разрабатываемый во ВНИИМ, предполагает ее создание как модели «механизма» формирования измеряемой величины [1].

Специалисты ВНИИМ с участием нейрофизиологов, психологов, математика-программиста и арт-терапевта разработали и обосновали синтетическую модель измерения эмоций, которые с наибольшей вероятностью возникают у человека после восприятия им определенных звучаний. В этой модели эмоция трактуется как обусловленная воздействием звучания нейрофизиологическая (эмоциогенная) реакция, характер которой можно идентифицировать по ощущению или поведению субъекта. Соответственно, разработанная модель отображает модель работы мозга при прослушивании акустического сигнала. В 1-ой ступени модели рождаются простейшие (наиболее древние, общие у животных и человека) эмоции, которые принято именовать базовыми (рис. 1). Они соответствуют базовым эмоциогенным реакциям, возникающим на

инфразвуковых частотах дельта-, тэта- и альфа-ритмов мозга. Эмоции более позднего происхождения, общие у всех людей и доступные развитым млекопитающим, формируются во 2-ой ступени модели из последовательностей базовых эмоций. В 3-й ступени последовательности базовых эмоциональных образов образуют культурно обусловленные эмоциональные образы [16].

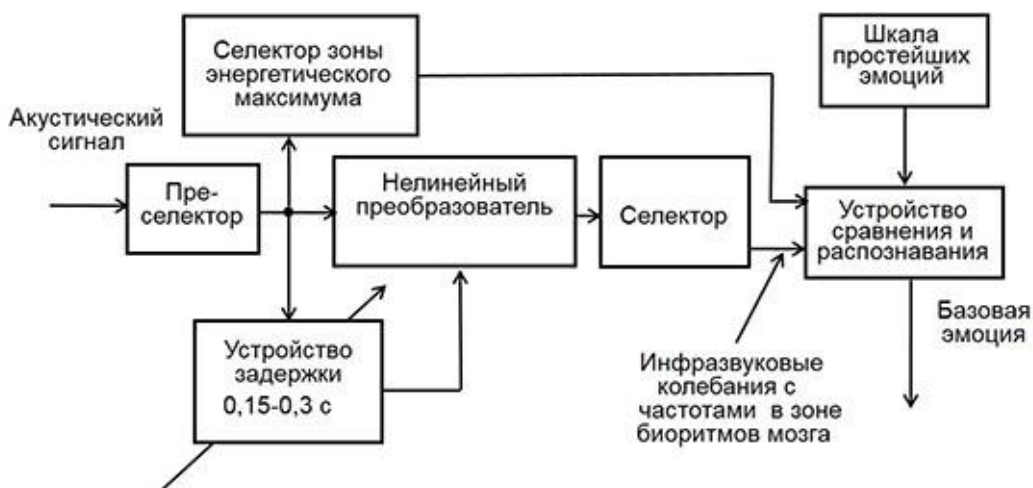


Рисунок 1. 1-я ступень модели измерения ожидаемых эмоций, вызванных акустическими сигналами

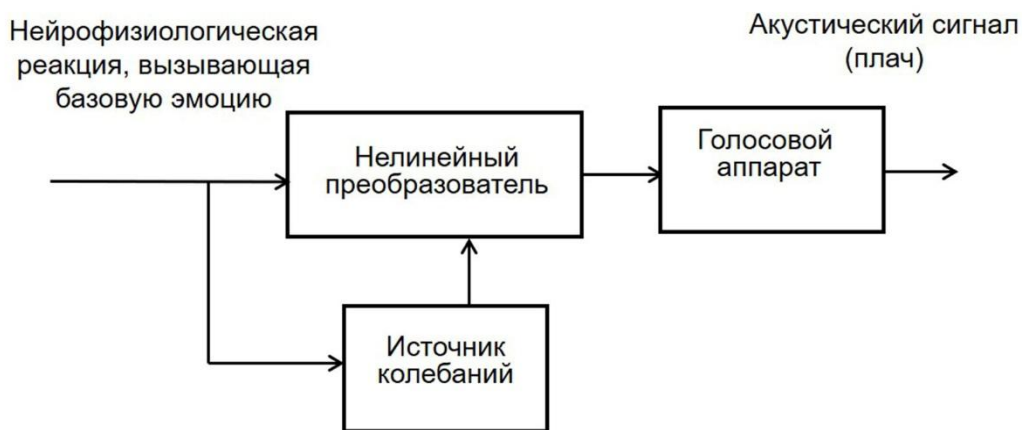


Рисунок 2. Модель механизма формирования эмоциональной окраски голоса

Анализ эволюции эмоций и процесса их рождения у человека в ответ на акустический стимул привел к представлению о том, что механизм работы мозга при формировании эмоциогенных реакций на акустические воздействия (рис. 1) и при окрашивании звучания голоса возникшей эмоцией (рис. 2), в основе, один и тот же, но его направленность различна. Рождающиеся в мозгу нейрофизиологические реакции (с частотами

дельта-, тэта- и альфа-ритмов мозга), вызвавшие базовые эмоции, воздействуют на нелинейный преобразователь и модулируют поступающие на него же колебания звуковой частоты.

Возникла гипотеза о возможности диагностировать уровень эмоционального развития младенцев и выявлять нейрофизиологические отклонения по результатам измерения параметров звучаний их голосов. Для этого следует нелинейно преобразовать вокализации и селектировать инфразвуковые колебания, а затем сравнить результаты с некоторой нормой – спектром инфразвуковых колебаний среднестатистического звучания однотипных и одинаково преобразованных вокализаций, записанных у представительной группы детей. С целью проверки гипотезы были проведены исследования изменений преобразованного спектра плача, записанного у нескольких девочек в возрасте 1-2 дня и 2 месяца. Результаты исследований показали, что за 2 месяца среднее значение относительного уровня мощности компонентов на частотах дельта-ритма снизилось с 47 до 38%, тэта-ритма возросло с 33 до 40 %, альфа-ритма увеличилось с 20 до 22 %.

Уменьшение мощности в зоне дельта-ритма можно рассматривать как свидетельство привыкания младенца к автономной жизни, а увеличение мощности в зоне тэта-ритма – как процесс осмысления окружающего мира. Небольшой рост активности в зоне альфа-ритма свидетельствует об увеличении доли осознанной моторики.

Характерно, что и в процессе эволюции развитие эмоций у животных было связано с последовательным усилением нейрофизиологической активности на все более высоких частотах [17]. Развитие младенца, по-видимому, повторяет путь эволюции.

СКО относительного уровня мощности биоритмов для группы младенцев и его изменение во времени характеризуют динамику развития индивидуальных особенностей эмоциональности младенцев в группе. За те же два месяца СКО относительного уровня мощности в зоне каждого из биоритмов для этой группы младенцев возросло примерно в два раза. Инициативный характер этих исследований, выполненных без привлечения каких-либо финансовых средств, крайне ограничил количество обследованных детей и лимитировал длительность интервала анализа. Однако даже тот небольшой объем данных, который удалось получить, свидетельствует о полезности предложенного метода. Периодическое измерение величин, характеризующих инфразвуковой спектр преобразованных вокализаций, позволяет оценить динамику эмоционального развития младенцев, выявить отклонения в развитии и прогнозировать их последствия, принять необходимые меры медицинского или образовательного характера.

3. Заключение

В статье показано, что все большую актуальность приобретает разработка методов и средств измерений величин, характеризующих динамику медленно изменяющихся процессов. Такие измерения необходимы для прогнозирования состояния технических, биологических, экологических, социальных и некоторых других систем на заданном интервале времени. Эффективность разработки методов прогнозирования иллюстрирована конкретными примерами.

Благодарность

Работа «Формирование измерительной модели, связывающей музыкальное воздействие с эмоциями слушателей» выполнена по гранту РФФИ № 15-04-00565 ОГОН.

Литература

- 1 Тайманов Р.Е., Сапожникова К.В. Приборы. 2016, вып. 10 (208). С. 41-45.
- 2 Генкина Р.И., Лукашов Ю.Е. и др. Законодательная и прикладная метрология. 2010, вып. 5. С. 8-20.
- 3 OIML D 10. Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment used in testing laboratories.
- 4 РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
- 5 Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R., Ionov A., Proc. 27-th International Symposium —Metrology and Metrology Assurance 2017, Sept. 8-12, 2017, Sozopol, Bulgaria. Pp.20-25.
- 6 Сапожникова К., Пронин А., Тайманов Р., Котляров Р., XXVI Национальный научный симпозиум с международным участием "Метрология и метрологическое обеспечение-2016", 7 - 11 сент., Созополь, Болгария. С.163-170.
- 7 ГОСТ Р 8.825-2013. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний.
- 8 ГОСТ Р 8.734-2011. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.
- 9 ГОСТ Р 8.673-2009. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
- 10 Taymanov R., Sapozhnikova K., Druzhinin I. Nuclear Plant Journal. 2007, March-April.Pp. 45-47.

- 11 Успенский В.М. Информационная функция сердца, 2-ое дополн. издание. Под ред. В.Б. Симоненко. Москва, Планета, 2016.
- 12 Zanchi P., Fasolo M. et al. *Psicologia Clinica dello Sviluppo*. 2016, 20 (1). Pp. 103-123.
- 13 Orlandi S., Bandini A., Fiaschi, F.F., Manfredi, C. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2017, 37. Pp.16-22.
- 14 Rosales-Pérez A., Reyes-García C.A., et al. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2015, 17. Pp. 38-46.
- 15 Патент RU 2067420 С1. Серганова Т.И., Столярова Э.И. А61В 8/00 (1995.01), Конв. приоритет: 29.09.1993 RU 93 93046900
- 16 Taymanov R., Baksheeva Iu., Sapozhnikova K., Chunovkina A. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 772, Art. 012036, 6 p. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/772/1/012036>
- 17 Taymanov R., Sapozhnikova K. *EPJ Web of Conferences*. 2014, 77, 00016 <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20147700016>

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Соколов Б.В.^{1,2}, Бураков В.В.¹, Микони С.В.¹, Юсупов Р.М.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)

² Университет ИТМО

sokolov_boris@inbox.ru

Введение

В настоящее время проблемы, связанные с оцениваем качества продукции, стали предметом интенсивных исследований, проводимых в такой новой научной отрасли знаний, как *качествоведение*, в которой разрабатываются методологические и методические основы количественного оценивания качества продукции, средства обеспечения единства форм оценивания указанного качества и достижения требуемой точности [1].

Центральным понятием здесь является понятие *качества* – под которым, согласно Международному стандарту ISO 8402-2000, понимается совокупность характеристик объекта, определяющих его способность удовлетворять установленным или предполагаемым потребностям [3,9,27-28]. В области создания и применения новых информационных технологий уже давно ведутся исследования, посвящённые оцениванию качества соответствующей продукции. Результаты указанных исследований находят своё отражение в соответствующих Международных стандартах и отечественных ГОСТах [1,3,9]. Так, например, в международном стандарте ISO 9126:1991 «Информационная технология. Оценка программного продукта. Характеристики качества и руководство по их применению» и последующих стандартах, его развивающих (ISO 9126:1-4, ISO 14598 – 1-6: 1998-2000), приводятся модели, показатели, критерии и метрики качества программных средств и продуктов [3,9]. При этом на практике используется большое число (порядка 100-150) количественных и качественных показателей, характеризующих как сами программные средства, так и технологии их создания. Среди них, в первую очередь, можно указать показатели стоимости создания и эксплуатации программных средств, критичность, оригинальность, размер и сложность программных средств; полнота описания требований, динамика и величина вносимых изменений; степень соответствия традиционной модели; напряженность графика создания программных средств, доступность ресурсов; доступность заказчика; число и квалификация разработчиков

программных средств. На рис.1. приведен пример задания частных показателей, а также единиц их измерений, используемых на практике при оценивании качества создаваемого программного обеспечения [3,27,28].

Кроме перечисленных показателей, к настоящему времени также разработано большое количество (порядка нескольких десятков) моделей создания программных средств, к числу которых можно отнести: классическую каскадную модель, каскадную модель с перекрывающимися процессами, V-образную модель каскадную модель и каскадно-возвратную модель, модель XP, эволюционное прототипирование, экспериментальное прототипирование, модель RAD, пошаговую модель, спиральную модель, сборочное программирование. В этих условиях особую актуальность приобретает проблема обоснованного выбора и адаптации соответствующей модели под проект конкретно создаваемого программного средства. Для этого разработано соответствующее методическое обеспечение, включающие в себя многочисленные методы, алгоритмы и процедуры многокритериального оценивания, анализа и выбора соответствующих моделей и проектов. Так, например, в работах [3,9] были разработаны методы и алгоритмы его реализующие, а также средства автоматизации решения задач формирования множества рекомендуемых моделей процесса разработки программных средств, принадлежащий классу алгоритмов распознавания, основанных на вычислении оценок. Особенности метода и алгоритмов являются использование множества рекомендуемых моделей в качестве конечного результата; использование редукции как способа формирования системы опорных множеств, гарантирующей формирование множества моделей; отказ от использования весовых коэффициентов, как средства выявления приоритетов лица, принимающего решение. Предложенные средства автоматизации в настоящее время используются в ряде отечественных и зарубежных компаний-разработчиков программного обеспечения

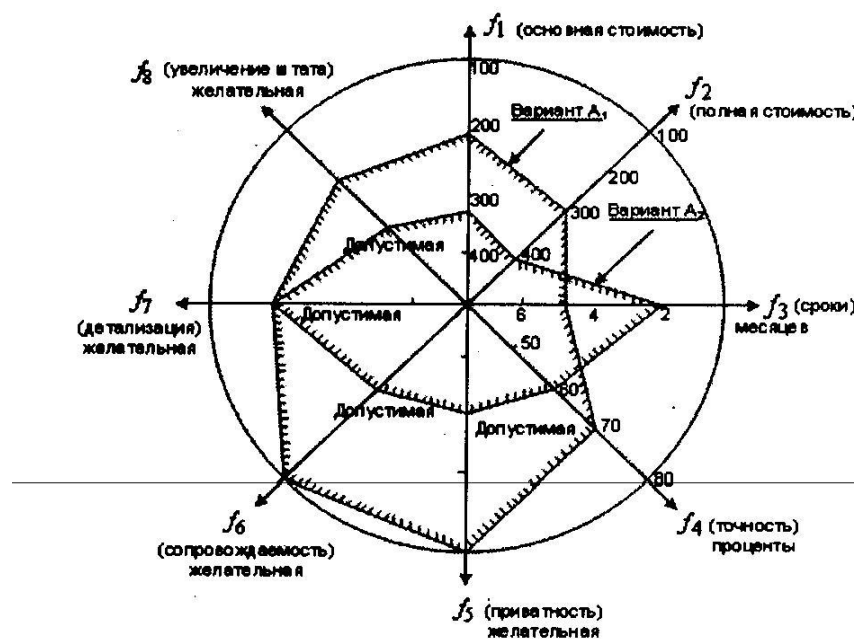


Рисунок 1. Пример набора показателей, используемых при оценивании качества программных средств.

В целом анализ полученных в данной области результатов показывает, что к настоящему времени для уровня машинной модели (программы) существуют методические средства, позволяющие оценивать её качество [3,9,27,28]. Поэтому в современных условиях становится актуальной разработка такого же рода средств оценивания качества моделей (методов, моделей, алгоритмов и методик), но теперь уже для более ранних этапов моделирования объектов-оригиналов, в качестве которых в данной статье рассматриваются сложные объекты или их частный случай – сложные технические объекты.

Следует отметить, что в области оценивания качества моделей к настоящему времени получено много интересных научных и практических результатов, связанных как с количественным и качественным оцениванием и анализом свойств моделей [6,12,22,23,26], так и упорядочением, а также выбором (синтезом) моделей для решения заданных классов задач [10,12,22,23]. При этом для различных предметных областей создавались свои теории и технологии моделирования, разрабатывались и разрабатываются огромное количество банков моделей и много модельных комплексов (далее моделей), которые широко используются на практике. Вместе с тем, при наличии большого разнообразия моделей остаются открытыми вопросы обоснованного выбора моделей, сравнения различных технологий моделирования [2,4,8,9,12,13,1517-25]. Это касается, в том числе, и такой важнейшей отрасли научных знаний как современная метрология [19]. Более того, в современных условиях назрела острая необходимость

создания таких информационных технологий, при которых уровни отчуждаемости моделей от своих разработчиков были бы такими же, как это имеет место для соответствующих программных продуктов [4,9].

Из анализа изложенного материала следует, что в современных условиях, к сожалению, практически остаётся не решённой проблема оценивания качества моделей, анализа и упорядочения различных классов моделей, обоснованного синтеза новых моделей, либо нахождения среди уже существующих моделей наиболее предпочтительных моделей, предназначенных для решения конкретных прикладных задач. Актуальность данной проблемы в ещё большей степени усиливается в том случае, когда исследуемый объект описывается не одной моделью, а комплексом моделей, в состав которого могут входить разнородные и комбинированные модели, каждая из которых должна оцениваться своей системой показателей [7,9]. Дополнительную сложность указанная проблема приобретает в том случае, когда при оценивании качества моделей приходится учитывать *фактор времени*. Это касается, прежде всего, тех объектов-оригиналов, у которых под действием различных причин (объективных, субъективных, внутренних, внешних и т.п.) наблюдается существенная структурная динамика [12,15]. В этих условиях для того, чтобы модель сохраняла свою точность и полезность, необходимо проводить адаптацию параметров и структур данной модели к изменяющимся условиям. А для этого заранее, на этапе синтеза модели, в состав её параметров и структур требуется вводить дополнительные элементы (избыточность), которые на этапе непосредственного использования модели позволят управлять качеством модели, снизят чувствительность модели и соответствующих показателей качества к изменениям состава, структуры и содержания исходных данных [12,22].

Однако для конструктивного решения общей проблемы оценивания и управления качеством моделей (выбора наиболее предпочтительных моделей), с нашей точки зрения, надо, в первую очередь, исследовать следующие общие и частные проблемы моделей [22,26]:

1. *Проблема разработки обобщённого описания различных классов моделей, позволяющего, во-первых, устанавливать взаимосвязи и соответствия между видами и родами моделей, и, во-вторых, сравнивать и упорядочивать их, используя различные метрики;*
2. *Проблема описания, классификации и выбора системы показателей, оценивающих качество моделей;*
3. *Проблема разработки комбинированных методов оценивания показателей качества моделей, заданных с использованием числовых и нечисловых (номинальных, порядковых) шкал;*

4. Проблема разработки методов и алгоритмов решения задач многокритериального анализа, упорядочения и выбора наиболее предпочтительных моделей, управления их качеством;
5. Проблема разработки методологических и методических основ решения задач многокритериального анализа и синтеза технологий комплексного моделирования сложных объектов.

Указанные проблемы и методические основы их формализации и решения, дополненные разработкой понятийно-терминологической и методологической базы, могут, с нашей точки зрения, рассматриваться как компоненты новой прикладной теории, которую будем называть квалиметрией моделей [22,26]. Рассмотрим более подробно вопросы обобщенного описывания проблематики моделей применительно к классу сложных объектов.

1. Обобщенное описание проблем субъектно-объектного моделирования развивающейся ситуацией и их управленческая интерпретация

К настоящему моменту времени существуют многочисленные варианты определения понятия *модель*, которое характеризуется ярко выраженной *полисемией*, отражающей различные смысловые значения, вкладываемые в данное понятие в зависимости от сферы приложений и от контекста, в связи с которым оно используется. В настоящее время существует несколько сотен определений понятий *модель* и *моделирование* [2,6,10,11,12,14,17-20]. Приведём еще одно из них – *модель* – это системное многоместное отображение объекта оригинала, имеющее наряду с безусловно-истинным, условно-истинное и ложное содержание, проявляющееся и развивающееся в процессе его создания и практического использования [14]; *моделирование* – один из этапов познавательной деятельности субъекта, включающий в себя разработку модели, проведение на ней исследований, получение и анализ результатов, выдачу рекомендаций о дальнейшей деятельности субъекта и оценивание качества самой модели применительно к решаемой задаче с учётом конкретных условий.

Из анализа перечисленных определений следует, что всякая корректно построенная модель содержит объективную истину (т.е. в чём-то правильно отображает объект-оригинал) [14,15]. Вместе с тем, из-за конечного числа элементов и их отношений в создаваемых моделях, описывающих объекты, принадлежащие разнообразной действительности, и ограниченности ресурсов (временных, денежных, материальных), выделяемых на моделирование, модели всегда упрощённо и приближённо отображают объект-оригинал. Однако человеческая практика свидетельствует, что данные свойства модели являются вполне приемлемыми при решении задач, стоящих перед субъектами. Базируясь

на принципе баланса точностей всегда можно найти компромисс между степенью детализации описания объекта-оригинала и прагматической ценностью создаваемой модели.

Анализ вышеизложенных определений показывает, что при моделировании различных классов сложных объектов, естественных и искусственных, целесообразно выделять следующие основные элементы и отношения, характеризующие данный процесс: во-первых, субъекта либо субъектов (S^m), объект-оригинал (Ob^{op}), объект-модель (Ob^m), а также среду (CP^m), в которой осуществляется моделирование; и, во-вторых, бинарные отношения между перечисленными элементами $R_{<1>}(Ob^{op}, S^m)$, $R_{<2>}(S^m, Ob^m)$, $R_{<3>}(Ob^{op}, Ob^m)$, $R_{<4>}(CP^m, Ob^{op})$, $R_{<5>}(CP^m, Ob^m)$, $R_{<6>}(CP^m, S^m)$. Нижние индексы $< >$ в перечисленных условных обозначениях означают собственные имена объектов (субъектов) и отношений [12,15,22]. Сразу же отметим, что, говоря в дальнейшем о субъектах моделирования, мы будем под этим термином понимать различные классы социальных субъектов, к числу которых могут быть отнесены: лица, принимающие решения (ЛПР); лица, обосновывающие решения (ЛОР); эксперты; лица, использующие модели; лица, строящие модели. На рис. 2. представлен возможный вариант взаимосвязи перечисленных элементов и отношений между ними [12,15].

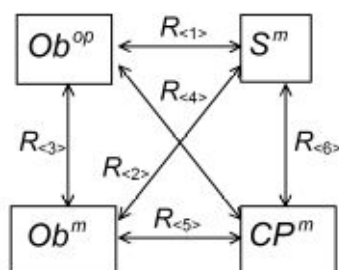


Рисунок 2. Варианты взаимосвязи объектов и субъектов моделирования развивающейся ситуации.

Из анализа данного рисунка следует, что процесс моделирования, определяется процессами взаимодействия субъектов (S^m), объект-оригинала (Ob^{op}), объект-модели (Ob^m), среды (CP^m), которые конструктивно задаются с помощью бинарных отношений между перечисленными элементами $R_{<1>}(Ob^{op}, S^m)$; $R_{<2>}(S^m, Ob^m)$; $R_{<3>}(Ob^{op}, Ob^m)$; $R_{<4>}(CP^m, Ob^{op})$; $R_{<5>}(CP^m, Ob^m)$; $R_{<6>}(CP^m, S^m)$. Важно отметить, что все перечисленные элементы и отношения под действием объективных-субъективных, внешних-внутренних причин постоянно изменяются во времени. В этом случае мгновенно зафиксированное

структурное состояние рассматриваемой четверки назовем *ситуацией*, а ее изменение во времени – *развивающейся ситуацией*. При таком описании процесс моделирования сложных объектов можно интерпретировать как *управление развивающейся ситуацией*.

Цель такого процесса будет состоять в постоянной минимизации субъектом —невязки|| возникающей между объектом-оригиналом и моделью на всех этапах их жизненного цикла путем постоянной адаптации модели под изменения, происходящие как в Ob^{op} , так и CP^m , S^m , например, изменение субъектом целей функционирования и моделирования Ob^{op} .

Представленная трактовка процесса разработки модели объекта в контексте развивающейся ситуации является весьма перспективной. Такой подход позволяет использовать достаточно хорошо разработанный аппарат анализа и синтеза сложных технических систем и их систем управления применительно к таким объектам управления как модели, а также в целом, к развивающейся ситуации [12,15,22].

Соответствующая технология графически представлена на рис. 3, где приняты следующие условные обозначения: 1 – формирование субъектом S^m целей создания объекта оригинала Ob^{op} ; 2 – формирование сценариев управляющих и возмущающих воздействий на объект-оригинал реальный, либо виртуальный; 3 – формирование субъектом S^m целей моделирования развивающейся ситуации; 4 – моделируемая система (объект Ob^{op}); 5 – модели (Ob^m) исследуемой системы; 6 – оценивание показателей качества моделей; 7 – управление качеством моделей; 8 – управление параметрами моделей; 9 – управление структурами моделей; 10 – изменение концепции описания моделей, состоящее в изменении границ между объектом-оригиналом и воздействующей на него средой.

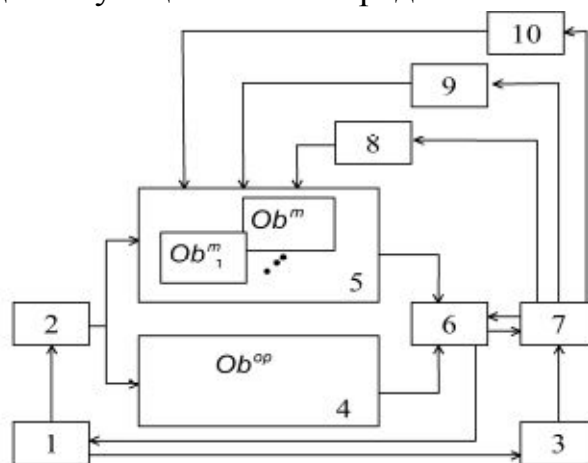


Рисунок 3. Обобщённая технология моделирования развивающейся ситуацией при ее управленческой интерпретации.

Из анализа данного рисунка следует, что моделирование развивающейся ситуации можно интерпретировать как процесс, состоящий в управлении качеством соответствующих моделей и самой технологии системного моделирования.

К настоящему времени разработаны многочисленные конструктивные подходы, позволяющие обобщенно описывать различные виды моделей, что необходимо для их оценивания и сравнительного анализа [12,15,22]. Теперь необходимо с таких же общих позиций содержательно и формально описать возможные технологии субъектно-объектного моделирования, опираясь на предлагаемую управленческую интерпретацию.

На содержательном уровне проблема моделирования развивающейся ситуации на различных этапах её жизненного цикла сводится к решению следующих трёх основных классов задач:

задачи анализа структурной динамики развивающейся ситуации;
задачи оценивания структурных состояния и структурной динамики развивающейся ситуации;

задачи структурно-функционального синтеза модели, а также выбора оптимальных программ управления качеством моделей в различных условиях обстановки.

В данной статье уделим основное внимание этапу применения синтезируемых моделей по целевому назначению. Для указанного этапа на содержательном уровне сформулируем соответствующие задачи, связанные с проблемами моделирования развивающейся ситуации.

В этом случае задачи анализа структурной динамики моделирования развивающейся ситуации включают в себя три основных подкласса задач [12,22,23]:

– задачи структурного анализа развивающейся ситуации;
– задачи исследования структурной динамики развивающейся ситуации в условиях отсутствия входных воздействий;

■ задачи исследования структурной динамики развивающейся ситуации при наличии входных воздействиях.

На содержательном уровне суть рассматриваемых задач сводится к следующему: известно исходное структурное состояние развивающейся ситуации; известен состав и допустимые варианты ее структурного построения; варианты сценариев изменения входных воздействий, известны пространственно-временные, технические и технологические ограничения; задан интервал времени, на котором проводится анализ; определён перечень показателей, с помощью которых оцениваются различные аспекты структурной динамики например, такие показатели качества моделей– как их адекватность, структурная и функциональная сложность, адаптивность, надежность и т.п..

Требуется провести многокритериальное оценивание и анализ структурной динамики развивающейся ситуации при различных вариантах входных воздействий. В том числе в ходе указанного анализа необходимо:

выяснить существование приемлемых решений;

– оценить управляемость ситуации, чувствительность решений к изменению исходных данных;

Затем необходимо осуществить многокритериальный динамический структурно-функциональный синтез как самой модели, исходя из поставленных субъектом целей моделирования и используемых показателей его качества, так и соответствующей технологии системного моделирования, при которых для каждого заданного сценария изменения возмущающих воздействий на развивающуюся ситуацию обеспечивался бы ее наиболее предпочтительный переход в требуемое структурное состояние.

Проведем формализацию рассматриваемых задач с использованием развиваемой авторами теории управления структурной динамикой [12,21]. Для конструктивного описания связей перечисленных ранее субъектов и объектов, являющихся базовыми компонентами развивающейся ситуации, введём в рассмотрение динамический системный альтернативный мультиграф (ДСАМ) с перестраиваемыми структурами следующего вида:

$$G^t = \langle X^t, F^t, Z^t \rangle, \quad (1)$$

где \square - индекс, характеризующий базовые компоненты развивающейся ситуации, $\square \quad NS = \{1,2,3,4\}$ – множество индексов, соответствующих структурам Ob^{op} , Ob^m , S^m , CP^m , $t \in T$ – множество моментов времени; $X^t = \{x^t_{i,l} \mid i \in NS, l \in L\}$ – множество базовых компонентов, входящих в состав структуры G^t в момент времени t ; $F^t = \{f^t_{i,l} \mid i,l \in NS\}$ – множество дуг типа G^t , отражающих взаимосвязи между его базовыми компонентами в момент времени t ; $Z^t = \{z^t_{i,l} \mid i,l \in NS\}$ – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих базовых компонентов например, параметры материальных, энергетических и информационных потоков, циркулирующих между базовыми компонентами.

Кроме того, зададим множество допустимых, исходя из содержательной постановки каждой конкретной задачи и сценария моделирования развивающейся ситуации, операций отображения указанных выше структур друг на друга:

$$M^t : F^t \rightarrow F^t, \quad (2)$$

а также операций композиции указанных отображений в момент времени t :

$$M^t = M^t_{1,1} \circ M^t_{1,2} \circ \dots \circ M^t_{1,K} \quad (3)$$

С учётом вышеизложенного, структурное состояние развивающейся ситуации можно определить как подмножество декартова произведения множеств ее базовых компонентов, на которых строятся возможные сценарии их взаимодействия:

$$S = \{X_1^t, X_2^t, X_3^t, X_4^t, \dots, 1, \dots, K\} \quad (4)$$

В этом случае множество структурных состояний запишется следующим образом:

$$S = \{S\} = \{S_1, \dots, S_K\} \quad (5)$$

Введём ещё множество допустимых операций отображения структурных состояний развивающейся ситуации друг на друга:

$$f_{t_1, t_2} : S_{t_1} \rightarrow S_{t_2} \quad (6)$$

При этом предполагается, что каждое структурное состояние развивающейся ситуации в момент времени $t \in T$ задаётся в результате операции композиции уравнений, описывающих каждый тип структуры (см. формулу 3).

Графическая управленческая интерпретация рассматриваемых задач управления структурной динамикой в этом случае сводится к поиску такого структурного состояния $S^* = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ и такой последовательности выполнения операций отображения вида (6) во времени $t_{1,2} \circ t_{2,3} \circ \dots \circ t_{f}$, при которых обеспечивается переход динамических систем вида (1) из заданных в требуемые структурные состояния. Наряду с графической интерпретацией исследуемой проблемы может быть также предложено следующее ее теоретико-множественное описание: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, позволяющие находить такие $\langle U^t, S^{*t_f} \rangle$, при которых выполняются следующие условия

$$J = \{X^t, Z^t, F^t, \dots, t \in (t_0, t_f]\} \xrightarrow{U^t, S^{*t_f}} \quad (7)$$

$$U^t, S^{*t_f} \in R = \{X^t, Z^t, F^t, \dots, t \in \tilde{R}_g; U^t = t_{1,2} \circ t_{2,3} \circ \dots \circ t_{t_f}\}; \quad \mathbf{B} \quad (8)$$

где U^t – управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как наиболее предпочтительную структуру и параметры модели, так и соответствующие технологии системного моделирования; J – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество выбираемых моделей и технологий, $q \in Q = \{1, \dots, l\}$ – множество номеров показателей; g – множество динамических альтернатив; \mathbf{B} – множество номеров пространственно-временных, технических и

технологических ограничений, определяющих процессы реализации системного моделирования развивающейся ситуации; \tilde{R}_g – заданные величины; $T = (t_0, t_f]$ – интервал времени, на котором синтезируются как наиболее предпочтительная структура модели, так и соответствующие технологии.

Анализ показывает, что предложенная интерпретация процессов управления структурной динамикой базируется на фундаментальном **функционально-структурном подходе** к описанию объектов любой природы [2,6,12]. Этот подход, в общем случае, представляет собой совокупность философских концепций, объективных закономерностей развития систем, научных положений и выводов, определяющих стратегию и методы анализа и синтеза антропогенных систем.

Его характерными особенностями являются [2,6,12,14]: учёт диалектической взаимосвязи функций и структуры объектов при определяющей роли функции по отношению к структуре; целостный подход к анализу и синтезу многоуровневых систем; учёт вещественно-энергетических и информационных связей между элементами системы; учёт взаимосвязей исследуемой системы с внешней средой.

Взаимоотношения функций и структур основных компонент развивающейся ситуации в процессе её изменения под действием различных причин характеризуются не только единством, но и противоречиями между ними. При этом разрешение указанных противоречий может осуществляться различными альтернативными путями – от полного отказа от старой структуры, переставшей соответствовать новым функциям, до использования старой структуры, несмотря на существенно изменившиеся функции. Предлагаемая интерпретация субъектно-объектного моделирования как процесса управления структурной динамикой, в этом случае предназначена для целенаправленного формирования оптимальной последовательности действий, которая должна обеспечить наилучшее разрешение (с точки зрения лица, принимающего решение) диалектического противоречия между функциями и структурами развивающейся ситуации на каждом из этапов ее жизненного цикла.

При этом на ранних этапах должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций и структур, а также внесён такой уровень избыточности в указанные множества и отношения, при которых на этапе применения объекта-оригинала и его модели по целевому назначению имелась бы возможность гибко реагировать на все расчётные и нерасчётные нештатные ситуации, вызывающие деградацию и реконфигурацию их структур.

2. Пример решения задачи оценивания и выбора проекта по трудоёмкости изготовления

Постановка задачи

Приведем пример поставки задачи разработки модели сложного объекта, ориентированного на решение важного класса прикладных задач, связанного с многопараметрическими измерениями его свойств [19]. Будем предполагать, что для решения проблемы предложено два проекта. Составлены технические задания на их разработку. Функциональность моделей одинакова, т.е. они в равной мере адекватны решаемой задаче. Доказана соизмеримая достоверность результатов решения задачи. Каждый разработчик обосновывает предпочтительность своего проекта создания модели. Перед лицом, принимающим решение, возникла проблема выбора наиболее приемлемой модели. Его интересуют, прежде всего, временные затраты на проектирование и применение модели [10]. С учётом особенности разработки информационных продуктов предполагается, что финансовые затраты пропорциональны количеству разработчиков и времени выполнения этих этапов.

Исходные данные

Разработчики моделей представили свои оценки временных затрат по пяти этапам проектирования и применения модели (см. табл. 1).

Этап проектирования представлен в табл. 1 двумя этапами: разработкой и модификацией модели, а этап применения – тремя этапами: настройкой модели на задачу, решением задачи и анализом результатов.

Таблица 1 Временные оценки этапов жизненного цикла

Модель	Разработка, месяц	Модификация, недель	Настройка, часов	Решение, мин	Анализ, дней
№ 1	2	2	5	8	1
№ 2	3	1	3	6	2

Решение задачи

Примем каждый этап за показатель оценивания предложенных проектов. Согласно требованиям задачи, каждый из них подлежит минимизации. Из сравнения векторных оценок двух моделей следует, что они несравнимы и требуется дополнительная информация для выявления лучшего варианта.

Учитывая численный характер векторных оценок, воспользуемся методами функционального выбора. Из них простейшим является метод достижения идеальной цели со средневзвешенной аддитивной обобщающей функцией:

$$v_i^a = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad (9)$$

В формуле (9) переменная v_{ij} означает нормированную оценку значения j -го показателя i -го объекта, а w_j характеризует важность (вес) j -го показателя, причём:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (10)$$

Согласно формуле (9) метод требует задания важности признаков w_j , $j=1,2,3,4,5$, по которым оцениваются модели. Вычислим весовые коэффициенты этапов жизненного цикла моделей с помощью матрицы парных сравнений. Для этого достаточно задать $N - 1$ предпочтений, соответствующих гамильтонову пути в матрице размерностью $N \times N$. Остальные клетки матрицы достраиваются автоматически с сохранением коэффициента согласованности [16].

При задании предпочтений следует, прежде всего, определиться в соотношении этапов проектирования и применения модели. В случае многократного решения типовой задачи наиболее важными этапами являются настройка модели на задачу и время её решения. В этап настройки модели входит планирование и подготовка исходных данных. При разовом решении задачи наиболее важным считается этап проектирования модели.

Из возможных типов предпочтений применим кратность предпочтений [7,8,16]. Сформулируем следующие предпочтения, для простоты ограничившись только умеренным превосходством:

- умеренное превосходство (Разработка, Модификация);
- умеренное превосходство (Настройка, Модификация);
- умеренное превосходство (Решение, Настройка);
- умеренное превосходство (Решение, Анализ).

Умеренное превосходство по Т. Саати кодируется как отношение 3:1 [16], что означает трехкратное превосходство первого аргумента предпочтения над вторым. Ниже представлена матрица, соответствующая принятым предпочтениям. Введённые в 4 клетки предпочтения выделены полужирным шрифтом. На их основе вычислены значения в остальных клетках матрицы [10].

Этап	Разработка	Модификация	Настройка	Решение	Анализ	Вес
Разработка		3,00	1,00	0,33	1,00	0,16
Модификация	0,33		0,33	0,11	0,33	0,05
Настройка	1,00	3,00		0,33	1,00	0,16
Решение	2,99	8,98	3,00		3,00	0,47
Анализ	1,00	2,99	1,00	0,33		0,16

На основе содержимого матрицы вычислен вектор весовых коэффициентов: $w = (0,16; 0,05; 0,16; 0,47; 0,16)$.

Выполнение этапов проектирования и применения моделей представлено в табл. 1 в различных единицах измерения. В то время как разработка модели измеряется месяцами, решение задачи измеряется минутами и т. д. Для сопоставления различных показателей они должны быть выражены в относительных единицах измерения, что достигается их нормированием. Нормированная оценка показателя в формуле (9) представляет собой отношение значения показателя к диапазону измеряющей его шкалы.

Граничные значения шкалы определяются либо по выборке оцениваемых объектов (выборочная шкала), либо задаются экспертом (экспертная или теоретическая шкала). Оценивание в экспертной шкале устойчиво, поскольку она учитывает возможный размах выборок. В левой части табл. 2 приведены границы выборочных шкал показателей для выборки из двух оцениваемых моделей.

Таблица 2 Шкалы и предпочтения

Признак	Мин.зн.	Макс.зн.	Вес	Требование	Нижняя граница	Верхняя граница
Разработка	2	3	0,16	Мин	0	5
Модификация	1	2	0,05	Мин	0	3
Настройка	3	5	0,16	Мин	0	8
Решение	6	8	0,47	Мин	0	10
Анализ	1	2	0,16	Мин	0	3

В правой части таблицы приведены экспертные шкалы этих показателей. Два средних столбца табл. 2 содержат соответственно вектор важности (вес) показателей и предъявляемые к ним требования.

Нормированные в экспертных шкалах значения показателей представляют собой сопоставимые в абсолютной шкале $[0, 1]$ единичные оценки моделей. Они приведены в соответствующих столбцах табл. 3.

Таблица 3 Единичные и обобщённая оценки моделей

Модель	Разработка	Модификация	Настройка	Решение	Анализ	Оценка	Ранг
№ 1	0,60	0,33	0,38	0,20	0,67	0,37	2
№ 2	0,40	0,67	0,63	0,40	0,33	0,44	1

В столбце «Оценка» приведены обобщённые оценки моделей 1 и 2, вычисленные по формуле (9), а в столбце «Ранг» – ранг, определённый по обобщённым оценкам. Согласно этим столбцам предпочтение отдаётся модели № 2.

Согласно требованиям в таблице 2 идеальными частными целями являются левые (минимальные) границы выборочных шкал. Относительные отклонения (нормированные значения штрафов) от этих границ представлены в соответствующих столбцах табл. 4.

Таблица 4 Решение задачи методом отклонений от цели

Модель	Разработка	Модификация	Настройка	Решение	Анализ	Отклонение	Ранг
№ 1	0,00	0,50	0,40	0,50	0,00	0,324	2
№ 2	0,33	0,00	0,00	0,00	0,50	0,133	1

Модель № 1 и № 2 имеют соответственно 2 и 3 нулевых штрафа по тем критериям, чьи значения совпадают с минимальными границами выборочных шкал. В столбце отклонение (от цели) приведены средневзвешенные штрафы по всем критериям. Поскольку у модели № 2 он меньше, она признаётся лучшей.

Таким образом, применение методов достижения цели и отклонения от цели дали одинаковые результаты, несмотря на различные относительные единичные оценки показателей и благодаря применению аддитивной средневзвешенной обобщающей функции обоими методами.

В том случае, когда лицо, принимающее решение, обладает большей информацией о целях и предпочтениях на шкалах показателей применяются соответственно методы оптимизации по достижению реальной цели и многомерной полезности. В примере совместим эти методы, задавшись реальными целями по четырём показателям и нисходящей логистической функцией полезности по показателю «Решение задачи».

На рис. 4 реальные цели помечены на оси абсцисс каждого из четырёх показателей. Установим 50-ти процентную полезность в точках достижения реальной цели. Ей соответствуют кусочно-линейные функции полезности. На графиках функций полезности точками показаны значения полезности для моделей № 1 и № 2. Модель № 1 определена левой колонкой графиков, а модель № 2 – правой колонкой.

Справа от каждой колонки графиков функций полезности показаны диаграммы вкладов соответствующих показателей в обобщённую оценку модели. Сектор круговой диаграммы представляет собой нормированное обобщённой оценкой слагаемое формулы (9). Ограниченный линиями сектор соответствует среднеарифметической оценке вклада по каждому показателю.

Решение задачи методом оптимизации по полезности с аддитивной обобщающей функцией приведено в табл. 5.

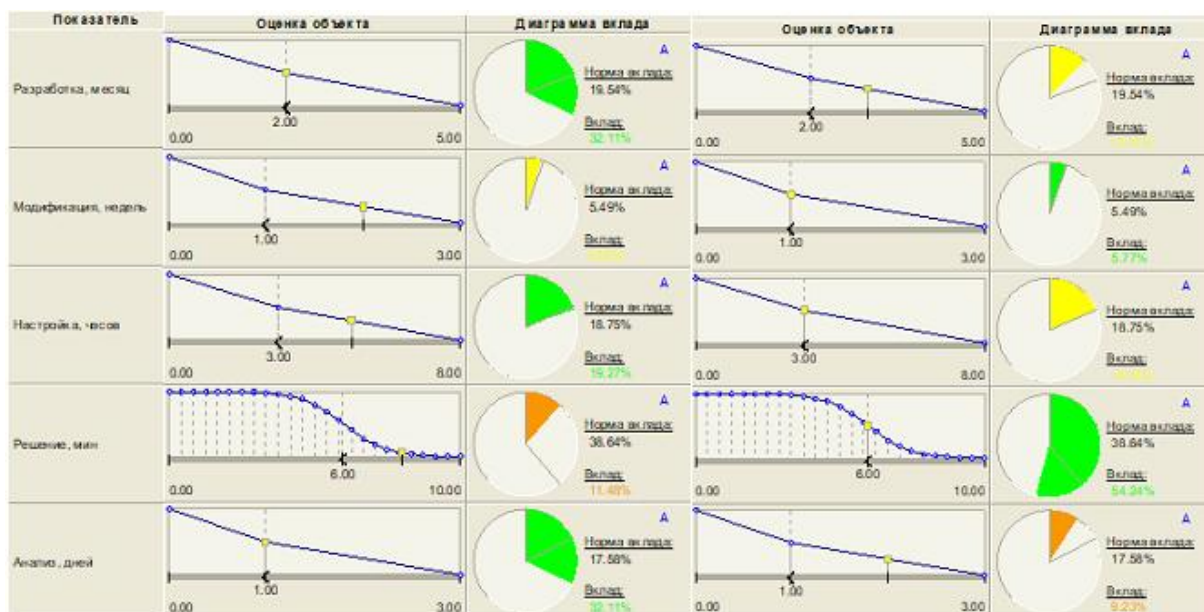


Рисунок 4. Значения функций полезности для моделей № 1 и № 2 и вклады оценок

Анализ вкладов на рис. 4 позволяет графически объяснить лучшую оценку модели № 2. Она достигнута за счёт вклада по показателю «Решение задачи», имеющему максимальную важность по сравнению с остальными показателями.

Таблица 5 Решение задачи методом многомерной теории полезности

Модель	Разработка	Модификация	Настройка	Решение	Анализ	Оценка	Ранг
№ 1	0,67	0,50	0,50	0,06	0,75	0,36	2
№ 2	0,50	0,75	0,70	0,50	0,50	0,54	1

Рассмотренный пример позволил продемонстрировать основные методы функционального выбора. Одинаковые результаты, полученные этими методами для конкретного примера, можно рассматривать как частный случай. В общем случае для других объектов и предъявляемых к ним требований методы могут давать различные предпочтения на множестве оцениваемых объектов.

Заключение

Подводя краткий итог сказанному, следует отметить, что в современных условиях назрела острая необходимость разработки методологических и методических основ теории оценивания и управления качеством моделей, являющейся одной из базовых теорий современной междисциплинарной отрасли системных знаний. Одна из основных целей

данной теории состоит в количественном и качественном оценивании таких базовых свойств моделей сложных объектов и процессов как адекватность, сложность, адаптивность, универсальность, многофункциональность, надежность, открытость, интеллектуальность, трудоемкость, достоверность.

Данная теория, являющаяся составной частью такой научной отрасли знаний как качествоведение, сама может быть декомпозирована на множество частных прикладных теорий, в которых должно проводиться оценивание качества моделей, используемых в определённой предметной области.

По нашему мнению, разработка теории качества моделей должна идти параллельно в двух основных взаимодействующих и взаимно обогащающих направлениях исследований. В рамках первого направления должны разрабатываться общие вопросы моделей, которые базируются на результатах, получаемых в рамках большого числа частных прикладных теорий оценивания и управления качеством моделей (второе направление исследований), развиваемых в каждой из конкретных предметных областей [3,6,9,12,13,17-25,27-28]. В качестве самостоятельного направления исследований по рассматриваемой проблематике целесообразно выделить создание интегрированных систем поддержки принятия решений при оценивании и управлении качеством моделей.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№№15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, в рамках бюджетных тем №№0073–2014–0009, 0073–2015–0007, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP.

Литература

- 1 Андрианов Ю.М., Суббето А. И. Квалиметрия в приборостроении. – Л. Машиностроение, 1990. – 216.
- 2 Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
- 3 Баранов С.Н., Домарацкий А.Н., Ласточкин Н.К., Морозов В.П. Процесс разработки программных изделий – М.: Наука, 2000. – 176 с.

- 4 Валькман Ю.Р. О проблеме —отчуждения моделей исследуемых объектов от создателей в проектировании сложных изделий // Теория и системы управления -1996.-№3.
- 5 Калинин В.Н, Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами //Теория и системы управления.-.1995.-№1.
- 6 Калинин В.Н., Резников Б.А. Теория систем и управления (структурно-математический подход). – Л.: ВИКИ, 1987
- 7 Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981.
- 8 Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2000.
- 9 Липаев В.В. Тестирование компонентов и комплексов программ: учебник. РАН. Институт системного программирования. – М.: Синтег, 2010. – 392 с.
- 10 Микони С.В. Системный анализ методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив. Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 4(41). С. 180-199.
- 11 Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.
- 12 Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
- 13 Павловский Ю.А. Имитационные модели и системы. – М.: Фазис, 2000.
- 14 Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989.
- 15 Ростовцев Ю.Г., Юсупов Р.М. Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования// Известия ВУЗов. Приборостроение. - № 7, 1991.
- 16 Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1989. — 316 с.
- 17 Савин Г.И. Системное моделирование сложных процессов. – М.:Фазис, 2000.
- 18 Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2001.
- 19 Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е. Измерения как основа формирования новых знаний. /В книге Метрология и измерительная техника, книга-справочник в трех томах, ред. проф. Х. Радева, т.3, перевод с болгарского М.Иговой и К. Коджабашевой, Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2016, с.749-780.

- 20 Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В. Адаптивные системы управления машиностроительным производством. – М.: Машиностроение, 1989.
- 21 Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики.-2002.-№5.
- 22 Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодальных комплексов // Известия РАН. Теория и системы управления, 2004, №6, стр. 5-16.
- 23 Соколов Б.В., Юсупов Р.М., Микони, С.В. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: состояние исследований и перспективы развития // –СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. - С.44-53.
- 24 Технология системного моделирования / Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.; Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988.
- 25 Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. Системы и модели. – М.: Радио и связь, 1982.
- 26 Юсупов Р.М., Иванищев В.В., Костельцев В.И., Суворов А.И. Принципы квалиметрии моделей // IV СПб Международная конференция «Региональная информатика-95», тез. докладов. – СПб, 1995.
- 27 Florac W.A., Carlton A.D. Measuring the Software Process – Addison-Wesley, 1999. – 272 p.
- 28 Jones C. Software Assessments, Benchmarks, and Best Practice – Addison-Wesley, 2000. – 688 p.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Г.Ф. Малыхина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

malykhina@icc.spbstu.ru

При проектировании измерительных систем для медицинских приложений не всегда имеется возможность иметь полную информацию и точные знания об объекте измерения. Это связано со следующими причинами:

- неизвестно полное множество внутренних параметров объекта, которые оказывают влияние на косвенно измеряемые величины;
- отсутствуют необходимые датчики, которые позволяют измерять полное множество внутренних параметров, косвенно характеризующих измеряемые величины;
- невозможно применять полное множество датчиков измерительной системы, предназначенной для повседневного использования, которая не должна нарушать комфортность.

В этих случаях можно говорить об измерениях в условиях неполного знания измеряемого объекта, или об измерениях, основанных на неполном векторе внутренних параметров, характеризующих объект измерения (Рис.1).

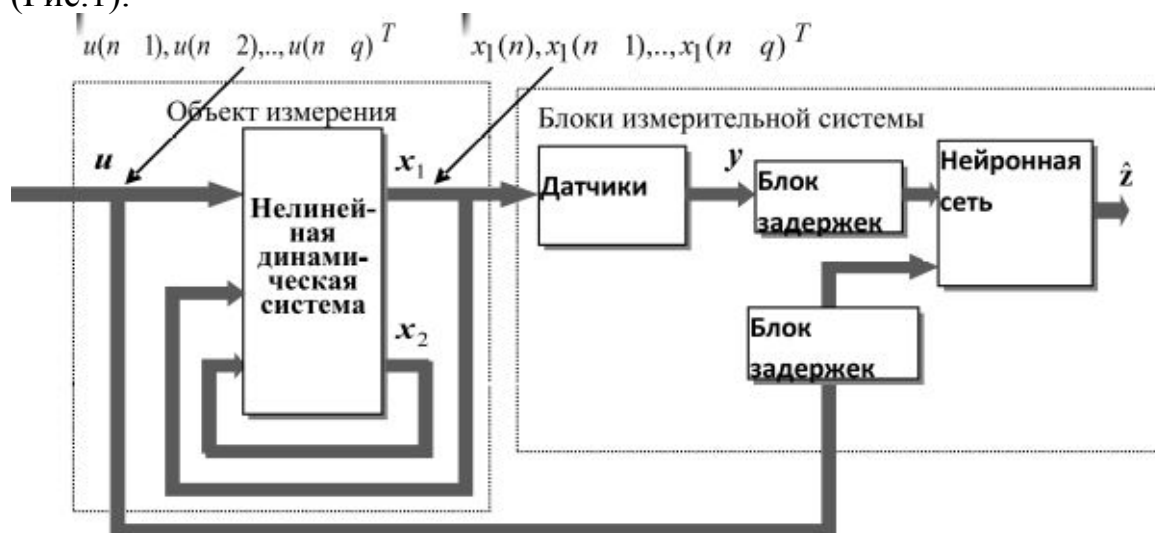


Рисунок 1. Измерение в условиях неполного вектора измеряемых параметров

Неполнота информации о внешней среде оказывает существенное влияние на проектируемую измерительную систему. В качестве примера можно привести позитрон-эмиссионную томографию – получение изображений, путем детектирования радиации эмиссионных позитронов после введения радиоактивных материалов в ткани органов. Каждый датчик регистрирует сигналы, смешанные в неизвестных пропорциях. Таким образом, косвенные измерения должны быть выполнены при неполной информации о среде.

Недостаточная информация о внешней среде может быть дополнена при наличии структурной и информационной избыточности, присутствующей в измерительной системе. Например, измерение параметров движения космического аппарата, спускаемого на поверхность Луны с использованием радиоизотопной системы, работающей на рассеянном гамма-излучении, связано с неопределенностью состава грунта в месте посадки.

В условиях неполной информации об объекте или о среде измерения, целесообразно применение нейросетевого подхода, который позволяет получить следующие преимущества:

- включение процедур моделирования неизвестной величины в алгоритм измерения;
- реализация слепых методов разделения сигналов отдельных источников при смешивании их средой с неизвестными характеристиками;
- адаптация обученной нейронной сети к реальным условиям измерения при наличии структурной и информационной избыточности в измерительной системе.

Измерение с использованием динамических нейронных сетей.

Рассмотрим объект измерения, который представляет собой нелинейную динамическую систему дискретного времени, описанную в терминах пространства состояний.

Динамическое поведение системы в предположении об отсутствии шума характеризуется уравнениями:

$$x(n+1) = f(x(n), u(n)), \quad (1)$$

$$y(n) = g(x(n)), \quad (2)$$

где $x(n)$ q -вектор, характеризующий состояние нелинейной динамической системы, $u(n)$ входной m -вектор управляющих воздействий, $y(n)$ p -вектор, характеризующий выход системы, $f(\cdot)$ - функция, характеризующая изменение состояний системы, функция $g(\cdot)$ определяет связь между вектором параметров состояниями системы и ее выходом.

Размерность пространства состояний q определяет порядок системы. Уравнение (1) характеризует процесс функционирования системы, уравнение (2) – процедуру измерения. Если функция \mathbf{h} определяет линейное преобразование, то система (1) является линейной. Если функция \mathbf{h} в уравнении измерения (2) линейна, то процедура измерения строится как линейное преобразование характеристик состояния системы.

Если разработчик имеет полные знания об объекте измерения, включающие знание модели объекта и всех параметров его состояния, и имеет датчики, позволяющие измерить все эти параметры, то процедура измерения определяется как уравнение (3), включающее также шум измерения $e(n)$:

$$y(n) = \mathbf{h}^T \mathbf{x}(n) + e(n). \quad (3)$$

Для линейной динамической системы дискретного времени в случае, если только некоторые из состояний объекта могут быть известны исследователю, система характеризуется уравнениями [1]:

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(n) + \mathbf{B} \mathbf{u}(n), \quad (4)$$

$$y(n) = \mathbf{C} \mathbf{x}(n), \quad (5)$$

где \mathbf{A} $q \times q$ -матрица, \mathbf{B} $q \times (m+1)$ -матрица, \mathbf{C} $p \times q$ матрица.

Предположим, что только k параметров состояний объекта могут быть измерены. Тогда матрица \mathbf{A} эволюции динамической системы в уравнении (4) может быть разделена на блоки:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

где \mathbf{A}_{11} , \mathbf{A}_{21} – матрицы переходов для вектора измеряемых параметров $\mathbf{x}_1 = [x_1 \dots x_k]^T$, а \mathbf{A}_{12} , \mathbf{A}_{22} – матрицы переходов для вектора не измеряемых, неизвестных параметров $\mathbf{x}_2 = [x_{k+1} \dots x_q]^T$.

Передаточная матрица \mathbf{B} внешних воздействий на систему, называемая также матрицей внешнего управления, разделяется аналогичным образом на две составляющие с размерностями, согласованными с фрагментами вектора параметров состояния:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2]^T, \quad (7),$$

где \mathbf{B}_1 – матрица управления измеряемыми параметрами состояния системы, где \mathbf{B}_2 – матрица управления не измеряемыми параметрами состояния системы.

Общая матрица уравнения измерения (5) так же естественно расщепляется на два блока меньшей размерности:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где C_1 – матрица измерения для параметров, контролируемых датчиками, C_2 – гипотетическая матрица для не измеряемых датчиками компонентов вектора параметров состояния.

Уравнение измерения с учетом $x_1(n), x_2(n)$ принимает вид:

$$y(n) = C_1 x_1(n) + C_2 x_2(n). \quad (9)$$

Вектор не измеряемых параметров $x_2(n)$ можно оценить на основе измеряемых параметров $x_1(n), x_1(n-1), \dots, x_1(n-q)$.

Итеративное преобразование вектора не измеряемых параметров на основе вектора измеряемых на q -том шаге характеризуется новым уравнение измерения:

$$y(n) = C_1 x_1(n) + C_2 [A_{21} x_1(n-1) + A_{22} A_{21} x_1(n-2) + \dots + A_{22}^{q-1} A_{21} x_1(n-q) + B_2 u(n-1) + A_{22} B_2 u(n-2) + \dots + A_{22}^{q-1} B_2 u(n-q) + A_{22}^q x_2(n-q)]. \quad (10)$$

Для возможности выполнения измерений на основе преобразованной формы уравнений, отражающих измерительную систему динамического объекта, требуется, чтобы система была локально управляемой относительно вектора не измеряемых параметров. Это условие обеспечивается, если матрица $M = [A_{22}^{q-1} B_2 \dots A_{22} B_2 B_2]$ и матрица наблюдаемости $L = [I \ A_{21} \ A_{22} \dots \ A_{22}^{q-1} \ A_{21}]$ имеют полный ранг, т.е. определитель матриц не равен нулю $Det(M) \neq 0, Det(L) \neq 0$ [6,7].

Таким образом, если пренебречь составляющей $x_2(n-q)$, то измерение параметров нелинейной динамической системы в условиях неполной информации выражается в форме (10) как преобразование текущего и предшествующих (на глубину q) значений вектора измеренных величин $[x_1(n), x_1(n-1), \dots, x_1(n-q)]^T$ и предшествующих значений вектора управления $[u(n-1), u(n-2), \dots, u(n-q)]^T$.

Преобразование результатов измерения (10) может быть выполнено с помощью рекуррентной нейронной сети. Нейронная сеть имеет линию задержек на входе, нелинейные активационные функции и моделирует пространство состояний не измеряемой части параметров объекта. В процессе градуировки измерительной системы выполняется обучение нейронной сети, в результате которого определяется необходимое количество задержек на входе, зависящее от порядка системы, структурная сложность нейронной сети (число слоев и число нейронов в каждом слое).

Описанный метод был применен для неинвазивного измерения уровня глюкозы крови на основе показаний реографа [2]. На вход

нейронной сети подавался вектор $\mathbf{u}(n-1), \mathbf{u}(n-2), \dots, \mathbf{u}(n-q)^T$ управляющих воздействий, включающий количество принятой пищи с учетом ее гликемического индекса, количество жидкости, показатель физической активности. Непосредственно измеряемыми параметрами $\mathbf{x}_1(n), \mathbf{x}_1(n-1), \dots, \mathbf{x}_1(n-q)^T$ являются комплексные сопротивления тканей на нескольких частотах и температура. На основании непосредственно измеренных параметров и входных параметров удалось определить концентрацию глюкозы в крови.

Таким образом, применение рекуррентной нейронной сети, моделирующей пространство состояний, и внешнее управляющее воздействие на контролируемый объект, позволяет эмулировать систему измерений и после обучения сети выполнять измерения параметров нелинейной динамической системы в условиях недостатка априорных знаний об объекте измерения, и невозможности получить адекватную модель объекта.

Измерение в условиях неизвестной среды, смешивающей сигналы.

Неполнота информации о внешней среде оказывает существенное влияние на проектируемую измерительную систему. Рассмотрим случай, когда компоненты вектора $\mathbf{x}(n)$ сигналов динамической системы смешаны. Такая задача возникает, например, в акустических измерениях, в радиолокации, в позитрон-эмиссионной томографии. Сигналы $\mathbf{x}(n) [x_1(n), x_2(n), \dots, x_q(n)]$ подвергаются смешиванию неизвестной матрицей \mathbf{H} . Единственно доступным для измерения является вектор наблюдений, который в матричной форме можно представить следующим выражением [3]: $\mathbf{x}_1(n) = \mathbf{H}\mathbf{x}(n) + \mathbf{v}(n)$, где $\mathbf{v}(n) [v_1(n), v_2(n), \dots, v_q(n)]^T$ - вектор шума. Доступна для измерений смесь сигнала и шума. Интересующим нас, подлежащим измерению, является вектор-сигнал $\mathbf{x}(n)$, который является результатом применения разделяющей матрицы \mathbf{W} к непосредственно измеренному сигналу: $\mathbf{y}(n) = \mathbf{W}\mathbf{x}_1(n)$. Другими словами, задача восстановления заключается в поиске матрицы \mathbf{W} , обратной по отношению к смешивающей матрице \mathbf{H} , неизвестной исследователю.

Задача измерения в условиях неизвестной среды, смешивающей сигналы, может быть по-разному решена в случае, если необходимо получить все компоненты вектора $\mathbf{x}(n)$, представляющие полезные сигналы, или только часть компонентов вектора $\mathbf{x}(n)$, не восстанавливая входящие в него компоненты шума. Поскольку присутствие шума является более общим случаем, рассмотрим метод слепого извлечения полезных сигналов из смеси. Этот метод может быть выполнен с использованием каскадной нейронной сети, подстраивающей веса матрицы $\mathbf{W} [w_1, w_2, \dots, w_m]$ (Рис. 2).



Рисунок 2. Каскадная нейронная сеть для извлечения сигналов

Первый каскад нейронной сети выполняет извлечения первого компонента сигнала со специфическими статистическими свойствами. Второй каскад удаляет извлеченный компонент из смеси. Удаление извлеченного сигнала позволяет снижать размерность задачи на следующем шаге, где для второго компонента сигнала повторяется процедура извлечения и удаления. Число каскадов нейронной сети зависит от числа компонентов сигнала, подлежащих извлечению и измерению. Реализация процедуры извлечения сигналов основана на разнице статистических свойств компонентов вектора $x(n)$, которые характеризуются функцией плотности вероятностей (ФПВ).

В качестве целевой функции при поиске оптимальных значений \mathbf{W} предложено использовать обобщенные статистические моменты высокого порядка, которые более чувствительны к различию между ФПВ. Поэтому были использованы обобщенная асимметрия $A_{p_1q_1}$ порядка p_1 и обобщенный эксцесс $K_{p_2q_2}$ порядка p_2, q_2 , которые определяются по формулам:

$$A_{p_1q_1} = \frac{E \text{sign}(y) |y|^{p_1}}{E |y|^{p_1/q_1}}, \quad (11)$$

$$K_{p_2q_2} = \frac{E |y|^{p_2}}{E |y|^{p_2/q_2}}. \quad (12)$$

Целевая функция основана на двух обобщенных моментах:

$$J_{p_1q_1p_2q_2}(\mathbf{w}) = \frac{1}{p_1} A_{p_1q_1}(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_1) - \frac{1}{p_2} K_{p_2q_2}(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_1). \quad (13)$$

Анализ статистических погрешностей оценки обобщенной асимметрии и обобщенного эксцесса показал, что в смысле расстояния Махаланобиса для асимметрии $A_{p_1q_1}$ лучшие различающие свойства достигаются при $(p_1 = 2, q_1 = 1)$, а для эксцесса $K_{p_2q_2}$ - при $p_2 = 1, q_2 = 1/2$.

Предложенный нейросетевой метод был применен для восстановления сигналов в каналах системы измерения параметров светоизлучающих диодов [4], в динамической позитрон-эмиссионной томографии для разделения изображений тканей левого и правого желудочка сердца [5] и др.

Адаптация обученной нейронной сети к реальным условиям измерения.

Недостаточная информация о внешней среде может оказывать существенное влияние на результаты измерения. Особенно остро проблема недостатка информации представлена при выполнении исследовательских проектов, например, при организации экспедиции на другие планеты. В частности, при спуске на поверхность Луны измерение параметров движения космического аппарата выполняется с использованием радиоизотопной системы, работающей на рассеянном гамма-излучении.

Состав грунта определяет величину комптоновского сечения, которое в зависимости от состава может изменяться значительно. В результате экспедиций на Луну состав грунта был изучен на некоторых участках ее поверхности, в местах посадки исследовательских модулей [6]. Тем не менее, посадка должна пройти успешно и в других, неисследованных ранее областях, и при отклонении от расчетного места посадки.

Для этой цели разработан алгоритм измерения, адаптирующийся к месту посадки (Рис.3). Алгоритм объединяет показания двух высотомеров, работающих на разных физических принципах: радиовысотомера и фотонного высотомера. Два прибора работают в разных диапазонах высот. В процессе приближения к поверхности погрешности радиовысотомера возрастают, а погрешности фотонного высотомера уменьшаются. На интервале высот от 20 до 10 м работают одновременно два высотомера, показания одного из которых зависят от состава грунта. Это дает возможность выполнять адаптацию алгоритма фотонного высотомера с учетом показаний радиовысотомера с последующим плавным переключением на показания фотонного высотомера.

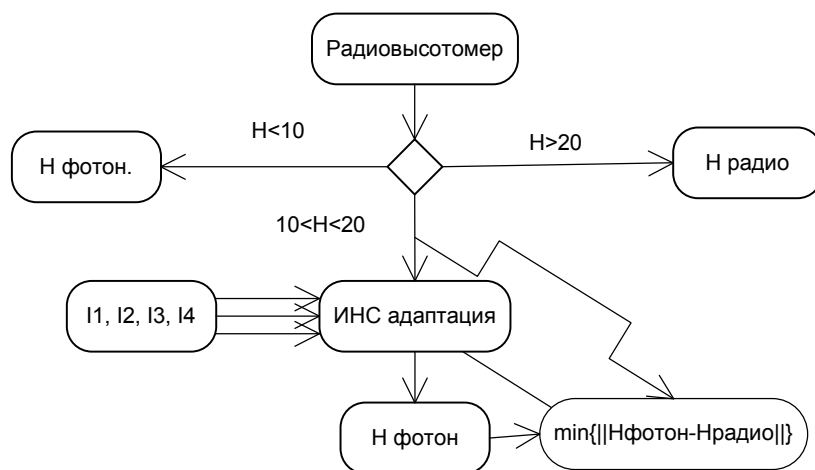


Рисунок 3. Адаптация нейронной сети для измерения параметров движения спускаемого аппарата на высоте от 20 до 10м.

Нейронная сеть может быть адаптирована в новых условиях окружающей среды. В условиях нестационарной среды, свойства которой изменяются с течением времени, могут быть использованы нейронные сети, адаптирующиеся в реальном времени, причем, чем выше адаптивные способности системы, тем более устойчивой будет ее работа в нестационарной среде [5].

На высотах от 20 м до 10 м выходные сигналы детекторов рассеянного гамма-излучения I_1, I_2, I_3, I_4 используются для адаптации нейронной сети на основе измерения высоты с помощью радиовысотомера $H_{радио}$. Для устранения влияния углов наклона спускаемого аппарата предложено выполнять суммирование выходов четырех детекторов. На основе адаптации нейронной сети будет получена сеть, соответствующая текущему значению σ_0 комптоновского рассеяния, характеризующая состав грунта поверхности. Для измерения на высотах от 10 до 0.3 м предложено использовать обученную нейронную сеть ИНС_i, адаптированную к составу грунта.

Литература

1. Haykin, Simon. Neural networks and learning machines / Simon Haykin.—3rd ed. PrenticeHall.2009, 938 pp.
2. Ю.А. Гродецкий, К.Э. Кудряшов, Г.Ф. Малыгина. Искусственная нейронная сеть для обработки сигнала глюкореографа. «Нейрокомпьютеры»: Разработка, Применение, №3, 2009, с.29-32.
3. S. Amari, A. Cichocki. Adaptive blind signal and images processing.: Learning algorithm and application. John Willey & Sons, USA 2002, pages 587.

4. А.В. Картамышев, Г.В. Малыхина. Методика удаления шума в измерителе параметров эталонных излучателей. «Нейрокомпьютеры»: Разработка, Применение, № 6, 2007.
5. Margarita Magadan-Mendez, Anu Juslin, Sergey V. Nesterov, Kari Kalliokoski, Juhani Knuuti, Ulla Ruotsalainen ICA Separation of Functional Components from Dynamic Cardiac PET data. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine. 2008, p. 93-102.
6. Малыхина Г.Ф., Кислицына И.А. Измерение параметров движения с использованием нейронных сетей. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Научно-технические ведомости СПб ГПУ, №5, 2015, с. 59-68.

РЕГИСТРАЦИЯ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЭГ-ПАТТЕРНОВ ВООБРАЖАЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР

Станкевич Л.А.¹, Шемякина Н.В.², Сонькин К.М.³, Нагорнова Ж.В.²,
Хоменко Ю.Г.⁴, Гунделах Ф.В.¹ Чевыкалова А.В.¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова
РАН, Санкт-Петербург

³ ООО «АйБрейн»

⁴ Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург
stankevich_lev@inbox.ru

Развитие человечества тесно связано с развитием средств человеко-машинных коммуникаций. На первых этапах развития компьютерной техники и машин, управляемых компьютерами, люди общались с ними с помощью традиционных компьютерных средств коммуникаций, включающих клавиатуры, мониторы, принтеры, устройства графического ввода и вывода, реализующие *простые интерфейсы*. С развитием искусственного интеллекта появились средства более естественных для человека речевых и визуальных коммуникаций, на базе которых были созданы и продолжают совершенствоваться так называемые *интеллектуальные интерфейсы*. В конце 20-го и в начале 21-го веков наблюдается бурное развитие науки о мозге, а в последнее время - междисциплинарных исследований, делающих попытки интегрировать знания о специфике сигналов, производимых мозгом, результаты распознавания таких сигналов и представления о методах искусственного интеллекта, что привело к возможности создания новых средств человеко-машинных коммуникаций – *нейроинтерфейсов* [1].

В данной работе обсуждаются подходы к созданию интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК), основанных на распознавании ЭЭГ-паттернов воображаемых движений. Интерфейс «мозг-компьютер» - это, фактически, некий программно-аппаратный комплекс, считывающий и «переводящий» сигналы мозга в управляющую внешним устройством или программой команду. В основе большинства нейроинтерфейсов лежит принцип считывания и декодирования биоэлектрической активности мозга, изменяющейся при выполнении той или иной деятельности, изменении состояния или восприятии внешних стимулов. В зависимости от способа регистрации биоэлектрической активности ИМК могут быть инвазивными (с хирургическим вмешательством, например, имплантацией электродов) и

неинвазивными (то есть, при регистрации биоэлектрической активности непосредственно с поверхности кожи головы). Декодирование (распознавание и классификация) зарегистрированных биоэлектрических сигналов может быть выполнено с использованием развитых в последнее время интеллектуальных методов обработки информации и принятия решений. Проблемой существующих нейроинтерфейсов, особенно неинвазивных, является низкая точность распознавания мозговой активности.

Вместе с тем, как показывают исследования последних лет, использование ИМК на основе ЭЭГ для реабилитации – целесообразно, в частности, для пациентов с нарушениями двигательных функций.

Предполагается, что воображаемые и реальные движения имеют одинаковые нейробиологические корреляты и приблизительно одинаковое время реализации [2,3], и это время в обоих случаях увеличивается с повышением сложности и точности двигательной задачи (закон Фиттса) [4,5]. Соответствие реальных и воображаемых движений наблюдается у здоровых лиц и пациентов, например, с болезнью Паркинсона и после инсульта [6,7].

В работах соотечественников было показано, что обучение управлению через ИМК может не зависеть от давности заболевания, локализации очага поражения и тяжести неврологического дефицита [8,9]. Используя ресурсы пластичности мозга [10], реабилитационные мероприятия могут быть эффективны и по прошествии ряда лет после травмы или инсульта [11].

Важным моментом разработок ИМК является то, что управление, например, программой, внешним вспомогательным роботизированным устройством происходит в реальном времени, то есть человек сразу видит результат своих усилий, получает обратную связь и учится управлять своим состоянием, чтобы достигнуть определенного эффекта. Вместе с тем, реабилитационный эффект может проявляться не сразу, а при достаточно длительных тренировках – до шести и более недель [12].

В настоящее время созданы инвазивные и неинвазивные нейроинтерфейсы, которые позволяют распознавать некоторые моторные команды мозга и мышечные сигналы, подавать результаты их декодирования в компьютеры с целью управления разнообразными внешними устройствами, в том числе медицинского назначения.

По мнению экспертов, нейроинтерфейсы – перспективная отрасль с огромным потенциалом. По этой причине исследования в этой области ведутся практически во всех развитых странах мира (для обзора см. [13]). Такие страны как США и Китай не только проводят научные исследования, но уже выпустили коммерчески доступные нейроинтерфейсы массового спроса, такие как EmotiveInsight (США),

Neurosky (США) и Brainlink (Китай) с собственными магазинами приложений для настольных и мобильных устройств на популярных платформах типа iOS, Android, Windows, Linux, MacOSX.

Целью данной работы была разработка неинвазивного ИМК, основанного на распознавании воображаемых движений мелкой моторики на базе мобильного 21-канального электроэнцефалографа SmartBCI (ООО Мицар, Санкт-Петербург).

В ЭЭГ исследованиях приняли участие 10 здоровых испытуемых (средний возраст 26.2[SD=3.1]). Испытуемые были здоровы на момент исследования и сообщали, что не имеют никаких медицинских и нейрофизиологических нарушений, имеют нормальное зрение. Все процедуры исследования выполнялись в соответствии с Хельсинской декларацией (1974) о проведении исследований с участием добровольцев.

В качестве заданий испытуемым предлагали выполнять задачи на воображение движений, совершаемых пальцами правой руки. Проводили, как одиночные серии исследований, так и исследования влияния тренировок на точность мультиклассовой классификации воображаемых движений.

В качестве парадигмы использовали воображение движений в заданном звуками ритме [14] – воображение движений совершалось каждые 700 мс. Испытуемым предлагалось выполнять четыре типа воображаемых движений: мизинцем, большим, указательным, средним пальцами правой руки, предварительно синхронизуя ритм воображения про себя с внешними звуками, задававшими ритм и темп воображения. Последовательность выполнения заданий была рандомизирована между испытуемыми. Инструкция на воображение движений пальцами была ориентирована на инициацию кинестетических ощущений у испытуемого [15]. Показано, что при возникновении кинестетических ощущений при воображении движений зоной интереса являются сенсомоторные зоны коры, как и при выполнении реальных моторных команд. Задания имели блоковую схему. В общей совокупности испытуемый выполнял – не менее 100 реальных и 130 – воображаемых движений в заданном темпе для каждого из пальцев.

Процедура регистрации ЭЭГ. При проведении первоначальных тестирований и подбора индивидуальных признаков для декодирования ЭЭГ паттернов ЭЭГ регистрировали монополярно от 19 отведений ЭЭГ в соответствии со стандартной системой 10-20 с использованием многоканального электроэнцефалографа ООО Мицар (ЧД 500 Гц). В ходе тренировок ЭЭГ регистрировался монополярно от 21-ти отведений (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2 по системе 10-20) с использованием мобильного, портативного, беспроводного электроэнцефалографа SmartBCI (ООО Мицар, ЧД 250Гц).

В обоих случаях референтные электроды располагались на мочках обеих ушей, заземляющий электрод – во фронтальной части головы. Регистрацию ЭЭГ проводили в полосе 0.53 - 30 Гц с применением сетевого фильтра 45-55 и 95-105 Гц, для записи ЭЭГ в первом случае использовали программу WinEEG (авторские права - Пономарев В.А., Кропотов Ю.Д. № LtD 2001610516 от 08.05.2001), при работе с мобильным электроэнцефалографом данные подавались через LSL поток в среду MatLab и фиксировались, фильтровались, преобразовывались и классифицировались с использованием самостоятельно разработанного ПО. В обоих случаях сопротивление электродов не превышало 5 кОм.

В ходе анализа результатов отдельных записей и результатов сессий тренировки данные отфильтровывались, очищались от артефактов: удалялись медленные сигналы с амплитудой более 50 μV в полосе 0-2 Гц и быстрые сигналы с амплитудой более 35 μV в полосе 20-35 Гц. Данные приводились к различным преобразованиям, при этом, по результатам ранее проведенной работы, выбор был сделан в пользу преобразования ЭЭГ к плотности источника тока [16], процедура соответствовала проводимой в работе [14] и была реализованы в режиме online.

В качестве признаков использовали сложность кривой, кепстральные коэффициенты, коэффициенты вайвлет преобразований.

При анализе точности классификации ЭЭГ паттернов воображаемых движений без накопления – подход «single-trial» – наилучший результат был получен при использовании преобразования к плотности источников тока в сочетании со следующими характерными признаками: кепстральными коэффициентами и сложностью кривой, вычисленной в скользящем временном окне. Средний процент классификации для 4-х классов воображаемых движений мелкой моторики составил $66\% \pm 8[\text{SD}]$, лучший результат 79% при выборе отведений ЭЭГ по результатам картирования из всех отведений; а при выборе из зон только сенсомоторной коры с теми же условиями: $62\% \pm 9[\text{SD}]$ по группе, лучший результат также 79% .

В качестве инструмента классификации использовали разработанную ранее систему, представляющую собой комитет классификаторов (нейронных сетей и метода опорных векторов) [14]. Использование для создания ИМК ансамблей и комитетов классификаторов является одним из разрабатываемых подходов для повышения точности распознавания до 93-100 % для двухклассовой задачи [14] и снижения временных затрат (в два раза большее быстродействие ИМК, основанном на регистрации компонента P300 по сравнению с одинарными классификаторами) [17].

Выявлена возможность применения нового разработанного комитета классификаторов на основе одновременно используемых нескольких

пространств признаков (длина, площадь, коэффициенты вейвлет преобразования, кепстральные коэффициенты) в on-line режиме для управления виртуальными и физическим средствами предоставления биологической обратной связи. В перспективе разрабатываемая система классификации ЭЭГ паттернов воображаемых движений может использоваться в ИМК с тактильной или электростимуляционной обратной связью. Во многих работах указывается на повышение эффективности ИМК с включением в контур ИМК обратной связи в виде пассивных движений, тактильной или искусственной обратной связи [18].

Работа поддержана грантом РФФИ офи-м №16-29-08296

Литература

- 1 Станкевич Л.А., Сонькин К.М., Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В., Хоменко Ю.Г. М.: НИЯУ МИФИ. 2016. С. 105-146.
- 2 Crammond D.J. Trends Neurosci. 1997. V. 20. N. 2. P. 54.
- 3 Porro C.A., Francescato M.P., Cettolo V. Diamond M.E., Baraldi P., Zuiani C., Bazzocchi M., di Prampero P.E. J. Neurosci. 1996. V. 16. № 23. P. 7688.
- 4 Dominey P., Decety J., Broussolle E., Chazot G., Jeannerod M. Neuropsychologia. 1995. V. 33, N. 6. P. 727-741.
- 5 Jeannerod M., Frak V. Current Opinion in Neurobiology. 1999. V. 9. P. 735.
- 6 Morales I., Dopico J.G., Sabate M., Gonzalez-Hernandez T., Rodriguez M. American Journal of Physiology-Cell Physiology. 2007. V. 292. P. 1934.
- 7 Gonzalez B., Rodriguez M., Ramirez C., Sabate M. Behavioral Neuroscience. 2005. V. 119. P. 622.
- 8 Мокиенко О.А., Люкманов Р. Х., Черникова Л. А., Супонева Н. А., Пирадов М. А., Фролов А. А. Физиология человека. 2016. Т. 42, вып. 1. С. 31–39.
- 9 Frolov A.A., Husek D., Biryukova E.V., Bobrov P.D., Mokienko O.A., Alexandrov A.V. NNW2017 DOI: 10.14311/NNW.2017.27.006
- 10 Nudo R.J., Wise B.M., SiFuentes F., Milliken G.W. Science. 1996. V. 272, N. 5269. P. 1791-1794.
- 11 Taub E., Uswatte G., Elbert T. Nat Rev Neurosci. 2002. V. 3, N. 3. P. 228-236.
- 12 Liu Y., Li M., Zhang H., Wang H., Li J., Jia J., Wu Y., Zhang L. J Neurosci Methods. 2014. V. 222. P. 238-249.
- 13 Brunner C, Birbaumer N, Blankertz B, Guger Ch, Kübler A, Mattia D, Millán J, Miralles F, Nijholt A, Opisso E, Ramsey N, Salomon P & Müller-Putz G. Brain-Computer Interfaces 2015. V. 2 , Iss. 1.
- 14 Станкевич Л.А., Сонькин К.М., Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В.,

- Хоменко Ю.Г., Перец Д.С., Коваль А.В. Физиология человека. 2016. Т. 42, В.1. С. 1-12.
- 15 Neuper C., Scherer R., Reiner M., Pfurtscheller G. Brain Res Cogn Brain Res. 2005. V.25, N. 3. P. 668-677.
- 16 Tenke С.Е., Kayser J. Clin Neurophysiol. 2012. V.123. N. 12. P. 2328-2345.
- 17 Кирьянов Д.А., Каплан А.Я. Наука и инновации в медицине. 2016. вып. 3. С. 28-32.
- 18 Бадаква А.М., Миллер Н.В., Зобова Л.Н. Физиология человека. 2016. Т. 42, вып.1. С. 128–136.

AN INTRODUCTION TO PRISM SIGNAL PROCESSING APPLIED TO SENSOR VALIDATION

Manus P. Henry
University of Oxford
manus.henry@eng.ox.ac.uk

О ПРОЦЕДУРЕ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ PRISM В ПРИМЕНЕНИИ К ВАЛИДАЦИИ ДАТЧИКОВ

Интернет вещей (IoT) [1] и Индустрия 4.0 [2] предполагают существенное расширение применения датчиков в самых разных средах. Проблемы значительны: локальная вычислительная мощность должна быть эффективно и гибко использована как для выполнения текущих метрологических задач, так и для перенастройки / перестройки потока обрабатываемых сигналов, поскольку требования к мониторингу меняются во времени.

В этой статье представлен PRISM, применяющий повторное интегрирование в процессе мониторинга сигнала. Это новый тип блока обработки сигналов, который может внести вклад в решение задач метрологии 21-го века. PRISM действует как полностью рекурсивный, КИХ-фильтр с двойным выходом: вычислительная нагрузка низкая и не зависит от длины окна данных. Конструкция PRISM тривиальна, так что сети PRISM могут быть собраны, как во время разработки, так и автономно в режиме реального времени, и выполнять широкий спектр метрологических задач. Блоки отслеживания сигнала, основанные на PRISM, для частоты, фазы и / или амплитуды синусоиды функционируют близко к нижней границе Крамера-Рао (CRLB) для отношения сигнал/шум до 0 дБ.

Два достоинства обработки сигнала PRISM - низкие вычислительные затраты и незначительная стоимость проектирования - важны для разработки простых методов валидации датчиков [3]. Пример симуляции демонстрирует, как обработка сигнала PRISM может использоваться для автономного обнаружения, отслеживания и компенсации нежелательной частотной составляющей в частотном датчике.

Abstract

The Internet of Things (IoT) [1] and Industrie 4.0 [2] propose substantial increases in the deployment of sensors into a diverse range of environments. The challenges are considerable: local computational power must be efficiently and flexibly deployed both to perform current metrological tasks and to reconfigure/redesign the signal processing flow as monitoring requirements evolve over time.

This paper introduces the Prism (precise, repeat integral, signal monitor), a new type of signal processing block, as a contribution towards to the challenges of 21st Century metrology. The Prism acts as a fully recursive, dual output, FIR filter: the computational burden is low and independent of data window length. Prism design is trivial, so that networks of Prisms can be assembled, whether at design

time or autonomously in real time, to carry out a wide range of metrological tasks. Prism-based trackers for the frequency, phase and/or amplitude of a sinusoid perform close to the Cramer-Rao Lower Bound (CRLB) for SNRs down to 0 dB. Two aspects of Prism signal processing: low computational and negligible design costs, provide useful tools for the development of simple sensor validation techniques [3]. A simulation example demonstrates how Prism signal processing can be used to autonomously detect, track, and compensate for an undesired frequency component in a frequency-based sensor.

1. The Prism

The Prism (Fig. 1) is a signal processing block accepting an input time series $s(t)$ and generating one, or more usually two, output time series, $G_s(t)$ and/or $G_c(t)$. Internally, it is structured as two layers of integration blocks, where each input signal is multiplied by a modulating sine or cosine function of characteristic frequency m and harmonic number h (a small integer, often 1), and the resulting product is integrated over the last $1/m$ seconds. The two outputs result from a sum and a difference of second stage integrals. The Prism can be viewed as a pair of FIR filters operating over a window of the input data $s(t)$ of total duration $2/m$. Unusually, the Prism calculations can be performed recursively, so that the computational effort needed per sample is small, and is independent of the Prism window length.

This facilitates high data throughput for a given computational budget. Another significant advantage of the Prism is that the filter ‘coefficients’ are simply the linearly spaced sine and cosine values of the modulation functions. Accordingly, the computation requirement to ‘design’ a Prism with desired m and h values is very low, and so it is possible to instantiate new Prism-based signal processing schemes in real time on resource-limit devices using simple rules. Further details of the Prism will be given in later publications.

For a steady sinusoidal input with amplitude A , frequency f and initial phase θ_i (i.e. the phase at $t = 0$)

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \theta_i), \quad (1)$$

the Prism outputs $G_s(t)$ and $G_c(t)$ are given by:

$$G_s(t) = A \operatorname{sinc}^2(r) \frac{r^2}{r^2 h^2} \sin(\theta(t) - 2\pi r), \quad (2)$$

and

$$G_c(t) = A \operatorname{sinc}^2(r) \frac{hr}{r^2 h^2} \cos(\theta(t) - 2\pi r), \quad (3)$$

where the true instantaneous phase $\theta(t) = 2\pi ft + \theta_i$; $r = f/m$, the frequency ratio; and $\operatorname{sinc}(x)$ is the normalized sinc function. The Prism outputs have a linear phase delay $2\pi r$, while the gains of $G_s(t)$ and $G_c(t)$ for $h = 1$, labelled Γ_s and Γ_c respectively, are shown in Fig. 2; these exhibit a generally low pass characteristic with periodic notches at multiples of m , including at zero hertz.

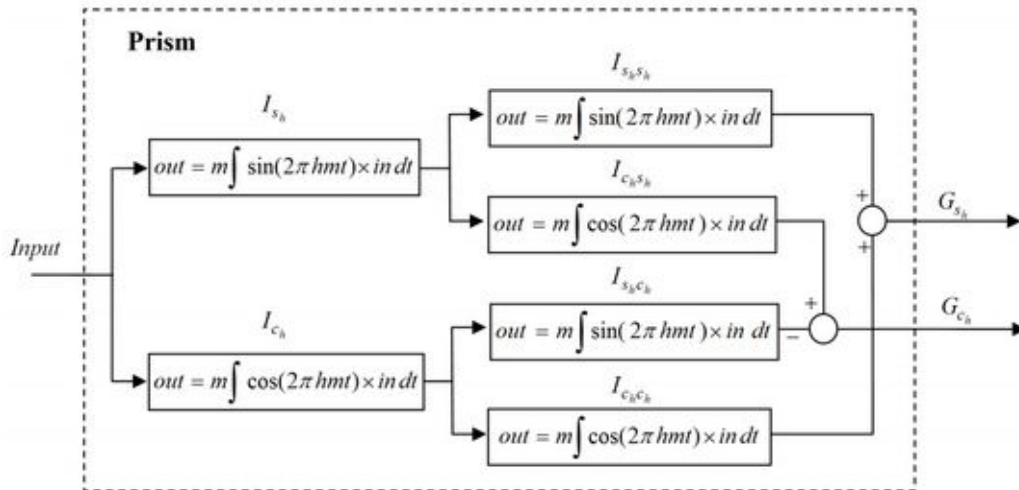


Figure 1. Prism signal processing block with time series input and time series outputs $G_s(t)$ and $G_c(t)$. The design parameters are m the characteristic frequency, and h the harmonic number

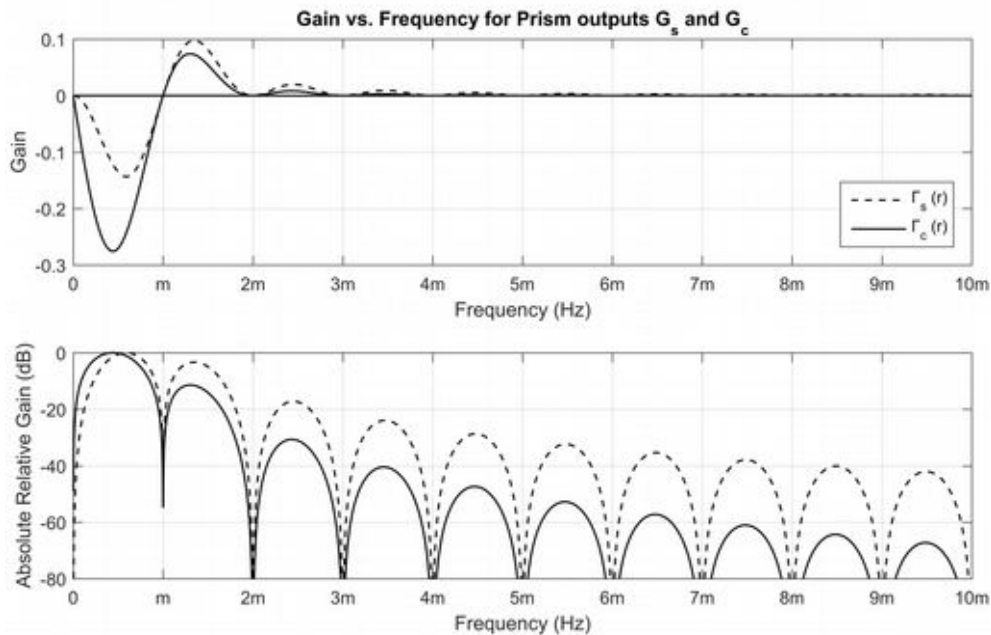


Figure 2. Gains of Prism outputs $G_s(t)$ and $G_c(t)$ with harmonic number $h = 1$

The two Prism outputs $G_s(t)$ and $G_c(t)$ are orthogonal (i.e. a sine/cosine pair), and other than a scaling factor h/r , they form an analytic function from which sample-by-sample estimates of frequency, amplitude and phase may be derived. In other words, given an input signal with unknown sinusoidal properties, which is passed through a Prism with characteristic frequency m , the sinusoidal parameters may be estimated based on values of $G_s(t)$ and $G_c(t)$. One means of tracking a single sinusoid is the Recursive Signal Tracker (RST) block which employs a single Prism and recent history of $G_s(t)$ and $G_c(t)$.

Reference [4], co-authored with Russian colleagues at SUSU in Chelyabinsk, outlines the RST calculation, along with its application to a pressure sensor validation problem. The mechanical integrity of the pressure

sensor is tested by regular excitation from ultrasonic pulses. The response of the pressure sensor structure to each pulse takes the form of multiple exponentially decaying sinusoids combined into a single signal, where the properties (frequency, initial amplitude, decay rate) of each sinusoid are used to detect faults such as the fouling of the sensing membrane. A variety of Prism-based techniques are used to isolate individual frequency components for tracking. These include low pass and bandpass filtering, conventional static notch filtering, and a new technique called dynamic notch filtering, whereby one or more frequency components can be removed from a signal and where the notched frequencies can be selected in real time. This entails forming linear combinations of Prism outputs [4], where the Prisms share a common characteristic frequency m , but use different harmonic values h . Linear combinations of the same Prism outputs, but using different weightings, have the effect of notching out different frequency components, and so it is possible to ‘split’ a multi-component signal into a set of individual signals, each carrying only a single frequency component, which may then be tracked using an RST. As illustrated in [4], such signal splitting may be implemented sample-by-sample with low computational cost.

The Prism thus provides a useful toolkit for basic signal processing tasks where the compute and design requirements are low, and hence is suited to the challenges of metrology in the 21st Century, where the Internet of Things provides ubiquitous, adaptable sensing.

2. *Sensor Validation Example*

An example is now given of how Prism-based techniques may be used to carry out the following tasks: tracking a signal consisting of a single frequency component; detecting the presence of an anomalous frequency component in the signal; and then instantiating additional Prism-based signal processing to isolate and track both the original frequency component and the anomalous frequency component. The resource requirements for both the instantiation (including the design) and the operation of this validation scheme are sufficiently low that it is suited for the low cost, autonomous sensors of the IoT.

Figure 3 shows an initial arrangement where an input signal, for example from a resonant transducer, is being tracked by a RST, which generates sample-by-sample estimates of frequency, amplitude and/or phase, under the assumption that the input signal has only a single frequency component to be tracked. These parameters may in turn be mapped onto appropriate engineering units to calculate the measurand under consideration (for example, pressure, temperature, flow rate etc). For the purposes of this simulation, the underlying sensing technology is not important. Rather, this is a generic and simplified example that may be mapped onto a number of specific measurement technologies.

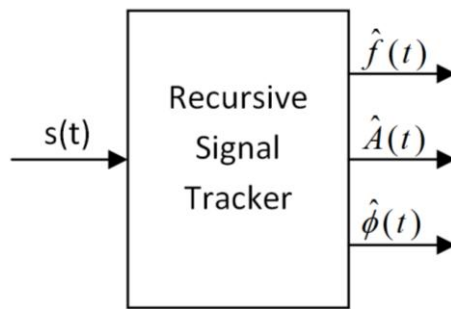


Figure 3. Sensor validation example: initial signal processing scheme. The transducer signal $s(t)$ is analysed using an RST to generate sample-by-sample estimates of frequency, amplitude and phase

In the simulation study that follows, the sample rate $f_s = 51.2$ kHz, and the RST uses $m = 200$ Hz for tracking the input signal. For the first 100 seconds of the simulation, only a single frequency component, denoted the Primary component, is present. This has a frequency of 81 Hz and an amplitude of 0.5 V. The input signal includes white noise with a standard deviation of $1e-5$ V. After 100 seconds, an additional frequency component, denoted the Interference component, is added to the input signal, thus simulating the onset of an unexpected anomaly, as might be caused by an internal fault or some external interference. In this example the additional frequency component has a constant frequency of 53 Hz and an amplitude of 1 mV ($1e-3$ V). Note that the signal processing design is general and is not tuned to any of the specific parameter values stated here.

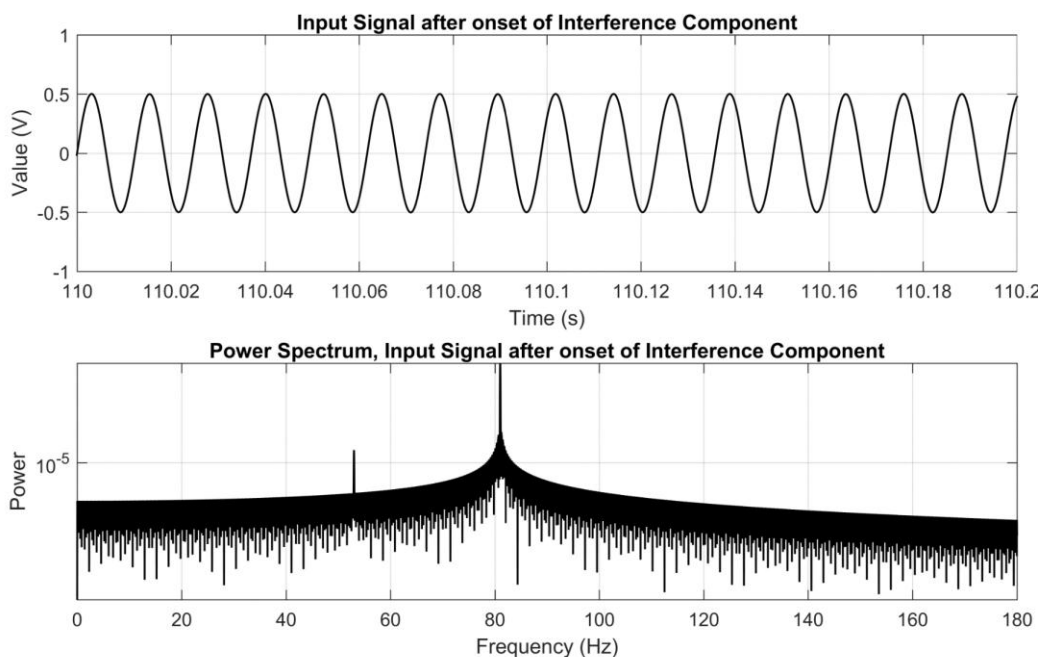


Figure 4. Raw transducer signal and power spectrum after onset of fault

Figures 4 and 5 demonstrate the impact such an anomaly has on the RST signal tracking. Figure 4 (upper) shows a time sequence of the input signal, after the onset of the fault. Given the low amplitude of the Interference component there is little observable change in the time series. However in the lower plot the corresponding power spectrum (for the time $t = 100 \text{ s} \dots 200 \text{ s}$) shows the presence of the Interference frequency component at 53 Hz as well as the Primary frequency components at 81 Hz.

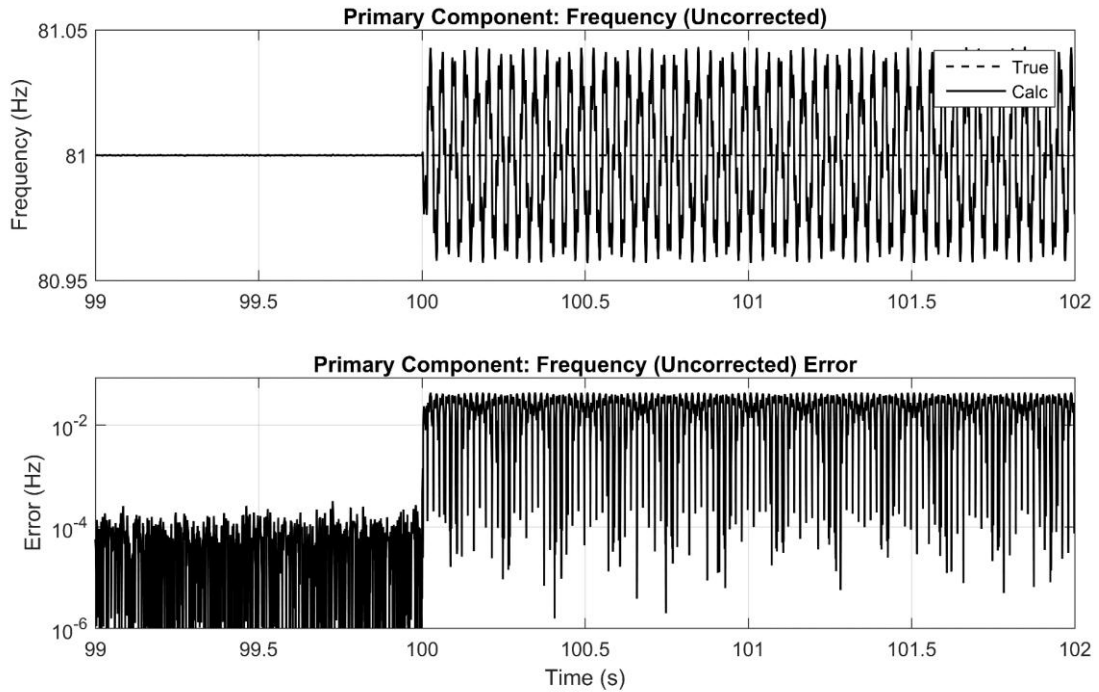


Figure 5. RST calculated value of frequency (upper) and corresponding absolute error (lower) before and after onset of fault.

Figure 5 shows the estimate of frequency generated by the RST during the onset of the Interference component. The upper plot shows the time sequence of the frequency estimate: a clear change in behaviour takes place at $t = 100 \text{ s}$, when the Interference component is included in the input signal $s(t)$. The lower plot shows the magnitude of the frequency error on a logarithmic scale. Prior to the onset of the Interference component the frequency error was approximately within the range $\pm 1 \text{e-}4 \text{ Hz}$, but after the onset of the Interference component the frequency error range increased to approximately $\pm 5 \text{e-}2 \text{ Hz}$. Similar changes are observed in the errors for the amplitude and phase tracking (graphs not shown). Before the ‘_fault’ the amplitude error was within the range $\pm 5 \text{e-}6 \text{ V}$, but afterwards the amplitude error range increased to $\pm 1 \text{e-}3 \text{ V}$. Similarly, prior to the fault the phase error was approximately $\pm 1 \text{e-}5 \text{ radians}$, but afterwards the phase error range increased to $\pm 1 \text{e-}2 \text{ radians}$.

Figure 6 demonstrates that the impact of the Interference component on the calculated values of frequency is to introduce a cyclical error. The upper plot shows a close up of the RST frequency time series after the onset of the fault,

which shows a repeated cycling pattern. The lower plot shows the power spectrum of the entire RST frequency estimate for $t = 100$ s to $t = 200$ s. It is important to appreciate that this is not the power spectrum of the original signal $s(t)$. Rather, the frequency output of the RST is treated as a separate signal in its own right, and the power spectrum is performed upon the resulting time series. Accordingly, the RST frequency output has a large DC (zero hertz) component, corresponding to the true parameter value of 81 Hz, but in addition there are two peaks at approximately 28 Hz and 134 Hz. These are the so-called beat frequencies, found by forming the difference and sum respectively of the two original frequencies ($81 \text{ Hz} - 51 \text{ Hz} = 28 \text{ Hz}$, and $81 \text{ Hz} + 53 \text{ Hz} = 134 \text{ Hz}$).

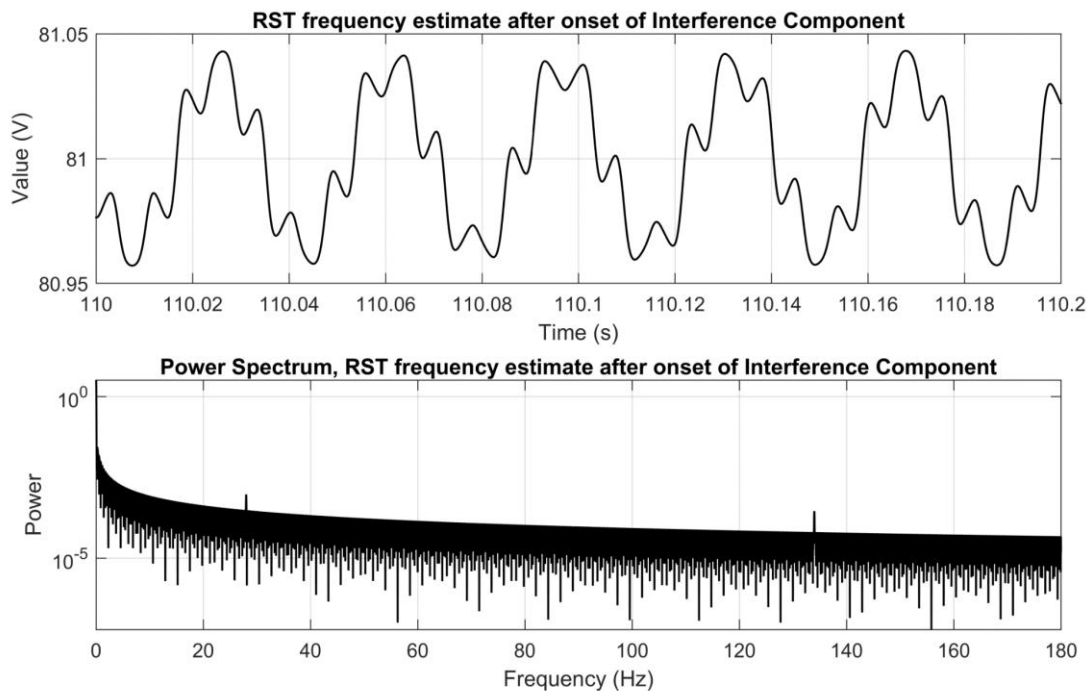


Figure 6. Detail of RST calculated value of frequency (upper);
Power spectrum of frequency estimate (lower).

Similar beating behaviour is observed on the amplitude estimate; these symptoms both define the measurement interference problem, and suggest a means of detecting and ultimately compensating for these effects.

Figure 7 shows an extension to the original RST tracker scheme of Figure 3. The RST on the left is comparable to that of Figure 3 but additional signal processing is provided to detect any interference component in the input signal $s(t)$. This includes a second RST which accepts the frequency estimate of the first RST as an input and estimates the frequency of variation of this parameter – effectively, it is being used to track the (lower) beat frequency. This estimated ‘raw’ beat frequency is fed into a further signal processing block which calculates a sliding window estimate of its mean and standard deviation. A low standard deviation is likely to indicate the presence of a steady, as opposed to a randomly varying, beat frequency, and hence the presence of an interference

component in the signal. The mean beat frequency is used rather than the raw value for later correction calculations as it has reduced noise. A threshold test is applied to the estimated standard deviation, where a low value indicates the presence of an interference frequency. Note that additional testing might include the ‘_amplitude’ of the frequency modulation to ensure that the detection is not triggered by minor variations. At the same time, the estimated mean beat frequency is passed to an additional signal processing block, together with the frequency output of the first RST, in order to provide an improved estimate of the prime component frequency.

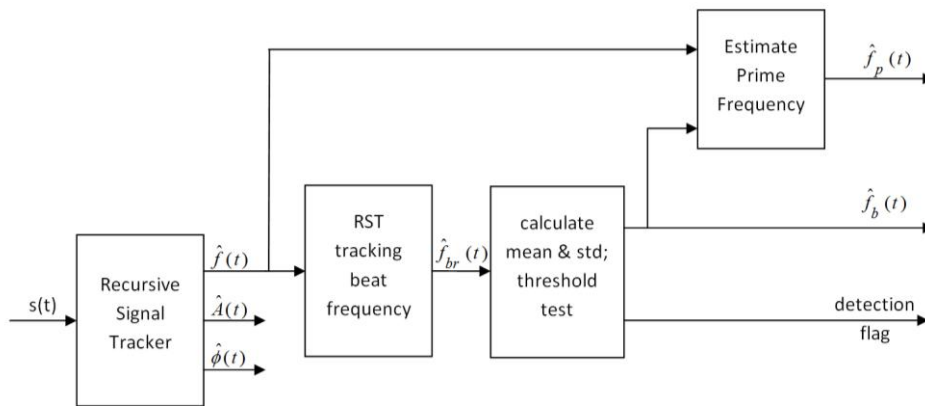


Figure 7. Signal processing scheme extended to detect interference signal

This can be achieved by calculating the moving average of the prime component frequency, where the moving average is calculated over the period of the mean beat frequency, in order to minimise the variation induced by the beat frequency.

Figure 8 shows the simulated output resulting from the signal processing scheme shown in Figure 7. The upper plot shows the calculated mean value of the raw beat frequency. Prior to the fault at $t = 100$ s, the mean frequency shows random variation. After the onset of the fault, the mean beat frequency rapidly settles on 28 Hz. The middle plot shows the calculated standard deviation of the raw (n.b. not the mean) beat frequency. Prior to the onset of the fault, the standard deviation is typically around 10 Hz. After the fault, the standard deviation drops steadily, settling at around 0.1 Hz. A threshold level for detecting the onset of an interference component has been set at 0.8 Hz in this case. The lower plot shows the flag output of the diagnostic test, with two possible states: either the original signal is clean, or an Interference component (i.e. a fault) has been detected. As long as the standard deviation of the beat frequency remains above the selected limit of 0.8 Hz, the diagnostic state value is set to ‘_Clean’. At approximately $t = 100.4$ s, when the standard deviation of the beat frequency drops below the threshold, the flag is set to ‘_Interference’.

Once the presence of an interfering component has been detected, additional Prism-based signal processing blocks may be created to estimate the

parameters of the fault and to provide a correction to the measurement. Figure 9 shows an extension of Figure 7 in which a Dynamic Notch Filtering block (as explained in [4]) is introduced to isolate and track both the Primary component and the Interference component. The Dynamic Notch Filtering block requires the input signal and the estimated frequencies of the two components.

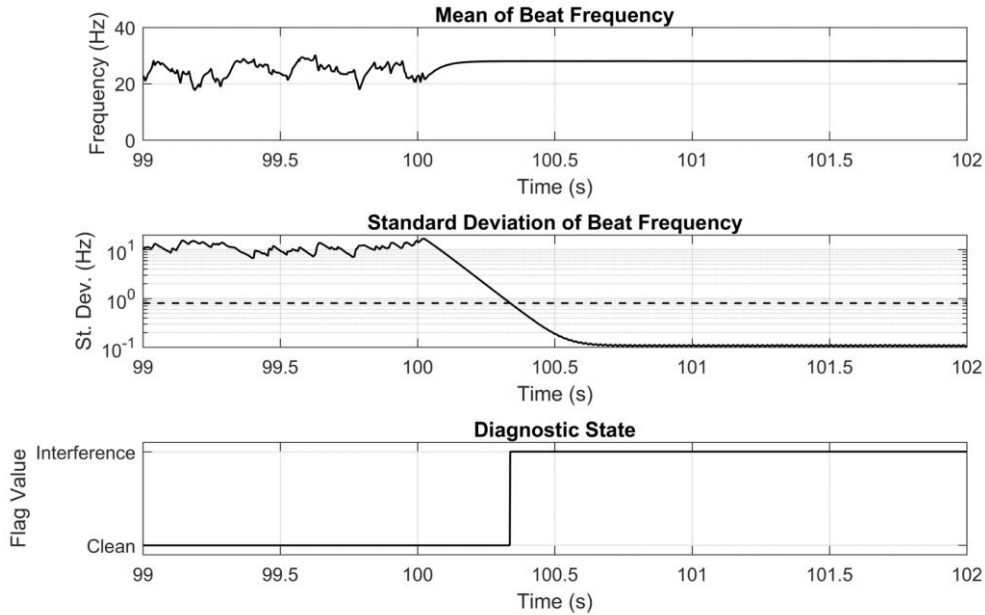


Figure 8. Simulation of onset of interference for signal processing scheme of Figure 7.

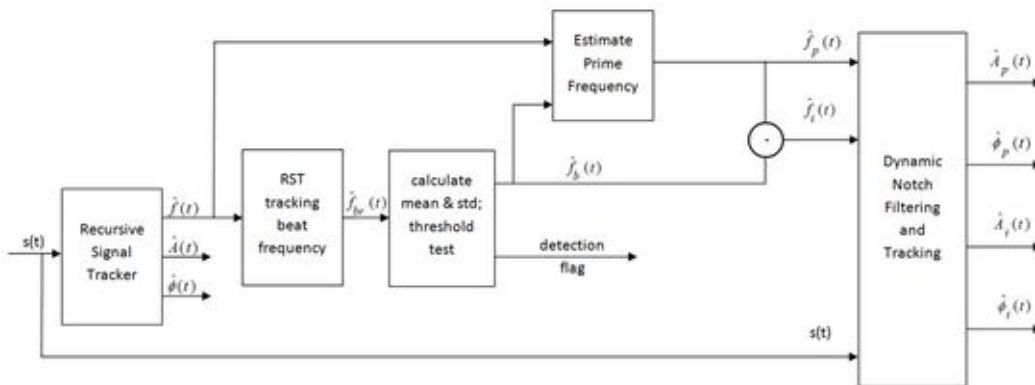


Figure 9. Signal processing scheme further extended to track and correct for interference signal.

Figure 10 shows the calculated frequency estimate of the Primary component generated by the signal processing scheme of Figure 9. The upper plot shows the time sequence: a step change in behaviour occurs at $t = 100$ s, when the Interference component is manifest, and at approximately $t = 100.4$ s when the correction is enabled. The lower plot shows the magnitude of the

frequency error on a logarithmic scale. Prior to the onset of the Interference component the frequency error is approximately within the range $\pm 1e-4$ Hz; after the onset of the Interference component the frequency error range increases to approximately $\pm 5e-2$ Hz; after the correction for interference is applied the frequency error range reduces to approximately $\pm 5e-4$ Hz, demonstrating the effectiveness of the dynamic notch filtering correction.

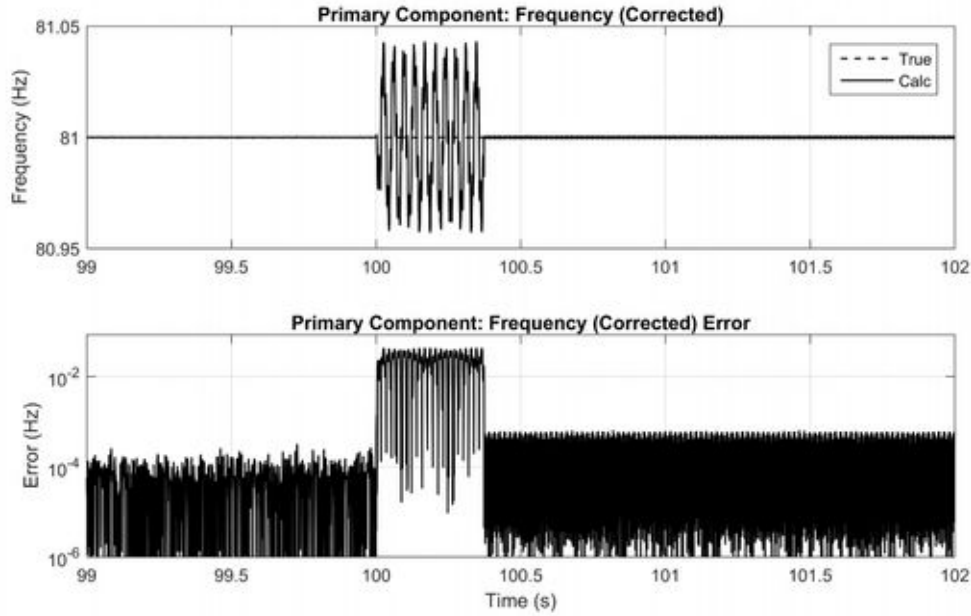


Figure 10. Corrected value of Primary Component frequency generated by signal processing scheme of Figure 9 (upper) and corresponding absolute error (lower) before and after onset of fault.

Similarly effective corrections are provided for frequency and phase. For example, Figure 11 shows the amplitude estimate of the Primary component. The upper plot shows the time sequence: changes in behaviour occur at $t = 100$ s, when the Interference component is manifest, and at approximately $t = 100.4$ s when the correction is enabled. The lower plot shows the magnitude of the amplitude error on a logarithmic scale. Prior to the onset of the fault the amplitude error is approximately $\pm 5e-6$ V; after the onset of the fault the error increases to $\pm 1e-3$ V; after the correction strategy is applied the error reduces to approximately $\pm 1e-4$ V.

Figure 12 shows the estimate value of the frequency of the Interference component. In the upper plot the time sequences of the estimated and true values of the frequency are given. Both are zero before the onset of the interference component at $t = 100$ s. Approximately 0.4 s elapses before the interference component is detected, the new signal processing blocks are instantiated, and an estimate of the frequency of the interference component is provided. The lower plot shows the error in the frequency estimate, which after $t = 100.4$ s is within the approximate range $\pm 1e-3$ Hz. Similar accurate tracking results are obtained

for the amplitude and phase of the Interference component arising from the dynamic notch filtering and tracking calculation.

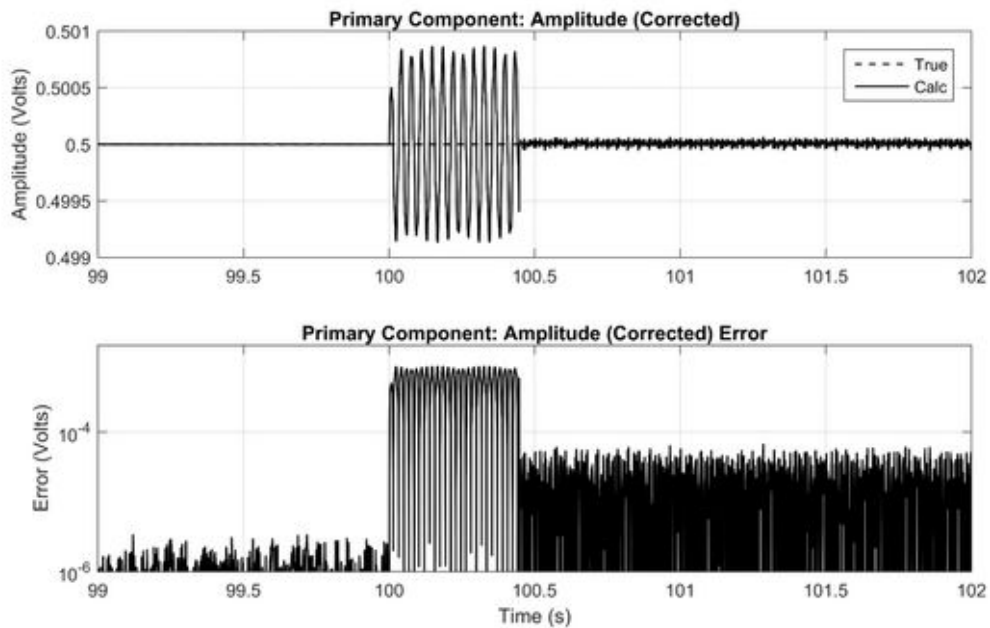


Figure 11. Corrected value of Primary Component amplitude generated by signal processing scheme of Figure 9 (upper) and corresponding absolute error (lower) before and after onset of fault.

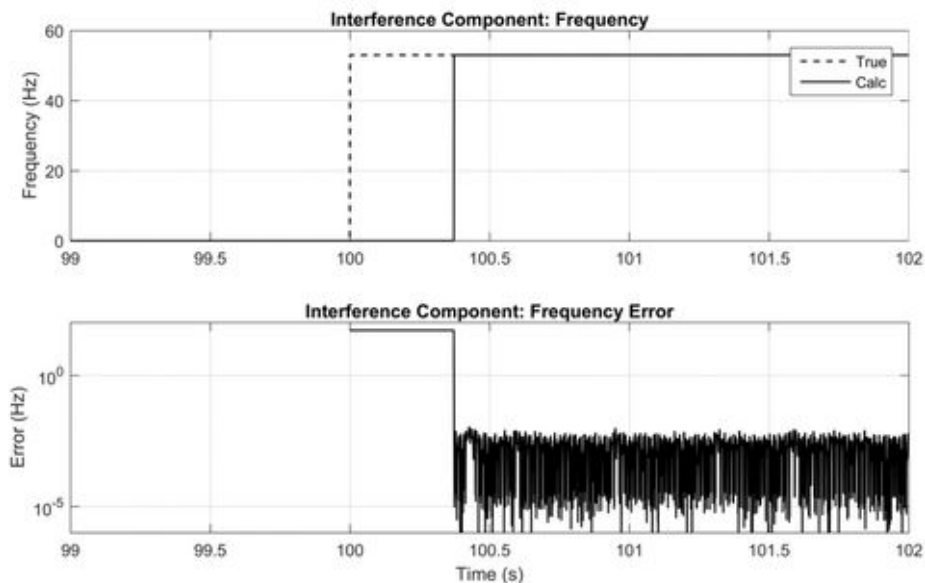


Figure 12. Estimated value of Interference Component frequency generated by signal processing scheme of Figure 9 (upper) and corresponding absolute error (lower) before and after onset of fault.

Once the signal processing scheme of Figure 9 is instantiated, it may continue to operate for as long as the fault is deemed to persist. For example if the amplitude of the Interference component drops below a certain threshold, or the standard deviation of the beat frequency rises above another threshold, it

may be determined by the system that the Interference component need no longer be tracked and the associated signal processing may be discontinued. Additionally, if it is deemed that the current signal processing scheme or associated parameters are no longer suited to tracking the current set of signal components, then new signal processing blocks may be instantiated to better match the current signal properties. Note that such instantiation and filter warmup may occur in parallel with the continued operation of the current signal processing arrangement in order to prevent any interruption in tracking function before switching to the new signal processing scheme.

3. Conclusions

The Prism is a new signal processing object which has the desirable properties of a recursive calculation and simple design. It is particularly well-suited to the new metrology challenges of the 21st Century, where the Internet of Things anticipates ubiquitous, adaptable and low cost sensing.

Because Prism design and instantiation is simple, a signal processing system can create additional processing blocks as required in response to newly detected conditions, as the sensor validation example illustrates. Furthermore, the ability to create Dynamic Notch Filtering blocks as a means of ameliorating the effects of unwanted components and/or tracking such components for the purpose of further diagnostic analysis, provides a powerful set of strategies that are suitable for implementation by automated systems. Additionally, because the design effort required to design new Prism-based signal processing is low (for example compared with conventional FIR filter design), it is possible to instantiate new Prism-based signal processing blocks in real time, selecting design parameters (e.g., m) to match the observed signal properties.

References

1. L.D. Xu, W. He, and S.L. Wang, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. Vol. 10, issue 4. p. 2233–2243.
2. B. Vogel-Heuser, D. Hess. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2016. Vol 14, issue 2.
3. Sapozhnikova K.V., Henry M., Taimanov R.E. The need for standards for self-diagnosable and self-certifiable instrumentation, *Datchiki & Systemi (Sensors & Systems)*, No 6, pp 51-7, 2006.
4. M. Henry, O.Bushuev, O. Ibryaeva. —PrismSignal Processing for Sensor Condition Monitoring, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2017)*, Edinburgh, UK, June 2017.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ФУНКЦИЕЙ ДООБУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

Фетисов В.С., Харисова З.И.

Уфимский государственный авиационный технический университет

Введение

Интеллектуализация средств измерений – одно из главных направлений в современной метрологии. Особенно заметны преимущества интеллектуализации в тех системах, которые предназначены для работы в технологических потоках, где важно непрерывное поддержание метрологической надежности.

Однако понимание термина «интеллектуальная измерительная система» до сих пор нельзя считать окончательно сформировавшимся. Существует два основных представления:

1) согласно ГОСТ Р 8.673-2009 «Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения», интеллектуальная измерительная система – это адаптивная измерительная система с функцией метрологического самоконтроля [1];

2) согласно теории искусственного интеллекта, интеллектуальная измерительная система – это система, которая для получения результата в той или иной степени имитирует работу какой-либо живой системы (например, нейросистемы человека, включая его головной мозг); при этом благодаря использованию элементов искусственного интеллекта такая измерительная система способна к обучению, анализу, принятию оптимальных решений и т.д.) [2].

Предлагаемая авторами система для поточных измерений гранулометрического состава суспензий является интеллектуальной с любой точки зрения она не противоречит ни одному из указанных подходов.

1. Структура предлагаемой системы и алгоритм ее функционирования

Проведение гранулометрического анализа суспензий является неотъемлемой частью технологического контроля во многих областях промышленности химической, пищевой, нефтяной, лакокрасочной, фармацевтической и пр. Под гранулометрическим составом подразумевают процентное (долевое) распределение массы или числа частиц по их размерам (диапазонам размеров) [3]. Гранулометрические анализаторы часто должны работать в условиях технологического потока и обладать достаточным быстродействием, поскольку вовремя полученная

информация о текущем гранулометрическом составе суспензии может быть использована для оперативного изменения параметров работы технологического оборудования, таких устройств, как диспергаторы, мельницы, фильтры, центрифуги и т.д. с целью обеспечения качества конечного продукта.

Традиционными методами гранулометрического анализа являются кондуктометрический метод, разновидности ситовых и седиментационных методов и группа оптических методов: лазерная дифракция, нефелометрия, турбидиметрия, световая микроскопия [4]. Наиболее надежным способом определения размеров частиц для жидких дисперсных сред является микроскопический анализ, который сводится к использованию оптических (видеотехнических) средств, с помощью которых производят микрофотографирование исследуемых образцов, а затем обработку полученных изображений.

Представление результатов гранулометрического анализа сводится к построению кривых распределений частиц по размерам, которые наглядно описывают дисперсный состав и плотность распределения [5]. Пример представления результатов гранулометрического анализа суспензий показан на рис. 1.

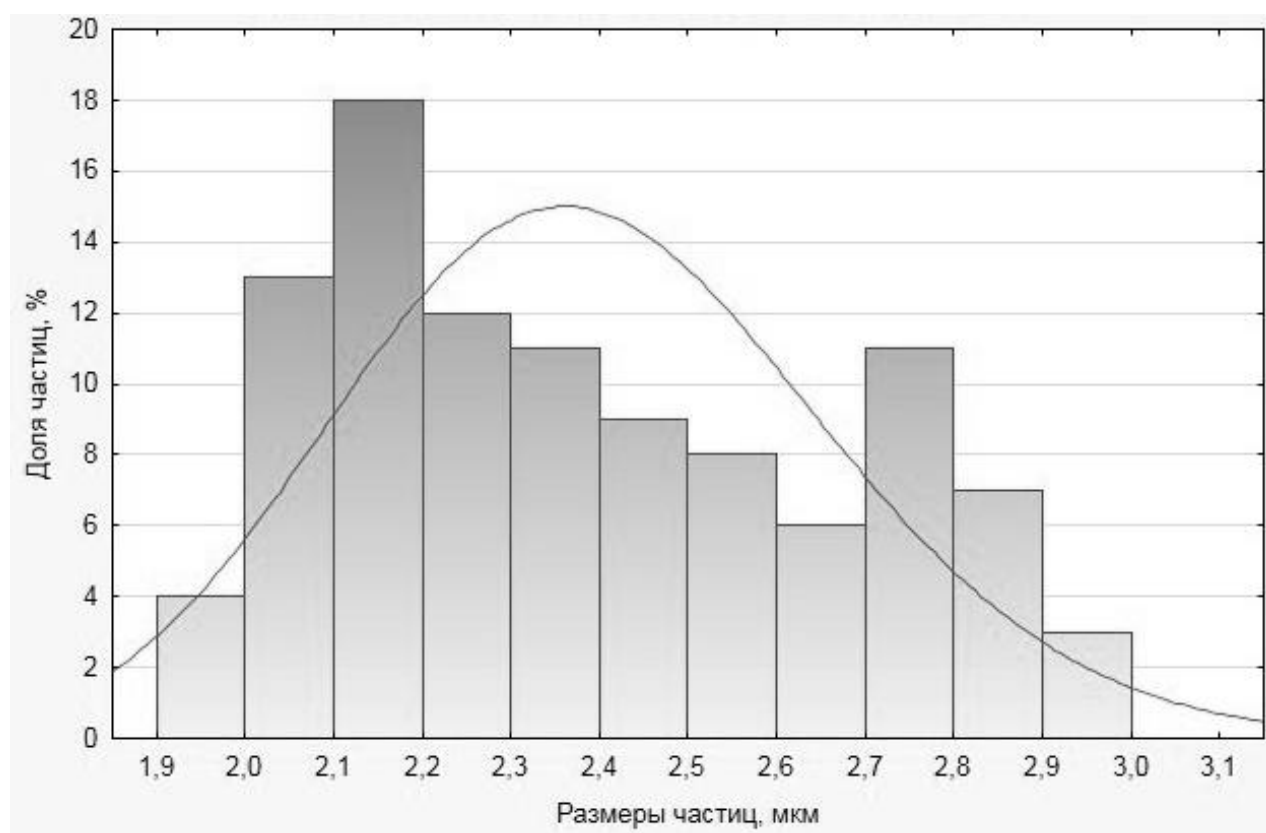


Рисунок 1. Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения

Каждая дифференциальная кривая распределения (если ограничиваться одномодовыми распределениями) однозначно характеризуется тремя коэффициентами: модой M_0 (определяет положение максимума кривой), дисперсией D_0 (определяет ширину распределения) и коэффициентом асимметрии K_a (определяет степень несимметричности кривой относительно ее пика). Авторы в данной работе ограничились одномодовым представлением распределений частиц по размерам, так как для контроля большинства технологических процессов это вполне приемлемо.

В лабораторных условиях получить результаты гранулометрического анализа не сложно, однако в условиях технологического потока требуются специальные меры, обеспечивающие метрологическую надежность и быстродействие.

Быстродействие предлагаемой системы обеспечивается за счет использования постоянно работающего нефелометрического анализатора на основе проточной измерительной камеры с прозрачной стенкой и видеокамеры, установленной перед ней [6]. В центр измерительной камеры подведен жесткий световод, вводящий в среду зондирующее лазерное излучение. Картина рассеянного излучения, обусловленная в большой степени характером распределения частиц по размерам, периодически регистрируется видеокамерой. Примеры соответствия картин рассеяния и графиков распределения частиц по размерам приведены в табл.1.

Таким образом, необходимо быстро отображать вектор изображения (вектор яркостей пикселей фотоматрицы размерностью $N \times M$) в трехкоординатный вектор коэффициентов распределения (M_0 , D_0 , K_a). Удобнее всего это делать с помощью искусственной нейросети (ИНС). В измерительной технике в последние десятилетия ИНС находят все большее применение, позволяя заменить операции вычисления градуировочных зависимостей обучением системы на примерах. Но в предлагаемой системе ИНС выполняет роль не просто преобразователя, отображающего входной вектор в выходной. Она играет важную роль в процессе метрологического самоконтроля, который при определенных условиях может инициироваться и переключать ИНС в режим обучения. Это дополнительное обучение (не связанное с начальной градуировкой) происходит на основе объективных результатов, получаемых посредством микроскопического анализа.

Структура предлагаемой системы приведена на рис.2.

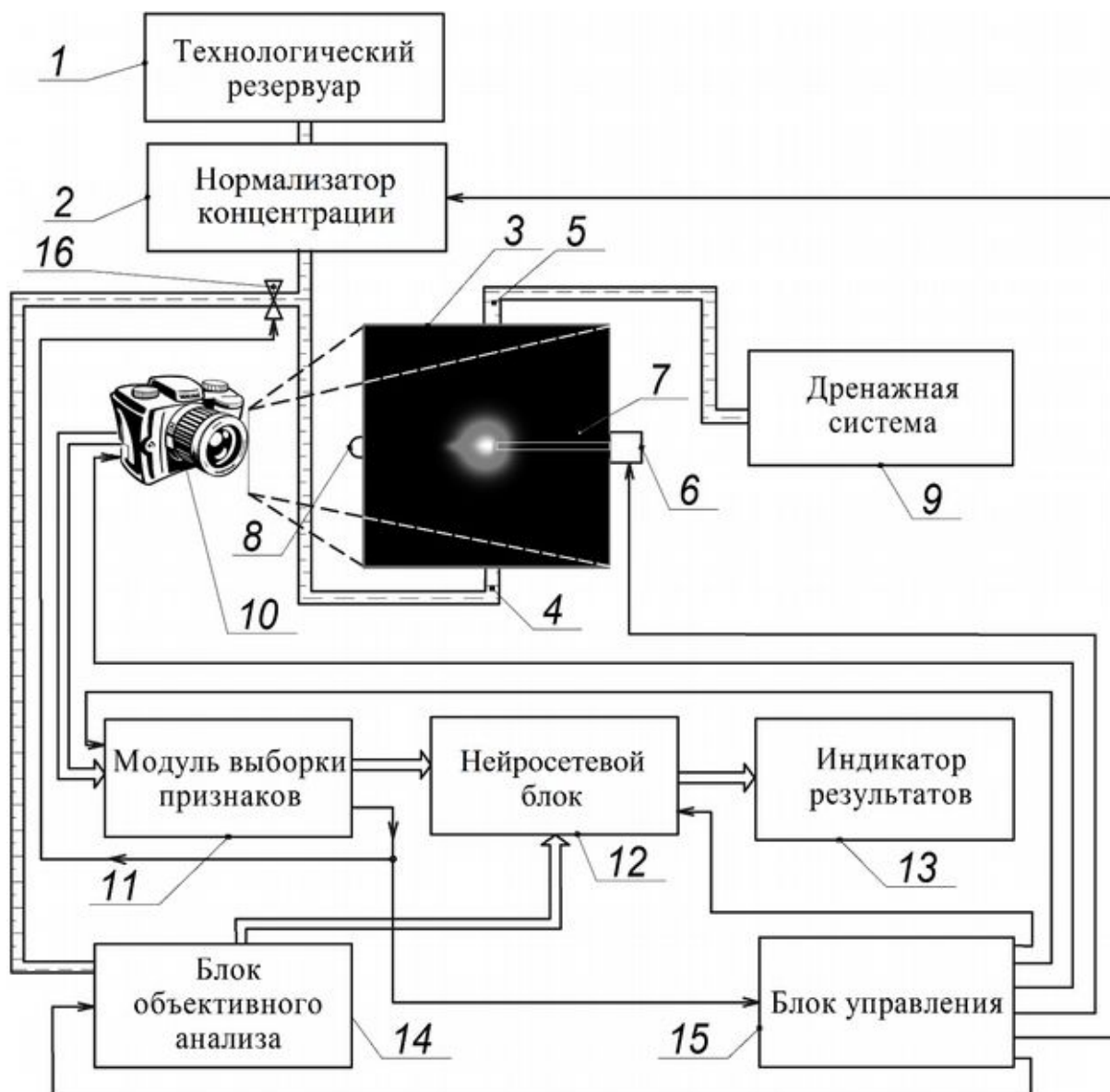


Рисунок 2. Структура измерительной системы для поточного гранулометрического анализа суспензий

Система может работать в режиме обучения (здесь надо различать предварительное обучение – начальную градуировку и дополнительное обучение – режим метрологического самоконтроля) и текущих измерений. В режиме предварительного обучения из технологического резервуара 1 последовательно подается несколько жидких образцов с известным и сильно различающимся гранулометрическим составом. Каждый образец проходит через нормализатор концентрации 2, который по сигналу с блока управления 15 производит разбавление поступающей пробы и доведение ее концентрации до определенного стандартного значения. Затем суспензия поступает в камеру 3, а оттуда вытекает в дренажную систему 9.

Под действием сигнала с блока управления лазер 6 просвечивает исследуемую среду лучом, рассеиваемым в разных направлениях. Прямой падающий луч попадает в световую ловушку 8, которая предотвращает отражение луча обратно в камеру от ее стенки. Картина рассеяния, зависящая от распределения частиц по размерам, снимается цифровой фотокамерой 10 и в виде массива значений яркости пикселей ее фотоматрицы поступает в модуль выборки признаков 11, который формирует набор наиболее характерных признаков изображения. Если модуль выборки признаков 11 обнаруживает набор признаков, сильно отличающихся от уже известных и хранящихся в его памяти, тогда открывается вентиль 16, который обеспечивает поступление анализируемой жидкости в блок объективного анализа 14 (в этом блоке реализуется микроскопический анализ в автоматическом, полуавтоматическом или даже ручном режиме). По завершении анализа числовые результаты, характеризующие распределение частиц по размерам, передаются в нейросетевой блок 12 для его обучения. Результаты поступают на индикатор результатов 13, где отображается диаграмма распределения частиц по размерам. После тренировки сети на всех базовых образцах цикл предварительного обучения заканчивается.

В основном режиме работы (режиме текущих измерений) все описанные блоки работают аналогично, с той лишь разницей, что блок объективного анализа 14 большую часть времени находится в режиме ожидания, а нейросетевой блок 12 производит практически мгновенные преобразования вектора сигналов с модуля выбора признаков 11 в результат гранулометрического анализа посредством обученной ранее искусственной нейросети. И только в некоторые отдельные моменты времени, когда модуль выборки признаков 11 для поступающего на его вход изображения обнаруживает новый набор признаков, он формирует управляющий сигнал для проведения метрологического самоконтроля - нового объективного (микроскопического) анализа, после которого производится дополнительное обучение системы с учетом нового образца. Такие операции дополнительного обучения ИНС способствуют постепенному увеличению точности и метрологической надежности гранулометрического анализа.

2. Результаты экспериментов. Обучение искусственной нейросети

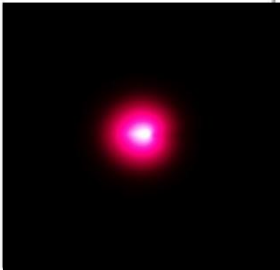

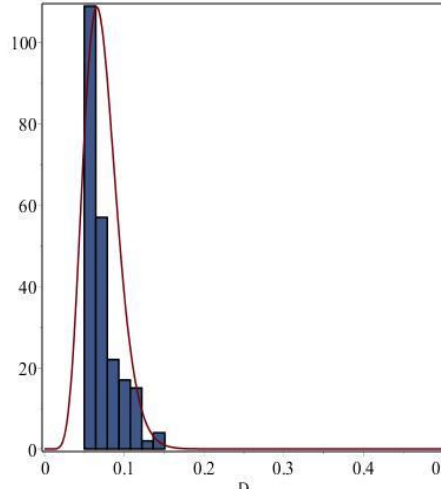
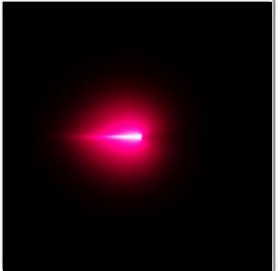
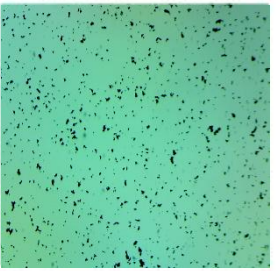
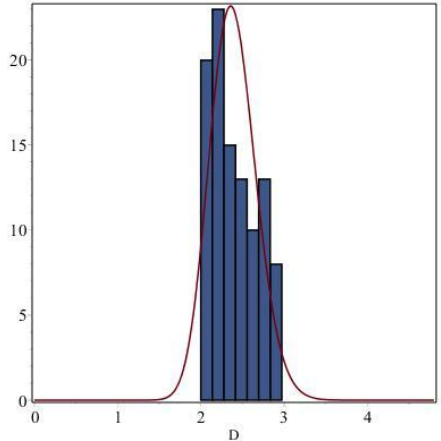
В экспериментах исследовались водные суспензии синтетических алмазных порошков различных фракций. Образцы поочередно исследовались в проточной измерительной камере, для каждого из образцов были зафиксированы картины рассеяния, с помощью цифрового микроскопа Trinocular MZJG160C фирмы Amscope (Эмекон, США) были

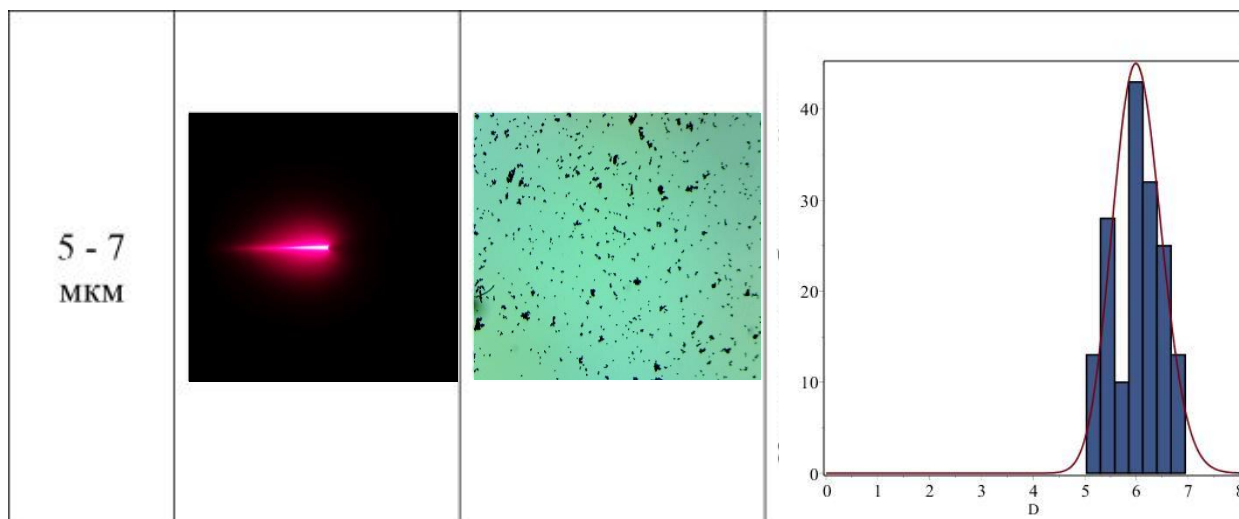
сделаны микроскопические снимки. Полученные снимки обрабатывались в среде разработки LabView с использованием модуля видеообработки LabVIEW Vision Development Module. По снимкам производился подсчет количества и размеров частиц.

По полученным данным строились гистограммы распределения частиц по размерам, а также дифференциальные кривые распределения частиц для каждого из образцов. По полученным снимкам были определены параметры распределения частиц для дальнейшего нейросетевого обучения системы: мода M , дисперсия D и коэффициент асимметрии K_a .

В качестве обработчика отснятых фотоснимков использовалась нейросеть типа MLP (многослойный перцептрон), алгоритм обучения – Back Propagation. [7].

Таблица 1 Примеры соответствия картин рассеяния и графиков распределения частиц по размерам

Диапазон размеров частиц	Картина рассеяния света	Микроскопический снимок	Распределение частиц по размерам
0 - 0.5 МКМ			
2 - 3 МКМ			



Для получения параметров яркости по полученным снимкам в среде LabView был написан скрипт, который позволяет определять значения яркости пикселей в 180 особых точках (рис.3). Полученные значения яркости в особых точках являлись входными переменными для ИНС. Мода M_0 , дисперсия D_0 и коэффициент асимметрии K_a являлись выходными переменными.

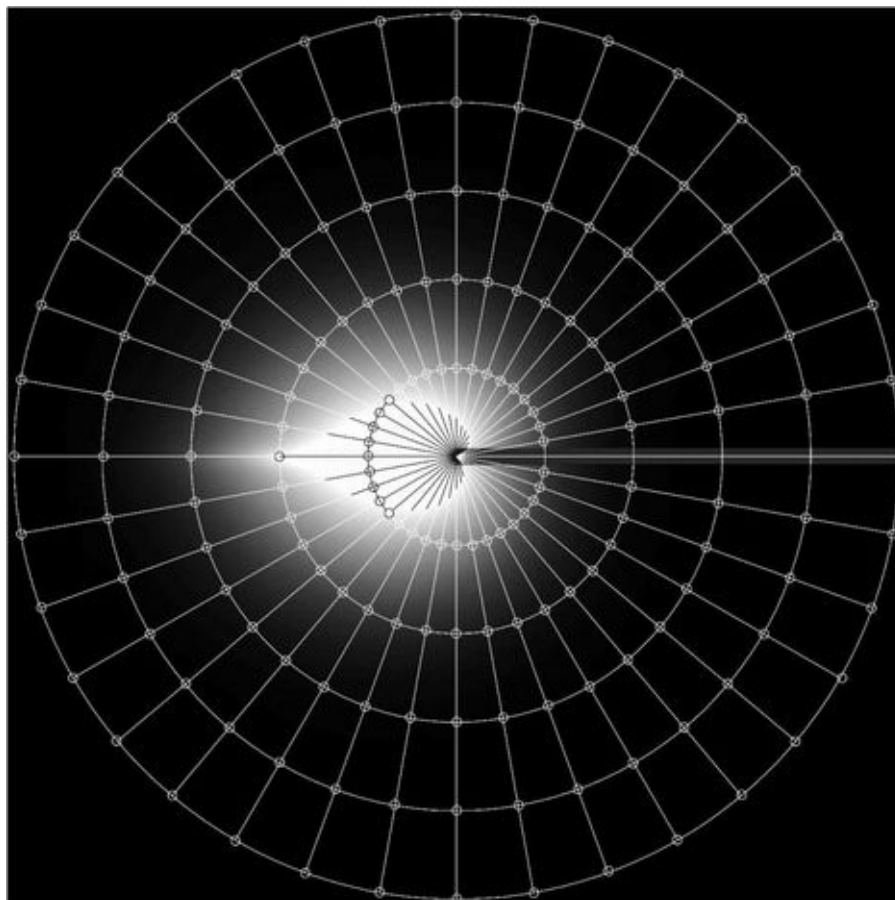


Рисунок 3 – Особые точки для определения яркости пикселей в области рассеяния излучения

Процесс обнаружения нового изображения, при котором должен запуститься процесс дополнительного обучения, происходит по специальному алгоритму сравнения текущих значений входных переменных нейросети с уже имеющимися в памяти и сводится к определению показателя сходства, вычисляемого как сумма квадратов разностей значений яркости пикселей в одних и тех же особых точках. Минимальное значение этого показателя свидетельствует о наибольшем сходстве двух сравниваемых векторов.

Показатель сходства сравнивается с пороговым значением, выбор которого зависит от требуемой точности и приемлемой частоты выполнения дообучения нейросети. В случае превышения порогового значения показателя сходства модулем выборки признаков формируется сигнал о том, что обнаружен неизвестный образец и требуется провести микроскопический анализ образца и дополнительное обучение системы. При этом запускается блок объективного анализа, с помощью которого полученная проба подробно анализируется и определяются значения M , D_0 и K_a для нового цикла обучения. Они записываются в память нейросети в качестве выходных переменных.

Рассмотрим пример, показывающий эффективность дополнительного обучения ИНС в процессе работы. Пусть на вход нейросети поступил входной вектор, соответствующий новому образцу с ранее не встречавшимся гранулометрическим составом. Этот состав подвергся микроскопическому анализу, и для него были определены следующие параметры распределения: $M_0=40.50$, $D_0=20.21$, $K_a=34.34$. Если использовать ранее обученную сеть без дополнительного обучения, то она выдает результат с довольно большой погрешностью: $M_0=35.86$, $D_0=27.98$, $K_a=20.48$. После дообучения сети исследуемый образец был рассмотрен повторно, после чего нейросеть выдала гораздо более близкие к реальным результатам ($M_0 = 40.88$, $D_0 = 20.09$, $K_a = 34.24$). Эффективность дополнительного обучения нейросети в процессе работы показана в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анализа до и после дополнительного обучения нейросети

Параметры распределения	Результат микроскопического анализа	Результат до доп. обучения		Результат после доп. обучения	
			$\delta, \%$		$\delta, \%$
Мода M_0	40,50	35,86	12,94	40,88	0,93
Дисперсия D_0	20,21	27,98	27,77	20,09	0,60
Коэффициент асимметрии K_a	34,34	30,48	12,96	34,24	0,29

Таким образом, результат анализа после дополнительного обучения значительно ближе к результату микроскопического анализа.

В качестве альтернативных алгоритмов обучения нейросети были рассмотрены следующие распространенные и применимые для рассматриваемой задачи методы [8]:

метод обратного распространения (Back propagation) – наиболее распространенный алгоритм обучения многослойных нейросетей;
 метод быстрого распространения (Quick Propagation) – модификация метода обратного распространения;
 метод спуска по сопряженным градиентам (Conjugate Gradients Descent) – алгоритм обучения более быстрый и простой в плане подбора параметров обучения (количество эпох, скорость обучения, инерция и пр.), по сравнению с методом обратного распространения.

В Таблице 3 представлены результаты сравнения работы перечисленных алгоритмов.

Таблица 3 – Результаты сравнения алгоритмов обучения нейросети

№ опыта	Результат объективного анализа	Метод Back Propagation		Метод Quick Propagation		Метод Conjugate Gradients Descent		
		Результат	Отклонение	Результат	Отклонение	Результат	Отклонение	
1	M ₀	24,742	24,856	0,114	24,907	0,165	24,921	0,179
	D ₀	7,004	7,028	0,024	7,484	0,48	7,035	0,031
	K _a	0,21391	0,232	0,018	0,241	0,027	0,235	0,021
2	M ₀	0,977	0,979	0,002	1,016	0,039	1,118	0,141
	D ₀	0,352	0,355	0,003	0,395	0,043	0,377	0,025
	K _a	1,214	1,217	0,003	1,357	0,143	1,225	0,011
3	M ₀	2,389	2,392	0,003	2,479	0,09	2,486	0,097
	D ₀	0,076	0,09	0,014	0,092	0,016	0,096	0,02
	K _a	0,231	0,236	0,005	0,239	0,008	0,244	0,013

Было проведено 3 опыта, в каждом из которых для образца суспензии производилась съемка картины рассеяния, затем выполнялся микроскопический анализ с определением коэффициентов M₀, D₀, K_a, после чего выполнялось обучение ИНС. По результатам 10 запусков сети, обученных разными методами, вычислялись средние расчетные значения коэффициентов и вычислялись соответствующие отклонения.

Как видно, наименьшее отклонение от результата объективного анализа показал метод обратного распространения, по этой причине в качестве основного метода обучения в работе использовался именно он.

Заключение

Предлагаемая система обладает быстродействием поточного нефелометрического анализатора на основе простой измерительной камеры с зондирующим лазерным излучением и видеокамеры и, в то же время, высокой метрологической надежностью, поддерживаемой за счет подключаемого по мере необходимости объективного (микроскопического) средства анализа.

Обученная при начальной градуировке на нескольких образцовых суспензиях ИНС в процессе работы, по сути, является средством быстрого отображения вектора входных сигналов, получаемых из картин рассеяния света в измерительной камере, в вектор параметров распределения частиц по размерам. Дополнительное обучение ИНС в процессе работы способствует постепенному улучшению точностных характеристик системы и поддержанию достоверности гранулометрического анализа.

Литература

1. ГОСТ Р 8.673-2009 "Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения". Доступно на сайте: <http://vsegost.com/Catalog/49/49914.shtml>
2. Bellman R. E. An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computers Think, Boyd & Fraser Publishing Company, San Francisco, 1978.
3. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – 3-е изд. – Л.: Химия, 1987. – 264 с., с.11.
4. Xu, R., 2002, Particle Characterization: Light Scattering Methods, Kluwer Academic Publishers, p.14.
5. Ходаков, Г. С. Основные методы дисперсионного анализа порошков / Г. С. Ходаков. - М. : Стройиздат, 1968. — 199 с., с.10
6. Харисова З.И., Фетисов В.С. Система для экспрессного определения гранулометрического состава суспензий на основе видеотехнических средств и искусственной нейросети, дообучаемой в процессе работы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. с.57-64.
7. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей/ Р. Каллан. — Москва, Санкт-Петербург, Киев: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 287 с., с.15.
8. Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H., and De Jesús, O., —Neural Network design, 2nd ed., p.11-7,12-14

ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМИ УРОВНЕМЕРАМИ

А.А. Калашников

АО «АТОМТЕХЭНЕРГО»

alexander_ak1987@mail.ru

В настоящей статье рассматриваются гидростатические измерения уровня жидких сред в аспекте многопараметрических измерений. Такое нестандартное рассмотрение данного вида измерений позволило разработать новые методы по повышению метрологической достоверности промышленных гидростатических уровнемеров. Причем под метрологической достоверностью в данной статье понимается не только повышение точности измерений, но и надежность ее сохранения в период эксплуатации.

Для обеспечения достоверных измерений уровня, в том числе в условиях быстрых переходных процессов, разработан алгоритм обработки измерительных сигналов гидростатических уровнемеров, который обеспечивает высокую точность коррекции показаний с учетом множества параметров рабочей среды. Методы коррекции показаний на основе разработанного алгоритма были внедрены в атомной энергетике России.

Помимо коррекции показаний алгоритм обеспечивает и выполнение on-line мониторинга для идентификации всех возможных дефектов измерительных каналов уровня, включая скрытые дефекты, которые не выявляются посредством штатных средств АСУТП или в процессе регламентных процедур технического обслуживания.

Настоящая статья содержит описание данного алгоритма и его применение в задачах коррекции показаний и on-line мониторинга метрологической исправности измерительных каналов уровня в условиях непрерывного технологического процесса.

Введение

На первый взгляд может показаться, что гидростатические измерения уровня жидкой среды являются простыми измерениями в промышленности. Однако данное понимание справедливо только в идеализированном случае измерений уровня однофазной рабочей среды со стационарными теплофизическими характеристиками. В действительности, в ходе технологического процесса теплофизические характеристики среды изменяются в довольно большом диапазоне. Например, в атомной и тепловой энергетике температура изменяется от 25 °С до 370 °С, давление от 100 кПа до 16,5 МПа; рабочей средой является двухфазная среда (вода-пар), достигающая состояния насыщения. Такие изменения приводят к сложным физико-химическим межфазовым

процессам, протекающим в условиях больших массовых переносов пароводяной смеси. При этом сама граница раздела сред (пар-вода) является нечеткой как в вертикальном, так и в горизонтальном сечении, поэтому абсолютно точно выразить уровень воды мерой длины является крайне затруднительным.

При использовании гидростатических уровнемеров непосредственно определяется именно «весовая характеристика» уровня. Типовая промышленная гидростатическая схема измерений уровня с применением однокамерного уравнительного сосуда (УСО) приведена на рисунке 1.

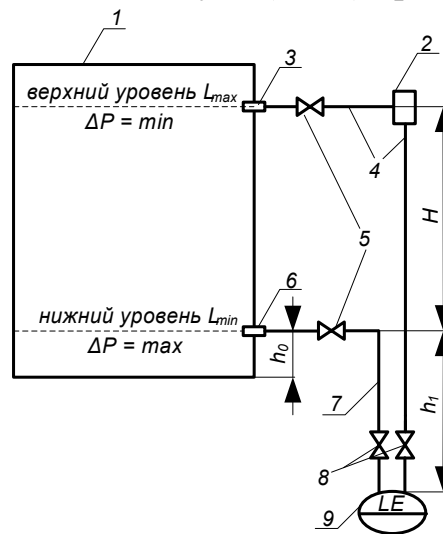


Рисунок 1. Измерение уровня воды в технологической емкости под давлением с применением однокамерного уравнительного сосуда

На рисунке:

1 – технологическая емкость под давлением; 2 – однокамерный уравнительный сосуд (УСО); 3 – штуцер (врезка плюсовой импульсной линии); 4 – плюсовая импульсная линия (трубная проводка); 5 – коренные вентили; 6 – штуцер (врезка минусовой импульсной линии); 7 – минусовая импульсная линия; 8 – отсечные вентили; 9 – датчик разности давлений (ДД); ΔP – измеряемый перепад давлений; h_1 – высота импульсных линий до нижнего штуцера; H – база уровнемера; h_0 – расстояние от внутренней образующей дна емкости до нижнего штуцера; L_{max} – максимальное измеряемое значение уровня; L_{min} – значение уровня, соответствующее высоте нижнего штуцера.

При данной схеме измерений уравнительному сосуду сообщается давление/разрежение со стороны технологической емкости, и на датчике разности давлений (ДД) в общем случае возникает перепад:

$$\Delta P = P_{\Sigma^{+++}} - P_{\Sigma^{---}} = P_{\text{вн}} + P_{\text{ил1}} - P_{\text{воды}} - P_{\text{пара}} - P_{\text{вн}} - P_{\text{ил2}}$$

где ΔP – измеряемый перепад давлений;

$P_{\Sigma^{+++}}$ – общее давление, оказываемое со стороны плюсовой линии;

$P_{\Sigma^{---}}$ – общее давление, оказываемое со стороны минусовой линии;

$P_{\text{вн}}$ – давление/разрежение внутри технологической емкости;

$P_{\text{ил1}}$ – гидростатическое давление, создаваемое столбом воды в плюсовой импульсной линии и УСО;

$P_{\text{воды}}$ – гидростатическое давление воды в технологической емкости,

$P_{\text{пара}}$ – гидростатическое давление пара в технологической емкости,

$P_{\text{ил2}}$ – гидростатическое давление воды в технологической емкости.

Указанные в формуле измеряемые параметры давления зависят от ряда других теплофизических параметров, основными из которых являются: плотность воды и водяного пара внутри технологической емкости, плотность воды в плюсовой и минусовой импульсных линиях. Для того чтобы подробнее рассмотреть влияние данных параметров на результаты измерений, распишем формулу в следующем виде:

$$\Delta P = \rho_{\text{ил1}} \cdot g \cdot H + (\rho_{\text{ил1}} - \rho_{\text{ил2}}) g h_1 - (\rho' \cdot g \cdot L + \rho'' \cdot g \cdot (H - L)), \quad (1)$$

где $\rho_{\text{ил1}}$ – плотность воды в плюсовой импульсной линии и УСО,

g – местное ускорение свободного падения,

H – база датчика уровня,

ρ' – плотность воды внутри технологической емкости,

ρ'' – плотность паровоздушной смеси внутри технологической емкости,

$\rho_{\text{ил2}}$ – плотность воды в минусовой импульсной линии и УСО,

h_1 – высота импульсных линий до нижней врезки,

L – искомый уровень воды в технологической емкости.

Значения плотности воды и пара, входящие в формулу (2), в основном зависят от распределения давления $P_{\text{вн}}$ и температуры $T_{\text{вн}}$ внутри технологической емкости, а также от распределения температурного поля $T_{\text{ил}}$ в импульсных линиях. Зависимость плотности воды и водяного пара описывается уравнениями IAPWS [1, 2].

В энергетике при изменении параметров давления $P_{\text{вн}}$ и температуры $T_{\text{вн}}$ плотность воды в ходе технологического процесса снижается с 998 кг/м^3 до 590 кг/м^3 , плотность пара возрастает до 130 кг/м^3 (при температуре $347 \text{ }^\circ\text{C}$). Такие изменения параметров неизбежно приводят к изменению показаний гидростатических уровнемеров, и требуется непрерывно вносить соответствующую коррекцию.

Когда температура рабочей среды в технологической емкости равна температуре окружающего воздуха, соответствующая шкала измерений, обеспечивающая достоверность показаний, условно называется «холодной». Когда температура рабочей среды выше температуры окружающего воздуха – соответствующая шкала измерений условно называется «горячей».

Для того чтобы в динамике выполнять корректировку показаний гидростатических уровнемеров от «холодной» шкалы к «горячей»,

выведем формулы для поправочных коэффициентов на «горячую» шкалу с учетом изменений вышеуказанных параметров рабочей среды и технических характеристик самого измерительного канала.

Вывод формул для поправочных коэффициентов на «горячую» шкалу

В случае «холодной» шкалы плотность рабочей среды в технологической емкости и импульсных линиях (1 и 2) одинаковы:

$$\rho_{ил1} = \rho_{ил2} = \rho_{хш},$$

где $\rho_{хш}$ – плотность воды в технологической емкости, соответствующая случаю «холодной» шкалы.

С учетом данного условия уравнение (1) для «холодной» шкалы имеет вид:

$$\Delta P = (H - L_{хш}) \cdot g \cdot \rho_{хш} \quad (2)$$

где $L_{хш}$ – уровень воды в технологической емкости для случая «холодной» шкалы,

Для того чтобы расписать уравнение (1) для случая «горячей» шкалы, дополнительно учтем распределение плотности среды по высоте импульсных линий.

Зачастую на практике плотность среды в плюсовой импульсной линии (ИЛ) считают одинаковой на протяжении всей ее высоты. Также обычно принимают одинаковыми значения плотности среды в минусовой и плюсовой линиях. Однако ввиду удаленности ИЛ друг от друга значения температуры и плотности среды в них могут отличаться, что приводит к дополнительной погрешности измерительного канала (ИК). Подтверждается это и результатами инженерных и научных работ, описывающих неравномерности распределения температурного поля по высоте ИЛ на объектах энергетики [3].

Из вышеуказанного следует, что плотность среды в ИЛ датчиков некорректно принимать одинаковой без проведения соответствующей пирометрии. Причем, даже зная результаты пирометрии, вывод непрерывной функции распределения плотности по высоте ИЛ в каждом конкретном случае является нетривиальной и трудозатратой задачей. В связи с этим, для универсальности и упрощения метода расчета плотности среды выделим участки по высоте ИЛ, на протяжении каждого из которых тепло-химические характеристики среды допустимо считать одинаковыми (пояснительный рисунок 2).

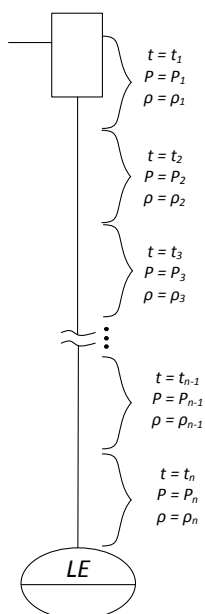


Рисунок 2. Схема деления ИЛ на участки с одинаковыми характеристиками среды

Тогда, суммарное давление гидростолба в ИЛ можно определить следующим образом:

$$P = g \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot h_i, \quad (3)$$

где ρ_i – плотность воды на участке i ,

h_i – высота участка i ,

P – суммарное давление гидростолба ИЛ.

Плотность каждого из участков ИЛ определяется из справочных данных [4] при соответствующих значениях температуры t_i и давления p_i . В свою очередь, давление на участке i складывается из давления внутри технологической емкости $P_{вн}$ и суммы гидростатических давлений вышестоящих участков в ИЛ. Таким образом, расчет суммарного давления гидростолба в ИЛ по формуле (3) осуществляется от верхних участков к нижним.

С учетом условия (3) уравнение (1) для «горячей» шкалы преобразуется к виду:

$$\Delta P = g \sum_{i=1}^n \rho_{ил1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{ил1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{ил2\gamma} \cdot h_\gamma - \rho' \cdot g \cdot L + \rho'' \cdot g \cdot (H - L), \quad (4)$$

где H_i – длина участка i плюсовой ИЛ в пределах фактической базы ИК уровня ($\sum_{i=1}^n H_i = H$),

h_j – длина участка j плюсовой ИЛ в пределах ее высоты до минусового отбора импульса ($\sum_{j=1}^m h_j = h_1$),

h – длина участка минусовой ИЛ в пределах ее высоты до минусового отбора импульса ($\sum_{\gamma=1}^k h_\gamma = h_1$).

Так как используемые переменные в уравнении (4) удовлетворяют переменным в уравнении (2), то справедлива система:

$$\Delta P = (H - L_{\text{хш}}) \cdot g \cdot (\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}''),$$

$$\Delta P = g \left[\sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_\gamma - \rho' \cdot g \cdot L + \rho'' \cdot g \cdot (H - L) \right]$$

где ΔP $[g \sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_\gamma - \rho' \cdot g \cdot H;$

$$g \left[\sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_\gamma - \rho'' \cdot g \cdot H \right];$$

$L_{\text{хш}} [0; H], L [0; H]$ – ограничения из физического смысла.

Решая систему относительно L , получим функции коррекции показаний на «горячую» шкалу в следующем виде:

$$L = \frac{L_{\text{хш}} \cdot (\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}'') - H \cdot (\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}'' + \rho'') + \sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_\gamma}{\rho' - \rho''}$$

Для упрощения процедур промышленных расчетов удобно использовать полученную функцию, преобразованную к виду:

$$L = k \cdot L_{\text{хш}} + b, \quad (5)$$

где поправочные коэффициенты k и b вычисляются по формулам:

$$k = \frac{(\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}'')}{\rho' - \rho''},$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_\gamma - H \cdot (\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}'' + \rho'')}{\rho' - \rho''}.$$

Так как вывод полученных расчетных формул для поправочных коэффициентов k, b произведен на области определения $L_{\text{хш}} [0; H]$ и $L [0; H]$, то их применение на практике справедливо, когда на промышленном объекте за показания уровня «0 мм» принято считать уровень врезки минусовой импульсной линии.

Когда на промышленном объекте за показания уровня «0 мм» принимается уровень дна технологической емкости, то при расчетах поправочных коэффициентов необходимо дополнительно учитывать смещение шкалы измерений на высоту h_0 (см. рис 1). Тогда, с учетом смещения на высоту h_0 функция пересчета (5) преобразуется к виду:

$$L = k \cdot (L_{\text{хш}} - h_0) + b + h_0.$$

или:

$$L = K \cdot L_{\text{хш}} + B,$$

где $K = k;$

$$B = -k \cdot h_0 + b + h_0.$$

Полученные расчетные формулы для поправочных коэффициентов K , B позволяют выполнить корректировку показаний ИК уровня на «горячую» шкалу для различных режимов работы технологического оборудования и любых технических характеристик ИК.

Динамическая коррекция показаний

С целью динамической коррекции показаний уровня в программно-технических комплексах (ПТК) АСУТП на основе ранее выведенных зависимостей предлагается рассчитывать поправочные коэффициенты K , B с учетом текущих значений плотности воды и водяного пара. Определение плотности воды и водяного пара в режиме реального времени осуществляется по данным справочника [4], или, более сложно, на основании [2]. Исходными данными для расчетов плотности и в том и в другом случае являются соответствующие текущие показания датчиков давления и температуры в технологической емкости (рис. 3).

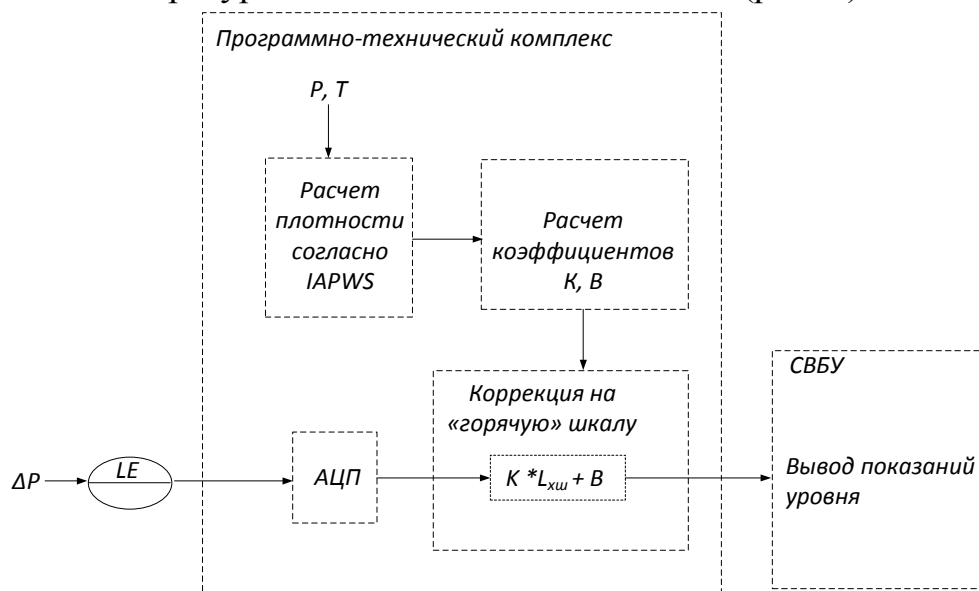


Рисунок 3. Предлагаемая схема динамической коррекции показаний уровня

На рисунке: ΔP – измеряемый перепад давлений; LE – датчик разности давлений, настроенный на «холодную» шкалу (согласно ГОСТ 22520-85); P – текущее значение давления в технологической емкости; T – текущее значение температуры в технологической емкости; СВБУ – система верхнего блочного уровня.

Данный способ динамической коррекции обеспечивает достоверность показаний измерительных каналов во всех возможных режимах работы технологического оборудования, в том числе при переходных процессах. Внедрение данного метода позволило снизить максимальную приведенную погрешность гидростатических уровнемеров в переходных режимах работы энергоблоков АЭС до 3 %.

Применение разработанного алгоритма обработки измерительных сигналов для задач on-line мониторинга ИК

Разработанный алгоритм по обработке измерительных сигналов гидростатических уровнемеров позволяет осуществлять моделирование виртуального датчика уровня для выполнения on-line мониторинга метрологической исправности ИК. Особую актуальность такой метод on-line мониторинга имеет в условиях действующих объектов энергетики, где реализация разработанной динамической коррекции показаний не представляется возможной по причине отсутствия цифровых ПТК в структуре АСУТП. В таких случаях моделирование показаний виртуального датчика открывает и возможности по организации независимого высокоточного контроля уровня, в том числе переходных режимах работы технологического оборудования.

Математическое моделирование виртуального датчика по аналогии с разработанными методами коррекции основывается на расчетах значений уровня с учетом поправочных коэффициентов K и B с тем отличием, что в качестве исходных данных используются не показания канала $L_{\text{хш}}$, а сами измеряемые значения перепадов давлений на датчиках:

$$L_M = K \cdot \Delta P + B \quad (6)$$

где:

$$K = \rho'' - \rho' \cdot g^{-1};$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_\gamma - \rho'' \cdot H}{\rho' - \rho''} + h_0.$$

где L_M – моделируемые показания датчика уровня;

ΔP – усредненное значение измеренного перепада давлений на дублирующих датчиках уровня;

H – значение базы ИК уровня, найденное по результатам специализированных геодезических измерений.

Значение ΔP , входящее в формулу (6), определяется следующим образом:

$$\Delta P = \rho_{\text{ик}} g H_{\text{ик}} - \rho'_{\text{ик}} g \cdot k^{-1} \cdot \sum_{i=1}^k L_i - h_0 +$$

$$+ \rho''_{\text{ик}} \cdot g \cdot H_{\text{ик}} - k^{-1} \cdot \sum_{i=1}^k L_i - h_0 + \Delta P_0,$$

где $\rho_{\text{ик}}$ – плотность воды в плюсовой импульсной линии, которая учтена при настройке дублирующих ИК уровня;

$H_{\text{ик}}$ – учтенное значение базы;

$\rho'_{\text{ик}}$ – учтенная плотность воды внутри технологической емкости;

$\rho''_{\text{к}}$ – учтенное значение плотности пара внутри технологической емкости;

L_i – показания i -го измерительного канала;

k – общее количество дублирующих ИК уровня.

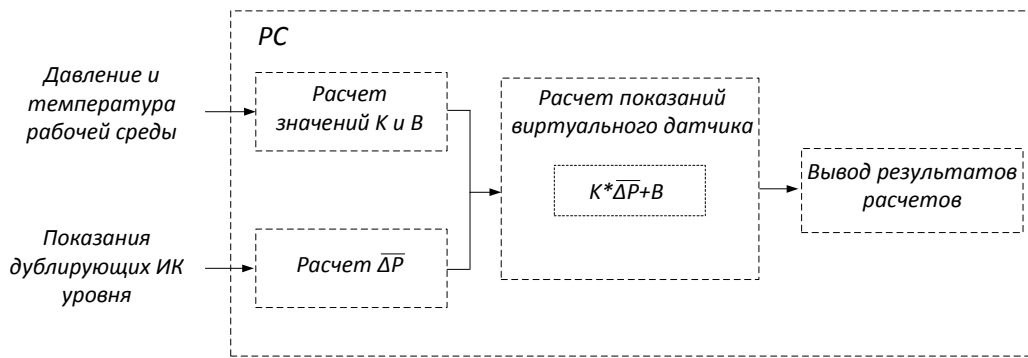


Рисунок 4. Организация математического моделирования виртуального датчика уровня

С целью осуществления метрологической диагностики в режиме реального времени или в определенные временные срезы показания каждого из дублирующих ИК уровня сверяются с моделируемыми показаниями виртуального датчика, и рассчитывается среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N L_n - M[L_M]^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N L_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{Mn}^2}$$

где σ – среднеквадратичное отклонение за период времени N ;

N – объем выборки по времени;

L_n – текущее значение показаний штатного ИК уровня в момент времени n ;

$M[L_M]$ – математическое ожидание моделируемых показаний L_M за весь объем выборки;

L_{Mn} – текущее значение показаний моделируемого датчика в момент времени n .

По превышению среднеквадратичного отклонения заданной границы констатируется факт неисправности ИК.

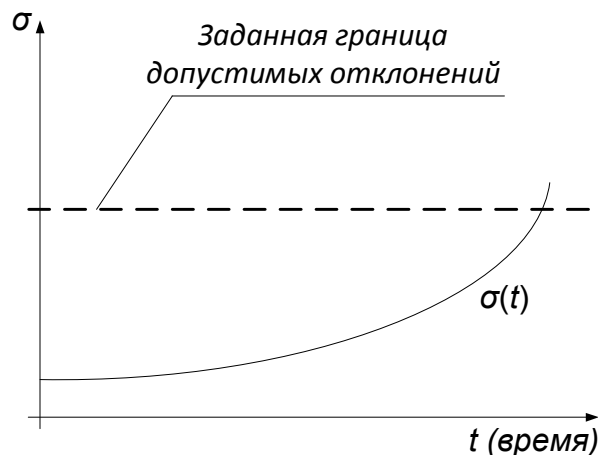


Рисунок 5. Выход среднеквадратичного отклонения за допустимую границу

Анализируя график зависимости среднеквадратичного отклонения от времени, становится возможным не только выявить погрешность измерений, но и идентифицировать причину её возникновения [5].

Предлагаемый метод on-line мониторинга позволяет решить основную задачу технического обслуживания – своевременно диагностировать тот или иной дефект, пока он не привел к критическому отказу/ошибке работы технологического оборудования и систем автоматизации. Применение данного метода открывает возможности создания отечественного экспертно-технического комплекса для метрологической диагностики информационно-измерительных систем объектов энергетики.

Заключение

Разработанный алгоритм коррекции показаний гидростатических уровнемеров, учитывающий изменения множества параметров рабочей среды и технических характеристик измерительного канала, был внедрен в атомной энергетике. Это позволило снизить максимальную приведенную погрешность гидростатических уровнемеров при переходных режимах до 3 %.

Разработанная математическая модель виртуального датчика уровня для задач on-line мониторинга позволяет диагностировать не только явные, но и скрытые неисправности ИК. Практическая значимость данного метода on-line мониторинга заключается и в том, что он обеспечивает дистанционное выполнение метрологической диагностики ИК в условиях непрерывного технологического процесса. Позволяет своевременно идентифицировать возможную причину неисправности и, следовательно, ориентировать персонал по составу и объему ремонтных работ, сокращая, тем самым, время устранения неисправности, что имеет особую актуальность в зоне ограниченного доступа. При этом применение данного метода не требует вмешательства в работу штатного оборудования АСУТП.

В целом предлагаемые методы коррекции показаний и on-line мониторинга закладывают основы методологии повышения метрологической достоверности промышленных гидростатических уровнемеров с точки зрения многопараметрических измерений.

Литература

1. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. – Lucerne: IAPWS, 2007. – 49 p.

2. Александров А.А. Система уравнений IAPWS-IF-97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч.1. Основные уравнения // Теплоэнергетика. – 1998. – № 9. – С. 69 – 77
3. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Е.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 316 с.
4. Калашников А.А. Справочник по настройке промышленных гидростатических уровнемеров. – М.: Инфра-Инженерия, 2017. – 194 с.
5. Калашников А.А. On-line мониторинг измерительных каналов уровня с датчиками разности давлений на АЭС. Ч.1. Математическая модель контрольного датчика // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 4. – С. 40 – 46

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Гуревич В.М.

ЗАО “Центрприбор”, Москва

raisa_gur@mail.ru

1 Введение

Характеристики времяпролетных ультразвуковых расходомеров (УЗР) определяются величинами, входящими в функцию преобразования расхода Q :

$$Q = 2826 \cdot D^2 \cdot V_o = 2826 \cdot D^2 \cdot K_g \cdot \frac{\Delta t}{t_{up} \cdot t_{dn}} \cdot \frac{L^2}{2L'}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где V_o – осредненная скорость потока, м/с; D – гидравлический диаметр, м; $K_g = V_o/V_{УЗР}$ – гидродинамический коэффициент, как отношение осредненной скорости к скорости по траектории зондирования; L, L' – длина акустической базы и ее проекция на ось, соответственно, м; $\Delta t = t_{dn} - t_{up}$ – разностный интервал времени распространения ультразвуковых (УЗ) колебаний вверх и вниз по потоку, с.

Факторами, ограничивающими точность измерения, являются изменчивость текущего значения K_g в диапазоне расходов и особенности гидравлического монтажа. Фактором, ограничивающим скорость реакции УЗР на изменение расхода, является случайный характер Δt .

Пульсации выходного сигнала, зависящие от размаха вариаций Δt , сглаживают с помощью фильтров, характеризуют допускаемым коэффициентом пульсаций $[K]$ или нормируют допускаемым значением в долях Q_{max} . При использовании УЗР в быстродействующих системах автоматического регулирования с малой зоной нечувствительности, для приложений с малой задержкой отклика и малым временем нарастания t_n большие пульсации Δt приводят к дестабилизации работы.

Для решения технического противоречия и определения параметров фильтров требуется знание природы и поведения флуктуаций Δt (мгновенной скорости или расхода).

2 Статистические характеристики разности времени распространения Δt

Физические причины случайного характера Δt – турбулентные вихри, неоднородности акустического импеданса и закрутка потока. Наибольшее влияние оказывают турбулентные вихри масштаба, соизмеримого с диаметром ультразвукового (УЗ) луча [1].

В турбулентном потоке траектория становится зигзагообразной из-за искажения волнового фронта УЗ посылки, неоднородностей среды, изменяющих соотношения прохождения, отражения и преломления ультразвука, суммирования векторов скорости c звука с окружной скоростью крупномасштабных вихрей или закрутки потока, пересекающих луч. Акустическая база удлиняется, времена распространения увеличиваются, профиль скоростей перестает быть гладким (рис. 1).



Рис. 1. Физические причины флуктуаций Δt

Исследования проводились на водной объемной поверочной установке динамического типа с погрешностью $\pm 0,2\%$ в диапазоне изменения $\lg(Re) = 2,2 - 5,7$ и при температурах среды в диапазоне от 15 до 55°C. Тип первичного преобразователя – прямооточный, —наклонный диаметр \parallel , DN 20 – 65, с отражениями (DN 20) или без них.

Особенностью установки являлись наборы из локальных сопротивлений и прямых участков разной длины, возможность создания импульса расхода с помощью клапана, считывание значений Δt в рабочее пространство MatLab под управлением m-файла.

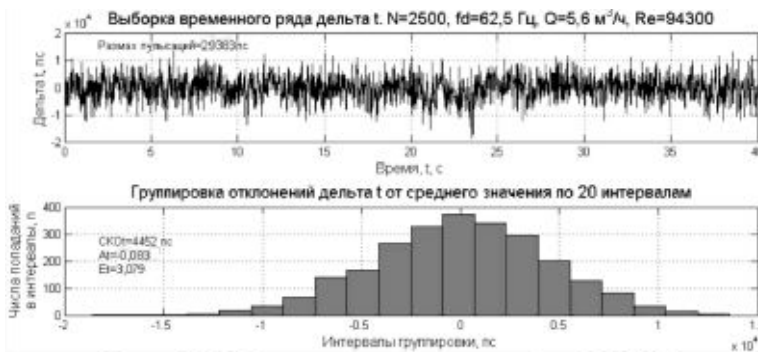


Рис. 2. Шумовая дорожка Δt , DN 20, Q_{max} , прямой участок $L_{ent} > 30DN$

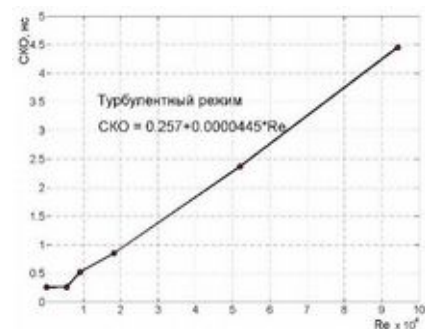


Рис. 3. Зависимость $\sigma_{\Delta t}(Re)$

Шумовые дорожки Δt считывались в 7-10 точках диапазона расходов для разных условных проходов, местных сопротивлений на входе и режимах течения (рис. 2). Дальнейшая обработка предусматривала определение среднеквадратического отклонения $\sigma_{\Delta t}$, статистических моментов, построение спектра, автокорреляционной функции (АКФ) и установление характера распределения вероятностей.

Проверка отклонения распределения вероятностей Δt от нормального проводилась при объемах выборки $N = 2500$ и уровнях значимости $\alpha = 0,05$ с помощью теста Харке-Бера (Jarque-Bera test, сверка асимметрии A_t и эксцесса E_t с моментами нормального распределения $A_t = 0$, $E_t = 3$) с числом степеней свободы $f = 2$, а также с помощью критерия согласия Пирсона (критерий χ^2) с числом степеней свободы $f = 18$.

Гипотеза H_0 о нормальном распределении всех выборок Δt в исследуемых точках расхода, включая неподвижную среду, не отвергалась.

Значения $\sigma_{\Delta t}$ (СКО) в турбулентной области (рис.3) имеют практически линейную зависимость от расхода (или Re , Δt). Например, для DN 20, $L_{ent} = 45D$ установленная опытным путем зависимость $\sigma_{\Delta t}(Re)$ имела вид:

$$\sigma_{\Delta t} = 0,257 + 0.0000445 * Re.$$

Эта зависимость является характеристикой конкретного первичного преобразователя, поскольку $\sigma_{\Delta t}$ зависит от длины акустической базы, L , вида локального сопротивления на входе и длины входного прямого участка L_{ent} . Так, если при невозмущенном входе $L_{ent} = 45D$ уровень турбулентности, определяемый как $\sigma_{\Delta t}/\Delta t$, составляет 2,5 %, то при установке на входе одного колена 90° при $L_{ent} = 2D$ он возрастает до 3,8%.

Спектр содержал гармонические составляющие со случайной фазой и амплитудой, кратные приблизительно 0,25 Гц, амплитуда которых после 5 Гц была близка к нулю.

По результатам анализа проводилось моделирование сигналов Δt в среде Simulink для опробования аварийных ситуаций, не реализуемых на поверочной установке (рис. 4). Моделировались начальная шумовая составляющая при неподвижной среде (—Random Number1), построитель импульса, перепада, тренда среднего уровня Δt (—Signal Builder), полигармонический сигнал из первой, третьей и пятой гармоник со случайной фазой (блоки —Sine Wave1) и шумовая составляющая (—Random Number11), изменяющиеся пропорционально среднему уровню Δt с помощью блоков сложения и умножения. Частота дискретизации $f_d = 62.5$ Гц.

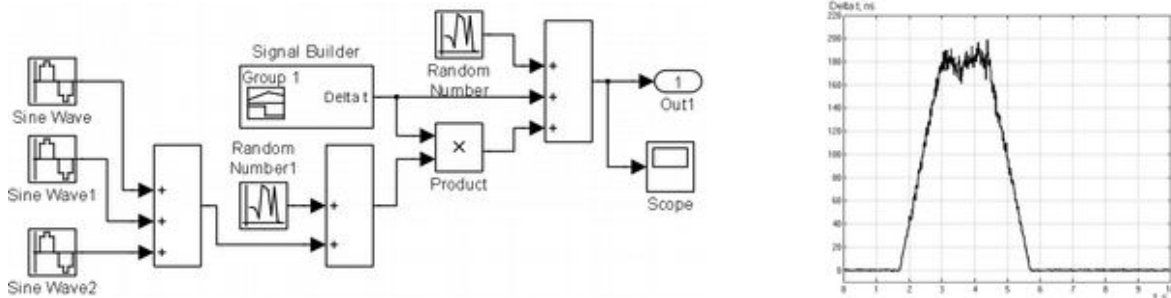


Рис. 4. Моделирование импульса $\Delta t = 180$ пс
(DN 20, $Q = 0,5Q_{max} = 3,0$ м³/ч)

Уменьшение времени нарастания t_n при сохранении уровня фильтрации возможно за счет увеличения частоты озвучивания f_d , однако, существует два ограничительных момента: возрастание маскирующего действия многократных эхо-сигналов и коррелированность членов дискретно-временного ряда Δt . Последнее ограничение связано с тем, что только усреднение по статистически независимым отсчетам приводит к уменьшению выходных флюктуаций.

Пространственная корреляция отсчетов вызывается вихрями в турбулентном потоке, которые достаточно медленно распадаются в кадре, движущемся со скоростью V_0 . Вихри перемещаются мимо УЗ луча (рис. 1), и их пространственная корреляция приводят к временной корреляции Δt . До тех пор, пока время выборки $1/f_d$ больше времени корреляции τ сглаживание корректно. Время корреляции увеличивается с уменьшением скорости V_0 и увеличением диаметра трубы D , зависит от длины L и соотношения q диаметров УЗ луча и трубы, а также от конструкции, и учитывается обобщенным коэффициентом m , значение которого находится в пределах от 0,15 до 0,25. Для минимальной скорости V_{0m} в турбулентном режиме ($Re=1e+4$) справедливо неравенство

$$f_d \leq \frac{V_{0m}}{mD}.$$

Построение АКФ проводилось по выборке, полученной для DN 20 ($D = 0,02$ м, $V_m = 0,5$ м/с, $m = 0,2$). Время корреляции τ оценивалось по интервалу между главным максимумом АКФ и второму пересечению с осью времени, и составляло приблизительно 8 мс. То есть, например, для условного прохода DN 20 статистическая независимость флюктуаций Δt сохраняется до частот озвучивания $f_d = 125$ Гц.

3 Коррекция времени нарастания

При измерениях объема в УЗР используется выходной фильтр, который реализует алгоритм простого скользящего среднего (SMA), характеризующийся постоянством ширины скользящего окна W и одинаковыми весовыми коэффициентами. Связь между входными и выходными величинами и их оценками:

$$\hat{y}_t = \frac{W-1}{W} \hat{y}_{t-1} + \frac{1}{W} \cdot x_t.$$

Сглаживание используется для улучшения визуального восприятия данных, однако в режиме измерения расхода требование высокого уровня сглаживания пульсаций часто сочетается с требованием малого времени нарастания t_n . При заданном коэффициенте пульсации $[K]$ выходного сигнала требуется степень фильтрации, определяемая максимальной шириной окна W

$$\left(\frac{6,6 \cdot \sigma_{\Delta t}}{\Delta t_{\max} \cdot [K]} \right)^2,$$

которая может достигать $W > 1000$. Однако когда зашумленная измеряемая величина изменяется резко, фильтр становится излишне инертным и недостаточно быстро реагирует на реальные изменения во входном сигнале, внося недопустимые искажения.

Большое время адаптации (150-200 итераций) и высокая сложность реализации исполняемого кода также требуют жертвовать оптимальным построением фильтров в пользу более простого решения, имеющего наглядный физический смысл.

Выбор между фильтрацией шума, задержкой отклика и t фильтра делается на основе каскадной фильтрации с выходом в виде фильтра, использующего экспоненциальное скользящее среднее (ЕМА) и прямой зависимостью степени сглаживания от коэффициента α :

$$\hat{y}_t = (1 - \alpha) \cdot x_t + \alpha \cdot \hat{y}_{t-1}.$$

Из-за наличия обратной связи экспоненциальный фильтр проводит учет всех предыдущих значений, а также обладает свойством быстрого приближения к значениям после скачка.

При отсутствии тренда, превышающего порог, нелинейный адаптивный алгоритм предусматривает установку весовых коэффициентов и 1 с учетом зависимости $\sigma_{\Delta t}(\Delta t)$, а при обнаружении тренда весовые коэффициенты меняются местами.

Наличие тренда (скачка) Δt (скорости, расхода) устанавливаются с помощью оценки:

$$\theta_n = [\Delta t(n + M) - \Delta t(n - M)]^2,$$

которая близка к нулю при медленном изменении сигнала в окрестности текущего входного отсчета и резко возрастает при превышении трендом порогового значения. Результаты моделирования обнаружителя тренда как подсистемы в среде Simulink при $M = 8$, объединенного с первым каскадом сглаживания на SMA, приведены на рис. 5.

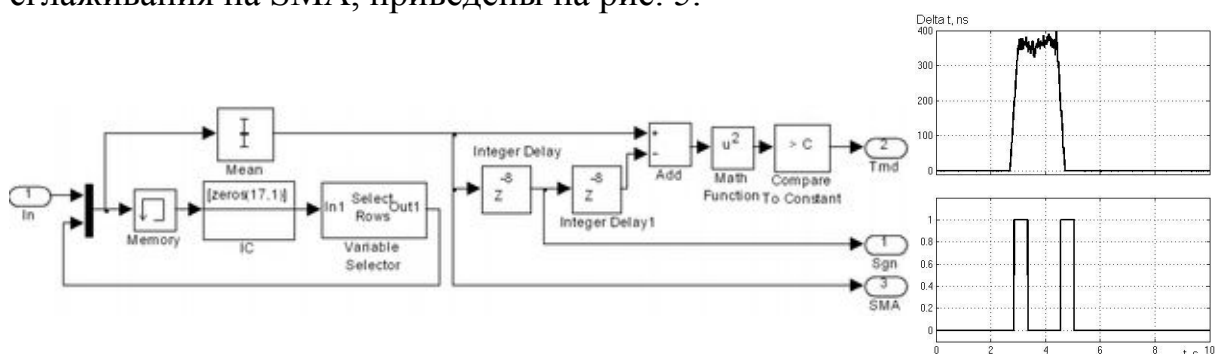


Рис. 5. Обнаружение тренда или скачка сигнала

Петля из последовательно соединенных мультиплексора —Mux||, задержки на период озвучивания —Memory||, установки начального значения сигнала —IC||, переменного селектора —Variable Selector|| группирует из входного сигнала —In|| окно SMA с шириной W , в пределах которого блок —Mean|| находит среднее арифметическое. Сглаживание входного сигнала —In|| (вверху) уменьшает размах вариаций в 2-4 раза и стабилизирует работу обнаружителя тренда, а его степень ограничивается лишь допускаемой задержкой отклика и t_n .

Предварительно сглаженный входной сигнал поступает на интегральные линии задержки —IntegerDelay|| и —IntegerDelay1||, из текущего значения вычитается задержанное значение с помощью блока —Add||, а разность возводится в квадрат с помощью блока математических операций. Вычисленная оценка θ_n сравнивается с порогом при помощи компаратора —Compare To Constant||, а выходной сигнал с логическими уровнями (внизу) управляет переключением весовых коэффициентов α и $(1-\alpha)$.

На рис. 6 приведена модель нелинейного адаптивного фильтра с осциллограммами входного (вверху) и выходного (внизу) сигналов. Проверка проводилась, как при подаче входного сигнала от блока —Signal modeling|| (рис. 4), так и при считывании шумовых дорожек Δt из рабочего пространства с помощью блока —From Workspacel||.

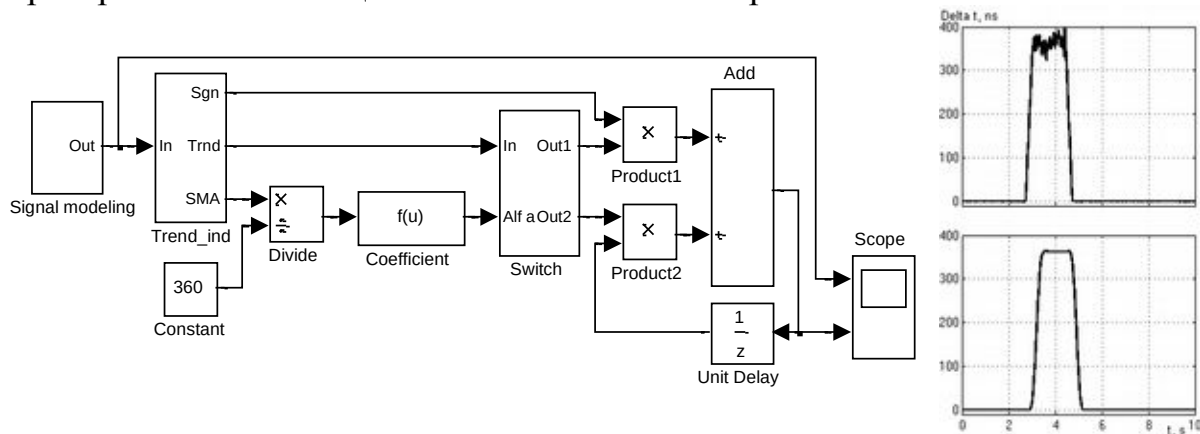


Рис. 6. Моделирование нелинейного адаптивного фильтра

Экспоненциальный фильтр реализован на блоке —Add||, выход которого через единичную задержку и блок умножения —Product2|| поступает на вход сумматора, на другой вход которого через блок умножения —Product1|| поступает входной сигнал. В установившемся режиме блок ключей —Switch||, управляемый логическими уровнями индикатора тренда, устанавливает на втором входе —Product2|| коэффициент α , а на входе —Product1|| — $(1-\alpha)$. При обнаружении тренда коммутация коэффициентов обратная.

Коэффициент α зависит от значения $\sigma_{\Delta t}$ входного сигнала (рис. 3) в относительных единицах и определяется выражением вида:

$$\alpha = (1 + \operatorname{atan}((u * 30) - 15) / \pi) / 2 + 0,25,$$

где $u = \Delta t / \Delta t_{\max}$ – относительное значение входного сигнала (Δt , скорость, расход).

Получение нужной зависимости $\alpha(u)$ достигается с помощью блока —Coefficient‖ для функций, определяемых пользователем. Диапазон α для нашего случая находится в пределах от 0,55 до 0,98 при изменении входных значений от 0 до 1. Получение входного сигнала в относительных единицах реализовано на блоках —Constant‖ и —Divide‖.

Алгоритм нелинейного адаптивного фильтра был реализован в исполняемом коде микроконтроллера УЗР и опробован на реальном потоке при создании импульса расхода с помощью трехходового электрически управляемого клапана.

Отклики для традиционного и адаптивного алгоритмов показаны на рис. 7 и 8.

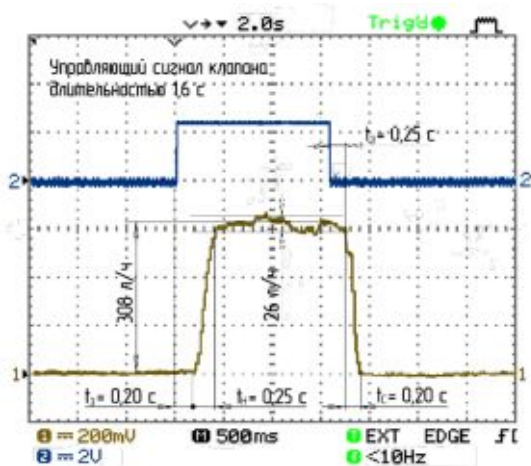


Рис.7. Фильтр простого скользящего среднего, $t_n = 0,3$ с, отклик выходного напряжения при импульсе расхода 0 – 308 л/ч длительностью 1,6 с

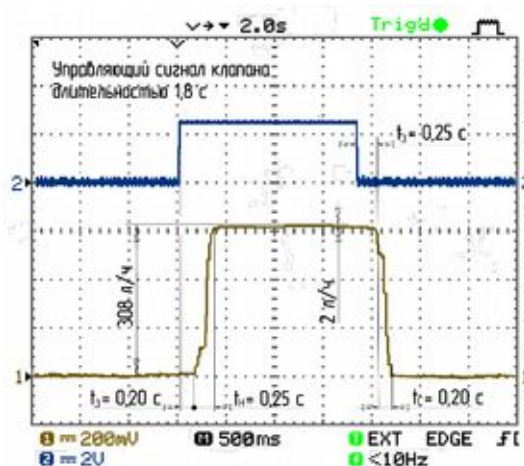


Рис.8. Нелинейный адаптивный фильтр, отклик выходного напряжения при импульсе расхода 0 – 308 л/ч длительностью 1,8 с

В случае нелинейного адаптивного фильтра сглаживание фронтов и срезов импульса или тренда минимально и практически определяется первым каскадом, в то время как в установившихся режимах оно возрастает до обеспечения допустимых выходных пульсаций.

4 Коррекция статической характеристики

При выпуске из производства калибровка и поверка УЗР проводится в нормальных условиях, на установившемся потоке при отделении любого локального сопротивления от входа расходомера прямым участком

трубопровода L_{ent} . Длина прямого участка в калибрах, L_{ent}/D , без учета фактора —закрутки, необходимая для полного устранения возмущения от любого локального сопротивления, для всех режимов потока определяется как

$$L_{ent}/D \geq 4.343 \cdot \ln(Re),$$

а ее зависимость от числа Рейнольдса, Re , проиллюстрирована на рис. 9. Однако даже при выполнении требований по входным участкам при нормальных условиях базовый гидродинамический (калибровочный) коэффициент K_{gb} изменяется в широких пределах. Например, для DN 50, на потоках с числами Re от 10 до 200000, K_{gb} изменяется от 0,7808 до 0,9450, что составляет приблизительно 17%.

Ход $K_{gb}(Re)$ по 34 узловым точкам, приведен на рис. 10.

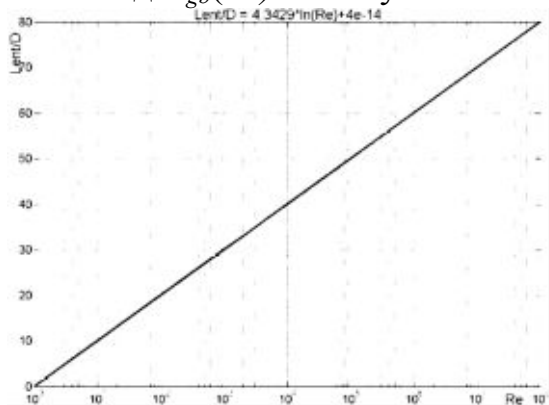


Рис.9 – Зависимость длины прямых участков в калибрах, L_{ent}/D , от числа Re

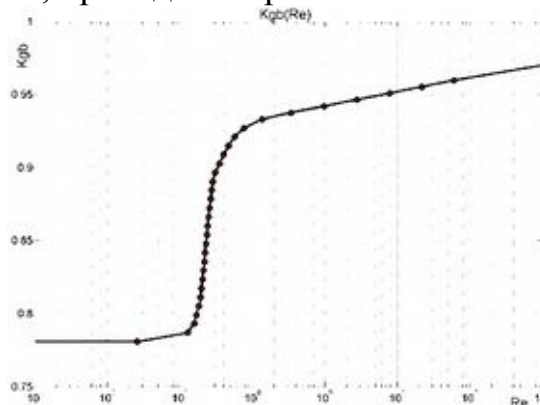


Рис.10 – Зависимость базового гидродинамического коэффициента, K_{gb} , от числа Re

Существует ряд эмпирических зависимостей $K_{gb}(Re)$, которые требуют знания текущего значения кинематического коэффициента вязкости среды, ν , и последующего вычисления Re . При измерении нефтепродуктов используют поточный плотномер с опцией измерения ν . Для водных потоков измеряют температуру среды, T , и применяют эмпирическую формулу Пуазейля:

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

При эксплуатации УЗР в ряде случаев выполнение требований входных участков невозможно, осесимметричные потоки заменяются деформированными и ситуация с вычислением градуировочных коэффициентов еще более усугубляется. Поэтому калибровочная кривая УЗР без гарантии того, что его работа в условиях эксплуатации будет соответствовать функционированию на поверочной установке, не имеет смысла, так как реальные условия эксплуатации, как правило, сложнее условий, существующих в поверочных лабораториях из-за зависимости

$K_g(Re)$ и эффектов установки, вызванных воздействием местных сопротивлений на входе.

Основные применяемые решения: использование кондиционеров потока, разработка траекторий зондирования, малочувствительных к профилю скоростей, применение многолучевых УЗР с использованием траекторий в узлах квадратуры Гаусса, калибровка для конкретной установки, линеаризация полиномом вида $A_0 + A_1Q + A_2Q^2$.

Несмотря на усложнение конструкции или процедуры калибровки, методы не являются универсальными, и в случае коммерческого использования УЗР на границах балансовой принадлежности хозяйствующих субъектов приводят к финансовым спорам.

От этого недостатка свободен метод по патенту США № 7643947, предусматривающий предварительное измерение v , вычисление Re и автоматический расчет текущих значений K_g по факту конкретной установки.

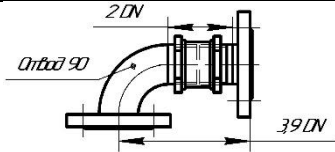
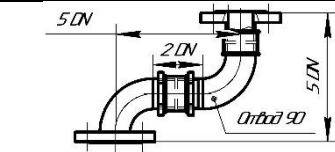
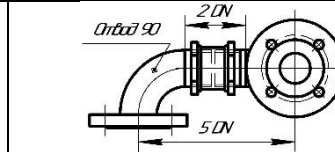
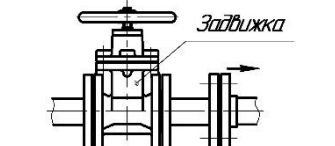
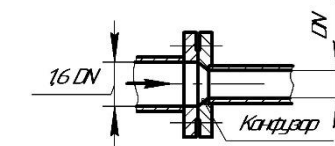
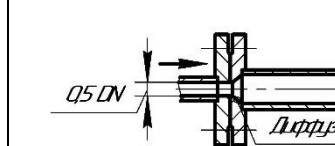
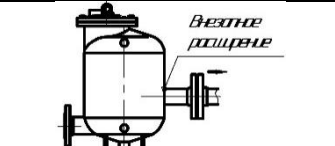
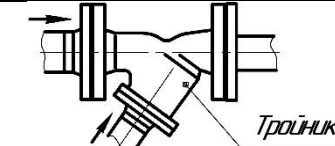
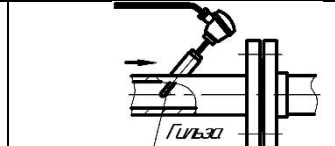
Для первичного преобразователя типа —наклонный диаметр‖ формула метода дополнена множителем $q = d/D$, представляющим отношение диаметров пьезоактивного материала к трубопроводу и учитывающим уменьшение K_g из-за расчета не вдоль траектории зондирования, а с учетом диаметра УЗ луча.

При фиксированном наборе местных сопротивлений создается эмпирическая библиотека файлов расчета K_g , идентифицируемых условным номером N , который определяет номер начальной кривой IC и фактор закрутки SF при известных числах Re и длинах прямых участков L_{ent} :

$$K_g = K_{gb} + q \cdot \frac{(1 - K_{gb}) * \text{Max} \left[0, IC - \frac{L_{ent}}{[SF * (4,343 * \ln(Re) + 4e - 14)] * 10} \right]}{10}.$$

Начальные кривые в наборе из 10 местных сопротивлений (см. таблицу) имеют ход, аналогичный базовому коэффициенту K_{gb} , и смещены относительно него в сторону увеличения на $IC \cdot [(1 - K_{gb})/10]$, поскольку любая деформация потока приводит только к возрастанию текущего значения K_g .

Таблица – Набор выбранных местных сопротивлений на входе УЗР

		
$N=1$. Одно колено 90° ; $IC=8$; $SF=1,50$	$N=2$. Два колена 90° в одной плоскости; $IC=12$; $SF=2,50$	$N=3$. Два колена 90° в разных плоскостях; $IC=10$; $SF=1,25$
		
$N=4$. Задвижка вверх по течению; $IC=5$; $SF=1,10$	$N=5$. Расширение диаметра трубы; $IC=3$; $SF=1,00$	$N=6$. Сужение диаметра трубы; $IC=8$; $SF=1,00$
		
$N=7$. Нормальный вход; $IC=7$; $SF=3,00$	$N=8$. Разделение потока на входе; $IC=7$; $SF=1,10$	$N=9$. Интрузивный элемент; $IC=3$; $SF=1,05$

Примечание. – Для прямого входного участка свыше 45 DN: $N=0$, $IC=1$, $SF=1$

Для облегчения процедуры эмпирического определения калибровочных коэффициентов на поверочной установке в процессе подбора значений IC и SF был реализован калькулятор K_g в виде m-файла в среде MatLab. На рис.11 в качестве примера приведены расчет хода базовой кривой K_{gb} и K_g при воздействии двух колен 90° в разных плоскостях ($N=3$) и сужения сечения на входе ($N=6$) при длине прямых участков $L_{ent}=5$.

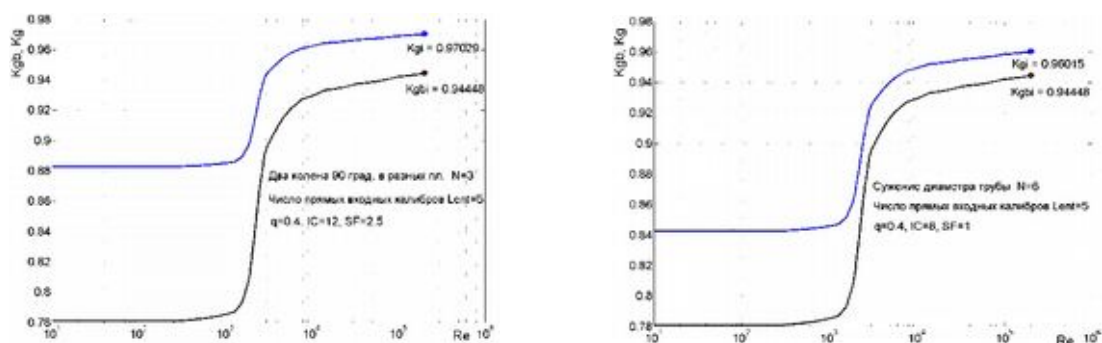


Рисунок 11. Зависимости $K_g(Re)$ при разных местных сопротивлениях

Значения K_g сопоставлялись с ходом базового гидродинамического коэффициента K_{gb} и оценивались расхождения, например, в i -ой точке

$Re_i = 2e+5$. Они составили 1,66 и 2,73 %, соответственно, что определяло увеличение относительной погрешности УЗР.

После реализации алгоритма в исполняемом коде микроконтроллера УЗР были проведены расширенные натурные испытания с DN 20 – 65 на водных потоках в интервале температур от 10 до 55 °С, с набором местных сопротивлений по таблице для диапазона L_{ent} от 3 до 25. После калибровки на прямом участке 50DN воспроизводилась исследуемая деформирующая структура, характерные признаки N , L_{ent} и d , которой вводились с клавиатуры вычислителя или по линии RS-485.

Результаты калибровок в одном из видов испытаний приведены на рис. 12 и 13.

Два колена 90° в одной плоскости, DN 50

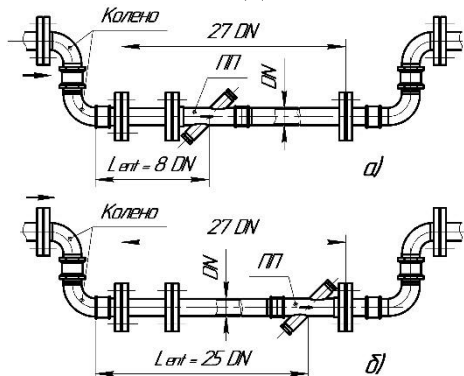


Рис. 12. Длины входных участков:
а) $L_{ent} = 8 \text{ DN}$; б) $L_{ent} = 25 \text{ DN}$

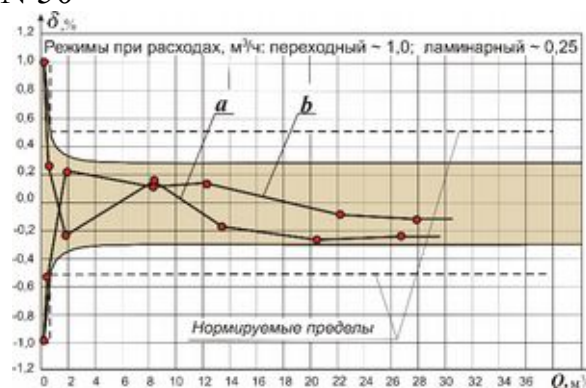


Рис. 13. Результаты калибровок:
а) $L_{ent} = 8 \text{ DN}$; б) $L_{ent} = 25 \text{ DN}$

Комплекс испытаний с применением описанного алгоритма, проведенный в диапазоне изменения $\lg(Re)$ от 2,2 до 5,7, показал существенное снижение погрешности и увеличение кратности диапазона измерений до 150, то есть поддержание работоспособности на всех режимах течений – ламинарном, переходном и турбулентном.

Набор характерных местных сопротивлений на входе можно увеличить свыше 10 или дополнить его группами из двух-трех за счет уплотнения расстановки начальных кривых IC , изменения и подбора соответствующих коэффициентов в алгоритме.

Несмотря на кропотливость эмпирического подбора коэффициентов для каждого местного сопротивления в диапазоне расходов, метод прост в использовании и сводится к вводу N и L_{ent} по факту установки УЗР, однако, допускает возможность преднамеренной или непреднамеренной ошибки ввода данных.

Для устранения субъективного фактора перспективным является использование корреляции между $\sigma_{\Delta t}$ разности времени распространения Δt и текущим значением гидродинамического коэффициента K_g (рис. 3 и 10)

при нормировании шумовых характеристик на неподвижной среде и максимальном расходе как базовых значений. Такой подход не требует идентификации местных сопротивлений и прямых участков.

5 Метрологический самоконтроль

При эксплуатации УЗР в условиях, не допускающих демонтаж для поверки, проводится метрологический самоконтроль на неподвижной среде. Процедура предусматривает имитацию фиксированных точек расхода, дольных от максимального Q_{max} , за счет искусственного введения соответствующих разностных интервалов времени Δt . Самодиагностика позволяет оценить смещение аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности (на —нулевом расходе и в имитируемых точках) относительно первичной поверки, причем контролю подвергаются все составные части УЗР, так как при имитации используются реально измеренные временные интервалы вниз и вверх по потоку.

К недостаткам относятся ограничение температурного диапазона измеряемой среды при самоконтроле из-за температурной, барической и других зависимостей скорости звука и недопустимость использования жидкостей-заменителей.

Для преодоления обозначенных ограничений предлагается следующая процедура.

При выпуске из производства, используя функцию преобразования, рассчитывают и вводят в память вычислителя разностные интервалы времени

$$\Delta t_1^{20}; \Delta t_2^{20}; \Delta t_3^{20}$$

и т.д., соответствующие нескольким точкам диапазона расхода в нормальных условиях. Запоминают скорость звука c_0^{20} , при которой проводились расчеты.

При самодиагностике вычислитель рассчитывает значение скорости звука c :

$$c = \left(\frac{1}{t_{up}} + \frac{1}{t_{dn}} \right) \cdot \frac{L}{2} \text{ м/с.}$$

Коррекция разностных временных интервалов при изменении параметров среды (состава, температуры, давления) на месте эксплуатации проводится микроконтроллером вычислителя для имитируемых точек расхода автоматически, по формуле:

$$\Delta t_i = \Delta t_i^{20} \cdot \frac{(c_0^{20})^2}{c^2}.$$

Используя реальные значения времени распространения УЗК в неподвижной среде t_{up} и t_{dn} , вычислитель определяет интервалы времени для каждой точки расхода

$$t_{up} - \Delta t_i/2; \quad t_{dn} + \Delta t_i/2.$$

При вызове оператором имитируемой точки расхода, вычисленные интервалы подставляются в функцию преобразования.

6 Заключение

Для оптимизации характеристик УЗР используют поточное измерение (вычисление) таких физических величин как температура, скорость звука, кинематическая вязкость, а также статистические характеристики разностного времени распространения УЗ колебаний по потоку и против него.

Литература

1. Weber F.J., Johari H. and Durgin W.W. ASME FEDSM. 2001. вып. FEDSM2001-18038. С.85-91.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ОСТРОЙ ТОКСИЧНОСТИ ВОДЫ

Любимцев В.А.¹, Холодкевич С.В.^{1,2}, Дружинин И.И.³

¹*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,*

²*Санкт-Петербургский государственный университет*

³*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»*

lyubimcev55@mail.ru

Использование животных в качестве "живых датчиков" (биодатчиков) находит в последнее время всё большее применение. Это обусловлено их высокой и разносторонней чувствительностью к различным факторам внешней среды, обеспечивающей выживание и конкурентоспособность как индивидуальных особей, так и вида в целом. Для контроля качества воды могут использоваться различные виды животных, для которых вода является естественной средой обитания, например, рыбы и малоподвижные беспозвоночные гидробионты – моллюски или раки.

В случае ухудшения качества воды биодатчики изменяют параметры своей жизнедеятельности, которые регистрируются и анализируются специализированной измерительной аппаратурой. Для рыб такими параметрами являются параметры, характеризующие их (двигательную активность), для моллюсков или раков – параметры сердечной деятельности (кардиоактивность). Совокупность биодатчиков и соответствующей измерительной аппаратуры может быть названа биоэлектронной системой (БЭС) [1].

Основным преимуществом использования биодатчиков в БЭС является их чувствительность к широкому кругу токсических химических соединений, действующих на клеточном уровне, и однотипный характер реакции на начальной стадии токсического поражения – увеличение частоты сердечных сокращений или частоты дыхания.

Это позволяет обеспечивать диагностику острой токсичности воды, то есть обнаружение в реальном времени случаев быстрого нарастания токсичности воды до уровня, опасного даже при ее разовом использовании. С этой целью БЭС устанавливаются на водозаборных пунктах систем централизованного водоснабжения населенных пунктов [2-4].

Основной вопрос, возникающий при использовании БЭС, это принципы нормирования ее метрологических характеристик и метрологического обеспечения. Если для электронной части БЭС этот вопрос может быть решен традиционными средствами метрологии, то задача нормирования метрологических характеристик биодатчиков, как

правило, не ставилась. Соответственно биодатчики формально не могли быть включены в измерительную систему как ее составные части. В данном случае они являются преобразователем некоторой измеряемой величины, эмпирически связанной с оценкой качества воды.

Тем не менее, очевидно, что для успешного функционирования БЭС в равной степени необходимы как исправно работающая электронная часть, так и «работоспособная» совокупность биодатчиков, отобранных с этой целью по определенным критериям.

В качестве примера решения вопроса о метрологическом обеспечении БЭС может быть рассмотрена многоканальная система «БиоАргус», разработанная в научно-исследовательском центре экологической безопасности РАН (Санкт-Петербург). Система состоит из 6-8 однотипных измерительных каналов (ИК), в которых в качестве биодатчиков используются речные раки, размещенные в индивидуальных аквариумах, а в качестве измеряемой величины – частота сердечных сокращений (ЧСС) раков.

Принцип действия ИК системы основан на лазерном облучении наружной поверхности речного рака в зоне локализации его сердца с последующей регистрацией потока излучения, рассеянного в обратном направлении.

Структурная схема ИК и схема формирования оптического сигнала, модулируемого сокращением сердца рака, приведены на рис. 1. ИК системы содержит лазерный волоконно-оптический преобразователь пульсаций (ЛВОПП) 1, гибкий волоконно-оптический зонд, состоящий из излучающего 2 и приемного 5 волокон, держатель волоконно-оптического зонда 7 и блок обработки сигнала 6. Держатель 7 фиксируется на панцире 3 рака. Гибкость и легкость волоконно-оптического зонда обеспечивают свободу перемещений рака.

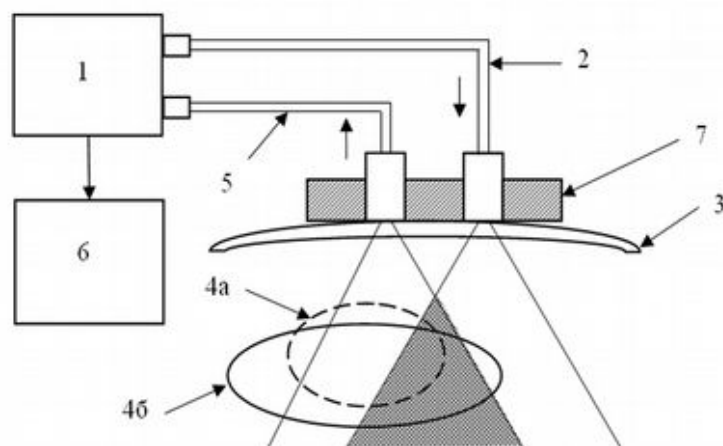


Рисунок 1. Структурная схема ИК БЭС «БиоАргус»

В качестве источника оптического излучения используется полупроводниковый лазер, расположенный в ЛВОПП. От выходного оптического разъема ЛВОПП излучение передается к поверхности рака по излучающему волокну 2. При сокращениях сердца рака (4а и 4б – сердце рака в период систолы и диастолы) происходит изменение оптических свойств сердечной сумки и тканей, находящихся между сердцем и наружной поверхностью рака. Вследствие этого происходит циклическое изменение рассеянного потока излучения. Часть этого рассеянного потока попадает в приемное волокно 5, по которому поступает на входной оптический разъем ЛВОПП.

В ЛВОПП с помощью фотоприемника оптический сигнал преобразуется в напряжение, из которого выделяется переменная составляющая, несущая информацию о циклических сокращениях сердца рака. В блоке 6 напряжение преобразуется в цифровой код, который обрабатывается по заданной программе с целью определения ЧСС, статистических характеристик и других параметров, связанных с ЧСС, выработки сигналов о токсическом загрязнении воды, сигналов о технической и метрологической исправности системы.

Значение ЧСС вычисляется по выборке из 100 последовательных кардиоинтервалов как их среднее значение. Для этой же выборки вычисляется среднее квадратичное отклонение (SD) результатов измерений относительно этого среднего значения. Значения ЧСС и SD обновляются с заданной периодичностью.

Основной принцип, заложенный в алгоритм работы системы – выявление значимых, превышающих предел, свидетельствующий о возможном загрязнении воды, отклонений ЧСС раков от значений, принятых в качестве нормальных. При этом соответствующий сигнал формируется только в том случае, если эти отклонения были зафиксированы в течение заданного интервала времени у большинства используемых раков, что уменьшает вероятность выдачи ложного сигнала опасности.

Этот принцип иллюстрирует рис. 2, на котором показана в качестве примера характерная динамика изменения ЧСС для рака при температуре воды 18 °С в условиях покоя (участок от 15:40 до 16:44). Стрелкой 1 отмечен момент времени дозирования в воду модельного загрязнителя (20 г/л NaCl). Указаны уровни средних значений ЧСС(покой), величина SD – для «покоя» и значение ЧСС(стресс) – сразу после воздействия загрязнителя. Для уверенного различия состояний покоя и стресса разность ЧСС(стресс) и ЧСС(покой) должна существенно превышать суммарные случайные отклонения этих величин от их средних значений.

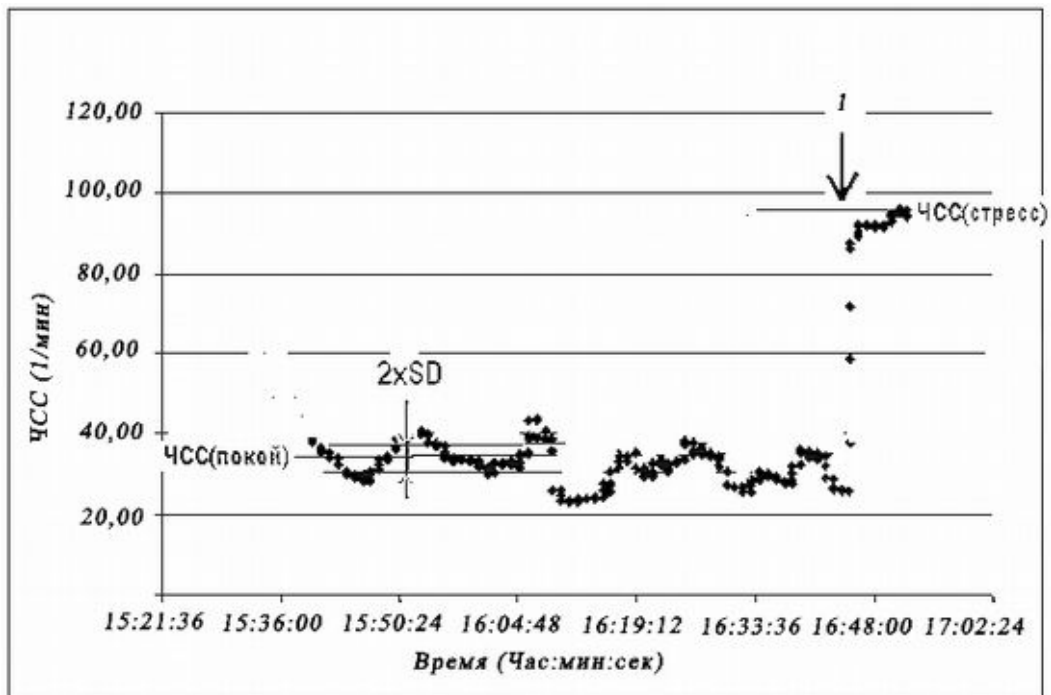


Рисунок 2. Характерная динамика изменения ЧСС рака при стрессе

Следует отметить, что использование этого алгоритма будет давать требуемые результаты только в том случае, если при его реализации будут учтены как общие особенности физиологии раков, так и индивидуальные характеристики кардиоактивности каждого животного.

В первую очередь, из результатов, используемых для контроля качества воды, должны быть исключены результаты измерений ЧСС, полученных в период «ночной» активности раков, связанной с поиском пищи, так как в этот период ЧСС раков существенно увеличивается (по сравнению с состоянием покоя в "дневное" время) при отсутствии каких-либо загрязнений воды. В системе "БиоАргус" чередование периодов "день" – "ночь" обеспечивается искусственным путем за счет включения и выключения ламп, обеспечивающих освещение изолированных от внешнего света аквариумов с раками.

Перед использованием раков в качестве биодатчиков они проходят отбор по двум основным критериям:

а) по параметрам, обеспечивающим примерную физиологическую однородность используемой совокупности раков – возрасту, длине, массе, равномерности окраски панциря, наличию активности;

б) по достаточности уровня сигнала, возникающего при циклических сокращениях сердца и зависящего от особенностей взаимного расположения и оптических свойств сердечной сумки и поверхностных тканей рака.

Практика показывает, что в среднем около 30 % исходной

совокупности раков удовлетворяет приведенным критериям.

После отбора выбранные раки помещаются не менее чем на сутки в отдельные аквариумы для получения данных об индивидуальных особенностях их кардиоактивности. Обработка данных проводится как автоматически, так и посредством анализа операторами, обеспечивающими настройку системы перед вводом ее в эксплуатацию. По окончании обработки для каждого ИК (каждого биодатчика) устанавливаются индивидуальные значения ЧСС(покой) и SD(покой) и допускаемые отклонения от этих значений, соответствующие нормальному качеству воды и метрологической исправности канала.

Следует отметить, что в дальнейшем эти значения автоматически корректируются в процессе эксплуатации системы, так как статистические данные о параметрах кардиоактивности непрерывно обновляются.

Дополнительно осуществляется автоматическая проверка наличия правильной периодичности суточной активности раков (наличие так называемого циркадного ритма: выраженного периода изменения ЧСС, обусловленного периодичностью освещенности «день» – «ночь») с целью подтверждения работоспособности биодатчика [5–7]: подтверждения того, что рак здоров и может продолжать использоваться для контроля качества воды [8]. Эта проверка может рассматриваться как метрологический самоконтроль применительно к биодатчикам.

Помимо перечисленных выше процедур, достоверность результатов измерений ЧСС обеспечивается применением дополнительных средств, обеспечивающих проверку параметров системы «БиоАргус» на этапе подготовки ее к использованию и в процессе эксплуатации.

Конструкцией ЛВОПП предусмотрена возможность, за счет нажатия кнопки подачи тестового сигнала, изменять силу тока, протекающего через лазерный излучатель. В момент нажатия кнопки в регистрируемом на выходе ЛВОПП-4 сигнале наблюдается импульс с крутым передним фронтом. Изменение тока подобрано таким образом, что амплитуда этого импульса приблизительно соответствует амплитуде сигнала, возникающего от сокращений сердца «среднестатистического» рака при измерении ЧСС «среднестатистическим» образцом ЛВОПП. С другой стороны, эта амплитуда пропорциональна среднему значению потока излучения лазера, произведению коэффициентов пропускания обоих волокон волоконно-оптического зонда и рассеивающей способности материала, находящегося в зоне установки волоконно-оптического зонда. В роли такого материала могут выступать как поверхностные ткани рака, так и пластины имитаторов этих тканей. Зависимость амплитуды импульса, возникающего при нажатии кнопки подачи тестового сигнала, от перечисленных выше параметров позволяет получить интегральную оценку состояния лазерного излучателя, волоконно-оптического зонда, электронной части ЛВОПП и

соответствующего измерительного канала в целом.

Исследования, проведенные с использованием более 100 раков, показали, что рассеянное отражение от поверхностных тканей рака хорошо воспроизводится при использовании в качестве имитатора этих тканей пластины из фторопласта-4 толщиной 4 мм. Таким образом, при установке держателя оптического зонда на пластину-имитатор вместо панциря рака, сигнал, поступающий в приемное волокно, соответствует сигналу, характерному для среднестатистического речного рака при отсутствии сокращений его сердца. Переменная составляющая сигнала в этом случае определяется оптическими и электронными шумами всех элементов, входящих в ИК, что позволяет количественно оценивать уровень этих шумов и контролировать этот уровень впоследствии в процессе эксплуатации. Использование кнопки подачи тестового сигнала позволяет сопоставлять уровень указанных шумов с ожидаемым уровнем полезного сигнала. В настоящее время эта процедура осуществляется в ручном режиме, но в перспективе предполагается ее автоматизировать, что позволит обеспечить периодический метрологический самоконтроль состояния оптоэлектронной части БЭС.

Использование пластины-имитатора позволяет получать интегральную оценку состояния соответствующего ИК, но не позволяет осуществлять для этого канала оценку погрешности измерений ЧСС. Для решения этой задачи используется устройство имитации пульсаций (рис. 3) – имитатор оптического сигнала, возникающего при сокращениях сердца рака.

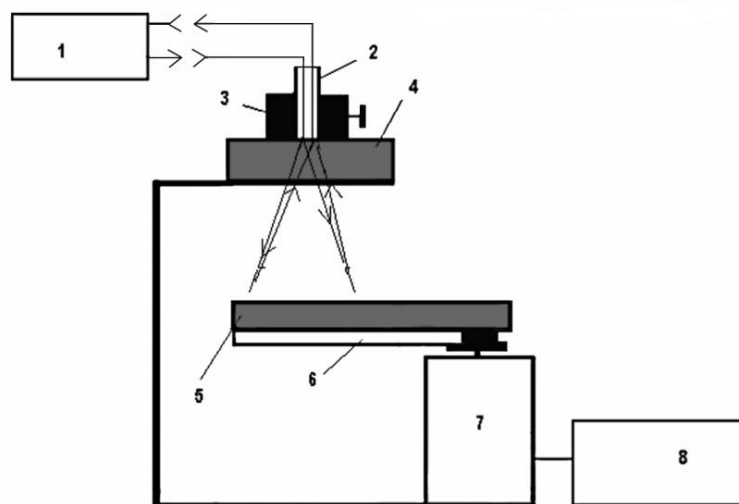


Рисунок 3. Устройство имитации пульсаций

В устройство входят элементы проверяемого ИК (ЛВОПП 1, оптический зонд 2, держатель оптического зонда 3) и элементы имитации сигнала (пластина-имитатор 4, пластина-модулятор 5, опорный диск 6, двигатель 7, блок управления двигателем 8).

Пластина 4 имитирует оптический сигнал, возникающий при отсутствии у рака сердечных сокращений. Для создания переменной составляющей потока излучения, аналогичной оптическому сигналу, возникающему при сокращении сердца рака, используется фторопластовая пластина 5 в виде сектора. Она закрепляется на опорном диске 6, прозрачном для лазерного излучения и насаженном на валу двигателя 7, который совместно с блоком управления 8 обеспечивает частоту вращения диска 6 с требуемой точностью. Конструкция устройства имитации пульсаций позволяет обеспечивать заданное расстояние между пластинами 4 и 5.

При вращении диска 6 в поток излучения, прошедший через пластину 4, попадают попеременно участок диска 6, пропускающий поток излучения, и пластина 5, рассеивающая его в обратном направлении. Рассеянный в обратном направлении поток проходит через пластину 3 и попадает в приемное волокно оптического зонда, формируя модулированный оптический сигнал.

Анализ источников погрешности ИК системы «БиоАргус» показал, что доминирующей составляющей этой погрешности является погрешность, обусловленная влиянием шумов оптико-электронного измерительного тракта.

В системе "БиоАргус" применены многомодовые оптические волокна, вследствие чего основным источником шума в ИК является оптический шум, обусловленный спонтанной подвижностью модовой структуры выходного светового потока из излучающего оптического волокна и неидеальностью усреднения этой неоднородности вследствие микроскопических неоднородностей поверхностного слоя панциря рака. Измерения показывают, что при отсутствии помехи, амплитуда оптического шума превышает амплитуду электронных шумов ИК в 6 - 10 раз.

С использованием устройства имитации пульсаций были получены следующие оценки относительной погрешности ИК системы "БиоАргус" при измерении ЧСС:

в диапазоне от 12 до 120 ударов/мин не более ± 8 % при отношении "сигнал/шум" не менее 5;

в диапазоне от 30 до 120 ударов/мин не более ± 5 % при отношении "сигнал/шум" не менее 2,6.

Диапазон от 30 до 120 ударов/мин является наиболее актуальным при использовании речных раков в качестве биодатчиков (см. рис. 2). Отношение ЧСС(стресс) к ЧСС(покой), как правило, не менее 2, поэтому приведенные значения погрешности позволяют надежно различить состояния покоя и стресса. Рисунок 2 наглядно иллюстрирует также особенность кардиоактивности раков, заключающуюся в том, что значение

SD понижается при повышении ЧСС. На этой особенности основана процедура метрологического самоконтроля ИК системы, использующая принцип информационной избыточности [9, 10]. Действительно, зафиксировав значение SD, характерное для состояния покоя рака и исправного ИК, следует далее ожидать относительной стабильности этого значения, либо же его уменьшения при увеличении ЧСС. Если в том же диапазоне ЧСС происходит заметное увеличение SD, то это может быть вызвано уменьшением отношения "сигнал/шум", приводящим к увеличению, в первую очередь, случайной погрешности измерений. При этом не важно, происходит ли это из-за уменьшения полезного сигнала (например, из-за уменьшения излучательной способности лазера, плохих контактов или загрязнения в оптической системе, изменения положения сердца рака или оптических свойств панциря) или из-за увеличения уровня шумов (например, из-за неисправности оптической или электронной части ИК, помех).

Заключение.

Вопросы, связанные с метрологическим обеспечением БЭС "БиоАргус", рассмотренные выше, характерны и для других биоэлектронных систем. Для БЭС "БиоАргус" необходимо не только иметь техническую возможность проводить оценки эффективности биодатчиков и контроль их работоспособности в процессе эксплуатации, но также имитировать характерный для этих биодатчиков оптический сигнал при определении метрологических характеристик оптоэлектронной части БЭС. Возможен вариант нормирования метрологических характеристик биодатчиков с включением их в состав системы (например, посредством установления функциональной связи между количеством модельного загрязнителя и параметрами кардиоактивности), но в этом варианте не учитывается основное преимущество биодатчиков – реакция на интегральное качество воды. Перспективным представляется использование сочетания обоих способов нормирования метрологических характеристик БЭС – с нормированием реакции биодатчиков на воздействие модельного загрязнителя (или их совокупности) и с нормированием характеристик остальной части БЭС при их взаимодействии с имитаторами биодатчиков.

Литература

- 1 Холодкевич С.В., Иванов А.В., Корниенко Е.Л., Куракин А.С., Любимцев В.А. Биоэлектронный мониторинг поверхностных вод // Мир измерений. 2011. № 10. С. 6–13.

- 2 Махнев П.П., Бекренев А.В., Бакланов В.С., Холодкевич С.В., Иванов А.В., Донченко В.К., Куракин А.С., Корниенко Е.Л., Федотов В.П. Система обеспечения безопасности водоснабжения на водопроводных станциях Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 9. ч. 1. С. 6–15.
- 3 Кармазинов Ф.В., Кинебас А.К., Бекренев А.В., Сулейманова Э.К., Холодкевич С.В., Иванов А.В. Опыт эксплуатации систем биомониторинга качества воды в Санкт-Петербурге // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. № 7. ч. 2. С. 2–6.
- 4 Kholodkevich S.V., Ivanov A.V., Kurakin A.S., Kornienko E.L., Fedotov V.P. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations // Journal of Environmental Bioindicators. 2008. V. 3. № 1, P. 23–34.
- 5 Кинебас А.К., Нефедова Е.Д., Гвоздев В.А., Холодкевич С.В., Иванов А.В., Куракин А.С., Корниенко Е.Л. Повышение эффективности и надежности биоэлектронных систем станций производственного биологического мониторинга качества воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 1. С. 20–27.
- 6 Иванов А.В., Холодкевич С.В., Куракин А.С. Самодиагностика биоэлектронных систем мониторинга окружающей среды в реальном времени // Системы контроля окружающей среды. Сборник научных трудов, НАН Украины, МГИ. – Севастополь. – 2012. – Выпуск 17. С. 26–31.
- 7 Kurakin A., Kholodkevich S., Ivanov A. Algorithm Development for the Self-Diagnosis Applied to the Bioelectronic Systems of the Real-Time Environmental Monitoring // Proceedings – 2015 4rd Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO. IEEE conference publications ISBN 978-9-9409-4364-6, Budva, Montenegro, 2015. P. 357–360.
- 8 Udalova G.P., Kholodkevich S.V., Fedotov V.P., Kornienko E.L. Changes in heart rate and circadian cardiac rhythm as physiological biomarkers for estimation of functional state of crayfish *Pontastacus leptodactylus* Esch. upon acidification of the environment // Inland Water Biology. 2012 V. 5. № 1. P. 119–127.
- 9 ГОСТ Р 8.734-2011. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.
- 10 Taymanov R., Sapozhnikova K., Danilova I., Druzhinin I. Multy-channel intelligent measuring systems // XXI IMEKO World Congress «Measurement in Research and Industry». Prague, Czech Republic, 2015, 5 p.

ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС – МЕЧТА ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

Рембеза С.И.¹, Кошелева Н.Н.¹, Рембеза Е.С.², Свистова Т.В.¹

¹ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет,

²ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет, г. Воронеж

rembeza@yandex.ru

Анализируются возможности создания искусственного органа обоняния – Электронного Носа (ЭН). Описаны основные методы распознавания и контроля различных газов, базирующиеся на их характерных физико-химических свойствах. Рассмотрена возможная структура ЭН, а также реальность изготовления всех его компонентов. Со временем ЭН может заменить использование животных в сфере распознавания запахов наркотиков, взрывчатых веществ и других объектов.

Технический прогресс человечества обусловлен развитием новых технологий (микроэлектроника, информационные технологии и др.), следствием чего являются миниатюризация измерительной техники и расширение ее информационных возможностей. С большой пользой удалось воспроизвести и даже расширить мироощущения человека через аналоги таких органов чувств как зрение, слух, осязание и обоняние с помощью специальных приборов. В области зрения мы расширили свое восприятие природы от жесткого рентгеновского излучения до радиоволн, в области слуха – от ультразвука до инфразвука, однако в области обоняния наши успехи не столь значительны.

При восприятии запахов мы пока не можем полностью заменить приборами наших «братьев меньших» – собак и других животных, помогающих в поисках по запаху наркотиков, взрывчатых веществ, людей и других объектов. Однако, их использование очень дорого в связи с необходимостью длительного обучения, содержания и небольшого срока службы животных. Поэтому не вызывает сомнений необходимость разработки искусственного органа обоняния – Электронного Носа (ЭН). Правда, при его разработке мы не можем использовать миллионы рецепторов-датчиков как у живых существ, но создать прибор узкого назначения, например, для анализа состава газов в дыме котельных или для контроля запаха определенных видов пищевых продуктов – в настоящее время вполне решаемая задача. Кроме того, животные чувствуют только те газы, молекулы которых растворяются в слизистой оболочке носа, а ЭН будет определять газы, недоступные обонянию, например, собак.

В биологической обонятельной системе имеется набор первичных преобразователей – химических рецепторов, генерирующих сигналы в присутствии определенных газов, которые проходят первичную обработку

(усиливаются, фильтруются, кодируются) нейронами обонятельной луковицы. Затем газовая смесь анализируется и идентифицируется нейронной сетью головного мозга путем сравнения образа газа с имеющимися калибровочными данными, полученными при обучении нейронов.

В соответствии со структурой обонятельной системы электронный прибор типа ЭН должен содержать набор сенсоров газов, устройство их первичной обработки и более сложную структуру для распознавания мультисенсорного сигнала как многомерного образа определенного запаха (рис. 1) [1]. В современных мультисенсорных устройствах используются устройства с разными или одинаковыми принципами распознавания запахов.

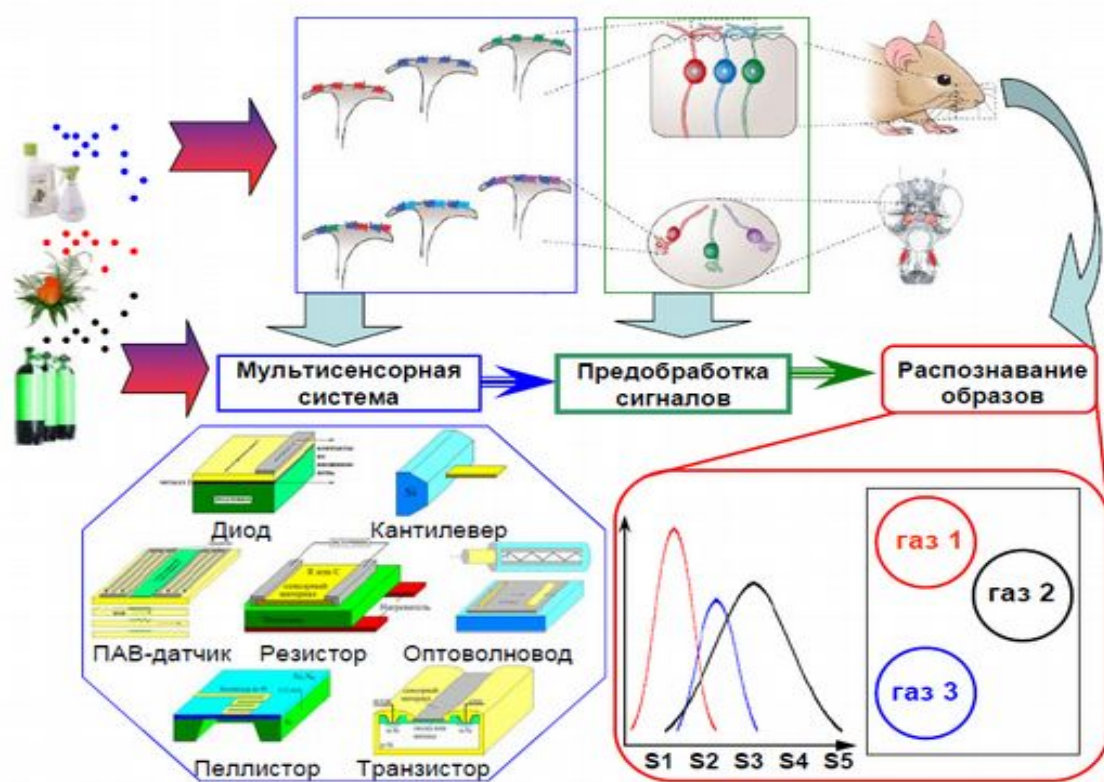


Рисунок 1. Концепция устройства прибора Электронный Нос [1].

Для обнаружения различных газов в воздушной среде используются различные физические и химические эффекты, возникающие при взаимодействии конкретного газа с сенсорным элементом измерительного прибора. При взаимодействии с газом сенсорный элемент может изменять свою теплоотдачу, температуру горения газа, электропроводность, электрический сигнал или величину оптического поглощения. Датчик газа содержит сенсорный элемент и электронную схему преобразования, усиления и индикации сигнала. Датчики газов характеризуются

чувствительностью к концентрации данного газа в воздухе (от долей ppm – одна молекула газа на 10^6 молекул воздуха, до объемных процентов 1 %об. = 10^4 ppm), а также селективностью – способностью отдельно или одновременно измерять несколько различных газов [2].

В настоящее время область применения датчиков газов – это контроль утечек в системах взрывобезопасности бытового и природного газа, в основном состоящего из метана и пропана; контроль содержания алкоголя в выдыхаемом водителем воздухе и контроль содержания окиси углерода в выхлопе автомобиля; контроль содержания метана в шахте, а также в ряде других применений. С помощью стационарных, портативных, автономных и простых в эксплуатации датчиков токсичных и взрывоопасных газов спасены миллионы жизней во всем мире.

Кратко рассмотрим принцип работы наиболее распространенных сенсорных элементов датчиков газов.

Топливная, или электрохимическая ячейка используется для контроля содержания кислорода или различных горючих газов. Элемент содержит два электрода и специальный электролит. В присутствии контролируемого газа между электродами возникает электрический заряд, величина которого пропорциональна концентрации измеряемого газа. Например, фирма Dräger выпускает электрохимические сенсоры для контроля концентраций кислорода и более 100 токсичных газов [3]. Широкому применению электрохимических сенсоров газов в мультисенсорных системах препятствуют их габаритные размеры и ограниченный срок службы.

Термохимические, или каталитические сенсоры (пеллисторы) используются для контроля горючих газов. Пеллистор (от английского pellet – пиллюля, и resistor – сопротивление) представляет собой две платиновые спирали с керамической оболочкой, одна из которых пропитана катализатором (соли Pt, Pd и др.). При помещении пеллистора в поток горючего газа и нагрев в воздухе двух спиралей, одна из которых для сравнения находится в воздухе, а вторая помещена в контролируемый газ, сгорающий на спирали с катализатором. Температура спирали с катализатором и ее электросопротивление возрастают пропорционально концентрации контролируемого газа [4]. Пеллисторные сенсоры находят применение в многокомпонентных газоанализаторах при контроле, например, состава котельных газов или других смесей газов [5].

Наиболее распространенным и универсальным сенсором газов является металлооксидный (полупроводниковый) сенсор, у которого при адсорбции молекул газа на поверхности изменяется величина электросопротивления пропорционально концентрации газа в воздухе [2]. Наибольшей чувствительностью к газам эти датчики обладают в интервале температур 300–500 °С, который можно изменить за счет использования

примесей-катализаторов. Изменение электросопротивления поликристаллического металлооксида (SnO_2 , ZnO , TiO_2 и др.) при взаимодействии с газами, обусловлено реакцией газов с адсорбированным на поверхности кислородом, с изменением его зарядового состояния и потенциального рельефа для движения электронов через образец.

Запатентованный Тагучи (Япония) в начале 60-х годов XX века толстопленочный датчик газов на основе SnO_2 до сих пор выпускается и успешно реализуется фирмой Figaro Ltd в Японии и в ее филиалах в других странах [6]. Металлооксидные полупроводники в датчиках газов можно использовать в виде тонкопленочных структур и в этом случае технология их производства хорошо сочетается с технологией изготовления изделий микроэлектроники. Например, изготовленный по микроэлектронной технологии на окисленном кремнии кристалл датчика газов размером 1 мм^2 имеет тонкопленочный платиновый нагреватель и два тонкопленочных (на основе SnO_2) сенсора [7]. Микроэлектронная технология позволяет не только изготавливать отдельные сенсоры, но и производить целые линейки из нескольких сенсоров, удобные для использования в газоанализаторах для контроля нескольких газов. С помощью легирования металлооксидных пленок различными примесями можно в широких пределах регулировать чувствительность и селективность сенсорных слоев к различным газам. Поэтому металлооксидные полупроводниковые сенсоры газов являются перспективным объектом для использования в системах ЭН.

Оптические методы распознавания газов основаны на анализе спектров инфракрасного (ИК) поглощения света, при его прохождении через анализируемый газ, которые обусловлены колебательными процессами атомов в молекулах газов. Поглощение ИК излучения будет наблюдаться, когда длина волны излучения совпадает с собственной частотой колебаний молекул. Метод удобен для контроля метана (CH_4) и других молекул (H_2S , NO , NO_2 , CO , CO_2), атомы которых имеют энергию колебаний в диапазоне длин волн $3,1\text{--}5,5 \text{ мкм}$, в котором отсутствуют линии поглощения воды [8]. Селективность датчика обеспечивается применением специальных оптических фильтров.

Основные преимущества ИК-датчиков газа: работа при комнатной температуре и взрывобезопасность, возможность определения концентрации газов в диапазоне от 0 до 100%, высокая точность измерений, хорошая чувствительность и селективность к разным газам. К недостаткам можно отнести сравнительно высокую цену ИК-датчиков по сравнению с пеллисторами и полупроводниковыми металлооксидными датчиками.

Первым этапом в разработке ЭН можно считать изготовление и выпуск газоанализаторов для контроля дымовых газов в промышленности. В настоящее время имеются разнообразные газоанализаторы

отечественного и зарубежного производства. Например, предлагаются [9] анализаторы дымовых газов систем отопления и промышленных газов серии Testo, позволяющие контролировать до 8 основных дымовых газов, а также их температуру, давление и скорость потока. При этом используются сенсоры на основе ИК-поглощения, электрохимических ячеек, теплообмена и другие.

Имеются образцы ЭН для анализа качества пищевых продуктов по их запаху [10]. Анализатор содержит 10 различных сенсоров на основе металлооксидных полупроводников, а также систему обработки сигналов по специальным программам. ЭН используется для контроля качества самых разнообразных продуктов: меда, кофе, сыра, молока, масла, разнообразных соков, фруктов, мяса, рыбы и т.п. Во многих случаях использование ЭН дает выигрыш по стоимости и по времени по сравнению с традиционными химическими методами анализа качества пищевых продуктов.

Будущее Электронного Носа будет зависеть не только от существующих методов газового анализа, но и от разработки принципиально новых методов распознавания газов, основанных на таких физических явлениях как дифференциальная спектроскопия подвижности ионов в электрическом поле [11] или поверхностно-стимулированная Рамановская спектроскопия [12]. Будут также совершенствоваться методы обработки и анализа сигналов датчиков газов. Например, на основе обучающихся нейронных сетей и на других новых принципах. Поэтому у Электронного Носа есть не только многообещающее настоящее, но и перспективное будущее.

Литература

- 1 Сысоев В.В. Мультисенсорные системы распознавания газов на основе металло-оксидных тонких пленок и наноструктур. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Саратов. 2009. С.36.
- 2 Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение // Москва. 1989. С.196.
- 3 www.draeger.com
- 4 http://gasdetection.ru/publ/tekhnologii/termokataliticheskie_datchiki_g_atanalizatorov_konstrukuja_i_princip_raboty/2-1-0-5
- 5 Лажков А.В. О влиянии неравномерного нагрева линейки термokatалитических датчиков на распознавание газовых смесей. Вестник ССТУ. Физика, радиотехника, электроника. 2013. № 1. С.39-43.
- 6 Figaro: Датчики газов. М. Изд. Дом «Додэка – XXI». 2002. С.64.

- 7 Рембеза С.И., Буслов В.А., Викин Г.А., Рембеза Е.С. Твердотельный интегральный датчик газов. Патент РФ. № 2257567. 19.05.2004.
- 8 Черненко А. Инфракрасные датчики газа SGX: путь к безопасности и энергоэффективности. Компоненты и технологии. 2015. № 7. С.40-42.
- 9 www.test.spb.ru
- 10 Benedetti S., Buratti S., Spinardi A., Mannino S, Mignani I. Electronic nose as a non-destructive tool to characterize peach cultivars and to monitor their ripening stage during shelf-life. Postharvest Biology and Technology. 2008. № 47. С.181-188.
- 11 Левин М.Н. Проект «Электронный нос» - разработка дифференциального спектрометра ионной подвижности. Новые технологии. 2014. № 5. С.4-9.
- 12 Fateixa S., Nogueira H. I. S., Trindade T. Hybrid nanostructures for SERS: materials development and chemical detection. Phys.Chem.Chem.Phys. 2015. V. 17. P. 21046-21071.

THE IMPORTANCE OF MEASURING USER EXPERIENCE IN THE 21ST CENTURY: INNOVATIVE TECHNOLOGY CHALLENGE

Adrien. Lecossier¹, Katy. Tcha-Tokey², Simon. Richir²

¹ *LAMPA laboratory, Arts et Métiers Paris Tech Angers, SOURIAU
ESTERLINE, adrien.lecossier@ensam.eu*

² *LAMPA laboratory, Arts et Métiers Paris Tech Angers
katy.tcha-tokey@ensam.eu*

ВАЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ОПЫТА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В 21 ВЕКЕ: ВЫЗОВ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Опыт пользователя — это понятие, широко распространенное в области исследований и среди практиков. Тем не менее, его измерение часто подвергается сомнению из-за субъективного характера. Измерение пользовательского опыта представляет собой техническую проблему, так как технологии, используемые для оценки восприятия пользователя на сегодняшний день, являются недостаточно разработанными. В этой статье показана важность разработки процедур измерения пользовательского опыта для определения величины, которая надежно характеризует способность пользователя к такому измерению. Рассмотрены результаты нескольких исследований, в которых предлагаются субъективные методы оценки пользовательского опыта. Показана роль нескольких методов измерения, существующих сегодня, включая электроэнцефалографические и электромиографические исследования, которые в некоторых случаях используются для объективной оценки пользовательского опыта (т.е. эмоций и аффектов). Проанализированы преимущества и недостатки этих методов. Даны рекомендации, показывающие, каким образом метрологические подходы могут помочь решить проблему измерения опыта пользователя. Поскольку в настоящее время достигнут большой прогресс в создании средств измерений, наиболее важной рекомендацией для надежного измерения опыта пользователя является сбор как субъективных, так и объективных данных, связанных с таким опытом. Объединение этих данных, в значительной степени, может помочь избежать предвзятости и уменьшить неопределенность.

Abstract

User experience is a concept widely spread in the research field and among practitioners. Nevertheless, its measurement is often questioned due to its subjective nature, consequently minimizing the importance of user experience. Measuring user experience represents a technical challenge, as, technologies used to evaluate the user's perceptions to date are immature. In this paper we cover the importance of designing user experience measurement procedures in order to identify a reliable user experience measurand. We review several studies in which subjective user experience assessment methods are proposed. We also focus on

the few measurement techniques existing today such as electroencephalographic and electromyographic responses that, in some cases, are used to assess objective user experience (i.e., emotions & affects). Both type of methods present advantages as well as disadvantages. Therefore, we came out with several recommendations based on metrology definitions to show in which way the metrology concepts can reply to UX measurement problematics. According to the current technology maturity of the measurement means, the most important recommendation for reliable user experience measures is to gather subjective as well as objective data on UX. Crossing the data may help avoid as much bias and errors as possible.

1. Introduction

Technologies are at the heart of the 21st century revolution. They are more and more changing the way we work, learn and the way we define human. Recently, researchers have been trying to understand and master technologies through the concept of User eXperience (UX). ISO DIS 9241-210 tentatively defines UX as "*all aspects of the user's experience when interacting with the product, service, environment or facility*" [1]. The user is at the center is the watchword. This is why, UX has been in the last years an approach used in numerous disciplines (e.g., Human computer interaction (HCI), ergonomics, information architecture, branding, ...) to improve user-centric products or services. There is no reasonable doubt in the importance of UX in product quality. A specific product that highlights the importance of considering UX is virtual reality (VR), a technology greatly in vogue that provides applications to the general public. Studies show that UX consideration can alleviate the cybersickness (e.g., nausea, vertigo, disorientation, ...) affecting users in VR [2]. Moreover, today's technologies are more complex, they are fashionable, they stimulate the user's senses, they are immaterial. Therefore, early UX research strategy, rather than focusing on instrumental measures, focuses on more holistic subjective perceptions such as hedonic qualities, affects or emotions [3]. The Agarwal and Meyer study provided clear evidence of how studying emotion can add value to traditional user experience research [4]. Even if they used only subjective assessment, they show that for the same usability level, two computer applications can create different emotional results when they are used. Emotion even be opposed (pleasant against unpleasant for example). It confirms that the emotion caused by the observation of an object can in a second question its usability. This report is probably shared by the engineers at Renault. They would no doubt have appreciated having a way to evaluate the emotion when they designed the Renault Velsatis in 2002. On paper, everything seemed ideal: a high-end vehicle, full of technologies, competing with luxury German brands. But, they forgot to take into account the nefast emotion caused by a so futurist design, which resulted in an almost unprecedented commercial failure.

The analysis is clear: most UX evaluation methods are subjective, self-developed or not statistically validated [5]. There is an urge for clear measurement standards for UX evaluation. The current situation is alarming

since a product's intrinsic quality has to be objectively measured in order to be easily compared and controlled. Consequently, the main challenge UX is facing in this 21st century context, is to ensure that new products and services provide good UX to users. To do so, UX research needs to define measurands whether the UX criterion is hedonic (e.g., pleasure, motivation, satisfaction, ...) or instrumental (e.g., performances, usability,...).

In the remainder of this paper, we argue in favor of usability and emotions & affects being the two most common UX components studied among researchers. We define them in section 2 and we present subjective as well as objective assessment methods for both components in section 3. In section 4, we discuss recommendations to measure UX in line with the methods presented and the metrology definition of —measurement. Finally we conclude on future perspectives of our study.

2. Most Common User eXperience components

—User experience involves a product/service (or a system in general), whereas experience does not require it. Watching a sunset is an experience, not user experience. User experience involves interacting (or the possibility to interact) with a system at some point, whereas „experience“ does not require it. “ [6]

UX is defined through a construct of components such as usability, emotion, enjoyment, visual aesthetic. The interaction with the product or system provides a set of emotions, a certain degree of enjoyment and visual aesthetic evaluation from the user. These UX components tend to vary in accordance with the field and the type of product or system they are connected to. Each component is strongly related to the user's perceptions. Usability is the most studied UX component because it historically allowed to obtain a more complete understanding of users' needs [7]. According to Bargas-Avila [5], emotion & affect is unsurprisingly the most assessed UX dimension because of the interrelationship between emotions states and decisions processes (e.g., purchase a product). Definitions and assessment methods of the two most common UX components (i.e., usability, emotions & affects) are presented in the following sections. Opposing instrumental (i.e., usability) and non-instrumental (i.e., emotions & affects) aspects of UX.

2.1. Usability Definition

Usability is generally defined as the ease of learning (i.e., learnability, memorization) and the ease of using (i.e., efficiency, effectiveness and satisfaction) [8]. User performances, the match of the system with the user's expectations, with the user's cognitive, motor and sensory abilities are other definitions that supplement the usability notion. This notion is strongly linked to HCI and ergonomic design. The study of usability during these last 20 years has contributed to place the user in the middle of the design process and has also systematise the practice of UX methods in several fields through certifications and ISO norms. To cite a few, the ISO-TR 16982, 2002 and the ISO 20282-1,

2006 norms concern usability methods intended for user centered design practitioners. Linked to the user's performances and skills, usability is associated with the instrumental and pragmatic aspect of UX measure [9]. It is a necessary component, but measuring usability alone is not enough to ensure a reliable usage of interactive systems. For the last years, research on non-instrumental or hedonic aspects of the UX assessment (e.g., emotions & affects, subjective judgement, pleasure, ...) are flourishing with the ambition of understanding man-system relationship better.

2.2. *Emotions & affects Definition*

Emotion is seen as any mental experience with high intensity and high hedonic content (pleasure/displeasure). Two main theories structure emotions & affects. Ekman's theory [10], exposes five basic emotions which are anger, fear, joy, sadness and disgust. Whereas Russell's theory [11] exposes affects through a —circumplex model of two independent dimensions: activation/deactivation of the affect and pleasant/unpleasant affect (e.g., a pleasant and deactivated affect would be —relaxed, a pleasant and activated affect would be —excited, a unpleasant and deactivated affect would be —bored, a unpleasant and activated affect would be —tense). For psychologists [12], emotion is —*a complex psychological reality that involves cognitive appraisal processes of information flow being internal or external to the individual, associated with sensations of excitement and pleasure (or displeasure), physiological changes, emotional behaviours with a specific goal.*

3. UX Assessment

As UX mainly concerns the user, the —simple way of assessing its dimensions consist of asking him or her, through several methods (see 3.1) to what extent he perceives certain UX components. In this way all aspects of the UX (e.g., emotions, perceived efficiency, perceived effectiveness, satisfaction ...) can be assessed.

3.1. *Subjective Assessment Methods*

UX is seen as a subjective dimension as the result of its evaluation is specific to the user's personality or to the evaluator's experience. A majority of subjective UX assessment methods are used in UX evaluation. Usability inspection methods, questionnaire methods, scale or observation are example of the most used methods.

Usability assessment

There are as many tools as fields of study to evaluate usability. For example, Nielsen [13] developed in 1993 heuristics for User Interface Design to assist designers in the assessment of the interface. He proposed seven important usability principles to counter usability problems in the design: visibility of system status (e.g., —*provide status information*), match between system and real world (e.g., —*contains familiar terms and natural language*), user control and freedom (e.g., —*obvious way to undo actions*), consistency and standards

(e.g., —*uniform command syntax*), error prevention (e.g., —*understand the user's language*), recognition rather than recall (e.g., —*make the repertoire of available actions salient*), flexibility and efficiency of use (e.g., —*user interface should be customizable*). These criteria are inspected by each designer without any need of users.

Other than inspection methods, questionnaires methods are used to assess usability with users. Usability questionnaires can be specific to a system (e.g., mobile phones, augmented reality). For example, Ryu [14] developed a Mobile Phone Usability Questionnaire (MPUQ) focusing on some usability dimensions such as: ease of learning and use, assistance with operation and problem solving, emotional aspect and multimedia capabilities, commands and minimal memory load, efficiency and control and typical tasks for mobile phones. This quite modern questionnaire takes into account new usability concepts such as —*emotional usability*, —*attractiveness*, —*sensuality*, —*pleasure and displeasure in product use*. The questionnaire is composed of 72 items.

The System Usability Scale (SUS) is a questionnaire created in the 1986 as a —*quick and dirty method* of only 10 items [15]. Nevertheless it has been a very successful questionnaire used a considerable number of times by practitioners due to its adapted size and ease of use for the industrial context.

Observation methods in the user's environment are one more type of subjective methods. Users are observed by experts who evaluate usability according to their own subjective criteria [16]. The sessions may be followed by a discussion with the user or among experts so as to gather more information. This helps to avoid some bias by considering the experts as having together a more objective vision.

In their study, Sauro et Kindlund alert on the number of usability assessment methods and mention the usability irony: usability metrics need to be easier to use— [17]. This is why, they propose a quantitative approach of usability measure that Standardize Usability Metrics (SUM) into a single score. Their score is based on three properties which are efficiency, effectiveness and satisfaction combining subjective (i.e., average satisfaction) as well as objective measures (i.e., time, number of errors, completion). They conclude that SUM can never replace all the information inherent in the various component metrics that compose the three properties. However like a FICO score, an IQ score or even the Richter scale, SUM has the ability to provide high-level summary information about a complex construct in four integral summative usability measures (i.e., average satisfaction, time, number of errors, completion) [17].

Emotion & affects assessment

Measuring emotion is one of the most vexing problems in affective Science according to researchers. In their chapter —*Assessing emotion by questionnaire*, Harald et al. [18] assume that questionnaires may be the best suited self-report technique to assess conscious emotional experience. They

present their own —emotional experience questionnaire based on theoretical considerations. According to them, emotion is generally induced in three types of settings: in a laboratory, in real life observation or when asked to recall a past experience. Their questionnaire is to be used to study four types of emotional experience (i.e., joy/happiness/pleasure, sadness/sorrow/grief, anger/bad temper/rage) in a situation to recall. The emotions were presented through pictorial representations. The questionnaire was developed to assess three types of characteristics: description of the situation, description of the emotional reaction and control of the emotion.

The self assessment manikin (SAM) is only based on the pictorial representations. It is described in Bradley and Lang's study as a nonverbal assessment technique that directly assesses pleasure, arousal and dominance associated with a person's affective response to an object or event [19]. In their study, they point out the advantages (e.g., no translation needed) of SAM compared to a semantic differential scale. SAM has been developed in 1980 and has inspired many other emotional instrument such as the Product Emotion Measurement Instrument (PrEMo) that uses cartoons instead of classical pictorial representations [20].

Recently, the Pleasure, Arousal and Dominance (PAD) semantic differential scale to assess affect and drive was translated in french [21] from the well established tool of Mehrabian and Russell [22]. They defined pleasure (unpleasure) as feelings ranging from unhappiness to extreme happiness. They used bipolar pairs of adjectives such as —pleased/annoyed or —happy/unhappy to evaluate the user's pleasure (unpleasure). Arousal is described as a mental activity identified through a single dimension ranging from sleep to excitement. The bipolar pairs of adjectives identifying the activities are for example —stimulated/relaxed and —excited/calm. And dominance is related to sense of control ranging from dominant to submissive, it is represented by the bipolar pairs of adjectives such as —controlling/controlled and —important/awed.

Another approach in assessing emotion is to study the variation of its intensity, indeed some people tend to be driven by a higher need for stimulation when they are placed in a poorly arousing context [23]. The Affect Intensity Measure (AIM) created in 1987 was also recently used in an evaluative process study. The AIM measures the intensity with which emotion is experienced by people engaged in an evaluative process. The scale is defined through five subscales: the Intrapersonal Positive Affect I (IPA I; intensity of positive emotions experienced with high energy), the Intrapersonal Positive Affect II (IPA II; intensity of positive emotions experienced with exuberance), the Negative Reactivity (NR; the reactivity to negative events), the Serenity (S; reactivity to positive events with weak excitability (calmness)), and the Negative Intensity (NI; intensity of negative emotions (anger, stress, nervousness)).

The subjective methods described previously are mostly related to laboratory setting. An approach to study emotion in the field was presented by Csikszentmihalyi and Larson [24] to counter the possible bias of laboratory settings. The Experience Sampling method (ESM) consist of describing variations (i.e., frequency, intensity, patterning) in real life of psychological processes (e.g., emotion) in self-reports.

3.1.1. Subjective Assessment Advantages

The subjective evaluation of the UX aims, in a sense, at evaluating the parameters that an "objective measure" is today unable to perform. We have seen in the previous subjective assessment methods of usability and emotions & affects that they present obvious advantages. For example, the ability of questionnaires to evaluate the user's opinion, beliefs and thoughts. No methods other than subjective ones are known to do so. Another advantage is the ease of use of questionnaires or scales to evaluate an experience. Indeed, no specific knowledge is needed as researchers propose most of the time well studied intelligible items, nor specific means of measurement are needed, basically, the questionnaires or scales available could just be downloaded or printed for any use once they are implemented. Pictorial representations of emotions are even easier to use worldwide as no language translation is needed. In the heuristic evaluation methods only one experienced evaluator is needed, few resource is mobilized as no user's are necessary. Furthermore, methods such as questionnaires or scales can be performed remotely and this way, easily gather a large user participation rate (e.g., 500 participants) in a few period of time (e.g., two weeks).

3.1.2. Subjective Assessment Disadvantages

Even if today, subjective methods are still the most accurate way to evaluate perceived UX, they are also costly, time-consuming and very complex to implement due to the need of preliminary experiments, purchased resources (e.g., materials, academic papers) and the involvement of human end users. For example, in Lecossier et al.'s work, they evaluate UX quality throughout an innovation process [25]. During this process, the same users must respond to a combination of seven surveys (i.e., 85 items). This can obviously cause some weariness, which does not occur with —quick and dirty methods of fewer items (i.e., 10) such as the SUS. Nevertheless, the questionnaire or scale with very few items may miss the relevant information in the user's experience. And even the questionnaire or scale with too many items, however reliable it is, may cause a bias resulting from random responses: the user responds randomly to the last set of items in order to cut down their tiredness [26]. Tcha-Tokey et al. also identified similar costly stages in the validation process of their questionnaire [27]. As for observation and heuristic evaluation methods, the bias may not come from the user but from the expert himself or herself, depending on his experience, mood, and own interpretation. Another complexity is the numerous

different versions of questionnaires or scales obeying to different criteria used to evaluate a single UX components such as usability or emotions in studies. This makes comparisons of results very difficult and leads to few common understanding of the UX notion among researchers. Nevertheless, interest for UX is steadily increasing even if subjective evaluation methods such as questionnaires are neither sustainable nor applicable [5] on a large scale. In addition, no real innovations are made in subjective methods, some questionnaires are still used 30 years later, they thus, can often be called into question because of the frequent increase of breakthrough innovations in the technology they evaluate. In order to put an end to these difficulties, some research study the UX as a physical phenomenon by proposing new measurement models. The next chapter reviews these new methods used to measure the most common UX components: usability and emotion & affects. Table 1 presents a summary of subjective assessment methods for the emotion & affects and the usability UX components.

Table 1: Examples of subjective assessment methods according to the most common UX components, usability and emotions & affects

Component	Method	type	Sources	System assessed
Usability	Nielson's Usability heuristics	Heuristic evaluation	Nielson, 1994	User interface
	MPUQ	Questionnaire	Ryu, 2009	Mobile phone
	SUM	Measure and questionnaire	Sauro, 2005	Interactive Systems
	SUS	Scale	Brooke, 1986	Interactive systems
	Observation of users by experts	Observation	Tong et al., 2015	Game-based screening tool
Emotions & affects	Emotional experience questionnaire	Questionnaire	Harald et al., 1989	All
	SAM	Pictorial representation	Lang, 1985	All
	PrEMo	Cartoon representation	Desmet, 2005	All

	PAD Semantic differential scale	Differential scale	Mehrabian and Russell, 1974	Images
	AIM	Scale	Larsen and Diener, 1987	Textile (car seats)

3.2. Objective Assessment Methods

Even though a majority of subjective UX assessment methods are used in UX evaluation, UX is more and more seen as a dimension that can be assessed objectively. Assessing UX objectively is focusing on UX components such as usability or emotions & affects on one side and on metrics (or measurand) associated to each component such as frequency or time on the other side. Several methods and instrument exposed below do provide interesting objective results.

Usability assessment

Objective UX assessments have often been about user performances based on actual usage. Indeed, Brooks and Hestnes identified several measurands to evaluate the usability of media interfaces (e.g., game score, game duration, mouse clicks, time between mouse clicks, ...) [28]. Just like Frøkjær et al. [29], who consider efficiency, effectiveness and satisfaction as independent usability dimensions, given that they capture different aspects of usability. For example, indicators of efficiency include time completion and learning time, indicators of effectiveness include quality of solution (i.e., outcome of user's interaction with the system, for example grade, score or task accuracy) and error rates, finally, indicators of satisfaction include subjective assessment methods such as attitude (e.g., preferences or acceptability of the service) rating scales. Frøkjær et al. recommend to measure all three aspects of usability, confirming an important observations: objective evaluations of usability are necessarily carried out additionally to subjective evaluations due to the subjective nature of the satisfaction aspect of usability. Moreover, the authors suggest to define usability measurement principle according to the application domain and context of use so as to uncover the measures that are specific to the particular situation.

In other fields such as virtual reality, or games within which interaction are becoming more complex with different interaction paradigms (e.g., gesture interaction, speech recognition, 3D navigation, ...), similar measurands are also used. Number of errors, score, level reached, time completion are measures usually chosen to objectively evaluate the usability [27]. Nevertheless, measuring usability in games with a scenario of several hours can quickly be a demanding work. Brinkman et al. provides a possible solution. They try to optimize objective measurement techniques by reducing the number of participants [30]. To achieve this, the authors use the Layered Protocol Theory,

which decomposes the user-system interaction into different layers that can be designed and analysed separately (subsystem). For example, the usability of a radio alarm clock can be decomposed by measuring the usability of each of its subsystems (e.g., clock button, volume button, radio station buttons, ...). For each subsystem, the number of user interactions performed to accomplish a task is measured. The measurement model use a differential measurement method considering the first measure as an etalon. The system or subsystems can then be modified and again tested in order to measure the resulting usability. The study shows that by using a differential measurement method, the number of participants can be reduced by 60%, meanwhile obtaining reliable results, just as other usability assessment protocols.

Emotion & affects assessment

Numerous methods are emerging to assess UX in a more —technically advanced way compared to subjective methods, especially when it comes to emotions & affects, an non-physical quantity characterizing human. Experiencing emotions generates a variety of physiological reactions that can be measured with a diverse set of instruments.

One of these instruments is an electroencephalography (EEG). In their study, Taymanov et al. use an EEG to register neurophysiological reaction induced by an emotional state. They show the correlation between neurophysiological reaction and basic emotions caused by an acoustic stimuli [31].

Each emotion (e.g., anger, sadness, joy, ...) is associated with a particular pattern of facial and vocal expressions. For example, anger is linked to a state, contracted eyebrows, compressed lips, vigorous and brisk movements and can be accompanied with a raised voice or speech, sometimes shoutings. Based on facial expression theories, instruments such as facial electromyographic activity (EMG) can link expression features to distinct emotions. Mahlke and Minge [32] used facial EMG among other methods to measure different components of emotional experience (e.g., cognitive appraisal, motor expression, physiological reactions) in an interactive context.

Another similar approach is based on vocal cues. For example Batliner et al. developed the Monitoring of User State Emotion (MoUSE) instrument to identify trouble (i.e., negative emotion) in communication thanks to emotional markers in the speaker's voice [33]. They tried to adapt their instrument to realistic scenarios by combining adequate knowledge sources (e.g., prosodic features, repetition, reformulation, dialogue act sequences).

Heart activity is also an emotional indicator registered through an electrocardiographic (ECG) instrument. There are a variety of parameters for analyzing and interpreting the raw signal of a ECG. Common parameters are heart rate, interbeat interval and heart rate variability which can indicate positive or negative valence. Westerink et al. [34] combined ECG with Skin

Conductance Response (SCR), a physiological measure of psychological and autonomic arousal, for more accurate results. They built an emotions measurement platform for real-life situations in contrast with psychological techniques usually validated in laboratory situations. They show that emotional experience can be measured in an relatively unobtrusive way.

The Autonomic Nervous System (ANS) designates all systems with sympathetic and parasympathetic branches, which are generally associated with activation and relaxation, respectively. The most commonly assessed indices of ANS activation are based on electrodermal (i.e., sweat gland) or cardiovascular (i.e., blood circulatory system). There are rich theories and understanding of how the brain and ANS interact in generating, regulating, recognizing and responding to emotion [35].

3.2.1. Objective Assessment Advantages

The objective assessment of UX has several advantages compared to subjective assessment. First, it allows direct evaluation (i.e., during actual usage) without interrupting the user's interaction with the system. Second, certain users bias are avoided (e.g., random responses, memory loss) during the evaluation of the interaction, indeed, users do not have to recall their experience in order to express their opinion which by definition is subjective. Third, the objective assessment of UX is by its own nature more reliable than subjective assessment. Finally, research on objective UX and in particular emotion & affects are leading to great innovations. For example, new assessment techniques such as electroencephalogram-based emotion recognition are developed; new research fields, primarily based on these objective measures, such as —affective computing‖ or —Brain-Computer Interaction‖ (BCI) are arising and new scopes of research are emerging in several fields such as Artificial Intelligence (AI), hedonic systems, domotics, robotics with the ambition to build applications, so called —empathic applications‖ (e.g., conversational agents, human-like robots, intelligent homes, ...).

3.2.2. Objective Assessment Disadvantages

Although objective assessment methods do not involve the use of questionnaires, their interpretation is complex, especially for the emotional component. The measure of brain activity requires the use of unusual good quality materials, thus expensive. Furthermore, this material can be invasive for the user and constraining to use in real life [34]. Besides the material aspect, the physiological measures are still imprecise. Actually, facial expression, heart rate or brain activity are correlated to inaccurate emotional standards for several reasons. First, emotion is impacted by user's characteristics such as culture, âge, experience... these specificities are not taken into account in most studies. Second, emotions are constantly evolving during a single activity, it is difficult to precisely follow the —palettell of emotions once drowned by the activity, history of people, upbringing, education, belonging to a definite socio-culture

group, etc. Third, these physiological methods show inconsistent results for predicting emotional valence for example in human-computer interaction. While some authors associate a decrease of heart rate with negative valenced situations, other authors found a positive correlation between heart rate and valence. Heart activity seems to be a more reliable indicator for arousal and mental workload than for emotional valence [34]. Fourth, brain activity is influenced by many various random factors of physiological and cognitive character, such as respiration, muscle activity, tiredness, attraction of attention to irrelevant thoughts or side impacts, etc. It is rather hard to diminish their influence during the experiments [31]. Finally, usability measurement must include efficiency, effectiveness and satisfaction measures to be reliable. However, as satisfaction is necessarily evaluated subjectively, it appears that usability cannot be entirely measured, to date.

Table 2 presents a summary of objective measurement methods for the emotion & affects and the usability UX components.

Table 2: Examples of measurement methods according to the fundamental UX components: usability and emotions & affects

Component	Method	Measurand	Sources	System assessed
Usability	System Tracking	Time completion, learning time	Frøkjær et al., 2000	All
		Mouse click, time between clicks	Brooks & Hestnes, 2010	Computing
		Error rate, number of errors	Frøkjær et al., 2000; Tcha-Tokey et al., 2016	All
		Quality of the solution (grade, score, level reached, task accuracy)	Frøkjær et al., 2000; Brooks & Hestnes, 2010; Tcha-Tokey et al., 2016	Games
Emotions & affects	EEG	Neurophysiological activity	Taymanov, 2016	Acoustic
	EMG	Facial expression	Mahlke & Minge, 2008	Human-technology interaction
	MoUSE	Vocal expression	Batliner et al., 2003	Automatic dialogue system

				(call center)
	ECG	Heart rate	Westerink, 2009	Everyday life
	SCR	Electrodermal activity	Westerink, 2009	Everyday life
	ANS	Electrodermal / cardiovascular	Ax, 1953	Health, wellbeing

4. UX Measurements Recommendations

In the field of electrical measurement, the measure of the electrical current is reliable since it is characterized by a standard. Alike the electrical current measurement, every reliable measure follows three main criteria [36] :

1. its measurement procedure is defined by measurement principles, a measurement method and a measurement model (cf. measurement procedure in the VIM). For example, during a steady-state operation, the electrical power measurement can be realized by an indirect measurement method using both an ammeter and a voltmeter. This measurement method is based on the measurement model —the power is equal to the voltage multiplied by the current— which use the voltage and current measurement principles.
2. the measure is objective and reproducible (cf. measurement reproducibility in the VIM),
3. it effectively assessed the corresponding measurand (cf. measurement accuracy in the VIM).

Our analysis is that, despite the large amount of studies on UX measurement and despite the numerous set of measures proposed, most of these studies do not focus on the quality of the measure according to the metrological definitions.

(1) From our point of view, most of UX measurement procedures are incomplete. Indeed, measurement principles and methods are often proposed, but finally no measurement models are clearly defined and validated for any UX component. Neither are defined logical relations between all quantities known to be involved in the UX measurement.

Recommendation (1): According to this statement, our first recommendation would be to gather and compare the numerous measurement principles and methods used in UX studies to date, and identify or create measurement models for each UX component. This approach will lead to reliable measurement procedures. In this way, measurement results could be compared even if they result from different applications. We also suggest to explore —unified— UX measurement models that study the correlation between UX components (or

subcomponents) such as usability (i.e., effectiveness, efficiency, satisfaction) and emotion & affects.

(2) We noticed that, UX is a subjective notion by its own nature and therefore most UX component assessments are subjective and few are objective. Subjectivity makes the assessments results hardly reproducible, therefore creates coexistence of several interpretations for the same type of studies. We exposed that more and more objective assessments are being developed for the emotion component and for some of the usability aspects. Even if the emotion is measured, the measurement result is still expressed qualitatively (i.e., positive or negative valence) because no quantity are clearly linked to the measure of emotion.

Recommendation (2): Our recommendation would be, first, to identify more measurands from the already existing subjective UX studies. Second, to define more measurands for the usability aspects especially for the satisfaction for which no objective methods are defined. Third, to work on quantitative measures for emotion & affects. And finally, to provide the tools and environment that work best for the reproducibility of the measurements.

(3) As the usability measurement procedure is still not clear, it can be often seen in studies, that usability is measured through an incomplete set of measures, neglecting other usability facets. This, strongly compromises the measurement accuracy. As long as no standard measurement procedure of usability is defined, usability evaluation will probably cause false measurement results, or results that do not actually define usability. The usability measurement procedure could be susceptible to changes in order to adapt to targeted range of systems [29]. As for the emotion & affects, we discovered that the emotion measurement accuracy is investigated in several fields, and some encouraging results are emerging in the metrology field [31].

Recommendation (3): In order to solve these difficulties, we would like to suggest that fundamental researches focus on a development of a standard methodology in order to help researchers and practitioners to develop their own usability measurement procedures according to the range of applications they evaluate. Moreover, applicative researches need to implement new generation of emotion-based materials (e.g., emotional platform with a combination of physiological sensors included) in order to facilitate the emotion measurement.

Recommendation (4): In the meantime, the most important recommendation for reliable user experience measures would be to gather as much subjective as well as objective data on UX possible. Actually, crossing the data may help avoid bias, inaccuracy and uncertainty in a certain degree in the measurement results.

5. Conclusion

This paper has presented various subjective and objective methods that are used, to date, to evaluate the usability and the emotions & affects UX components.

We then identified the main points that prevent UX measure from being considered reliable, and brought recommendations based on the metrology definitions to show in which way the metrology concepts can replies to UX measurement problematics. Ideally, the quality of the UX should be measured objectively, yet subjective methods are most used. Indeed, current objective measurement methods are still immature, in particular for the emotion measure. Moreover, emotion & usability measurement procedure standards should be clearly defined and adapted as much as possible to all contexts. In the meanwhile, for reliable user experience measures gathering subjective as well as objective data on UX may be the most cautious procedure. Indeed, crossing the data may help avoid as much bias and error as possible.

Moving towards this type of progress also needs to take a closer look at the ethical question that bears the passive measure of a user's emotion.

We hope that this study opens new scopes of research between the metrology and the user experience fields.

Authors' Contributions

Adrien Lecossier and Katy Tcha-Tokey are co-first authors, they contributed equally to this work.

References

- 1 ISO DIS 9241-210:2008. Ergonomics of human system interaction - Part 210: Human-centred design for interactive systems (formerly known as 13407). International Organization for Standardization (ISO). Switzerland.
- 2 Lin, J. J., Abi-Rached, H., & Lahav, M. (2004, April). Virtual guiding avatar: An effective procedure to reduce simulator sickness in virtual environments. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 719-726). ACM.
- 3 Scapin, D. L., Senach, B., Trousse, B., & Pallot, M. (2012). User experience: Buzzword or new paradigm? ACHI 2012 - 5th International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, (January), 336–341
- 4 Agarwal, A., & Meyer, A. (2009). Beyond usability: evaluating emotional response as an integral part of the user experience. *Proceedings of the 27th International Conference*, 2919–2930. <http://doi.org/978-1-60558-247-4/09/04>
- 5 Bargas-Avila, J. a., & Hornbæk, K. (2011). Old wine in new bottles or novel challenges: A critical analysis of empirical studies of user experience. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'11), 2689–2698.
- 6 Roto, V. (2007). User Experience from Product Creation Perspective. *Towards a UX Manifesto COST294-MAUSE, September*, 31-34
- 7 N. Bevan (2008). Classifying and Selecting UX and Usability Measures. Proceedings of the International Workshop on Meaningful Measures: Valid Useful User Experience. Reykjavik, Iceland, June 2008
- 8 Abran, A., Khelifi, A., Suryan, W., & Seffah, A. (2003, April). Consolidating the ISO usability models. In *Proceedings of 11th international software quality management conference* (Vol. 2003, pp. 23-25).

- 9 Hassenzahl, M., & Tractinsky, N. (2006). User experience-a research agenda. *Behaviour & information technology*, 25(2), 91-97.
- 10 Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition & emotion*, 6(3-4), 169-200.
- 11 Ressel, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *J. Personality and Social Psychology*, 39, 1161-78.
- 12 Piolat, A., & Bannour, R. (2008). Emotions et affects: contribution de la psychologie cognitive. *Le sujet des émotions au Moyen Age*, 53-84.
- 13 Nielsen, J. (1994, April). Enhancing the explanatory power of usability heuristics. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 152-158). ACM.
- 14 Ryu, Y. (2009). Mobile phone usability questionnaire (MPUQ) and automated usability evaluation. *Human-Computer Interaction. New Trends*, 349-351.
- 15 Brooke, J. "System usability scale (SUS): a quick-and-dirty method of system evaluation user information." *Reading, UK: Digital Equipment Co Ltd* (1986).
- 16 Tong, T., Chignell, M., Sieminowski, T.(2015). Case study: a serious game for neurorehabilitation assessment. *Procedia Comput. Sci.* 69, 125–131
- 17 Sauro, J., & Kindlund, E. (2005). A method to standardize usability metrics into a single score. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '05)*, 401–409. <http://doi.org/10.1145/1054972.1055028>
- 18 Plutchik, R., & Kellerman, H. (Eds.). (2013). *The measurement of emotions* (Vol. 4). Academic Press.
- 19 Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 25(1), 49-59.
- 20 Desmet, P. (2005). Measuring emotion: Development and application of an instrument to measure emotional responses to products. *Funology*, 111-123.
- 21 Detandt, S., Leys, C. & Bazan, A., (2017). A French Translation of the Pleasure Arousal Dominance (PAD) Semantic Differential Scale for the Measure of Affect and Drive. *Psychologica Belgica*. 57(1), pp.17–31. DOI: <http://doi.org/10.5334/pb.340>
- 22 Mehrabian, A. and Russell, J. A. (1974). *An approach to environmental psychology*. Cambridge, MA: MIT.
- 23 Kergoat, M., Giboreau, A., Nicod, H., Faye, P., Diaz, E., Beetschen, M. A., & Meyer, T. (2016). Affect intensity and softness tactile preferences: An experimental approach to arousal regulation. *Food Quality and Preference*, 52, 120-123. Measurement (VUUM)
- 24 Csikszentmihalyi, M., & Larson, R. (2014). Validity and reliability of the experience-sampling method. In *Flow and the foundations of positive psychology* (pp. 35-54). Springer Netherlands.
- 25 Lecossier, A., Pallot, M., & Richir, S. (2017). UX-FFE Model: An Experimentation of a new innovation process dedicated to a mature industrial company. In ICE 2017. Madeira Island.

- 26 Gogol, K., Brunner, M., Goetz, T., Martin, R., Ugen, S., Keller, U., ... & Preckel, F. (2014). —My Questionnaire is Too Long! The assessments of motivational-affective constructs with three-item and single-item measures. *Contemporary Educational Psychology*, 39(3), 188-205.
- 27 Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S. (2016). Proposition and Validation of a Questionnaire to Measure the User Experience in Immersive Virtual Environments. *The International Journal of Virtual Reality*, 16(1), 33-48.
- 28 P. Brooks and B. Hestnes, —User measures of quality of experience: Why being objective and quantitative is important, IEEE Netw., vol. 24, no. 2, pp. 8–13, 2010.
- 29 Frøkjær, E., Hertzum, M., & Hornbæk, K. (2000, April). Measuring usability: are effectiveness, efficiency, and satisfaction really correlated?. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 345-352). ACM.
- 30 Brinkman, W.-P. ., Haakma, R. ., & Bouwhuis, D. G. . (2005). Empirical usability testing in a component-based environment: Improving test efficiency with component-specific usability measures. *Lecture Notes in Computer Science*, 3425, 20–37.
- 31 Taymanov, R., Baksheeva, I., Sapozhnikova, K., & Chunovkina, A. (2016). Measurement model as a means for studying the process of emotion origination. *Journal of Physics: Conference Series*, 772(December).
- 32 Mahlke, S., & Minge, M. (2008). Consideration of multiple components of emotions in human-technology interaction. In *Affect and emotion in human-computer interaction* (pp. 51-62). Springer Berlin Heidelberg.
- 33 Batliner, A., Fischer, K., Huber, R., Spilker, J., & Nöth, E. (2003). How to find trouble in communication. *Speech communication*, 40(1), 117-143.
- 34 Westerink, J., Ouwerkerk, M., de Vries, G. J., de Waele, S., van den Eerenbeemd, J., & van Boven, M. (2009, September). Emotion measurement platform for daily life situations. In *Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops, 2009. ACII 2009. 3rd International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- 35 Levenson, R. W. (2014). The autonomic nervous system and emotion. *Emotion Review*, 6(2), 100-112.
- 36 International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms, 3rd ed., 2008 version with minor corrections, BIPM, JCGM 200, 2012.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ПОСТОЯНСТВА ОСИ ВРАЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ТОЧНЫЕ РОТАЦИОННЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Радев Х.К., Богев В.Й., Василев В.А., Благов И.Х.

Технический университет – София
hradev@tu-sofia.bg

Постоянство оси вращения является основным требованием к объектам, осуществляющим точные ротационные движения (предметные столы кругломерных приборов, ротационные модули измерительных систем или станков и др.).

Отклонение от постоянства оси вращения оценивается через радиальное, аксиальное и угловое биения оси.

Рассматриваются четыре нереверсивных метода оценки биения оси вращения, нашедшие применение в метрологической практике. Оценивается радиальное, аксиальное и угловое биения оси вращения двух ротационных модулей, характеризующихся значительной разницей в точности вращения. Оценка осуществляется использованием каждого из четырех методов при одинаковых условиях измерения, что позволяет сравнить метрологические и эксплуатационные возможности исследуемых методов.

1. Введение

Постоянство оси вращения, является основным требованием к объектам, осуществляющим точные ротационные движения (предметные столы кругломерных приборов, ротационные модули измерительных систем или станков и др.).

Отклонение от постоянства оси вращения оценивается через т.н. «блуждающее биение» (радиальное, аксиальное и угловое).

Блуждающее биение, в данной плоскости или направлении, рассматривается как геометрическое место точек мгновенной оси вращения объекта и представляет собой, соответственно, сложную замкнутую кривую или совокупность точек, расположенных по линии измерения.

Количественно блуждающее биение оценивается через размах отклонений относительно виртуальной базы или через мгновенные положения оси относительно виртуальной базовой оси.

Виртуальная базовая ось – это прямая, в данной координатной системе XYZ, проходящая через центры тяжести точек мгновенной оси вращения в двух любых, отдаленных друг от друга параллельных плоскостях XOY. Ось вращения ориентирована по оси Z. Положение мгновенной оси вращения, является функцией угла φ_i вращения объекта относительно виртуальной базовой оси.

Все три вида блуждающего биения имеют свою систематическую и случайную составляющую, которые могут быть оценены при многократном измерении и соответствующей статистической обработке полученных результатов измерений.

Оценивание биения оси основывается на результатах измерения биения плоских или сферических поверхностей эталонных деталей (стеклянной интерференционной пластины или стеклянной полусферы), установленных определенным способом на вращающихся элементах соответствующих объектов [1, 2]. Последующая обработка этой первичной измерительной информации осуществляется по определенным алгоритмам, использующим в одной или другой форме Фурье-анализ.

В случаях, когда значение отклонения формы поверхностей эталонных деталей соизмеримо со значением биения, особенно при измерениях в нанометровом диапазоне, используются реверсивные методы (например, реверсивные методы Дональдсона и Естлера) [2-5]. При реверсивных методах, влияние отклонения формы эталонных деталей исключается применением т.н. инверсией входных величин (методом исключения погрешности по знаку). Биение измеряется два раза – до и после поворота эталонной детали на 180° и соответствующее репозиционирование измерительной головки (датчика).

В настоящем докладе, рассматриваются четыре нереверсивных метода оценки биения оси вращения, нашедшие применение в метрологической практике.

2. Методы измерения

Как было указано выше, оценивание блуждающего биения, основывается на результатах измерения биения плоских и ротационных поверхностей эталонных деталей в радиальном и аксиальном направлении. Измеренные значения этого биения, в границах одного оборота, включают в себе первую гармоническую составляющую, связанную соответственно с эксцентриситетом и неперпендикулярностью соответствующей поверхности эталонных деталей относительно виртуальной оси вращения. На профилограммах, построенных по этим значениям, эта гармоническая составляющая выражается как эксцентриситет центра средней окружности измеренного кругового профиля относительно оси вращения, а блуждающее биение Δ_i – как отклонение от средней окружности (рис. 1).

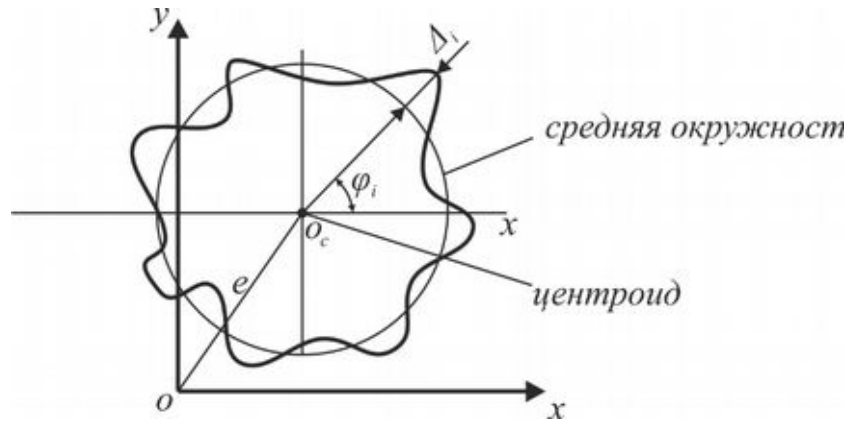


Рисунок 1. Представление блуждающего биения в виде профилограммы

Метод 1

Метод 1 используется часто в метрологической практике для определения радиального Δ_p и аксиального Δ_a блуждающего биения. Но он позволяет также определение и углового блуждающего биения Δ_y . Процедура включает измерение радиального и аксиального биения поверхности эталонной стеклянной полусферы, установленной на вращающемся столе исследуемого объекта (рис. 2^{а)} б)) с помощью двух измерительных головок (ИГ₁ и ИГ₂) и последующей обработки результатов A_{1i} и A_{2i} этих измерений, т.е. показаний измерительных головок при вращении стола на угол φ_i .

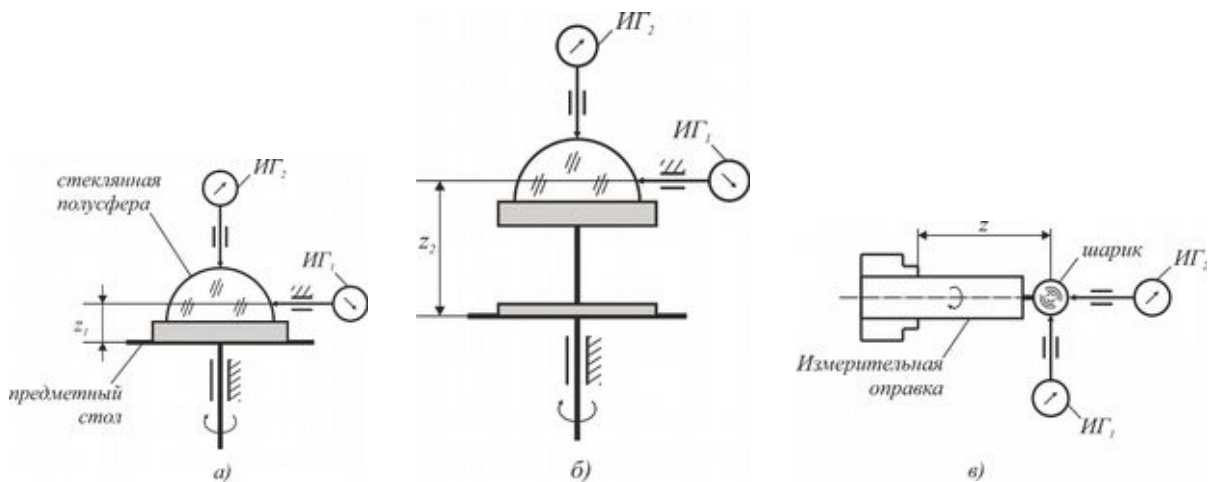


Рисунок 2. Схема измерения радиального аксиального и углового блуждающего биения (Метод 1)

Собственным отклонением формы эталонной полусферы можно пренебречь, и тогда радиальное биение Δ_{p_i} проявляется как отклонение от круглости измеряемого профиля полусферы.

Аксиальное биение Δ_a можно определить непосредственно по результатам измерения с ИГ₂.

Аналогично радиальному биению и аксиальное блуждающее биение, при заданном угле вращения φ_i можно представить в виде профилограммы как отклонение от средней окружности.

При измерении радиального и аксиального блуждающего биения шпинделя металлорежущих станков используется оправка с шариком (рис. 2^{б)}) [1].

Угловое блуждающее биение Δ_y , определяется по результатам измерения радиального биения профиля полусферы на разной высоте z от предметного стола (рис. 2^{а) б)}). Угол α_i , между i -той мгновенной осью вращения и виртуальной базовой осью, определяется разностью между Δ_{pi} двух находящихся на расстоянии Δz друг от друга сечений по формуле:

$$\alpha_i = \arctg \frac{\Delta_{piz1} - \Delta_{piz2}}{\Delta z} \quad (1)$$

Представление блуждающего радиального, аксиального и углового биения в виде профилограммы для оценки отклонения от окружности позволяет оценить как их текущие значения, как функции угла поворота φ_i , так и их максимальное рассеивание в виде размаха.

Метод 2

Этим методом можно определить аксиальное и угловое блуждающее биение (рис. 3).

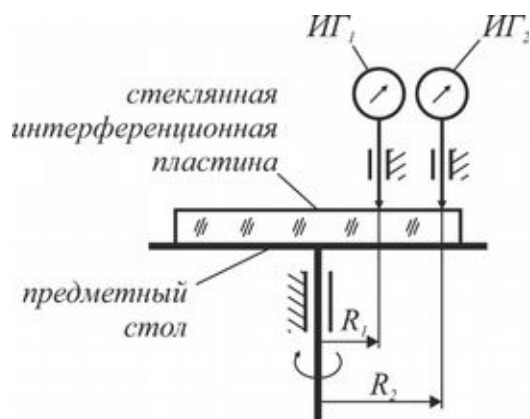


Рисунок 3. Схема измерения аксиального и углового блуждающего биения (Метод 2)

С помощью двух измерительных головок (ИГ₁ и ИГ₂) измеряется торцевое биение установленной на предметном столе стеклянной интерференционной пластины по круговым дорожкам с радиусом R_1 и R_2 . При хорошем центрировании линия измерения с ИГ₁ приблизительно

совпадает с осью вращения, т.е. можно принять, что $R_1 \approx 0$ и непосредственно по ее показаниям A_{1i} можно оценить аксиальное блуждающее биение. Торцевое биение, измеренное с ИГ₂, включает в себе как аксиальное Δ_a так и угловое Δ_y блуждающее биение.

По значениям A_{2i} и A_{1i} строятся профилограммы по которым текущие значения $\Delta_{a_{1i}}$ и $\Delta_{a_{2i}}$ и их размах оцениваются как отклонения от средней окружности.

Текущий угол α_i , между мгновенными осями вращения и виртуальной базовой осью, т.е. текущие значения углового блуждающего биения Δ_{y_i} , определяются выражением

$$\alpha_i = \operatorname{arctg} \frac{\Delta_{a_{2i}} - \Delta_{a_{1i}}}{R_2} \quad (2)$$

Метод 3

Этот метод используется обычно для определения аксиального блуждающего биения и отклонения от перпендикулярности предметного стола, относительно оси вращения (рис. 4).

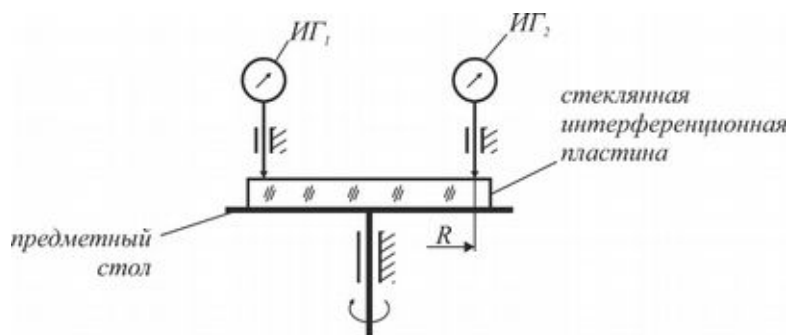


Рисунок 4. Схема измерения аксиального и углового блуждающего биения (Метод 3)

Измеряется одновременно торцевое биение, установленной на предметном столе стеклянной интерференционной пластины по круговой дорожке с радиусом R , с помощью двух измерительных головок (ИГ₁ и ИГ₂) расположенных на 180° . Аксиальное и угловое блуждающее биение, определяются по показаниям A_{1i} и A_{2i} измерительных головок при вращении стола на угол φ_i .

Вычисляют полусумму $\Delta A'_i$ и полуразницу $\Delta A''_i$ этих показаний, отражающие соответственно аксиальное Δ_{a_i} и угловое биение Δ_{y_i} .

$$\Delta A'_i = \frac{A_{1i} + A_{2i}}{2} \quad (3)$$

$$\Delta A_i'' = \frac{A_{1i} - A_{2i}}{2} \quad (4)$$

Торцевое биение $\Delta A_i''$ по радиусу R , выраженное в угловых единицах α_i , определяется выражением.

$$\alpha_i = \arctg \frac{\Delta A_i''}{R} \quad (5)$$

По значениям $\Delta A_i'$ и $\Delta A_i''$ (соответственно α_i) строятся профилограммы, по которым текущие значения аксиального Δ_{a_i} и углового Δ_{y_i} блуждающего биения оцениваются как отклонения от их средних окружностей, аналогично методам 1 и 2.

Метод 4

Измерением по этому методу можно определить аксиальное и угловое блуждающее биение.

На предметном столе вращающегося модуля, устанавливается стеклянная интерференционная пластина с пренебрежимо малыми отклонениями от плоскости. С помощью трех и более ИГ расположенных симметрично по окружности с радиусом R , измеряется торцевое биение пластины при ее поворачивании на угол φ_i (рис. 5).

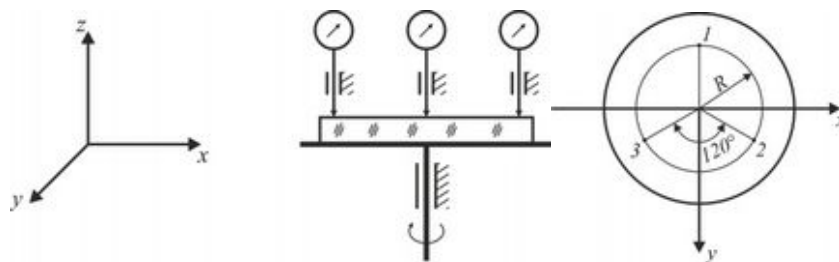


Рисунок 5. Схема измерения аксиального и углового блуждающего биения (Метод 4)

По показаниям измерительных головок, при заданном угле поворота стола φ_i , т.е. по координатам трех или более точек пластины в координатной системе XYZ, строится плоскость и вычисляется положение их центра по оси Z (координата z_i) и положение нормального вектора этой плоскости относительно оси вращения. Ось вращения ориентирована по оси Z.

Колебание координаты z_i центра, выражает аксиальное блуждающее биение, а колебание положения нормального вектора – блуждающее угловое биение. И оба вида биения могут быть выражены их текущими значениями, относительно соответствующего центра или их размахом.

3. Экспериментальные исследования

Целью экспериментальных исследований, является оценивание и сравнение метрологических и эксплуатационных возможностей, рассматриваемых методов измерений, при одинаковых условиях измерения.

Определяются радиальное, аксиальное и угловое биение двух ротационных модулей со значительной разницей в точности вращения, обусловленной разницей подшипников – подшипники качения (при первом модуле) и аэростатические подшипники (при втором модуле).

Экспериментальная постановка позволяет реализовать каждый из описанных методов. В качестве эталонных деталей используются: стеклянная полусфера, с отклонением от круглости 0.05 мкм и стеклянная интерференционная пластина, с отклонением от плоскостности 0.07 мкм. В качестве измерительных головок, применяются линейные инкрементальные датчики HEIDENHAIN ST1288, связанные с многоканальным отсчитывающим прибором HEIDENHAIN GAGE-CHEK ND2108. При дискретности отсчета 1 мкм максимально допустимая погрешность $MPE = \pm 1$ мкм. Для определения текущего угла поворота φ_i , служат встроенные в исследуемых ротационных модулях угловые инкрементальные датчики HEIDENHAIN ROD 486.

При конкретном эксперименте, используются пять датчиков (четыре расположенных на 90° по окружности с радиусом $R = 50$ мм и один датчик в центре окружности). Показания, связанные с ними, отсчитываются одновременно через 10° за один оборот, т.е. в 36 точках измеряемого профиля эталонной детали. Далее, показания соответствующих датчиков, используются для реализации методов от 2 до 4. Таким образом, обеспечиваются одинаковые условия измерения.

При реализации метода 1 используются два датчика. Второй из них, измеряющий аксиальное биение, имеет плоский измерительный наконечник. Расстояние между измеряемыми сечениями, при оценке углового биения $\Delta z = 300$ мм.

Для выделения систематической и случайной составляющей блуждающего биения, измерения проводятся при 10 последовательных оборотах, при скорости вращения 4 об/мин.

Результаты измерения представлены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1 Результаты измерения Модуля 1

Метод	Модуль 1								
	Радиальное биение			Аксиальное биение			Угловое биение		
	Δ_p	$u_c \Delta_p 1$	$u_c \Delta_p 2$	Δ_a	$u_c \Delta_a 1$	$u_c \Delta_a 2$	Δ_γ	$u_c \Delta_\gamma 1$	$u_c \Delta_\gamma 2$
1	59.5	3.4	0.25	9.1	0.76	0.25	560	34	7.2

2	-	-	-	9.3	0.73	0.25	592	20.6	7.2
3	-	-	-	9.1	0.73	0.18	518	19	3.6
4	-	-	-	9.1	0.76	0.15	518	19	2.4

Замечания:

1. Биение Δ и соответствующие неопределенности $u_c \Delta_1$ и $u_c \Delta_2$ определены как средние арифметические из 10 наблюдений.
2. Значения радиального и аксиального биения даны в мкм, а углового биения в мкрад.

Таблица 2 Результаты измерения Модуля 2

Метод	Модуль 2								
	Радиальное биение			Аксиальное биение			Угловое биение		
	Δ_p	$u_c \Delta_{p1}$	$u_c \Delta_{p2}$	Δ_a	$u_c \Delta_{a1}$	$u_c \Delta_{a2}$	Δ_γ	$u_c \Delta_{\gamma1}$	$u_c \Delta_{\gamma2}$
1	1.7	0.095	0.35	0.8	0.13	0.25	48	1.28	7.2
2	-	-	-	0.7	0.12	0.25	28	0.64	7.2
3	-	-	-	0.7	0.03	0.18	22	1.9	3.6
4	-	-	-	0.6	0.03	0.15	22	1.9	2.4

Замечания:

1. Биение Δ и соответствующие неопределенности $u_c \Delta_1$ и $u_c \Delta_2$ определены как средние арифметические из 10 наблюдений.
2. Значения радиального и аксиального биения даны в мкм, а углового биения в мкрад.

Оценка блуждающего биения как отклонение точек профилограммы относительно средней окружности позволяет, с одной стороны, исключить первую гармоническую составляющую, обусловленную эксцентриситетом и неперпендикулярностью эталонных деталей относительно оси вращения, а с другой стороны – представить блуждающее биение, как виртуальный выявленный круговой профиль и оценить его моментное значение и размах, через отклонения формы этого профиля, аналогично отклонению от круглости профиля реальной ротационной детали [6]. Тогда неопределенность результата измерения, можно оценить по значениям неопределенности положения двух экстремальных точек рассматриваемого профиля.

Неопределенность результата измерения блуждающего биения $u_c \Delta$ содержит две основные составляющие – $u_c \Delta_1$ и $u_c \Delta_2$.

$$u_c \Delta = \sqrt{u_c \Delta_1^2 + u_c \Delta_2^2}, \quad (6)$$

где $u_c \Delta_1$ – неопределенность, связанная со свойствами исследуемого объекта, т.е. отражающая случайную составляющую блуждающего биения;

$u_c \Delta_2$ – неопределенность, связанная с процессом самого измерения, т.е. с реализацией виртуального выявленного профиля.

При одинаковых условиях измерения $u_c \Delta_2$ зависит от точности измерительной системы, измерительной процедуры и алгоритма обработки первичной измерительной информации.

При $MPE = \pm 1$ мкм оценивании типа В и принятом прямоугольном законе распределения, среднеквадратическая неопределенность, связанная с измерительной системой равна 0.58 мкм при однократном и 0.18 мкм при десятикратном измерении. Она входит в $u_c \Delta_2$, в зависимости от процедуры и алгоритма обработки первичной измерительной информации соответствующего метода (см. табл. 1 и табл. 2). Как видно из таблиц 1 и 2 $u_c \Delta_2$ наименьшая при методе 4.

Сравнение $u_c \Delta_2$ при методах 1 и 2 с альтернативными реверсивными методами Дональдсона и Естлера [3, 4] показывает, что при пренебрежимо малых отклонениях формы эталонных деталей и равных других условиях, в результате двукратного измерения $u_c \Delta_2$ при реверсивных методах на 30% меньше.

Первая составляющая неопределенности результата измерения $u_c \Delta_1$ практически не зависит от метода измерения и логично является доминирующей при модуле 1.

Разница между оцененными значениями блуждающего биения при рассматриваемых четыре методах измерения находится в пределах неопределенности.

4. Выводы

1. Точность измерения рассматриваемых методов, при других равных условиях определяется измерительной процедурой и алгоритмом обработки первичной измерительной информации. Эта точность самая высокая при методе 4.
2. Основными критериями, при выборе одного или другого из рассматриваемых методов, наряду с точностью, являются: наличие соответствующих эталонных деталей и число измерительных датчиков, программное обеспечение для обработки первичной измерительной информации, простота измерительной оснастки и удобство при работе. Для каждого конкретного случая этот выбор требует соответствующего анализа на базе экономической целесообразности.

Литература

1. ISO 230-7:2015 Test code for machine tools -- Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation.
2. Salsbury, J. G., 2003, —Implementation of the Estler Face Motion Reversal Technique,|| J. Soc. Precis. Eng., 27(2), p. 189–194.
3. Donaldson, R. R., 1972, —A Simple Method for Separating Spindle Error From Test Ball Roundness Error,|| CIRP Ann., 21(1), p. 125–126.
4. Estler WT. Calibration and use of optical straightedges in the metrology of precision machines. Optical Engineering 1985;24 (3):372-9.
5. Grejda, R. D., Marsh, E. R., and Vallance, R. R., 2005, —Techniques for Calibrating Spindle With Nanometer Error Motion,|| ASPE Journal of Precision Engineering, 29(1), p. 113–123.
6. Радев Х.К., Богев В.Й., Василев В.А., 2011, Неопределенность оценок отклонений формы геометрических элементов, Системи обробки інформації, 1(91), стр. 62-66