



Хуссейн Шиабат Аль Хамд Могахед Хуссейн

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ
ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА
ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ
СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

Специальность 05.11.13– Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный университет им. И.И. Ползунова»

- Научный руководитель:** **Якунин Алексей Григорьевич,**
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Светлаков Анатолий Антонович,**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Томский государственный
университет систем управления и
радиоэлектроники», профессор кафедры
электронных средств автоматизации и
управления
Гужов Владимир Иванович,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Новосибирский государственный
технический университет», профессор кафедры
систем сбора и обработки данных
- Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Сибирский федеральный
университет»

Защита состоится «28» февраля 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, проспект Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «___» декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н.

Васендина Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В последнее время методы непрерывного оперативного контроля получают все большую востребованность при решении задач технического и природного мониторинга в связи с ужесточением регламента реализации технологических процессов, участившимися случаями возникновения различных экстремальных ситуаций, техногенных и экологических катастроф, развитием фундаментальных исследований в области изучения свойств природной среды и климатических явлений.

При этом, из-за масштабности современных производств и необходимости осуществления контроля и выявления нештатных ситуаций на больших территориях возникает проблема необходимости эффективного сбора, обработки и хранения большого объема данных с огромного числа первичных измерительных преобразователей.

Однако, существующие системы мониторинга используют для идентификации нарушений закономерностей в регистрируемых на объектах контроля информативных сигналах преимущественно пороговые методы, в которых величина порога должна устанавливаться при настройке системы и не зависит от особенностей динамики информативных сигналов. Кроме того, с развитием телекоммуникационной инфраструктуры и удешевлением устройств первичного сбора данных резко возрос объем измерительной информации, что привело к проблеме не только ее своевременной потоковой обработки, но и передачи, хранения и обеспечения к ней оперативного доступа.

В этой связи становится актуальной разработка информационного обеспечения, программно-технических средств и алгоритмических решений, способных эффективно выявлять аномалии и нарушения закономерностей в контролируемых процессах с учетом их особенностей, а также минимизировать объем передаваемой и хранимой информации без потери ее прагматической ценности.

Объектом исследования являются собираемые с первичных измерительных преобразователей данные оперативного контроля техногенных и природных объектов, а также методы, необходимые для их непрерывной диагностики и выявления нарушений их функционирования.

Предмет исследования – алгоритмы на основе статистических методов сбора, хранения и обработки информативных сигналов, формируемых в системах непрерывного оперативного мониторинга природных и техногенных объектов.

Основной **целью диссертационного исследования** является совершенствование алгоритмического и программного обеспечения систем мониторинга техногенных и природных объектов путём модификации статистических алгоритмов, используемых для выявления нарушений закономерностей в информативных сигналах контролируемых техногенных и природных объектов и обеспечение компактификации передачи и хранения таких сигналов.

Данная область исследований соответствует следующим пунктам паспорта специальности ВАК 05.11.13: п.4. «Разработка методического, технического, приборного и информационного обеспечения для локальных, региональных и

глобальных систем экологического мониторинга природных и техногенных объектов» и п.6 «Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля».

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были **сформулированы следующие задачи:**

- провести анализ методов выявления и идентификации аномалий и иных нарушений закономерностей в информативных сигналах систем мониторинга;
- осуществить модификацию существующих онлайн-методов обнаружения таких аномалий в сигналах системы мониторинга, как их перепады и выбросы;
- для объектов контроля, характеризующихся наличием в них циклических периодических процессов, усовершенствовать метод обнаружения такой аномалии, как нарушение цикличности таких процессов и разработать алгоритмы восстановления потерянных и краткосрочного прогнозирования наблюдаемых данных;
- разработать способы компактного хранения и передачи данных, полученных в ходе мониторинга;
- осуществить апробацию разработанных методов и реализующего их алгоритмического и программно-технического обеспечения для решения практических задач контроля в информационно-измерительных системах.

Основными **методами решения поставленных задач** являются методы статистической обработки экспериментальных данных, методы вычислительной математики, методы цифровой обработки сигналов и методы теории погрешностей.

Теоретической основой исследования служили труды учёных и специалистов, в числе которых J. Yang, R. Agrawal, S. Makridakis, F. Rasheed, G. Welch, J. Contrera, J. W. Taylor, G. Anandalingam, K. Chitharanjan, C. Shahabi, Z. Bakar, D. Janakiram, H. S. Hippert, B. Ryabko, J. C. Palomares-Salas, K. A. Cullen, R. C. Tabony, T. Al-Hawari, W. Charytoniuk, E. Keogh, H. E. Solberg, P. A. Hancock, C. J. Willmott, X. Song, M. G. Elfekey, B. Iglewicz, V. Barnett, Новиков М.М., Айвазян С.А., Дубров А.М., Елисеева И.И., Загоруйко Н.Г., Наследов А.Д., Попов В.Н, Пустыльник Е.И., Шпаков П.С., Юзбашев М.М. и многие другие.

Научная новизна исследования заключается в совершенствовании основанного на применении статистического подхода алгоритмического и программного обеспечения, реализующего методы выявления нарушений закономерностей в информативных сигналах контролируемых объектов и включает следующие пункты:

1. Разработаны новые методы обнаружения выбросов и перепадов в контролируемых системой мониторинга процессах на основе сравнения трендов смежных интервалов наблюдения, а также предложена корректировка значений пороговых уровней классических онлайн-методов обнаружения аномалий, что позволяет повысить точность обнаружения аномалий в контролируемых системой мониторинга процессах.

2. Усовершенствован основанный на геометрических паттернах алгоритм выявления нарушений цикличности в периодических сигналах, отличающийся от прототипа возможностью его применения в онлайн-режимах измерений, учетом тренда на стадии формирования и применения паттерна и повышенной достоверностью краткосрочного прогнозирования и восстановления потерянных данных.
3. Разработаны основанные на разностных схемах модификации алгоритмов компрессии данных как с потерями, так и без потерь, и организации их хранения в целочисленном виде с учетом периода выборки, обеспечивающие возможность хранения больших объемов информации для многоканальных систем мониторинга техногенных и природных объектов.

Обоснованность и достоверность научных положений, методов и рекомендаций обеспечивается за счет использования теоретически обоснованных вычислительных методов, подтверждена результатами экспериментальной проверки, наличием зарегистрированных в установленном порядке реализующих разработанные алгоритмы программных продуктов. Вычислительные эксперименты выполнялись с помощью разработанных автором, в том числе и зарегистрированных, прикладных программ.

Теоретическая ценность диссертации состоит в развитии статистических методов идентификации аномалий в сигналах, основанных на учете особенностей динамики изменения параметров контролируемых процессов в системе мониторинга, а также в развитии методов онлайн-компрессии передаваемых и хранимых данных.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что применение созданных в ходе проведения исследований алгоритмов обработки информативного сигнала и программно-технических решений для систем мониторинга техногенных и природных объектов позволяет:

- уменьшить вероятность появления ошибок первого и второго рода при выявлении аномалий и иных нарушений присутствующих в сигнале закономерностей;
- повысить быстродействие, а также сократить объем хранимых данных.

Это снижает требования, предъявляемые к используемым в приборах и методах контроля средствам вычислительной техники, положительно отражается на эффективности работы системы оперативного контроля, расширяет ее функциональность и спектр контролируемых параметров.

Реализация результатов работы.

Исследования по тематике диссертационной работы велись в рамках следующих госбюджетных НИР: «Моделирование динамических температурных полей в системах экстраполирующего температурного мониторинга техногенных объектов» (2010-2012 гг.), государственного задания вузам на 2013-2015 гг. (тема «Развитие гибридных моделей и методов оценки и прогнозирования состояний техногенных, социально-экономических и природных объектов» (2013-2015 гг.).

Результаты работы внедрены и использовались при разработке системы оперативного контроля потребления энергоресурсов университетского кампуса АлтГТУ (г. Барнаул) и мониторинга метеоданных и в работах, выполняемых институтом водных и экологических проблем СО РАН.

Апробация работы. Результаты исследований апробированы на научно-технических и научно-практических конференциях различного уровня: ВНК "Инновационные процессы в гуманитарных, естественных и технических системах" (Таганрог, 2012 г.), Международной НТК «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.), IV НПК "Информационно-измерительная техника и технологии" (Томск, 2013г.), II Всероссийской с международным участием НПК по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (Томск, 2013 г), VI Международной научно-практической конференции «Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов (МППОС– 2016)».

На защиту выносятся:

- модифицированные пороговые методы идентификации нарушений закономерностей (перепады сигналов, выбросы, нарушения цикличности), наблюдаемых в информативных сигналах контролируемых объектов, пригодные для использования в режиме реального времени на устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами;
- метод формирования шаблона тренда по данным измерений с учетом тренда детерминированной составляющей и применение шаблона для оценки нарушения цикличности в информативных сигналах объектов, характеризующихся наличием в них периодических процессов, для восстановления потерянных данных и для краткосрочного прогнозирования;
- модифицированные методы сжатия информативных сигналов в системах мониторинга природных и техногенных объектов, оптимизированные под передачу данных, содержащих перепады и выбросы и случайную составляющую, не являющуюся в общем случае стационарным эргодическим процессом;
- результаты практического внедрения разработанных методов и средств для оперативного контроля техногенных объектов и природной среды, включая интерфейсные решения для визуализации контролируемых процессов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ, в том числе 8 статей из Перечня ВАК (из них одна – входящая в базу научного цитирования Scopus), 4 статьи и доклады в других изданиях, 10 тезисов докладов. На объекты интеллектуальной собственности получено 3 свидетельства о регистрации программ и одно – о регистрации базы данных.

Личный вклад автора. Все основные научные результаты, выносимые на защиту и составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в разработке модификаций известных статистических методов обнаружения аномалий и сжатия данных, создании и отладке программного обеспечения, проведении вычислительного эксперимента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Всего в работе 158 страниц, 1 приложение, 67 рисунков и 4 таблицы. Список источников включает 142 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость полученных

результатов, основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и дано краткое описание структуры работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу известных моделей и методов обнаружения нарушений закономерностей в протекании процессов контролируемых объектов. Очерчен круг рассматриваемых в данной работе видов нарушений регулярности контролируемых процессов, к которым были отнесены перепады уровней, выбросы, нарушения цикличности, кратковременное отсутствие данных измерений. Обозначена проблема необходимости обеспечения компактного и надежного способа передачи и хранения связанных с мониторингом больших массивов данных в режиме реального времени.

Вторая глава начинается с описания модели сигнала, использованной в вычислительных экспериментах для исследования разрабатываемых алгоритмов, задаваемой уравнением:

$$x(t) = x_s(t) + x_p(t) \cdot k_{am}(t) + x_a(t) + x_n(t), \quad (1)$$

где $x_s(t) = A_0 \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t)$ – составляющая, отражающая изменение тренда информативного сигнала; $x_p(t) = A_p \cdot \sin(2\pi f_p \cdot t)$ – периодическая составляющая; $k_{am}(t)$ и $x_a(t)$ – соответственно, мультипликативная и аддитивная аномальные составляющие и $x_n(t)$ – шумовая составляющая.

Назначение x_s – моделировать квазидетерминированную часть сигнала, создавая на нем возрастающий и ниспадающий тренд. Частота этой составляющей f_0 многократно ниже частоты периодической составляющей f_p . Вместо синусоиды периодическая составляющая задавалась также в виде сигнала треугольной формы со сглаженными переходами:

$$x_p(t) = \begin{cases} F(t) * A_p \left(\frac{t}{2f_p} - 2i \right), & \text{если } \frac{i}{f_p} < t \leq \frac{i+0,5}{f_p}; \\ F(t) * A_p \left(2i - \frac{t}{2f_p} \right), & \text{если } \frac{i+0,5}{f_p} < t \leq \frac{i+1}{f_p} \end{cases} \quad (2)$$

где знак «*» означает свертку функций, $\tau = 0, 1/f_p$ и $F(t)$ – Гауссова функция.

Для описания мультипликативной аномальной составляющей использовалась функция прямоугольного окна с меньшей единицы амплитудой, начало и конец которого совпадали с началом и концом i -го периода:

$$k_{am}(t) = k_{m0} \cdot \text{rect}(f_p \cdot t - i + 0,5), \quad (3)$$

где $\text{rect}(t)$ – прямоугольная функция, равная нулю при $|t| > 0,5$

Вид аддитивной аномальной составляющей зависел от вида аномалии. В простейшем случае для однократных перепадов уровня, возникающих в момент времени t_0 , они представлялись в виде функции Хевисайда:

$$x_a(t) = A_a \cdot h(t - t_0), \quad (4)$$

где $h(t)$ – функция Хевисайда, A_a – величина перепада

Выбросы моделировались в виде двух следующих друг за другом перепадов с одинаковой, но разной по знаку амплитудой. Для более адекватного реальным сигналам описания перепадов и выбросов их границы задавались линейно

пологими, после чего выполнялась свертка полученного результата с гауссоидой аналогично (2).

Далее в главе описаны предложенные модификации онлайн-статистических алгоритмов обнаружения перепадов, выбросов и нарушений циклов в периодических процессах и результаты их тестирования.

Для обнаружения перепадов был предложен алгоритм, основанный на сравнении средних скоростей на смежных, равно протяженных и содержащих по n отсчетов временных интервалах, на которые разбиваются результаты измерений $x(t)$. Для каждого из них сначала вычисляется среднее значение контролируемой величины:

$$x_k = \frac{1}{n} \sum_{i=(k-1)*n+1}^{k*n} x(t_i), \quad (5)$$

где k – номер текущего интервала. Затем для каждого такого интервала по двухточечной схеме находится усредненная производная сигнала $x(t)$, представляющая собой текущую скорость изменения значения контролируемой величины x на k -м интервале:

$$v_k = (x_k - x_{k-1}) \cdot \frac{1}{n}, \quad (6)$$

На следующем шаге находится усредненное значение модуля скорости изменения сигнала за последние N интервалов:

$$\bar{v}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k |v_i|, \quad (7)$$

Далее находится отклонение текущего значения скорости на k -м интервале от его среднего значения с учетом знака:

$$\Delta v_k = v_k - \bar{v}_k \text{sign}(v_k) \quad (8)$$

и для Δv_k находится модифицированное стандартное отклонение:

$$\Delta v = \delta = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=k-N+1}^k \Delta v_k^2}, \quad (9)$$

Если сигнал имеет постоянный тренд, то среднее значение скорости на всех k -х интервалах будет одинаковым, отклонение от скорости для всех интервалов будет нулевым и, соответственно, нулевым будет его стандартное отклонение. В противном случае, при наличии вариации тренда, модифицированное стандартное отклонение будет отлично от нуля, и его можно будет использовать как критерий для нахождения интервалов, содержащих перепады:

$$\forall \Delta v_k : \begin{cases} |\Delta v_k| \leq \delta : \text{нормальная зона;} \\ \delta < |\Delta v_k| < K_\varepsilon \delta : \text{критическая зона;} \\ |\Delta v_k| \geq K_\varepsilon \delta : \text{аномальный перепад,} \end{cases} \quad (10)$$

где K_ε – постоянный коэффициент метода, равный 2.

Для проверки предложенного алгоритма был проведен вычислительный эксперимент с применением модели сигнала (1).

Размер интервала усреднения и минимальный шаг следования перепадов выбирались так, чтобы на один интервал приходилось не более одного перепада. Рисунок 1 иллюстрирует работу алгоритма идентификации при отношении шум/сигнал (NSR, noise to signal ratio), равном -20дБ. Под NSR здесь и далее понимается отношение величины перепада A_a к среднеквадратичному отклонению шумовой составляющей отсчета.

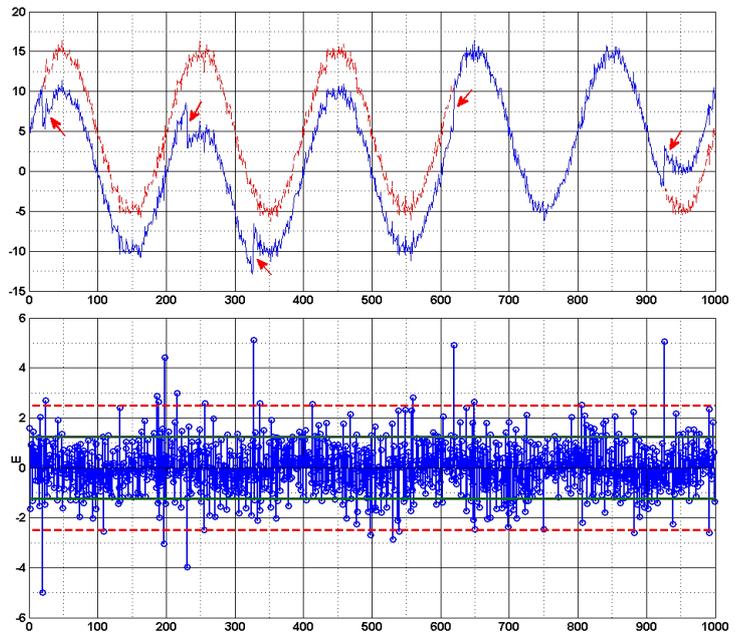


Рисунок 1– Модельный сигнал (вверху) и отклонения текущего значения скорости от среднего значения (внизу) для SNR=20дБ

Для оценки влияния значения NSR на вероятность появления ошибок идентификации перепада (как первого, так и второго рода), были проведены дополнительные исследования, результаты которых показаны на рисунке 2а. На этом рисунке для сравнения показаны зависимости ошибки обнаружения перепадов от NSR для байесовского метода, дающего наилучшие результаты по сравнению с такими методами обнаружения перепадов, как Z-score и τ – Thompson. Как видно из рисунка, предлагаемый метод имеет явные преимущества по сравнению с референтным, особенно при наличии больших шумов.

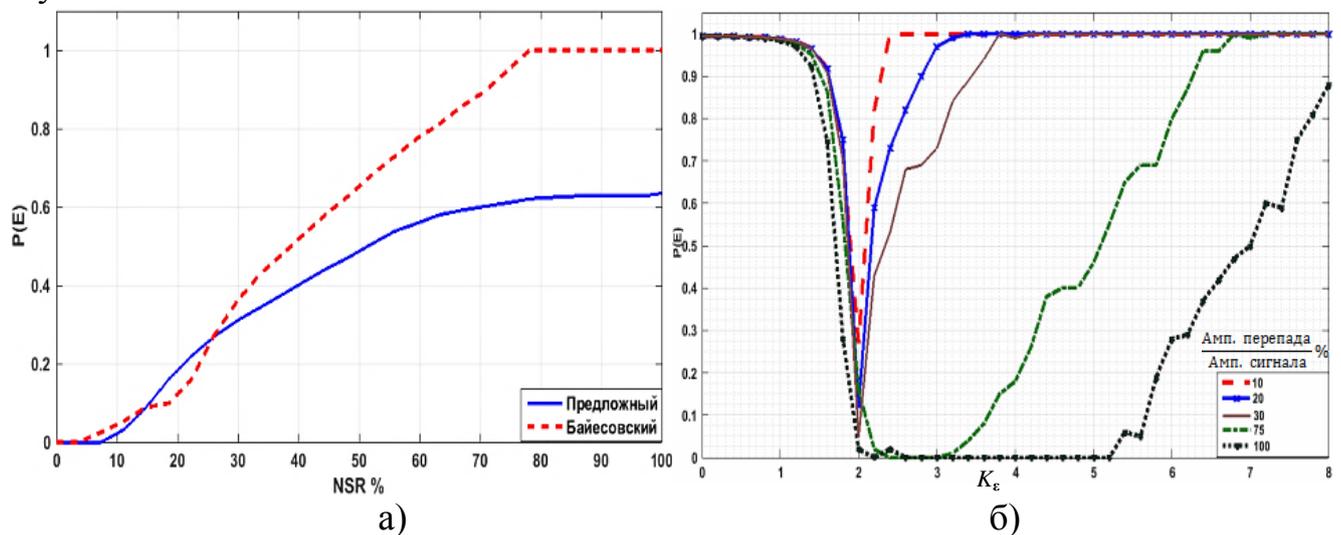


Рисунок 2– Зависимость вероятности ошибки идентификации перепада от отношения SNR для предложенного метода и байесовского метода (а) и зависимость вероятности ошибки обнаружения перепада предложенным методом от задающего порога срабатывания коэффициента K_e (б)

Дополнительно были проведены исследования влияния значений коэффициента K_e предложенного метода на вероятность ошибки обнаружения (рисунок 2б), из которых следовало, что именно при $K_e = 2$ достигается необходимый для реализации метода оптимум. При увеличении K_e возрастают ошибки второго рода, то есть повышается вероятность пропуска перепада, а при

уменьшении K_ε возрастают ошибки первого рода, то есть возрастает вероятность принятия за перепад шумовой составляющей. Предлагаемый метод показал высокую эффективность и при анализе реальных данных температурного мониторинга, полученных с описанной в 4 главе информационно-измерительной системы, а также данных, взятых с сайта [http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Новомихайловке,_Барнауле_\(аэропорт\),_METAR](http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Новомихайловке,_Барнауле_(аэропорт),_METAR).

Для наглядной визуализации содержащих аномалии данных было также предложено использовать применяемый на фондовых рынках метод японских свечей. При этом вместо (5) можно использовать полусумму значений на входе и выходе свечей.

Метод обнаружения аномальных выбросов отличается от описанного выше тем, что вместо нахождения задаваемой уравнением (6) текущей скорости по трехточечной схеме находится ее изменение:

$$a_k = (x_k + x_{k-2} - x_{k-1}) \quad (11)$$

Результаты применения предложенного метода для температурных измерений приведены на рисунке 3, из которого видно, что метод позволяет идентифицировать аномальные выбросы типов А и В.

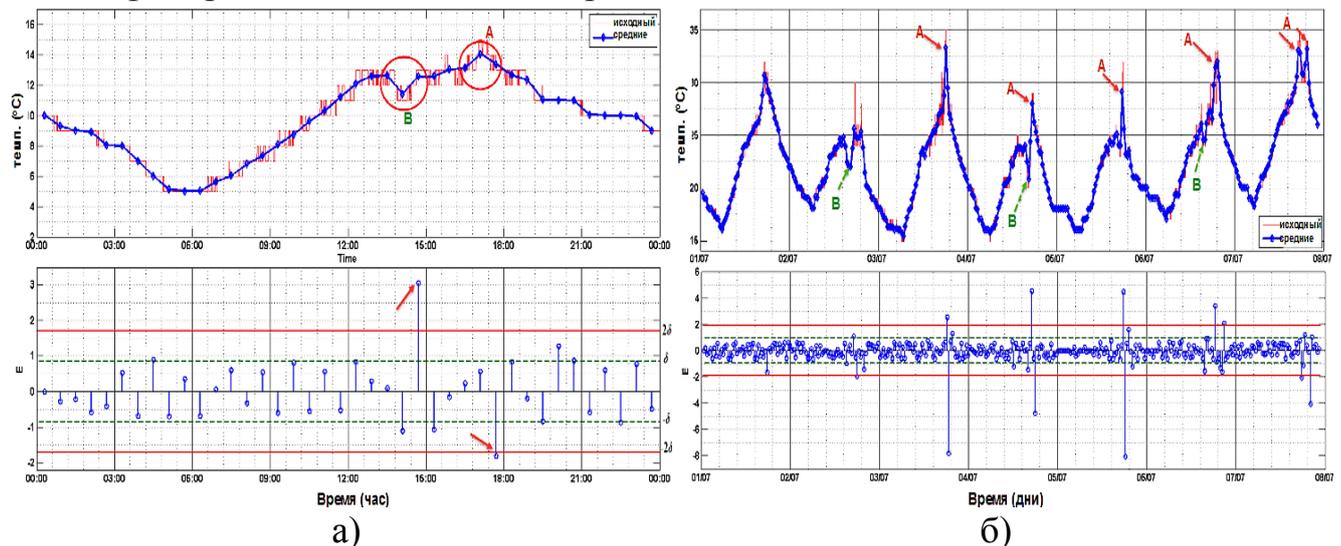


Рисунок 3– Обнаружение выбросов типа В и А на суточных колебаниях уличной температуры (а, в день 20.6.2014) и колебаниях в течение недели (б, период 1-8.7.2014)

Для того, чтобы объективно сопоставить возможности рассмотренных методов, был проведен вычислительный эксперимент с применением описанной в уравнении (1) модели информационного сигнала. Исследовалась зависимость суммарной ошибки обнаружения выбросов (первого и второго рода) в зависимости от отношения сигнал/шум при различных отношениях амплитуды выбросов к амплитуде сигнала, отношениях длительности выброса к периоду гармонических колебаний и при различных длительностях интервала наблюдения. В качестве примера на рисунке 4 показаны такие зависимости для случая $A_a/A_o=0,2$, $f_o \cdot \tau_a=0,1$. Период гармонических колебаний содержал 250 отсчетов.

Для сравнения на этом же рисунке приведена зависимость для референтных методов Z-score и τ – Thompson, также широко используемых для обнаружения выбросов.

Далее в главе описывается разработка методов обнаружения нарушений цикличности в периодических процессах, восстановления потерянных данных и их краткосрочного прогнозирования.

Суть предлагаемого метода заключается в том, что в процессе обработки данных из описываемого уравнением (1) исходного сигнала выделяется аperiodическая составляющая $x_s(t)$, и затем, перед формированием паттерна, она вычитается из исходного сигнала. Для осуществления такого разделения предполагается, что составляющая сигнала $x_s(t)$ представляет собой гладкую функцию, спектр которой ограничен частотой, многократно меньшей частоты основного цикла f_p , периодической составляющей сигнала $x_p(t)$. Это позволяет более точно формировать шаблон для периодической составляющей, восстанавливать форму сигнала для текущего цикла с учетом наличия в нем низкочастотного тренда, а, значит, и более надежно выявлять любые случаи отклонения сигнала от его среднестатистического значения.

При описании алгоритмов методов предполагается, что каждый k -й цикл содержит по m отсчетов контролируемой величины $x_i^k, i = 1, \dots, m$ уже предварительно сглаженных значений контролируемого параметра.

Так, алгоритм метода для обнаружения нарушений цикличности данных включает следующие шаги.

Так, алгоритм метода для обнаружения нарушений цикличности данных включает следующие шаги.

ШАГ 1. После поступления m отсчетов очередного цикла находится среднее значение контролируемой величины для этого цикла \bar{x}_k .

ШАГ 2. В соответствии с реализованном в алгоритме методом интерполяции находятся значения отсчетов предыдущего цикла $x_{s_i}^{k-1}$ для аperiodической составляющей сигнала $x_s(t)$ по значениям средних значений контролируемой величины текущего и двух циклов сигнала, предшествующих текущему циклу. Например, при линейной интерполяции эти значения определяются из выражения

$$x_{s_i}^{k-1} = \begin{cases} \frac{\frac{m}{2} - i}{m} \bar{x}_{k-2} + \frac{\frac{m}{2} + i}{m} \bar{x}_{k-1} & \text{для } i = 1 \dots \frac{m}{2} \\ \frac{3m - 2i}{2m} \bar{x}_{k-1} - \frac{\frac{m}{2} - i}{m} \bar{x}_k & \text{для } i = \frac{m}{2} + 1 \dots m \end{cases} \quad (12)$$

ШАГ 3. Выполняется компенсация обусловленного аperiodической составляющей тренда контролируемого параметра и восстанавливаются значения чисто периодической составляющей сигнала на предыдущем цикле по формуле

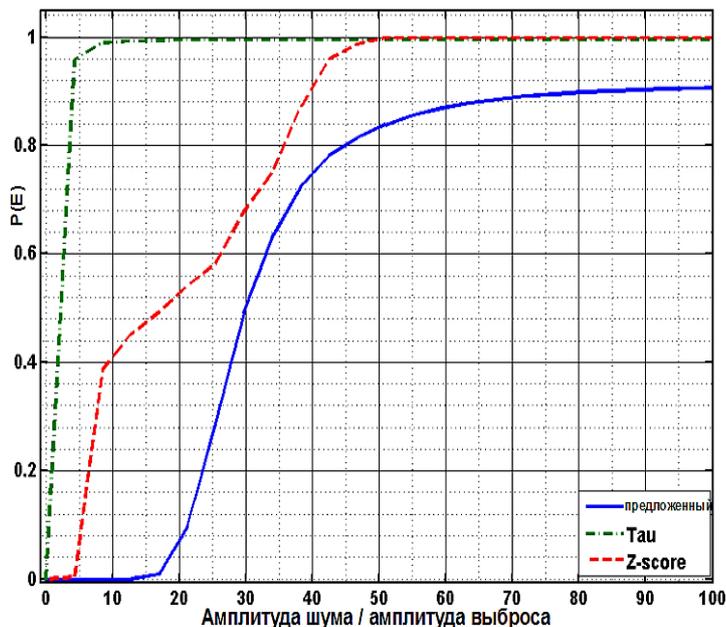


Рисунок 4— Зависимость ошибки обнаружения выбросов от отношения шума к сигналу (в %) для предложенного метода на основе сравнения трендов, метода Z-score и метода τ - Thompson

$$x_{p_i}^{k-1} = x_i^{k-1} - x_{s_i}^{k-1}, \quad (13)$$

ШАГ 4. Оценивается амплитуда сигнала на предыдущем цикле D_{k-1} . Если вычислительные ресурсы используемого для обработки данных оборудования крайне ограничены, в качестве оценки D_{k-1} нормирующего множителя можно выбрать непосредственно размах амплитуды сигнала:

$$D_{k-1} = \max_{i=1\dots m} x_{p_i}^{k-1} - \min_{i=1\dots m} x_{p_i}^{k-1}, \quad (14)$$

ШАГ 5. Обнаружение нарушений цикличности, если выполняется условие $k > 3$, то условие обнаружения аномального цикла будет задаваться выражением

$$\max_{i=1\dots m} \left(\frac{x_{p_i}^{k-1}}{D_{k-1}} - P_i^{k-2} \right) > \delta, \quad (15)$$

где δ – критерий обнаружения, задающий величину максимально допустимого относительного отклонения нормированных на оценку амплитуды D_{k-1} значений сигнала $x_{p_i}^{k-1}$ от паттерна формы P_i^{k-2} , вычисленного на шаге.6 предыдущего цикла.

ШАГ 6. Пересчет очередных значений для паттерна формы P_i^{k-1} и интегрального коэффициента амплитуды C_{k-1} в случае, если для цикла $k - 1$ не было выявлено нарушений цикла ни по форме, ни по амплитуде. Расчет очередных значений, в отличие от ранее описанного варианта, выполняется методом экспоненциального сглаживания:

$$P_i^{k-1} = \alpha \frac{x_{p_i}^{k-1}}{D_{k-1}} + (1 - \alpha) P_i^{k-2} \quad (16)$$

$$\bar{D}_{k-1} = \alpha D_{k-1} + (1 - \alpha) \bar{D}_{k-2} \quad (17)$$

где α - коэффициент экспоненциального сглаживания, примерно равный $\frac{1}{n}$.

В качестве примера на рисунке 5 показано применение описанного алгоритма для обнаружения нарушений цикла при мониторинге уличной температуры.

Выделение в периодическом сигнале трендовой и циклической составляющей позволяет более точно описывать его поведение, а, следовательно, использовать предложенный метод для более точного решения таких задач, как краткосрочное прогнозирование и восстановление потерянных данных за предшествующие периоды.

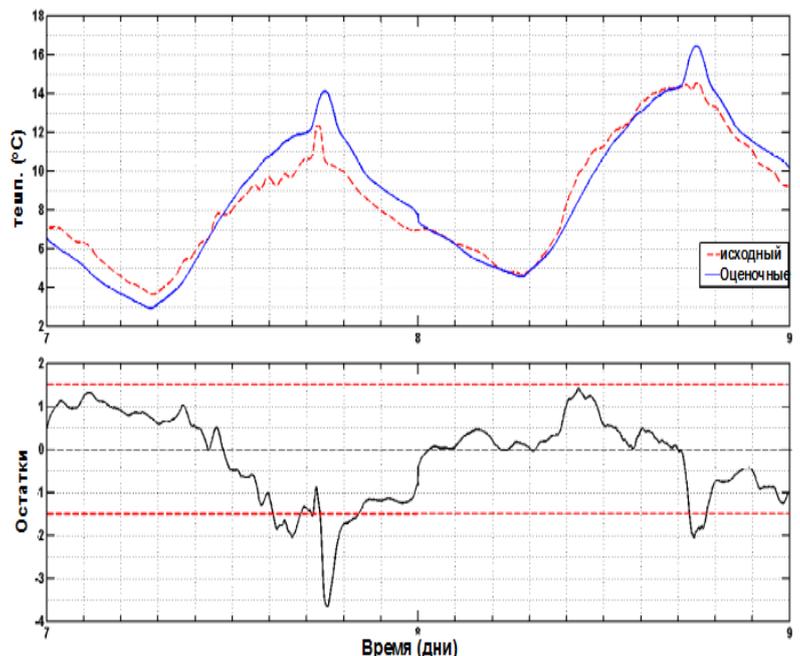


Рисунок 5– Исходные данные, соответствующие им паттерны и относительные нормированные разности между исходным сигналом и паттернами форм

Третья глава посвящена вопросам сжатия данных мониторинга с целью сокращения объема трафика при транспорте информации и ее последующего компактного хранения. При этом должна обеспечиваться высокая надежность кодирования при минимальных требованиях к вычислительным ресурсам, а также сохранять высокую степень сжатия при наличии в сигнале аномалий в виде выбросов и перепадов.

Одним из путей решения поставленной задачи явилась оптимизация структуры базы данных и переход к хранению нормированных по величине и времени целочисленных данных. Для нормализации по величине используется преобразование, переводящее минимальное значение контролируемого параметра x – в хранимое в базе целочисленное значение y :

$$y = C * x + y_0, \quad (18)$$

где C – некоторый множитель, а y_0 – смещение.

Нормализация по времени выполняется с помощью аналогичного выражения

$$i = (t - t_0) / \Delta t, \quad (19)$$

где t_0 – время старта системы, а Δt – интервал выборки данных.

Все другие рассмотренные в работе методы сжатия представляют собой модификацию алгоритма кодирования длин серий (RLE, run-length encoding).

В первой модификации поток данных разбивается на серии, в каждой из которых передается отклонение отсчета от некоторого реперного значения, например, от значения последнего отсчета предыдущей серии. Серия завершается либо по достижении в ней максимального числа отсчетов, либо если очередное отклонение превышает максимально допустимое значение. Степень сжатия метода приблизительно равна отношению длин разрядной сетки, необходимой для записи. К его достоинствам можно отнести простоту реализации и минимальное время доступа к считыванию данных.

В двух других модификациях алгоритма сжатия сигнал сначала пропускается через нелинейный фильтр, а уже затем подвергается сжатию без потерь по методу RLE. На выходе нелинейного фильтра новое значение появляется только в том случае, если очередной отсчет отличается от текущего выходного значения на величину, превышающую Δ_x , причем это отличие должно наблюдаться не менее чем в k_{rep} следующих подряд отсчетах. Пример работы такого фильтра для случая $\Delta_x = 1$ и $k_{\text{rep}} = 2$ показан на рисунке 6а.

Если уровень случайных шумов достаточно велик, то можно осуществлять многоуровневое сравнение с полосами неопределенности так, как это показано на рисунке 6б.

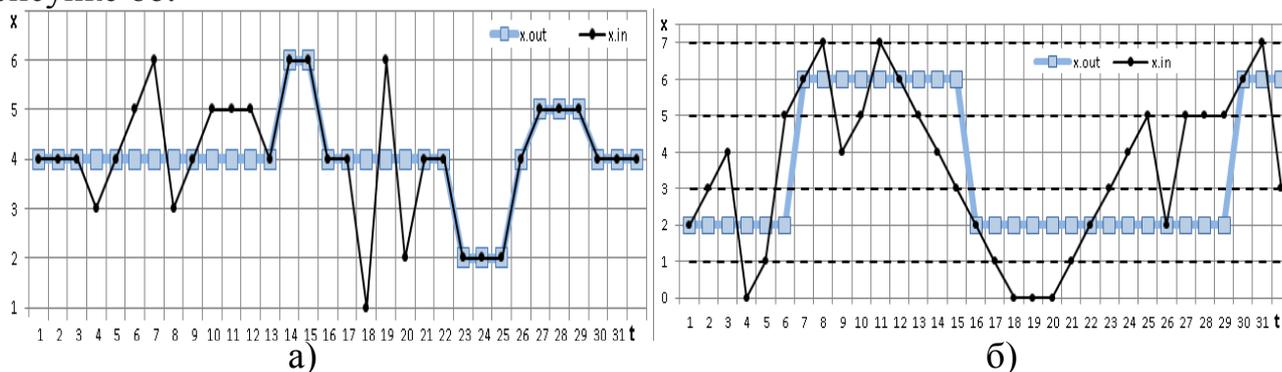


Рисунок 6– Вид выходного и выходного сигнала нелинейного фильтра со сравнением по выходному сигналу (а) и с многоуровневым сравнением и полосой неопределенности (б)

Выходной сигнал в таком фильтре может принимать значения, соответствующие только среднему значению основных полос. При этом смена выходного сигнала будет возможна лишь тогда, когда уровень входного сигнала пересечет границу разделительной полосы, соответствующей вышележащему или нижележащему уровню и будет находиться другой полосе на протяжении $k_{\text{пер}}$ отсчетов.

Проведенные эксперименты по оценке степени сжатия предложенных методов для системы температурного мониторинга показали, что она достигает 90 при контроле комнатной температуры при отсутствии аномалий и падает до 61 при контроле уличной температуры на участках с наличием аномалий. Это как минимум на порядок превышает лучшие референтные методы сглаживания, например, такие, как кусочная аппроксимация полиномами шестой - девятой степеней.

В четвертой главе на примере информационно-измерительной системы мониторинга университетского кампуса (ИИС) показаны результаты практического применения результатов исследований. Укрупнённая архитектура системы приведена на рисунке 7.

Система позволяет контролировать потребление таких энергоресурсов, как водопотребление и теплотребление, а также осуществлять температурный мониторинг помещений вуза. Кроме того, она позволяет осуществлять непрерывный мониторинг таких параметров природной среды, как температура окружающего воздуха, давление, влажность, солнечная инсоляция, скорость перемещения воздушных масс по трем координатам.

В системе использованы первичные измерительные преобразователи фирм Dallas Semiconductor (температура и влажность) и Texas Instruments (давление), тепловычислитель 7КТ «Абакан», 3D - анемометр собственной разработки, промышленные контроллеры i7188 фирмы ICP CON и контроллеры собственной разработки, СУБД MySQL. Интерфейсы между технологическим компьютером (ТК), SQL-сервером и программируемыми логическими контроллерами (PLC) реализованы с использованием платформы Java jScada. Управляется система через Web – интерфейс.

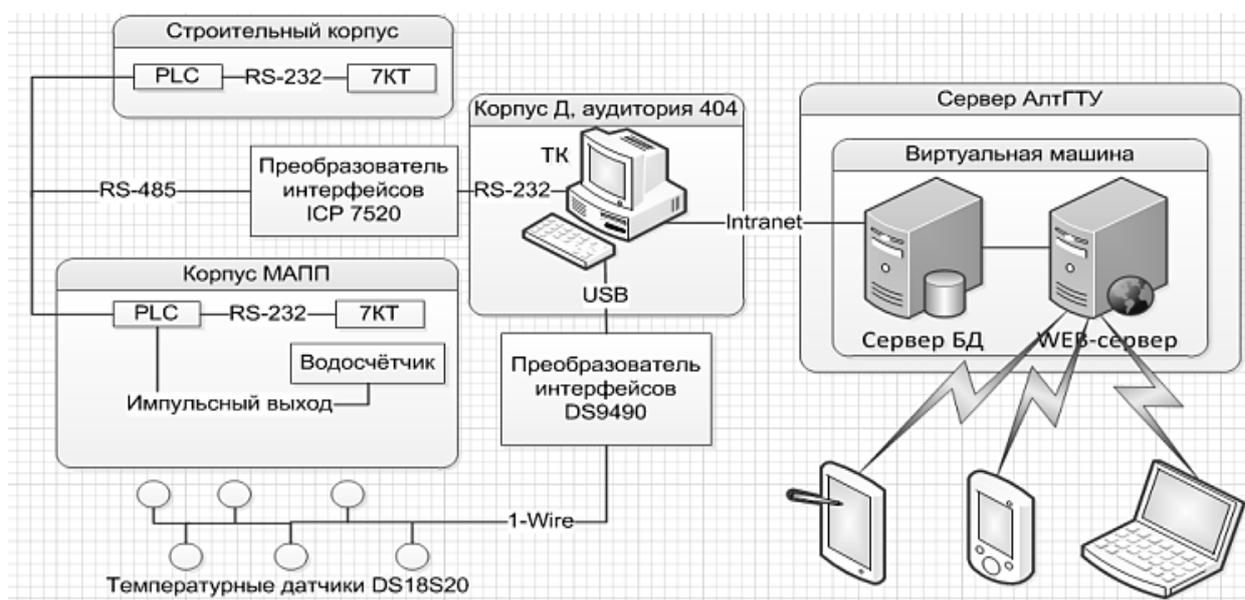


Рисунок 7– Архитектура прототипа системы мониторинга

В главе описываются особенности применения разработанных методов для выявления аномалий различных физических величин в различных условиях их наблюдения и обсуждаются перспективы применения предложенных программно-технических средств и их дальнейшего развития как для еще более компактного хранения данных, так и для обнаружения и идентификации специфических событий в системе мониторинга.

Основные **ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ** диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Проведен анализ методов обнаружения нарушений закономерностей поведения контролируемых процессов в системах мониторинга природных и техногенных объектов.
2. Предложены новые алгоритмы на основе модификаций известных статистических методов для обнаружения выбросов и перепадов информативных сигналов в системах мониторинга. Они имеют меньшую вероятность ошибок, не требовательны к вычислительным ресурсам и поэтому особенно эффективны при контроле температуры воздуха в помещении и в окружающей среде в режиме онлайн с применением современных средств микропроцессорной техники.
3. Разработан алгоритм для формирования паттернов формы циклов периодических информативных сигналов с учетом их тренда, который был использован для оценки нарушений формы цикла, краткосрочного прогнозирования и восстановления потерянных данных..
4. Разработаны методы сжатия данных без потерь и с потерями в пределах слоя неопределенности в исходных данных. Эти методы, также как и предыдущие, максимально просты и способны работать на микроконтроллерах с минимальными системными требованиями.
5. Выполнена разработка программного обеспечения для обнаружения различных видов аномалий и база данных для системы контроля энергоресурсов университетского кампуса, а также температурного мониторинга его помещений и мониторинга метеорологических параметров окружающей среды.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

1. **Хуссейн, Х.М.** Исследование методов обнаружения выбросов на линиях тренда (Outlines Detect). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614709, заявка 2015611600, дата рег. 24.04.2015 / {Х.М. Хуссейн, А.Г. Якунин. - М.: Роспатент, 2015.
2. **Хуссейн, Х.М.** Выявление аномалий и периода в циклических временных рядах (Pattern Form). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614704, заявка 2015611568, дата рег. 24.04.2015 / Х.М. Хуссейн, А.Г. Якунин - М.: Роспатент, 2015.
3. **Хуссейн, Х.М.** Диспетчерский пункт визуализации данных многоканальной **системы** мониторинга техногенных и природных объектов (Dispatcher-1). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2015615853, заявка 2015612721, дата рег. 26.05.2015 / А.Г. Якунин, М.А. Якунин Х.М. Хуссейн, - М.: Роспатент, 2015.

4. **Хуссейн, Х.М.** База данных системы контроля динамических процессов (Dynamic-1). Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620793, заявка 2015620245, дата рег. 22.05.2015 / А.Г. Якунин, М.А. Якунин, Х.М. Хуссейн, - М.: Роспатент, 2015.

Статья в издании, входящем в базу научного цитирования Scopus:

5. **Hussein, M. H.** Detection of Regularity Violations of Cyclic Processes in a Temperature Monitoring System Using Patterns Form [Текст] / H. Sh. Hussein, A.G. Yakunin // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics, 2015.- № 8(2). – С.157-164.

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных перечнем ВАК:

6. Сучкова, Л.И. Многоточечная система дистанционного мониторинга пространственно-распределенных динамических процессов [Текст] / Л.И. Сучкова, **Х.М. Хуссейн**, Р.В. Кунц, М.А. Якунин, А.Г. Якунин, А.В. Юрченко // Контроль, диагностика. № 13/2013. – С.95-101.
7. Сучкова, Л.И. Проектирование и внедрение систем для климатического и технологического мониторинга [Текст] / Л.И. Сучкова, **Х.М. Хуссейн**, Р.В. Кунц, А.Г. Якунин // Известия АГУ. № 1/1/2013. - С.210-214.
8. **Hussein, H. M.** Data Differencing Method To Optimize Data Storing In Weather Monitoring System [Текст] / H.M. Hussein A.G. Yakunin // Ползуновский вестник, 2013.- № 2. – С.65-68.
9. **Сучкова, Л.И.** Исследование долговременной стабильности параметров термодатчиков DS18B20 / Л.И. Сучкова, **Х.М. Хуссейн**, Якунин М.А., Якунин А.Г. // Доклады ТУСУР. – 2015. – № 1(35). – С.42-46.
10. **Hussein, H. M.** Short Term Forecasting For Air Temperature Based On Pattern Repetition [Текст] / H.M. Hussein A.G. Yakunin // Ползуновский вестник, 2015.- № 1. – С.91-96.
11. **Hussein, H. M.** Outliers Detection In Air Temperature Measurements [Текст] / H.M. Hussein A.G. Yakunin // Ползуновский вестник, 2015.- № 1. – С. 97-102.
12. **Хуссейн Х. М.** Методы выявления аномалий при контроле динамических процессов природных и техногенных объектов / Хуссейн Х. М., Якунин А. Г. // Вестн. ИжГТУ.– 2015 № 1.– С.79-83

Статьи и доклады в научных журналах и сборниках трудов, сборниках материалов международных и всероссийских конференций:

13. **Hussein, H.M.** Ways for improving methods of data storing in monitor systems / H.Hussein, L.I. Suchkova, M.A. Yakunin // Ползуновский альманах, № 2. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – С.48-50.
14. **Сучкова, Л.И.** Масштабируемые программно-технические решения для экологического и технического мониторинга / Л.И. Сучкова, **Х.М. Хуссейн**, А.Г. Якунин // Ползуновский альманах №1/2013, Барнаул: Изд-во Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 2013. – С. 75-82.
15. Якунин, М.А. Программно-технические и алгоритмические решения для систем многоточечного климатического и экологического мониторинга /

М.А. Якунин, Л.И.Сучкова, **Х.М.Хуссейн**, А.Г.Якунин // Сборник трудов II Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest, 12-17 августа 2013. – Томск, НИ ТПУ. – С.185-195.

16. **Хуссейн, Х.М.** Распределенная система мониторинга динамических процессов/ Х.М. Хуссейн, Р.В.Кунц, Л.И. Сучкова, А.Г. Якунин, А.В. Юрченко // Материалы III Научно-практической конференции "Информационно-измерительная техника и технологии" – Томск: Изд-во НИ ТПУ, 3-5 мая 2012. – С.160-169.

Тезисы докладов:

17. Yakunin, M. A., Lighting monitoring and its application in the radiation balance research/ М. А. Yakunin, Yakunin A.G., Suchkova L.I., **Hussein H.M.** // Материалы 14 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация». - Барнаул: АлтГТУ, 2013. – С.24-27.
18. **Хуссейн Х.** Оптимизация базы данных для метеорологической системы мониторинга / Хуссейн Х., Якунин А.Г.// Материалы всероссийской научной конференции "Инновационные процессы в гуманитарных, естественных и технических системах" - ч.1.-Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – С.54-56.
19. Программно-аппаратный комплекс с изменяемым уровнем масштабирования для мониторинга метеоданных / Умбетов С.В., **Хуссейн Х.М.** //Материалы 14 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация». - Барнаул: АлтГТУ, 2013.- т.2. – С.18-20.
20. **Hussein H. M.** Selecting a suitable temperature sensor for atmospheric turbulence analysis / Hussein H. M. , Yakunin A.G. //Горизонты образования: Научно-образовательный журнал АлтГТУ. Материалы 10-й Всероссийской научно-технической конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь - 2013» - Барнаул: АлтГТУ, 2013.- выпуск.15. – С.53-56. http://edu.secna.ru/media/f/vsib_tez_2013.pdf
21. **Hussein, H.** Simple Curve Smoothing Methods For Weather Monitoring System/ H. Hussein, A. Yakunin // Materiali XI Mezinardni vedecko-practicka conference «Veda a Technologie: krok do budoucnosti-2015», Dil 17. Technicke vedy. - Praha, 2015. - pp. 73-76.
22. **Hussein, H.** Anomalies detection in air temperature / H. Hussein, A. Yakunin // Materials of XI International Research and Practice Conference «Modern Scientific potential-2015», Vol. 38. Technical sciences - Sheffield, 2015. - pp. 33-38.
23. **Hussein, H.** Database storage space saving for weather monitoring systems using curve smoothing and fitting techniques/ H.M.Hussein // Материалы 16 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация». - Барнаул: АлтГТУ, 2015.- т.1. – С.11-14.
24. **Hussein, H.** Missing data estimation for air temperature measurements /H.M.Hussein //Материалы 16 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация». - Барнаул: АлтГТУ, 2015.- т.1.- С.15-20
25. **Hussein, H.** Air Temperature Trend Analyses Using Candlestick Charts /H. Hussein, L.I.Suchkova, A.G.Yakunin // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов:

сборник научных статей VI Международной научно-практической конференции / отв. ред. В.И. Иордан (Барнаул, 11–12 марта 2016 г.). – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2016. – 300 с. – С.247-253.

26. **Hussein, H.** Storage space saving for database in weather monitoring system using data difference techniques / /H.M. Hussein, A.G. Yakunin, L.I. Suchkova // Материалы 17 Международной конференции «Измерение, контроль, информатизация». - Барнаул: АлтГТУ, 2013. – С.11-14.

Подписано в печать 28.11.2016 Формат 60×84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л 1 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ 2016 – 483

Отпечатано в типографии АлтГТУ,

656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Тел.: (8–3852) 29–09–48

Лицензия на полиграфическую деятельность

ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.