

Материалы международной научно-технической конференции

МОНИТОРИНГ

ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

30 ноября – 1 декабря

2017



Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники



Министерство
по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
МИНИСТЕРСТВО ПО ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
«МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ
ОБЪЕКТОВ»**

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ

(Минск, Республика Беларусь, 30 ноября- 1 декабря 2017 года)

Минск БГУИР 2017

УДК 534-16+004.42+004.92

Редакционная коллегия:

Батура М.П., Баранов В.В., Бранцевич П.Ю., Забеньков И.И., Иванов Ю.С., Ишин Н.Н.,
Лапицкая Н.В., Лыньков Л.М., Тихонов М.М.

Мониторинг техногенных и природных объектов: сб. материалов междунар. научн. -техн. конф./ редкол.: Батура М.П. [и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – 145 с.

В сборнике опубликованы результаты научных исследований в области мониторинга природных и техногенных объектов.

УДК 534-16+004.42+004.92

© Оформление. БГУИР, 2017

Оглавление

«МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ СИСТЕМ С СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ»	5
ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ.....	12
МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ КАК ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ КРИТЕРИЙ ПРИ ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ	32
РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ БОЛЬШИХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ	43
АНАЛИЗ ОТКАЗОВ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г.МИНСКА	54
МЕТОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ МАШИННОГО ПАРКА СТАНЦИИ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ	59
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ВЫБРОСОВ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	70
РЕГРЕССИВНЫЙ АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ.....	77
ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА-ХУАНГА В КОМПЬЮТЕРНОМ ВИБРАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ	93
ФОРМИРОВАНИЕ У ЧЕЛОВЕКА НАВЫКА ЭКСТРЕННОГО РЕАГИРОВАНИЯ НА ВНЕШНИЕ СТИМУЛЫ ДВИЖЕНИЯМИ РУКИ И ТЕЛА	106
ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	113
ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОЙ КООРДИНАЦИИ СТАНЦИЙ НАВЕДЕНИЯ	117
МОНИТОРИНГ ЗАДАЧ В СИСТЕМАХ КООРДИНАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АГЕНТОВ	124
СТРУКТУРА И ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК	131
ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР КАК ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА.....	135
ОПРОБЛЕМАХ МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ВОДЕ.....	142

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ СИСТЕМ С СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРОЙ

В.А.ЗЕЛЕНЦОВ

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)
14 линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178, Российская Федерация*

Поступила в редакцию

Аннотация. В статье описаны основы построения и примеры практической реализации систем (платформ) для мониторинга и прогнозирования состояния природно-технологических объектов с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Показано, что базовым подходом для создания таких систем может являться сервис-ориентированная архитектура. Конструктивность и реализуемость предложенного подхода демонстрируется на примерах практической апробации разработанной системы при создании тематических сервисов.

Ключевые слова: мониторинг, прогнозирование, данные дистанционного зондирования Земли, информационная платформа, тематический сервис, сервис-ориентированная архитектура.

Abstract. The article describes the basics of design and examples of practical implementation of systems (platforms) for monitoring and forecasting the state of natural-technological objects using Earth remote sensing data. It is shown that a service-oriented architecture can be the basic approach for creating such systems. The constructiveness and feasibility of the proposed approach is demonstrated on the examples of practical testing of the developed system when creating thematic services.

Keywords: monitoring, forecasting, Earth remote sensing data, information platform, thematic service, service-oriented architecture.

Введение

Природные и природно-технологические объекты (ПТО) различного типа являются в настоящее время предметом пристального исследования в связи с усложнением создаваемых инфраструктурных, энергетических, гидротехнических, и т.д., комплексов, повышением внимания к процессам их взаимодействия с окружающей средой, с одной стороны, и ростом масштабов и негативных последствий от чрезвычайных ситуаций (ЧС) и стихийных бедствий, с другой.

Под ПТО здесь понимается совокупность природных, природно-техногенных и техногенных объектов, условия существования которых взаимосвязаны и взаимозависимы. Применение этого термина отражает общую тенденцию развития глобальных техногенных процессов, приводящих к тому, что биосфера Земли трансформируется в биотехносферу, элементами которой являются отдельные и связанные между собой ПТО.

Одной из основных проблем мониторинга и прогнозирования состояния ПТО является необходимость разработки и применения моделей различного класса для описания процессов их функционирования в обычных условиях и при возникновении чрезвычайных ситуаций, а также потребность в максимально полной автоматизации всего цикла моделирования – от сбора исходных данных до выдачи рекомендаций лицу, принимающему решения (ЛПР).

Комбинированное использование разнородных методов и алгоритмов, т.е. переход к комплексному моделированию, с выбором и настройкой параметров наиболее

предпочтительных для каждой конкретной ситуации моделей, позволяет взаимно компенсировать объективно существующие недостатки и ограничения отдельных моделей, одновременно усиливая их положительные качества. Вместе с набором преимуществ, которые предоставляет комплексное моделирование ПТО, возникает и ряд проблем, связанных с его автоматизацией. Главная из них состоит в необходимости в процессе моделирования осуществлять согласование (координацию) используемых моделей, методов и алгоритмов на концептуальном, модельно-алгоритмическом, информационном и программном уровнях, и их выбор.

Теоретические основы для решения данной проблемы разрабатываются в настоящее время в рамках нового научно направления, называемого квалитметрией моделей и полимодельных комплексов. Однако не менее важной задачей является практическая реализация предлагаемых подходов к комплексному моделированию, выбор и обоснование конструктивных путей создания соответствующих программных средств и информационных ресурсов для мониторинга и прогнозирования состояния ПТО.

При создании подобных программных систем и платформ необходимо обеспечивать интегрированную обработку как наземных, так и дистанционных (аэрокосмических) данных, а также учитывать целый ряд требований, которые определяют возможности их использования при решении конкретных задач анализа ПТО, управления развитием территорий, анализа рисков ЧС и информационно-аналитической поддержки действий при возникновении ЧС.

Существующие и находящиеся на сегодняшний день в разработке системы [1-10], как правило, отличаются перегруженностью пользовательских интерфейсов, ориентированы на интерактивный или ручной режим работы и требуют высокой специальной квалификации пользователей для подбора, обработки необходимых данных, моделирования, и интерпретации результатов. Такие требования являются явно завышенными, когда речь идет о специалистах-практиках, принимающих оперативные решения по управлению, в том числе и в условиях дефицита времени в чрезвычайных ситуациях.

Концептуальный подход к построению систем мониторинга и прогнозирования состояния ПТО

На рис. 1 на примере мониторинга гидроэлектростанции (ГЭС) и окружающей ее среды представлена главная проблема, с которой приходится сталкиваться на практике при оценивании и упреждающем прогнозировании состояния ПТО. Суть данной проблемы связана с отсутствием необходимого модельно-алгоритмического, информационного, технического, технологического обеспечения *интеграции* поступающих в реальном масштабе времени разнородных данных и информации *об отдельных компонентах* данных состояний. В этих условиях операторы (лица, принимающие решения — ЛПР) вынуждены в своих головах (на основе технической документации, экспертных знаний и т. п.) воссоздавать целостный образ управляемой системы (ГЭС), а также причинно-следственных связей, определяющих ее состояние и сценарии развития внешней обстановки.

Временные задержки и ошибки в управлении, вызванные неверным решением задач оценивания или мониторинга состояний ПТО, могут привести к необратимым негативным последствиям — срыву выполнения возлагаемых на них задач, отказам, различным по своим последствиям авариям и катастрофам. В наибольшей степени эта проблема обостряется при возникновении нештатных ситуаций, вызванных различными внешними и внутренними факторами. В большинстве случаев процедуры мониторинга состояния ПТО в таких ситуациях не автоматизированы.

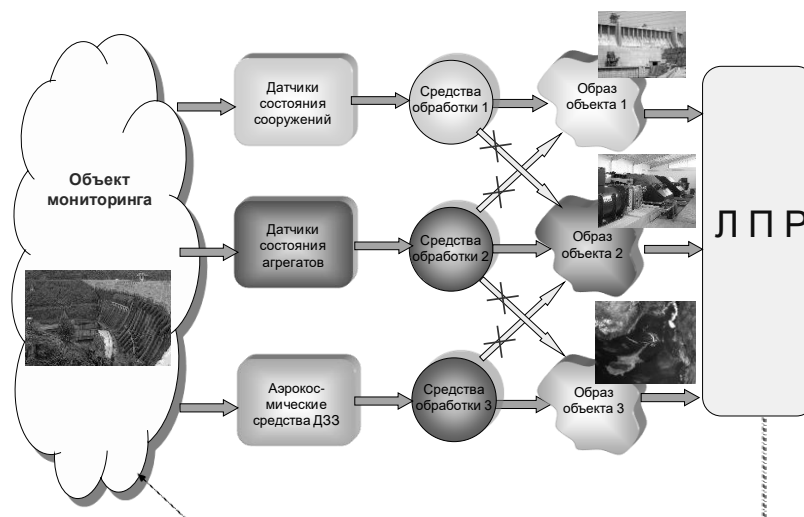


Рис. 1. Существующая информационная технология наземно-космического мониторинга состояния ПТО.

В предлагаемом докладе представлены основные результаты, которые были получены при поиске конкретных путей решения проблем комплексной автоматизации мониторинга и прогнозирования состояний ПТО. Разработанная технология и соответствующие системы мониторинга и поддержки принятия решений при управлении базируются на комбинированном использовании логических, лингвистических и математических моделей и методов, обеспечивающих параллельную, распределенную обработку и анализ в реальном времени разнородной измерительной информации, а также упреждающее предсказательное комплексное моделирование развивающейся ситуации. Главное достоинство и отличительная черта разработок состоит в том, что их использование обеспечивает на конструктивном уровне интеграцию данных, информации и знаний, получаемых из различных источников при мониторинге и управлении ПТО. На рис. 2 показано, как на основе единой среды обработки и анализа данных, созданной на основе применения предлагаемой технологии, формируется целостный образ объекта мониторинга.

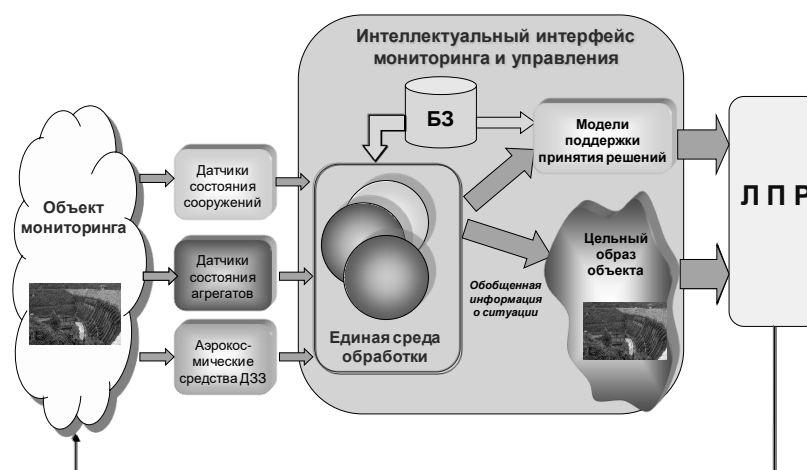


Рис. 2. Предлагаемая интеллектуальная информационная технология наземно-космического мониторинга состояния ПТО.

Архитектура систем мониторинга и прогнозирования состояния ПТО

Снижение требований к пользователю и интеллектуализация рассматриваемых системозначает, прежде всего, необходимость максимально полной автоматизации обработки данных и предоставления результатов обработки в виде тематических сервисов. Под

тематическим сервисом понимается веб-сервис, обеспечивающий интегрированную обработку данных ДЗЗ и других пространственных и непространственных данных, выполненную в соответствии с алгоритмом решения конкретной тематической задачи, и предоставление результатов пользователю.

Разработка тематических сервисов является комплексной задачей и предполагает совместное, интегрированное использование данных ДЗЗ, а также результатов наземных измерений, расчетно-аналитических и прогнозных моделей, средств визуализации результатов, и др. Ключевыми проблемами здесь являются, во-первых, необходимость создания теоретической базы для автоматического (интеллектуального) выбора типов и настройки параметров разнородных моделей, необходимых для решения каждой конкретной задачи, и, во-вторых, обоснование архитектуры информационных систем и состава технологий, необходимых для реализации всего комплекса требований к формированию и предоставлению тематических сервисов. Первая из данных проблем решается в рамках активно развиваемого в настоящее время научного направления – квалиметрии моделей и полимодельных комплексов [12, 13]. В неразрывной связи с этим направлением в СПИИРАН развиваются и информационные технологии для создания и функционирования систем, обеспечивающих реализацию полного цикла работ по формированию сервисов в максимально автоматизированном режиме, включая заказ, получение, обработку разнородных данных, моделирование и предоставление результатов пользователю. Именно этому направлению посвящена данная статья.

Проведенный анализ показал, что к числу наиболее приемлемых вариантов архитектурного построения систем мониторинга и прогнозирования состояний (СМП) ПТО является использование сервис-ориентированной архитектура (СОА). Она реализует модульный подход к разработке программного обеспечения, основанный на использовании распределённых, слабо связанных заменяемых компонентов, оснащённых стандартизированными интерфейсами для взаимодействия по стандартизированным протоколам [14]. Данный подход предназначен для построения сложных распределённых информационных систем на базе интеграции веб-сервисов. При этом интеграция осуществляется на уровне протоколов, без понимания обеими взаимодействующими сторонами внутреннего устройства другой стороны. Благодаря этому становится возможным использование разных языков программирования, инструментов взаимодействия, мониторинга и хранения данных, что позволяет оптимизировать инфраструктуру СМП путём подбора лучшего программно-аппаратного решения для каждого конкретного сервиса.

Примеры практической реализации СМП ПТО

В настоящее время в СПИИРАН реализованы все основные компоненты СМП на базе СОА включая модули заказа и каталогизации космической съемки, реализующие процедуры обработки данных ДЗЗ, поступающих с КА Ресурс-П 1, 2, 3 КШМСА, ГЕОТОН, Гиперспектр; Канопус-В и БКА.

Состав формируемых тематических сервисов включает в настоящее время более 20 наименований по направлениям: лесопользование, сельское хозяйство, чрезвычайные ситуации, и т.д., и постоянно увеличивается. Сервисы основаны на использовании материалов российских, белорусских, европейских, и других ДЗЗ.

Принципиальная возможность создания программных интерфейсов на основе СОА, обеспечивающих интеграцию с внешними источниками данных, разнородными информационно-аналитическими модулями и системами была продемонстрирована при разработке и апробации ряда прототипов для решения задач управления развитием территорий муниципальных образований, оперативного прогнозирования наводнений, обнаружения изменений состояния лесного покрова, водных объектов, и ряда других. Главной особенностью созданных прототипов является возможность их работы полностью в автоматическом режиме за счёт организации взаимодействия территориально распределённых разнородных веб-сервисов.

Так, например, при реализации системы оперативного прогнозирования наводнений использовались следующие архитектурные и программные решения:

- сервисная шина, представленная программным продуктом OpenESB;
- интерпретатор сценария на языке BPEL, встроенный в сервисную шину OpenESB;
- программное обеспечение для отображения данных по стандартам веб-картографии GeoServer;
- система управления базой пространственных данных PostgreSQL с дополнением PostGIS;
- сервер администрирования на базе Python;
- сервис сбора данных с гидрологических датчиков (расположен на удалённом сервере №1);
- сервис прогнозирования значений параметров гидродинамических процессов;
- сервис, управляющий работой расчётной гидродинамической модели;
- сервис обработки и интерпретации результатов расчётов;
- пользовательский веб-интерфейс в виде прогрессивного веб-приложения, адаптированного для работы на стационарных и мобильных пользовательских терминалах и обеспечивающего выполнение принципиального требования о необходимости минимизации специальных знаний потребителя для работы с информационными системами.

Обобщенная схема системы оперативного прогнозирования наводнений представлена на рисунке 3.



Рис. 3. Обобщенная схема системы оперативного прогнозирования наводнений

Созданный прототип системы оперативного прогнозирования наводнений выполняет в автоматическом режиме полный цикл моделирования: от сбора исходных данных с гидрологических датчиков, до обновления результатов прогнозирования в пользовательском интерфейсе. Координацию работы всех подсистем и сервисов осуществляет интерпретатор BPEL процессов посредством сервисной шины.

Наиболее показательны результаты, полученные во время наводнения 2013 г. на реке Даугава (Латвия) в районе г. Даугавпилса. Система прошла испытания, проработав весь период весеннего половодья автоматически, без участия человека.

Созданная подсистема визуализации выполняла несколько этапов постобработки полученных результатов моделирования. Прежде всего, растровая карта затопления автоматически векторизовалась для обеспечения совместимости со сторонними геоинформационными системами. Второй этап визуализации – размещение результатов моделирования на геопортале. Данный сервис предоставлял возможность просмотра слоев с контурами затопления от начала процесса моделирования до двенадцатичасового прогноза. При этом допускалось наложение слоев, соответствующих различным меткам времени, для наглядного представления динамики развития наводнения (рисунок 4).



Рис. 4. Анализ зон затоплений путем перемещения слайдера временной шкалы

Аналогичный механизм реализован для анализа возможных зон затоплений при различных уровнях подъема воды.

В РФ система прошла апробацию в 2014-2017 г.г. при выполнении проектов применительно к территории на участке русла реки Северная Двина от г. Великий Устюг до г. Котлас. Здесь в качестве гидродинамического блока использовалась отечественная разработка – двумерная модель STREAM 2D [39,40], в качестве данных ДЗЗ использовались материалы съемки КА «Ресурс-П».

Результаты сравнения прогнозных и реальных (на основе обработки данных ДЗЗ с КА «Ресурс-П» от 18.04.2016) контуров затоплений, рассчитанных по данным 2016 г., показаны на рисунке 5. Здесь также точность прогноза, оцененная, по составу объектов инфраструктуры, попадающих в зону затопления, составила не менее 90 %.

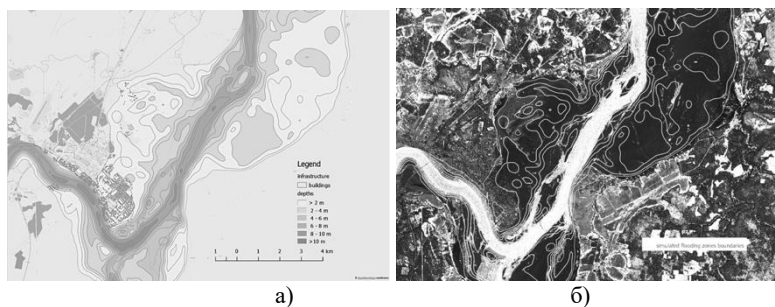


Рис.5. Сравнение результатов моделирования (а) с реальными границами зон затоплений (б)

Важным для практического применения системы является тот факт, что в результате прогноза визуализируются объекты инфраструктуры, попадающие в зону затоплений, формируются отчеты о потенциальном ущербе, а также обеспечивается автоматическое оповещение граждан и организаций – владельцев этих объектов.

Заключение

Проведенный анализ существующих и перспективных технологий интеграции распределенных информационных ресурсов при решении задач мониторинга и прогнозирования состояния ПТО с использованием данных ДЗЗ показал, что в качестве базового подхода к созданию СМП целесообразно использовать сервис- и событийно-ориентированные архитектуры, в сочетании с технологиями платформу-независимого универсального описания, автоматического поиска и интеграции веб-сервисов. Результаты апробации показывают, что применение такого подхода обеспечивает полную реализацию необходимой функциональности СМП, и выполнение базовых требований к подобным системам. При этом вся сложность, связанная с использованием разнородных территориально распределённых информационных систем, скрыта от пользователя за счёт полной автоматизации вычислительного процесса. Это позволяет использовать систему не только специалистам с высоким уровнем знаний в области ГИС и информационных технологий и специалистам в предметной области (например, гидрологии), а также другим пользователям, заинтересованным в результатах прогноза наводнений (службам по чрезвычайным ситуациям, органам исполнительной власти, коммерческим организациям и гражданам).

Поддержка исследований

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ (№№16-08-00510, 16-07-00925, 1717-06-00108, 15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-01277), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/К, в рамках бюджетных тем №№0073–2014–0009, 0073–2015–0007. Исследования по системам прогнозирования наводнений проводились при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 17-11-01254.

Список литературы

1. Геоаналитика агро. URL: <http://agro.geoanalitika.com/ru/> (дата обращения: 25.08.2017).
2. КосмосАгро. URL: <http://new.scanex.ru/geo-service/kosmosagro/> (дата обращения: 25.08.2017).
3. ВЕГА-PRO. URL: <http://pro-vega.ru/> (дата обращения: 25.08.2017).
4. Сервис контроля за состоянием земной поверхности. URL: <http://copernicus.eu/main/l-and-monitoring> (дата обращения: 25.08.2017).
5. Сервис управления при чрезвычайных ситуациях. URL: <http://emergency.copernicus.eu/> (дата обращения: 25.08.2017).
6. Сервис контроля за состоянием морской среды. URL: <http://marine.copernicus.eu> (дата обращения: 25.08.2017).
7. Сервис контроля за состоянием атмосферы. URL: <http://atmosphere.copernicus.eu> (дата обращения: 25.08.2017).
8. Сервис мониторинга изменений климата. URL: <http://climate.copernicus.eu> (дата обращения: 25.08.2017).
9. Веб-хостинг DigitalGlobe с расширенными возможностями просмотра. URL: <https://www.digitalglobe.com/products/enhancedview-web-hosting> (дата обращения: 25.08.2017).
10. Информация о пожарах для системы управления ресурсами. URL: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms> (дата обращения: 25.08.2017).
11. Интернет-сайт лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании. URL: <http://litsam.ru/index.php/ru/homepage-ru/projects-ru/> (дата обращения: 25.08.2017).
12. Микони С. В., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Применение алгебраического подхода в квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2013). Сб. докладов VI научно-практической конференции (г. Казань, 16-18 октября 2013 г.). Т. 1. Казань: Фэн, 2013. С. 68–79.
13. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Неокибернетика в современной структуре системных знаний // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. №2. С. 3–11.
14. Paik H., Lemos A., Barukh M., Benatallah B., Natarajan A. Web Service Implementation and Composition Techniques // Springer International Publishing, 2017. 256 p.

Сведения об авторах

Зеленцов Вячеслав Алексеевич — д.т.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИРАН

Information about the authors

Zelentsov V.A., Dr. Sc. Eng., Prof., Chief researcher, Laboratory for Information Technologies in Systems Analysis and Modeling, St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the RAS (SPIIRAS).

Адрес для корреспонденции

199178, Российская Федерация, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, СПИИРАН
+7 812 328 0103
e-mail: v.a.zelentsov@gmail.com
Зеленцов Вячеслав Алексеевич

Address for correspondence

199178, 39, 14 Line, St. Petersburg, Russian Federation, SPIIRAS
+7 812 328 0103
e-mail: v.a.zelentsov@gmail.com
Zelentsov Viacheslav A.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ВИБРАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ

П.Ю. БРАНЦЕВИЧ, Е.Н. БАЗЫЛЕВ, Е.С. КУЛАКОВСКАЯ, С.Ф. КОСТЮК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Аннотация. Текст аннотации на русском языке. Отмечены основные функции компьютерных многоканальных систем вибрационного контроля. Количественные и качественные параметры таких систем в значительной степени определяются возможностями программного обеспечения. Приведен ряд алгоритмов цифровой обработки вибрационных сигналов, учитывающих их некоторые особенности, проявляющиеся в реальных условиях эксплуатации контролируемых объектов и систем вибрационного мониторинга.

Ключевые слова: вибрация, контроль, цифровая обработка сигналов, мониторинг, спектр

Abstract. The main functions of computer multichannel vibration control systems have been noted. The quantitative and qualitative parameters of such systems are substantially determined by their software capabilities. Set of algorithms for the digital processing of vibration signals is presented, including some of their characteristics, which are manifested in the real conditions of operations of controlled objects and vibration monitoring systems.

Keywords: vibration, control, digital signal processing, monitoring, spectrum

Введение

Состояние производственных объектов энергетики, нефтехимии, машиностроения характеризуется многими параметрами, имеющими различную физическую природу. Но для механизмов и агрегатов, в основу механического функционирования которых положено вращательное движение, одними из важнейших параметров являются уровень и спектральный состав вибрации, причем при длительном безостановочном функционировании сложного технического объекта требуется непрерывно контролировать его вибрационное состояние и оперативно принимать решения при возникновении аварийно-опасных ситуаций [1-2].

Стандартами определены правила проведения непрерывного вибрационного контроля и мониторинга важных для производства и народного хозяйства дорогостоящих агрегатов (электрические турбогенераторы, газоперекачивающие установки, компрессоры и т.п.) в ходе их эксплуатации [3-5]. Для решения этих задач применяют многоканальные системы и комплексы, которые определяют, отображают и регистрируют на каком-то носителе информации значения параметров вибрации через небольшие (не более нескольких секунд) промежутки времени, а также выполняют допусковый контроль, функции сигнализации и, в определенных условиях эксплуатации, защитного отключения [6].

Идея применения компьютера в качестве основного вычислительного блока параметров вибрации реализована в измерительно-вычислительном комплексе (ИВК) серии «Лукомль», разработанном и производимом научно-исследовательской лабораторией систем вибродиагностики БГУИР [7-9]. Комплексы данного типа применяются в качестве штатной системы вибрационного контроля, мониторинга и защиты турбоагрегатов на электростанциях Беларуси.

Системы вибрационного контроля и защиты, построенные на базе компьютерной техники, позволяют реализовать разнообразные, как стандартные так и сложные алгоритмы защиты, ориентированные на конкретные типы дефектов и ситуаций [10-12]. Это, в свою очередь, позволяет избежать необоснованных («ложная тревога») срабатываний защитного

отключения и не допустить «пропуска дефекта». Однако, используемые в них способы и алгоритмы обработки вибрационных сигналов, должны обеспечивать требуемый уровень точности.

Определение амплитуды и частоты оборотных гармонических составляющих

В ходе работы системы вибрационного мониторинга типа «Лукомль» в режиме реального времени вычисляется ряд параметров:

- интенсивность вибрации (среднее квадратическое значение (СКЗ)) в стандартизованном (10-1000 Гц) или заданном частотном диапазоне в единицах виброскорости;
- частота вращения вала;
- амплитуды и начальные фазы, по крайней мере, до десяти спектральных составляющих вибрации, кратных частоте вращения вала (порядковый анализ);
- пик-фактор исходного сигнала.

При решении задач оценки технического состояния и диагностики выполняется значительно больше преобразований и обработок длинных реализаций исходных вибрационных сигналов, представленных в единицах виброускорения [13-17]:

- спектральный и полосовой спектральный анализ;
- цифровая фильтрация;
- порядковый анализ;
- вейвлет преобразование;
- выделение и исследование огибающей;
- построение гистограммы распределения по уровню и оценка эксцесса, асимптоты, s - дискриминанты;
- выделение и исследование периодической и шумоподобной составляющих [18-20].

Отличительной особенностью вибрационных сигналов, отражающих вибрационное состояние механизмов и агрегатов с вращательным движением, является наличие периодической (или близкой к периодической) и шумоподобных составляющих. Пример такого сигнала показан на рис.1. Если частота вращения ротора имеет целочисленную кратность по отношению к частотному разрешению спектрального анализа, то дискретное преобразование Фурье позволяет получить амплитудный спектр, соответствующий действительному. Амплитуда и начальная фаза m -ой гармоники легко вычисляются с помощью формул дискретного преобразования Фурье [21-22], причем количество дискретных точек преобразования выбирается таким, чтобы интервал анализа был кратным (в рамках возможностей дискретизации) периоду:

$$C_m = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot m \cdot n}{N}\right); \quad (1)$$

$$S_m = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot m \cdot n}{N}\right); \quad (2)$$

$$m = 1 \div \frac{N}{2};$$

$$A_m = \sqrt{C_m^2 + S_m^2}; \quad \phi_m = \arctg\left(\frac{S_m}{C_m}\right), \quad (3)$$

где $x(n)$ – n -ое значение вибросигнала (n -ый элемент массива данных, представляющих вибрационный сигнал);

N – число элементов массива, в котором записан обрабатываемый сигнал, используемых для вычисления амплитудного спектра.

Амплитудный спектр, представленный на рисунке 1, иллюстрирует такую ситуацию. Частотное разрешение спектрального анализа в данном случае $\Delta f = 1,25$ Гц, а частота вращения ротора 50 Гц.

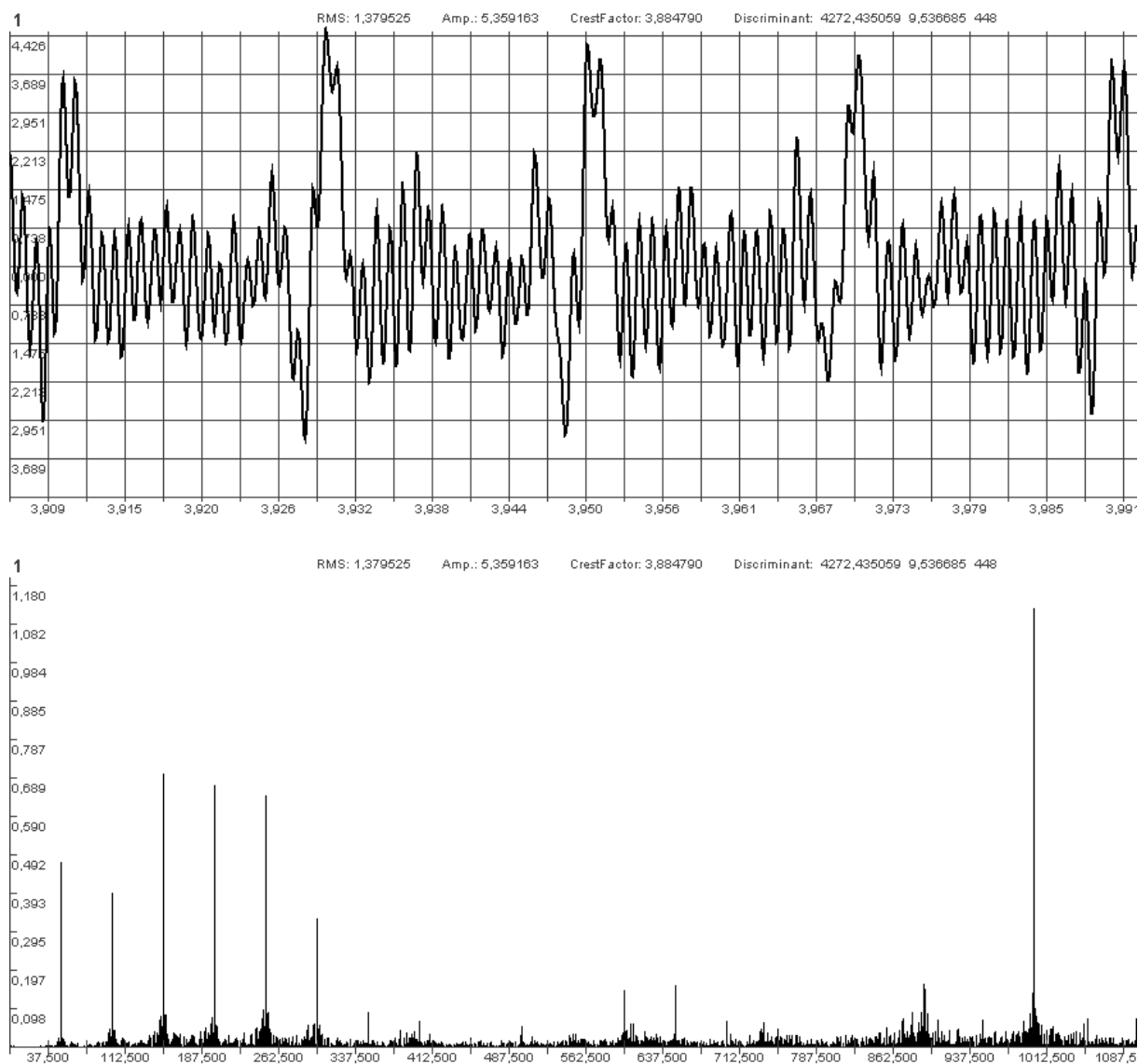


Рис. 1. Временная реализация и амплитудный спектр вибрационного сигнала, полученного при исследовании подшипниковой опоры генератора

Проблемная, с точки зрения исследования амплитудного спектра вибросигнала, ситуация показана на рис.2. Частотное разрешение спектрального анализа в данном случае $\Delta f = 1$ Гц, а частота вращения ротора находится между 24 и 25 Гц. Здесь наблюдается размывание амплитуды реальной спектральной составляющей по соседним спектральным линиям. И, если

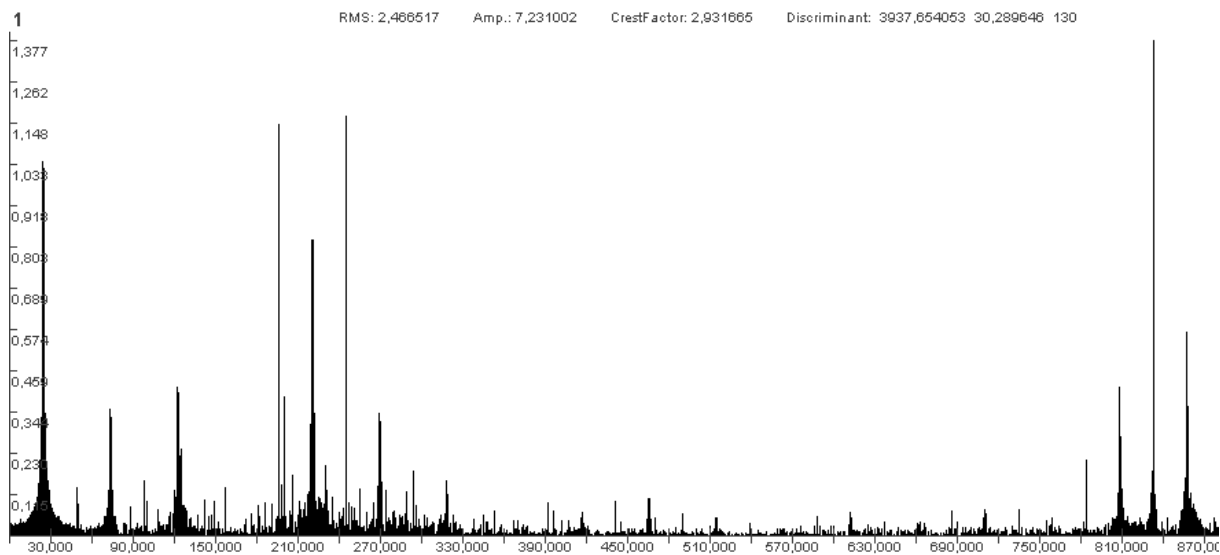
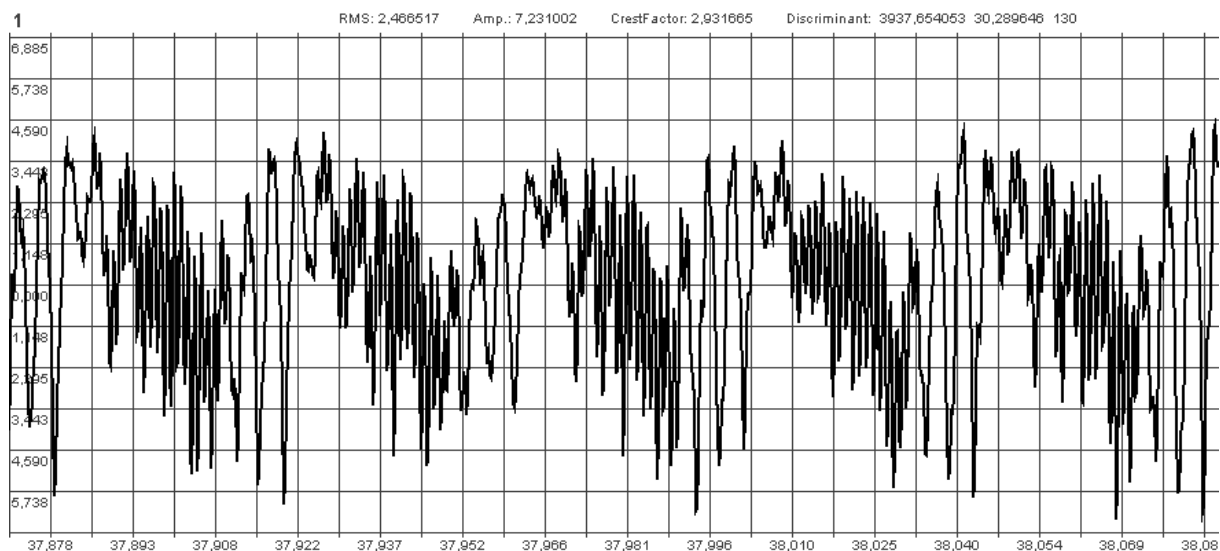


Рис. 2. Временная реализация и амплитудный спектр вибрационного сигнала, полученного при исследовании электродвигателя, частотное разрешение спектрального анализа 1 Гц

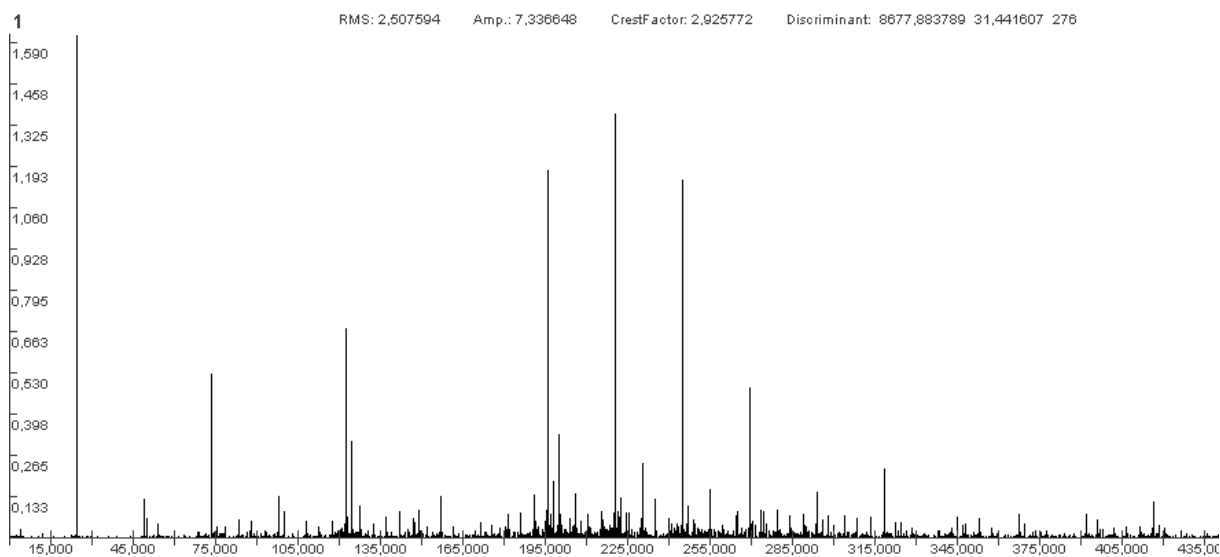


Рис. 3. Амплитудный спектр вибросигнала, частотное разрешение спектрального анализа 0,5 Гц

инженер-исследователь посчитает, что значение амплитуды гармонической составляющей, соответствующей частоте вращения ротора, равно амплитуде спектральной линии, максимальной

в интервале частот диапазона вращения ротора (в данном случае f_0 – частота вращения ротора, может быть принята равной 24 Гц, а амплитуда этой частотной составляющей равна $1,04 \text{ м/с}^2$), то этот результат будет существенно отличаться от реального. На рис.3 представлен амплитудный спектр этого же вибросигнала, но вычисленный с частотным разрешением 0,5 Гц. Здесь $f_0 = 24,5$ Гц, а амплитуда соответствующей частотной составляющей $1,62 \text{ м/с}^2$. Однако изменение частотного разрешения спектрального анализа в сторону уменьшения в два раза требует увеличения в два раза размера обрабатываемого массива данных, что далеко не всегда возможно в реальных системах вибрационного мониторинга.

Предлагается следующий способ определения частоты и амплитуды гармонической составляющей, с частотой не кратной фундаментальной частоте спектрального анализа.

Допустим, что в анализируемом сигнале присутствует гармоническая составляющая с частотой f_x , такой, что

$$i \cdot \Delta f < f_x < (i + 1) \cdot \Delta f \quad (4)$$

и отсутствуют гармонические составляющие с частотами $i \cdot \Delta f$ и $(i + 1) \cdot \Delta f$.

После вычисления спектра, с применением для выделения интервала анализа прямоугольного временного окна, будут получены некоторые значения амплитуд спектральных составляющих, соответствующих частотам $i \cdot \Delta f$ и $(i + 1) \cdot \Delta f$, обозначим их соответственно A_i и A_{i+1} .

Если обозначить

$$\varsigma = (i + 1) \cdot \Delta f - f_x \quad (5)$$

и A_{f_x} – истинное значение амплитуды гармонической составляющей с частотой f_x , то тогда с учетом того, что представление в частотной области прямоугольного временного окна длительностью $T = 1/\Delta f$ описывается выражением:

$$X(f) = \frac{\sin(\pi \cdot f \cdot T)}{\pi \cdot f}, \quad (6)$$

причем, $X(0) = T$, A_i и A_{i+1} можно выразить через A_{f_x} с помощью соотношений:

$$A_i = A_{f_x} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{\sin[\pi(\Delta f - \varsigma)T]}{\pi(\Delta f - \varsigma)} = A_{f_x} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{\sin\left[\pi\left(1 - \frac{\varsigma}{\Delta f}\right)\right]}{\pi(\Delta f - \varsigma)}, \quad (7)$$

$$A_{i+1} = A_{f_x} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{\sin(\pi \cdot \varsigma \cdot T)}{\pi \cdot \varsigma} = A_{f_x} \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot \varsigma}{\Delta f}\right)}{\pi \cdot \varsigma}. \quad (8)$$

Выполнив преобразования над выражениями (7) и (8) определим значение ς .

$$\frac{A_{i+1}}{A_i} = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot \varsigma}{\Delta f}\right)}{\pi \cdot \varsigma} \cdot \frac{\pi(\Delta f - \varsigma)}{\sin\left[\pi\left(1 - \frac{\varsigma}{\Delta f}\right)\right]} = \frac{\Delta f - \varsigma}{\varsigma};$$

$$\varsigma = \frac{\Delta f}{1 + \frac{A_{i+1}}{A_i}} = \frac{A_i}{A_i + A_{i+1}} \Delta f. \quad (9)$$

После этого можно определить значение частоты f_x :

$$f_x = (i + 1) \cdot \Delta f - \varsigma = \left(i + \frac{A_{i+1}}{A_i + A_{i+1}}\right) \cdot \Delta f; \quad (10)$$

и амплитуду гармонической составляющей A_{f_x} :

$$A_{f_x} = A_{i+1} \cdot \frac{\pi \frac{\varsigma}{\Delta f}}{\sin\left(\pi \frac{\varsigma}{\Delta f}\right)}. \quad (11)$$

Этот способ может быть использован при исследовании вибрационного состояния механизмов с вращательным движением для определения амплитуд и частот спектральных составляющих вибрации, кратных оборотной частоте (частоте вращения ротора). Эти спектральные составляющие являются достаточно выраженными на сплошном спектре, причем высокую точность определения их параметров достигается даже в том случае, если их частоты не кратны частотному разрешению спектрального анализа. Для рассматриваемого примера, вычисленные по формулам (10-11) параметры оборотной частотной составляющей, $f_0 = 24,491$ Гц, а амплитуда соответствующей частотной составляющей $1,624 \text{ м/с}^2$

При практическом применении данного способа необходимо вводить некоторые ограничения его применения, которые обуславливаются наличием шумовых составляющих и погрешностей тракта преобразования, передачи и обработки. Примером такого ограничения может служить подход, при котором уточнение параметров явно выраженной в амплитудном спектре гармонике осуществляется только в том случае, когда значения амплитуд A_i и A_{i+1} не отличается друг от друга более, чем в L раз (реально значение L может находиться в диапазоне 10 - 100 единиц).

Удаление медленных дрейфов

При обработке реальных вибрационных сигналов следует учитывать, что данные, поступающие от первичных преобразователей подвержены действию помех и искажающих факторов различного типа. Одним из них является низкочастотный дрейф, лежащий вне информативной частотной полосы вибрации, который может оказать существенное искажающее воздействие на вычисляемые параметры, особенно в случаях, когда выполняется интегрирование сигнала, представленного в единицах виброускорения, для его перевода в единицы виброскорости.

Для удаления низкочастотного дрейфа из исходного массива данных можно применить подход при котором на первом этапе ищется описание дрейфа в виде алгебраического многочлена первой или второй степени, а затем принимается решение о вычитании этой функции из исходного сигнала.

Так как многочлен должен описывать дрейф на всем интервале анализа, то он может быть найден как среднеквадратическое приближение в виде полинома:

$$P_n(x) = c_0 + c_1 \cdot x + c_2 \cdot x^2 + \dots + c_n \cdot x^n. \quad (12)$$

Значения коэффициентов многочлена наилучшего приближения могут быть найдены как решение системы уравнений [23]:

$$\begin{cases} c_0 \cdot s_{00} + c_1 \cdot s_{10} + c_2 \cdot s_{20} + \dots + c_n \cdot s_{n0} = r_0; \\ c_0 \cdot s_{01} + c_1 \cdot s_{11} + c_2 \cdot s_{21} + \dots + c_n \cdot s_{n1} = r_1; \\ \dots\dots\dots \\ c_0 \cdot s_{0n} + c_1 \cdot s_{1n} + c_2 \cdot s_{2n} + \dots + c_n \cdot s_{nn} = r_n. \end{cases} \quad (13)$$

Для функции $f(x)$, представленной в дискретном виде со значениями аргумента от 0 до $N-1$

$$s_{ij} = \sum_{x=0}^{N-1} x^{i+j}; \quad r_i = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cdot x^i. \quad (14)$$

На практике для описания низкочастотного дрейфа целесообразно применять полиномы первой или второй степени.

Для полинома первой степени система уравнений (13) приобретает вид:

$$\begin{cases} c_0 \cdot s_{00} + c_1 \cdot s_{10} = r_0; \\ c_0 \cdot s_{01} + c_1 \cdot s_{11} = r_1. \end{cases} \quad (15)$$

Решая эту систему получим:

$$c_0 = \frac{r_1 \cdot s_{10} - r_0 \cdot s_{11}}{s_{01} \cdot s_{10} - s_{00} \cdot s_{11}}; \quad c_1 = \frac{r_0 \cdot s_{01} - r_1 \cdot s_{00}}{s_{01} \cdot s_{10} - s_{00} \cdot s_{11}}. \quad (16)$$

Для полинома второй степени система (13) выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} c_0 \cdot s_{00} + c_1 \cdot s_{10} + c_2 \cdot s_{20} = r_0; \\ c_0 \cdot s_{01} + c_1 \cdot s_{11} + c_2 \cdot s_{21} = r_1; \\ c_0 \cdot s_{02} + c_1 \cdot s_{12} + c_2 \cdot s_{22} = r_2. \end{cases} \quad (17)$$

После ввода обозначений:

$$k_0 = s_{00}; \quad k_1 = s_{01} = s_{10}; \quad k_2 = s_{02} = s_{11} = s_{20}; \quad k_3 = s_{12} = s_{21}; \quad k_4 = s_{22};$$

система (17) приобретает вид

$$\begin{cases} c_0 \cdot k_0 + c_1 \cdot k_1 + c_2 \cdot k_2 = r_0; \\ c_0 \cdot k_1 + c_1 \cdot k_2 + c_2 \cdot k_3 = r_1; \\ c_0 \cdot k_2 + c_1 \cdot k_3 + c_2 \cdot k_4 = r_2. \end{cases} \quad (18)$$

Для дискретной последовательности аргумента x значения коэффициентов s определяются следующими выражениями:

$$s_{00} = \sum_{x=0}^{N-1} 1 = N ; s_{10} = s_{01} = \sum_{x=0}^{N-1} x = \frac{(N-1) \cdot N}{2} ;$$

$$s_{11} = s_{20} = s_{02} = \sum_{x=0}^{N-1} x^2 = \frac{N \cdot (N-1) \cdot (2N-1)}{6} ;$$

$$s_{12} = s_{21} = \sum_{x=0}^{N-1} x^3 = \frac{N^2 \cdot (N-1)^2}{6} ;$$

$$s_{22} = \sum_{x=0}^{N-1} x^4 = \frac{N(N-1)(2N-1)(3(N-1)^2 + 3(N-1) - 1)}{30} ,$$

а коэффициенты r рассчитываются по формулам:

$$r_0 = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) ; r_1 = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cdot x ; r_2 = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) \cdot x^2 .$$

Применив метод определителей для решения системы (18), можно получить коэффициенты для полинома второй степени:

$$c_0 = D_0 / D ; \quad c_1 = D_1 / D ; \quad c_2 = D_2 / D ,$$

где

$$D = k_0 k_2 k_4 + 2k_1 k_2 k_3 - k_1^2 k_4 - k_0 k_3^2 - k_2^3 ;$$

$$D_0 = r_0 k_2 k_4 + k_3 (r_2 k_1 + r_1 k_2) - r_1 k_1 k_4 - r_0 k_3^2 - r_2 k_2^2 ;$$

$$D_1 = r_1 k_0 k_4 + k_2 (r_0 k_2 + r_2 k_1) - r_2 k_0 k_3 - r_1 k_2^2 - r_0 k_1 k_4 ;$$

$$D_2 = k_2 (r_1 k_1 + r_2 k_0) + r_0 k_1 k_3 - r_0 k_2^2 - r_2 k_1^2 - r_1 k_0 k_3 .$$

Удаление низкочастотного дрейфа из исходного сигнала осуществляется с помощью выражений:

$$f_*(x) = f(x) - (c_0 + c_1 x + c_2 x^2) - \text{для полинома второй степени;} ,$$

$$f_*(x) = f(x) - (c_0 + c_1 x) - \text{для полинома первой степени;} ,$$

$$x = 0 \div N - 1 .$$

В качестве примера на рисунке 4 представлен вибрационный сигнал, полученный в реальных условиях от первичного виброизмерительного преобразователя при наличии низкочастотного дрейфа и после его удаления, а на рисунке 5 – амплитудные спектры этих сигналов. Анализ данных, представленных на рисунках, показывает, что удаление

низкочастотного тренда позволяет демаскировать сигнал при его обработке с помощью преобразования Фурье в информативно значимой полосе частот.

При осуществлении реального виброконтроля на технических объектах возникает вопрос о том, в каких случаях следует удалять низкочастотный дрейф из исходного сигнала перед его дальнейшей обработкой, а в каких – нет, так как иногда применение алгоритма удаления дрейфа может привести к обратным результатам.

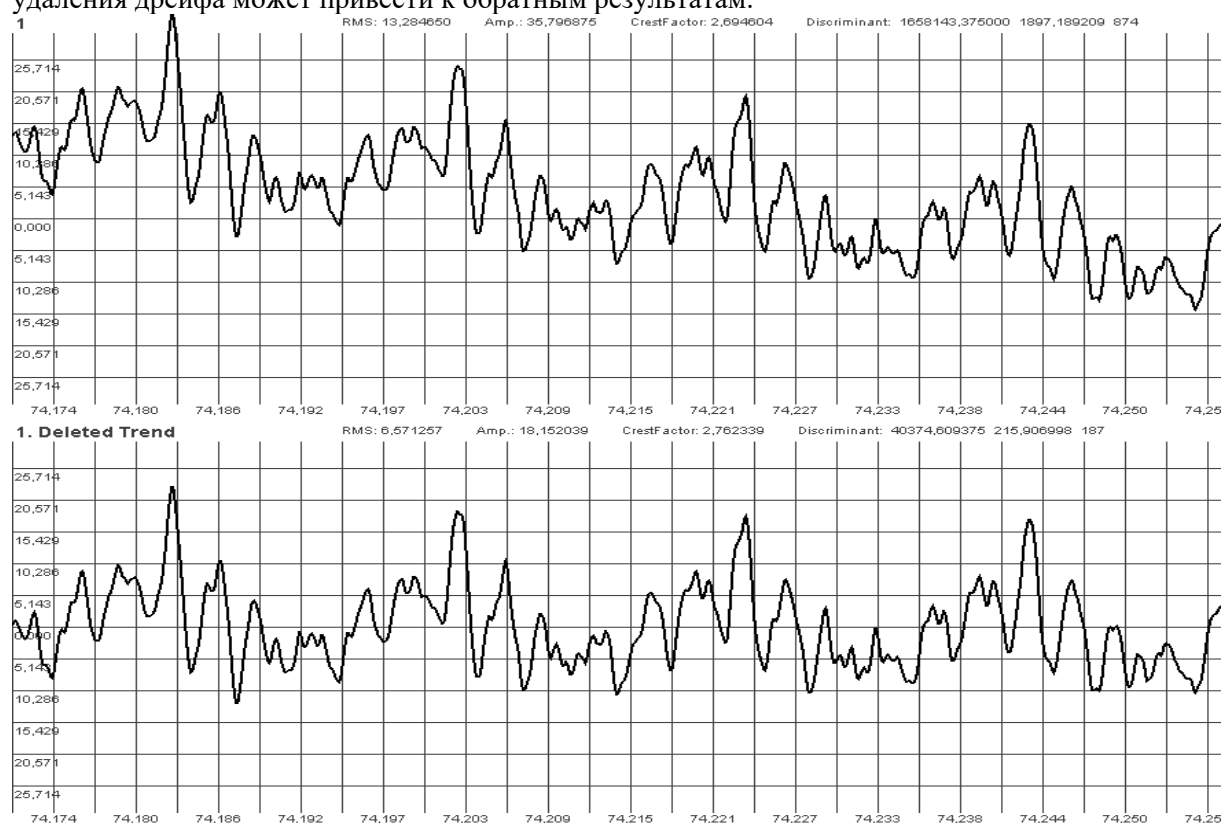


Рис. 4. Временная реализация вибросигнала в единицах виброускорения, полученная при исследовании электродвигателя, при наличии низкочастотного дрейфа и после его удаления

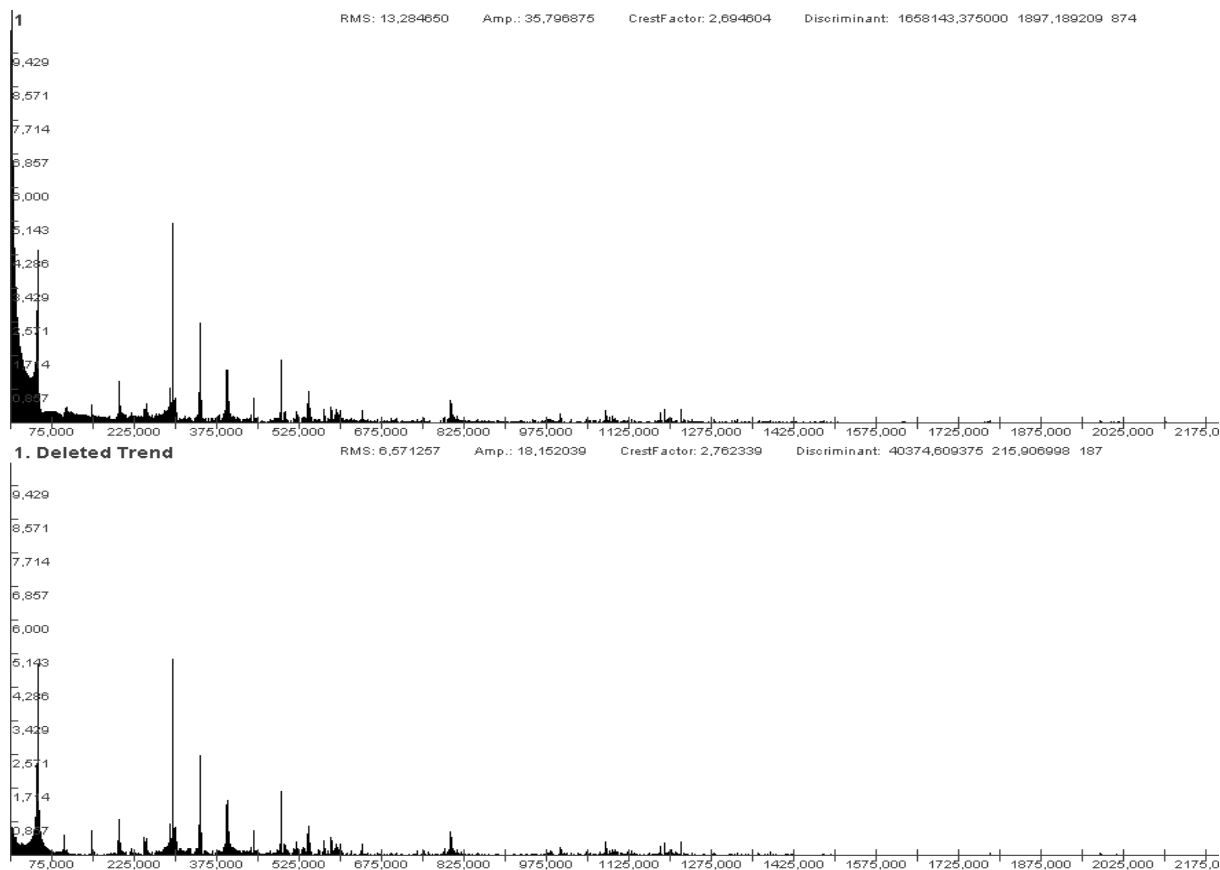


Рис. 5. Амплитудный спектр вибрационного сигнала при наличии низкочастотного дрейфа и после его удаления, частотное разрешение спектрального анализа 2,5 Гц

Для разрешения вопроса применимости алгоритма рассчитывается значение некоторого параметра (или вектора параметров) по отношению к сигналу до удаления дрейфа и после удаления:

$$A_1 = F[f(x)]; \quad A_2 = F[f_*(x)],$$

где F - функция обработки для расчета параметра;

A_1, A_2 - значение вычисленных параметров.

Затем сравниваются A_1 и A_2 . В том случае, если значение A_1 больше (меньше) A_2 , то алгоритм удаления низкочастотного дрейфа применяется к исходному сигналу, в противном случае – нет.

Разделение вибрационного сигнала на компоненты

Системы непрерывного стационарного мониторинга позволяют зафиксировать факт возникновения аномальной ситуации на контролируемом объекте и оперативно отреагировать на него стандартным образом или реализовать алгоритмы сигнализации и защиты, учитывающие индивидуальные особенности контролируемых объектов [9-12].

Однако значительные изменения СКЗ вибрационного сигнала или амплитуд отдельных или группы гармонических составляющих, выявляемые такими системами, свидетельствует о существенном развитии определенного типа дефекта. Если же стоит задача создания системы проактивного технического обслуживания оборудования, то возникает потребность проведения тщательного изучения изменений вибрационного состояния технических объектов на протяжении их эксплуатации. Представляет интерес обнаружение редких кратковременных изменений структуры вибрационного сигнала и дальнейшее выявление причинно-

следственных связей между их появлением и развитием дефектов, которые требуют определенного реагирования.

Для этого целесообразно проводить анализ непрерывных вибрационных сигналов, отражающих вибрационное состояние объекта, на протяжении длительных временных интервалов (часы и даже сутки), которые соответствуют некоторому циклу изменения режимов функционирования оборудования. Такой подход соответствует современной концепции обработки, называемой «Большие данные» [16].

Проводя анализ формы вибрационных сигналов, отражающий интенсивность механических колебаний корпусных элементов механизмов роторного типа, функционирование которых предполагает вращательное движение, и их амплитудных спектров, можно заметить, что в большинстве случаев такие вибрационные сигналы (см. ранее представленные рисунки), содержат периодическую компоненту, состоящую из гармоник, кратных частоте вращения, и некоторую шумоподобную составляющую.

Поэтому, с целью более детально исследования предлагается представить исходный вибросигнал в виде суммы периодической и шумоподобной составляющих [24-25]:

$$x(nt_d) = p(nt_d) + s(nt_d) = \sum_{m=1}^L A_m \cos[2\pi \cdot k_m f_o \cdot nt_d - \phi_m] + s(nt_d), \quad (19)$$

где $p(nt_d)$ – периодическая составляющая вибрационного сигнала;

$s(nt_d)$ – шумоподобная составляющая вибрационного сигнала;

n – номер дискретного отсчета, $n = 0, 1, 2, \dots$;

t_d – интервал дискретизации;

f_o – частота вращения ротора или вала привода (оборотная частота);

k_m – кратность m -ой гармоники, включенной в периодическую составляющую, относительно f_o ;

A_m, f_m, ϕ_m – амплитуда, частота, начальная фаза m -ой гармоники, $f_m = k_m f_o$.

L – число гармоник, выбранных для периодической составляющей вибросигнала.

Кратность гармоник, входящих в состав периодической составляющей вибросигнала, определяется с учетом параметров подшипников, зубчатых передач, схемы редуктора контролируемого узла и его других конструктивных особенностей и может быть как целочисленной так и дробной. Если точно известна частота f_o , то амплитуда и начальная фаза m -ой гармоники легко вычисляются с помощью дискретного преобразования Фурье (1)-(3), причем количество дискретных точек преобразования выбирается таким, чтобы интервал анализа был кратным (в рамках возможностей интервала дискретизации) периоду f_m :

$$N_m = \text{round}\left(k \frac{f_d}{f_m}\right),$$

где k – число периодов частотной составляющей f_m , такое, что N_m меньше или равно размеру массива, кратного степени двойки, который используется для вычисления амплитудного спектра сигнала:

$$k = \text{int}\left(\frac{N \cdot f_m}{f_d}\right),$$

где f_d – частота дискретизации.

Когда частота f_0 известна, периодическая составляющая сигнала $p(nt_d)$ вычисляется по формуле первого слагаемого выражения (19), а шумоподобная составляющая находится как:

$$s(nt_d) = x(nt_d) - p(nt_d). \quad (20)$$

Однако, на практике для контроля интенсивности вибрации и регистрации вибрационных сигналов часто используют приборы, в которых отсутствует измерительный канал для фазового датчика, который формирует сигнал, применяемый для определения частоты вращения и фазовых сдвигов оборотных составляющих вибрации. Традиционный же спектральный анализ позволяет точно вычислить первую и другие оборотные частоты, только в том случае, если они кратны фундаментальной частоте спектрального анализа. При проведении исследований вибрационного состояния реальных объектов такой кратности удается достигнуть далеко не всегда. Следствие этого – размывание оборотной частотной составляющей по соседним спектральным линиям и проблемы с определением её частоты. В таких случаях для определения значения оборотной частоты представляется целесообразным применение способа вычисления выраженной спектральной составляющей на основе значений соседних спектральных составляющих (см. (10)-(11)).

После разделения вибрационного сигнала на полигармоническую и шумоподобную составляющие можно определять параметры каждой из составляющих в отдельности.

При этом можно сделать предположение, что изменения параметров периодической составляющей – следствие достаточно существенного изменения технического состояния объекта, а локальные изменения шумоподобной составляющей – это проявление зарождающихся дефектов. На рисунках 6-7 показан исходный вибрационный сигнал, отражающий вибрационное состояние подшипниковой опоры генератора, его периодическая и шумоподобная составляющие, а также их амплитудные спектры. Периодическая компонента отражает основные особенности вибрационного сигнала, включая в себя гармоники кратные частоте вращения. Это хорошо видно на амплитудных спектрах. А шумоподобный остаточный вибросигнал несет в себе несущественные отличия от периода к периоду и локальные всплески вибрации, которые могут быть индикаторами зарождающихся дефектов.

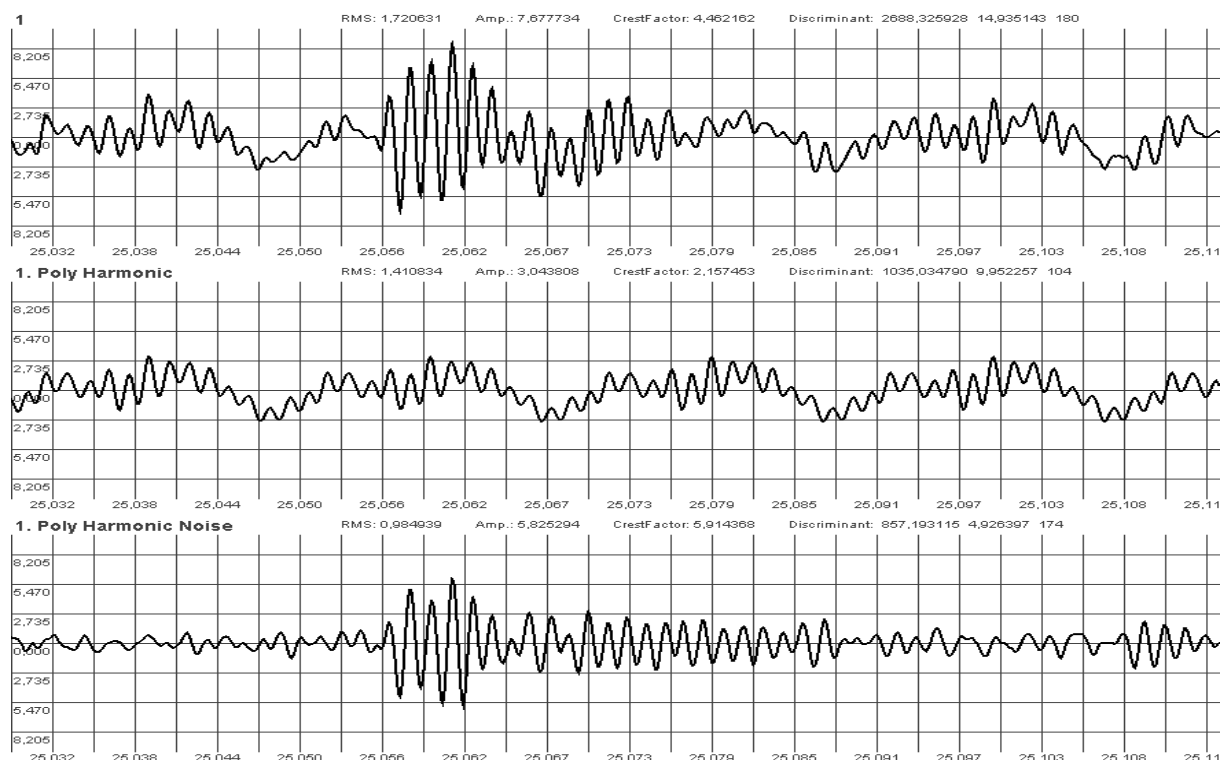


Рис. 6. Временная реализация вибросигнала в единицах виброускорения, полученная при исследовании подшипниковой опоры генератора мощностью 300МВт, её периодическая и шумоподобная составляющие

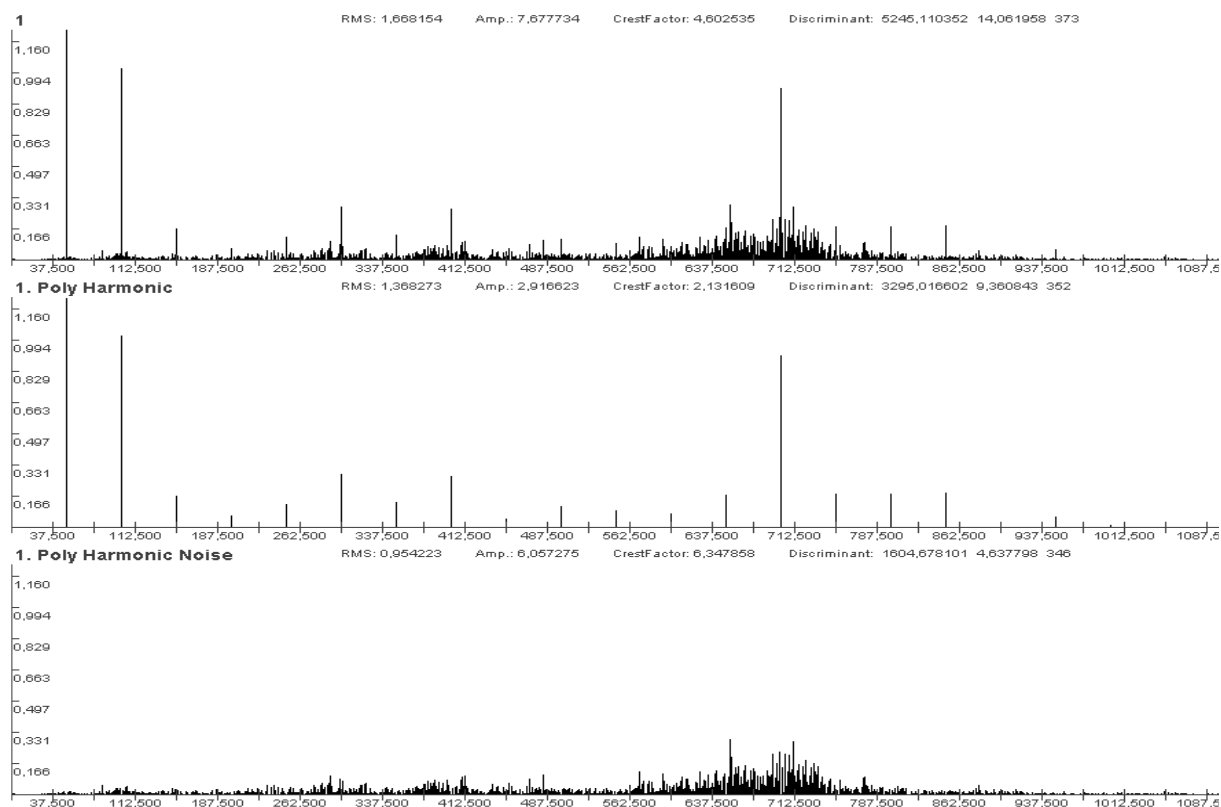


Рис. 7. Амплитудные спектры исходного вибрационного сигнала, его периодической и шумоподобной составляющих

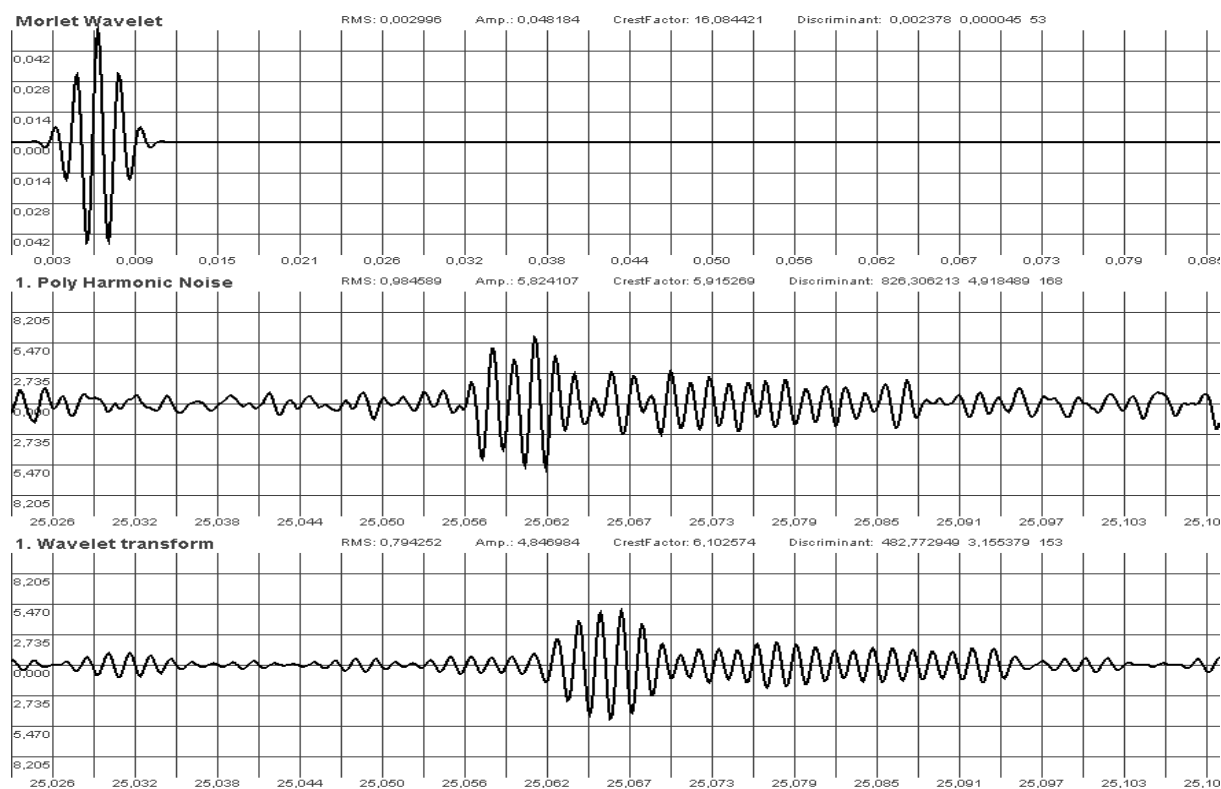


Рис. 8. Форма вейвлета Морле, шумоподобной составляющей и её вейвлет-преобразования

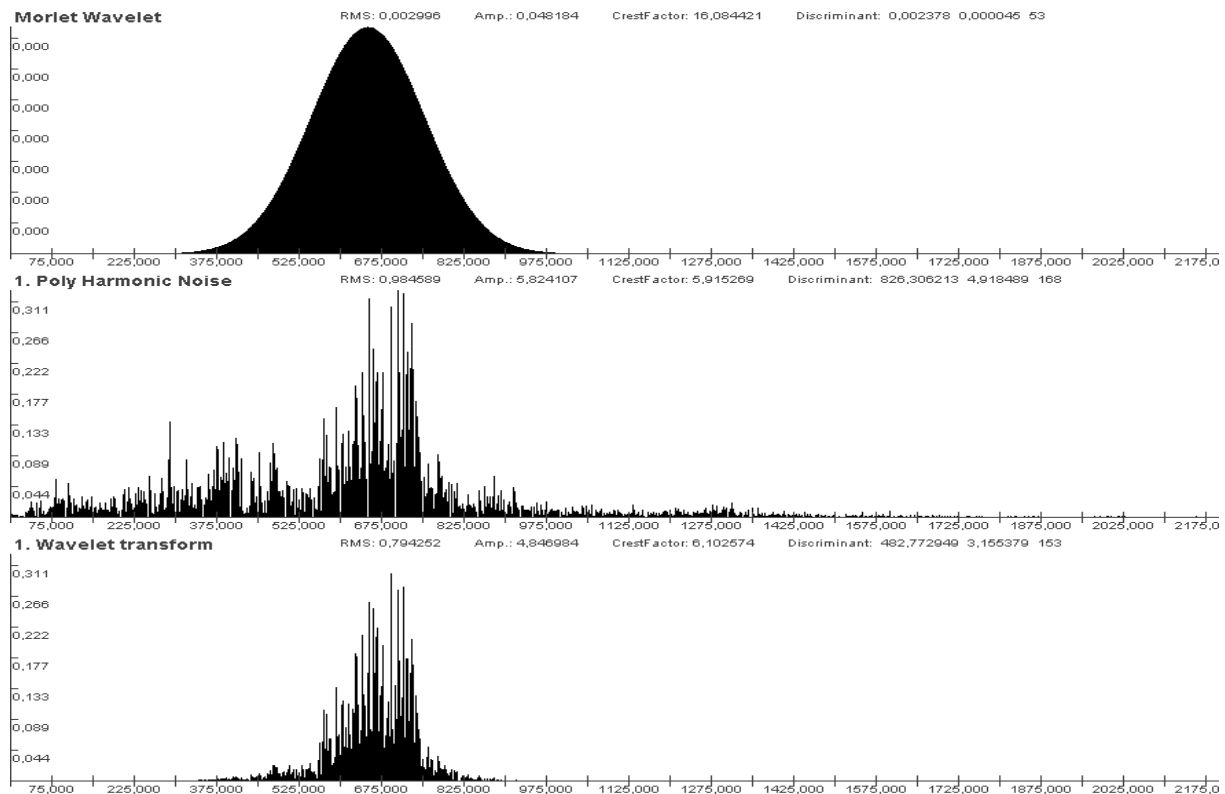


Рис. 9. Амплитудный спектр вейвлета Морле, шумоподобной составляющей и её вейвлет-преобразования

Обработка большого объема вибрационных сигналов, полученных при исследовании механизмов и агрегатов с вращательным движением, подтверждает гипотезу о том, что разложение исходных вибрационных сигналов на периодическую и шумоподобную составляющие с последующим их отдельным анализом позволяет на шумоподобной составляющей выявлять редко возникающие аномальные вибрационные всплески [26].

Для лучшего выделения возмущающих всплесков можно, в ряде случаев, предварительно выполнить вейвлет-преобразование шумоподобной составляющей [27-29]. На рисунках 8-9 представлены результаты вейвлет-преобразования во временной и частотной областях.

Обработка вибрационных сигналов с изменяющейся основной частотой

К данному способу обработки вибрационных сигналов приходится прибегать в тех случаях, когда требуется исследуемые сигналы разделить на компоненты (19), но сигналы зарегистрированы при изменяющейся во времени частоте вращения ротора (вала) контролируемого объекта. При этом обычно известен диапазон изменения частоты вращения (оборотной частоты).

Предлагается следующий способ обработки вибрационного сигнала.

1. Для исследования выбирается отрезок временной реализации ($L=4096, 8192, 16384, 32768$ дискретных точек).

2. В начале отрезка исследуемой временной реализации на более коротком интервале, в $N=1024$ или 2048 дискретных точек выполняется быстрое преобразование Фурье (БПФ) [21,22] и вычисляется амплитудный спектр (1)-(3).

3. Анализируется амплитудный спектр в поддиапазоне допустимого изменения оборотной частоты и в 5-7 поддиапазонах, значения границ которых имеют соответствующую кратность по отношению к границам изменения оборотной частоты.

4. Выбирается гармоника в одном из этих поддиапазонов, максимальная по амплитуде, и определяется кратность этого поддиапазона по отношению к поддиапазону оборотной частоты.

5. Применяются формулы (4)-(11) и определяются параметры выбранной гармоники – её частота f_x и амплитуда A_{f_x} .

6. Если была выбрана гармоника из первого поддиапазона, то её частота принимается за начальную $f_{begin} = f_x$ для исследуемого отрезка временной реализации размера L , в противном случае

$$f_{begin} = \frac{f_x}{j},$$

где j – кратность поддиапазона, в котором определялась частота f_x , поддиапазону оборотной частоты (в общем случае это действительное число).

7. В конце отрезка исследуемой временной реализации на отрезке в 1024 или 2048 отсчетов выполняются описанные выше действия (пункты 2-6) и находится конечная оборотная частота f_{end} .

8. Вычисляются амплитуды квазигармонических составляющих сигнала с изменяющимися частотами:

$$C_{k*} = \frac{2}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot z_k (m + n \cdot \Delta m) \cdot n}{L}\right); \quad (21)$$

$$S_{k*} = \frac{2}{L} \sum_{n=0}^{L-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot z_k (m + n \cdot \Delta m) \cdot n}{L}\right), \quad (22)$$

где z_k – кратность k -ой квазигармонической составляющей. В простейшем случае это целочисленные значения 1, 2, 3, ..., но могут быть и действительные значения.

$k = 1 \div K$ – номер гармоники, входящей в состав квазипериодической составляющей.

$$\Delta F = \frac{1}{t_s L};$$

$$m_{beg} = \frac{f_{begin}}{\Delta F};$$

$$m_{end} = \frac{f_{end}}{\Delta F};$$

$$m = m_{begin} - \Delta m \frac{N}{2};$$

$$\Delta m = \frac{m_{begin} - m_{end}}{L - N},$$

где ΔF – частотное разрешение при анализе на длинной временной реализации;
 m_{beg} , m_{end} , m – действительные числа;
 t_s – интервал дискретизации, заданный при вводе вибрационного сигнала;
 K – количество гармоник кратных ведущей частоте, которые используются для определения квазипериодической составляющей вибрационного сигнала.
 9. Рассчитывается квазипериодическая составляющая вибрационного сигнала:

$$p_*(n) = \sum_{k=1 \div K} \left(C_{k*} \cos \left(\frac{2\pi \cdot z_k (m + n \cdot \Delta m) \cdot n}{L} \right) + S_{k*} \sin \left(\frac{2\pi \cdot z_k (m + n \cdot \Delta m) \cdot n}{L} \right) \right),$$

где n – номер дискретного отсчета, $n=0,1,2, \dots, L-1$.

10. Шумоподобная составляющая вычисляется как разность между исходным сигналом и квазипериодической составляющей:

$$s(n) = x(n) - p_*(n), \quad n=0,1,2, \dots, L-1.$$

На рисунках 10-11 в качестве примера изображены исходный вибрационный сигнал, полученный при контроле вибрационного состояния электродвигателя, при изменении частоты вращения приводного вала, его разложение на квазипериодическую и шумоподобную составляющие, а также амплитудные спектры этих сигналов.

Данный пример наглядно демонстрирует, что предложенный способ позволяет выделять из вибрационного сигнала кратные квазигармонические составляющие, определяемые частотой вращения вала (ротора) исследуемого технического объекта.

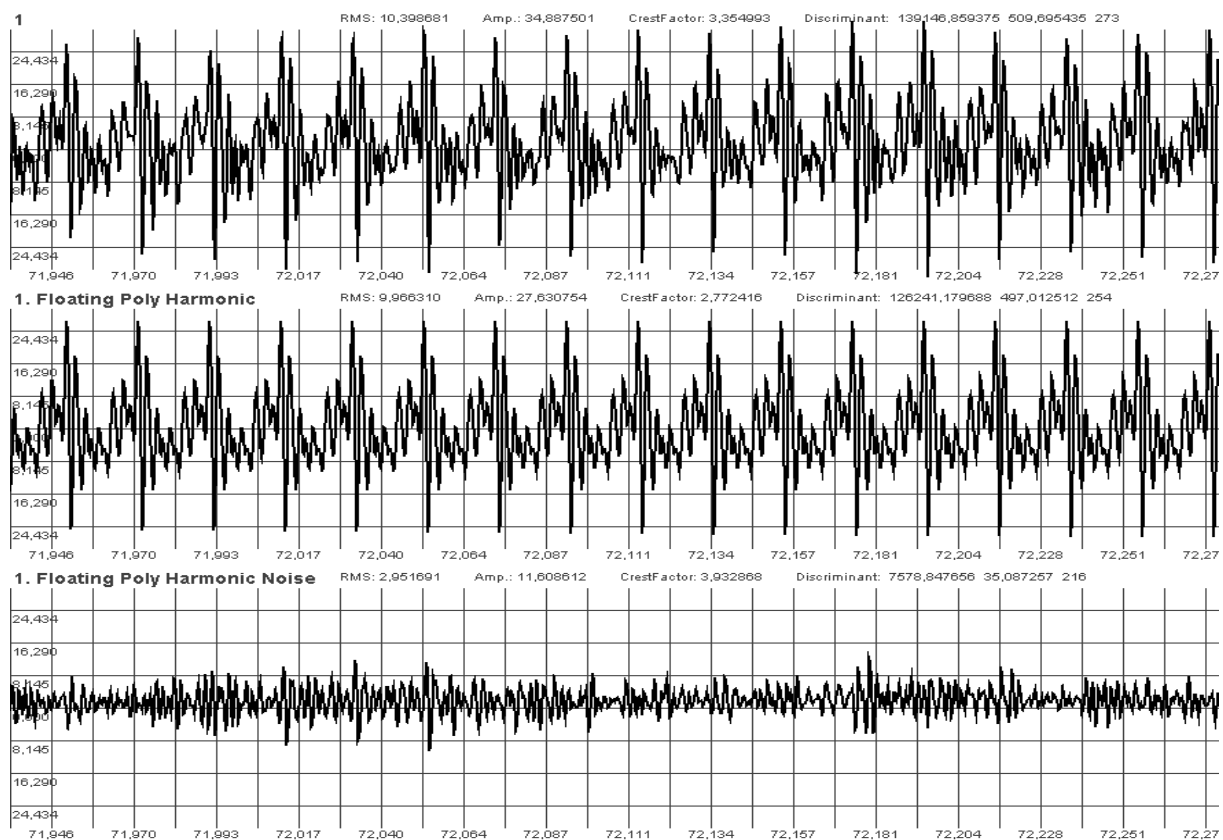


Рис. 10. Временная реализация вибросигнала в единицах виброускорения, полученная при исследовании вибрации электродвигателя, её квазипериодическая и шумоподобная составляющие

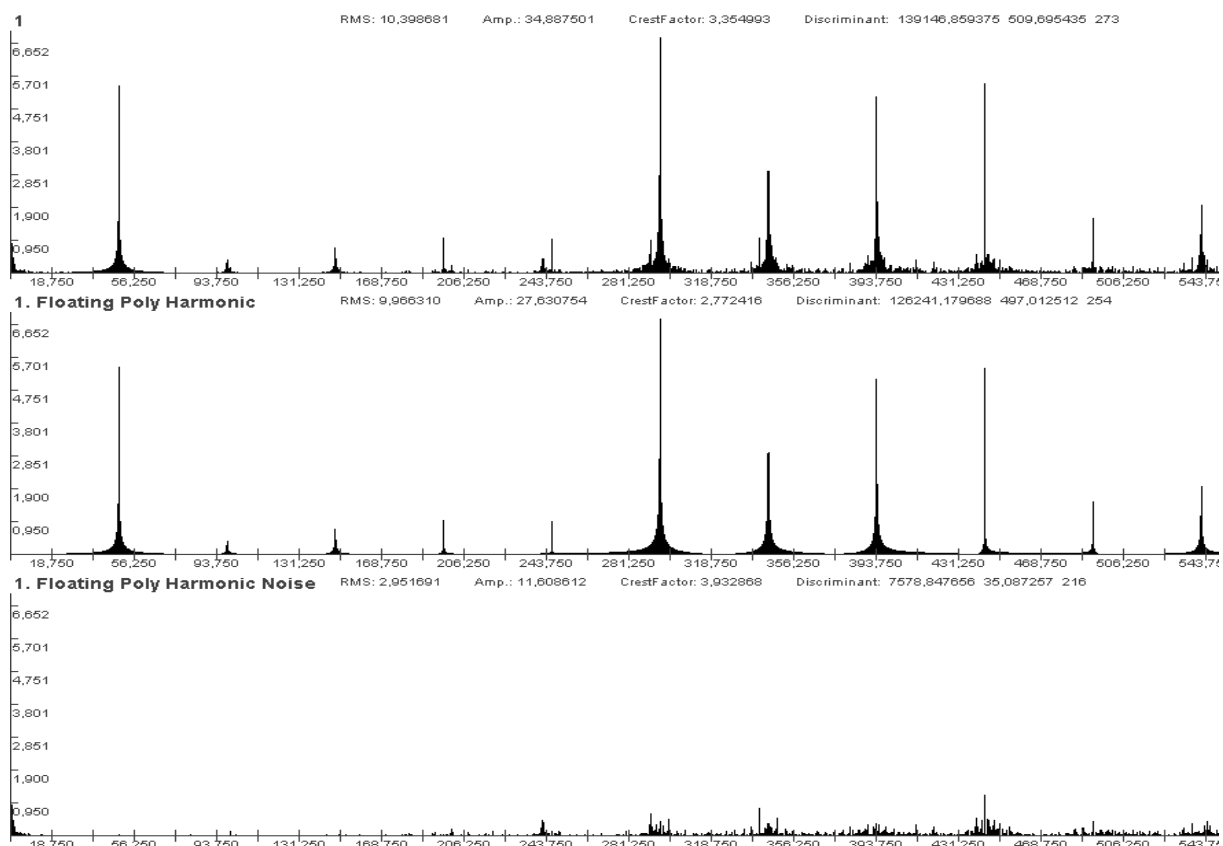


Рис. 11. Амплитудные спектры исходного вибрационного сигнала, его квазипериодической и шумоподобной составляющих

Заключение

Рассмотренные алгоритмы и способы цифровой обработки вибрационных сигналов применены при разработке измерительно-вычислительных комплексов (ИВК) «Лукомль» и «Темб-М» [7, 10-20]. Многолетний опыт эксплуатации ИВК «Лукомль» в качестве штатной системы вибрационного контроля и мониторинга турбоагрегатов на предприятиях энергетики Беларуси показал их хорошую точность при определении параметров вибрации, высокую надежность в работе и адаптируемость к решению новых задач.

В настоящее время решаются новые задачи в области создания систем оценки технического состояния, поддержки принятия решений и диагностики по вибрационным параметрам. Для этого применяются системы на основе распределенного сбора больших объемов виброметрических данных и программно-алгоритмических средств обработки больших данных.

Проведен ряд экспериментальных работ в этом направлении, в которых для регистрации длинных реализаций вибрационных сигналов применялся ИВК «Темб-М», а для их обработки использовано программное средство, разработанное в рамках задания ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Список литературы

1. Bently D.E., Hatch C.N., Grissom B. Grissom Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Canada. Bently pressurized bearing company. 2002.
2. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика. М. 2005.
3. ISO 10816. Mechanical vibration. Evolution of machine vibration by measurements on non- rotating parts. Part 1-5.
4. ГОСТ ИСО 10816–1–97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования.
5. ГОСТ 25364–97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений.
6. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. СПб., Изд. центр СПбГМТУ. 2000.
7. Бранцевич П.Ю. // Энергетика и ТЭК. 2008. № 12(69). С. 19-21.
8. Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф. Устройство для измерения параметров вибрации и защиты механизмов с вращательным движением. Патент на полезную модель РБ № 8654 .
9. Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Базылев Е.Н. // Доклады БГУИР. 2015. № 7. С. 5-10.
10. Бранцевич П.Ю. // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций. Сб. докл. Москва. ОАО «ВТИ». 2005. С. 115–121.
11. Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф. // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. Минск. Институт прикладной физики НАН Беларуси/ 2013. С. 67-74.
12. Brancevich P., Miao X., Li Y. // 20th International Congress on Sound and Vibration. 7-11 July 2013. Bangkok. Thailand. PP. 612-619.
13. Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н., Костюк С.Ф. // Неразрушающий контроль и диагностика. 2017. № 2. С. 18-32.
14. Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н., Костюк С.Ф. // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Могилев, Белорус.-Рос. ун-т, 2017. С. 418-423.
15. Бранцевич П.Ю. // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2016): сб. статей VI международной заочной научно-технической конференции. Ч.1. Поволжский гос. ун-т сервиса. Тольятти. ПВГУС. 2016. С. 80-86.
16. Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н., Костюк С.Ф. // BIG DATA and Advanced Analytics. Использование BIG DATA для оптимизации бизнеса и информационных технологий : сборник материалов II междунар. науч.-практ. конф. (Минск, Республика Беларусь, 15-17 июня 2016 года). Минск. БГУИР. 2016. С. 119-126.
17. Бранцевич П. Ю. // Алгоритмические и программные средства в информационных технологиях, радиоэлектронике и телекоммуникациях: сб. статей II международной заочной научно-технической конференции. Тольятти. ПВГУС. 2014. С. 63–71.

18. Brancevich P., Li Y. // 21st International Congress on Sound and Vibration. 13-17 July 2014. Beijing. China. PP. 4122-4129.
19. Бранцевич П.Ю. // Topical areas of fundamental and applied research: Proceedings of the Conference. North Charleston, 2013. Vol. 1. PP. 111-116.
20. Бранцевич П.Ю. // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. 2013. Вып.2. С. 277-283.
21. Оппенгейм А.В., Шафер Р.В. Цифровая обработка сигналов. Москва. Связь. 1979.
22. Лайонс Р. // Цифровая обработка сигналов. Москва. Бином. 2006.
23. Березин И.С., Жидков Н.П. // Методы вычислений. Т. 2. Москва. Физматгиз. 1962.
24. Бранцевич П.Ю., Базаревский В.Э., Костюк С.Ф. // Механика 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г. В 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. Минск, 2011. Т. II. С. 27–31.
25. Бранцевич П. Ю. // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT–2012) : сб. ст. II международной заочной научно–технической конференции. Ч.1. Поволжский гос. ун–т сервиса. Тольятти, ПВГУС. 2012. С. 244 – 250.
26. Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н. // Неразрушающий контроль и диагностика. 2016. № 3. С. 28-41.
27. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. Москва. ДМК Пресс. 2008.
28. Бранцевич П.Ю. // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. 2014. Вып.3. С. 220-228.
29. Brancevich P., Li Y // 22nd International Congress on Sound and Vibration 2015 (ICSV 22). Proceedings of a meeting held 12-16 July 2015, Florence, Italy. International Institute of Acoustics and Vibration. Curran Associates Inc. USA. 2015. PP. 3609-3616.

References

1. Bently D.E., Hatch C.N., Grissom B. Grissom Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Canada. Bently pressurized bearing company. 2002.
2. Nerazrushayushchiy kontrol. Spravochnik. Tom 7. Kniga 2. Vibrodiagnostika. M. 2005.
3. ISO 10816. Mechanical vibration. Evolution of machine vibration by measurements on non-rotating parts. Part 1-5.
4. GOST ISO 10816–1–97. Vibracija. Kontrolj sostojanija mashin po rezultatam izmerenij na nevrashschajushchichsja tschascjah. Tschascj 1. Obshtschie trebovanija.
5. GOST 25364–97. Agregaty paroturbinnnye stacionarnnye. Normy vibracii opor valoprovodov i obshtschie trebovanija k provedeniju izmerenij.
6. Barkov A.V. Monitoring i diagnostika rotornyh mashin po vibracii. SPb., Izd. centr SPbGMTU. 2000.
7. Brantsevich P.YU. // Energetika i TEK. 2008. № 12(69). S. 19-21.
8. Brantsevich P.YU., Kostyuk S.F. Ustojstvo dlja izmerenija parametrov vibracii i zashtschity mehanizmov s vrashtschatel'nyh dvirzeniem. Patent na poleznuju model RB № 8654.
9. Brantsevich P.YU., Bazylev Ye.N., Kostyuk S.F. // Doklady BGUIR. 2015. № 7. S. 5-10.
10. Brantsevich P.YU. // Problemy vibratsii, vibronaladki, vibromonitoringa i diagnostiki oborudovaniya elektricheskikh stantsiy. Sb. dokl. Moskva, OAO «VTI», 2005. S. 115–121.
11. Brantsevich P.YU., Kostyuk S.F. // Dostizheniya fiziki nerazrushayushchego kontrol: sb. nauchn. tr. Minsk. Institut prikladnoy fiziki NAN Belarusi, 2013. S. 67-74.
12. Brancevich P., Miao X., Li Y. // 20th International Congress on Sound and Vibration. 7-11 July 2013. Bangkok. Thailand. PP. 612-619.
13. Brantsevich P.YU., Bazylev Ye.N., Kostyuk S.F. // Nerazrushajushchij kontrol i diagnostika. 2017. № 2. С. 18-32.
14. Brantsevich P.YU., Bazylev Ye.N., Kostyuk S.F. // Sovremennyye metody i pribory kontrolya kachestva i diagnostiki sostoyaniya ob"yektov: sb. st. 6-y Mezhdunar. nauch. -tekhn. konf. Mogilev, Belarus. -Ros. un-t, 2017. S. 418-423.
15. Brantsevich P.YU. // Informacii oonye tehnologii. Radioelektronika. Telekommunikacii. (ITRT-2016): sb. statej VI merzdunarodnoj zaotschnoj nauchno-technitscheskoj konferencii. Ts.1. Povolrzkij gos. un-t servisa. Toljatti. PVGUS. 2016. S. 80-86.
16. Brantsevich P.YU., Bazylev Ye.N., Kostyuk S.F. // BIG DATA and Advanced Analytics. Ispolzovanie BIG DATA dlja optimizacii biznesa i informacionnyh tehnologij: sbornik materialov II merzdunar. nauch.-prakt. konf. (Minsk, Respublika Belarus, 15-17 ijunja 2016 goda). Minsk. BGUIR. 2016. S. 119-126.
17. Brantsevich P.YU. // Algoritmitscheskije i programmnye sredstva v informacii oonyh tehnologijach, radioelektronike i telekommunikacijach: sb. statej I I merzdunarodnoj zaotschnoj nauchno-technitscheskoj konferencii. Toljatti. PVGUS. 2014. S. 63-71.
18. Brancevich P., Li Y. // 21st International Congress on Sound and Vibration. 13-17 July 2014. Beijing. China. PP. 4122-4129.

19. Brantsevich P.YU. // Topical areas of fundamental and applied research: Proceedings of the Conference. North Charleston, 2013. Vol. 1. PP. 111-116.
20. Brantsevich P.YU. // Aktualnye voprosy mashinovedeniya: sb. nautc. tr. 2013. Vyp.2. S. 277-283.
21. Oppengeym A., Shaffer R. // Tsifrovaya obrabotka signalov. Moskva. Svjaz. 1979.
22. Layons R. // Tsifrovaya obrabotka signalov. Moskva: Binom . 2006.
23. Berezin I.S., Rzikov N.P. // Metody vytschislenij. T. 2. Moskva. Fizmatgiz. 1962.
24. Brantsevich P.YU., Bazarevskiy V.E., Kostyuk S.F. // Mekhanika 2011: sb. nauch. tr. V Belorusskogo kongressa po teoret. i prikladnoy mekhanike, Minsk. 26–28 okt. 2011g. v 2 t. /Ob`edin. in-t mashinostroenija NAN Belarusi. Minsk. 2011. T. II. S. 27-31.
25. Brantsevich P.YU. // Informacioonye tehnologii. Radioelektronika. Telekommunikacii. (ITRT-2016): sb. statej II merzdunarodnoj zaotschnoj nautschno-technitscheskoj konferencii. Ts.1. Povolrzkij gos. un-t servisa. Toljatti. PVGUS. 2012. S. 244-250.
26. Brantsevich P.YU., Bazylev Ye.N. // Nerazrushajuschtsij control i diagnostika. 2016. № 3. C. 28-41.
27. Smolencev N.K. // Osnovy teorii vejvletov. Vejvlety v MATLAB. Moskva. DMK Press. 2008.
28. Brantsevich P.YU. // Aktualnye voprosy mashinovedeniya: sb. nautc. tr. 2014. Vyp.3. C. 220-228.
29. Brancevich P., Li Y // 22nd International Congress on Sound and Vibration 2015 (ICSV 22). Proceedings of a meeting held 12-16 July 2015, Florence, Italy. International Institute of Acoustics and Vibration. Curran Associates Inc. USA. 2015. PP. 3609-3616.

Сведения об авторах	Information about the authors
Бранцевич П.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедры ПОИТ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Базылев Е.Н. ассистент кафедры ПОИТ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Кулаковская Е.С. Заместитель декана факультета компьютерных систем и сетей Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.	Brancevich P.J., PhD, associate professor, associate professor the software for information technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics. Bazyleu Y.N., assistant the software for information technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics. Kulakouskaya E.S. Deputy Dean, Faculty of computer systems and networks, Belarussian state university of infomatics and radioeletronics.
Адрес для корреспонденции	Address for correspondence
220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники тел. +375-17-293-88-81; e-mail: branc@bsuir.edu.by Бранцевич Петр Юльянович	220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovka st., 6, Belarusian state university of informatics and radioelectronics tel. +375-17-293-88-81; e-mail: branc@bsuir.edu.by Brancevich Peter

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ КАК ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ КРИТЕРИЙ ПРИ ПРИНЯТИИ УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

М.Н. СУББОТИН, О.И. ЦИНКЕВИЧ

Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь
ул. Машиностроителей, 25, Минск, 220118, Республика Беларусь

Аннотация. Практика последних лет наглядно показывает сильное влияние на экономику нашей страны разнообразных чрезвычайных ситуаций. На территории Беларуси могут иметь место природные и техногенные аварии, катастрофы. Это требует систематической деятельности по борьбе с этими бедствиями. Важным аспектом данной деятельности служит ведение работ по прогнозированию возможности возникновения и экономических последствий подобных чрезвычайных ситуаций. Работы по мониторингу и прогнозированию бедствий всегда являлись весьма актуальными. Именно от этого зависит полнота и целесообразность принимаемых должностными лицами решений по предупреждению и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, последствия чрезвычайных ситуаций, прогнозирование, мониторинг, управленческое решение.

Abstract. The experience of recent years demonstrates a strong influence of different emergencies on the economy of our country. On the territory of the Republic of Belarus, there are natural disasters and anthropogenic accidents. This requires systematic activities to manage these catastrophes. An important aspect of this activity is the work on forecasting the possibility of occurrence and economic consequences of such emergencies. Monitoring and prediction of disasters have always been very important. It depends on the completeness and appropriateness of the adopted officials decisions on prevention and elimination of consequences of emergency situations.

Keywords: emergency situations, consequences of emergencies, forecasting, monitoring, management decision.

В современном мире система мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций становится на первое место в борьбе с техногенными катастрофами и природными катаклизмами. Перспектива этого направления очевидна. В области защиты населения и территорий мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций играет важную роль, так как наблюдение, анализ и оценка состояния и изменения выявленных и потенциальных источников чрезвычайных ситуаций, а также прогноз влияния на безопасность населения, организаций, окружающую среду позволит разрабатывать и реализовывать меры, направленные на предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций, минимизацию социально-экономических и экологических последствий.

Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций на сегодня рассматривается как комплекс наблюдений за состоянием окружающей среды (атмосферы, гидросферы, иных геосфер, почвенно-растительного покрова, животного мира, объектов техносферы), с целью контроля ее состояния и охраны, а также опережающее отражение вероятности возникновения и развития чрезвычайной ситуации на основе анализа возможных причин ее возникновения, ее источника в прошлом и настоящем.[1]

В области защиты населения и территорий сущность мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций заключается в наблюдении, анализе и оценке состояния и изменения выявленных и потенциальных источников чрезвычайных ситуаций, а также прогнозировании

влияния на безопасность населения, организаций, окружающую среду, позволяющую разрабатывать и реализовывать меры, направленные на предупреждение и ликвидацию чрезвычайных ситуаций, минимизировать социально-экономические и экологические последствия.

Результаты мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций могут стать одним из определяющих критериев при принятии управленческих решений в деятельности органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям. Точная и оперативная информация об опасном природном явлении, аварии или опасном техногенном происшествии и т.д., опережающее отражение вероятности возникновения и развития чрезвычайной ситуации на основе анализа возможных причин ее возникновения, ее источника в прошлом и настоящем позволят качественно и эффективно разрабатывать программы и планы, принимать действенные решения по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций на этапе оценки обстановки.

Организацию проведения видов мониторинга чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Республике Беларусь осуществляют 11 органов государственного управления по 15 отдельным видам мониторинга. [2]

Порядок функционирования системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на территории Республики Беларусь определяется нормативными правовыми актами, принимаемыми Правительством Республики Беларусь, МЧС Республики Беларусь, республиканскими органами государственного управления и иными государственными организациями, подчиненными Правительству Республики Беларусь, местными исполнительными и распорядительными органами.

Предупреждение чрезвычайных ситуаций в рамках системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций как для их предотвращения (снижения риска возникновения), так и в целях уменьшения потерь и ущерба от них (смягчения последствий) должно проводиться по следующим направлениям:

- мониторинг окружающей среды и состояния потенциально опасных объектов;

- прогнозирование чрезвычайных ситуаций и оценка их риска.

Система мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций предусматривает:

- организацию взаимодействия между подсистемами Государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и их звеньями по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций (представление сведений о состоянии обстановки на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения и прилегающих к ним территориях, принятых мерах по защите населения, предупреждению чрезвычайных ситуаций и снижению риска их возникновения, мерах по повышению готовности сил и средств, предназначенных для локализации и ликвидации возможных чрезвычайных ситуаций и планах их действий);

- организацию обмена оперативной информацией;

- создание необходимых банков данных по прогнозированию чрезвычайных ситуаций;

- создание необходимой научно-технической и методической документации по прогнозированию чрезвычайных ситуаций;

- анализ принятых технических решений по предупреждению и прогнозированию чрезвычайных ситуаций на объектовом, местном, территориальном и республиканском уровнях;

- разработку методологий и методик вариантных прогнозов возникновения, развития и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Можно предположить, что степень влияния чрезвычайных ситуаций на социально-экономическое развитие Республики Беларусь в будущем будет только возрастать. Объективным фактором роста уязвимости послужат тенденции увеличения концентрации населения, роста городских агломераций, усложнения технологии, все большее использование опасных процессов и общее изменение производительных сил, неограниченный рост техносферы, нарушающий баланс в окружающей среде. Обеспечение успешного социально-экономического развития в этих условиях возможно только при наличии эффективной системы безопасности населения и устойчивости народного хозяйства. Успешность функционирования подобной системы в значительной мере зависит от того, удастся ли реализовать стратегический

подход при противодействии данным бедствиям или нет. Будет ли строиться деятельность системы безопасности в чрезвычайных ситуациях на долгосрочном прогнозировании развития ситуации и четкой постановке целей или нет. Это в настоящее время с особой актуальностью ставит задачи изучения вопросов прогнозирования и мониторинга возникновения чрезвычайных ситуаций и их последствий для экономики и общества и остается одним из приоритетных направлений деятельности МЧС Республики Беларусь.

Список литературы

1. Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций. Общие положения. Порядок функционирования системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. ТКП 304-2011 Введ. 08.04.11. – Минск: МЧС, 2011. – 40 с.
2. Об утверждении положения о системе мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [Электронный ресурс]: Постановление Совета Министров Республики Беларусь, 19 ноя. 2004 г., № 1466 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Национальный центр правовой информации Республики Беларусь – Минск, 2016.

Сведения об авторах

Субботин М.Н., кандидат военных наук, доцент, профессор Университета гражданской защиты МЧС РБ.

Цинкевич О.И., старший преподаватель Университета гражданской защиты МЧС РБ.

Information about the authors

Subbotin, M.N., candidate of military sciences, associate Professor, University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus.

Tsinkevich, O.I., senior lecturer, University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220118, Республика Беларусь, Минск, Машиностроителей, 25, Университет гражданской защиты МЧС РБ, +37517291423357; e-mail:cinkevich58@mail.ru

Address for correspondence

220118, Republic of Belarus, Minsk, Mashinostroiteley str., 25, University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. +37517291423357; e-mail:cinkevich58@mail.ru

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЕСЕННИХ ПОЛОВОДИЙ

Д.О. ПЕТРОВ

*Учреждение образования "Брестский государственный технический университет"
ул.Московская 267, Брест, 224017, РБ*

Аннотация. Проведен обзор основных факторов, влияющих на прохождение весенних половодий на равнинных реках с преимущественно снеговым питанием. Описан метод определения содержания воды в снежном покрове на основе пассивного микроволнового сканирования земной поверхности радиометрами-поляриметрами с борта ИСЗ. Предложена методика прогнозирования расхода воды в створе реки во время прохождения весенних половодий на основе комплексного анализа при помощи искусственных нейронных сетей гидрометеорологических временных рядов и спутникового мониторинга содержания воды в снежном покрове на водосборной площади реки. Приведены результаты апробации методики в створе р. Припять, расположенного в окрестностях гидрологического поста г. Мозырь.

Ключевые слова: спутниковый радиометрический мониторинг, водный эквивалент снежного покрова, прогнозирование весенних половодий, искусственные нейронные сети.

Abstract. The main driving factors, influencing the spring high water period on the lowland rivers with mainly snowmelt feeding are reviewed. The snow water equivalent assessment method, based on satellite based passive microwave radiometry is described. The method of spring flood river discharge prediction, based on artificial neural network processing of both hydrometeorological and microwave radiometry time series is proposed. The approbation results of the proposed prediction method, which is applied on river Pripyat cross section, situated near Mozyr hydrological station are given.

Keywords: microwave radiometry, snow water equivalent, spring flood water discharge prediction, artificial neural network.

Введение

Прогноз развития наводнений является сложной задачей, требующей учета комплекса различных факторов. В частности, водный режим р. Припять (и ряда других рек, питание которых также относится к смешанному типу с преобладанием снегового) характеризуется длительным весенним половодьем. Поэтому учет динамики накопления снегозапасов позволяет существенно повысить точность прогноза и тем самым эффективнее провести организационно-технические мероприятия по нивелированию последствий наводнения.

Сложность в оценке запасов снега и количества воды в снеге заключается в неравномерности его распределения по водосбору. Наблюдаемые значения толщины снежного покрова и его плотности соответствуют расположению снегомерных ходов. Однако на территории водосбора условия формирования снега не однотипны. Кроме наличия различных типов ландшафтов (болото, лес, пашня) на накопления снега оказывает значительное влияние антропогенная деятельность. В этих условиях видится не целесообразным переносить или даже интерполировать измеренные таким способом значения толщины снежного покрова и его мощности в целом на весь водосбор.

Существующая методика оценки содержания воды в снежном покрове по результатам микроволнового сканирования поверхности Земли

С 70-х годов прошлого века для оперативной оценки состояния снеготопливов активно используются методы дистанционного зондирования земной поверхности на основе измерения радиотеплового излучения Земли при помощи ряда орбитальных платформ (SSMR, SSM/I, AMSR-E) [1]. Снежный покров обладает способностью ослаблять радиотепловое излучение от подстилающей земной поверхности. Благодаря этому можно вычислить толщину снега и его водный эквивалент на основе таких физических параметров снежного покрова, как плотность снега и размер составляющих его ледяных кристаллов (размер зерна) [2].

Для вычисления водного эквивалента снежного покрова используется эмпирическая регрессионная формула, учитывающая разницу между радиояркими температурами частотных каналов 19 и 37 ГГц горизонтальной поляризации сенсора SSM/I [3]. Существенный недостаток такого метода оценки снеготопливов – низкое пространственное разрешение (от 12 до 25 км). Кроме того, на точность вычисленных параметров значительно влияют растительность, сложность рельефа, характер снежной толщи [4]. В частности, к невозможности определения водного эквивалента приводит наличие воды на поверхности снежного покрова (из-за поглощения микроволнового излучения) [5].

Оценка влияния снеготопливов на развитие весеннего половодья

При выполнении исследования использован находящийся в свободном доступе архив наблюдений динамики изменения водного эквивалента на площади северного полушария Земли за период с 1979 г. по 2014 г., созданный в рамках проекта GlobSnow [6]. Данные архива получены путем ассимиляции результатов наблюдений наземных метеорологических станций с измерениями орбитальных пассивных сенсоров микроволнового излучения SSMR и SSM/I. Измерения орбитальных пассивных сенсоров имеет суточную детализацию, в отличие от данных снегомерных съемок, имеющих интервал 5-10 дней. Сам архив представляет собой набор матриц размерностью 721×721 , элементы которых содержат значения усредненной толщины водного эквивалента снежного покрова в миллиметрах. Вершины ячеек матриц спроецированы на поверхность северного полушария Земли при помощи азимутальной равновеликой проекции Ламберта с центром, расположенным на полюсе сферы [7]. Каждая ячейка имеет размеры 25×25 км. Для расчета объема воды в снежном покрове выбраны 208 ячеек матрицы вычисленных значений водного эквивалента, покрывающих площадь 130000 км² на территории водосборной площади р. Припять с расположением замыкающего створа поблизости гидрологического поста наблюдения в г. Мозырь. Для сопоставления с динамикой накопления воды на водосборе использованы измерения ежедневного среднесуточного расхода воды в р. Припять на гидрологическом посту у г. Мозырь, выраженные в кубических метрах в секунду, за промежуток времени с ноября по март каждого года, начиная с 1979 г. и заканчивая 2004 г.

Так как водный эквивалент снежного покрова выражается в миллиметрах толщины слоя воды – объем воды в ячейке вычисляется как произведение величины водного эквивалента и соответствующей площади элемента матрицы. Следовательно – объем воды на водосборной площади, выраженный в кубических километрах, можно получить путем суммирования рассчитанных объемов для в каждой из 208 ячеек.

Используя приведенные соотношения рассчитаны ежедневные величины объема воды в толще снега на исследуемой территории за тот же промежуток времени, что и среднесуточные расходы на гидрологическом посту г. Мозырь.

Проведенное исследование выявило характерные взаимосвязи между процессом таяния снега на водосборной площади и повышением расхода воды в замыкающем створе [8]. Рассчитаны средние, максимальные и минимальные значения величин накопленных величин воды в снеге и расходов воды в замыкающем створе водосборной площади за 26 лет (см. таблицу 1).

Таблица 1. – Минимальные, средние и максимальные значения величин накопления воды в снеге и расходов воды в замыкающем створе водосборной площади

Величины накопления воды в снежном покрове, км ³			Величины расхода воды в замыкающем створе водосборной площади, м ³ /с		
минимальное значение	среднее значение	максимальное значение	минимальное значение	среднее значение	максимальное значение
0	1,4	14,3	79	423,6	4310

Показательно, что даже десятикратное превышение среднего значения величины накопления воды в снежном покрове само по себе не приводит к сравнимому возрастанию расхода воды в контрольной точке русла реки.

С другой стороны, в 1999 году воды в снеге на водосборной площади накопилось в пять раз выше среднего значения и в промежуток времени с 5 февраля по 26 марта началось интенсивное таяние снежного покрова сопровождаемое выпадением значительного количества осадков (от 110% до 255% нормы), что привело к катастрофическому повышению расхода воды в замыкающем створе у г. Мозырь (максимальный расход воды превысил среднее значение в 7,7 раз). Процесс интенсивного таяния снежного покрова совместно с выпадением осадков отчетливо виден в выделенной области графика на рисунке -а благодаря тому, что микроволновое излучение полностью поглощается образовавшимся на поверхности слоем воды (рассчитанное значение величины накопленного объема воды 05.02.1999 скачком падает до нуля, сохраняется в течение 50 дней, а затем 26.03.1999 также скачком принимает положительное значение).

По результатам проведенного анализа можно констатировать, что использование результатов дистанционного микроволнового сканирования поверхности Земли позволяет оперативно контролировать суточную динамику величины водного эквивалента снежного покрова на значительных территориях, однако количественное восстановление соответствующей весенней динамики расхода воды на контрольной измерительной гидрологической станции требует учета таких важных факторов, как наличие и объем осадков во время весеннего таяния снега, а также впитывание почвой выделившейся из снега воды [8].

Методика выполнения комплексного прогноза

Ряд источников сходитя во мнении, одним из наиболее эффективных инструментов для анализа таких нелинейных и многофакторных зависимостей, как гидрологические временные ряды, является механизм многослойных ИНС с прямым распространением сигнала. В частности, [9] иллюстрируют преимущества такого подхода по сравнению с авторегрессионной интегрированной моделью скользящего среднего, известной также как метод Бокса-Дженкинса. Поэтому для прогнозирования значений расхода воды в створе реки в рамках настоящего исследования были выбраны нейросетевые механизмы.

Для выполнения прогноза значений расхода воды вплоть до максимальных во время прохождения высоких весенних половодий было решено использовать ИНС, одновременно обрабатывающую методом скользящего окна значения двух временных рядов: среднесуточных расходов воды, зарегистрированных на гидрологическом посту наблюдения, и суммарных величин накопления воды в снежном покрове на исследуемой водосборной площади. В силу ограниченности данных, получаемых непосредственными промерами снежного покрова, было принято решение воспользоваться результатами ежедневной оценки содержания воды в снежном покрове на основе пассивного радиотеплового сканирования поверхности водосборной площади с борта ИСЗ.

При значительном впитывании почвой воды, выделяющейся в результате таяния снега, наблюдаются т. н. малые половодья. В этом случае не наблюдается существенной зависимости

расхода воды в створе от накопленных снегозапасов; поэтому при прогнозировании явлений данного класса данные о накопленных снегозапасах было решено не учитывать. Признаком, по которому можно заблаговременно определить, что предстоит не малое, а высокое половодье, является выпадение осадков осенью с последующим зимним промерзанием почвы (т. е. значительным снижением ее инфильтрационной способности).

В случае отсутствия доступа к результатам микроволнового сканирования поверхности водосбора (например, из-за неисправности оборудования на борту ИСЗ) ИНС может выполнять прогноз высоких половодий по единственному временному ряду. Реальным примером ограниченной доступности таких данных является зарегистрированная 05.04.2016 и сохраняющаяся по сей день техническая неисправность канала 37 ГГц вертикальной поляризации сенсора SSMIS, размещенного на спутнике DMSP F-17 [10].

Благодаря тому, что микроволновое излучение, регистрируемое орбитальным комплексом датчиков, полностью поглощается слоем воды в толще либо на поверхности снега (появившейся в результате таяния и/или выпадения осадков), оказывается возможным надежное и своевременное выявление момента начала интенсивного таяния снежного покрова. Поэтому при учете суммарных величин накопления воды в снежном покрове было решено применить ступенчатый фильтр, приводящий к единице все значения, отличные от нуля и предшествующие моменту поглощения микроволнового излучения слоем воды. В результате формируется сигнал начала интенсивного снеготаяния, используемый ИНС прогнозирования высоких половодий.

Предлагаемая методика предназначена для прогнозирования среднесуточного расхода воды на выбранном створе реки во время прохождения как высоких весенних половодий, приводящих к возникновению наводнений, так и малых весенних половодий. Определение предполагаемой категории ожидаемого половодья основывается на результатах предварительного учета количества выпавших осенних осадков за период октябрь-ноябрь и доли дней с отрицательной среднесуточной температурой воздуха за период декабрь-январь. Необходимые характерные значения учитываемых величин определяются на основе анализа метеорологических временных рядов, накопленных за соответствующие промежутки времени, непосредственно предшествующие зарегистрированным высоким половодьям.

Для повышения качества прогнозирования в случае высоких половодий, дополнительно к учету методом скользящего окна предыдущих значений расхода воды выполняется также учет момента начала интенсивного таяния снега на основе обработки результатов пассивного микроволнового сканирования поверхности водосбора. На случай временного сбоя в функционировании оборудования ИСЗ, на гидрометеорологических данных, характерных для высоких половодий, обучаются две ИНС: первая из них предполагает одновременный учет двух временных рядов, а вторая работает с единственным временным рядом. В случае, когда данные об осенних осадках и зимних среднесуточных температурах свидетельствуют о предстоящем малом половодье, для прогнозирования используется третья ИНС, обученная на гидрологических данных, характерных для малых половодий.

Размер скользящего окна для обработки входных данных определяется эмпирическим путем с целью минимизации ошибки обученной нейронной сети на тестовой выборке. Тестовая выборка должна охватывать период, включающий момент пика среднесуточного расхода воды – самого позднего из зарегистрированных во время весенних половодий на выбранном створе реки.

Размер горизонта прогнозирования должен соответствовать заблаговременности среднесрочного метеорологического прогноза (от 7 до 10 суток) [11]. Для оценки характера спада воды при достижении пика половодья рекомендуется выполнять также прогноз нисходящей ветви гидрографа (не более чем на удвоенную величину горизонта прогнозирования). Размер скользящего окна для обработки входных данных определяется эмпирическим путем с целью минимизации ошибки обученной нейронной сети на тестовой выборке. Тестовая выборка должна охватывать период, включающий момент пика среднесуточного расхода воды – самого позднего из зарегистрированных во время весенних половодий на выбранном створе реки.

Для оценки характера спада воды при достижении пика половодья рекомендуется выполнять также прогноз нисходящей ветви гидрографа (не более чем на удвоенную величину горизонта прогнозирования).

Апробация методики прогнозирования в створе р. Припять, расположенного на гидрологическом посту наблюдения г. Мозырь

Для целей апробации методики прогнозирования использован находящийся в открытом доступе архив зарегистрированных метеорологическими станциями среднесуточных температур воздуха и величин выпавших осадков на территории Европы с 1978 г. по 2005 г., предоставляемый международным проектом ECA&D (Europe Climate Assessment & Dataset) [12]. Временные ряды измерений расхода воды на гидрологическом посту наблюдения г. Мозырь (р. Припять) с 1978 г. по 2005 г. получены из архива Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (РУП «Белгидромет»). Источником значений ежедневной оценки содержания воды в снежном покрове на основе пассивного радиотеплового сканирования земной поверхности за промежутки времени с 1979 г. по 2005 г. послужил архив проекта GlobSnow [6].

В 1979 и 1999 году произошли катастрофические половодья с максимальным расходом воды по гидропосту г. Мозырь в $4300 \text{ м}^3/\text{с}$ и $3270 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно. Для 1999 года характерен продолжительный период интенсивного таяния снега, сопровождаемый выпадением значительного количества осадков (110 — 255% нормы) в течение 51 дня. Следует отметить, что временной интервал между началом интенсивного таяния снега 05.02.1999 и достижением расхода воды максимальной величины на гидрологическом посту наблюдения 29.03.1999 составил 53 дня.

Анализ временных рядов среднесуточной температуры воздуха за период с 1968 г. по 2005 г. также позволил особо отметить зимние месяцы 1978 – 1979 гг. и 1998 – 1999 гг., предшествующие весеннему половодью. В данные годы за период с декабря по январь для более чем 80% дней была зарегистрирована отрицательная температура на водосборной площади р. Припять с замыкающим створом в г. Мозырь, причем за период с октября по ноябрь в 1978 г. на исследуемой территории выпало 58,56 мм осадков, а в 1998 г. за тот же промежуток времени – 120,54 мм. Эти наблюдения согласуются с тем фактом, что причиной высоких половодий часто становится промерзание почвы на водосборе, значительно уменьшающее ее инфильтрационную способность при интенсивном весеннем таянии снега и выпадении осадков [13, с. 78 – 79].

Было выполнено нормирование значений всех используемых в исследовании временных рядов зарегистрированных расходов воды в замыкающем створе водосборной площади: в качестве единичного значения была выбрана максимальная величина расхода воды, равная $4310 \text{ м}^3/\text{с}$ (зарегистрирована 09.04.1979 на гидрологическом посту наблюдения г. Мозырь). Затем временные ряды зарегистрированных расходов воды были совмещены по пиковым значениям весенних половодий. Значения временных рядов, следующие за пиком половодья, были ограничены 14 элементами, а предшествующий промежуток для малых половодий расширен до 119 элементов (число выбрано с опорой на самый поздний за 27 лет наблюдений срок достижения максимума расхода воды, имевший место 28.04.1996). Для высоких половодий промежуток соответствующих временных рядов, предшествующий достижению максимального значения, расширен до 98 элементов согласно сроку наступления пика половодья, в 1979 г.

Необходимо заметить, что в архиве проекта GlobSnow ежедневные оценки величины водного эквивалента содержатся не за все годы: так, зима 1978 – 1979 гг. представлена исключительно среднемесячными величинами водного эквивалента снежного покрова, и такие усредненные данные не позволяют выделить признак интенсивного снеготаяния с требуемой точностью. На основе доступных ежедневных данных оценки водного эквивалента снежного

покрова за зимне-весенний период с 1998 г. по 1999 г. сформирован сигнал начала интенсивного таяния снега, сопровождаемого выпадением значительного количества осадков.

При формировании наборов данных для прогнозирования высоких половодий в качестве базового срока регистрации интенсивного таяния снега был выбран срок в 53 дня, с учетом времени достижения пика высокого весеннего половодья, случившегося в 1999 г.

В качестве архитектуры ИНС был выбран многослойный персептрон с одним скрытым слоем и симметричной сигмоидной функцией активации нейронов в скрытом и выходном слоях и линейной функцией активации во входном слое. В соответствии с избранной функцией активации, элементы обучающих и тестирующих выборок масштабированы в диапазон $[-1, 1]$.

В соответствии с принятыми решениями по архитектуре ИНС и способу прогнозирования временного ряда, для различных классов половодий эмпирическим путем была подобрана следующие структуры слоев:

- для высоких половодий размер скользящего окна составил 46 дней, поэтому входной слой представлен 92 нейронами по причине использования двух разных наборов данных, промежуточный – 184 нейронами и согласно избранному горизонту прогнозирования в 7 дней в выходном слое находится семь нейронов, общее число синаптических связей – 18216;
- для малых половодий используется тот же самый размер скользящего окна и шага прогнозирования, поэтому персептрон имеет 46 нейронов во входном слое, 92 – в промежуточном и 7 нейронов в выходном слое, общее число синаптических связей – 4876;
- в качестве альтернативного варианта прогнозирования высоких половодий было решено исследовать возможность использования той-же самой структуры ИНС, как и при прогнозировании малых половодий, которая не предусматривает дополнительного учета временного ряда изменения водного эквивалента снежного покрова.

В целях недопущения снижения обобщающей способности нейронных сетей для обучения использовались наборы данных с количеством образцов в два раза превышающим количество синаптических связей: 36402 и 9752 для ИНС прогнозирований высоких и малых половодий соответственно. Для обеспечения заявленного количества образцов в обучающих выборках наблюдаемые гидрографы были дополнены промежуточными, вычисленными методом линейной интерполяции значений между соседними парами временных рядов зарегистрированных в разные годы на гидрологическом посту наблюдения расходов воды.

Для учета возможных расхождений в сроках наступления интенсивного таяния снега, набор соответствующих сигналов, входящих в состав обучающей выборки ИНС прогнозирования высоких половодий, был сформирован путем смещения в обе стороны относительно базового срока в 53 дня момента наступления характерного перепада значений на произвольно выбираемое, но не превышающее по абсолютной величине 3, число дней, что составляет половину горизонта прогнозирования.

Набор ИНС был обучен методом Resilient Propagation (RPROP), что позволило сократить время, требуемое на обучение, по сравнению с стандартным методом обратного распространения ошибки [14]. В целях исключения эффекта переобучения ИНС, остановка процесса обучения производилась при обнаружении роста среднеквадратичной ошибки нейронной сети на тестовой выборке при дальнейшем наблюдении снижения ошибки на обучающей выборке. Для оценки адекватности прогнозирования обученными ИНС расхода воды в створе реки применялось вычисление величины коэффициент корреляции Пирсона r и квадратного корня из среднеквадратичной ошибки RMSE на тестовой выборке (таблица 2).

Таблица 2. – Оценка качества прогноза расхода воды по гидрологическому посту г. Мозырь для разных категорий весеннего половодья.

Категория половодья	Учет начала таяния снега	Коэффициент корреляции Пирсона, r	Квадратный корень из среднеквадратичной ошибки, $RMSE$
Высокое половодье	да	0,99	0,02
	нет	0,94	0,06
Низкое половодье	нет	0,79	0,06

Заключение

Согласно приведенным результатам апробации предложенной методики на створе р. Припять, комплексный анализ искусственной нейронной сетью гидрометеорологических временных рядов и сигнала начала интенсивного таяния снежного покрова, полученного при помощи спутниковой СВЧ-радиометрии, позволяет повысить качество прогнозирования восходящей ветви гидрографа высоких весенних половодий по сравнению с использованием в качестве входных данных исключительно гидрометеорологической информации, полученной в результате непосредственных измерений на местности.

Список литературы

1. Шарков, Е.А. Пассивное микроволновое зондирование земли: прошлое, настоящее и планы на будущее // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – В. 1. – Т. 1. – С. 70–80.
2. Узлов, В.А., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Основные физические параметры снежного покрова / В.А. Узлов, // Тр. Нижегородского гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – Т. 103. – № 1. – С. 119–129.
3. Chang, A.T.C., Foster J.L., Hall D.K., Rango A., Hartline B.K. Snow water equivalent determination by microwave radiometry // Cold Regions Science and Technology. – 1982. – № 5. – P. 259–267.
4. Носенко, Г.А., Долгих Н.А., Носенко О.А. О возможности практической реализации существующих алгоритмов восстановления характеристик снежного покрова по данным микроволновых съемок из космоса для мониторинга водных ресурсов // Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: Сборник. – М.: изд. GRANP polygraph, 2005. – Т. II. – С.150–156.
5. Global snow monitoring for climate research – design justification file. European Space Agency Study Contract Report 21703/08/I-EC Deliverable 1.7. – 2010. – 246 p.
6. Stiles, W.H., Ulaby F.T. The active and passive microwave response to snow parameters // Journ. of Geophys. Research. – 1980. – № 85. – P. 1037–1044.
7. Luoju K., Pulliainen J., Takala M., Lemmetyinen J., Derksen C., Wang L. Snow Water Equivalent (SWE) product guide // GlobSnow Consortium [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: http://www.globsnow.info/swe/GlobSnow_SWE_product_readme_v1.0a.pdf. – Дата доступа: 08.06.2016.
8. Петров, Д.О. Программный модуль анализа накопления снега для системы мониторинга и прогнозирования паводка // Вестник БрГТУ. – 2014. – № 2(86): Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – С. 134–137.
9. Tang, Z., Fishwick P. A. Feedforward neural nets as models for time series forecasting //ORSA journal on computing.. – 1993. – V. 5. – №. 4. – P. 374–385.
10. Brodzik, M. J., Armstrong R. Near-Real-Time DMSP SSM/I-SSMIS Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures, Version 1. // USA NASA DAAC National Snow and Ice Data Center [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <https://nsidc.org/data/NSIDC-0342/versions/1#>. – Дата доступа: 18.11.2017.
11. Наставление по Глобальной системе обработки данных и прогнозирования // ВМО. – 2012. – № 485. – Т. 1: Глобальные аспекты. – 204 с.
12. Data Policy for ECA&D and E-OBS // European Climate Assessment and Dataset [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа: http://http://eca.knmi.nl/documents/ECAD_datapolicy.pdf. – Дата доступа: 08.06.2016.
13. Волчек А.А., Пойта П.С., Шведовский П.В. Мониторинг, оценка и прогноз чрезвычайных ситуаций и их последствий – Брест: Альтернатива, 2012. – 426 с.

14. Riedmiller, M. Advanced supervised learning in multi-layer perceptrons—from backpropagation to adaptive learning algorithms //Computer Standards & Interfaces. – 1994. – V. 16. – №. 3. – P. 265-278.

References

1. Sharkov, E.A. Passivnoe mikrovolnovoe zondirovanie zemli: proshloe, nastoyashee i plany na budushee // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. – 2004. – V. 1. – P. 70–80.
2. Uzlov, V.A., Shishkov G.I., Scherbakov V.V. Osnovnyie fizicheskie parametryi snezhnogo pokrova / V.A. Uzlov, // Tr. Nizhegorodskogo gos. tehn. un-ta im. R.E. Alekseeva. – 2014. – T. 103. – N 1. – P. 119–129.
3. Chang, A.T.C., Foster J.L., Hall D.K., Rango A., Hartline B.K. Snow water equivalent determination by microwave radiometry // Cold Regions Science and Technology. – 1982. – № 5. – P. 259–267.
4. Nosenko, G.A., Dolgi N.A., Nosenko O.A. O vozmozhnosti prakticheskoy realizacii sushhestvuyushhih algoritmov vosstanovleniya harakteristik snezhnogo pokrova po dannym mikrovolnovykh s#emok iz kosmosa dlja monitoringa vodnyh resursov // Fizicheskie osnovy, metody i tehnologii monitoringa okruzhajushhej sredy, potencial'no opasnyh javlenij i ob#ektov: Sbornik. – M.: izd. GRANP polygraph, 2005. – V. II. – P.150–156.
5. Global snow monitoring for climate research – design justification file. European Space Agency Study Contract Report 21703/08/I-EC Deliverable 1.7. – 2010. – 246 p.
6. Stiles, W.H., Ulaby F.T. The active and passive microwave response to snow parameters // Journ. of Geophys. Research. – 1980. – № 85. – P. 1037–1044.
7. Luo J., Pulliainen J., Takala M., Lemmetyinen J., Derksen C., Wang L. Snow Water Equivalent (SWE) product guide // GlobSnow Consortium [Elektronnyj resurs]. – 2010. – Rezhim dostupa : http://www.globsnow.info/swe/GlobSnow_SWE_product_readme_v1.0a.pdf. – Data dostupa : 08.06.2016.
8. Petrov, D.O. Programmnyj modul' analiza nakopleniya snega dlja sistemy monitoringa i prognozirovaniya pavodka // Vestnik BrGTU. – 2014. – № 2(86): Vodohozhajstvennoe stroitel'stvo, teplojenergetika i geojekologija. – P. 134–137.
9. Tang, Z., Fishwick P. A. Feedforward neural nets as models for time series forecasting //ORSA journal on computing.. – 1993. – V. 5. – №. 4. – P. 374–385.
10. Brodzik, M. J., Armstrong R. Near-Real-Time DMSP SSM/I-SSMIS Pathfinder Daily EASE-Grid Brightness Temperatures, Version 1. // USA NASA DAAC National Snow and Ice Data Center [Elektronnyj resurs]. – 2017. – Rezhim dostupa : <https://nsidc.org/data/NSIDC-0342/versions/1#>. – Data dostupa : 18.11.2017.
11. Nastavlenie po Global'noj sisteme obrabotki dannyh i prognozirovaniya // VMO. – 2012. – № 485. – T. 1 : Global'nye aspekty. – 204 s.
12. Data Policy for ECA&D and E-OBS // European Climate Assessment and Dataset [Elektronnyj resurs]. – 2012. – Rezhim dostupa : http://eca.knmi.nl/documents/ECAD_datapolicy.pdf. – Data dostupa : 08.06.2016.
13. Volchek A.A., Pojta P.S., Shvedovskij P.V. Monitoring, ocenka i prognoz chrezvychajnyh situacij i ih posledstvija – Brest : Al'ternativa, 2012. – 426 s.
14. Riedmiller, M. Advanced supervised learning in multi-layer perceptrons—from backpropagation to adaptive learning algorithms //Computer Standards & Interfaces. – 1994. – V. 16. – №. 3. – P. 265-278.

Сведения об авторах

Петров Д. О., магистр технических наук, старший преподаватель УО «Брестский государственный технический университет»

Адрес для корреспонденции

224017, РБ, г. Брест, ул. Московская, д. 267, тел. +375295238723, e-mail: polegdo@gmail.com
Петров Дмитрий Олегович

Information about the authors

Petrov D. O., Master of Engineering Sciences, senior lecturer, Brest State Technical University

Address for correspondence

224017, Belarus, Brest, Moskovskaya str, 267, Brest State Technical University, tel. +375295238723, e-mail: polegdo@gmail.com
Petrov Dmitry Olegovich

РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ БОЛЬШИХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОБИЛЬНЫХ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Е.Н. ЗАЦЕПИН, С.В. ДРОБОТ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию

Аннотация. В работе предложена архитектура системы радиационного мониторинга, использующая «облачные» технологии. Основными элементами такой системы являются недорогие и компактные устройства детектирования, подключенные к мобильным инфокоммуникационным устройствам; глобальная сеть Интернет; серверное устройство со специализированным программным обеспечением, реализующим основные функции системы радиационного мониторинга, в том числе накопления данных.

Ключевые слова: устройство детектирования, радиационный мониторинг, облачные технологии, программное обеспечение.

Abstract. The architecture of the radiation monitoring system with using "cloudy" technologies is offered. Basic elements of the system are the inexpensive and compact detecting device connected to mobile infocommunication devices; a global network the Internet; the server device with the specialised software realising the basic functions of radiating monitoring system, including accumulation of the data.

Keywords: detecting device, cloudy technologies, software.

Введение

В связи с происходящим в настоящее время во многих странах ренессансом ядерной энергетики актуальной остается задача радиационного контроля больших территорий. Опыт преодоления последствий аварий на Чернобыльской АЭС, АЭС Фукусима, а также инцидентов на ядерных объектах, показал наличие тенденции ограничения эксплуатирующими организациями распространения информации о реальной радиационной обстановке вокруг аварийных объектов. Однако, современный уровень развития электроники и инфокоммуникационных технологий позволяет реализовать недорогую независимую систему радиационного мониторинга, работающую в интересах общественных организаций и «гражданского общества». В работе рассмотрена архитектура системы радиационного мониторинга основанной на использовании мобильных инфокоммуникационных устройств с подключенными компактными устройствами детектирования, информация от которых через сеть Интернет накапливается в серверном устройстве и передается удаленному пользователю.

Структура и взаимосвязь устройств системы радиационного мониторинга

В предложенной системе радиационного мониторинга, структурная схема которой показана на рисунке 1, функции поста стационарной системы контроля радиационной обстановки выполняет мобильное инфокоммуникационное устройство, имеющее связь с сетью Интернет, к которому подключено недорогое и компактное устройство детектирования β - и γ -излучений на основе счетчика Гейгера-Мюллера [1]. Подключение к мобильному устройству осуществляется через 4 контактный аудио разъём 3,5 мм. Преобразование сигнала, поступающего от устройства детектирования, осуществляется аналогово-цифровым

преобразователем мобильного устройства. Мобильное инфокоммуникационное устройство должно иметь соответствующее программное обеспечение для обработки сигнала устройства детектирования, а также передачи данных о радиационной обстановке с привязкой к текущим географическим координатам на серверное устройство для накопления и дальнейшей обработки.

Это обеспечивает высокую надёжность, поскольку информация, сохранённая на сервере, становится доступна всем, в соответствии с политикой доступа к данным на общем сетевом ресурсе. Благодаря использованию «облачных» технологий, обеспечивается высокая масштабируемость системы. Возможность используемой архитектуры позволяет наращивать количество абонентов-постов мониторинга и оперативно получать данные от них без ущерба для производительности и качества сервиса.

«Облачная» модель распространения и поддержки программного обеспечения предполагает использование различных программных приложений в режиме удаленного доступа. Суть этой модели заключается в максимальном переносе функционала и данных на сервер. При реализации этой модели все данные хранятся на сервере, вычисления проводятся на сервере, взаимодействие пользователей осуществляется посредством обмена данными через сервер [2]. При этом на долю мобильного устройства остаются только задачи обеспечения связи с сервером, выполнения первичной обработки сигналов устройства детектирования и отображения информации. Таким образом достигается независимость предоставляемого функционала от конкретного устройства. На любом компьютере, планшете, смартфоне приложение выглядит одинаково и предоставляет одинаковый функционал и актуальные данные.



Рисунок 1 – Структурная схема системы радиационного мониторинга

Кроме того, рассматриваемая система мониторинга включает автоматизированные рабочие места (АРМ) пользователей, которые, в свою очередь, посредством проводного или беспроводного канала связи через глобальную сеть Интернет получают информацию из серверного устройства. В качестве такого АРМ может выступать персональный компьютер, ноутбук, наладонный или планшетный компьютер, смартфон и другие подобные устройства.

Для функционирования системы мониторинга требуется установка прикладного программного обеспечения (ПО), которая осуществляется после загрузки «дистрибутива» с сервера, с которого в дальнейшем производится его обновление и загрузка данных радиационного мониторинга.

Интерфейс прикладного программного обеспечения содержит несколько дополнительных вкладок – «карта», «график» и «настройки». Карта предназначена для отображения географической карты мира, с нанесенными на нее результатами измерений, а график служит для графического отображения архива результатов. Настройки прикладного ПО предусматривают два уровня сигнализации в случае превышения допустимого уровня мощности дозы, установленной пользователем – «предупреждение» и «опасность». Формат отправляемого пакета включает уникальный идентификатор устройства, измеренное значение мощности дозы ионизирующего излучения, а также опционально текущие координаты, указанные пользователем или определенные системой автоматически.

Определение местоположения устройства по умолчанию реализовано на серверной стороне, используя внешний IP-адрес узла, с которого производится подключение. В качестве GeoIP базы данных для привязки используется совмещенная база данных. В случае, если пользователь вручную указал в настройках прикладного ПО свое местоположение, используется указанное значение. В дальнейшей перспективе при разработке ПО для мобильных устройств, имеющих GPS-Glonass приемник, координата будет определяться автоматически. Сервер необходим для приема, обработки и хранения данных, поступающих от всех существующих измерительных устройств, а также выдачи по запросу пользователю в виде веб-сервиса карты радиационной обстановки, с нанесенными на нее значениями по всем мобильным устройствам, входящим в систему. Результат измерения от отдельного устройства отображается в виде метки (маркера) на карте с возможностью просмотра последнего измеренного значения, местоположения и времени измерения, а также выборки архивных показаний.

Серверное «облачное» программное обеспечение предназначено также для решения следующих задач:

- проверка достоверности полученной информации с использованием методов вероятностного анализа и нечеткой логики, проверка целостности всей системы;
- математическое моделирование распределения радиационного фона и определение радиационно-опасных источников;
- при ухудшении радиационной обстановки проведение расчета величины прогнозируемой дозы облучения, т.е. дозы, которая может быть получена персоналом и населением за определенное время.

Заключение

Предложенная архитектура предусматривает максимальную гибкость, масштабируемость и эффективность; возможность добавления в систему дополнительных устройств. Архитектура позволяет создать единую глобальную систему радиационного мониторинга, в реализации которой активное участие будет принимать «гражданское» общество.

Основные преимущества такой системы заключаются в следующем:

- использование мобильных, недорогих и компактных узлов детектирования;
- быстрое расширение контролируемой территории, в частности, за счет интеграции нового оборудования;
- эффективная эксплуатация системы, обновление, расширение, интеллектуальное управление вычислительными ресурсами.

Список литературы

15. Кошелев, М. Делаем приставку – счётчик Гейгера к iPhone за 2 часа [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/202780>. – Дата доступа: 01.11.2017.
16. Джордж, Р. Облачные вычисления / Р. Джордж. СПб.: БХВ-Петербург, 2011, 288 с.

References

1. Koshelev M. Delaem pristavku – schetchik Geigera k iPhone za 2 chasa [Electronic data] – Access mode: <http://habrahabr.ru/post/202780>. – Date of access: 01.11.2017. (in Russ.)
2. George, R. Oblachnye vychislenia. SPb.: BHV-Peterburg, 2011, 288 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Зацепин Е.Н., канд.техн.наук, доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дробот С.В., канд.техн.наук, доцент, декан факультета инфокоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375 17 293-23-87;
e-mail: ecolog@bsuir.by
Зацепин Евгений Николаевич

Information about the authors

Zatsepin E.N., PhD, associate professor, associate professor of department of human engineering and ergonomics of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Drobot S.V., PhD, associate professor, dean of faculty of infocommunications of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6,
Belarusian State University of Informatics and
Radioelectronics,
tel. +375 17 293-23-87;
e-mail: ecolog@bsuir.by
Zatsepin Evgeni Nikolaevich.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Г.А. РОЗУМ, Е.А. МЕЛЬНИКОВА, В.В. САВЧЕНКО, Н.В. ЩЕРБИНА, К.Д. ЯШИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию

Аннотация. В статье рассмотрены эффективные способы диагностики психофизиологического состояния водителей транспортных средств. Применен аппаратно-программный диагностический комплекс, позволяющий оценить психофизиологическое состояние водителя транспортного средства.

Ключевые слова: психофизиологическое состояние, аппаратно-программный диагностический комплекс, мониторинг.

Abstract. The problems of a psychophysiological condition of drivers of vehicles, effective ways of their diagnostics are observed. There is also examined the hardware-software diagnostic complex, which allows not only to assess the condition of the driver of the vehicle, but also to increase the objectivity of the evaluation, to shorten the testing time without noticeable fatigue of the subject.

Keywords: psychophysiological condition, hardware-software diagnostic complex, monitoring.

Введение

Обеспечение безопасности дорожного движения, создание эффективной системы предупреждения дорожно-транспортных происшествий остаются одним из приоритетных направлений деятельности государства.

В современных условиях управления транспортным средством осложняется высокой интенсивностью дорожного движения и наличием водителей транспортных средств с различным уровнем подготовки. Эти обстоятельства обуславливают значительное возрастание психических нагрузок и существенно повышают вероятность развития негативных изменений психофизиологического функционального состояния человека, проявляющихся в снижении уровня психической или психофизиологической адаптации, влекущих за собой ошибки, и, как следствие, дорожно-транспортное происшествие.

Под быстротой принятия решения или реакцией понимается любой ответ организма на изменение во внешней или внутренней среде: от биохимической реакции отдельной клетки до условного рефлекса. В обстоятельствах, возникающих в особых и экстремальных условиях деятельности водителя транспортного средства, значение имеет исполнение или принятие мгновенного решения. Для быстроты реакции в водительской деятельности необходимы определенные природные данные, также абсолютная пригодность [1].

С целью минимизации рисков, связанных со сбоем системы «водитель-автомобиль-дорога-среда» и для оценки надежности человека в системе, специалистами был выделен ряд психофизиологических состояний человека, необходимых для эффективного осуществления деятельности. Основная цель оценки психофизиологических состояний водителей – выявление состояний, способствующих возрастанию аварийных ситуаций на дорогах: невнимательность, рассеянность, эмоциональная неустойчивость, быстрая психическая утомляемость.

В данной статье рассматривается система «человек-машина-среда» применительно к водителю, который является «человеком-оператором», «машина» – транспортное средство (автомобиль) и, соответственно, «среда» – внешние дорожные, погодные условия. Безопасность дорожного движения определяется надежностью функционирования системы в целом и надежностью каждой из ее составляющих. Сбой в работе хотя бы одного элемента системы может привести к дорожно-транспортному происшествию. В статье приводятся результаты исследований психофизиологического состояния водителей, определяющие надежность (безаварийность) человека-водителя в системе «водитель-автомобиль-дорога-среда».

Таким образом, целью работы было определение параметров психофизиологических состояний водителей транспортных средств, их оценка, установление корреляционной зависимости между отдельными психофизиологическими состояниями.

Методика эксперимента

Исследования прошли 75 человек, в возрасте от 19 до 30 лет. Средний возраст испытуемых составил 24 года. Мужчины составили 67 % от общего числа испытуемых, женщины – 33 %. Участники эксперимента были разделены на три группы (таблица 1). I группа – кандидаты (не имеющие опыта вождения); II группа – водители непрофессионалы со стажем вождения до 4 лет; III группа – водители непрофессионалы со стажем работы более 4 лет.

Таблица 1 – Состав участников эксперимента

Группы	Численность группы, чел	Мужчины, чел	Женщины, чел
I группа	25	17	8
II группа	25	16	9
III группа	25	17	8
Итого	75	50	25

Перед началом проведения тестирования участник эксперимента регистрировался, получал установку об ответственности прохождения теста, изучал инструкцию и приступал к выполнению предварительного теста, по результатам которого испытуемый либо продолжал, либо заканчивал тестирование.

Оценка психофизиологических характеристик осуществлялась с использованием аппаратно-программного психодиагностического комплекса для автомобилистов УПДК-МК [2]. Методика исследования психофизиологического состояния водителей основана на оценке реакции на различные сигналы и оценке правильности выполнения условий теста. Участник эксперимента находится в позе сидя за компьютером при прохождении тестирования. Одним из обязательных условий является создание доброжелательной обстановки: испытуемому говорится, что обследование имеет целью получить важную объективную информацию о его индивидуальных психологических особенностях реагирования (необходимо как можно быстрее реагировать) на различные сигналы, которая может быть использована им для овладения навыками управления и безопасного вождения автомобиля.

В процессе эксперимента каждому участнику предлагалось последовательно пройти 5 тестов: 1) уровень восприятия скорости и расстояния, 2) оценка склонности к риску, 3) распределение внимания, 4) оценка эмоциональной устойчивости, 5) сложная зрительно-моторная реакция [2].

Суть оценки уровня психофизиологической готовности водителей сводится к определению количества уязвимых (ниже нормы) результатов тестирования. По этим результатам присваивается соответствующий вид допуска (пригодности): Д1- норма, Д2, Д3, и Д4 (недопуск). Д2 и Д3 - «ниже нормы», но лучше, чем недопуск. При наличии хотя бы одного одной оценки «ниже нормы», – рекомендуется вновь пройти курс работы на тренажере, а затем вновь пройти оценку психофизиологического состояния. В случае получения повторного результата Д4 «недопуск» – испытуемому не рекомендовано вождение автотранспорта.

Результаты исследования

При прохождении комплекса тестов оценивалось процентное распределение участников эксперимента по четырем видам допуска в каждой группе.

Полученные оценки психофизиологического состояния в зависимости от стажа вождения испытуемых, показали следующие результаты (рисунок 1). Участники эксперимента без опыта вождения (кандидаты, I группа) имели лишь 8% результатов, соответствующих уровню допуска Д1; эта же группа имела самые низкие оценки и больше всех получила «недопуск». II группа показала наивысший результат Д1 (28%). II группа проявила наибольшую собранность, ответственность и стремление продемонстрировать высокие результаты Д1. III группа имела лишь 16% уровень Д1. Это, видимо, связано с тем, что по мере приобретения индивидуального опыта у испытуемых происходит в некоторой степени снижение самоконтроля за счет чрезмерной уверенности и пренебрежения к четкости выполнения заданий.

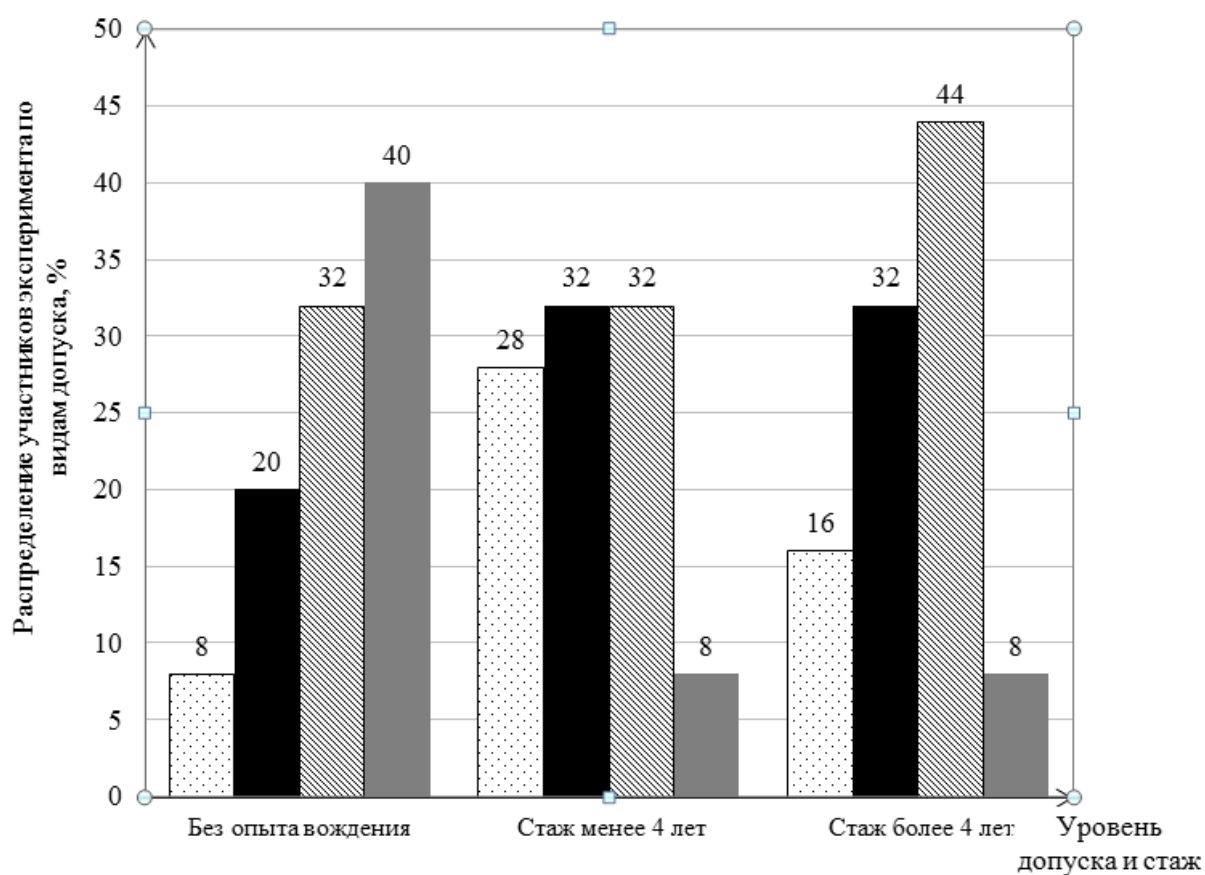
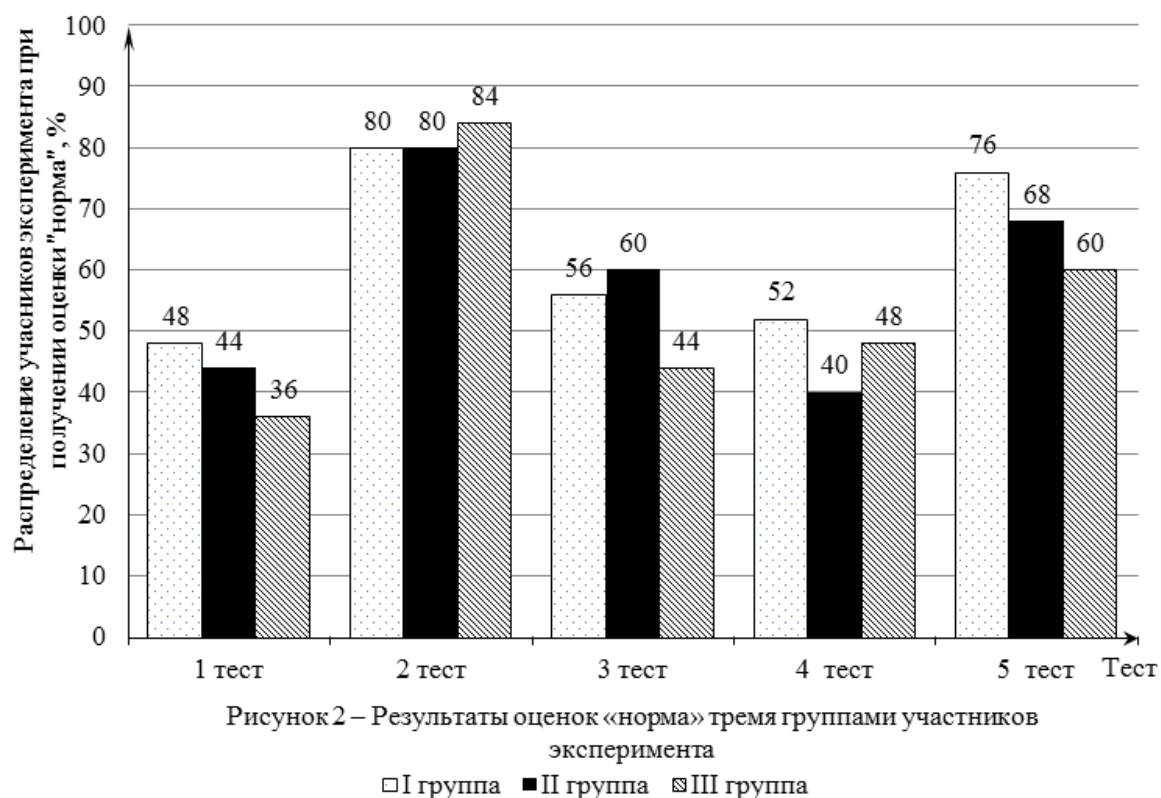


Рисунок 1 - Результаты прохождения тестов участниками эксперимента

□ Уровень допуска 1 ■ Уровень допуска 2 ▨ Уровень допуска 3 ■ Уровень допуска 4

Наилучшие результаты, т.е. состояние «норма», получены участниками эксперимента во всех группах при прохождении тестов 2 и 5 («Оценка склонности к риску» и «Сложная зрительно-моторная реакция-М») (рисунок 2).



Полученные результаты подвергались статистической обработке. Анализ проведен с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Статистический анализ результатов прохождения тестов участниками эксперимента выявил корреляционную зависимость некоторых психофизиологических состояний. Так, был выявлен средний уровень зависимости склонности к риску от стажа вождения (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,55$) и обратная зависимость оценки «Распределение внимания» и «Сложной зрительно-моторная реакция-М» ($r = -0,62$). Выявлена сильная зависимость оценки «Сложной зрительно-моторной реакции-М» и «Эмоциональной устойчивости» ($r = 0,75$).

В таблице 2 приведено процентное распределение участников эксперимента, имеющих уязвимые (ниже нормы) психофизиологические состояния. «Уровень восприятия скорости и расстояния» и теста-4 «Оценка эмоциональной устойчивости» при наличии стажа вождения (II-я и III-я группы).

Таблица 2 – Процентное распределение участников эксперимента, имеющих уязвимые (ниже нормы) психофизиологические состояния.

Группы участников эксперимента	1 тест	2 тест	3 тест	4 тест	5 тест
I группа	52	20	44	48	24
II группа	56	20	40	60	32
III группа	64	16	56	52	40

Также установлен высокий процент «ненорма» и во всех группах при оценках распределение внимания (тест 3) (рисунок 3).

«Ненорма», %

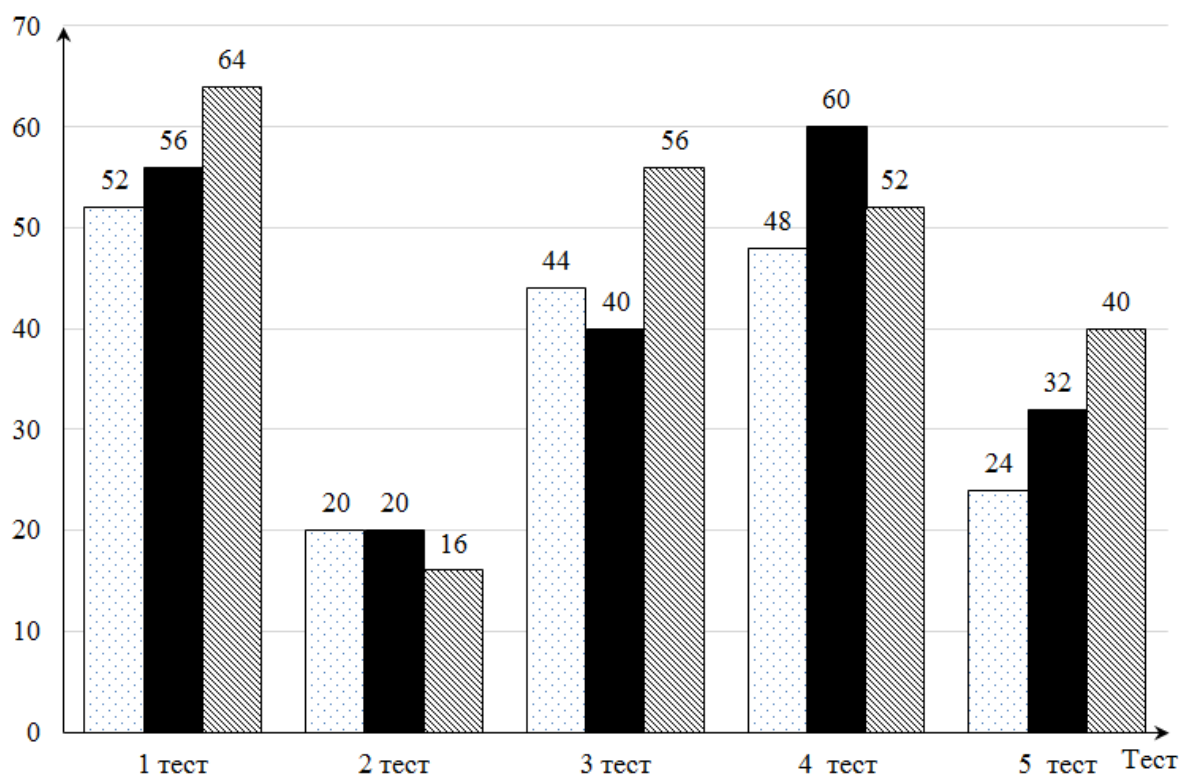


Рисунок 3 - Результаты оценки психофизиологического состояния «Ненорма»

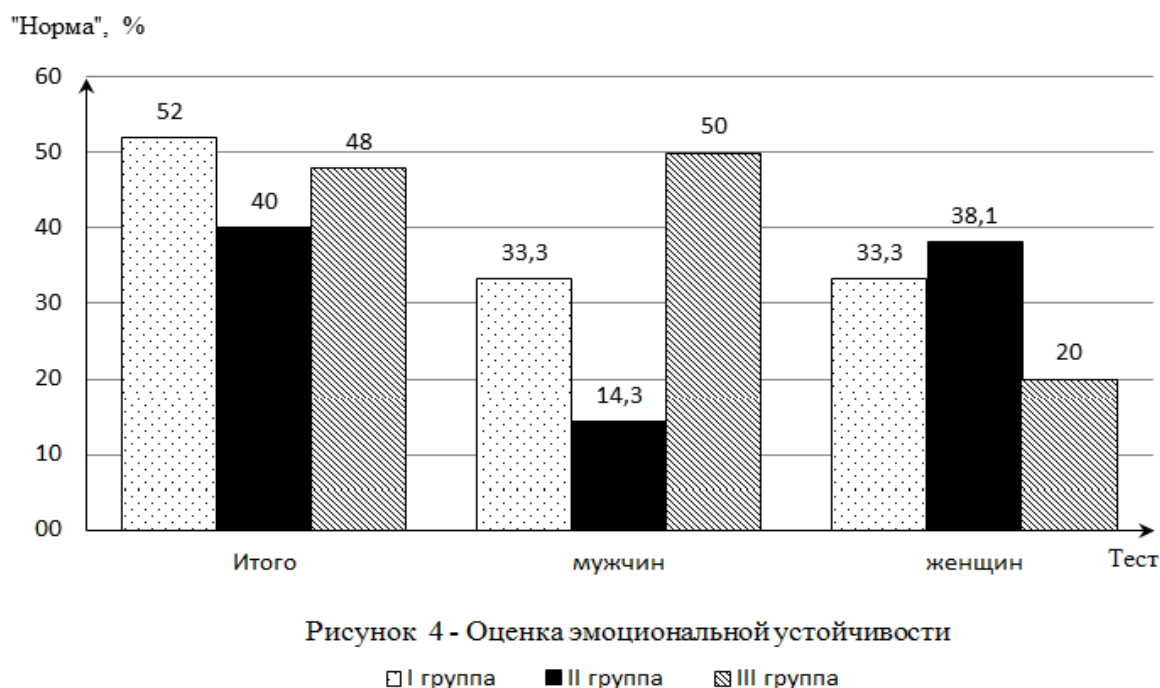
□ I группа ■ II группа ▨ III группа

Интерес представляет оценка эмоциональной устойчивости (тест 4). Эмоционально неуравновешенные водители являются значительно чаще нарушителями правил дорожного движения и участниками дорожно-транспортных происшествий. Эмоциональное состояние имеет большое значение в деятельности водителя транспортного средства и во многих случаях определяет правильность и точность его действий. У водителя транспортного средства, помимо переживаний, свойственных каждому человеку, могут возникать эмоции, связанные с управлением транспортным средством. Причинами этих эмоций могут быть и опасные ситуации на дорогах, движение в условиях плохой видимости, ответственность за жизнь и здоровье пассажиров, неудовлетворительное состояние дорожного покрытия, плохие метеорологические условия (гололедица, снег, метель, дождь), необходимость резкого торможения и внезапное изменение направления движения из-за создавшейся дорожной ситуации. Основным фактором, вызывающим у водителя транспортного средства эмоциональное напряжение, является необходимость в постоянной оценке непрерывно меняющейся дорожной обстановки и в принятии решений в условиях недостатка времени [3].

Степень эмоциональной напряженности водителя транспортного также постоянно меняется в зависимости от характера дорожных ситуаций и условий движения. Важным для него является способность безошибочно и быстро действовать в состоянии эмоционального напряжения, вызванного экстремальной ситуацией на дороге.

Тревожность повышается на начальных этапах приобретения навыка вождения, затем снижается, при стаже от трех до пяти лет она становится неадекватно низкой и затем вновь повышается до оптимального для данной деятельности уровня [4].

Результаты теста «Эмоциональная устойчивость» приведены на рисунке 4.



Из графика видно, что в смешанных группах, без учета гендерного различия участников эксперимента, наиболее эмоционально устойчивыми являются I и III группы. Таким образом, более эмоционально «хладнокровны» участники эксперимента, не имеющие опыта вождения (не знакомые с опытом принятия экстренных решений при аварийной ситуации на дорогах) и водители со стажем.

Анализируя показатели результатов теста в каждой группе участников эксперимента, с учетом гендерного различия, видим различия эмоционального состояния у мужчин и женщин, разных категорий групп.

Заключение

Результат статистической обработки результатов оценки уровня психофизиологического состояния водителя определил соотношение взаимовлияния некоторых психофизиологических состояний между собой. Так, например, выявлена обратно пропорциональная корреляционная зависимость между параметрами психофизиологических состояний: средним временем реагирования (сложная зрительно-моторная реакция) и показателем эмоциональной устойчивости (количество ошибок без помехи) ($r = -0,70$). Исходя из чего, можно сделать вывод, что чем меньше времени тратит водитель при принятии решения в процессе вождения, тем больше вероятность совершения ошибок на этапе принятия решения и при выполнении управляющих действий в нестандартных ситуациях и в условиях действия отвлекающих факторов.

Детальный анализ параметров психофизиологических состояний водителей показывает, что при оценке уровня восприятия скорости и расстояния, количество точных попаданий пропорционально среднеарифметическому времени реагирования при оценке эмоциональной устойчивости ($r = 0,5$). Что означает: чем выше эмоциональная устойчивость, тем более верно водитель транспортного средства способен оценивать скорость и дистанцию во время движения.

Наличие корреляционной зависимости означает, что при тренинге одного вида психофизиологического состояния, человек невольно тренирует и корреляционнозависимые психофизиологические состояния.

Список литературы

- [1] Психологическая диагностика Учебное пособие / Под ред. К.М. Гуревича и Е.М. Борисовой. – М.: Изд-во УРАО, 1997.
- [2] Руководство пользователя УПДК-МК [Электронный ресурс]/ АО «НЕЙРОКОМ». – Москва, 2017. – Режим доступа: http://www.neurocom.ru/ru2/auto/updk_mk_auto_testy.html/ . – Дата доступа: 15.12.2016.

- [3] Морковкина Е. А. Исследование профессионально-важных качеств водителей транспортных средств // Молодой ученый. 2009. №3. С. 143-151.
- [4] Шадриков В.Д. Проблемы системогенеза профессиональной деятельности. М., 1982.
- [5]

References

- [1] Psihologicheskay diagnostika. Uchebnoe posobie / Pod red. K.M. Gurevicha и E.M. Borisovoj. – М.: Izd-vo URAO, 1997.
- [2] Rukovodstvo polzovatelay UPDK-MK [Elektronnuj resurs]/ АО «Nejrokom». – Moskva, 2017. – Regim dostupa: http://www.neurocom.ru/ru2/auto/updk_mk_auto_testy.html/. – Data dostupa: 15.12.2016.
- [3] Morkovkina E. A. Issledovanie professoonalno-vagnuh kachestv voditelej transportnuh sredstv // Molodoj uchenuj. 2009. №3. S. 143-151.
- [4] Chandrikov V.D. Problemu sistemogeneza professionalnoj deytelnosti. M., 1982.

Сведения об авторах

Розум Г.А., ассистент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, магистр техники и технологии.

Мельникова Е.А., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, магистр технических наук.

Савченко В.В., к.т.н., доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Щербина Н.В. аспирант, старший преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, магистр технических наук.

Яшин К.Д., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, д. 6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники тел. +375-17-293-88-24, ; e-mail: kafipie@bsuir.by Розум Галина Анатольевна

Information about the authors

Rozum G.A., assistant of human engineering and ergonomics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics, M.A.Sc.

Melnikova E.A., PG student of the human engineering and ergonomics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics, M. Eng.

Savchenko V.V., PhD, associate professor of human engineering and ergonomics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Scherbina N.V., PG student of human engineering and ergonomics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics, M. Eng.

Yashin K.D., PhD, associate professor, head of the department of engineering psychology and ergonomics of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovka st., 6, Belarusian state university of informatics and radioelectronics tel. +375-17-293-88-24;
e-mail: kafipie@bsuir.by Rozum Galina Anatolevna

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ СЕТЕЙ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г.МИНСКА

М.М.ТИХОНОВ, А.Д.БУЛВА

*ГУО «Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь»
ул. Машиностроителей, 25, г. Минск, 220118, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию

Аннотация. Проведен анализ технического состояния сетей водоснабжения в г.Минске, выполнен анализ факторов, влияющих на риск возникновения аварийных ситуаций. Получены аналитические соотношения для прогноза интенсивности отказов городских сетей водоснабжения в зависимости от диаметра и материала труб. Предложен вариант использования полученных зависимостей в практических целях.

Ключевые слова: авария, водоснабжение, интенсивность отказов, риск, сети, статистика, чрезвычайная ситуация.

Abstract. The article discusses the technical condition of water supply networks in Minsk. It analyzed the factors influencing on their technical condition and lead to a crash. It were obtained analytical relations for predicting the failure rate of urban water supply networks, depending on the diameter and pipe material. Also provided is the option of using the received dependences for practical purposes.

Keywords: accident, water supply, failure rate, risk, network, statistics, emergency.

Введение

В Беларуси, как и в большинстве стран СНГ, для проектирования и строительства объектов водоснабжения и водоотведения до сих пор используется нормативная база 70-80 гг. бывшего СССР, которая является устаревшей, и которая в полной мере не отвечает современным требованиям охраны здоровья населения, экологической и инженерной безопасности [1].

В результате физического износа трубопроводов и арматуры ежегодно имеет место тенденция увеличения количества прорывов, отключений и аварий, а, следовательно, и потеря воды.

Как показывает практика, особые сложности создают аварии на главных магистральных сетях систем водоснабжения, которые приводят к серьезным техногенным последствиям, на длительное время нарушающим условия водоснабжение части территорий города, оставляя без воды население.

В соответствии с классификатором чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС), действующим в Республике Беларусь, указанные события идентифицируются, как чрезвычайные. При этом к ЧС локального уровня относится перерыв в водоснабжении на срок более 24 часов и снижении подачи воды на 15 суток, а при перерыве водоснабжения на срок более суток либо снижении подачи воды на срок более 20 суток – ЧС местного уровня [2].

Срок эксплуатации водопроводных сетей, являющихся основным элементом систем водоснабжения, для большинства городов Республики Беларусь составляет около 40–50 лет. Это говорит о том, что они выработали свой технически допустимый амортизационный срок, гарантирующий их надежную эксплуатацию, около 60% водопроводных сетей находятся в ветхом состоянии (для г. Минска это значение составляет 54%).

Учитывая указанные обстоятельства, представляется целесообразным проведение анализа отказов городских сетей водоснабжения.

При разработке планов мероприятий по восстановлению инфраструктурных сетей жизнеобеспечения необходимо использовать показатели надежности, которые позволяют

прогнозировать работу ремонтно-восстановительных служб, составы рабочих бригад, предусматривать потребный парк машин, механизмов и запасных частей. В целом, это позволит существенно повысить эффективность работы служб, ответственных за эксплуатацию инфраструктурных систем жизнеобеспечения населения, что окажет положительное влияние на надежность этих систем и создаст условия для улучшения доступа населения к водопроводной питьевой воде и средствам водоотведения.

В качестве объекта исследования приняты отказы наружных сетей водоснабжения г. Минска.

Основная часть

Для оценки нарушений в работе выполнен анализ более 1000 аварий, произошедших на сетях питьевого водоснабжения на территории г. Минска, который показал, что 77% из них приходится на трубопроводы, выполненные из чугуна (рис.1), что составляет 70% длины всех трубопроводных сетей, причем 41% связан с разрывом швов и 44% – с деформацией почвы (рис. 2).

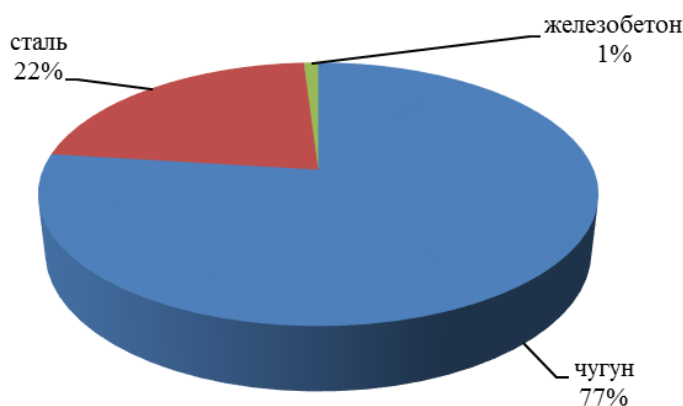


Рисунок 1 – Статистика аварий на водопроводных сетях по материалам труб

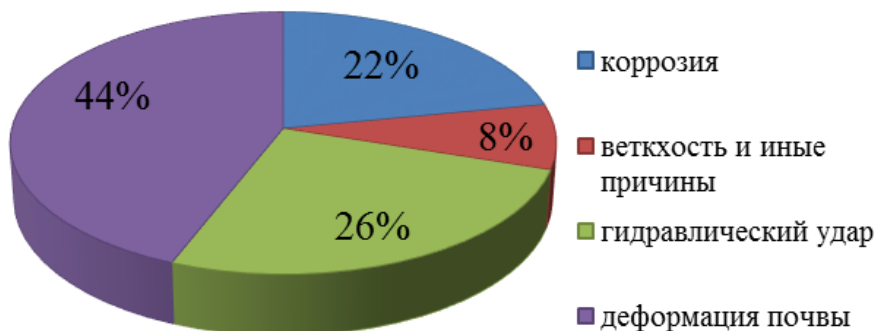


Рисунок 2 – Статистика аварий на водопроводных сетях по причинам возникновения

Основные факторы, влияющие на техническое состояние водопроводных сетей и сооружений, являются [3]:

динамические нагрузки, вызванные движением транспорта и перекачиваемой жидкостью, в том числе гидравлическими ударами;

деформация почвы, вызываемая замерзанием, оттаиванием и просадкой земной поверхности;

коррозия, вызываемая внешними (агрессивные подземные воды, почва и т.д.) и внутренними (агрессивность воды) причинами;

низкое качество строительно-монтажных и эксплуатационных работ.

Значительное негативное влияние на техническое состояние водопроводных сетей и сооружений на них оказывают выполнение строительства и ремонт дорог с отклонением от

проектных решений. Увеличение динамических нагрузок на водопроводную линию или сооружение в сочетании с нарушениями требований по их прокладке приводит к возникновению аварийных ситуаций.

Нарушения сварных швов являются наиболее частыми явлениями (примерно 36% от всех аварий); разломы (21%) и отверстия (17%) занимают второе и третье места.

Причины аварий на трубопроводах свидетельствуют, что разрывы швов в большинстве случаев (примерно в 80% случаев) происходят в результате гидравлического удара, а возникновение сквозных отверстий связано с коррозией материала трубопроводов (85%). Здесь же следует отметить, что основной причиной трещин и разломов в трубопроводах стала деформация почв. Статистика повреждений в результате гидравлического удара свидетельствует, что аварии этого вида характерны для труб малого диаметра (до 300 мм). Здесь же следует отметить, что аварийность для труб большого диаметра (1000 – 1200 мм) значительно ниже, чем для труб среднего диаметра. Однако аварии на трубах большого диаметра, наносят больший ущерб безопасности работы систем водоснабжения. Повреждения дорожных покрытий, размывы объемных котлованов, ущерб рядом проходящим инженерным коммуникациям, большие потери воды создают дополнительные сложности в локализации поврежденных участков и приводят к нарушению водоснабжения. Как правило, эксплуатационные сроки восстановления таких трубопроводов не выдерживаются.

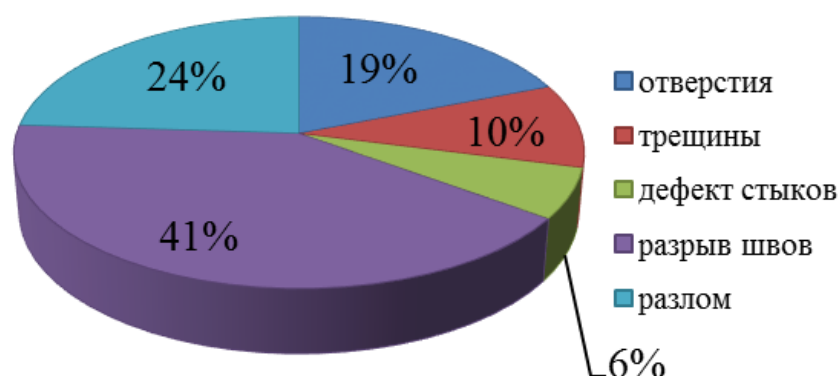


Рисунок 3 – Статистика видов аварий на водопроводных сетях

Анализ статистических данных по авариям на сетях водоснабжения позволил получить аналитические соотношения для прогноза интенсивности отказа Минских сетей водоснабжения в зависимости от диаметра и материала труб, из которых они изготовлены (рис.4-5).

Так, аппроксимируя статистические данные рис.4, интенсивность отказов в год на 10 км для стальных труб в зависимости от диаметра может быть определена по формуле:

$$\lambda(D) = 432,35 \cdot D^{-0,866} \quad (1)$$

где $\lambda(D)$ – интенсивность отказов в год в зависимости от диаметра труб, ав/(год×10 км);

D – диаметр водопровода, мм.

Аппроксимируя статистические данные рис.5, интенсивность отказов в год на 10 км для чугунных труб в зависимости от диаметра может быть определена по формуле:

$$\lambda(D) = 708,87 \cdot D^{-0,991} \quad (2)$$

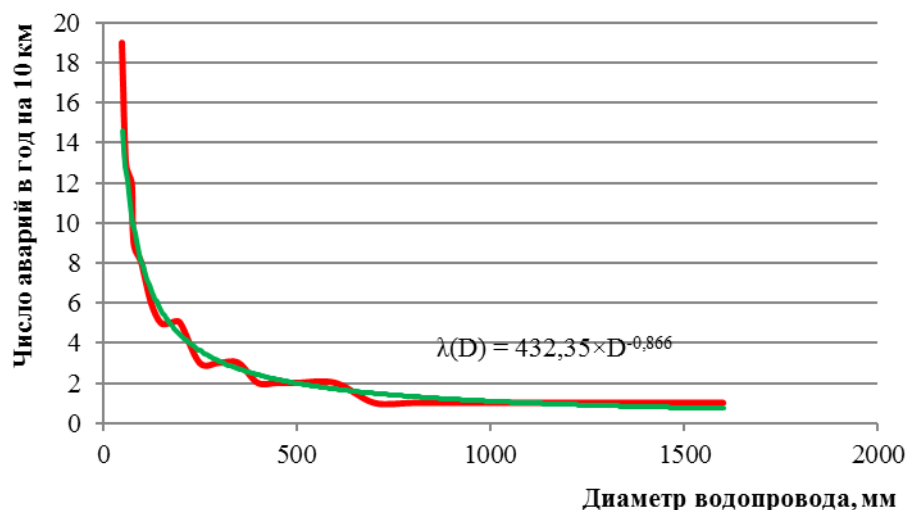


Рисунок 4 – Интенсивность отказов на водопроводных сетях (на 10 км в год) из стальных труб в зависимости от диаметра

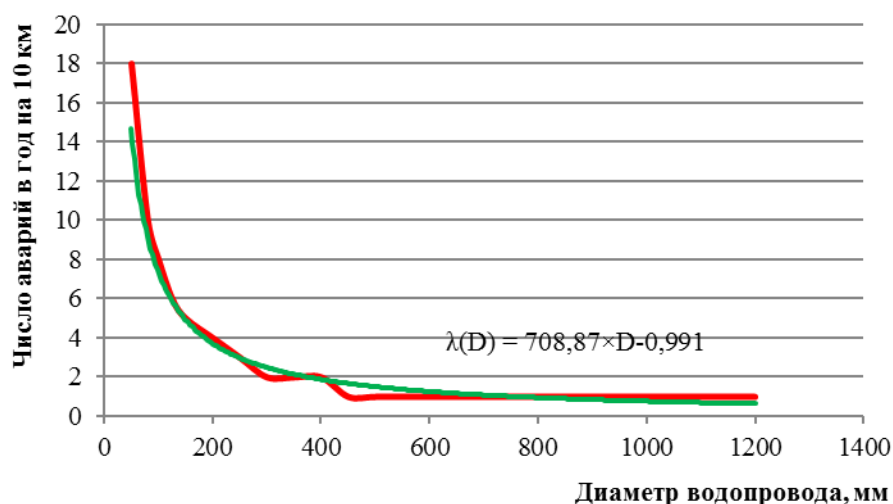


Рисунок 5 – Интенсивность отказов на водопроводных сетях (на 10 км в год) из чугунных труб в зависимости от диаметра

Заключение

Выполненный анализ аварийных ситуаций на линейной части систем водоснабжения г.Минска позволил охарактеризовать состояние, а также фактический уровень надежности и риска возникновения аварий. Приведенные данные свидетельствуют о наличии серьезных проблем в эксплуатации сетей водоснабжения, а также наличии необходимости принять профилактические меры, направленные на минимизацию возможных последствий в результате чрезвычайных ситуаций.

Полученные зависимости для характеристики интенсивности отказов позволяют планировать возможный объем ремонтно-восстановительных работ на год, определять запас материально-технических ресурсов, необходимый для устранения аварий, а также прогнозировать возможные последствия от аварий.

Величина интенсивности отказов, изменяющаяся из года в год в зависимости от состояния сетей водоснабжения, может также служить критерием эффективности проводимых профилактических и ремонтных мероприятий соответствующими службами города.

Список литературы

Седлухо Ю.П. Проблемы водоснабжения и водоотведения малых населённых пунктов. Опыт Беларуси [Электронный ресурс]. URL: <http://polymercon.com/publications/survey/problems-of-water-supply-and-sanitation-small-neseleennyh-points-the-experience-of-belarus/> (дата обращения: 11.11.2016).

Захарович М.Б. Повышение надежности работы систем водоснабжения на основе внедрения безопасных форм организации их эксплуатации и строительства: учеб, пособие / М.Б.

Захаревиц, А.Н. Ким, А.Ю. Мартыанова; СПбГАСУ. – СПб., 2011. – 62 с.

О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера:

постановление МЧС Респ. Беларусь от 19 фев. 2003 г. № 17 // Консультант Плюс: Беларусь.

Технология ПРОФ [Электронный ресурс] / ООО «ЮрСпектр», Нац.центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2016.

References

1. Sedluho YU.P. Problemy vodosnabzheniya i vodootvedeniya malyh naselyonnyh punktov. Opyt Belarusi [EHlektronnyj resurs]. URL: <http://polymercon.com/publications/survey/problems-of-water-supply-and-sanitation-small-neseleennyh-points-the-experience-of-belarus/> (data obrashcheniya: 11.11.2016).

2. O klassifikacii chrezvychajnyh situacij prirodnogo i tekhnogenennogo haraktera: postanovlenie MCHS Resp. Belarus' ot 19 fev. 2003 g. № 17 // Konsul'tant Plyus: Belarus'. Tekhnologiya PROF [EHlektronnyj resurs] / ООО «YUrSpektr», Nac.cent. pravovoj inform. Resp. Belarus'. – Minsk, 2016.

3. Zaharovich M.B. Povyshenie nadezhnosti raboty sistem vodosnabzheniya na osnove vnedreniya bezopasnyh form organizacii ih ehkspluatatsii i stroitel'stva: ucheb, posobie / M.B. Zaharevich, A.N. Kim, A.YU. Mart'yanova; SPbGASU. – SPb., 2011. – 62 s.

Сведения об авторах

Тихонов М.М., к.т.н., доцент, начальник
кафедры гражданской защиты ГУО
«Университет гражданской защиты МЧС
Республики Беларусь»

Булва А.Д., доцент кафедры гражданской
защиты ГУО «Университет гражданской защиты
МЧС Республики Беларусь»

Адрес для корреспонденции

220118, Республика Беларусь, г. Минск, ул.
Машиностроителей, 25,
ГУО «Университет гражданской защиты МЧС
Республики Беларусь»
Тел. +375-29-118-12-18;
e-mail: Bulva@list.ru
Булва Александр Дмитриевич

Information about the authors

Tsikhnanau M.M, Candidate of Engineering
Sciences, Associate Professor, Head of Department
of Civil Protection of the University of Civil
Protection of the Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus

Bulva A.D., Associate Professor at the Department
of Civil Protection of the University of Civil
Protection of the Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus.

Address for correspondence

220118, Republic of Belarus, Minsk, ul.
Mashinostroiteley, 25,
State Educational Institution «University of Civil
Protection of the Ministry of Emergency Situations
of the Republic of Belarus»
tel. +375-29-118-12-18;
e-mail: Bulva@list.ru
Bulva Aliaksandr

МЕТОДЫ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ МАШИННОГО ПАРКА СТАНЦИИ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

М.А. Масный, М.В. Давыдов

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П.Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь*

23.11.2017

Аннотация. В данном докладе проведено обоснование выбора метода и программного средства, необходимого для оптимизации, минимизации влияния человеческого фактора и ускорения работы машинного парка станции скорой медицинской помощи, которые позволяют усовершенствовать процесс управления.

Ключевые слова: развитие ERP-систем, парк станции скорой медицинской помощи, оптимальный маршрут, использование карт, отображение и хранение информации.

Abstract. This report substantiates the choice of the method and software needed to optimize, minimize the human factor and accelerate the operation of the machinery of the ambulance station, which improve the management process.

Keywords: development of ERP-systems, ambulance station park, optimal route, use of maps, display and storage of information.

Введение

К настоящему времени методы и программные средства оптимизации как практическая деятельность, устойчиво заняло свое место в сфере современных систем управления, таких как, машинные парки. Область осведомленности специалистов сферы систем управления включает различные виды информации - документооборот, информационные, товарно-материальные и финансовые.

Присутствие работающей системы управления машинным парком дает возможность полностью обеспечить контроль всего потока ресурсов (транспортных средств) - от исполнителя (места здравоохранения) до заказчика (пациента), - оптимизировать каждое действие на пути к цели, достигая значительной экономии ресурсов организации в плане материально-технических средств [1].

Актуальность

Развитие ERP-систем (Enterprise Resource Planning System — системы планирования ресурсов предприятия) в современных машинных парках станций скорой медицинской помощи, становится ощутимым при создании программного обеспечения (ПО). Это ПО обеспечивает специалистам медицинских учреждений (операторам ПВЭМ, диспетчерам) определенные удобства, сокращающие трудовые затраты и обеспечивающие более углубленные возможности в оптимизации принимаемых решений. Главной особенностью является интерфейс ПО, который должен погружать специалиста в решаемую им задачу, быть простым и доступным [2].

В этой области знаний определены и специфичные термины [3]:

«пользователь» - лицо, допущенное к изменению содержимого таблиц в базе данных, командного интерфейса программы;
«пользовательский интерфейс» - совокупность средств, с помощью которых пользователь может общаться с системой.

Создание удобного пользовательского интерфейса, задача сложная и требует комплексного подхода. Для этого программисту необходимо проникнуться в тему разрабатываемого ПО, учесть все пожелания заказчика, а также пользователя - человека, который в дальнейшем будет эксплуатировать данное ПО в необходимых целях организации. В пользовательском интерфейсе должны быть учтены все основные важные данные и исключительные ситуации. Под качеством интерфейса обычно понимают:
возможность и простоту доступа к набору информации;
дизайн окон (интерфейса);
перечень и дизайн отображаемых данных, символьной информации;
"диалог" пользователя и компьютера;
проработанные исключительные ситуации для предвидения ошибок;
командный (пользовательский) интерфейс доступа к управлению функционированием программы.

Задачи

Основные задачи методов и программных средств оптимизации заключаются в следующем: сборе, аккумулировании, анализе, передаче и обработке информации.
При решении этих задач организации часто сталкиваются с множеством проблем, например такими, как: пустая трата времени квалифицированных специалистов на проделывание множества операции при заполнении заявки и организации необходимого вида транспортного средства для предоставления заказчику (пациенту) нуждающемуся в экстренной или обычной медицинской помощи; отсутствие систематизации информации; несвоевременное обновление информации о наличии транспортных средств, приводящих к задержке выезда и транспортировки заказчиков (пациентов); ручное заполнение и подтверждение согласованных документов подписью, которое могут повлечь возникновение непредвиденных ошибки, вынуждающие сотрудников повторно заполнять документы; расхождение между требованиями заказчиков и возможностями организационных транспортных средств.
Эти проблемы могут быть устранены при внедрении соответствующих информационных систем управления, в частности методов и программных средств оптимизации, в данном случае таких как, машинного парка станции скорой медицинской помощи.

Подзадачи интерфейса

Можно выделить несколько основных подзадач интерфейса программы в общей задаче ПО:

Выбор оптимального маршрута и транспортного средства из машинного парка;
Формирование наглядного маршрута машины скорой медицинской помощи с использованием карт;
Отображение и хранение информации по принятому вызову с учетом статуса заявки.

Описание работы ПО

Блок-схема представляет собой совокупность символов, соответствующих этапам работы алгоритма и соединяющих их линий [4]. Пример блок-схемы для ПО представлен ниже.

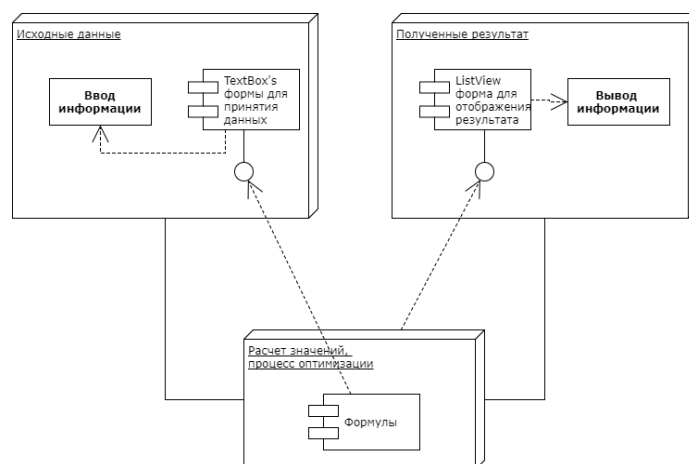


Рисунок 1 - Блок-схема ПО

На данной блок-схеме представлено выполнение основных действий ПО на основе принятия решений по выбору метода и программного средства оптимизации. Принцип работы заключается в следующем, оператор вводит исходные данные в определенные поля, данные передаются в функцию для вычисления наилучшего результата и передаются в результат, где оператору будет предложение производства дальнейших действий внутри ПО.

Заключение

Использование программного интерфейса, значительно повышающее наглядность и простоту осознания выходных данных, становится все более популярным в информационной технологии поддержки принятия решений. Таким образом, методы и программные средств оптимизации работы машинных парков дает возможность ускорить процесс и организовать распределенную систему сбора и обработки информации.

Список литературы

- Харрисон, А. – Управление логистикой / А. Харисон // Издательство: ОлимпБизнес, 2010. – 640 с.
- Econbooks, Inc.(1999). Диапазон областей применения СППР. Москва, Econbooks. [Электронный ресурс] <http://econbooks.ru/books/part/10362>. Режим доступа: - свободный.
- Разработка управляемого интерфейса. - /В.А.Ажеронок, А.В. Островерх, М.Г. Радченко, Е.Ю. Хрусталева. – М.: ООО «ИС-Паблишинг», 2010. – 723 с.: ил.
- Блок схемы алгоритмов. ГОСТ. Примеры; Блог программиста. [Электронный ресурс] <https://prof.com/archives/1462>. Режим~доступа: - свободный.

References

- Harrison, A. – Upravlenie logistikoj / A. Harison // Izdatel'svo: OlimpBiznes, 2010. – 640 s.
- Econbooks, Inc.(1999). Diapazon oblastej primeneniya SPPR. Moskva, Econbooks. [Elektronnyj resurs] <http://econbooks.ru/books/part/10362>. Rezhim dostupa: - svobodnyj.
- Razrabotka upravljajemogo interfejsa. - /V.A.Azheronok, A.V. Ostroverh, M.G. Radchenko, E.Ju. Hrustaleva. – M.: ООО «IS-Publishing», 2010. – 723 s.: il.
- Blok shemy algoritmov. GOST. Primery; Blog programmista. [Elektronnyj resurs] <https://prof.com/archives/1462>. Rezhim~dostupa: - svobodnyj.

Сведения об авторах

Масный Михаил Александрович, магистрант гр. 7М1131, университет БГУИР.
Давыдов Максим Викторович, зав. каф. ТОЭ, доцент, канд. техн. наук, университет БГУИР.

Information about the authors

Masnyi Mikhail Alexandrovich, undergraduate gr. 7M1131, BSUIR University.
Davydov Maksim Viktorovich, head of the chair of the Department of Electrical Engineering, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, BSUIR University.

Адрес для корреспонденции

220018, Республика Беларусь
Минск, ул. Одинцова 69
Белорусский государственный университет

Address for correspondence

220018, Republic of Belarus
Minsk, Odintsova 69
Belarusian state university of informatics and radio

информатики и радиоэлектроники
+375 (33) 634-36-34 МТС
e-mail: me.steel.off@gmail.com
Масный Михаил Александрович

electronics
+375 (33) 634-36-34 MTS
e-mail: me.steel.off@gmail.com
Masny Mikhail Alexandrovich

УДК 004.94

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ВЫБРОСОВ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.А. МЕЛЬНИЧЕНКО*, Ю.В. ЯЦКЕВИЧ, А.Ю. ЯЦКЕВИЧ, И.Г. ШУПЕЙКО

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

**Республиканский центр государственной экологической экспертизы и повышения квалификации
Минприроды, пер. Менделеева 1-й, д.50, корп. 4, Минск, 220037, Беларусь*

Поступила в редакцию

Аннотация. Разработана физическая модель процесса тушения кокса в тушильной башне. Создан программный комплекс для моделирования данного технологического процесса. Рассчитана динамика парогазово-воздушных потоков и концентрации выбросов в пространстве конкретной коксотушильной башни. Предложен комплекс инженерно-технических решений по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Ключевые слова: оценка выбросов, компьютерное моделирование, программный комплекс.

Abstract. The physical model of coke quenching in the quenching house has been worked out. The software complex for computer modeling of this technological process has been created. The gas-vapor mixture floats dynamics and emissions concentration in the quenching house has been calculated. The set of engineering solutions for air pollution reduction has been suggested.

Keywords: estimation of emissions, computer modeling, software complex.

Введение

В современных условиях развития общества решающее влияние на окружающую среду оказывает производственная деятельность, основным компонентом которой являются техногенные объекты. В то же время эти объекты являются источниками разнообразных угроз: производственных травм, профессиональных заболеваний, а также загрязнения всех основных компонентов окружающей среды (атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, земельных ресурсов, растительного и животного мира). В связи с этим актуализируется задача уменьшения выбросов техногенных объектов.

Задача оценки выбросов является сложной по причине многообразия и сложности источников поступления загрязняющих веществ в атмосферу, а также протекающих в ней физических и химических процессов.

Снижению выбросов загрязняющих веществ в воздушный бассейн и улучшению качества атмосферного воздуха в ближайшей перспективе будут содействовать следующие меры:

внедрение энерго-, ресурсосберегающих технологий в промышленности и энергетике;

организация повсеместного контроля выбросов;

установление стандартов и удельных технических нормативов выбросов;

внедрение прогрессивных методов очистки отходящих газов и оснащение источников выбросов эффективным пылегазоочистным оборудованием и т.п. [1].

Эти инженерные решения зачастую являются дорогостоящими, требуют больших затрат времени на разработку, проектирование и внедрение, но, к сожалению, не всегда достигают нужного эффекта. Применение современных средств вычислительной техники с использованием прогрессивных алгоритмов позволит значительно сократить затраты, повысить качество выполняемых расчетов и достоверность полученных результатов.

Нами разработан программный комплекс по оценке воздействия на окружающую среду вредных веществ, образующихся в процессе коксования угля в коксотушильной башне. Данный процесс выбран как один из наиболее типичных источников загрязнения атмосферного воздуха, и в то же время структура выбросов при этом очень сложная и включает продукты горения, пар и другие неоднородные компоненты.

Физическая модель процесса тушения кокса в тушильной башне

В трехмерном пространстве башни (рис.1, область O_0) перемещается смесь из воздуха, пара, мелких капель воды (туман) и твердых частиц (выбросы). В данной модели предполагается, что капли и частицы так малы, что практически не обладают инерционностью и перемещаются вместе с паровоздушной смесью (имеют такую же скорость). Количество каждого компонента смеси в каждой точке модельного пространства в некоторый момент времени описывается их плотностями (кг/м^3): ρ_a - плотность воздуха, ρ_p - плотность пара, ρ_w - концентрация мелких капель воды, ρ_{TSL} - концентрация пыли. Скорость смеси в каждой точке модельного пространства в некоторый момент времени описывается вектором (v_x, v_y, v_z) .

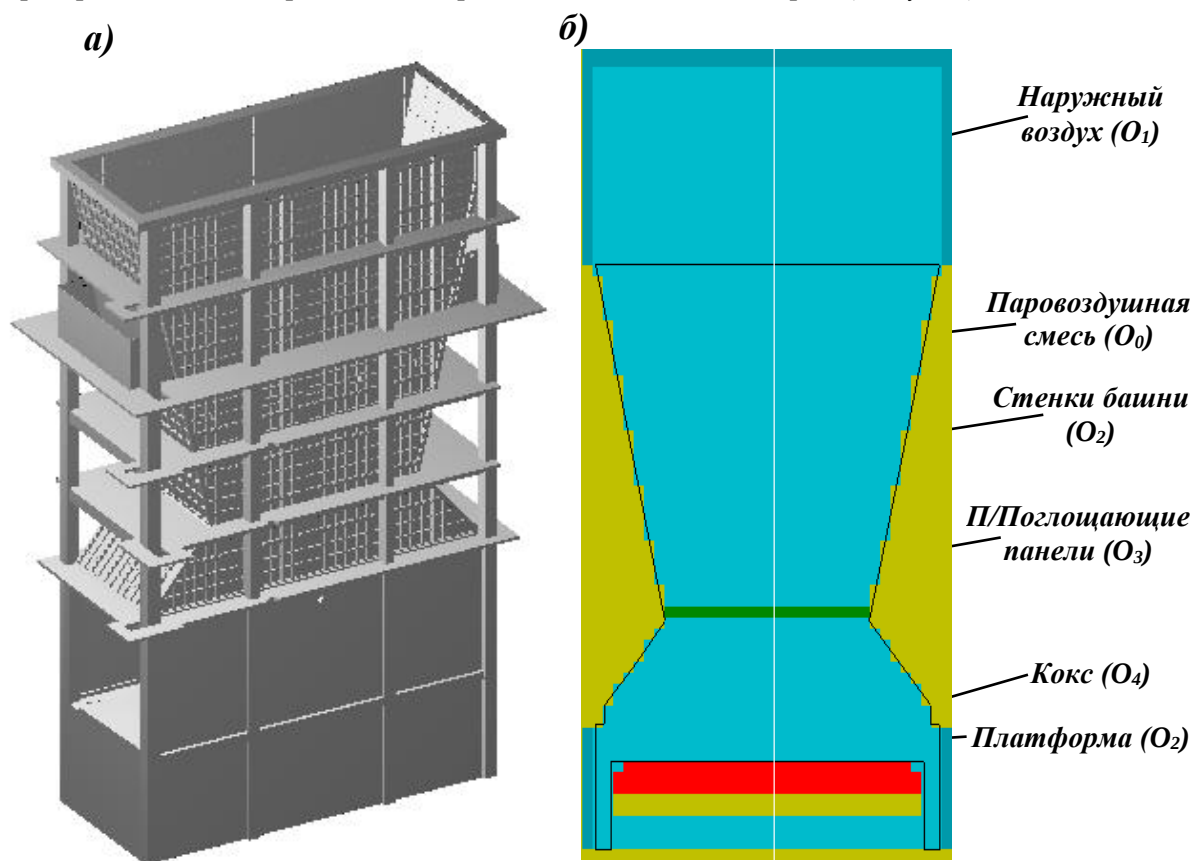


Рисунок 1 – Общий вид тушильной башни (а) и вид модельного пространства (б) в центральном сечении по типам областей (границ).

Источником пара, мелких капель воды и твердых частиц является поверхность кокса в нижней части башни (O_4). Интенсивность выброса ($\text{кг/м}^2\text{с}$) для всех трех компонентов изменяется в течение всего цикла тушения и описывается тремя таблично заданными функциями ($I_p(t)$, $I_w(t)$, $I_{TSL}(t)$). Эти функции подбирались в соответствии с режимом орошения и согласовывались с результатами натурных измерений по скоростям, температурам потоков и общему количеству выбросов. Выделяющийся пар, капли воды и пыль имеют температуру 100°C (373K). Скорость смеси на поверхности кокса принималась равной нулю: $v_{x4} = 0$, $v_{y4} = 0$, $v_{z4} = 0$.

В нижней части башни имеются ворота (O_1), через которые внутреннее пространство башни соединяется с внешней средой. То есть, через ворота наружный воздух может поступать внутрь башни, а паровоздушная смесь может выходить наружу. С точки зрения граничных условий в области O_1 переменные состояния среды имеют постоянное значение: $T_1=293\text{K}$, $\rho_{a1}=1,19 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{p1}=0 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{w1}=0 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{TSL1}=0 \text{ кг/м}^3$, а скорости равны скоростям граничных элементов области O_0 ($v_{x1} = v_{x0}$, $v_{y1} = v_{y0}$, $v_{z1} = v_{z0}$). Такие же граничные условия установлены в верхней части модели над башней. То есть, паровоздушная смесь может выходить из башни в верхней ее части, а наружный воздух может поступать внутрь башни сверху.

В стенках башни (O_2) никаких процессов не происходит. Но скорость паровоздушной смеси на твердой поверхности равна нулю (условие прилипания: $v_{x2} = 0$, $v_{y2} = 0$, $v_{z2} = 0$). Кроме того

поверхность стенок башни, имеющая постоянную температуру $T_2=20^\circ\text{C}=293\text{K}$, забирает некоторое количество тепла из области парогазовой смеси согласно формуле:

$$P_2 = \alpha(T - T_2)\Delta S, \quad (1)$$

где P_2 – мощность теплоотдачи; $\alpha=60 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$ – коэффициент теплоотдачи; T – температура паровоздушной смеси на границе с поверхностью стенки; T_2 – температура стенки, ΔS – площадь элемента поверхности.

Область пространства O_3 представляет собой пылепоглощающие панели. С точки зрения модели пространство в этой области обладает следующими свойствами:

- 1) область заполнена паровоздушной смесью и не имеет границ (граничных условий) с областью O_0 ;
- 2) скорость паровоздушной смеси внутри области в направлениях X и Z всегда равна нулю ($v_x=0 \text{ м/с}$, $v_z=0 \text{ м/с}$);
- 3) в вертикальном направлении Y на паровоздушную смесь действует сила сопротивления:

$$F = -K_a v_y \Delta x \Delta z, \quad (2)$$

где F – сила сопротивления набегающему потоку; K_a – коэффициент аэродинамического сопротивления одного квадратного метра площади панелей; $\Delta x \Delta z$ – площадь панелей;

- 4) концентрация пыли уменьшается по формуле:

$$\frac{\partial \rho_{TZL}}{\partial t} = -K_{TZL} \rho_{TZL}, \quad (3)$$

где $d\rho_{TZL}/dt$ – скорость уменьшения концентрации пыли; K_{TZL} – коэффициент пылепоглощения;

- 5) количество воды (мелких капель) так же уменьшается:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -K_w \rho_w, \quad (4)$$

где $d\rho_w/dt$ – скорость уменьшения концентрации воды; K_w – коэффициент поглощения воды;

- 6) панели забирают некоторое количество тепла из области паровоздушной смеси:

$$P_3 = \alpha(T - T_3)\Delta S, \quad (5)$$

где P_3 – мощность теплоотдачи; $\alpha=60 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$ – коэффициент теплоотдачи; T – температура паровоздушной смеси, протекающей через панели; T_3 – температура панели, ΔS – площадь поверхности соприкосновения элементов конструкции панели.

В исходном состоянии модели (начальные условия) все пространство башни O_0 заполнено неподвижным воздухом с характеристиками окружающей среды: $T(x,y,z,0)=293\text{K}$, $\rho_a(x,y,z,0)=1,19 \text{ кг/м}^3$, $\rho_p(x,y,z,0)=0 \text{ кг/м}^3$, $\rho_w(x,y,z,0)=0 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{TZL}(x,y,z,0)=0 \text{ кг/м}^3$, $v_x=0 \text{ м/с}$, $v_y=0 \text{ м/с}$, $v_z=0 \text{ м/с}$.

Математическая модель физических процессов при тушении кокса в пространстве тушильной башни

Процесс перемещения паровоздушной смеси

Расчет распределения скорости $v(x,y,z,t)$ по трехмерному пространству O_0 паровоздушной смеси производился на основе уравнения Навье-Стокса [2]:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -(\bar{v} \nabla) \bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\eta}{\rho} \Delta \bar{v} + \bar{g}, \quad (6)$$

где t – время; $\bar{v}$ – вектор скорости паровоздушной смеси; P – давление паровоздушной смеси;

$\bar{g}=(0,-9.8,0)$ – ускорение свободного падения (ось Y направлена вертикально); η –

динамическая вязкость паровоздушной смеси; ρ – плотность паровоздушной смеси, которая является суммой плотностей ее компонентов:

$$\rho = \rho_a + \rho_p + \rho_w + \rho_{TZL}, \quad (7)$$

где ρ_a – плотность воздуха, ρ_p – плотность пара, ρ_w – концентрация мелких капель воды (кг/м³), ρ_{TSL} – концентрация пыли (кг/м³).

Расчет распределения плотностей воздуха и пара ($\rho_a(x,y,z,t)$, $\rho_p(x,y,z,t)$) на основании трехмерного поля скоростей $v(x,y,z,t)$ производился по уравнениям неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla(\rho_a \bar{v}) = 0, \quad \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla(\rho_p \bar{v}) = 0. \quad (8)$$

Расчет распределения плотностей остальных составляющих смеси ($\rho_w(x,y,z,t)$, $\rho_{TSL}(x,y,z,t)$) на основании трехмерного поля скоростей $v(x,y,z,t)$ производился по аналогичным уравнениям дополненным уравнением диффузии:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \nabla(\rho_w \bar{v}) + D_w \Delta \rho_w, \quad \frac{\partial \rho_{TSL}}{\partial t} = \nabla(\rho_{TSL} \bar{v}) + D_{TSL} \Delta \rho_{TSL}. \quad (9)$$

где D_w – коэффициент диффузии мелких капель воды (кг/м³), ρ_{TSL} – концентрация пыли (кг/м³). Пересчет распределения плотности $\rho(x,y,z,t)$ в поле давлений $P(x,y,z,t)$ производился по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$P = \left(\frac{\rho_a}{M_a} + \frac{\rho_p}{M_p} \right) RT, \quad (10)$$

где T – температура парогазовой смеси; ρ_a – плотность воздуха; ρ_p – плотность пара; $M_a=0,029$ кг/моль – молярная масса воздуха; $M_p=0,018$ кг/моль – молярная масса пара; $R=8,3144$

Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Теплообмен

Расчет изменения температуры в различных точках пространства O_0 башни производился согласно уравнению:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \Delta T, \quad (11)$$

где t – время; x, y, z – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); v_x, v_y, v_z – проекции скорости паровоздушной смеси на координатные оси X, Y, Z соответственно; T – температура; ρ – плотность; λ – теплопроводность; c – удельная теплоемкость паровоздушной смеси.

Конденсация пара

Разработанная модель так же учитывает конденсацию пара. Этот процесс происходит, когда температура смеси при данном давлении становится ниже температуры насыщенного пара при том же давлении (плотности). При этом выделяется теплота, которая увеличивает температуру смеси (компенсирует разность температур) согласно формуле:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \begin{cases} K_{pw}(T - F_{tp}(\rho_p)), & \text{при } T < F_{tp}(\rho_p) \\ 0, & \text{при } T \geq F_{tp}(\rho_p) \end{cases}, \quad (12)$$

где dT/dt – скорость увеличения температуры в результате конденсации; $F_{tp}()$ – известная (таблично заданная) функция температуры при данной плотности насыщенного пара; $K_{pw}=0,4$ – коэффициент, характеризующий скорость (инерционность) процесса конденсации.

Выделившееся тепло связано с уменьшением плотности пара (ρ_p) и увеличением плотности капель воды (ρ_w) на ту же величину (или с той же скоростью) по формуле:

$$-\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{\partial \rho_p}{\partial t} = \frac{c \rho}{C_p} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (13)$$

где $d\rho_w/dt$ – скорость увеличения плотности капель воды; $d\rho_p/dt$ – скорость уменьшения плотности пара в результате конденсации; c – удельная теплоемкость паровоздушной смеси; ρ – плотность смеси; $C_p=2260$ кДж/кг – удельная теплота парообразования воды.

В основе метода моделирования лежит конечно-разностный метод, прямоугольная сетка имеет шаг дискретизации 0,5м (возможно - 0,25м). Шаг по времени – 0,001 с.

Компьютерное моделирование

Был разработан программный комплекс для проведения расчетов на основе описанной выше математической модели. Разработанное программное обеспечение интегрируется с системами трехмерного проектирования, например, SolidWorks, ProEngineer и т.п.

Проблема, которая возникла при производстве кокса в данной башне, – слишком большая концентрация выбросов. Один слой установленных пыле поглощающих панелей оказался недостаточно эффективен для обеспечения ужесточившихся нормативных требований. Возник вопрос: сколько слоев пыле поглощающих панелей будет достаточно.

Поэтому исходной целью моделирования в данной работе было прогнозирование концентрации выбросов пыли и газа при установке внутри башни двух и трех слоев пылепоглощающих панелей.

На первом этапе было проведено моделирование процесса тушения кокса с одним слоем панелей. По имеющимся данным натурных измерений были скорректированы эмпирические коэффициенты для обеспечения адекватности компьютерной модели.

Затем был смоделирован процесс тушения с двумя слоями панелей (рис.2). Концентрация пыли оказалась близка к предельно допустимой. Кроме того, результаты моделирования показали, что установка двух слоев панелей создает слишком большое сопротивление для прохода парогазовой смеси вверх по каналу внутри башни (уменьшается «тяга»). Значительное количество парогазовой смеси уходит через ворота в нижней части башни.

Поэтому было решено увеличить высоту башни на 4 метра и установить третий слой пылепоглощающих панелей. Результаты моделирования увеличенной башни с тремя слоями панелей показали (рис.3), что технологический процесс будет протекать в штатном режиме (парогазовая смесь движется вверх) и концентрация выбросов будет удовлетворять требованиям с большим запасом.

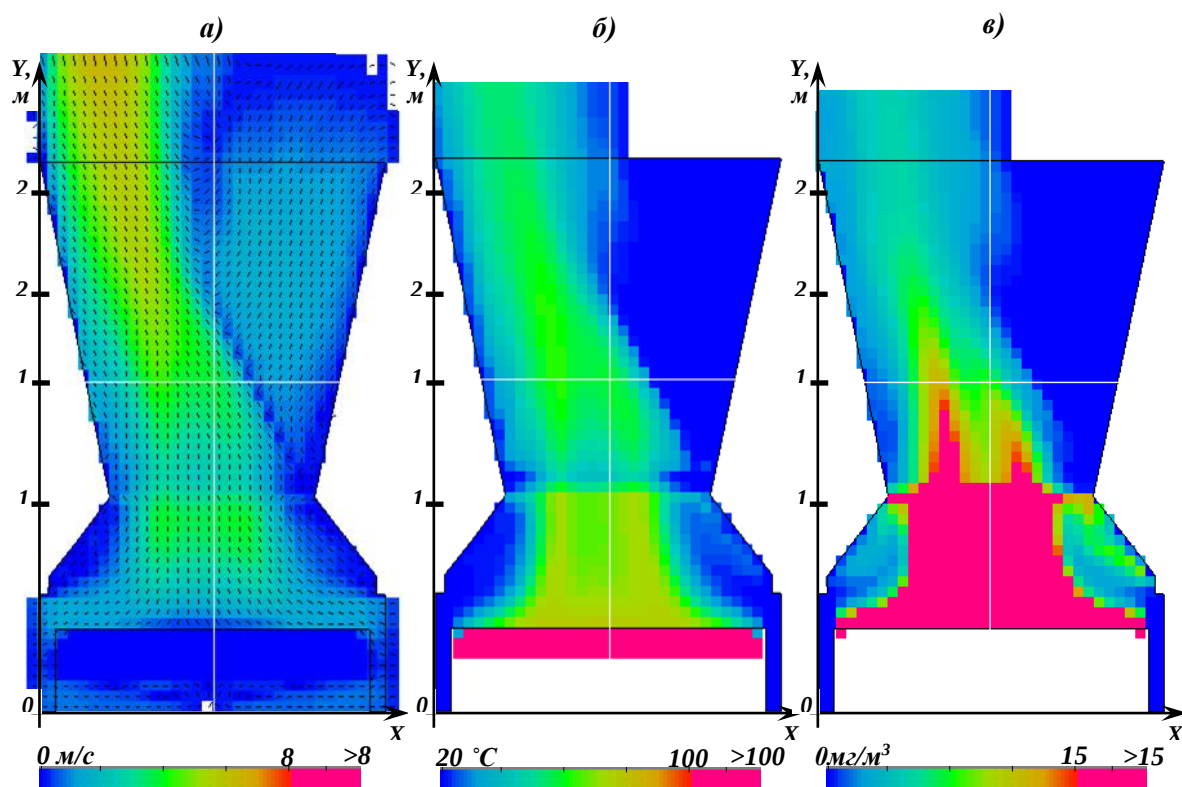


Рисунок 2 – Поля скоростей (а), температур (б) и концентраций выбросов (в) в центральном сечении тушильной башни с двумя слоями пыле поглощающих панелей в момент времени 135 секунд после начала процесса тушения кокса.

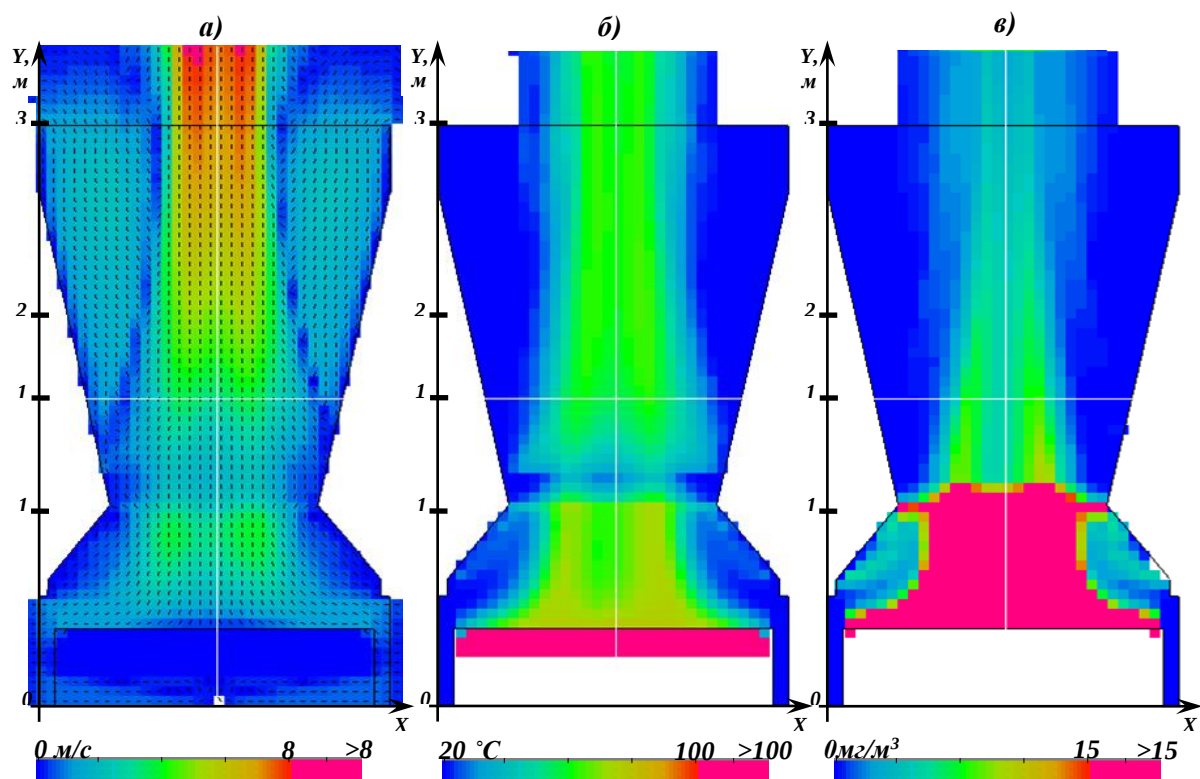


Рисунок 3 – Поля скоростей (а), температур (б) и концентраций выбросов (в) в центральном сечении тушильной башни высотой 30 метров с тремя слоями пыле поглощающих панелей в момент времени 135 секунд после начала процесса тушения кокса.

Заключение

На основе разработанной физической и математической моделей процесса тушения кокса в тушильной башне был создан программный комплекс для проведения расчетов. Смоделированы процессы тушения кокса с несколькими вариантами конструкции башни. Результаты проведенного моделирования позволили спрогнозировать концентрацию выбросов при различном количестве пылепоглощающих панелей и высоте башни. Предложено обоснованное инженерно-техническое решение по оптимизации концентрации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Показана перспективность и целесообразность применения методов компьютерного моделирования при прогнозировании и оценке состояния воздушной среды в результате выбросов от стационарных источников.

Список литературы

Состояние природной среды Беларуси: экол. бюл. 2015 г. – Минск, 2016. – 323 с.
Самсонов В.Т. Проветривание промышленных площадок: Аэродинамические расчёты при проектировании вентиляционных выбросов: Монография. – М.: Инфра-М, 2017. – 171 с.

References

Sostojanie prirodnoy sredy Belarusi: ecol. bul. 2015 g. – Minsk, 2016. – 323 s.
Samsonov V.T. Provetrivanie promyshlennykh ploshchadok: Aerodynamicheskie raschety pry proectirovanii ventilatsionnykh vybrosov: Monografia. – M.: Infra-M, 2017. – 171 s.

Сведения об авторах

Мельниченко Д.А., к.т.н., доцент, заместитель директора по учебной и научной работе Республиканского центра государственной экологической экспертизы и повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды РБ
Яцкевич Ю.В., к.т.н., ведущий инженер-программист НИЛ ЭМС локальных группировок РЭС Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Яцкевич А.Ю., старший преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шупейко И.Г., к.пс.н., доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Melnichenka D.A., PhD, associate professor, deputy director for academic and scientific work at Republican centre for state ecological expertise and advanced training of senior officials and specialists of Ministry of natural resources and environmental protection of the Republic of Belarus

Yatskevich Y.V., PhD, software engineer at EMC R&D Laboratory of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Yatskevich A.Y., senior faculty of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Shupeyko I.G., PhD, associate professor, associate professor of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-501-59-02;
e-mail: iskatel37@mail.ru;
Яцкевич Юрий Вячеславович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-501-59-02;
e-mail: iskatel37@mail.ru;
Yatskevich Yury

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ВЫБРОСОВ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.А. МЕЛЬНИЧЕНКО*, Ю.В. ЯЦКЕВИЧ, А.Ю. ЯЦКЕВИЧ, И.Г. ШУПЕЙКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

**Республиканский центр государственной экологической экспертизы и повышения квалификации
Минприроды, пер. Менделеева 1-й, д.50, корп. 4, Минск, 220037, Беларусь*

Поступила в редакцию

Аннотация. Разработана физическая модель процесса тушения кокса в тушильной башне. Создан программный комплекс для моделирования данного технологического процесса. Рассчитана динамика парогазово-душных потоков и концентрации выбросов в пространстве конкретной коксотушильной башни. Предложен комплекс инженерно-технических решений по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Ключевые слова: оценка выбросов, компьютерное моделирование, программный комплекс.

Abstract. The physical model of coke quenching in the quenching house has been worked out. The software complex for computer modeling of this technological process has been created. The gas-vapor mixture floats dynamics and emissions concentration in the quenching house has been calculated. The set of engineering solutions for air pollution reduction has been suggested.

Keywords: estimation of emissions, computer modeling, software complex.

Введение

В современных условиях развития общества решающее влияние на окружающую среду оказывает производственная деятельность, основным компонентом которой являются техногенные объекты. В то же время эти объекты являются источниками разнообразных угроз: производственных травм, профессиональных заболеваний, а также загрязнения всех основных компонентов окружающей среды (атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, земельных ресурсов, растительного и животного мира). В связи с этим актуализируется задача уменьшения выбросов техногенных объектов.

Задача оценки выбросов является сложной по причине многообразия и сложности источников поступления загрязняющих веществ в атмосферу, а также протекающих в ней физических и химических процессов.

Снижению выбросов загрязняющих веществ в воздушный бассейн и улучшению качества атмосферного воздуха в ближайшей перспективе будут содействовать следующие меры:

внедрение энерго-, ресурсосберегающих технологий в промышленности и энергетике;

организация повсеместного контроля выбросов;

установление стандартов и удельных технических нормативов выбросов;

внедрение прогрессивных методов очистки отходящих газов и оснащение источников выбросов эффективным пылегазоочистным оборудованием и т.п. [1].

Эти инженерные решения зачастую являются дорогостоящими, требуют больших затрат времени на разработку, проектирование и внедрение, но, к сожалению, не всегда достигают нужного эффекта. Применение современных средств вычислительной техники с использованием прогрессивных алгоритмов позволит значительно сократить затраты, повысить качество выполняемых расчетов и достоверность полученных результатов.

Нами разработан программный комплекс по оценке воздействия на окружающую среду вредных веществ, образующихся в процессе коксования угля в коксотушильной башне. Данный процесс выбран как один из наиболее типичных источников загрязнения атмосферного воздуха, и в тоже время структура выбросов при этом очень сложная и включает продукты горения, пар и другие неоднородные компоненты.

Физическая модель процесса тушения кокса в тушильной башне

В трехмерном пространстве башни (рис.1, область O_0) перемещается смесь из воздуха, пара, мелких капель воды (туман) и твердых частиц (выбросы). В данной модели предполагается, что капли и частицы так малы, что практически не обладают инерционностью и перемещаются вместе с паровоздушной смесью (имеют такую же скорость). Количество каждого компонента смеси в каждой точке модельного пространства в некоторый момент времени описывается их плотностями (кг/м^3): ρ_a – плотность воздуха, ρ_p – плотность пара, ρ_w – концентрация мелких капель воды, ρ_{TzL} – концентрация пыли. Скорость смеси в каждой точке модельного пространства в некоторый момент времени описывается вектором (v_x, v_y, v_z) .

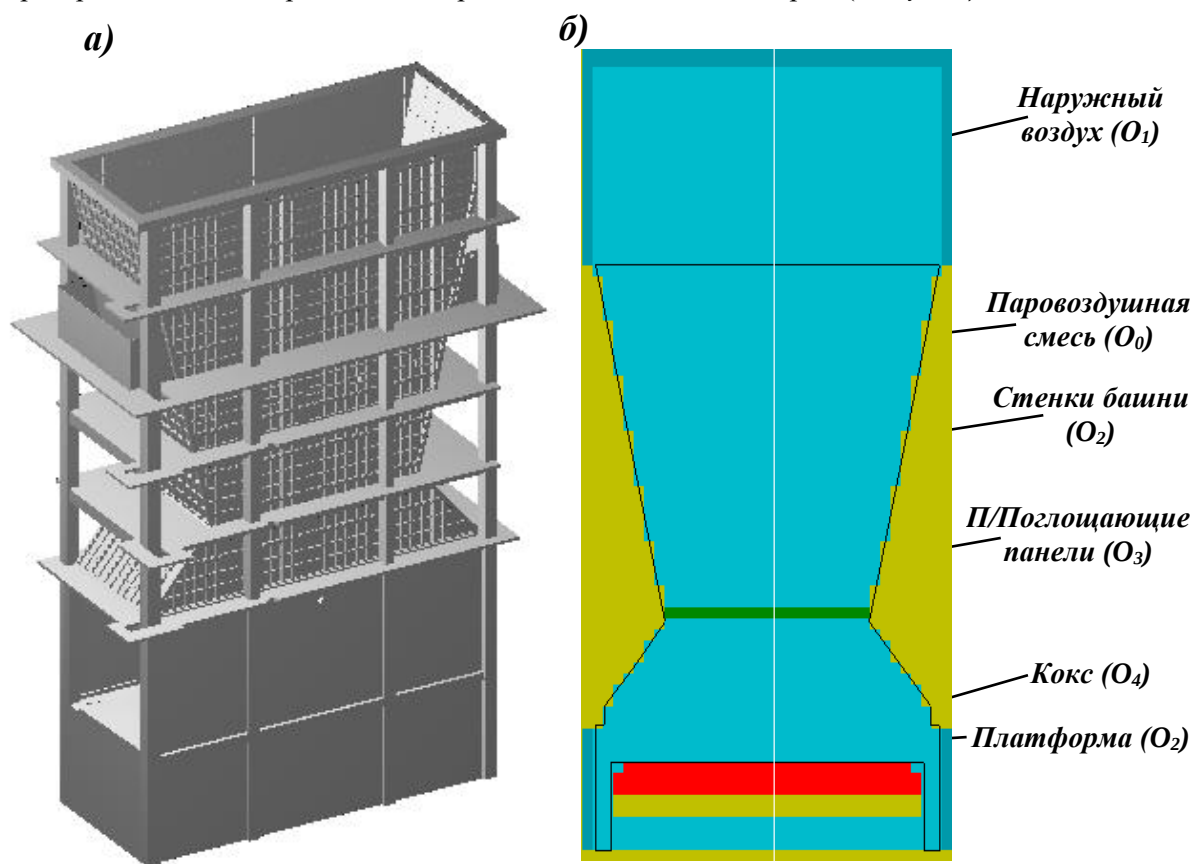


Рисунок 1 – Общий вид тушильной башни (а) и вид модельного пространства (б) в центральном сечении по типам областей (границ).

Источником пара, мелких капель воды и твердых частиц является поверхность кокса в нижней части башни (O_4). Интенсивность выброса ($\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$) для всех трех компонентов изменяется в течение всего цикла тушения и описывается тремя таблично заданными функциями ($I_p(t)$, $I_w(t)$, $I_{TzL}(t)$). Эти функции подбирались в соответствии с режимом орошения и согласовывались с результатами натурных измерений по скоростям, температурам потоков и общему количеству выбросов. Выделяющийся пар, капли воды и пыль имеют температуру 100°C (373K). Скорость смеси на поверхности кокса принималась равной нулю: $v_{x4} = 0$, $v_{y4} = 0$, $v_{z4} = 0$.

В нижней части башни имеются ворота (O_1), через которые внутреннее пространство башни соединяется с внешней средой. То есть, через ворота наружный воздух может поступать внутрь башни, а паровоздушная смесь может выходить наружу. С точки зрения граничных условий в области O_1 переменные состояния среды имеют постоянное значение: $T_1=293\text{K}$, $\rho_{a1}=1,19 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{p1}=0 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{w1}=0 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{TzL1}=0 \text{ кг/м}^3$, а скорости равны скоростям граничных элементов

области O_0 ($v_{x1} = v_{x0}$, $v_{y1} = v_{y0}$, $v_{z1} = v_{z0}$). Такие же граничные условия установлены в верхней части модели над башней. То есть, паровоздушная смесь может выходить из башни в верхней ее части, а наружный воздух может поступать внутрь башни сверху.

В стенках башни (O_2) никаких процессов не происходит. Но скорость паровоздушной смеси на твердой поверхности равна нулю (условие прилипания: $v_{x2} = 0$, $v_{y2} = 0$, $v_{z2} = 0$). Кроме того поверхность стенок башни, имеющая постоянную температуру $T_2=20^\circ\text{C}=293\text{K}$, забирает некоторое количество тепла из области парогазовой смеси согласно формуле:

$$P_2 = \alpha(T - T_2)\Delta S, \quad (1)$$

где P_2 – мощность теплоотдачи; $\alpha=60 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$ – коэффициент теплоотдачи; T – температура паровоздушной смеси на границе с поверхностью стенки; T_2 – температура стенки, ΔS – площадь элемента поверхности.

Область пространства O_3 представляет собой пылепоглощающие панели. С точки зрения модели пространство в этой области обладает следующими свойствами:

- 1) область заполнена паровоздушной смесью и не имеет границ (граничных условий) с областью O_0 ;
- 2) скорость паровоздушной смеси внутри области в направлениях X и Z всегда равна нулю ($v_x = 0 \text{ м/с}$, $v_z = 0 \text{ м/с}$);
- 3) в вертикальном направлении Y на паровоздушную смесь действует сила сопротивления:

$$F = -K_a v_y \Delta x \Delta z, \quad (2)$$

где F – сила сопротивления набегающему потоку; K_a – коэффициент аэродинамического сопротивления одного квадратного метра площади панелей; $\Delta x \Delta z$ – площадь панелей;

- 4) концентрация пыли уменьшается по формуле:

$$\frac{\partial \rho_{TZL}}{\partial t} = -K_{TZL} \rho_{TZL}, \quad (3)$$

где $d\rho_{TZL}/dt$ – скорость уменьшения концентрации пыли; K_{TZL} – коэффициент пылепоглощения;

- 5) количество воды (мелких капель) так же уменьшается:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -K_w \rho_w, \quad (4)$$

где $d\rho_w/dt$ – скорость уменьшения концентрации воды; K_w – коэффициент поглощения воды;

- 6) панели забирают некоторое количество тепла из области паровоздушной смеси:

$$P_3 = \alpha(T - T_3)\Delta S, \quad (5)$$

где P_3 – мощность теплоотдачи; $\alpha=60 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$ – коэффициент теплоотдачи; T – температура паровоздушной смеси протекающей через панели; T_3 – температура панели, ΔS – площадь поверхности соприкосновения элементов конструкции панели.

В исходном состоянии модели (начальные условия) все пространство башни O_0 заполнено неподвижным воздухом с характеристиками окружающей среды: $T(x,y,z,0)=293\text{K}$, $\rho_a(x,y,z,0)=1,19 \text{ кг/м}^3$, $\rho_p(x,y,z,0)=0 \text{ кг/м}^3$, $\rho_w(x,y,z,0)=0 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{TZL}(x,y,z,0)=0 \text{ кг/м}^3$, $v_x=0 \text{ м/с}$, $v_y=0 \text{ м/с}$, $v_z=0 \text{ м/с}$.

Математическая модель физических процессов при тушении кокса в пространстве тушильной башни

Процесс перемещения паровоздушной смеси

Расчет распределения скорости $v(x,y,z,t)$ по трехмерному пространству O_0 паровоздушной смеси производился на основе уравнения Навье-Стокса [2]:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -(\bar{v} \nabla) \bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\eta}{\rho} \Delta \bar{v} + \bar{g}, \quad (6)$$

где t - время; $\bar{v}$ - вектор скорости паровоздушной смеси; P - давление паровоздушной смеси; $\bar{g} = (0, -9.8, 0)$ - ускорение свободного падения (ось Y направлена вертикально); η - динамическая вязкость паровоздушной смеси; ρ - плотность паровоздушной смеси, которая является суммой плотностей ее компонентов:

$$\rho = \rho_a + \rho_p + \rho_w + \rho_{TSL}, \quad (7)$$

где ρ_a - плотность воздуха, ρ_p - плотность пара, ρ_w - концентрация мелких капель воды (кг/м^3), ρ_{TSL} - концентрация пыли (кг/м^3).

Расчет распределения плотностей воздуха и пара ($\rho_a(x, y, z, t)$, $\rho_p(x, y, z, t)$) на основании трехмерного поля скоростей $v(x, y, z, t)$ производился по уравнениям неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla(\rho_a \bar{v}) = 0, \quad \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla(\rho_p \bar{v}) = 0. \quad (8)$$

Расчет распределения плотностей остальных составляющих смеси ($\rho_w(x, y, z, t)$, $\rho_{TSL}(x, y, z, t)$) на основании трехмерного поля скоростей $v(x, y, z, t)$ производился по аналогичным уравнениям дополненным уравнением диффузии:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \nabla(\rho_w \bar{v}) + D_w \Delta \rho_w, \quad \frac{\partial \rho_{TSL}}{\partial t} = \nabla(\rho_{TSL} \bar{v}) + D_{TSL} \Delta \rho_{TSL}. \quad (9)$$

где D_w - коэффициент диффузии мелких капель воды (кг/м^3), ρ_{TSL} - концентрация пыли (кг/м^3). Пересчет распределения плотности $\rho(x, y, z, t)$ в поле давлений $P(x, y, z, t)$ производился по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$P = \left(\frac{\rho_a}{M_a} + \frac{\rho_p}{M_p} \right) RT, \quad (10)$$

где T - температура парогазовой смеси; ρ_a - плотность воздуха; ρ_p - плотность пара; $M_a = 0,029$ кг/моль - молярная масса воздуха; $M_p = 0,018$ кг/моль - молярная масса пара; $R = 8,3144$ $\text{Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ - универсальная газовая постоянная.

Теплообмен

Расчет изменения температуры в различных точках пространства O_0 башни производился согласно уравнению:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \Delta T, \quad (11)$$

где t - время; x, y, z - декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); v_x, v_y, v_z - проекции скорости паровоздушной смеси на координатные оси X, Y, Z соответственно; T - температура; ρ - плотность; λ - теплопроводность; c - удельная теплоемкость паровоздушной смеси.

Конденсация пара

Разработанная модель так же учитывает конденсацию пара. Этот процесс происходит, когда температура смеси при данном давлении становится ниже температуры насыщенного пара при том же давлении (плотности). При этом выделяется теплота, которая увеличивает температуру смеси (компенсирует разность температур) согласно формуле:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \begin{cases} K_{pw}(T - F_{tp}(\rho_p)), & \text{при } T < F_{tp}(\rho_p) \\ 0, & \text{при } T \geq F_{tp}(\rho_p) \end{cases}, \quad (12)$$

где dT/dt - скорость увеличения температуры в результате конденсации; $F_{tp}()$ - известная (таблично заданная) функция температуры при данной плотности насыщенного пара; $K_{pw} = 0,4$ - коэффициент, характеризующий скорость (инерционность) процесса конденсации.

Выделившееся тепло связано с уменьшением плотности пара (ρ_p) и увеличением плотности капель воды (ρ_w) на ту же величину (или с той же скоростью) по формуле:

$$-\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{\partial \rho_p}{\partial t} = \frac{c\rho}{C_p} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (13)$$

где $d\rho_w/dt$ – скорость увеличения плотности капель воды; $d\rho_p/dt$ – скорость уменьшения плотности пара в результате конденсации; c – удельная теплоемкость паровоздушной смеси; ρ – плотность смеси; $C_p = 2260$ кДж/кг – удельная теплота парообразования воды.

В основе метода моделирования лежит конечно-разностный метод, прямоугольная сетка имеет шаг дискретизации 0,5м (возможно - 0,25м). Шаг по времени – 0,001 с.

Компьютерное моделирование

Был разработан программный комплекс для проведения расчетов на основе описанной выше математической модели. Разработанное программное обеспечение интегрируется с системами трехмерного проектирования, например SolidWorks, ProEngineer и т.п.

Проблема, которая возникла при производстве кокса в данной башне, – слишком большая концентрация выбросов. Один слой установленных пыле поглощающих панелей оказался не достаточно эффективен для обеспечения ужесточившихся нормативных требований. Возник вопрос: сколько слоев пыле поглощающих панелей будет достаточно.

Поэтому исходной целью моделирования в данной работе было прогнозирование концентрации выбросов пыли и газа при установке внутри башни двух и трех слоев пылепоглощающих панелей.

На первом этапе было проведено моделирование процесса тушения кокса с одним слоем панелей. По имеющимся данным натурных измерений были скорректированы эмпирические коэффициенты для обеспечения адекватности компьютерной модели.

Затем был смоделирован процесс тушения с двумя слоями панелей (рис.2). Концентрация пыли оказалась близка к предельно допустимой. Кроме того, результаты моделирования показали, что установка двух слоев панелей создает слишком большое сопротивление для прохода парогазовой смеси вверх по каналу внутри башни (уменьшается «тяги»). Значительное количество парогазовой смеси уходит через ворота в нижней части башни.

Поэтому было решено увеличить высоту башни на 4 метра и установить третий слой пылепоглощающих панелей. Результаты моделирования увеличенной башни с тремя слоями панелей показали (рис.3), что технологический процесс будет протекать в штатном режиме (парогазовая смесь движется вверх) и концентрация выбросов будет удовлетворять требованиям с большим запасом.

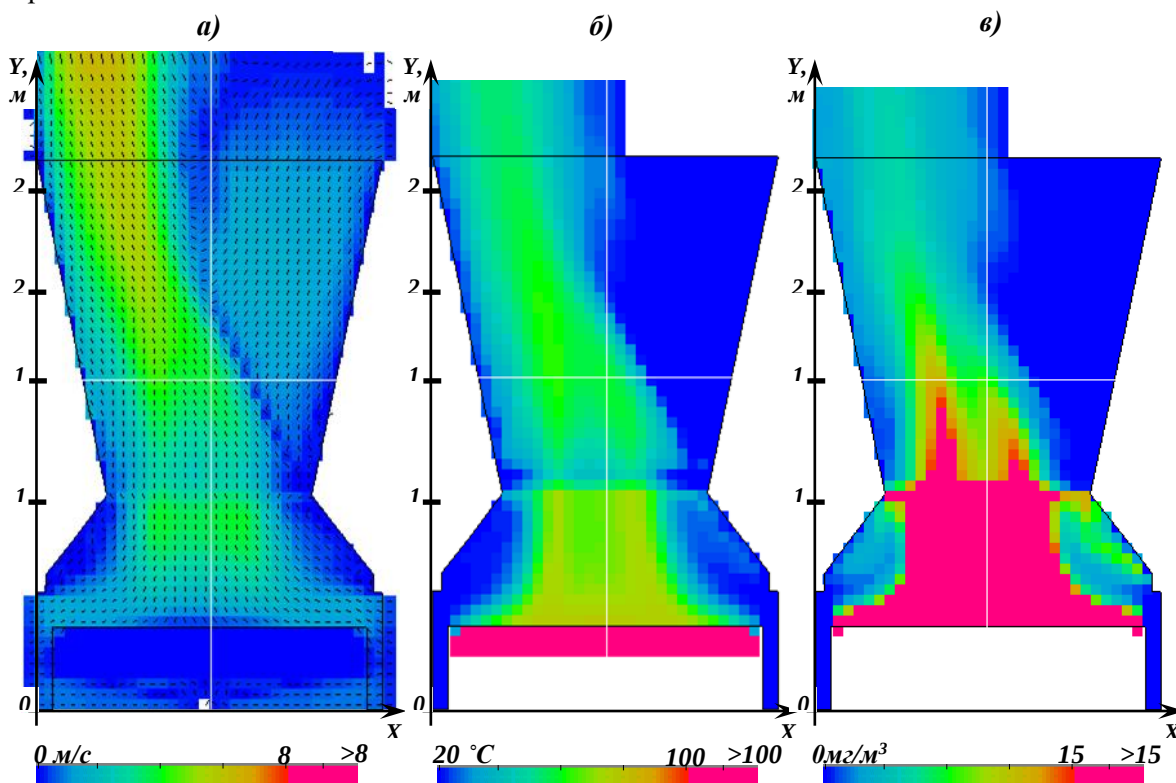


Рисунок 2 – Поля скоростей (а), температур (б) и концентраций выбросов (в) в центральном сечении тушильной башни с двумя слоями пыле поглощающих панелей в момент времени 135 секунд после начала процесса тушения кокса.

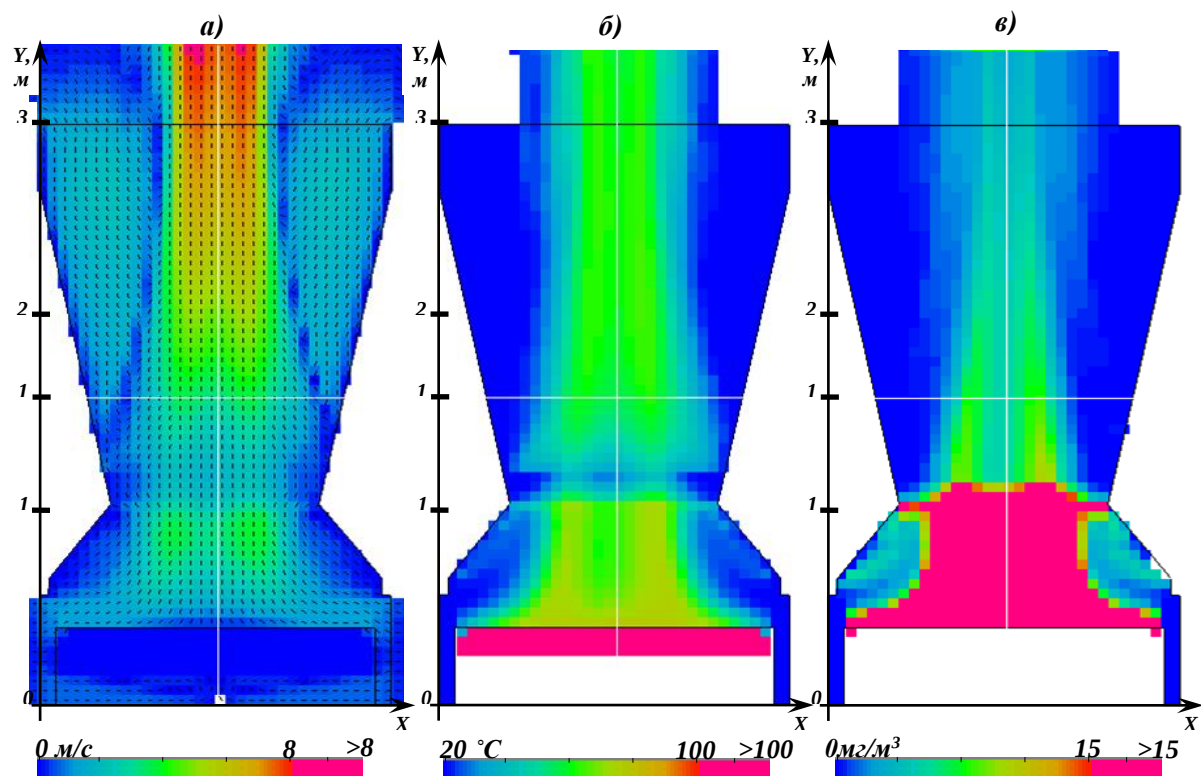


Рисунок 3 – Поля скоростей (а), температур (б) и концентраций выбросов (в) в центральном сечении тушильной башни высотой 30 метров с тремя слоями пыле поглощающих панелей в момент времени 135 секунд после начала процесса тушения кокса.

Заключение

На основе разработанной физической и математической моделей процесса тушения кокса в тушильной башне был создан программный комплекс для проведения расчетов. Смоделированы процессы тушения кокса с несколькими вариантами конструкции башни. Результаты проведенного моделирования позволили спрогнозировать концентрацию выбросов при различном количестве пылепоглощающих панелей и высоте башни. Предложено обоснованное инженерно-техническое решение по оптимизации концентрации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Показана перспективность и целесообразность применения методов компьютерного моделирования при прогнозировании и оценке состояния воздушной среды в результате выбросов от стационарных источников.

Список литературы

Состояние природной среды Беларуси: экол. бюл. 2015 г. – Минск, 2016. – 323 с.
Самсонов В.Т. Проветривание промышленных площадок: Аэродинамические расчёты при проектировании вентиляционных выбросов: Монография. – М.: Инфра-М, 2017. – 171 с.

References

Sostojanie prirodnoy sredy Belarusi: ecol. bul. 2015 g. – Minsk, 2016. – 323 s.
Samsonov V.T. Provetrivanie promyshlennykh ploshchadok: Aerodynamicheskie raschety pry proectirovani ventilyatsionnykh vybrosov: Monografia. – M.: Infra-M, 2017. – 171 s.

Сведения об авторах

Мельниченко Д.А., к.т.н., доцент, заместитель директора по учебной и научной работе Республиканского центра государственной экологической экспертизы и повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды РБ
Яцкевич Ю.В., к.т.н., ведущий инженер-программист НИЛ ЭМС локальных группировок РЭС Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники
Яцкевич А.Ю., старший преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
Шупейко И.Г., к.пс.н., доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-501-59-02;
e-mail: iskatel37@mail.ru;
Яцкевич Юрий Вячеславович

Information about the authors

Melnichenka D.A., PhD, associate professor, deputy director for academic and scientific work at Republican centre for state ecological expertise and advanced training of senior officials and specialists of Ministry of natural resources and environmental protection of the Republic of Belarus

Yatskevich Y.V., PhD, software engineer at EMC R&D Laboratory of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Yatskevich A.Y., senior faculty of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Shupeyko I.G., PhD, associate professor, associate professor of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-501-59-02;
e-mail: iskatel37@mail.ru;
Yatskevich Yury

РЕГРЕССИВНЫЙ АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО ВЫРАЩИВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ

В.В. РАБЦЕВИЧ, В.Ю. ЦВЕТКОВ, ЛОВЕЦКИЙ М.Ю.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию

Аннотация. Предложен метод сегментации АСМ-изображений на основе регрессивного волнового выращивания областей путем присоединения к областям новых элементов с учетом их уровня квантования. Проведено сравнение данного метода с наиболее распространенными методами сегментации.

Ключевые слова: сегментация изображений, выращивание областей, водораздел.

Abstract. Proposed algorithm segmentation of the atomic force microscopy images based on the regressive wave methods of region growing is proposed by attaching new elements to the regions taking into account their quantization level. This method is compared with the most common in the field of atomic force microscopy.

Keywords: image segmentation, region growing, watershed.

Введение

Технологии анализа структуры материалов на основе атомной силовой микроскопии (АСМ) в настоящее время интенсивно развиваются с приложением к различным областям. В материаловедении атомный силовой микроскоп позволяет получить АСМ-изображение сканируемого участка поверхности материала, яркость каждого пикселя которого несет информацию о физических свойствах соответствующего элемента участка. Во многих случаях это информация о расстоянии между этим элементом и щупом закрепленном на кантилере (при контактном методе исследования). Растр (двумерная матрица) значений пикселей в таких случаях представляет информацию о топологии соответствующего участка поверхности. Одной из основных задач анализа АСМ-изображений заключается в локализации их структурных элементов. В цифровой обработке изображений данная задача решается с помощью сегментации. В настоящее время все методы сегментации можно разделить на корреляционные, пороговые, основанные на областях, основанные на границах, текстурные, основанные на анализе цвета [14]. Корреляционные методы применяются при известных эталонах объектов. Они являются эффективными в системах прикладного телевидения и относятся в основном к области распознавания изображений. Пороговые методы эффективны для обработки АСМ-изображений, но требуют сложных алгоритмов предобработки, поскольку используют стабильные различия в яркостях отдельных областей и сильно зависят от выбора порога. Методы выделения границ эффективны, если границы достаточно четкие и стабильные, что не подходит для АСМ-изображений. Для описания свойств изображения применяются текстурные методы. Методы, основанные на анализе цвета, по своей сути являются комбинированными. Из всех категорий сегментации для решения прикладной задачи по разделению на области АСМ-изображений наиболее подходят методы на основе областей, которые можно разделить на четыре группы: водораздела [1 – 4], поровой обработки [5], разделения и слияния областей [6, 7, 8], выращивания областей [9 – 12]. Для сегментации АСМ-изображений наиболее эффективны и наиболее часто применяются методы водораздела. В их основе лежит отношение к яркости изображения как к

топографической карте, что позволяет строить линии раздела областей на самых ярких участках. Основные недостатки методов водораздела заключаются в избыточной сегментации, необходимости предварительной обработки (построение градиента либо матрицы расстояний, в зависимости от реализации) [14].

Для устранения данных недостатков можно задавать исходные точки роста. Это может быть сделано с помощью алгоритма маркерного водораздела.

Целью работы является разработка метода сегментации АСМ-изображений, учитывающего их физические особенности и вносящего минимум погрешностей при анализе.

Сравнение существующих методов сегментации применяемых в атомно-силовой микроскопии

В настоящее время в атомно-силовой микроскопии наибольшее распространение получили два типа методов сегментации: пороговые и с использованием водораздела. Однако для минимизации ошибки чаще используют последние.

Среди методов водораздела используются методы математической морфологии водоразделов с применением градиента, такие как метод Хариса, Винсента, Бачера, Пана, которые строятся на схожих критериях.

Классический алгоритм сегментации водоразделом состоит из следующих шагов.

Вычисление градиента в каждом пикселе.

Определение локальных минимумов.

Обход пикселей, применение приоритетной очереди (приоритет выше - чем выше интенсивность).

Полученное изображение часто получается чрезмерно сегментированным на большое число маленьких областей (бассейнов), большинство из которых не являются значимыми при решении проблемы. Устранить пересегментацию позволяет алгоритм маркерного водораздела, который включает процедуру предобработки и выбора маркеров, удовлетворяющих заданным условиям.

Еще одним распространенным алгоритмом является алгоритм выращивания областей, состоящий из следующих основных шагов.

1. На первоначальном этапе на изображении выбираются точки роста принадлежащие выделяемым областям (например точки с максимальным уровнем яркости).

2. Вокруг выбранных точек начинается рост областей, то есть присоединение соседних с использованием определенного критерия близости (например, пороговая величина).

3. Остановка роста областей по критерию (например, превышение порога отклонения яркости новых точек от заданного уровня яркости центра кристаллизации).

Недостатками данного алгоритма являются необходимость определения центров кристаллизации или задания некоторого правила для их обнаружения; выращивание областей в отдельном процессе без учета ситуации на других участках сегментируемого изображения, что может приводить к ошибкам; необходимость правила окончания выращивания областей.

Описание алгоритма регрессивного волнового выращивания областей

Предлагается алгоритм сегментации АСМ-изображений на основе регрессивного волнового выращивания областей путем присоединения к областям новых элементов с учетом их уровня квантования. Отличие предложенного алгоритма от классического алгоритма выращивания областей заключается в квазипараллельном увеличении размеров выделенных областей, что позволяет повысить точность сегментации изображений с плавными перепадами яркости. Предложенный алгоритм отличается от алгоритма волнового выращивания областей [13] выбором начальных точек роста областей по уровням квантования, начиная с наибольшего, и увеличением областей за счет постепенного присоединения к ним соседних элементов, принадлежащих нижнему смежному уровню квантования, что позволяет повысить точность сегментации АСМ-изображений при сопоставлении высоты точки сканирования со значением соответствующего пикселя.

Исходными данными для алгоритма являются матрица $M_Z = \|m_Z(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ зондирования, в которой значение каждого B -разрядного элемента $m_Z(y, x) \in [0, 2^B - 1]$ определяется высотой соответствующей точки поверхности, и пороги начала Δ_H и окончания Δ_N регистрации среза вертикального профиля поверхности, которые задают условия отделения локальных склонов поверхности от вершин и подложки, где Y, X – размеры матрицы сканирования по вертикали и горизонтали. Алгоритм состоит из следующих шагов.

1) Инициализация матрицы сегментации. Формируется матрица $M_S = \|m_S(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ сегментации, элементы которой определяются с помощью выражения $m_S(y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}$. Счетчику C_S сегментов присваивается нулевое значение: $C_S \leftarrow 0$.

2) Инициализация счетчика циклов прогрессивной сегментации. Счетчику C_Q циклов прогрессивной сегментации присваивается значение верхнего уровня квантования: $C_Q \leftarrow 2^B - 1$

3) Начало цикла прогрессивной сегментации. Формирование матрицы значимости для C_Q -го уровня квантования. Формируется матрица $M_Q(C_Q) = \|m_Q(C_Q, y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ значимости для C_Q -го уровня квантования, элементы которой определяются с помощью выражения

$$\begin{cases} (m_S(C_S, y, x) = 0) \wedge (m_Z(y, x) = C_Q) \Rightarrow (m_Q(C_Q, y, x) \leftarrow 1), \\ (m_S(C_S, y, x) \neq 0) \wedge (m_Z(y, x) \neq C_Q) \Rightarrow (m_Q(C_Q, y, x) \leftarrow 0) \end{cases}$$

при $y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}$.

4) Проверка матрицы значимости C_Q -го уровня квантования на нуль. Вычисляется сумма всех элементов матрицы $M_Q(C_Q)$ значимости для C_Q -го уровня квантования с помощью выражения: $S_Q = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} m_Q(C_Q, y, x)$.

Если $S_Q = 0$, то осуществляется переход на окончание цикла прогрессивной сегментации (шаг 6).

5) Элементы матрицы $M_Q(C_Q)$, удовлетворяющие условию

$$(m_Q(C_Q, y, x) = 1) \wedge (m_S(y, x) = 0) \quad (1)$$

сегментируются с помощью алгоритма выращивания областей [13]. В результате формируется матрица $M_S(C_Q) = \|m_S(C_Q, C_S, y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ новых областей C_Q -го уровня квантования, номера элементов которой $m_S(C_Q, y, x) \in [1, C_S(C_Q)]$ указывают на изолированные совокупности единичных элементов матрицы $M_Q(C_Q)$, удовлетворяющих условию (1), где $C_S(C_Q)$ – число сегментов, выделенных в матрице $M_Q(C_Q)$.

6) Начало цикла волновой сегментации. Формируется матрица $M_T(C_Q, C_S) = \|m_T(C_Q, C_S, y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ наращивания существующих областей C_Q -го уровня квантования и C_S -номера изолированной области в матрице сегментации, элементы которой определяются с помощью выражения $m_T(C_Q, C_S, y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}, x = \overline{0, X-1}$.

7) Волновое наращивание областей. Элементы матрицы $M_T(C_Q, C_s)$ переопределяются с помощью выражения

$$(m_s(y, x) \neq 0) \wedge (m_z(C_{Q-1}, y + j, x + i) = C_{Q-1}) \wedge \\ (m_T(C_Q, C_s, y + j, x + i) = 0) \Rightarrow \\ \Rightarrow (m_T(C_Q, C_s, y + j, x + i) \leftarrow m_s(y, x))$$

при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$, $j = \overline{-1, 1}$, $i = \overline{-1, 1}$.

8) Обновление матрицы сегментации. В матрицу сегментации M_S добавляются новые значимые элементы с помощью выражения

$$m_s(y, x) \leftarrow m_s(y, x) + m_T(C_Q, C_s, y, x)$$

при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$.

9) Проверка условия выхода из цикла волнового наращивания областей. Определяется число S_T значимых элементов матрицы $M_T(C_Q, C_w)$ с помощью выражения

$$S_T = \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} m_T(C_Q, C_w, y, x)$$

при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$.

Если $S_T = 0$ (новых присоединяемых элементов нет) осуществляется выход из цикла волновой сегментации.

10) Окончание цикла прогрессивной сегментации. Значение счетчика C_Q циклов прогрессивной сегментации уменьшается на единицу: $C_Q \leftarrow C_Q - 1$. Затем счетчик C_Q циклов проверяется на отрицательное значение. Если $C_Q \geq 0$, то осуществляется переход в начало цикла прогрессивной сегментации (шаг 3 алгоритма). Если $C_Q < 0$, то осуществляется выход из цикла и завершение алгоритма.

В результате выполнения данного алгоритма формируется матрица M_S сегментации, номера элементов которой $m_s(y, x) \in [1, C_s]$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$ указывают на сегменты, к которым они принадлежат.

Оценка эффективности алгоритмов сегментации АСМ-изображений

Для объективной оценки эффективности использования алгоритмов сегментации для выделения областей на АСМ-изображениях сформирован набор $\{M_T(j)\}_{(j=\overline{1, J})}$ из $J=8$ тестовых АСМ-матриц $M_T(j) = \|m_T(j, y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ размером $Y \times X$ по вертикали и горизонтали, элементы $m_T(j, y, x)$ которых содержат информацию о расстояниях от нижнего сечения подложки до верхних поверхностей эталонных полусфер одинакового размера, расположенных в трехмерном пространстве таким образом, что их основания лежат в параллельных плоскостях, а проекции их центральных точек в горизонтальной плоскости находятся в узлах виртуальной квадратной сетки. На рисунке 1 приведены тестовые АСМ-изображения. Результатом сегментации тестовых АСМ-матриц должна быть бинарная матрица, в которой элементам верхних поверхностей полусфер соответствуют единичные значения, а пространству между полусферами – нулевые значения. Данная бинарная матрица сегментации может быть преобразована в изображение в результате замены каждого ее элемента пикселем с максимальной или минимальной яркостью в зависимости от значения соответствующего элемента – «единица» или «ноль». Рассмотренная бинарная матрица сегментации является

эталонной. С ее помощью для каждого алгоритма выделения областей может быть получено значение нормированной ошибки E_S сегментации с помощью выражения

$$E_S = E_O + E_I,$$

где $E_O = \frac{\sum_{i=1}^9 S_O(i)}{S_E}$ – нормированная ошибка избыточной сегментации; $E_I = \frac{\sum_{i=1}^9 S_I(i)}{S_E}$ – нормированная ошибка недостаточной сегментации; i – порядковый номер эталонной полусферы; $S_E = \lceil 2\pi R_E \rceil$ – площадь проекции эталонной полусферы в горизонтальной плоскости (в пикселях); R_E – радиус талонной полусферы (в пикселях); $S_O(i)$ – число пикселей сегментированной области, соответствующей i -й эталонной полусфере и попадающих вне ее проекции в горизонтальной плоскости; $S_I(i)$ – число пикселей сегментированной области, соответствующей i -й эталонной полусфере и отсутствующих под ее проекцией в горизонтальной плоскости; $\lceil \rceil$ – операция округления до ближайшего целого с избытком.

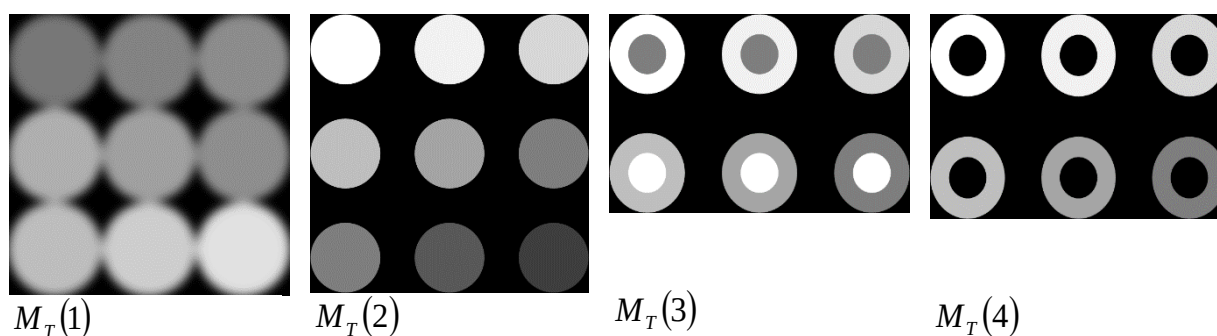


Рис.1. Тестовые изображения

На рисунках 2-5 приведены результаты визуализации матриц сегментации, полученных с помощью различных методов на основе 4-х тестовых матриц в результате их сегментации и бинаризации. Для визуализации матриц сегментации осуществлена замена каждого их элемента пикселем с яркостью, соответствующей значению данного элемента.

В таблице 1 приведены значения нормированных ошибок E_S , E_O и E_I для исследуемых алгоритмов сегментации и 4-х тестовых матриц.

Таблица 1 – Нормированные ошибки сегментации

Алгоритмы сегментации на основе	Значения нормированных ошибок сегментации для тестовых матриц											
	$M_T(1)$			$M_T(2)$			$M_T(3)$			$M_T(4)$		
	E_O	E_I	E_S	E_O	E_I	E_S	E_O	E_I	E_S	E_O	E_I	E_S
регрессивного волнового выращивания областей	0.27	0.02	0.29	0	0	0	1,1	0	1,1	0.68	0	0.68
маркерного водораздела	4.01	0.2	4.03	3.19	0.23	3.43	1.9	0.75	2.65	0.56	0.19	0.75
выращивания областей	5.06	0	5.06	0.064	0	0.064	0.012	0.048	0.06	0.02	0.054	0.07

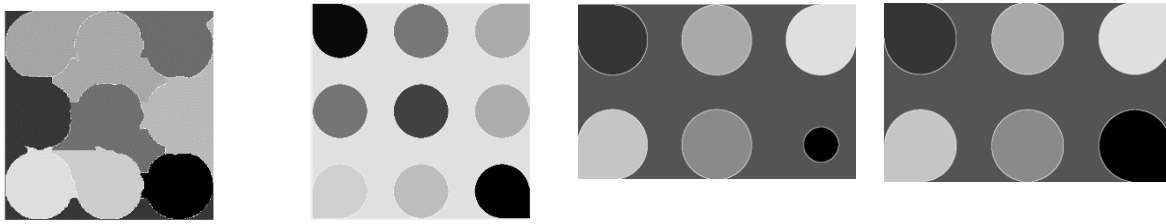


Рис. 2. Результат применения алгоритма маркерного водораздела

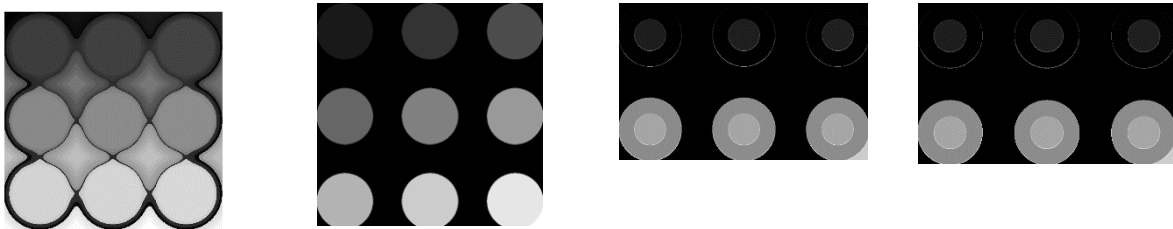


Рис. 3. Результат применения алгоритма выращивания областей

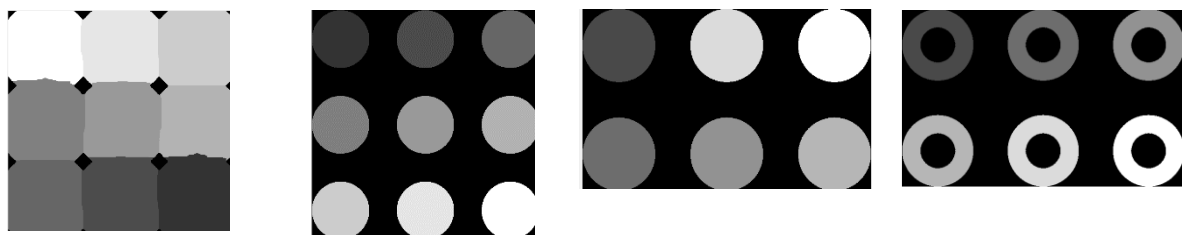


Рис. 4 Результаты разработанного метода

Из таблицы 1 и рисунков 2–4 следует, что при сегментации изображений подверженных размытию, предложенный метод показывает результаты в 13 и 8 раза лучше, чем методы водораздела и выращивания областей соответственно. На изображениях с четким разделением границ, ошибка сегментации предложенного метода стремится к нулю. Для изображений со сложной морфологией ошибка связана с захватом менее ярких областей, лежащих внутри или снаружи более ярких областей. Однако внешние границы таких сегментов, предложенный метод сегментирует без ошибок.

Заключение

Для сегментации АСМ-изображений предложен алгоритм на основе регрессивного волнового выращивания областей. Сущность алгоритма заключается в квазипараллельном, послойном выращивании областей вокруг максимальных для каждого слоя точек роста, что обеспечивает автоматическое разделение областей по высоте, которые известные методы сегментируют с ошибками.

Список литературы

1. Lalitha M., Kiruthiga M., Loganathan C. // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2. No. 2. P. 348–358.
2. Gauch J. M. // IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING. 1999. Vol. 8. No. 1. P. 69–79.
3. Khiyal M. S. H., Khan A., Bibi A. // Informing Science and Information Technology. 2009. Vol. 6. P. 876–886.

4. Arindrajit Seal, Arunava Das, Prasad Sen. // International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT). 2015. Vol. 6. No. 3. P. 2295–2297.
5. Chang, J.H. , Fan K.Ch., Chang Y.L. // Image and Vision Computing. 2002. Vol. 20. P. 203–216.
6. Muhsin, Z.F., Rehman A., Altameem A. et. al // The Imaging Science Journal. 2014. Vol. 62. No. 1. P. 56–62.
7. Xiaolin Wu. // IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE. 1993. Vol. 15. No. 8. P. 808–815.
8. Dass R., Priyanka, Devi S. // International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT). 2012. Vol. 3. Issue 1. P. 66–70.
9. Singh, K.K., Singh A. // International Journal of Computer Science Issues. 2010. Vol. 7. No. 5. P. 414–417.
10. Shih F. Y., Cheng S. // Image and Vision Computing. 2005. No. 23. P. 877–886.
11. Sharma Ritu, Sharma Rajesh // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2014. Vol. 2. Issue 9. P. 5686-5692.
12. N. Mohd Saad, S.A.R. Abu-Bakar, Sobri Muda, M. Mokji, A.R. Abdullah // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong, 14-16 March 2012. P. 674-677.
13. Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Конопелько В.К. // Докл. БГУИР. 2016. №8 (102). С. 82-88. (*Almiahi O.M., Tsviatkou V.Yu. , Kanapelka V.K., // Dokl. BGUIR. 2016. №8 (102) S.82-88.*)
14. Панченко Д.С., Путятин Е.П. // Радиоэлектроника и информатика 1999. С. 109-

References

1. Lalitha M., Kiruthiga M., Loganathan C. // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2. No. 2. P. 348–358.
2. Gauch J. M. // IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING. 1999. Vol. 8. No. 1. P. 69–79.
3. Khiyal M. S. H., Khan A., Bibi A. // Informing Science and Information Technology. 2009. Vol. 6. P. 876–886.
4. Arindrajit Seal, Arunava Das, Prasad Sen. // International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT). 2015. Vol. 6. No. 3. P. 2295–2297.
5. Chang, J.H. , Fan K.Ch., Chang Y.L. // Image and Vision Computing. 2002. Vol. 20. P. 203–216.
6. Muhsin, Z.F., Rehman A., Altameem A. et. al // The Imaging Science Journal. 2014. Vol. 62. No. 1. P. 56–62.
7. Xiaolin Wu. // IEEE TRANSACTIONS ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE. 1993. Vol. 15. No. 8. P. 808–815.
8. Dass R., Priyanka, Devi S. // International Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT). 2012. Vol. 3. Issue 1. P. 66–70.
9. Singh, K.K., Singh A. // International Journal of Computer Science Issues. 2010. Vol. 7. No. 5. P. 414–417.
10. Shih F. Y., Cheng S. // Image and Vision Computing. 2005. No. 23. P. 877–886.
11. Sharma Ritu, Sharma Rajesh // International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2014. Vol. 2. Issue 9. P. 5686-5692.
12. N. Mohd Saad, S.A.R. Abu-Bakar, Sobri Muda, M. Mokji, A.R. Abdullah // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. Hong Kong, 14-16 March 2012. P. 674-677.
13. *Almiahi O.M., Tsviatkou V.Yu. , Kanapelka V.K., // Dokl. BGUIR. 2016. №8 (102) S.82-88.*
14. Panchenko D.S., Putyatin E.P., // *Radioelektronika i informatika* 1999. S. 109-114.

Сведения об авторах

Рабцевич В.В., аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Цветков В.Ю., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ловецкий М.Ю., студент кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Rabtsevitch V.V., postgraduate student of department of infocommunication technologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Tsviatkou V.Yu., D.Sci., associate professor, chief of department of infocommunication technologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Lovetskiy M.Yu., student of department of infocommunication technologies of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь, г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-84-08; e-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovka st., 6, Belarusian state university of informatics and radioelectronics tel. +375-17-293-84-08; e-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Victor Yur'evich

ЗАЩИТА ОТ ПОМЕХ В СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ КОНЕЧНЫХ ГЕОМЕТРИЙ

Т. А. АНДРИЯНОВА, С. Б.САЛОМАТИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Аннотация. Предложены схемы помехоустойчивого кодирования информации в сенсорных сетях мониторинга с использованием сигнатур и алгоритмов кодирования в конечных полях. Даны оценки вычислительной сложности и помехоустойчивости алгоритмов
Ключевые слова: сигнатура, конечное поле, функция следа, кодовые структуры.

Abstract. The schemes of noise-immune encoding of information in sensor monitoring networks are proposed with the use of signatures and coding algorithms in finite fields. Estimates of the computational complexity and noise immunity of algorithms are given
Key words: signature, finite field, trace function, code structures.

Введение

Низкоплотностные LDPC коды, использующие алгоритмы распространения доверия для декодирования обладают хорошими корректирующими возможностями, что обуславливает применение таких кодов в современных системах связи и сенсорных сетях мониторинга [1, 2]. Основная трудность при синтезе проверочной матрицы LDPC кода связана с требованием отсутствия циклов в двудольном графе Таннера [3, 4]. Наличие циклов в двудольном графе кода является основным фактором снижения исправляющей способности алгоритма декодирования. Циклы приводят к зависимости декодируемого значения на текущей итерации от значений декодирования этого же символа на предыдущих итерациях. Одним из путей решения проблемы циклов является применение конечных геометрий и схем инцидентностей над конечными полями и декодирования кода алгоритмами с итеративным распространением доверия (IBP, iterative belief-propagation).

Конструкции LDPC кодов на основе схем инцидентностей

LDPC-коды часто задаются с помощью графа, для которого матрица H является матрицей смежности (так называемого графа Таннера). Это двудольный граф, вершины которого делятся на два множества: 1) n символьных вершин (bit nodes), соответствующих столбцам; 2) r проверочных вершин (check nodes), соответствующих строкам проверочной матрицы. Ребра, соединяющие вершины графа, соответствуют ненулевым позициям в матрице H . Коды, построенные с использованием конечных геометрий [5, 6], не имеют циклов длиной 4. Особый интерес представляют (квази-) циклические LDPC коды с охватом (girth) $g = 6$. С конечной геометрией G можно ассоциировать $J \times n$ матрицу инцидентностей $H_G^{(1)} = [h_{i,j}]$, где каждая строка и столбец соответствуют линии и точке, соответственно. Элемент $h_{i,j} = 1$ если и только если j -ая точка соответствует i -ой линии в G , в противном случае $h_{i,j} = 0$. Строки и столбцы веса ρ и γ соответствуют ρ точкам в соответствующей линии и γ линиям, проходящим через соответствующие точки. Если $\rho \ll n$ и $\gamma \ll J$, то матрица $H_G^{(1)}$ может рассматриваться как проверочная матрица LDPC кода. Коды, соответствующие $H_G^{(1)}$, носят название кода геометрии I GLDPC, имеющего блоки длиной n . Взаимно заменяя строки и

столбцы в матрице инцидентий, получаем код геометрии II GLDPC с проверочной матрицей $H_G^{(1)} = (H_G^{(1)})^T$.

Конструкции LDPC кодов, свободных от циклов длиной 4, могут быть получены на основе балансных блоковых схемах (BIBD). Схемы BIBD имеют параметра (v, k, λ, r, b) и представляют собой упорядоченные пары (X, A) у которых v точек множества X разбивается в семействе A на b подмножеств (блоков), у которых любые две точки определены λ блоками с k точками в каждом блоке и каждая точка присутствует в r различных блоках.

Так как $bk = vr$ и $\lambda(v-1) = r(k-1)$, то только три из пяти параметров независимые.

Поэтому запись (v, k, λ) – BIBD соответствует схеме BIBD, построенной на v точках, имеющей блоки размеров k , и индекс λ .

Пример 1. Пусть $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$, и A семейство 12 трех-элементных блоков:

$$A = \{(1, 2, 3), (4, 5, 6), (7, 8, 9), (1, 4, 7), (2, 5, 8), (3, 6, 9), (1, 5, 9), (2, 6, 7), (3, 4, 8), (1, 6, 8), (2, 4, 9), (3, 5, 7)\},$$

пара (X, A) является $(9, 3, 1)$ -BIBD [30].

Структура (v, k, λ) -BIBD с $k = 3$ и $\lambda = 1$ называется системой тройки Штейнера. Системы троек Штейнера существуют для всех $v = 1, 3 \bmod 6$.

Если множество блоков являются разбиениями точек множества X в BIBD, то множество блоков образуют параллельные классы. Разрешение BIBD структур оценивается через возможность разбиения семейства на параллельные классы. Разрешение дает точно r параллельных классов. BIBD с, как минимум, одним разрешением.

Пример 2. Для $(9, 3, 1)$ -BIBD в системе тройки Штейнера множество A может быть разбито на четыре параллельных класса следующим образом:

$$\{(1, 2, 3), (4, 5, 6), (7, 8, 9)\}, \{(1, 4, 7), (2, 5, 8), (3, 6, 9)\}, \{(1, 5, 9), (2, 6, 7), (3, 4, 8)\}, \{(1, 6, 8), (2, 4, 9), (3, 5, 7)\}.$$

Определим блок-точку матрицы инцидентий $H = [h_{i,j}]_{v \times b}$, где $h_{i,j} = 1$, если i -ая точка в X является в j -ом блоке A , и $h_{i,j} = 0$ в противном случае.

Если каждая точка (v, k, λ) – BIBD с $k \geq 2$ и $\lambda = 1$, относится к проверочному уравнению, и каждый блок является битом линейного блокового кода, тогда H есть проверочная матрица размером $v \times b$ строки которой имеют вес r , а столбцы – вес k . Если $r \ll k$ и $k \ll b$, H является разреженной проверочной матрицей LDPC кода.

Пример 3. Проверочная матрица $(9, 3, 1)$ -BIBD кода имеет следующий вид:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Если в проверочной матрице H на двух столбцах и соответствующих им строках располагаются две единицы, то в ассоциированном с такой матрицей графе Таннера образуется цикл длиной 4. Для блок-матрицы инцидентий H , построенной на t -схеме с $\lambda = 1$, такой вариант исключается. Поэтому для неё граф Таннера кода свободен от цикла длиной 4.

Декодирования LDPC кода с итеративным распространением доверия.

Алгоритм декодирования, соответствующий IBP, вычисляет точные апостериорные вероятности после некоторого количества итераций, если граф Таннера для данного кода не содержит циклов. Ниже предлагается передача двоичных сигналов по каналу АБГШ. Модулированные символы $m(v_i)$ передаются по Гауссовскому каналу и принимаются в виде $r_i = m(v_i) + w_i$, где w_i – гауссовская случайная величина с нулевым средним и дисперсией $N_0/2$, $1 \leq i \leq N$.

1. Алгоритм с жестким принятием решения и процедурой суммирования-умножения (sum product algorithm). Пусть $\mathbf{h} = \{h_0, \dots, h_{N-1}\}$ любая строка из проверочной матрицы кода с низкой плотностью проверок на четность. Будем говорить, что проверка для некоего принимаемого вектора $\mathbf{y} = \{y_0, \dots, y_{N-1}\}$ выполняется тогда, когда скалярное произведение вектора $\mathbf{y}$ на проверку дает ноль. Элемент y_i принятого вектора $\mathbf{y}$ участвует в проверке с $\mathbf{h} = \{h_0, \dots, h_{N-1}\}$ тогда, когда соответствующий элемент проверки h_i не равен нулю.

Одна итерация «жесткого» декодирования инвертированием битов производится следующим образом.

1. Для принятого вектора вычисляются все проверки.
2. Если некоторый бит принятого вектора участвовал более чем в половине не выполнившихся проверок, бит инвертируется.
3. После такого анализа всех символов принятого вектора вектор проверяется на принадлежность коду. Если вектор является кодовым словом, декодирование заканчивается, в противном случае выполняется следующая итерация алгоритма.

Фазы шагов итеративного процесса.

В первой фазе первого шага итеративного процесса n -й символьный узел, $n = 0, 1, \dots, N - 1$, посылает логарифмическое отношение правдоподобия $z_{n,l}^{(0)} = z_n^{(0)}$, называемое «сообщением», связанным с ним проверочным узлом $l \in \mathcal{L}(n)$. Затем i -ый проверочный узел, получивший K сообщений $z_{n,l}^{(0)}, n \in \mathcal{N}(l)$, формирует K логарифмических отношений правдоподобия $y_{l,n}^{(1)}, n \in \mathcal{N}(l)$,

$$y_{l,n}^{(1)} = \log \frac{P(v_n = 0 | \{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l)\} \setminus \{n\})}{P(v_n = 1 | \{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l)\} \setminus \{n\})}$$

где $P(v_n = 0 | \{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l)\} \setminus \{n\})$ и $P(v_n = 1 | \{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l)\} \setminus \{n\})$ – условные вероятности того, что $v_n = 0, v_n = 1$, соответственно, при условии, что известно множество принятых символов $\{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l)\} \setminus \{n\}$.

При этом

$$\begin{aligned} P(v_n = 0 | \{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l)\} \setminus \{n\}) \\ = \frac{1}{2} \left(\prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} (P(v_{n'} = 1 | r_{n'}) + P(v_{n'} = 0 | r_{n'})) \right. \\ \left. + \prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} (P(v_{n'} = 1 | r_{n'}) - P(v_{n'} = 0 | r_{n'})) \right) \end{aligned}$$

и

$$\begin{aligned}
P(v_n = 1 | \{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}\}) \\
= \frac{1}{2} \left(\prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} (P(v_{n'} = 1 | r_{n'}) + P(v_{n'} = 0 | r_{n'})) \right. \\
\left. - \prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} (P(v_{n'} = 1 | r_{n'}) - P(v_{n'} = 0 | r_{n'})) \right).
\end{aligned}$$

Логарифмическое отношение правдоподобия $y_{l,n}^{(1)}$ может быть выражено как функция $(K - 1)$ логарифмических отношений правдоподобия $z_{n'}^{(0)}, n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}$. Используя равенство

$$\frac{(e^{z_{n'}^{(0)}} - 1)}{(e^{z_{n'}^{(0)}} + 1)} = \tanh\left(\frac{z_{n'}^{(0)}}{2}\right)$$

получим

$$y_{l,n}^{(1)} = \log \frac{P(v_n = 0 | \{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}\})}{P(v_n = 1 | \{r_{n'}, n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}\})} = \log \frac{1 + \prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} \tanh\left(\frac{z_{n',l}^{(0)}}{2}\right)}{1 - \prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} \tanh\left(\frac{z_{n',l}^{(0)}}{2}\right)}.$$

Вычисление статистик $y_{l,n}^{(1)}, l = 0, 1, \dots, L - 1, n \in \mathcal{N}(l)$ завершает первую фазу первого шага процесса итеративного декодирования.

Во время выполнения второй фазы первого шага итеративного процесса декодирования l -ые, $l = 0, 1, \dots, L - 1$, проверочные узлы шлют логарифмические отношения правдоподобия $y_{l,n}^{(1)}, n \in \mathcal{N}(l)$, соответствующим смежным символьным узлам. Затем n -ый символьный узел, получивший сообщения от смежных проверочных узлов, вычисляет J логарифмических отношений правдоподобия $z_{n,l}^{(1)}, l \in \mathcal{L}(n)$,

$$z_{n,l}^{(1)} = z_n^{(0)} + \sum_{l' \in \mathcal{L}(n) \setminus \{l\}} y_{l',n}^{(1)} = z_n^{(0)} + \sum_{l' \in \mathcal{L}(n) \setminus \{l\}} \log \frac{1 + \prod_{n' \in \mathcal{N}(l') \setminus \{n\}} \tanh\left(\frac{z_{n',l'}^{(0)}}{2}\right)}{1 - \prod_{n' \in \mathcal{N}(l') \setminus \{n\}} \tanh\left(\frac{z_{n',l'}^{(0)}}{2}\right)}.$$

Здесь $y_{l',n}^{(1)}, l' \in \mathcal{L}(n) \setminus \{l\}$, означают сообщения, называемые внешней информацией (extrinsic information), которые l -ый символьный узел получил от смежного проверочного узла.

Вычисление статистик $z_{n,l}^{(1)}, l \in \mathcal{L}(n)$, завершает вторую фазу первого шага процесса итеративного декодирования.

Рассмотрим i -ый, $i = 0, 1, \dots, I - 1$ шаг итеративного процесса декодирования. Во время первой фазы i -ой итерации n -ый символьный узел посылает сообщение $z_{n,l}^{(i-1)}$, которое было вычислено им на предыдущем шаге, смежному проверочному узлу $l \in \mathcal{L}(n)$.

Затем i -ый проверочный узел $l = 0, 1, \dots, L - 1$, получивший K сообщений $z_{n,l}^{(i-1)}, n \in \mathcal{N}(l)$, от смежных символьных узлов, вычисляет статистики $y_{l,n}^{(i)}, n \in \mathcal{N}(l)$

$$y_{l,n}^{(i)} = \log \frac{1 + \prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} \tanh \left(\frac{z_{n',l}^{(i-1)}}{2} \right)}{1 - \prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} \tanh \left(\frac{z_{n',l}^{(i-1)}}{2} \right)}.$$

Во время второй фазы i -ого итеративного процесса декодирования, $i = 0, 1, \dots, I - 1$, l -ый проверочный узел $l = 0, 1, \dots, L - 1$, посылает сообщение $y_{l,n}^{(i)}$ n -ому символьному узлу $n \in \mathcal{N}(l)$. Затем n -ый символьный узел вычисляет статистики

$$z_{n,l}^{(i)} = z_n^{(0)} + \sum_{l' \in \mathcal{L}(n) \setminus \{l\}} y_{l',n}^{(i)} = z_n^{(0)} + \sum_{l' \in \mathcal{L}(n) \setminus \{l\}} \log \frac{1 + \prod_{n' \in \mathcal{N}(l') \setminus \{n\}} \tanh \left(\frac{z_{n',l'}^{(i-1)}}{2} \right)}{1 - \prod_{n' \in \mathcal{N}(l') \setminus \{n\}} \tanh \left(\frac{z_{n',l'}^{(i-1)}}{2} \right)},$$

которые данный символьный узел будет рассылать как сообщения на следующем шаге итеративного процесса. Этим завершается вторая фаза i -ого шага процесса итеративного декодирования.

Последнее выражение используется для вычисления статистики $z_{n,l}^{(i)}$ на всех шагах итеративного процесса кроме последнего, i -го, шага. На последнем шаге декодер вычисляет для i -ого символьного узла только одно логарифмическое отношение правдоподобия

$$z_n^{(I)} = z_n^{(0)} + \sum_{l \in \mathcal{L}(n)} y_{l,n}^{(I)} = z_n^{(0)} + \sum_{l \in \mathcal{L}(n)} \log \frac{1 + \prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} \tanh \left(\frac{z_{n',l}^{(I-1)}}{2} \right)}{1 - \prod_{n' \in \mathcal{N}(l) \setminus \{n\}} \tanh \left(\frac{z_{n',l}^{(I-1)}}{2} \right)}.$$

Затем он принимает жесткое решение $\hat{v}_n$ о символе v_n , используя правило

$$\hat{v}_n = \begin{cases} 0, & \text{если } z_n^I > 0, \\ 1, & \text{если } z_n^I < 0. \end{cases}$$

Если $z_n^I = 0$, декодер бросает монету, выбирая $\hat{v}_n = 0$ или $\hat{v}_n = 1$ с вероятностью $1/2$.

Поскольку алгоритм может быть описан как чередование вычислений сумм и произведений, его иногда называют алгоритм сумма-произведение (sum-product algorithm).

Сложность одной итерации «жесткого» декодирования инвертированием бит является линейной, количество итераций декодирования обычно выбирается около $\log_2 N$, где N – длина кодового слова.

2. Алгоритм «мягкого» декодирования. Пусть $h_{i,j}$ элемент i -й строки и j -го столбца проверочной матрицы H . Обозначим множество кодовых позиций, участвующих в i -ом проверочном уравнении как $\zeta(i) = \{l: h_{i,l} = 1\}$ и примем $\mu(l) = \{m: h_{m,l} = 1\}$ как множество проверочных позиций, в которых участвует кодовая позиция l .

Алгоритм итеративно вычисляет два типа условных вероятностей:

- $q_{m,l}^x$ – вероятность того, что l -ый бит вектора $\mathbf{v}$ имеет значение x по информации, полученной от всех проверочных вершин (графа Таннера) кроме вершины m ;

- $r_{m,l}^x$ – вероятность того, что уравнение, соответствующее проверочной вершине m , удовлетворяется, если значение l -го бита равно x , а остальные биты независимы с вероятностями $q_{m,l'}, l' \in \zeta(m) \setminus l$.

Начальные установки

Для $l \in \{1, 2, \dots, N\}$ установить априорные вероятности кодовых вершин (графа Таннера) равными

$$p_l^1 = \frac{1}{1 + \exp\left(r_l \frac{4}{N_0}\right)},$$

где $p_l^0 = 1 - p_l^1$ для каждой пары (l, m) такой, что $h_{m,l} = 1$, $q_{m,l}^0 = p_l^0$, $q_{m,l}^1 = p_l^1$.

Обработка сообщения

Шаг 1. Снизу вверх (по горизонтали):

Для каждой пары (l, m) вычислить

$$\delta r_{m,l} = \prod_{l' \in \zeta(m) \setminus l} (q_{m,l}^0 - q_{m,l'}^1)$$

и $r_{m,l}^0 = (1 + \delta r_{m,l})/2$, $r_{m,l}^1 = (1 - \delta r_{m,l})/2$.

Шаг 2. Сверху вниз (по вертикали):

$$q_{m,l}^0 = p_l^0 \prod_{m' \in \mu(l) \setminus l} r_{m',l}^0, \quad q_{m,l}^1 = p_l^1 \prod_{m' \in \mu(l) \setminus l} r_{m',l}^1,$$

результат нормируется с множителем $\alpha = \frac{1}{(q_{m,l}^0 + q_{m,l}^1)}$, где $q_{m,l}^0 = \alpha q_{m,l}^0$, $q_{m,l}^1 = \alpha q_{m,l}^1$.

Для каждого l вычислить апостериорные вероятности

$$q_l^0 = p_l^0 \prod_{m \in \mu(l)} r_{m,l}^0, \quad q_l^1 = p_l^1 \prod_{m \in \mu(l)} r_{m,l}^1,$$

результат нормируется их множителем $\alpha = \frac{1}{(q_l^0 + q_l^1)}$, где $q_l^0 = \alpha q_l^0$, $q_l^1 = \alpha q_l^1$.

Этап декодирования и формирования мягких выходов.

Для $i = 1, 2, \dots, N$ вычислить $v_i = \text{sgn}(q_i^0)$. Если $\hat{\mathbf{v}}\mathbf{H} = \mathbf{0}$, то оценкой кодового слова и мягкими выходами являются

$$\Lambda(v_i) = \log(q_i^1) - \log(q_i^0), \quad 1 \leq i \leq N$$

процесс завершается.

Иначе процесс возвращается к шагу 2. Если число итераций превышает заранее установленный порог, то фиксируется отказ от декодирования (ошибка). На выход выдаются принятые значения символов. Процесс завершается.

На рисунке 1 приведены зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум в канале для алгоритмов декодирования низкоплотностного кода.

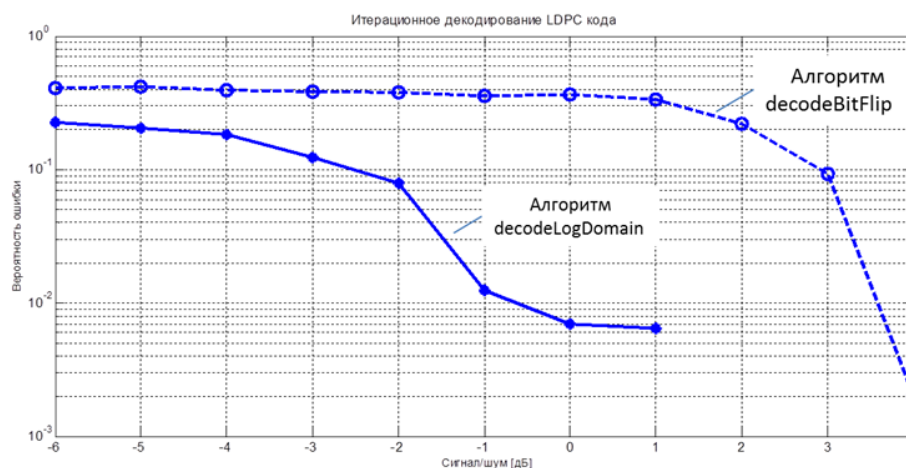


Рис. 1 Зависимости оценки помехоустойчивости низкоплотностного кода

Заключение

Сложность «мягкого» алгоритма выше, чем сложность «жесткого» декодирования инвертированием битов, однако качество декодирования повышается за счет использования дополнительной информации на выходе канала. Однако качество работы такого алгоритма зависит от инициализации: чем точнее она произведена, тем точнее будет конечный результат. Для канала с гауссовским шумом инициализация может быть произведена при помощи информации о дисперсии шума в канале. Для других распределений шума в канале или при неизвестных характеристиках шума точная инициализация алгоритма может являться сложной задачей.

Литература

1. Stojmenovic, I. Handbook of sensor networks: algorithms and architectures/ I. Stojmenovic. – John Wiley & Sons, 2005, vol. 49.
2. MacKay, D. Near Shannon limit performance of low-density parity-check codes/ D. MacKay, R. M. Neal // IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 47. Feb. 2001.
3. Richardson, T. J. Efficient encoding of low-density parity-check codes/ T. J. Richardson, R. L. Urbanke // IEEE transactions on information theory. Vol. 47. Feb. 2001.
4. Kou, Y. Low-density parity-check codes based on finite geometries: A rediscovery and new results/ Y. Kou, S. Lin. P. Fossorier // IEEE transactions on information theory. Vol. 47. Nov. 2001.
6. Fossorier, M. P. C. Reduced complexity iterative decoding of low-density parity-check codes based on belief propagation/ M. P. C. Fossorier, M. Mihaljevic, H. Imai // IEEE transactions on communications. Vol. 47. May 1999.
8. Lin, S. Shortened finite geometry codes/ S. Lin // IEEE transactions on information theory. Vol. 18. Sept. 1972. P. 692–696.

Сведения об авторах

Андриянова Т.А., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Окончила Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники по специальности «Радиоэлектронная защита информации» в 2009 году, магистратуру по специальности «Методы и системы защиты информации,

Information about the authors

Andryanava T.A., postgraduate student of Belarusian state university of informatics and radioelectronics. Graduated from Belarusian state university of informatics and radioelectronics «Radioelectronic information security» 2009, Master of Technical Sciences «Methods and systems of information security, information security» 2010.

информационная безопасность» в 2010/

Саломатин С.Б., к.т.н., доцент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь, Минск, ул. П.Бровки, 6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники.

тел: +375293436560;

e-mail: rezistka@gmail.com

Андриянова Татьяна Александровна

тел: +375296714732;

e-mail: kafsiut@bsuir.by

Саломатин Сергей Борисович

Salomatin S.B., Ph.D., associate professor of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovka st., 6, Belarusian state university of informatics and radioelectronics,

tel. +375293436560;

e-mail: rezistka@gmail.com

Andryianava Tatsiana Alexandrovna

tel. +375296714732;

e-mail: kafsiut@bsuir.by

Salomatin Sergei Borisovich

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА-ХУАНГА В КОМПЬЮТЕРНОМ ВИБРАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ

Д. В. МЕЛЕЩЕНЯ, П.Ю. БРАНЦЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены основные методы, применяемые в системах вибрационного контроля, их достоинства, недостатки и область применения. Предложено применение преобразования Гильберта-Хуанга для анализа нестационарных и нелинейных сигналов, получаемых системами вибромониторинга. Разработано программное средство, выполняющее декомпозицию сигнала на внутренние модовые функции, представлен пример исследования реального вибрационного сигнала.

Ключевые слова: вибрация, контроль, мониторинг, цифровая обработка сигналов, преобразование Фурье, Вейвлет-анализ, преобразование Гильберта-Хуанга.

Abstract. The main methods which are used in vibration control, their advantages, disadvantages and application areas are considered. The Hilbert-Huang transformation is considered in the context of its application to the analysis of non-stationary and nonlinear signals. The software tool that decomposes the signal into intrinsic mode functions is implemented and real vibration signals are investigated.

Keywords: vibration, monitoring, digital signal processing, Fourier transform, wavelet analysis, Hilbert-Huang transformation.

Введение

На предприятиях энергетики, газового хозяйства, нефтехимии, машиностроения и других отраслей эксплуатируется большое количество механизмов, агрегатов и устройств с вращательным движением. Состояние таких машин характеризуется параметрами колебательных процессов, происходящим внутри них и эффективно оценивается средствами виброакустической диагностики. Однако при этом встает вопрос выбора и формирования набора информационных признаков, которые будут отображать действительное техническое состояние исследуемого объекта [1-4].

На практике одним из самых популярных путей решения этой задачи является получение спектрального состава исследуемого сигнала. Для этого к исходному сигналу применяют дискретное преобразование Фурье (ДПФ), суть которого заключается в том, исходный сигнал отображается в частотный спектр. Ключевыми требованиями к исследуемой системе в этом случае являются ее линейность и стационарность. Однако большинство задач, связанных с цифровой обработкой, не позволяют исследовать сигнал на бесконечном интервале поскольку нет никаких данных о нем до начала измерений и в будущем. Частично эта проблема решается, если интерпретировать ограничение интервала, как произведение исходного сигнала на некую оконную функцию. В простейшем случае в качестве окна выступает прямоугольная функция, принимающая нулевые значения за пределами исследуемого интервала. Однако умножение на оконную функцию приводит к внесению определенных искажений в конечный спектр. Для минимизации некоторых эффектов прямоугольного окна, иногда применяют окна колоколоподобной формы (окна Ханна, Хэмминга, Блэкмана и т.д.) [5].

Также следует отметить, что исследуемая система не обязательно работает в установившемся режиме, что обуславливает нестационарность анализируемых данных. Преобразование Фурье в данном случае не дает представления о локальных свойствах исследуемой функции, поскольку сигналы, в которых появляются и исчезают гармоники, будут представлены так, будто эти составляющие присутствуют на всем протяжении сигнала. Эти проблемы могут быть частично

решены, если размер оконной функции будет выбран таким образом, чтобы часть сигнала, покрываемая окном, была максимально близка к стационарной, а оконная функция при этом продвигается во времени по сигналу. По сути это эквивалентно тому, что исходный сигнал делится на интервалы меньшей длины, а преобразование Фурье выполняется для каждого интервала. Это позволяет перейти к частотно-временному представлению сигнала и отследить изменение частотного спектра во времени [6, 7].

При использовании ДПФ со скользящим окном встает проблема выбора ширины окна поскольку с уменьшением количества охватываемых окном отсчетов увеличивается временное разрешение и уменьшается частотное. Компромисса позволяет достичь вейвлет-преобразование, которое позволяет достаточно хорошо локализовать характеристики исследуемого сигнала как по времени, так и по частоте. Суть преобразования состоит в свертке исследуемой функции с выбранной вейвлет-функцией. Выбор базисной функции во многом определяется исходными данными [8, 9].

Еще одним подходом в исследовании сигналов является преобразование Вигнера-Вилля, которое применяется не к сигналу, а к комплексной функции, в которой действительная часть представлена компонентами исходного сигнала, а мнимая его преобразованием Гильберта. Преобразование в чистом виде обладает серьезным недостатком – интерференцией, возникающей между двумя точками в частотно-временной области. Для минимизации этого эффекта используют наложение временных окон, подобно с тем как это делается в преобразовании Фурье со скользящим окном. Этот метод получил название – псевдо-преобразование Вигнера-Вилля [5, 10].

Преобразование Гильберта-Хуанга

Преобразование Гильберта-Хуанга (Hilbert-Huang transformation, ННТ) не требует выбора функционального базиса разложения и может применяться для исследования нелинейных нестационарных систем. Достоинством преобразования Гильберта-Хуанга также является хорошее разрешение по частоте и времени.

Преобразование Гильберта-Хуанга выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется эмпирическая модовая декомпозиция, а затем к полученному на первом шаге разложению применяется преобразование Гильберта.

В случае применения ННТ, в качестве информативных признаков, характеризующих сигнал, выступают мгновенные амплитуда, частота и фаза, для вычисления которых используются сигнал, сопряженный по Гильберту с исходным. Чтобы преобразование Гильберта давало корректный результат, необходима симметричность исследуемой функции относительно нулевого уровня. Это условие не всегда может быть выполнимо применительно к реальным сигналам из-за наличия в них постоянной составляющей или тренда.

В основе преобразования Гильберта-Хуанга лежит предположение о том, что любой сигнал может быть представлен как сумма колебательных процессов, каждый из которых удовлетворяет условию симметричности, и некоторого остатка, представляющего собой тренд. Задача состоит в нахождении этого разложения. Этот процесс получил название эмпирическая модовая декомпозиция (empirical mode decomposition, EMD).

Декомпозиция на модовые функции – итеративная процедура, ставящая в соответствие исходному сигналу набор эмпирических мод (intrinsic mode functions, IMF).). В классическом определении, данном Хуангом, IMF представляет функцию, удовлетворяющую следующим двум условиям:

- на всем наборе данных количество пересечений оси абсцисс и экстремумов должно быть равно или отличаться на единицу;
- в любой точке среднее значение огибающих определяемых максимумами и минимумами должно быть равным нулю.

В результате разложения сигнал $x(t)$ может быть представлен выражением (1):

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_i(t), \quad (1)$$

где $c_i(t)$ – модовые функции, $r(t)$ – остаточный тренд или постоянная составляющая.

Фактически алгоритм модовой декомпозиции, или просеивания, сводится к следующему. В исходном сигнале выделяются локальные экстремумы – минимумы и максимумы. По полученным точкам строится верхняя (по максимумам) и нижняя (по минимумам) огибающие. Для нахождения значений огибающей на интервале между двумя соседними экстремумами чаще всего применяется интерполяция кубическими сплайнами.

В качестве интерполяционного может использоваться сплайн Катмула-Рома [11]. Суть метода заключается в том, что для каждого интервала исходной функции находится свой полином, описывающий кривую на данном участке. При этом значение в некоторой точке произвольного интервала определяется по следующей формуле (2):

$$p(x) = h_{00}(t)p_k + h_{01}(t)p(x_{k+1} - x_k)m_k + h_{01}(t)p_{k+1} + h_{11}(t)(x_{k+1} - x_k)m_{k+1},$$

где

$$t = (x - x_k) / (x_{k+1} - x_k), \quad (2)$$

$$m_n = (p_{n+1} - p_{n-1}) / (t_{n+1} - t_{n-1}),$$

$h_{00}, h_{01}, h_{10}, h_{11}$ – базисные функции Эрмита.

Преимущество этого метода заключается в том, что коэффициенты интерполирующего полинома на интервале не зависят от значений на других интервалах, что позволяет выполнять интерполяцию параллельно.

После того, как получены огибающие вычисляется функция средних значений между ними (3):

$$m_i(t) = \frac{u_i(t) + v_i(t)}{2}, \quad (3)$$

где u_i и v_i – верхняя и нижняя огибающие.

Полученная функция вычитается из исходного сигнала (4), давая в результате первое приближение к IMF:

$$h_i(t) = y_i - m_i(t). \quad (4)$$

Далее процесс повторяется до тех пор, пока нормализованная квадратичная разность между двумя приближениями не станет меньше некоего заданного предела (5):

$$\partial > \sum_t (h_{i-1}(t) - h_i(t))^2 / h_{i-1}^2(t). \quad (5)$$

Очередная найденная IMF вычитается из исходного сигнала и описанные действия проделываются над остатком. Критериев полагать, что все компоненты сигнала найдены может быть несколько:

- 1) остаток представляет собой монотонную функцию, т.е. не содержит экстремумов;
- 2) сумма модовых функций, которая по сути представляет собой реконструированный сигнал, отличается от исходного сигнала на величину не превышающую некоего предварительно установленного предела;
- 3) величина остатка незначительна в сравнении с исходным сигналом [12-16].

Разложение вибрационного сигнала на внутренние модовые функции

Основная задача вибрационного анализа – выделение информационных признаков в исходном сигнале и выявление аномалий в результате мониторинга. В преобразовании Гильберта-Хуанга такими признаками выступают мгновенные частота, фаза и амплитуда внутренних модовых функций, или параметры этих модовых функций, рассматриваемых как составляющие вибрационного сигнала. Поскольку исходный сигнал состоит из совокупности мод, информация, характеризующая сигнал, распределяется по всему набору модовых

функций. На рисунке 1 изображен исходный сигнал, полученный в ходе исследования вибрационного состояния турбоагрегата, и результат его разложения на модовые функции (IMF1-6).

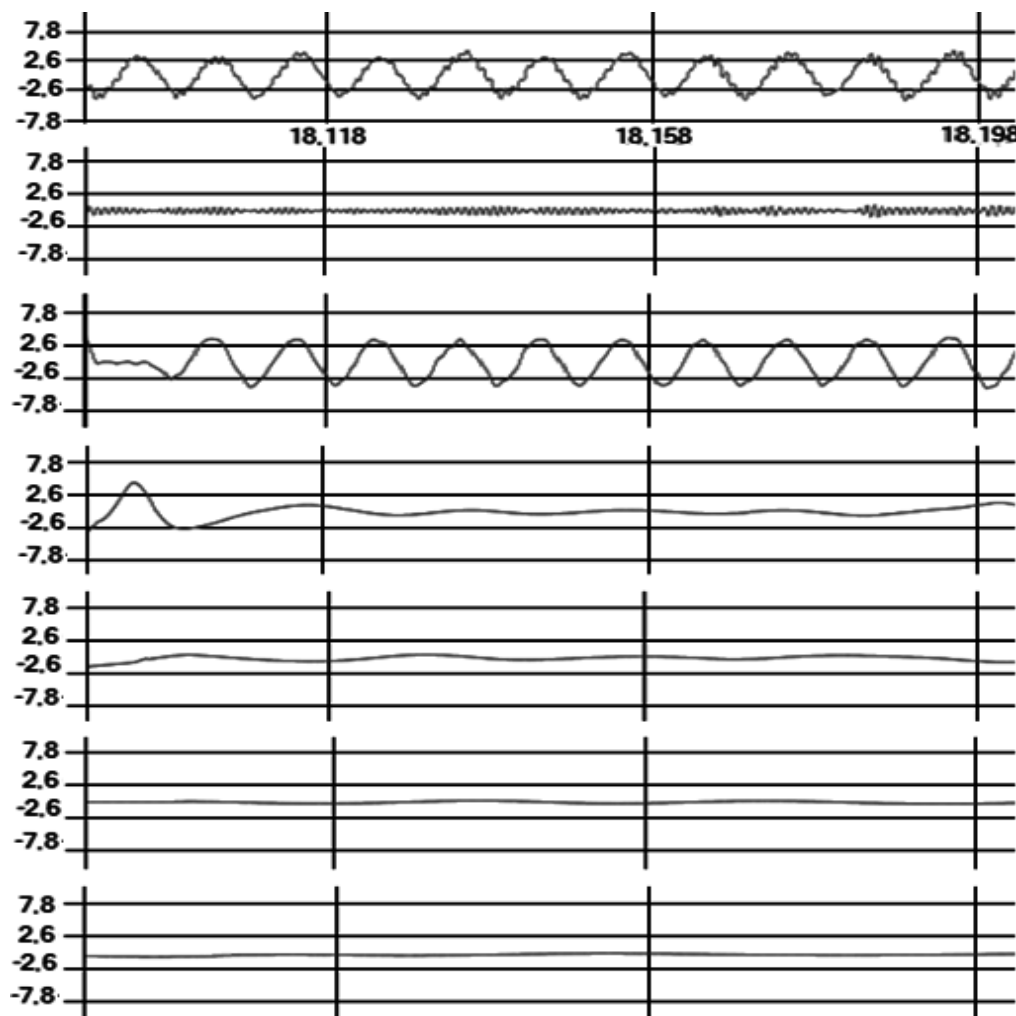


Рис. 1 – Пример разложения исходного сигнала на эмпирические модовые функции (По оси ординат амплитуда (м/с^2), по оси абсцисс – время в секундах)

Критерием остановки процесса просеивания в данном случае выступает разностная функция, получаемая после вычитания очередной моды из сигнала. В момент, когда результат вычитания представляет собой монотонную функцию, так что построение огибающих не представляется возможным, разложение считается завершенным. На рисунке 2 представлена функция, полученная путем суммирования всех модовых функций разложения и остаточного тренда, практически повторяющая форму исходного сигнала.

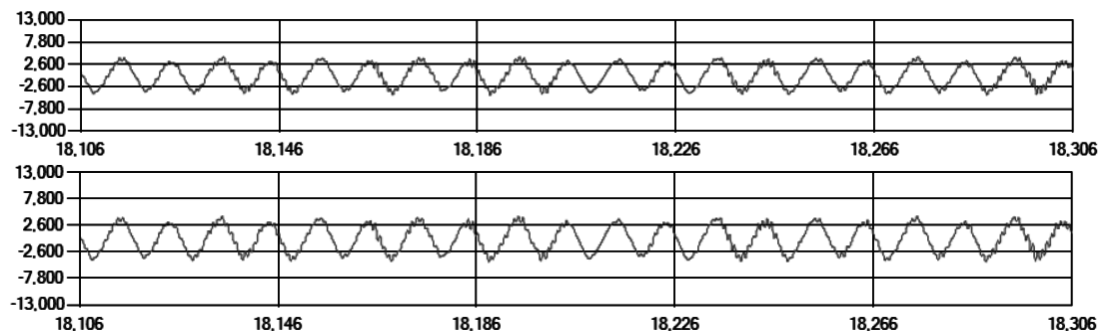


Рис. 2 – Исходный сигнал (верхний график) и сигнал полученный суммированием эмпирических мод (По оси ординат амплитуда (м/с^2), по оси абсцисс – время в секундах)

Как видно из рисунка 3, модовые функции с меньшим номером содержат гармоники с большей частотой, а с ростом номера частотный спектр смещается в область низких частот.

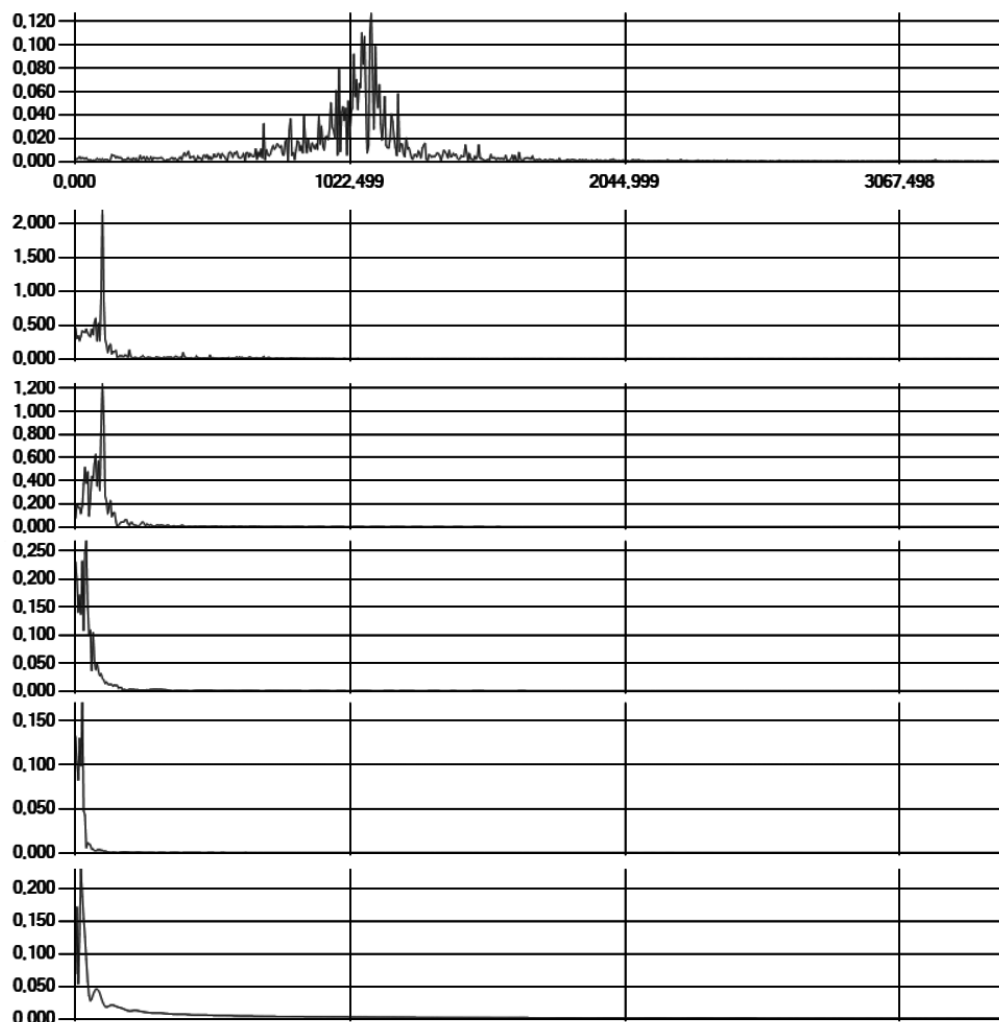


Рис. 3 – Спектральный состав внутренних модовых функций (По оси ординат амплитуда (м/с^2), по оси абсцисс – частота в герцах)

При этом нельзя говорить о какой-либо закономерности в избирательности частот определённой модой, поскольку в случае с эмпирической модовой декомпозицией любая частота может быть размазана по всему разложению. Так, к примеру, гармоника с частотой 100 Гц четко видна в спектре как первой, так и второй и третьей моды, однако амплитуда ее меньше чем в спектре исходного сигнала.

Для построения эмпирической модовой декомпозиции и ее исследования было разработано программное средство, позволяющее обрабатывать сигналы, получаемые измерительно-вычислительными комплексами «Тембр» и «Тембр-М» в ходе экспериментальных исследований механических колебаний механизмов, агрегатов, конструкций [17-18]. Программа позволяет осуществлять следующие действия:

- оконное преобразование Фурье;
- разложение исходного сигнала на внутренние модовые функции;
- визуализировать сигнал, его разложение на моды;
- отображать частотные спектры как исходной, так и модовых функций.

Особенностью реализации алгоритма эмпирической модовой декомпозиции является то, что в качестве критерия останова поиска очередной модовой функции наряду с вычислением квадратичной разницы установлен предел количества итераций. Для длинных и сложных сигналов это позволяет избежать трудоемких вычислений без существенного ухудшения качества отсеивания.

Заключение

Преобразование Гильберта-Хуанга может использоваться для анализа нелинейных и нестационарных данных. Отсутствие необходимости выбора базиса разложения и его исходных параметров позволяют применять его для достаточно широкого круга задач, где целесообразно представление сложного исследуемого сигнала в виде композиции более простых составляющих. Метод позволяет получить новые типы информативных признаков, характеризующих вибрационный сигнал. Разработанное программное средство, позволяет выполнять разложение на внутренние модовые функции сигналов, полученных с помощью комплексов «Тембр» и «Тембр-М», или сигналов, которые имеют аналогичный формат данных. Архитектура программы построена таким образом, что обработка сигнала может распределяться по нескольким вычислительным узлам. Это особенно актуально, если необходимо исследовать сигналы, длительность от нескольких десятков минут до суточных временных интервалов, поскольку преобразование Гильберта-Хуанга представляет собой достаточно ресурсоемкую задачу.

Список литературы

- Клюев В.В. // Неразрушающий контроль. Справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика. М., 2005.
- Бранцевич, П.Ю. // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7 (93). – с. 5-10.
- Бранцевич П.Ю., Базаревский В.Э., Костюк С.Ф. // Механика 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике. Минск. 26–28 окт. 2011г. Т. II. С. 27-31.
- Бранцевич П.Ю. // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций. Сб. докл. Москва, ОАО «ВТИ», 2005. С. 115–121.
- Марпл С.Л. // Цифровой спектральный анализ. М., 1990.
- Оппенгейм А., Шаффер Р. // Цифровая обработка сигналов. Москва: Техносфера. 2006.
- Лайонс Р. // Цифровая обработка сигналов. Москва: Бином. 2006.
- Daniel T.L. Lee // Wavelet Analysis: Theory and Applications. Hewlett-Packard Journal. 1994.
- Chang S. G., Yu B. // Image Processing. Vetterli: IEEE Trans. 2000.
- Wigner E. // On the quantum correction for thermodynamic equilibrium. Physical Review. 1932.
- Роджерс Д., Адамс Дж. // Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001.
- Huang E., Samuel S.P // The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing.
- Huang E., Shen Z., Long S. R. // The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, pp. 903-995, 1998.
- Huang E. // An Introduction to Hilbert-Huang Transform: A Plea for Adaptive Data Analysis. Research Center for Adaptive Data Analysis.
- Quek, S., Tua, P., and Wang, Q. // Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert–Huang transform of real signals. Smart Materials and Structures 12, 2003, pp. 447-460.
- Давыдов В.А., Давыдов А.В. // Очистка геофизических данных от шумов с использованием преобразования Гильберта-Хуанга. Электронное научное издание "Актуальные инновационные исследования: наука и практика". 2010, № 1.
- Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф. // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. Минск. Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2013. С. 67-74.
- Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н., Костюк С.Ф. // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Могилев, Белорус. -Рос. ун-т, 2017. С. 418-423.

References

- Klyuyev V.V. // Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik. Tom 7. Kniga 2. Vibrodiagnostika. M., 2005.
- Brantsevich, P.YU. // Doklady BGUIR. – 2015. – № 7 (93). – s. 5-10.
- Brantsevich P.YU., Bazarevskiy V.E., Kostyuk S.F. // Mekhanika 2011: sb. nauch. tr. V Belorusskogo kongressa po teoret. i prikladnoy mekhanike. Minsk. 26–28 okt. 2011g. T. II. С. 27-31.
- Brantsevich P.YU. // Problemy vibratsii, vibronaladki, vibromonitoringa i diagnostiki oborudovaniya elektricheskikh stantsiy. Sb. dokl. Moskva, OAO «VTI», 2005. S. 115–121.
- Marpl S.L. // Tsifrovoy spektral'nyy analiz. M., 1990.
- Oppengeym A., Shaffer R. // Tsifrovaya obrabotka signalov. Moskva: Tekhnosfera. 2006.

Layons R. // Tsifrovaya obrabotka signalov. Moskva: Binom. 2006.
 Daniel T.L. Lee // Wavelet Analysis: Theory and Applications. Hewlett-Packard Journal. 1994.
 Chang S. G., Yu B. // Image Processing. Vetterli: IEEE Trans. 2000.
 Wigner E. // On the quantum correction for thermodynamic equilibrium. Physical Review. 1932.
 Rodzhers D., Adams Dzh. // Matematicheskiye osnovy mashinnoy grafiki. M.: Mir, 2001.
 Huang E., Samuel S.P // The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing.
 Huang E., Shen Z., Long S. R. // The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, pp. 903-995, 1998.
 Huang E. // An Introduction to Hilbert-Huang Transform: A Plea for Adaptive Data Analysis. Research Center for Adaptive Data Analysis.
 Quek, S., Tua, P., and Wang, Q. // Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert–Huang transform of real signals. Smart Materials and Structures 12, 2003, pp. 447–460.
 Davydov V.A., Davydov A.V. // Ochistka geofizicheskikh dannykh ot shumov s ispol'zovaniyem preobrazovaniya Gil'berta-Khuanga. Elektronnoye nauchnoye izdaniye "Aktual'nyye innovatsionnyye issledovaniya: nauka i praktika". 2010, № 1.
 Brantsevich P.YU., Kostyuk S.F. // Dostizheniya fiziki nerazrushayushchego kontrol: sb. nauchn. tr. Minsk. Institut prikladnoy fiziki NAN Belarusi, 2013. S. 67-74.
 Brantsevich P.YU., Bazylev Ye.N., Kostyuk S.F. // Sovremennyye metody i pribory kontrolya kachestva i diagnostiki sostoyaniya ob'yektov: sb. st. 6-y Mezhdunar. nauch. -tekhn. konf. Mogilev, Belarus. -Ros. un-t, 2017. S. 418-423.

Сведения об авторах

Мелешеня Д.В., аспирант кафедры ПОИТ
 Белорусского государственного университета
 информатики и радиоэлектроники.

Бранцевич П.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедры
 ПОИТ Белорусского государственного
 университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

D.U. Meliashchenya, PG student of the software for
 information technologies department of Belarusian
 state university of informatics and radioelectronics.

P.J. Brancevich, PhD, associate professor, associate
 professor the software for information technologies
 department of Belarusian state university of
 informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
 г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
 Белорусский государственный
 университет информатики и радиоэлектроники
 тел. +375-17-293-88-81;
 e-mail: branc@bsuir.edu.by
 Бранцевич Петр Юльянович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
 Minsk, P. Brovka st., 6,
 Belarusian state university
 of informatics and radioelectronics
 tel. +375-17-293-88-81;
 e-mail: branc@bsuir.edu.by
 Brancevich Petr Julianovich

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ТКАНИ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

И.В. САМУЙЛОВ, Л. М. ЛЫНЬКОВ, М.В. ДАВЫДОВ, Г. САГАЙМАРУФ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье описана модель биологических тканей для моделирования воздействия магнитных полей на ткани человека. Модель предназначена для определения амплитуды электрического сигнала, наведенного импульсным магнитным полем. Проведено экспериментальное исследование амплитуд наведенных сигналов. Разработана структурная схема для реализации аппаратно-программных средств мониторинга воздействия магнитных полей на ткани человека для оценки безопасности промышленных объектов.

Ключевые слова: Магнитное поле, модель биологических тканей, наведённые сигналы, распределение энергии.

Abstract. The article describes a model of biological tissues for modeling the effect of magnetic fields on human tissues. The model is designed to determine the amplitude of an electrical signal induced by a pulsed magnetic field. The experimental investigation of the amplitudes of the induced signals is carried out. The structural scheme for the implementation of hardware and software for monitoring the effect of magnetic fields on human tissue for the assessment of the safety of industrial facilities is developed.

Keywords: Magnetic field, model of biological tissues, induced signals, energy distribution.

Simulation of impact of magnetic fields on human tissue for safety evaluation of industrial objects

I.Samuilou, L. Lynkou, M. Davydov, G. Saghaymarouf

Введение

В современном мире человек окружен магнитными полями как естественного, так и техногенного характера. С техногенными полями высокой интенсивности человек сталкивается на промышленных, транспортных объектах, а также в медицинских учреждениях. Магнитные поля оказывают разнообразные эффекты на человека: электрические, тепловые, специфические и т.д. Из этого вытекает необходимость оценки данных влияний. В работе рассмотрена многослойная модель биологических тканей человека для исследования распределения импульсных магнитных полей на основе тканевых образцов пропитанных солевым раствором. Исследовано распределение наведенного электрического сигнала в моделях биологических тканей. Предложена структурная схема для реализации аппаратно-программных средств мониторинга воздействия магнитных полей на ткани человека для оценки безопасности промышленных объектов.

Теоретический анализ

В ряде работ описывается возможность создания электрической модели биологических тканей на основе растворов солей, в частности соли NaCl. На рисунке 1а изображена частотная проводимость ряда солевых растворов, от 0 до 0,09 молярной массы NaCl. Данные не скорректированы по поляризации электродов и индуктивности выводов. Также показаны скорректированные и нескорректированные данные для сердечной мышечной ткани, показанные для иллюстрации результата коррекции [1].

Как следует из приведенных зависимостей видно из графика на частотах 800 - 1100 Гц проводимость сердечной мышцы приблизительно равна проводимости сердечной мышцы. На рисунке 1б даны графики удельного сопротивления различных тканей [2]. Из данных следует что Из чего следует что при обработки материалов растворами солей они на определённых частотах воздействующих сигналов приобретут свойства идентичные биологическим тканям.

Использование влагосодержащих материалов для имитации биологических тканей на частотах выше 1ГГц рассмотрена в работах Я.Т.А. Аль-Адеми [3]

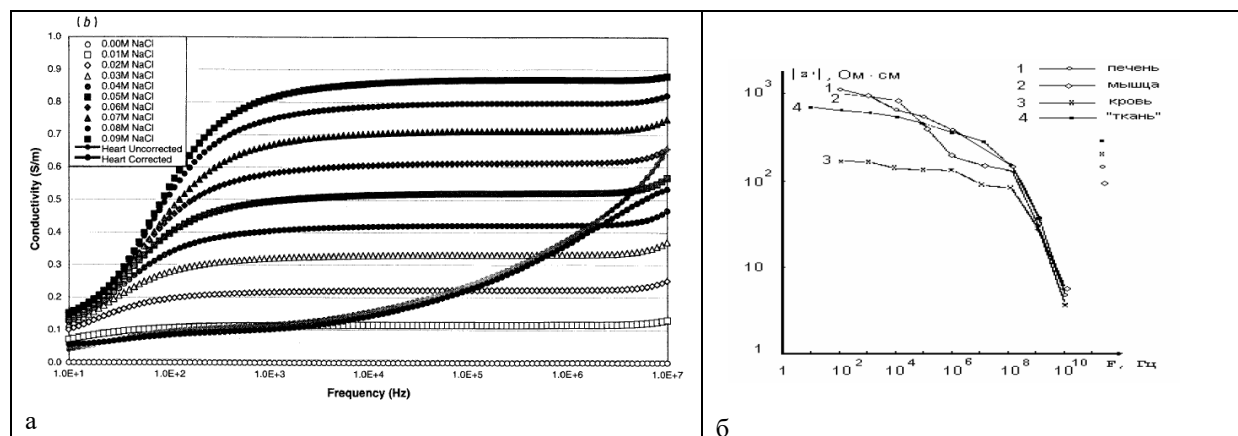


Рисунок 1. Электрические характеристики биологических тканей: а – проводимость ряда солевых растворов в сравнении с проводимостью сердечной мышцей; б – график удельного сопротивления различных тканей

Описание разработанной модели

В разработанной модели каждый слой ткани моделировал определённую ткань человека. Для исследования типы биологических тканей были выбраны следующими: кожа, мышечная ткань и жировая ткань. При частоте в 1кГц сопротивление биологических тканей составляет – 17 кОм/см, 240 Ом/см, 700 Ом/см соответственно. Для получения необходимых свойств ткань пропитывали раствором NaCl. На рисунке 2 показана как изменяется уровень удельного сопротивления образцов из войлока при изменении концентрации NaCl и уровня водонаполнения.

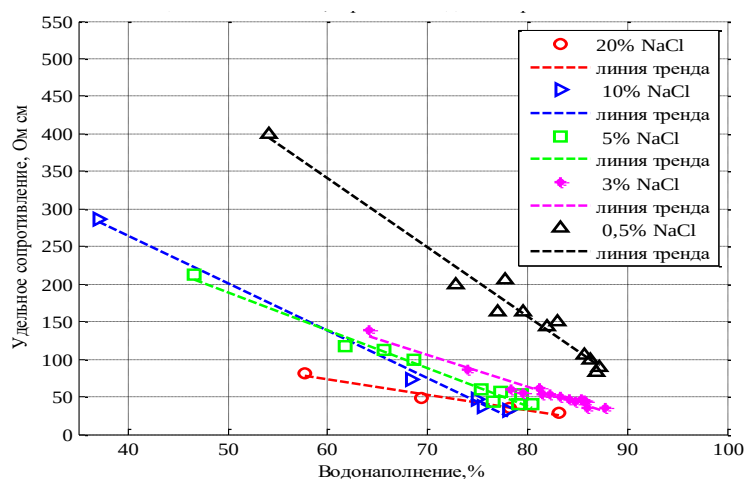


Рисунок 2. Зависимость концентрации раствора NaCl и уровня водонаполнения на удельное сопротивление образцов

В определённом диапазоне водонаполнения удельное сопротивление изменяется по линейному закону $Y=k_1 \cdot X+k_2$. Параметры данного выражения зависят от концентрации соли в растворе, от материала ткани используемой в модели, от силы прижатия измерительных электродов. Методика создания модели биологической ткани следующая:

подготовить образцы размером 70×50мм;
 приготовить раствор NaCl;
 распылить раствор над образцом с помощью пульверизатора;
 измерить вес образца, для фиксации образцов закрепить их на пластине из непроводящего материала;
 установить электроды на образце и измерить комплексное сопротивление образца на частоте в 1кГц измерителем иммитанса Е7-20;
 проверить соответствие сопротивления тканевой модели ее биологическому аналогу.

После создания одного слоя модели по выше описанной методике создаются остальные слои модели, после их помещают в один корпус разделив слои непроводящей пластиной, для предотвращения обмена между слоями ионами соли и влагой, схематично модель представлена на рисунке 3а.

На рисунке 3б дана схема проведения экспериментов. В ходе экспериментов индуктор перемещался вдоль образца а также изменялась высота индуктора (Н) над образцом

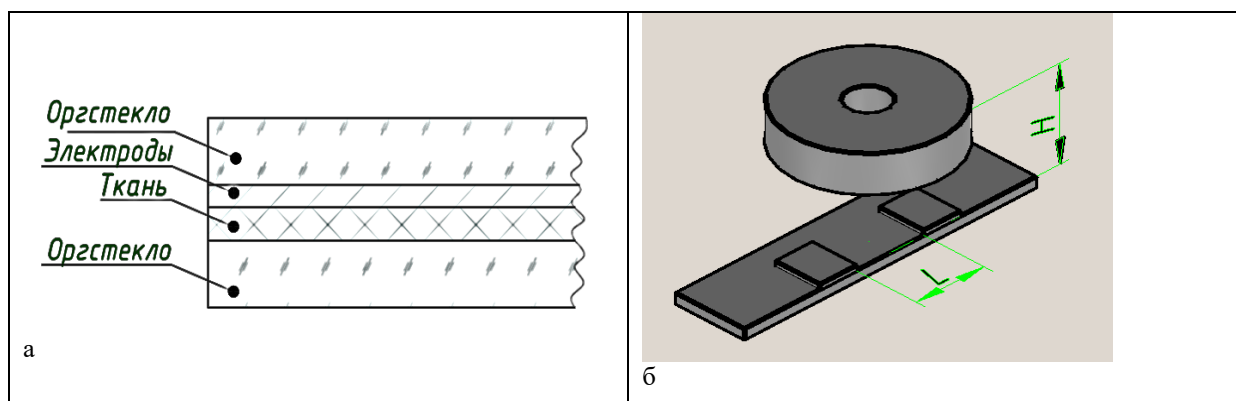


Рисунок 3. Схематичное изображение модели биологических тканей человека: а – изображение модели; б – схема проведения исследований

Методика исследования воздействия импульсных магнитных полей на модели биологических тканей

Импульсные магнитные поля создавались аппаратом Нейро–МС/Д. Использовался кольцевой индуктор с диаметром 17см. Максимальное напряжение магнитного поля составляло 0,8 Тл. Методика проведения исследования распределения амплитуды наведенных, импульсными магнитными полями, сигналов следующая:

закрепить электроды на исследуемом слое модели;
 закрепить индуктор на высоте 4,5 см от верхнего слоя образца;
 точку, равноудалённую от электродов, и совпадающую с осью излучения индуктора принять за начало координат;
 провести стимуляцию модели одиночным импульсом;
 снять амплитуду сигнала с осциллографа;
 переместить образец на 2 см вдоль модели;
 после снятия профиля амплитуд сигналов изменяем высоту индуктора и повторяем исследования.

Методика снятия наведённых сигналов с биологического образца:

вставить игольчатые электроды в биообразец, расстояние между электродами выдерживать в 3 см;
 провести стимуляцию модели одиночным импульсом;
 снять амплитуду сигнала с осциллографа;
 переместить образец на 2 см вдоль модели;
 после снятия профиля амплитуд сигналов изменяем высоту индуктора и повторяем исследования.

Экспериментальная часть

Исследовалась На рисунке 4а и 4б дана зависимость изменения формы сигнала от расстояния модели до излучателя в абсолютных и относительных величинах соответственно. Амплитуда сигнала сильно зависит от расстояния между индуктором и моделью. Чем ближе образец к излучателю, тем более локализовано поле. Кроме амплитуды изменяется форма профиля амплитуд, при удалении индуктора магнитное поле наводит сигнал более равномерно, изменяется расстояние в на котором амплитуда наведенных сигналов меняет свою полярность.

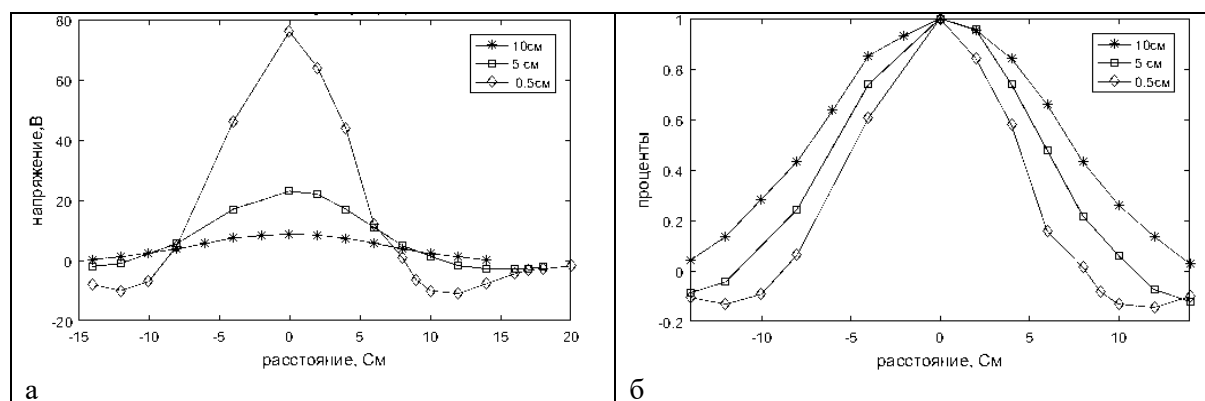


Рисунок 4. Форма сигналов полученные с модели: а – изменение формы сигнала в зависимости от расстояния модель-излучатель в абсолютных величинах; б – изменение формы сигнала в зависимости от расстояния модель-излучатель в относительных величинах.

На рисунке 5 показаны данные исследования уровня наведенных сигналов в тканях биообразца и в модели. В качестве аналога человеческих тканей выступили ткани свиньи. О возможности использования тканей животных в качестве аналогов тканей человека говорит тот факт что разница в электрических свойствах биологической ткани животных и человека не превышает внутривидовой разброс [4].

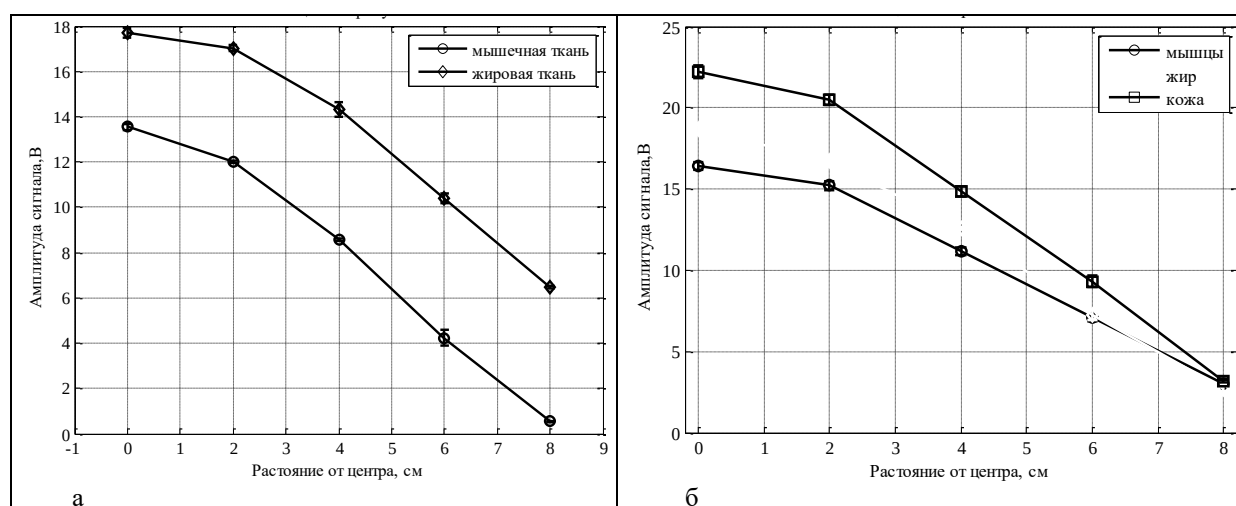


Рисунок 5. Амплитуда наведенного сигнала: а) – на биологическую ткань; б) – на модель. С ростом расстояния, до оси излучения индуктора, амплитуда наведенного сигнала значительно падает. Наибольшая амплитуда сигнала зарегистрирована в слое моделирующую кожу т.к. этот слой максимально близок к индуктору и это слой с максимальным сопротивлением. Амплитуда в биообразце падала равномерно в различных тканях, в модели наблюдается не равномерная скорость изменения амплитуды наведенных сигналов

На рисунке 6 изображена структурная схема для реализации аппаратно-программных средств мониторинга воздействия магнитных полей на ткани человека для оценки безопасности промышленных объектов. Несколько моделей биологических тканей определяют уровень наведенного сигнала в определенной ткани, предполагается использовать модели серого, белого вещества головного мозга и мышечной ткани. Сигнал с модели попадает на буферный усилитель, усиленный сигнал попадает на вход коммутатора, который подает на выход сигнал с определённой модели, переключение входов происходит под действием управляющих сигналов с микроконтроллера, АЦП переводит сигнал из аналогового вида в цифровой, микроконтроллер формирует пакеты данных и передает их через беспроводной интерфейс на персональный компьютер.



Рисунок 6. Структурная схема средства мониторинга воздействия магнитных полей

Список литературы

- [1] Electrical Properties of Biological Tissue/ RONALD PETHIG/ Institute of Molecular and Biomolecular Electronics University College of North Wales Bangor, United Kingdom, 2002
- [2] Тихомиров, А.М. Импеданс биологических тканей и его применение в медицине / А.М. Тихомиров // Российской государственной медицинской академии, 2006
- [3] Пулко Т.А., Я.Т.А. Аль-Адеми, Давыдов М.В., Насонова Н.В., Лыньков Л.М. Влагосодержащие экраны для защиты пользователей бытовых и промышленных СВЧ-источников// Биомедицинская радиоэлектроника. – 2013. -№4. – С. 50-56
- [4] The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz/ S Gabriel, R W Lau and C Gabrie// Physics in Medicine & Biology №41

References

- [1] Electrical Properties of Biological Tissue / RONALD PETHIG / Institute of Molecular and Biomolecular Electronics University of North Wales, Bangor, United Kingdom, 2002
- [2] Tikhomirov, A.M. Impedance of biological tissues and its use in medicine / A.M. Tikhomirov // Russian State Medical University, 2006
- [3] Pulko TA, Ya.T.A. Al-Ademi, Davydov MV, Nasonova NV, Lynkov LM Moisture-containing screens for protection of users of household and industrial microwave sources // Biomedical radioelectronics. - 2013.-№4. - P. 50-56
- [4] The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz / S Gabriel, R W Lau and C Gabrie // Physics in Medicine & Biology №41

Сведения об авторах

Самуйлов И.В. Магистрант БГУИР

Давыдов М.В. Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических

Information about the authors

Samuylov I.V. The master student of BSUIR

Davydov M.V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theoretical Basics of Electrical Engineering,

основ электротехники БГУИР

Лыньков Л. М. Доктор технических наук
профессор кафедры защиты информации БГУИР

Сагаймаруф, Г. аспирант БГУИР

Адрес для корреспонденции

Беларусь почтовый индекс 211390
г. Орша,
ул. Якубовского д. 9, кв. 1
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
+3756138828
ivsamuil@tut.by
Самуйлов Иван Владимирович

Служебный тел. (017) 293 8606
Домашний адрес, тел. 222750 г. Фаниполь, пер.
Богдасhevского, 2-71,
Моб. тел. _ + 375 29 5034881
E-mail: davydov-mv@bsuir.by
Давыдов Максим Викторович

BSUIR

Lynkov LM Doctor of Technical Sciences Professor
of the Department of Information Protection of the
Belarusian State University of Information
Technologies

Sagaymaruf, G. Postgraduate student of BSUIR

Address for correspondence

Belarus postal code 211390
Orsha,
ul. Yakubovskogo d. 9, Apt. 1
Belarusian State University of Informatics and
Radioelectronics
+3756138828
ivsamuil@tut.by
Samuylov Ivan Vladimirovich

Office phone. (017) 293 8606
Home address, tel. 222750 Fanipol, trans.
Bogdashevsky, 2-71,
Mob. Tel. _ + 375 29 5034881
E-mail: davydov-mv@bsuir.by
Davydov Maksim Viktorovich

ФОРМИРОВАНИЕ У ЧЕЛОВЕКА НАВЫКА ЭКСТРЕННОГО РЕАГИРОВАНИЯ НА ВНЕШНИЕ СТИМУЛЫ ДВИЖЕНИЯМИ РУКИ И ТЕЛА

В.А. ДУБОВСКИЙ¹, В.В. САВЧЕНКО¹, Н.В. ЩЕРБИНА², А.Ф. КУЗЬМЕНКО²

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси
Академическая, 12, Минск, 220072, Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Аннотация. Исследован процесс обучения человека экстренному реагированию на внешние стимулы с использованием балансировочной стабилметрической платформы с визуальной обратной связью по отклонению опорной поверхности от горизонтального положения. Выявлены особенности и проведен сравнительный анализ процесса формирования у человека навыка экстренного реагирования на зрительные стимулы движениями руки и центра тяжести тела. Результаты исследования являются научным обоснованием применения балансировочных стабилметрических систем для восстановления или развития двигательных функций человека, в том числе и для выработки профессионально важных качеств у операторов человеко-машинных систем.

Ключевые слова: двигательное обучение, время реакции, система «человек-машина», функциональное состояние, профессионально важные качества.

Abstract. In this paper we present some results concerning the use of an unstable balance platform equipped with visual feedback of the support surface inclination to train human ability to react quickly with the movements of the hand and the center of gravity of the body. The results of the study demonstrated that the balancing stabilometric systems are effective means of acquiring professionally important qualities of man-machine systems operators.

Keywords: motor learning, response time, "man-machine" system, functional state, professionally important qualities.

Введение

Изучение механизмов двигательного обучения, несмотря на многочисленные исследования в этом направлении, остается одной из центральных задач физиологии моторной активности человека применительно к таким областям, как медицинская реабилитация, подготовка спортсменов, профотбор и выработка профессионально важных качеств операторов систем «человек-машина» [1]. Известно, что двигательные (сенсомоторные) реакции человека являются формой целенаправленного поведения с полезным для субъекта приспособительным результатом и предполагают взаимодействие сенсорных и двигательных систем [2, 3]. Информация, поступающая от сенсорных анализаторов, приводит к запуску определенных двигательных программ, а также активизирует отделы центральной нервной системы (ЦНС), ответственные за контроль над этими программами и их корректировку.

Одним из подходов к изучению сенсомоторной активности человека является регистрация и анализ времени экстренных двигательных реакций, основанных на предварительной инструкции [2–4]. Словесная инструкция создает доминирующую мотивацию, или цель действия, которая заключается в максимально быстром реагировании движением на заранее обусловленный сигнал – информационный пусковой стимул. Под временем реакции понимается интервал времени между появлением сигнала и ответной реакцией, который включает в себя следующие компоненты [3–5]: время возбуждения рецептора и послышки импульса в соответствующий чувствительный центр; время обработки сигнала в ЦНС; время

принятия решения о реагировании на сигнал; время передачи сигнала по эфферентным волокнам к мышцам; время развития возбуждения в мышцах и преодоления инерции тела или его отдельного звена. Основными типами сенсомоторных реакций считаются [3–5]:

- Простая реакция, когда испытуемый реагирует на появление любого стимула одним и тем же способом (например, нажатием определенной кнопки).
- Реакция различения, когда испытуемый определенным способом реагирует лишь на один вид раздражителя, игнорируя все другие.
- Реакция выбора, когда испытуемый реагирует одним способом на один раздражитель и другими способами на другие.

К настоящему времени проведено большое количество исследований, в ходе которых в основном изучались такие проблемы, как влияние внешних факторов, индивидуальных особенностей и психофизиологического состояния человека на время его реакции, а также анализировались механизмы познавательных процессов в когнитивной психологии [4]. Авторам неизвестны работы, в которых был бы исследован процесс обучения человека, находящегося в вертикальной позе, экстренному реагированию на внешние стимулы движениями центра тяжести (ЦТ) тела. Подобного рода исследования позволили бы получить дополнительные данные о процессе формирования навыка произвольного управления ЦТ тела и провести сравнительный анализ результатов, полученных при формировании у человека навыка экстренного реагирования на зрительные стимулы движениями руки и ЦТ. Данная постановка задачи легла в основу настоящей работы.

Методика эксперимента

В исследовании принимали участие 28 здоровых испытуемых, не имеющих повреждений опорно-двигательного аппарата, в возрасте от 21 до 70 лет. Средний возраст составил 39,6 года. Все участники были заранее проинформированы о цели и содержании исследования и дали согласие на проведение эксперимента. Для исследования был использован программно-аппаратный стабилометрический комплекс «Стабилотренажер Д-01», разработанный в ОИМ НАН Беларуси. Данный комплекс содержит балансировочную платформу, которая характеризуется наличием ряда устойчивых положений, и позволяет измерять способность человека экстренно реагировать на зрительные стимулы целенаправленными движениями рук и ЦТ тела (тест «Реакция») [6].

Испытуемые были разделены на две группы по 14 человек. Первая группа (средний возраст 39,4 года) обучалась экстренному реагированию на зрительные стимулы целенаправленными движениями ЦТ тела путем непрерывной тренировки в течение 10 сеансов. Тренировочный сеанс состоял из четырех этапов, на каждом из которых испытуемый, стоя в вертикальной позе на балансировочной платформе в одном из ее устойчивых положений, должен был как можно быстрее изменить положение ЦТ тела в заданном направлении в ответ на определенный зрительный стимул на экране монитора. На каждом этапе измерялось время t_p реакции испытуемого как время между предъявлением стимула и началом движения платформы. Окно с визуальной обратной связью по положению платформы в тесте «Реакция» показано на рисунке 1.

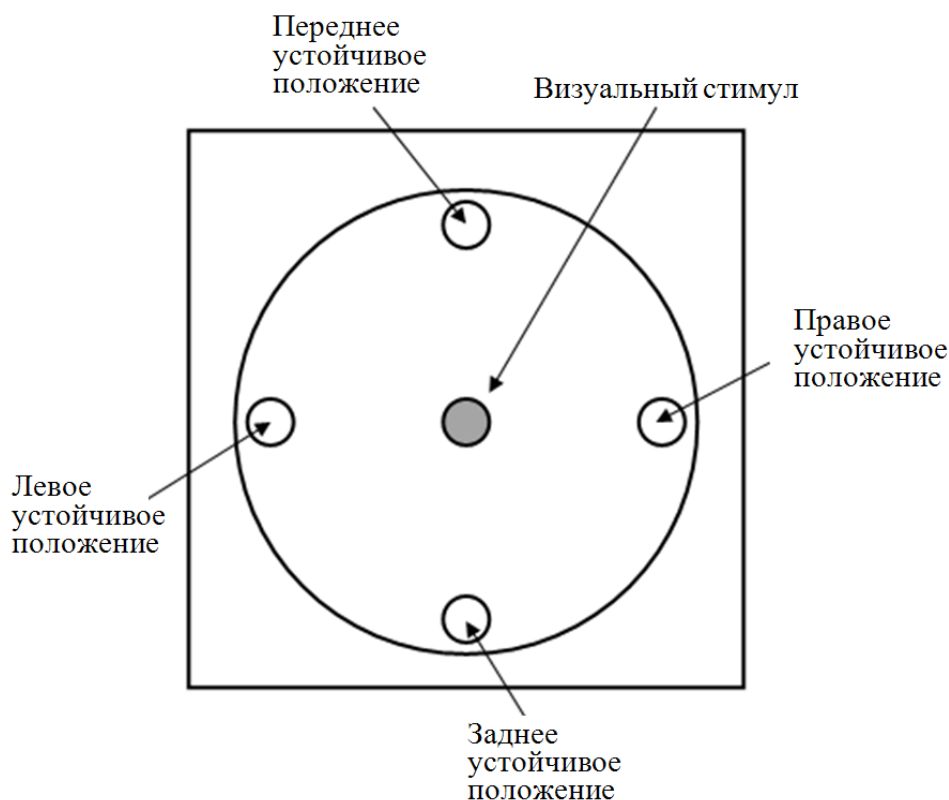


Рис. 1. Окно с визуальной обратной связью по положению опорной платформы в тесте «Реакция»

На первом этапе испытуемый, стоя на платформе так, чтобы она находилась в заднем устойчивом положении, должен был реагировать на появление визуального стимула перемещением ЦТ тела вперед. На втором этапе испытуемый реагировал из переднего устойчивого положения платформы перемещением ЦТ тела назад. На третьем и четвертом этапах аналогичным образом измерялось время реакции испытуемого в направлениях влево и вправо. После четвертого этапа вычислялось среднее время реакции испытуемого за пройденный сеанс тренинга. По завершении 10 сеансов тренировочного процесса балансирующую платформу устанавливали на столе и предлагали испытуемому пройти один раз тест «Реакция», реагируя на предъявляемые стимулы движениями правой руки (11-й сеанс). Испытуемые второй группы (средний возраст 39,8 года) обучались экстренному реагированию на зрительные стимулы целенаправленными движениями правой руки путем непрерывной тренировки также в течение 10 сеансов, после чего проходили один раз тест «Реакция» (11-й сеанс), реагируя на предъявляемые стимулы движениями ЦТ тела.

По завершении тренировочного процесса в каждой из групп рассчитывали средние значения времени t_p реакции по каждому сеансу, на основании которых получали динамику формирования навыка экстренного реагирования на внешние стимулы. Под «обучением» понималось изменение успешности выполнения задания в течение тренировочного процесса, которое характеризует способность к формированию новой двигательной координации [7]. Для оценки обучения производили регрессионный анализ и сравнивали углы наклона линий регрессии, описывающих полученные нами кривые обучения в ходе 10-сеансовой тренировки.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 приведены наиболее характерные результаты тренинга отдельных испытуемых из первой и второй групп.

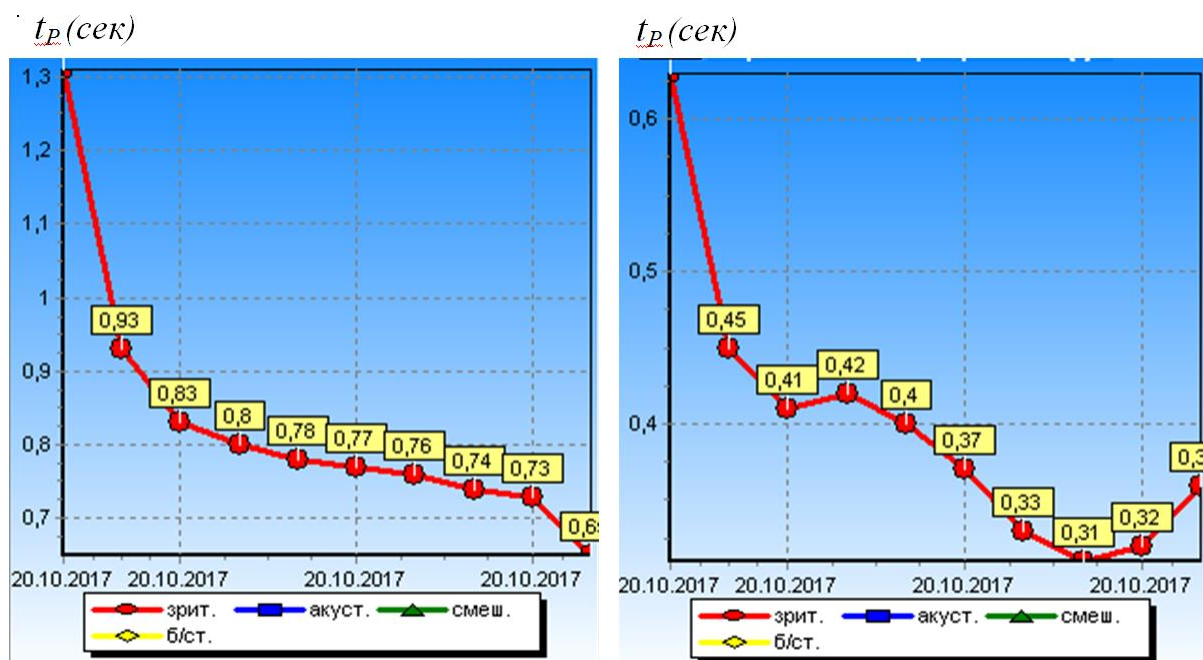


Рис. 2. Динамика времени t_p реакции на внешние стимулы испытуемого А из 1-й группы (а) и испытуемого Б из 2-й группы (б)
Динамика формирования навыка экстренного реагирования на внешние стимулы в первой и второй группах испытуемых представлена на рисунке 3.

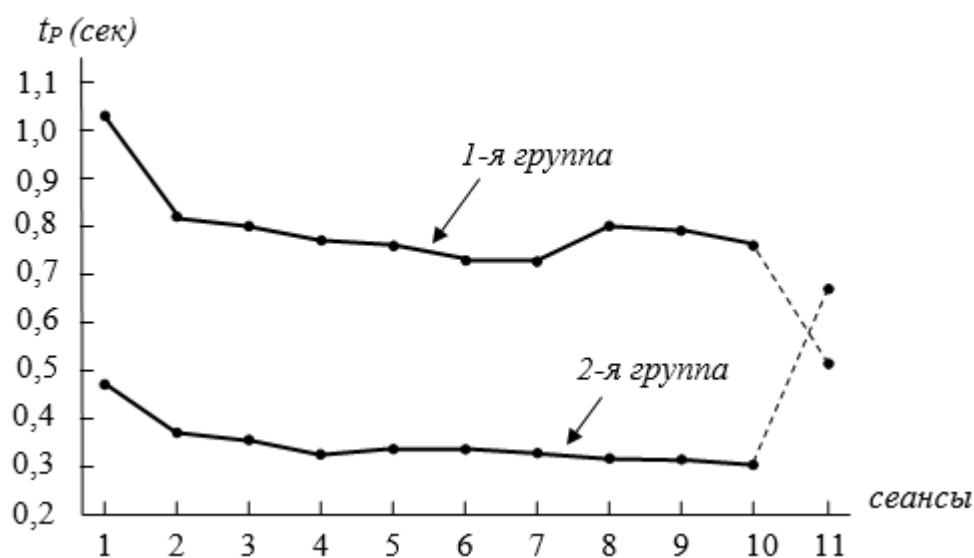


Рис. 3 Динамика успешности выполнения теста «Реакция» в 1-й и 2-й группах испытуемых
Результаты регрессионного анализа проведенного процесса обучения в первой и второй группах испытуемых в течение 10-ти сеансов приведены на рисунке 4.

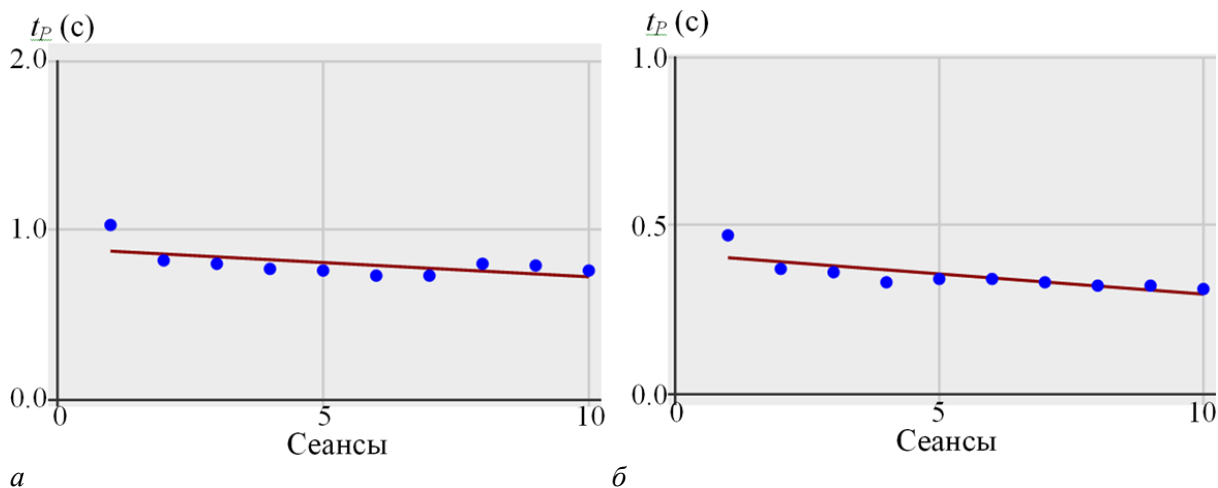


Рис. 4 Линия регрессии, описывающая ход обучения испытуемых 1-й группы (а) и испытуемых 2-й группы (б)

Результаты исследования показывают, что время t_p реакции испытуемых движением ЦТ тела в среднем более чем в два раза выше, чем движением руки. Вероятно, это может быть связано с тем, что в первом случае необходимо преодолеть инерцию тела с существенно большей массой и подключением большего количества мышц, а также с тем, что двигательные функции рук существенно более развиты, чем функция движения тела. При этом эффективность тренировки навыка экстренного реагирования на зрительные стимулы движениями ЦТ тела (коэффициент $a = -0.0169$) несколько выше, чем движениями руки (коэффициент $a = -0.0121$), что также объясняется более высоким уровнем развития двигательных функций рук и соответственно большими неиспользованными резервами нейронных структур ЦНС, ответственных за перемещения ЦТ тела.

Результаты исследования также показали, что тренировка испытуемых 1-й группы экстренному реагированию на внешние стимулы ЦТ своего тела не оказала позитивного влияния на функцию реагирования рукой, среднее значение показателя t_p которой в 11-м сеансе составило 0,51 с и близко к среднему начальному значению данного показателя (0,47 с), полученному во 2-й группе. В то же время исследования показали, что тренировка испытуемых 2-й группы экстренному реагированию движениями руки существенно повысила эффективность функции реагирования ЦТ тела, о чем свидетельствует полученное в 11-м сеансе среднее значение $t_p = 0,68$ с, которое оказалось даже ниже среднего значения (0,76 с) данного показателя завершающего сеанса тренировки испытуемых 1-й группы.

Как известно, в системах «человек-машина», одним из ключевых факторов, обеспечивающих безопасность функционирования, является функциональное состояние оператора непосредственно во время выполнения алгоритмов деятельности, в частности, текущие параметры профессионально важных качеств, необходимых для конкретного вида деятельности, например, параметры готовности к экстренному выполнению алгоритмов деятельности. Известно, что на автомобильном транспорте, по причине «человеческого фактора», происходит до 90% аварий. При этом в 57 % происшествий водительская ошибка является практически единственным фактором, который мог привести к аварии [8]. Лишь 2,4 % несчастных случаев можно объяснить исключительно технической неисправностью, а неблагоприятная окружающая среда (например, гололед) обуславливает 4,7 % дорожных происшествий. Остальные 35,9 % дорожно-транспортных происшествий (ДТП) происходят в силу сложного сочетания различных факторов. Данные, собранные в отдельных странах, как правило, незначительно отличаются от этих среднемировых показателей.

На основе анализа причин ДТП, получено следующее распределение ошибок водителей по категориям: ошибка пропуска – существенное действие не выполнено; ошибка исполнения – выполненное действие неправильно; экстраординарная ошибка – совершенное действие не должно было быть выполнено; последовательная ошибка – порядок выполнения действий был неправильным; временная ошибка – время выполнения действий было неправильным.

Сравнение этих категорий ошибок с причинами ДТП показывает, что задержка распознаваемости предметов, в результате которой происходит около 50 % ДТП, зависит главным образом от временной ошибки. Принятие ошибочных решений водителями является

причиной 40 % всех ДТП (ошибки исполнения). Неправильные действия водителей по управлению транспортным средством – причины 5 % всех ДТП (экстраординарная ошибка). У водителей, управляющих транспортным средством в состоянии уменьшенной степени бодрствования, повышается вероятность быть вовлеченными в ДТП ввиду того, что время реакции увеличивается из-за падения способности быстро реагировать и обрабатывать многочисленную информацию, а также из-за мышечной релаксации. В таком состоянии водителю требуется 3–4 с для отжатия педали тормоза вместо 0,7 с в нормальном состоянии. Уменьшение этого времени на 0,5 с сокращает приблизительно 60% наездов сзади, 50 % ДТП на перекрестках и 30 % ДТП с участием встречных транспортных средств. При уменьшении времени реакции на 1 с на 90% сокращаются наезды сзади и ДТП на перекрестках, предотвращается свыше 60 % встречных столкновений автомобилей [8].

Заключение

Исследован процесс обучения человека экстренному реагированию на внешние стимулы с использованием балансировочной стабилметрической платформы с визуальной обратной связью по отклонению опорной поверхности от горизонтального положения. Показано, что способность человека экстренно реагировать на внешние стимулы движением ЦТ тела существенно ниже, чем движением руки. При этом эффективность тренировки навыка экстренного реагирования на зрительные стимулы в первом случае несколько выше, чем во втором. Результаты исследования также показали, что тренировка экстренному реагированию на внешние стимулы движением ЦТ тела не оказала позитивного влияния на функцию реагирования рукой. В то же время тренировка экстренному реагированию движением руки оказала позитивное влияние на функцию управления ЦТ тела, существенно повысив ее эффективность при реагировании на внешние стимулы. Результаты исследования являются научным обоснованием применения балансировочных стабилметрических систем для восстановления или развития двигательных функций человека, в том числе и для выработки профессионально важных качеств у операторов человеко-машинных систем.

Список литературы

- Шейн А.П., Криворучко Г.А., Сайфутдинов М.С. Особенности формирования навыка зрительно-моторного слежения с использованием изометрических органов управления у ортопедических больных в различные сроки после устранения асимметрии в длине нижних конечностей // Физиология человека. 2005. Том 31, № 4. С. 70–80.
- Боксер О.Я., Судаков К.В. Системный анализ двигательных реакций человека в разных режимах работы целенаправленного поведенческого акта // Успехи физиологических наук. 1981. №1. С. 3–31.
- Нехорошкова А.Н., Грибанов А.В., Депутат И.С. Сенсомоторные реакции в психофизиологических исследованиях // Журнал медико-биологических исследований. 2015. № 1. С. 38–48.
- Зайцев А.В., Лупандин В.И., Сурнина О.Е. Время реакции в теоретических и прикладных исследованиях // Психологический вестник Уральского государственного университета. Вып.3. Екатеринбург: Изд-во «Банк культурной информации», 2002. С.3–20.
- Никандров В.В. Психомоторика. СПб: Речь, 2004. 104 с.
- Dubovsky V.A., Mironovich G.K. Rehabilitation: Practices, Psychology and Health. Nova Science Publishers, Inc. / Ed. R. Lagana and S. M. Esposito. NY, 2012. Ch.5. P. 113–124.
- Устинова К.И., Иоффе М.Е., Черникова Л.А. Возрастные особенности произвольного управления вертикальной позой // Физиология человека. 2003. Том 29, № 6. С. 74–78.
- Савченко В.В. Развитие методологии мониторинга функциональных состояний операторов транспортных систем «человек-машина» // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 6. С. 27–32.

References

- Shain A.P., Krivoruchko G.A., Sayfutdinov M.S. Osobennosti formirovaniya navika zritelno-motornogo slezeniya s ispolzovaniem izometricheskikh organov upravleniya u ortopedicheskikh bolnih v razlichnie sroki posle ustraneniya asimmetrii v dline niznih konechnostei // Fiziologiya cheloveka. 2005. Том 31, № 4. С. 70–80. (in Russ.)

Bokser O.Y., Sudakov K.V. Systemniy analiz dvigatelnykh reaktsiy cheloveka v raznykh rezimakh raboti celepravlennoogo povedencheskogo akta // Uspehi fiziologicheskikh nauk. 1981. №1. S. 3–31. (in Russ.)

Nehoroshkova A.N., Gribanov A.V., Deputat I.S. Sensomotornie reaktsii v psihofiziologicheskikh issledovaniyakh // Zurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy. 2015. № 1. S. 38–48. (in Russ.)

Zaycev A.V., Lupandin V.I., Surnina O.E. Vremya reaktsii v teoreticheskikh i prikladnykh issledovaniyakh // Psihologicheskii vestnik Uralskogo gosuniversiteta. Vip.3. Ekaterinburg: Izd-vo «Bank kulturnoy informatsii», 2002. S.3–20. (in Russ.)

Nikandrov V.V. Psihomotorika. SPb: Rech, 2004. 104 s.

Dubovsky V.A., Mironovich G.K. Rehabilitation: Practices, Psychology and Health. Nova Science Publishers, Inc. / Ed. R. Lagana and S. M. Esposito. NY, 2012. Ch.5. P. 113–124.

Ustinova K.I., Ioffe M.E., Chernikova L.A. Vozrastnye osobennosti proizvodnogo upravleniya vertikalnoy pozoy // Fiziologiya cheloveka. 2003. Том 29, № 6. S. 74–78.

Savchenko V.V. Razvitiye metodologii monitoringa funktsionalnykh sostoyaniy operatorov transportnykh system «chelovek-mashina» // Mehatronika, avtomatizatsiya, upravlenie. 2013. № 6. S. 27–32.

Сведения об авторах

Дубовский В.А., старший научный сотрудник
НИЦ «Бортовые системы управления мобильных
машин» ГНУ «Объединенный институт
машиностроения НАН Беларуси»

Савченко В.В., к.т.н., директор НИЦ Бортовых
систем управления мобильных машин ГНУ
«Объединенный институт машиностроения НАН
Беларуси»

Щербина Н.В., старший преподаватель кафедры
инженерной психологии и эргономики
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники
Кузьменко А.Ф., студент факультета
компьютерного проектирования Белорусского
государственного университета информатики и
радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул.
Академическая, д. 12, ГНУ «Объединенный
институт машиностроения НАН Беларуси»
тел. +375-17-284-26-12;
e-mail: v_dubovsky@tut.by
Дубовский Владимир Андреевич

Information about the authors

Dubovsky V.A., senior researcher of the research
and engineering center “Onboard control systems of
mobile machines” of the Joint institute of
mechanical engineering of the National academy of
sciences of Belarus.

Savchenko V.V., Ph.D., director of the research and
engineering center “Onboard control systems of
mobile machines” of the Joint institute of
mechanical engineering of the National academy of
sciences of Belarus.

Shcherbina N.W., senior lecturer of Engineering
Psychology and Ergonomics department of
Belarusian state university of informatics and
radioelectronics

Kuzmenko A.F., student of computer design
department of Belarusian state university of
informatics and radioelectronics

Address for correspondence

220072, Belarus, Minsk, Akademicheskaya Str., 12,
Joint institute of mechanical engineering of the
National academy of sciences of Belarus
Phone. +375-17-284-26-12;
e-mail: v_dubovsky@tut.by
Dubovsky Vladimir Andreevich

ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

И.И. ЗАБЕНЬКОВ, Д.В. АРХИПЕНКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье проводится сравнительный анализ радиосистем передачи информации с модуляцией OFDM. Представлены достоинства и недостатки различных систем по вероятности ошибки (BER), предложены способы повышения помехозащищенности и пропускной способности сверхширокополосных радиосистем передачи данных.

Ключевые слова: OFDM, помехозащищенность, MIMO, передающие и принимающие устройства, скорости передачи информации.

Abstract. This article provides a comparative analysis of communication systems with OFDM modulation the advantages and disadvantages of the various systems on the probability of error (BER), proposed method of increasing noise immunity and bandwidth of ultra-wideband radio data transmission.

Keywords: OFDM, noise immunity, MIMO transmitting device and receiving device, the transfer rate of information.

Введение

Для систем мониторинга природных и техногенных объектов необходим широкий канал с высокой скоростью передачи данных. Для данных условий предполагаем использовать сверхширокополосные системы передачи данных на основе OFDM и его модификаций.

Кратко можно выделить основные положительные и отрицательные стороны OFDM.

Достоинства:

Высокая эффективность использования радиочастотного спектра, объясняемая почти прямоугольной формой огибающей спектра при большом количестве поднесущих.

Простая аппаратная реализация: базовые операции реализуются методами цифровой обработки.

Способность противостоять сложным условиям в радиоканале, в первую очередь устранять межсимвольную интерференцию и бороться с узкополосными помехами. Как следствие – лояльность к многолучевому распространению.

Возможность использования различных схем модуляции для разных поднесущих, что позволяет адаптироваться к условиям распространения сигнала и к различным требованиям к качеству принимаемого сигнала.

Делает возможными одночастотные сети, что особенно привлекательно в системах телевизионного вещания, радиовещания и мониторинга техногенных объектов.

В каналах с относительно медленными изменениями возможно существенное увеличение пропускной способности за счет адаптации скорости передачи данных на каждой поднесущей в соответствии с отношением сигнал/шум для этой конкретной поднесущей.

Недостатки:

Необходима высокая синхронизация частоты и времени. Чувствительность к эффекту Доплера, ограничивающая применение OFDM в мобильных системах.

Имеет сравнительно большое отношение пиковой мощности к средней (*peak-to-average power ratio* – *PAPR*), что приводит к снижению энергетической эффективности высокочастотных

усилителей. Не идеальность современных приёмников и передатчиков вызывает фазовый шум, что ограничивает производительность системы.

Защитный интервал, используемый в OFDM для борьбы с многолучевым распространением, снижает спектральную эффективность сигнала [1,2].

Повышение пропускной способности сигналов с OFDM модуляцией

Для повышения пропускной способности сигналов с OFDM модуляцией предполагается использовать метод OFDM/OQAM, который основан на переносе действительной и мнимой части в комплексные QAM символы, смещением их во времени. В своей общей форме OFDM/OQAM полоса эквивалентна сигналу, который может сформирован суммой N OQAM модуляций. Алгоритмы переноса сигнала в непрерывную временную область [3] показаны на рис. 1 и 2.

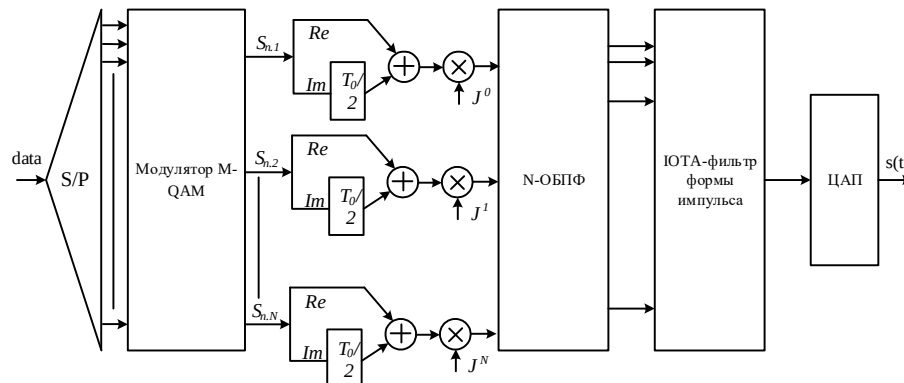


Рис. 1. Передающая часть IOTA-OFDM

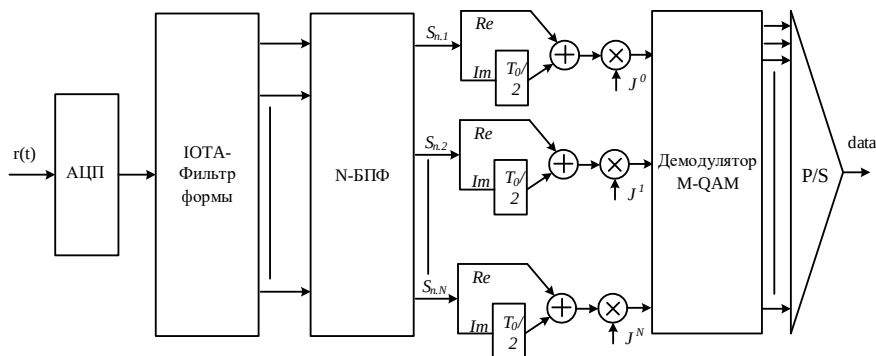


Рис. 2. Приемная часть IOTA-OFDM

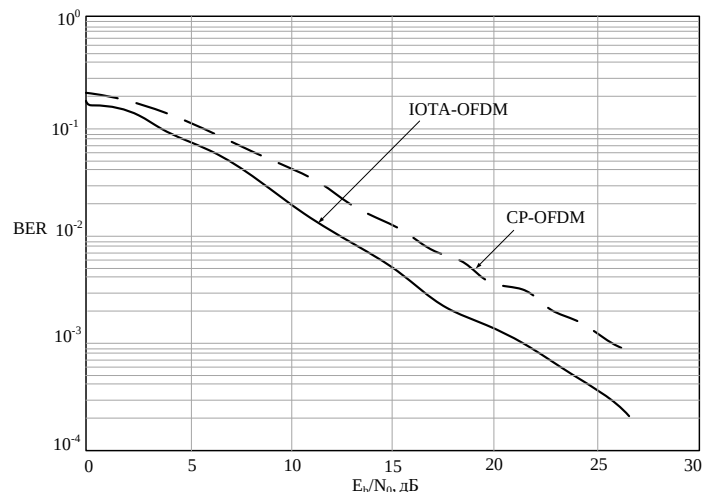


Рис. 3. Поведение коэффициента BER, для IOTA-OFDM и CP-OFDM

Улучшение помехозащищённости систем с OFDM

Применение технологии *MIMO* преследует две цели – повышение надежности приема/передачи и обеспечение связи по пространственно-разделенным каналам (*SDM*). В первом случае используется так называемый пространственно-временной блочный код (*STBC*), повышение скорости передачи происходит за счет сокращения проверочных последовательностей и уменьшения защитных интервалов (для *CP-OFDM*). При *SDM* скорость увеличивается благодаря распараллеливанию потоков транслируемых данных[2,3].

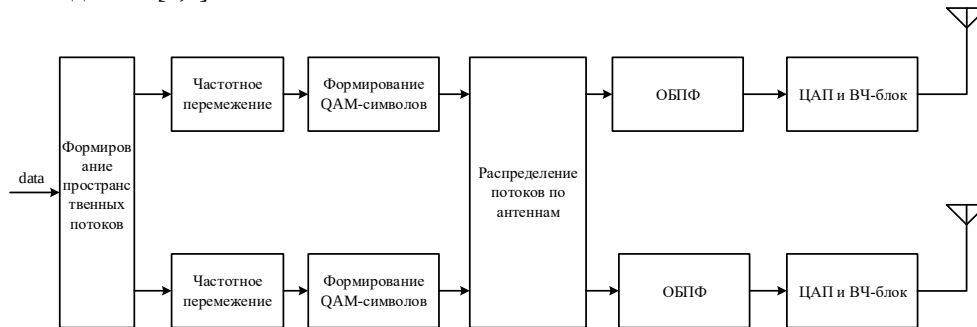


Рис. 4. Схема передатчика OFDM с использованием MIMO

Заключение

В данной статье рассмотрели вопросы, относящиеся к отношению *BER* для *CP-OFDM* и *IOTA-OFDM* для несовершенными системами. Результаты моделирования показывают, что *IOTA-OFDM* работает лучше, чем *CP-OFDM*: пропускная способность *IOTA-OFDM* увеличивается из-за отсутствия *CP*, повышается невосприимчивость к интерференции и уменьшает чувствительность к смещению частоты. Это создает существенные улучшения для пропускной способности при сравнении *BER*. Например, $BER = 10^{-3}$ *IOTA-OFDM* имеет выигрыш примерно на 4дБ, чем *CP-OFDM*, рис.3. Используя технологию *MIMO* с *IOTA-OFDM* можно добиться высокой скорости передачи информации, при обеспечении высокой помехозащищенности в населенных пунктах.

Список литературы

Энциклопедия WiMAX путь к 4G, В.Вишневский [и др.] – М.: Техносфера, 2009. – 472с.
Слюсарь В. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов / В.Слюсарь // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес – Сети и телекоммуникации, 2005. – С.52-58.
A Comparison of CP-OFDM with IOTA-OFDM Under Typical System Imperfections / Stephen Mann Tait Electronic, Tait Elec. – University of Canterbury, New Zealand– 2009.

References

Encyclopedia WiMAX path to 4G, V. Vishnevsky [and others] – M.: Technosphere, 2009. – 472p.
Slyusar V. Systems MIMO: principles and signal processing / V. Slyusar // ELECTRONICS: Science, Technology, Business Networks and telecommunications, 2005. – P. 52-58.
A Comparison of CP-OFDM with IOTA-OFDM Under Typical System Imperfections / Stephen Mann Tait Electronic, Tait Elec. – University of Canterbury, New Zealand– 2009.

Сведения об авторах

Забеньков Игорь Иванович, д.т.н, профессор,
профессор БГУИР.
Архипенков Дмитрий Владимирович,
магистрант БГУИР

Information about the authors

Zabenkov I.I., D. Sci., professor, professor of
Belarusian state university of informatics and
radioelectronics.
Arkhipov D.V., master student of Belarusian state
university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,

г. Минск, ул. П.Бровки, д.6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-260-74-76 (МТС)
e-mail: rembolt94@gmail.com
Архипенков Дмитрий Владимирович

Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university of
informatics and radioelectronics
tel. +375-29-260-74-76 (MTC)
e-mail: rembolt94@gmail.com
Arkhipenkov Dmitry Vladimirovich

ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОЙ КООРДИНАЦИИ СТАНЦИЙ НАВЕДЕНИЯ

Н.В. ХАДЖИНОВА, М.П. РЕВОТЮК, О.В. КОТ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена задача оптимальной координации станций наведения в терминах задачи о динамическом назначении, когда множества целей, а также средств их подавления с оценками эффективности формируются в реальном времени. Предложена модель и алгоритм построения оптимального назначения, на основе которых формируется программа ориентации антенн станций наведения.

Ключевые слова: координация станций наведения, метод динамического программирования,

Abstract. The problem of optimal coordination of the guidance stations in terms of the dynamic assignment problem is considered, when sets of targets, as well as their suppression means with efficiency estimates are generated in real time. A model and an algorithm for constructing the optimal assignment are proposed, on the basis of which a program for the orientation of the antennas of the guidance stations is formed.

Keywords: coordination of the guidance stations, dynamic programming method.

Постановка задачи

Создание систем защиты от ракетного нападения связано с необходимостью решения в реальном времени разнообразных задач распределения ресурсов на основе данных мониторинга текущей обстановки, характеристик целей и технологии функционирования средств защиты. Такие задачи связаны с давно обсуждаемой проблемой распределения целей, для решения которой необходимы модели разной степени подробности описания [1,2]. При этом общим методом является решение линейных задач назначения [3] на основе скалярной свертки векторных критериев эффективности использования выделяемых ресурсов. Предмет обсуждения – модель планирования использования станций наведения при обработке цели. С целью компактности изложения, но без потери общности, будем рассматривать проекцию всех процессов на двумерную плоскость (рис. 1). Предполагается далее, что для любого прогнозируемого интервала обработки (отрезки АВ) цели во времени и пространстве, а также данных о координатах размещения станций наведения (СНР) и пусковых установок (ПУ) можно проецировать возможные траектории полета антиракет на угловые координаты сектора наведения таких траекторий относительно станций наведения. На этапе планирования необходимо обеспечить ориентацию сектора обзора станции наведения так, что в любой момент времени сектор наведения полностью включен в сектор обзора. Очевидно, что углы сектора наведения и сектора обзора в общем случае не совпадают. Если угол сектора обзора больше угла сектора наведения, то ориентация сектора наведения может оставаться фиксированной на всем интервале обработки цели. В противном случае потребуются учесть необходимость поворота сектора обзора. Поворот требуется также при переходе на обслуживание очередной цели. Далее рассмотрим предлагаемую модель планирования работы станций наведения на основе геометрических понятий [1].

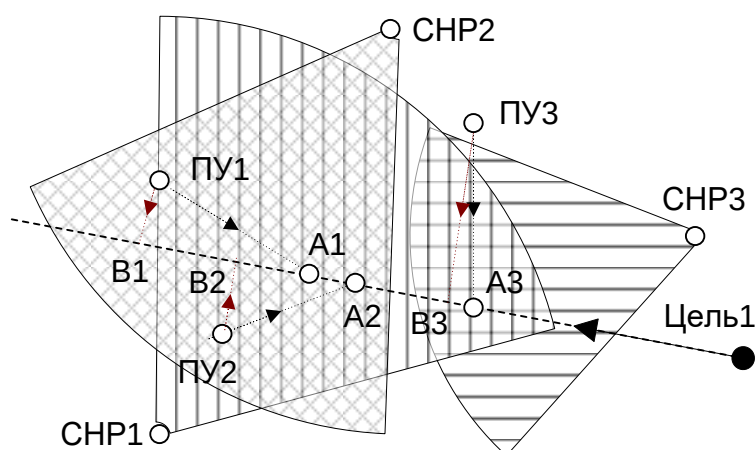


Рис. 1. Схема вариантов обработки цели с двукратным резервированием станций наведения

Модель планирования работы станций наведения

Планирование использования станций наведения должно для каждого интервала обработки цели сформировать список достаточного количества резервируемых станций наведения с ориентацией их секторов обзора. Область поиска решений удобно представить после проецирования сектора обзора и возможных траекторий полета антиракет в полярных координатах на ось времени (рис. 2).

Траектории полета антиракет от каждой пусковой установки к конкретной цели для пригодных для наведения станций будут представлены на оси времени отрезками с некоторыми значениями времени начала и конца полета. Фактически при этом используется для простоты изложения абстрагирование реального процесса пуска антиракеты и его сопровождения линейной моделью движения точки. Однако в реализации алгоритма планирования учет более подробных факторов потребует лишь замены соответствующих функций-операторов.

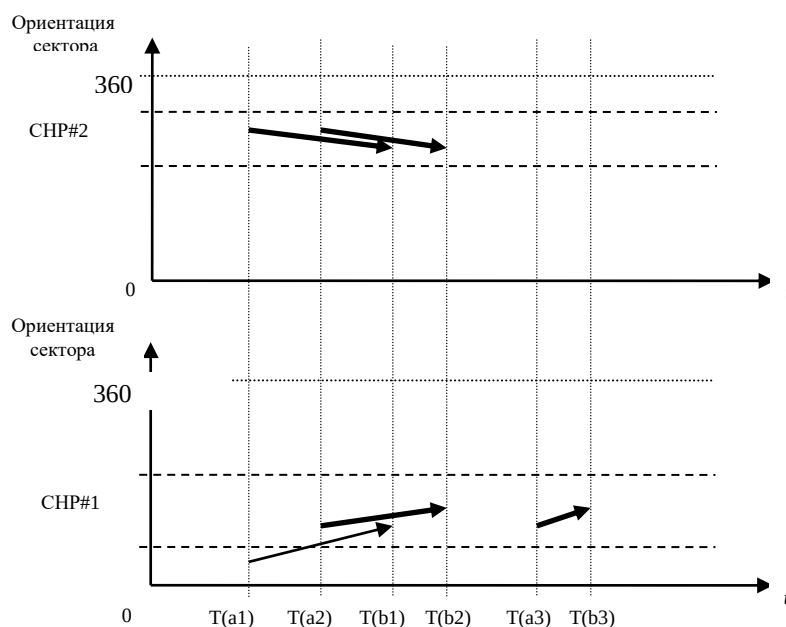


Рис. 2. Схема связи интервала обработки цели с ориентацией станций наведения

Очевидно, что для разных станций наведения одна и та же цель может иметь разную степень удобства обслуживания. Чем меньше абсолютная величина изменения ординат отрезка

проекции полета, тем меньше потребность в повороте сектора и влияние на обслуживание других целей.

Строго говоря, закон изменения проекции цели на угол ориентации сектора линейным от времени не является. Пусть в начальный момент времени координаты цели (x_0^T, y_0^T) , скорость цели – V_T , курс цели – K_T , а координаты станции наведения – (x_U, y_U) и от времени не зависят. Угол ориентации сектора станции наведения на цель обозначим $K_T^U(t)$. Его значение от времени t зависит следующим образом

$$K_T^U(t) = \arctg((x_0^T + V_T \cos(K_T)t - x_U) / (y_0^T + V_T \sin(K_T)t - y_U)).$$

Однако практическая потребность отображения угла ориентации сектора станции наведения на его ограниченную ширину может служить основанием для использования линейной зависимости по среднему значению. При этом легко оценивается погрешность аппроксимации, которая может быть учтена далее на этапе планирования.

Угловая ширина и ориентация сектора наведения позволяют характеризовать возможность наведения любого подмножества антиракет (рис. 3).

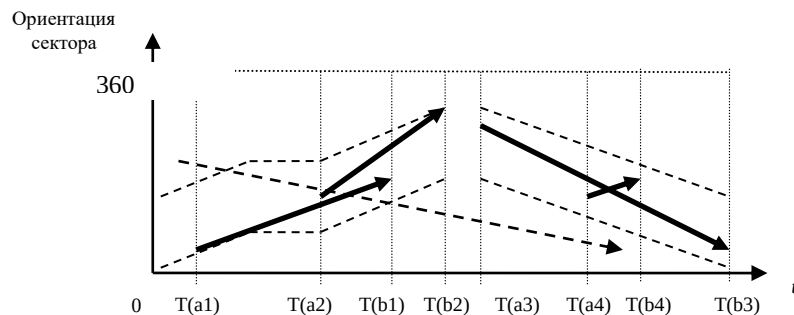


Рис. 3. Схема ориентации станции наведения со непрерывным поворотом сектора

Здесь жирными сплошными линиями со стрелками обозначены проекции целей, которые находятся в секторе станции наведения. Штриховая линия со стрелкой соответствует цели, которая не сопровождается.

Оценка реализуемости плана работы станций наведения

Очевидно, что проверка условия реализуемости сопровождения нескольких пусков для линейной схемы аппроксимации модели перемещения должна выполняться в моменты, соответствующие начальной и конечной точкам отрезков проекций траекторий полета антиракет. Это обстоятельство учтем далее для построения эффективной вычислительной схемы учета последствий появления новой или пересмотра плана подавления старой цели в реальном времени.

Обозначим A_T^L и B_T^L начальный и конечный моменты времени для сопровождаемых траекторий полета антиракет, запускаемых из пусковой установки L к цели T ; C_U – угловая ширина сектора станции наведения U .

Наблюдаемость и реализуемость рассматриваемого процесса соответствует условию $B_T^L > A_T^L$.

Однократная предварительная проверка истинности такого условия в реальном времени в момент получения данных о новой цели гарантирует отсутствие исключительных ситуаций в процедурах планирования.

Для любой станции наведения U проекции траекторий полета антиракет, запускаемых из пусковой установки L к цели T , соответствуют отрезкам $(A_T^L, K_T^U(A_T^L)) \rightarrow (B_T^L, K_T^U(B_T^L))$ на плоскости $(t, K_T^U(t))$. Длина таких отрезков всегда больше нуля.

Множество планируемых на обслуживание станцией наведения U траекторий характеризуется тем, что любые точки проекций таких траекторий должны попадать в интервал, соответствующий углу сектора C_U . Отсюда следует алгоритм проверки условий реализуемости наведения для новой цели с учетом реализуемости наведения ранее запланированных целей.

Уравнение движения ординаты точки проекции любой цели в случае линейной модели

$$k_T^U(t) = K_T^U(A_T^L) + \beta_T^U(t - A_T^L), \quad \beta_T^U = (K_T^U(B_T^L) - K_T^U(A_T^L)) / (B_T^L - A_T^L).$$

Рассмотрим вначале моменты времени начальной и конечной точки отрезка, соответствующего новой цели. Попадание в сектор шириной C_U проекции новой цели T^+ и ранее

запланированных целей T_U^* для обслуживания станцией наведения U в этом случае будет при условии $\max\{\overline{M}_T^U(t), K_{T^+}^U(t)\} - \min\{\underline{M}_T^U(t), K_{T^+}^U(t)\} \leq C_U, t \in \{A_{T^+}^L, B_{T^+}^L\}$ (рис. 2).

Здесь для каждой начальной или конечной точки отрезков, соответствующих ранее запланированным целям, но которые должны рассматриваться совместно с новой целью, определены значения

$$\overline{M}_T^U(t) = \max\{k_T^U(t), T \in T_+^*(t)\}, \quad \underline{M}_T^U(t) = \min\{k_T^U(t), T \in T_+^*(t)\},$$

$$T_+^*(t) = \{T \mid (T \in T_U^*) \wedge (t \in [A_{T^+}^L, B_{T^+}^L])\}.$$

Так как после принятия решения о включении в план цели T^+ всегда выполняется операция

$$T_U^* \leftarrow T_U^* \cup T^+, \text{ то для новой цели}$$

$$\overline{M}_{T^+}^U(t) = \max\{\overline{M}_T^U(t), K_{T^+}^U(t)\}, \quad \underline{M}_{T^+}^U(t) = \min\{\underline{M}_T^U(t), K_{T^+}^U(t)\}, t \in \{A_{T^+}^L, B_{T^+}^L\}.$$

Рассмотрим далее моменты времени начальной или конечной точек отрезков проекций ранее запланированных целей, попадающие в интервал $(A_{T^+}^L, B_{T^+}^L)$. Попадание в сектор шириной C_U

отрезка новой цели T^+ и конечных точек отрезков проекций ранее запланированных целей T_U^* в этом случае будет при условии (рис. 2)

$$\max\{\overline{M}_T^U(t), k_{T^+}^U(t)\} - \min\{\underline{M}_T^U(t), k_{T^+}^U(t)\} \leq C_U, \quad (t \in \{A_T^L, B_T^L\}) \wedge (t \in [A_{T^+}^L, B_{T^+}^L]), (T \in T_U^*).$$

Так как после принятия решения о включении в план цели T^+ выполняется операция

$$T_U^* \leftarrow T_U^* \cup T^+, \text{ то для ранее запланированных целей}$$

$$\overline{M}_T^U(t) \leftarrow \max\{\overline{M}_T^U(t), k_{T^+}^U(t)\},$$

$$\underline{M}_T^U(t) \leftarrow \min\{\underline{M}_T^U(t), k_{T^+}^U(t)\}, (t \in \{A_T^L, B_T^L\}) \wedge (t \in [A_{T^+}^L, B_{T^+}^L]), (T \in T_U^*).$$

Истинность последнего условия соответствует отображению всех альтернатив подавления цели на состояние пусковых установок и станций наведения с учетом ранее принятых решений. При этом можно ограничить ветвление от уровня пусковых установок, предварительно решив задачу выбора ориентации секторов наведения с целью учета требования наведения антиракет несколькими станциями наведения.

Оптимизация распределения станций наведения

Ориентации сектора наведения учитывается при решении динамической задачи назначения [1,2] пусковых установок для подавления цели на фазах поиска назначения и планирования расписания реализации оптимального назначения. Используя метод прямого динамического программирования, для каждого интервала обработки целей после их упорядочения по времени последовательно решается линейная задача о назначении [3], где особенности цели и средств ее подавления отражены скалярной сверткой критериев их оценки.

На фазе поиска назначения учитывается лишь наличие минимального количества станций наведения, необходимого для обеспечения работы пусковой установки. При этом на основе ранее рассмотренных моделей оценивается физическая реализуемость перехода из состояния станций наведения на предшествующем интервале планирования.

После выбора назначения для каждой станции наведения необходимо задать расписание ее работы, для которого минимизировано количество поворотов сектора наведения. Схема решения такой задачи жадным алгоритмом очевидна, если уточнить возможности управления физической ориентацией сектора.

Например, станция наведения может непрерывно поворачивать сектор с заданной скоростью (рис. 3). Реализация равномерного поворота требует задания в расписании моментов времени, скорости поворота и угловых границ.

Другой вариант – ступенчатый поворот сектора с фиксированной скоростью до заданного угла ориентации (рис. 4). Реализация ступенчатого поворота требует задания в расписании моментов времени и угла ориентации. Однако выбор схемы поворота и ее реализацию может выполнять станция наведения.

В любом случае алгоритм окончательного формирования расписания работы станций наведения для обоих вариантов имеет одинаковый вид. Общим этапом при этом наверняка будет предоставление фрагментов данных на непрерывных интервалах использования станции наведения с указанием номеров целей, моментов времени и ориентации сектора.

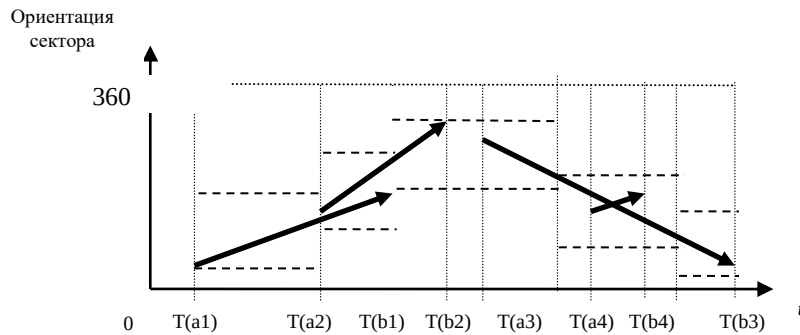


Рис. 4. Схема ориентации станции наведения со ступенчатым поворотом сектора

Рассмотрим процедуру формирования таких данных из результатов поиска решения. Исходные данные для окончательного формирования расписания представим отношением S со схемой

$\langle a_{\max}, a_{\min}, t_{LTU}, L_{TU}, T_{LU}, U_{LT}, d_{LTU} \rangle$, где $a_{\max}, a_{\min}$ – максимальный и минимальный требуемый угол обзора всех запланированных целей; t_{LTU} – момент времени,

соответствующий начальной либо конечной точке отрезка проекции цели; L_{TU} – номер

пусковой установки; T_{LU} – номер цели; U_{LT} – номер станции наведения, d_{LTU} – признак начала точки отрезка, используемый для выявления интервала простоя станции наведения.

Первичный ключ отношения здесь составной. Его образуют элементы $\langle T_{LU}, T_{LU}, U_{LT} \rangle$,

однозначно характеризующие уникальную ассоциацию пусковой установки, цели и станции наведения. При этом неявно подразумевается, что моменты времени, относящиеся к цели с некоторым номером, остаются неизменными, а каждой пусковой установке соответствует неизменный тип антиракеты. Если такое предположение будет нарушено, то следует выполнить новую нумерацию цели либо пусковой установки.

Для каждой отдельной станции наведения U строки таблицы рассматриваемого отношения заполняются на основе переменных состояния процедуры выбора подходящих станций. Для этого сформируем согласно схеме отношения S множество строк для начальных точек

отрезков $S^U = \{ \overline{M}_T^U(A_T^L), \underline{M}_T^U(A_T^L), A_T^L, L, T, U, 1 \}, (T \in T_U^*)$, а затем добавим к нему множество строк для конечных точек отрезков

$$S^U \leftarrow S^U \cup \{ \overline{M}_T^U(B_T^L), \underline{M}_T^U(B_T^L), B_T^L, L, T, U, 0 \}, (T \in T_U^*).$$

Далее следует упорядочить строки по моментам времени t_{LTU} :

$$S^U \leftarrow \{ S_i^U \mid S_i^U.t_{LTU} \leq S_{i+1}^U.t_{LTU}, i=1, |S^U|-1 \}.$$

По определению, $S_1^U.d_{LTU} = 1$, а $S_{|S^U|}^U.d_{LTU} = 0$.

Так как строки таблицы S^U упорядочены по неубыванию моментов времени t_{LTU} , то отсюда следует процедура выделения интервалов простоя станции наведения:

если $(S_i^U.t_{LTU} < S_{i+1}^U.t_{LTU}) \wedge (S_i^U.d_{LTU} = 0) \wedge (S_{i+1}^U.d_{LTU} = 1)$, то указываемый значением i интервал времени $(S_i^U.t_{LTU}, S_{i+1}^U.t_{LTU})$ есть интервал простоя, $i = 1, \overline{|S^U| - 1}$.

Однако в таблице отношения S^U могут оказаться строки, для которых справедливо

$$(|S_i^U.a_{\min} - S_{i+1}^U.a_{\min}| > C_U) \vee (|S_i^U.a_{\min} - S_{i+1}^U.a_{\min}| > C_U), i = 1, \overline{|S^U| - 1}.$$

Это соответствует целям, угол наведения для которых превышает угловую ширину сектора станции. Для таких строк необходимо провести их формальное расщепление для отражения моментов смены ориентации сектора. Подобным приемом следует отражать возможные ограничения на скорость поворота сектора. После добавления строк таблица отношения S^U должна оставаться упорядоченной по, моментам времени t_{LTU} .

Для простоты изложения схемы алгоритма рассмотрим вариант ступенчатого поворота сектора с фиксированной скоростью до заданного угла ориентации (рис. 4).

Построим множество R^U , содержащее индексы строк таблицы S^U , соответствующих моменту переключения режима станции наведения U :

```

i = 0; n_U = |S^U|; R^U = ∅;
while (i < n_U) {
    i ← i + 1; R^U ← R^U ∪ {i};
    b_max = S_i.a_max + C_U; k = i;
    while ((S_k.a_max ≤ b_max) ∧ (k < n_U)) k ← k + 1;
    b_min = S_i.a_min - C_U; j = i;
    while ((S_j.a_min ≥ b_min) ∧ (j < n_U)) j ← j + 1;
    i = min(j, k);
}
R^U ← R^U ∪ {n_U + 1};

```

В результате множества R^U и S^U представляют расписание работы станции наведения U в виде структуры смежности в форме FSF (Forward Star Form). Количество элементов расписания (режимов работы) – $m_U = (|R^U| - 1)$. Элементы расписания представляют непересекающиеся последовательно расположенные отрезки времени, на которых станция наведения U должна обеспечивать некоторый фиксированный режим ориентации сектора. Элемент расписания с номером j , $j \in \overline{1, m_U}$, представлен в таблице S^U строками с номерами $i \in N_j^U$, $N_j^U = \overline{R_j^U, R_{j+1}^U - 1}$.

Если желательно разместить сектор так, что проекции целей находятся в центре, то ориентация сектора уточняется

$$M_j^U = (\max\{S_i^U.a_{\max}, i \in N_j^U\} - \min\{S_i^U.a_{\min}, i \in N_j^U\}) / (R_{j+1}^U - R_j^U).$$

Заключение

Таким образом, наличие списка пригодных для обработки целей и средств их поражения позволяет ставить задачу об оптимальном назначении по критерию минимума суммы весов или оптимальном марьяже, если учесть предпочтения целей пусковыми установками. Оптимизация назначения требует решения последовательности линейных задач о назначении с

полиномиальной вычислительной сложностью, однако отражение технологий использования разделяемых ресурсов приводит к росту порядка вычислительной сложности. Построенные модели функционирования станций наведения в кусочно-линейном виде допускают эффективную конечно-автоматную реализацию в приращениях переменных состояния. Модель поиска решений представима в сетевом виде с выделением сильно связанных переменных слабо связанных локальных областей. Переходы на сети ассоциируются с конкретными переменными состояниями. В результате алгоритм оптимизации назначения может исключать повторные обходы ранее рассмотренных альтернатив, что снижает его вычислительную сложность.

Список литературы / References

Leboucher C., Shin H-S., Le M.enec S.[et al.] Optimal Weapon Target Assignment Based on an Geometric Approach//19th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, September 2-6, 2013. Wurzburg, Germany. P. 341-346.

Leboucher C., Shin H-S., Siarry P. [et al.] A Two-Step Optimisation Method for Dynamic Weapon Target Assignment Problem. [Electronic data]. – Access mode: <http://dx.doi.org/10.5772/53606> – Date of access: 20.09.2016.

Pentico D.W. Assignment problems: A golden anniversary survey// European Journal of Operational Research, vol. 176(2), 2007. P. 774-793.

Сведения об авторах

Хаджинова Н.В., старший преподаватель кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Ревотюк М.П., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кот О.В., м.т.н., аспирант кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Information about the authors

Khajunova N.V., senior lecturer of the information technologies in automated systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Revotjuk M.P., PhD, associate professor, associate professor of the information technologies in automated systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kot O.V., M. Sci., PG student of the information technologies in automated systems department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Ревотюк Михаил Павлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university of informatics and
radioelectronics
tel. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Revotjuk Mikhail Pavlovich

МОНИТОРИНГ ЗАДАЧ В СИСТЕМАХ КООРДИНАЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ АГЕНТОВ

М.П. РЕВОТЮК, О.В. КОТ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь

Поступила в редакцию

Аннотация. Рассматривается процесс регулярного решения классической линейной асимметричной задачи о назначении, когда множества работ и исполнителей, а также локальные оценки назначения формируются в реальном времени. Предложена структура данных и инкрементальный алгоритм построения оптимального паросочетания, в которых накопление предопределенных решений снижает вычислительную сложность решения до линейной зависимости от объема поступивших данных.

Ключевые слова: метод кратчайшего пополняющего пути, динамическая задача о назначении.

Abstract. The process of regular solution of the classical linear asymmetric assignment problem is considered, when sets of works and performers, as well as local assignment estimates are formed in real time. A data structure and an incremental algorithm for constructing optimal matching are proposed, in which the allocation of predefined solutions reduces the computational complexity of the solution to linear dependence on the volume of incoming data.

Keywords: shortest augmenting path method, dynamic assignment problems.

Введение

Задачи оптимизации управления системами взаимодействующих агентов естественно формулируются в терминах задач о динамическом назначении [1-3]. В процессе координации таких систем необходимо регулярно решать задачу о назначении агентам возникающих задач с учетом реальных ограничений и возможной коррекции плана назначения. Традиционно задачи координации агентов сводятся к известным задачам дискретной оптимизации, таким как задача о назначении или задача нескольких странствующих коммивояжеров. Однако необходимость учета реальных отношений между агентами и задачами приводит к экспоненциальной сложности алгоритма формирования оптимального назначения [3,4]. Процесс управления системами взаимодействующих агентов преследует цель формирования оптимального отображения множества задач T на множество агентов A . Функция, определяющая дискретный процесс принятия решения по распределению агентов как одного из видов ресурсов для решения задач, часто записывается в рекуррентной форме связи в момент времени t переменных состояния S_t , вектора решения X_t , функции прогноза состояния V_t и оценками эффективности управления S_t . Например, для реализации метода динамического программирования [1] такая функция имеет вид:

$$X_t^* = \arg \max \{c_t x_t + E[V_{t+1}(S_{t+1}(x_t)) | S_t] | x_t \in X_t\}. \quad (1)$$

При принятии решения о назначениях нет полной информации о наличии ресурсов и задач в будущем, а также об эффективности или приемлемости назначения. Стандартный инженерный подход состоит в близорукое решение задачи о назначении, используя только информацию, доступную на момент принятия решения [1]. Отображение (паросочетание) $X: T \rightarrow A$ в практически интересных случаях определяется решением линейной задачи о назначении (ЛЗН), для которой оценки эффективности назначения заданы матрицей $C: T \times A \rightarrow R^+$ [2]. При этом предполагается, что множества T и A формируются независимо и асинхронно (рис. 1), хотя

иногда зависимости между элементами таких множеств отражают введением фиктивных элементов.

Классические ЛЗН в матричной постановке имеют вид

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \mid \sum_{i=1}^n x_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; x_{ij} \geq 0; i, j = \overline{1, n} \right\} \quad (2)$$

Случай поиска максимума сводится к постановке вида (2), если произвести замену $c_{ij} \leftarrow c^* - c_{ij}$, $i, j = \overline{1, n}$, $c^* = \max \{c_{ij}, i, j = \overline{1, n}\}$.

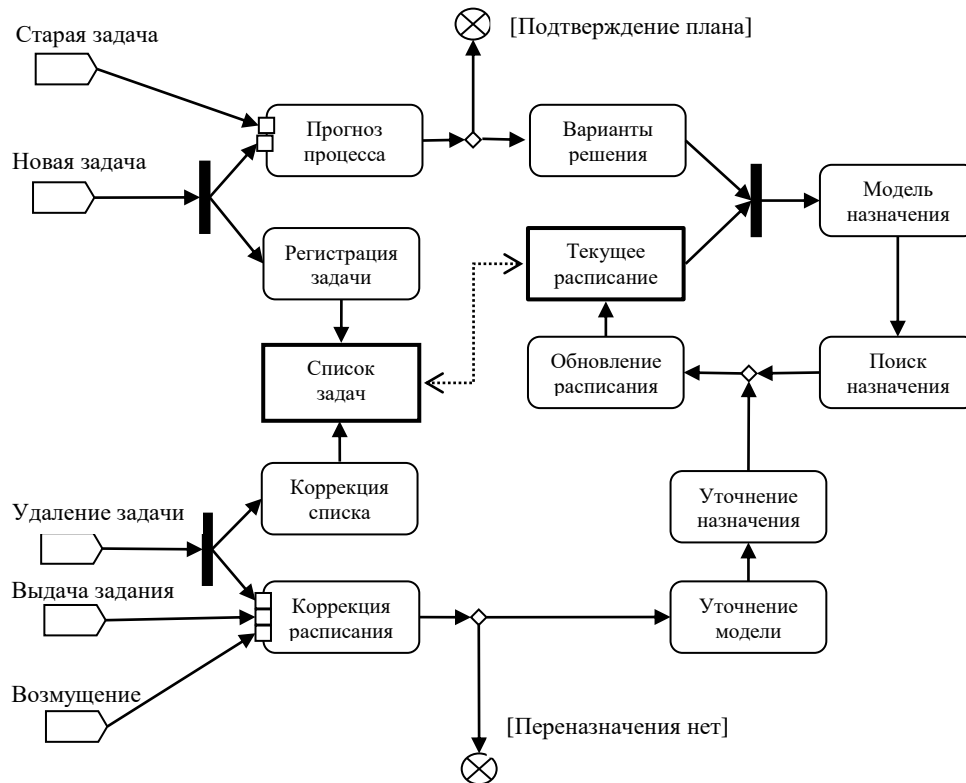


Рис. 1. Схема распределения ресурсов для обслуживания заявок на решение задач

Представляющие практический интерес задачи с прямоугольной матрицей

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \mid \sum_{i=1}^m x_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; x_{ij} \geq 0; i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n} \right\} \quad (3)$$

могут рассматриваться как задачи вида (2) после дополнения матрицы строками или столбцами с нулевыми элементами. Таким образом, ЛЗН можно рассматривать в постановке (3), когда $m \leq n$. Случай $m > n$ легко сводится к решению (3) после транспонирования матрицы и соответствующей замены содержательной интерпретации индексов строк и столбцов [1,5].

Постановка задачи

Реальные процессы решения задач агентами характеризуются наличием интервала от момента появления задачи до наиболее позднего момента начала ее решения. В этом интервале можно пересматривать альтернативы решения, по крайней мере, в механотронных системах. Очевидно, что максимум эффективности управления достигается при минимуме задержек на решение ЛЗН. Предлагается учесть дискретность процесса формирования портфеля заявок, явно используя понятия наиболее раннего и позднего срока начала решения задачи для упреждающего поиска окончательного назначения. Очевидно, что если процедура назначения

дополняет граф оптимального паросочетания и агентов при поступлении новых заявок, то задержка времени определяется сложностью обработки последней группы заявок.

Вычислительная сложность решения ЛЗН имеет полиномиальную зависимость от параметров матрицы [1]. Вид зависимости определяется методом решения и схемой его реализации. Практически интересные методы рассматривают ЛЗН как специальный случай задачи линейного программирования. Среди методов решения выделяют прямые методы, прямо-двойственные и комбинированные. Теоретические и экспериментальные исследования эффективности решения ЛЗН отражены во многих источниках [1]. Часто упоминаемая в публикациях оценка вычислительной сложности относится к исторически первому венгерскому методу имеет вид от $O(n^4)$ до $O(n^3)$ [1]. Процесс поиска назначения позже было предложено рассматривать в терминах поиска кратчайших путей приращений потенциалов. При этом учет возможностей реализации схемы Дейкстры для поиска кратчайших путей позволил получить асимптотики от $O(n^{3/4} m \cdot \log c^*)$ до $O(\sqrt{nm} \cdot \log(nc^*))$. Последнюю оценку имеет алгоритм метода кратчайшего пополняющего пути (Shortest Augmenting Path, SAP) [6]. Другой вариант поиска назначения реализует так называемый аукционный алгоритм, вычислительная сложность которого также $O(\sqrt{nm} \cdot \log(nc^*))$ [4].

Очевидно, что в случае решения потока ЛЗН вместо наивной схемы независимой обработки отдельных задач можно использовать пересчет задачи (2) после изменения некоторых элементов строки матрицы. Вычислительная сложность пересчета одной строки снижается в n раз, если использовать наследование результатов предшествующего решения.

Таким образом, представляет интерес построение алгоритмов получения решения новой ЛЗН на основе наследуемых результатов, что позволит повысить быстродействие системы координации. Известный прототип рассматриваемой задачи – задача о динамическом назначении [3,4,6]. В [6] рассматривается расширение статического варианта ЛЗН для случая, когда меняются элементы матрицы стоимости и предложен алгоритм решения на основе венгерского метода. Далее будет рассмотрено улучшение подобного подхода на основе метода SAP.

Алгоритм решения задачи

Решение классических открытых ЛЗН, записываемых в виде (3) обычно есть вектор назначений строк матрицы коэффициентов ее столбцам

$$R = \{r_j = i \mid x_{ij} = 1, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\}. \quad (4)$$

Известно, что наиболее эффективные для решения задачи (3) алгоритмы венгерского метода строятся с учетом особенностей двойственной задачи

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^m u_i + \sum_{j=1}^n v_j \mid c_{ij} - u_i - v_j \geq 0, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n} \right\}. \quad (5)$$

Предлагается для оптимизации динамического назначения (1) модифицировать инкрементальный алгоритм венгерского метода [4,6] с целью многократного обновления с вычислительной сложностью $O(n^2)$ текущего паросочетания для новой или изменяемой строки $i, i \in \overline{1, m}$. Обозначим для каждой вершины x графа множество непосредственно достижимых смежных выходных вершин x' , $x' = \{y \mid x \rightarrow y\}$, а входных вершин – $'x$, $'x = \{x \mid x \rightarrow y\}$, где $x \rightarrow y, x, y \in N$.

Предлагаемый инкрементальный алгоритм итераций метода SAP, представляемый функцией $slap(i)$, реализует обработку последствий изменения весов выходных связей любой строки (рис. 2).

```

function slap(i) {
  foreach  $j \in i'$  {  $p_j = i, d_j = c_{ij} - v_j$ ; }
   $R = \emptyset, S = \emptyset, T = \{i'\}$ ;
  while (true) {
    if ( $|S| = 0$ ) {
       $h = \min\{d_j | j \in T\}$ ;
       $S = \{j | (d_j = h) \wedge (j \in T)\}$ ;  $T \leftarrow T \setminus S$ ;
      foreach  $j \in S$  if ( $r_j = 0$ ) go to back;
    }
     $k = S_1, S \leftarrow S \setminus \{k\}, R \leftarrow R \cup \{k\}, l = r_k$ ;
    foreach  $j \in T$  if ( $h + c_{lj} - v_j < d_{lj}$ ) {
       $d_j = h + c_{lj} - v_j; p_j = l$ ;
      if ( $d_j = h$ ) {
        if ( $r_j = 0$ ) go to back;
         $S \leftarrow S \cup \{j\}, T \leftarrow T \setminus \{j\}$ ;
      }
    }
    back: foreach  $k \in R$   $v_k \leftarrow v_k + d_k - h$ ;
    do { $l = p_j; r_j = l; k = j; j = q_l; q_l = k$ ; } while ( $i \neq l$ );
  }
}

```

Рис. 2. Алгоритм итерации решения ЛЗН методом SAP

Такая функция обеспечивает формирование вектора назначения строк при их последовательном рассмотрении (рис. 3), а также корректное изменение вектора назначения в режиме реоптимизации [2,4]. Ее схема не меняется и для ЛЗН, формулируемой в виде графа.

```

function SLAP() {
  foreach  $j \in \overline{1, n}$  { $r_j = 0, v_j = 0$ ; }
  foreach  $i \in \overline{1, m}$  slap(i);
}

```

Рис. 3. Алгоритм решения открытой ЛЗН методом SAP

В отличие от алгоритма итерации назначения венгерским методом, развитие дерева паросочетаний здесь проводится алгоритмом Дейкстры, где классификация состояния вершин дерева проводится экономным способом. Преимущества метода SAP особенно заметны для разреженных графов.

Структура данных представления динамической задачи

В случае задач динамического назначения параметры m и n зависят от времени, поэтому узким местом становятся операции выделения подлежащих реоптимизации строк и столбцов. Пусть в реальном времени формируется поток ЛЗН с номерами $k = 1, 2, \dots$, а на каждом шаге изменяется $T(k)$ элементов матрицы $\|c_{ij}, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\|$. Первоначально пусть

$c_{ij} = \infty, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$, тогда появление элементов $c_{ij} < \infty$ означает наличие дуги $i \rightarrow j$ графа назначения. Прямолинейный поиск изменившихся строк в матрицах ЛЗН с номерами k и $k+1$ характеризуется вычислительной сложностью $O(mn)$.

Для быстрого отображения изменений матриц предлагается использовать векторы

$X^k(i) = k \cdot (c_{ij}^k \equiv c_{ij}^{k-1})$ и $Y^k(j) = k \cdot (c_{ij}^k \equiv c_{ij}^{k-1})$, $i \in \overline{1, m}, j \in \overline{1, n}, k > 0$. Индексы измененных строк и столбцов будем сохранять в стеках индексов строк $H_x^k(t)$, $|H_x^k(t)| = h_x^k(t)$, и столбцов

$H_y^k(t), |H_y^k(t)| = h_y^k(t)$, на шаге t формирования матрицы на этапе $k+1$, когда $t \in \overline{1, T(k+1)}$.

Если $X^0(i) = 0, i = \overline{1, m}, Y^0(j) = 0, j = \overline{1, n}$, а $c_{ij}^0 = \infty, i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$, то операция учета фактов

$c_{ij}^{k+1} \leftarrow c_{ij}^k$ на этапе $k+1$ имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_x^{k+1}(0) = 0; h_y^{k+1}(0) = 0; \\ \forall (t \in \overline{1, T(k+1)}) \wedge (i \in \overline{1, m}) \wedge (j \in \overline{1, n}) \text{ if } (c_{ij}^{k+1}(t) \neq c_{ij}^k) \{ \\ \quad \text{if } (X^{k+1}(i) \neq k+1) \{ \\ \quad \quad h_x^{k+1}(t) \leftarrow h_x^{k+1}(t) + 1, H_x^{k+1}(h_x^{k+1}(t)) \leftarrow i, X^{k+1}(i) \leftarrow k+1; \\ \quad \quad \} \\ \quad \text{if } (Y^{k+1}(j) \neq k+1) \{ \\ \quad \quad h_y^{k+1}(t) \leftarrow h_y^{k+1}(t) + 1, H_y^{k+1}(h_y^{k+1}(t)) \leftarrow j, Y^{k+1}(j) \leftarrow k+1; \\ \quad \quad \} \\ \quad c_{ij}^{k+1} \leftarrow c_{ij}^k(t); \\ \} \end{array} \right. \quad (6)$$

Сложность операции изменения элемента очередной матрицы – $O(1)$. Очевидно, что

истинность выражения $h_x^k(k+1) > h_y^k(k+1)$ означает необходимость решения ЛЗН с заменой строк столбцами.

Алгоритм функции $slap(i)$ исключает необходимость дополнения матрицы C строками или столбцами нулевыми элементами, но требует выполнения условия $m \leq n$. Формальное инвертирование матриц выполняется одношаговой заменой адресной функции доступа к элементам матрицы C .

Фильтрация несущественных событий

Появление новых элементов множеств вершин не обязательно приводит к изменению существующего оптимального паросочетания. Контроль устойчивости назначения, обеспечивающий грубость системы к незначительным возмущениям элементов или размерности матрицы, предлагается реализовать на основе результатов решения задачи оценки интервалов устойчивости решений ЛЗН:

для каждого элемента c_{ij} в (2) необходимо найти интервал $I(i, j) = (a_{ij}, b_{ij})$, в котором

значения таких элементов могут быть изменены без нарушения структуры оптимального назначения (3).

Пусть граф оптимального паросочетания (текущего решения ЛЗН) представлен элементами

$E_m = \{(r_j, j) | (r_j \leq m), j = \overline{1, n}\}$, а оставшиеся элементы матрицы образуют

$E_u = \{(i, j), i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}\} \setminus E_m$. Очевидно, что $|E_m| = m$, а $|E_u| = m \cdot (n-1)$, что приходится учитывать при оценке вычислительной сложности алгоритма.

Обозначим $\delta_m(x, y)$ и $\delta_u(x, y)$ – допустимое изменение веса любого ребра $x \rightarrow y$, где

$(x, y) \in E_m \cup E_u$. Интервалы значений веса ребра, в которых назначение ребра остается неизменным, для задачи минимизации (1) определяются из элементарных рассуждений:

$I_{\min}^m(x, y) = (-\infty, c_{xy} + \delta_m(x, y)]$, $(x, y) \in E_m$;

$I_{\min}^u(x, y) = [c_{xy} - \delta_u(x, y), +\infty)$, $(x, y) \in E_u$.

Будем считать, что ребро графа оптимального паросочетания скрыто, если его вес увеличен так, что ребро больше не является частью существующего решения. Скрытие реализуется назначением веса из интервала $(c_{xy} + \delta_m(x, y), +\infty)$.

Известно, что для элементов оптимального паросочетания справедливо $c_{xy} = u_x + v_y$, $(x, y) \in E_m$. Пусть оценка оптимального решения ЛЗН есть

$$Z^0 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij}^0 = \sum_{i=1}^m u_i^0 + \sum_{j=1}^n v_j^0. \quad (7)$$

Нетрудно показать, что если скрыто ребро $x \rightarrow y$, $(x, y) \in E_m$, то процесс реоптимизации, начинающийся в вершине x , завершится в вершине y , потенциал которой не изменится.

Меняется только потенциал строки u_x , а в соответствии с выражением (7):

$u_x^1 - u_x^0 = Z^1 - Z^0$, $x \in \overline{1, m}$. Здесь нулевой верхний индекс использован для пометки исходного, а единичный – нового решения.

Отсюда следует, что $\delta_m(x, y) = Z^1 - Z^0$. Интервал безопасного изменения значений веса скрываемого ребра определяется выражением

$$I_{\min}^m(x, y) = (-\infty, c_{xy} + Z^1 - Z^0] = (-\infty, c_{xy} + u_x^1 - u_x^0], (x, y) \in E_m. \quad (8)$$

Использование разности потенциалов исключает необходимость прямолинейного вычисления оценок решений задачи (1), требующего $m + n$ шагов.

Подобным образом рассматриваются ребра, не принадлежащие оптимальному решению, когда $c_{xy} \geq u_x + v_y$, $(x, y) \in E_u$. Если вес таких ребер менять в интервале $(u_x + v_y, +\infty)$, то структура решения (2) остается неизменной.

Пусть $\varepsilon_u(x, y) = c_{xy} - \delta_u(x, y)$. Очевидно, что ребро графа паросочетания открыто, если его вес уменьшен так, что это ребро становится частью нового оптимального решения. Открытие ребра наступает в случае, когда $c_{xy} \leftarrow \varepsilon_u(x, y)$. Для поиска $\varepsilon_u(x, y)$ предлагается воспользоваться выражением (8), инвертируя направление шагов процесса построения интервала. Конечная граница интервала $I_{\min}^m(x, y)$ станет начальной границей интервала

$I_{\min}^u(x, y)$. Нулевой шаг в (8) становится решением ЛЗН для гарантированно приводящего к открытию ребра значения $c_{xy} = -\infty$, а единичный шаг соответствует решению ЛЗН с исходной матрицей. В результате получаем

$$I_{\min}^u(x, y) = (-\infty + Z^0 - Z^1, +\infty] = (-\infty + u_x^0 - u_x^1, +\infty], (x, y) \in E_u. \quad (9)$$

Оценка выражения (9) требует лишь одношаговой реоптимизации исходной задачи (1).

Вычислительная сложность реализации выражений (8) и (9) – $O(n^4)$ (при использовании венгерского метода). Однако следует учитывать, что:

реальный интерес представляет оптимальное паросочетание, а так как $|E_m| = m$, то

вычислительная сложность реализации (8) – $O(mn^2)$;

вычислительная схема реализации выражений (8) и (9) не исключает возможности

использования метода SAP для снижения сложности реализации (8) до $O(\sqrt{n} \cdot \log(nc^*))$;

вычисление выражений (8) и (9) может быть прервано, проводится с приоритетом оценки для вновь измененных строк и выполняться в фоновом режиме.

Таким образом, определение интервалов устойчивости естественным образом согласуется с последовательной схемой выражения (1).

Заключение

Представленные результаты позволяют обеспечить мониторинг потока задач в системах взаимодействующих агентов, обеспечивая минимальные задержки на обработку особых событий и откладывание принятия решений на максимально возможный срок. Сокращение времени получения оптимального решения ЛЗН в первом приближении

пропорционально объему локальных изменений данных задачи. Дополнительная память для хранения наследуемых значений потенциалов строк и столбцов не превышает объема $O(m + n)$. Структура оптимального паросочетания при решении задач динамического назначения может оставаться без изменения при незначительном изменении значений весовых коэффициентов. Выявление областей допустимого изменения таких коэффициентов без нарушения структуры решения позволяет обеспечить отказ от итерации реоптимизации. При этом сокращается потребность в информационном взаимодействии между агентами.

Список литературы / References

- Spivey M.Z., Powell W.B. The Dynamic Assignment Problem// Transportation science, vol. 38(4), 2004. P. 399-419.
- Pentico D.W. Assignment problems: A golden anniversary survey// European Journal of Operational Research, vol. 176(2), 2007. P. 774-793.
- Powell W.B., Snow W. Adaptive Labeling Algorithms for the Dynamic Assignment Problem//Transportation Science, Vol. 34, No. 1. – February 2000. P. 50-66
- Toroslu I.H., Üçoluk G. Incremental assignment problem //Information Sci., vol. 177, 2007. P. 1523-1529.
- Bijsterbosch J., Volgenant A. Solving the Rectangular assignment problem and applications//Annals of Operations Research, vol. 181(1), 2010. P. 443-462.
- Jonker R., Volgenant A. A shortest path algorithm for dense and sparse linear assignment problem// Computing, vol. 38, 1987. P. 325-340.
- The Dynamic Hungarian Algorithm for the Assignment Problem with Changing Costs/G.A. Korsah [et al.] //Tech. report CMU-RI-TR-07-27[Electronic resource]: Robotics Institute, Carnegie Mellon University, July, 2007. – Mode of access: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub4/mills_tettey_g_ayorkor_2007_3/mills_tettey_g_ayorkor_2007_3.pdf. – Date of access: 24.08.2017.

Сведения об авторах

Ревотюк М.П., к.т.н., доцент,
доцент кафедры информационных технологий
автоматизированных систем Белорусского
государственного университета информатики и
радиоэлектроники.

Кот О.В., м.т.н., аспирант кафедры
информационных технологий
автоматизированных систем Белорусского
государственного университета информатики и
радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Ревотюк Михаил Павлович

Information about the authors

Revotjuk M.P., PhD, associate professor,
associate professor of the information technologies
in automated systems department of Belarusian state
university of informatics and radioelectronics.

Kot O.V., M. Sci., PG student of the information
technologies in automated systems department of
Belarusian state university of informatics and
radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university of informatics and
radioelectronics
tel. +375-17-293-86-58;
e-mail: rmp@bsuir.by
Revotjuk Mikhail Pavlovich

СТРУКТУРА И ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК

О.М. БАКУНОВА, О.Н. ОБРАЗЦОВА

*Институт информационных технологий
Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники
Ул. Козлова, 28, г. Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе описана структура программный комплекса оценки антропогенной нагрузки на территориальные единицы, принципы работы его составных частей, подходы к обработке экологической информации.

Ключевые слова: оценка антропогенной нагрузки, оценка загрязненности окружающей среды, программный комплекс

Abstract. A program complex of anthropogenic effect on territory units, principles of functioning of its parts and approaches to ecological information processing are described.

Keywords: anthropogenic effect assessment, environmental contamination assessment, program complex.

Введение

Разработка программного комплекса выполнялась в рамках подготовки кандидатской диссертации «Оценка антропогенной нагрузки на административные территории». Перед разработчиками стояли следующие задачи:

1. Выявление основных типов и классификация антропогенных нагрузок.
2. Разработка методики количественной оценки антропогенных нагрузок на территориальные единицы.
3. Разработка программного комплекса обработки и отображения качественных и количественных данных об антропогенных нагрузках административных районов.
4. Сбор и анализ данных для проверки правильности построения модели.

Актуальность темы исследования может быть обоснована следующими положениями:

В настоящее время в связи с ростом населения, расширения промышленности, выбросов возрастает актуальность оценки антропогенной нагрузки. С возрастанием антропогенного воздействия вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды также увеличивается. Как признание значимости перечисленных угроз, была принята международная Конвенция о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды (Орхусская конвенция). Среди целей этой конвенции называются способствование экологическому просвещению и повышению уровня информированности общественности о проблемах окружающей среды, особенно в отношении получения доступа к информации, участия в процессе принятия решений и получения доступа к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды. В частности, Орхусская конвенция предполагает активное информирование общественности посредством Интернета, публикаций отчетов о состоянии окружающей среды. Таким образом, актуальны проблемы разработки метода обработки разнородных экологических показателей, приведения их к единой форме представления и создания систем мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды.

Результаты и обсуждение

В программном комплексе производится комплексная оценка следующих антропогенных факторов:

Промышленное воздействие

Заводы

ТЭЦ

АЭС

Транспорт

Сельскохозяйственное воздействие

Радиационное воздействие

Демографическое и рекреационное воздействие

Проблему приведения множества разнородных показателей к единому виду решает представление данных в виде секционированных булевых матриц и их обработка с применением метода конечных предикатов.

В разработанной модели для оценки антропогенной нагрузки данные структурируются по признакам:

среде;

виду загрязнителя;

типу загрязнителя;

загрязнителю;

городу;

типу поста наблюдения;

посту наблюдения

Каждый из признаков представлен группой характерных для него компонентов. Так, для признака «Среда» в модели выделяются 3 компонента: загрязнение атмосферы, загрязнение водных ресурсов, загрязнение почвенного покрова. Для признака «Источник загрязнения» значимость того или иного источника загрязнения вносится в матрицу предикатов как «0», если выбранный источник не вносит вклад по данному загрязнителю или «1», если выбранный источник вносит существенный вклад по данному загрязнителю и т.д.



Рис.1. Структурная схема программного комплекса

Основные функции программного комплекса могут быть описаны его структурой, представленной на рис.1

В программном комплексе имеется справочник нормативных показателей (предельно допустимых концентраций, среднегодовых, среднесуточных, максимально-разовых значений для различных загрязнителей в различных средах), составленный по действующим ТНПА и необходимый для оценки экспериментальных значений. [напр.,1] При изменении ТНПА администратор имеет возможность изменить справочные значения. Имеется разграничение доступа Пользователь/Администратор (аутентификация). Страница справочных данных представлена на рис. 2

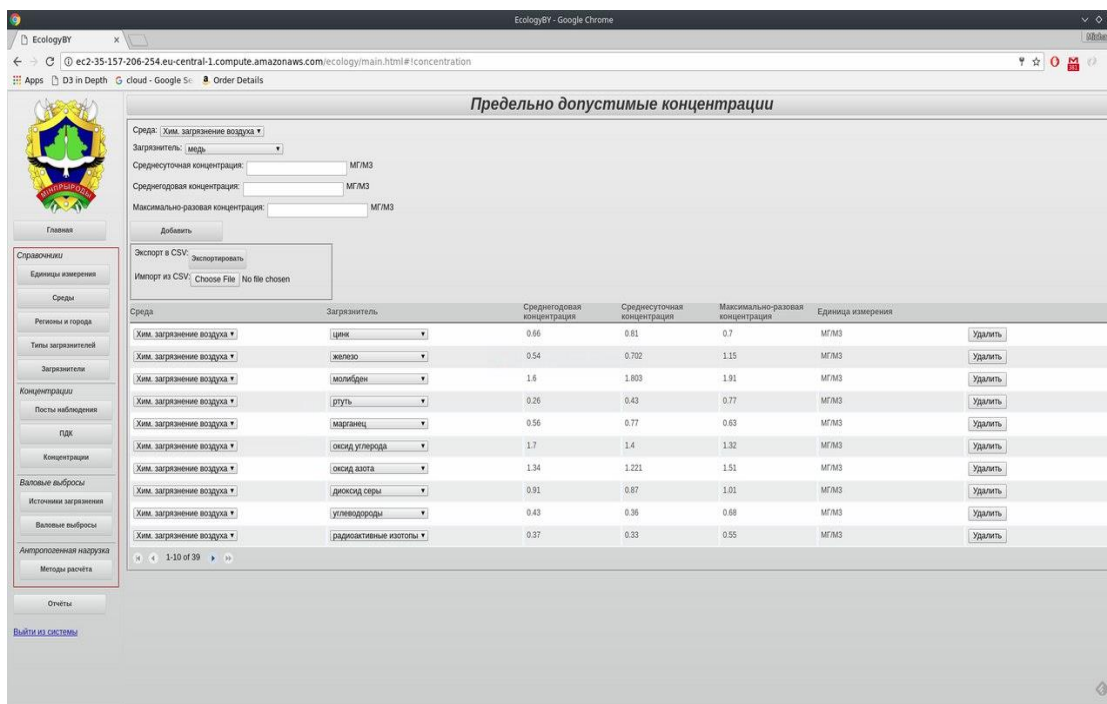


Рис. 2. Справочник ПДК

Модель апробирована на наборах данных, приведенных в отчетах Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь [2]

Частные показатели, приведенные в указанных отчетах соответствуют Руководству по подготовке оценочных докладов по охране окружающей среды, основанных на применении экологических показателей в странах Восточной Европы (ECE/CER/140) [3]

Развитием разрабатываемого программного комплекса является решение задачи автоматизированного сбора данных с датчиков стационарных постов наблюдения в режиме реального времени. Пользователь может задавать параметры поиска, которые будут отражены в отчете, отчет может быть сформирован для конкретной административной территории, определенного загрязнителя, загрязняемой среды и периода времени

В отчетах имеются следующие возможности визуализации: построение линейных диаграмм на фоне усредненных по всем территориальным единицам значений в виде сформированного в формате .pdf отчета с цветовым выделением допустимых/недопустимых концентраций закрасиванием территориальных единиц определенным цветом в зависимости от допустимых/недопустимых уровней контролируемых показателей

Заключение

В статье представлена структура программного комплекса оценки антропогенной нагрузки на территориальные единицы, описаны принципы работы его составных частей, описаны подходы к обработке экологической информации, использованные при его разработке. В качестве исходных данных взяты частные показатели, соответствующие Руководству по подготовке оценочных докладов по охране окружающей среды, основанных на применении экологических показателей в странах Восточной Европы (ECE/CER/140). Разработанный программный комплекс включает элементы экспертной системы - справочные данные, осуществляет обработку данных, расчет комплексного показателя и визуализацию результатов.

Список литературы

Гигиенические нормативы 2.1.7.12-1-2004 «Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве».
Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2015 / Под общей редакцией М.А. Ереско [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые, граф. данные.

(55,5 Мб), – Минск, «Бел НИЦ «Экология». – 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв.; 12 см. – Систем. требования: Pentium II и выше; Windows XP.

Экологические показатели и основанные на них оценочные доклады: Восточная Европа, Кавказ и Центральная Азия /6-я конференция министров «Окружающая среда для Европы» // ECE/CEP/140 - Белград, Сербия, 10-12 октября 2007 года – 122с.

References

Gigienicheskie normativy 2.1.7.12-1-2004 «Perechen predelno dopustimyh koncentracij (PDK) i orientirovochno dopustimyh koncentracij (ODK) v pochve»

Nacionalnaya Sistema monitoringa okrushauchi sredu Respubliki Belarus: rezultatu nabludenii, 2015 / Pod obshei redakciei M.A. Eresko [Elektronnui resyrs]. Electron. tekstovue, graf. dannue. (55,5 Мб), – Минск, «Бел Нис «Экология». – 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): цв.; 12 см. – Систем. требованиа: Pentium II i vyshe; Windows XP.

Environmental Indicators and Indicators-based Assessment Reports – Eastern Europe, Caucasus and Central Asia // ECE/CEP/140

Сведения об авторах

Бакунова О.М., старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Образцова О.Н., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных систем и технологий Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Bakunova O.M., senior lecturer of information systems and technologies department of Information technologies institute of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Abraztsova V.M., PhD, associate professor, associate professor of information systems and technologies department of Information technologies institute of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220037, Республика Беларусь,
Минск, ул. Козлова, д. 28,
Институт информационных технологий
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-294-57-60;
e-mail: jeunesse@inbox.ru
Бакунова Оксана Михайловна

Address for correspondence

220037, Republic of Belarus,
Minsk, Kozlov st, 28,
Information technologies institute of Belarusian
state university of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-294-57-60;
e-mail: jeunesse@inbox.ru
Bakunova Oksana Mihailovna

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР КАК ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

О.С. МАЛЬЦЕВ, М.В. ДАВЫДОВ, М.П. ФЕДОРИНЧИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
ул. П. Бровки 6, Минск, 220013, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию

Аннотация. Представлена возможная методика управления и контроля параметров перестраиваемого акустооптического фильтра, приведена структура аппаратной части, позволяющей реализовать данную методику. Представлены результаты исследования комплексного импеданса пьезопреобразователя из LiNbO_3 с рабочей полосой частот 90-120 МГц.

Ключевые слова: ПАОФ, акустооптика, ниобат лития, пьезопреобразователь.

Abstract. A technique for controlling and testing the parameters of a tunable acousto-optic filter is suggested, the structure of the hardware part allowing to implement this technique is given. The research result of the LiNbO_3 piezoelectric transistor complex impedance with a working frequency band of 90-120 MHz are presented.

Keywords: AOTF, acoustooptics, lithium niobate, piezoelectric transducer.

Введение

Мониторинг окружающей среды в настоящее время является одной из важнейших приоритетов для мирового сообщества. Это обусловлено тем, что человечество столкнулось с негативным влиянием технического прогресса на окружающий мир.

Задача мониторинга – комплексная и включает в себя множество направлений, например, контроль за качественным и количественным составом атмосферы и гидросферы Земли. Эти направления можно считать во многом приоритетными, т.к. именно атмосфера и гидросфера оказывают определяющие воздействия на существующий биосенот.

Широкое применение нашли методы дистанционного исследования окружающей среды. В основе научно-исследовательских технических систем, обеспечивающих выполнение данных исследований, лежат методы оптической спектроскопии – анализ спектра излучения, переизлучения, поглощения различными веществами путем регистрации флуоресценции после воздействия на исследуемое вещество каким-либо излучением (УФ,ИК) [1].

Конкретный выбор диапазона длин излучения и типа (широполосный или лазерный) определяется решаемой задачей, однако в основе системы лежит единый метод – дисперсионный. Дисперсионный метод основан на выделении нужной спектральной полосы в результате разложения излучения в спектр. В качестве диспергирующего элемента, разлагающего излучение в спектр, используются призмы, дифракционные решетки, интерферометры [2].

Диспергирующим элементом является и перестраиваемый акустооптический фильтр. В данном докладе представлена методика программного управления параметрами перестраиваемого акустооптического фильтра.

Постановка задачи и методика ее решения

Одним из способов повышения эффективности работы ПАОФ и улучшения его технических параметров является усовершенствование системы управления (драйвера) ПАОФ. Развитие современной элементной базы позволяет реализовать не только подачу необходимого уровня мощности на заданной частоте, но и обеспечить коррекцию величины мощности в масштабе реального времени. Для того, чтобы сформулировать требования к методике управления параметрами ПАОФ, необходимо рассмотреть принцип работы ПАОФ и его основные технические параметры.

Перестраиваемый акустооптический фильтр (ПАОФ) предназначен для выделения из светового луча с широким спектром узкого спектрального диапазона и перестройки центральной длины волны этого диапазона в соответствии с управляющим сигналом [3].

ПАОФ, предназначенный для спектроскопии, состоит из акустооптического анизотропного кристалла диоксида теллура или кварца, к которому присоединен пьезоэлектрический преобразователь. При подаче высокочастотного электрического сигнала на пьезопреобразователь (ПП), возникает обратный пьезоэлектрический эффект [4] и ПП преобразует электрические колебания в акустические. В настоящее время при выборе материалов для ПАОФ предпочтение отдается диоксиду теллура, т.к. функционален во всей видимой и инфракрасной областях оптического спектра, вплоть до $\sim 5,5$ микрометровых волн, а конструктивно работа в данном диапазоне обеспечивается неколлинеарной конструкцией ПАОФ.

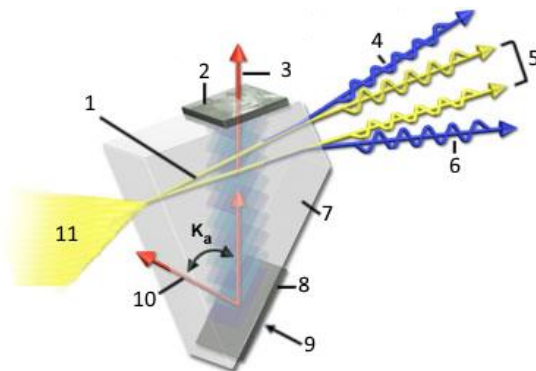


Рис. 1. Конфигурация неколлинеарного ПАОФ на диоксиде теллура:

- 1) Падающая необыкновенная волна, 2) Акустический поглотитель; 3) Оптическая ось; 4) Дифрагированный обыкновенный пучок 1-го порядка; 5) Недифрагированные пучки 0-го порядка; 6) Дифрагированный необыкновенный пучок 1-го порядка; 7) Кристалл TeO_2 ; 8) Пьезопреобразователь; 9) ВЧ вход; 10) Угол наклона акустического столба.

Основной механизм, ответственный за акустооптическое взаимодействие называют упруго-оптическим эффектом. Периодические сжатия и разрежения во всем объеме кристалла проявляются в виде перераспределения показателя преломления, что и реализует дифракцию падающего света. Хотя функция ПАОФ аналогична дифракционной решетке, характер дифракции в фильтре отличается тем, что она происходит в объеме кристалла, а не на плоской поверхности, и в ограниченной полосе спектральных частот светового луча, которая определяется диапазоном частот подводимого ВЧ сигнала. В этом отношении ПАОФ выступает в роли полосового фильтра, нежели дифракционной решетки. Переменный характер ультразвуковой акустической волны приводит к формированию в кристалле дифракционной решетки Брэгга [1]. Для конкретной акустической частоты, только ограниченный диапазон спектральных частот удовлетворяет условию фазового согласования [5], что является условием возникновения дифракции. Перестраивая частоту радиосигнала, подводимого к ПП, мы изменяем центр спектральной полосы пропускания, согласно условий для поддержания фазового синхронизма. Длины дифрагированной волны изменяются в зависимости от частоты радиосигнала, приложенного к ПП. Центральная длина волны (1) в полосе пропускания определяется условием синхронизма по следующей формуле:

$$\lambda_{\text{центр}} = \frac{V \Delta n}{f} \quad (1)$$

Где:

$\lambda_{\text{центр}}$ – Центральная длина волны света в полосе пропускания,

V – Скорость акустической волны в кристалле;

Δn – Разность коэффициентов преломления «обыкновенного» и «необыкновенного» пучков;

f – Частота акустической волны;

Амплитуда световых волн, дифрагированного пучка пропорциональна радиочастотной мощности, приложенной к кристаллу (7). Следовательно, изменение частоты и мощности ВЧ-сигнала обеспечивает механизм выбора длины волны и регуляции интенсивности света, отфильтрованной ПАОФ. При дальнейшем исследовании закономерностей функционирования фильтров было установлено, что разрешающая способность фильтра и его эффективность растут одновременно с увеличением длины акустооптического взаимодействия [6].

Технические параметры ПАОФ

Спектральный диапазон - интервал световых длин волн, в котором фильтр может быть перестроен для выделения волны требуемой длиной с заданным разрешением, т.к. длина волны дифракции определяется частотой возбуждения, приложенной к акустическому преобразователю и результирующей частотой акустической волны. Центральная длина волны уменьшается с увеличением акустической частоты.

Диапазон перестройки частот акустической волны – диапазон ВЧ частот, подаваемых на ПП для генерации акустической волны той же частоты для формирования дифракционной решетки в объеме кристалла.

ПАОФ имеют ограничения в виде величины диапазона перестройки длины акустической волны с помощью ПП. Обычно, эта величина значительно меньше той, которую может обеспечить в оптическом диапазоне кристалл.

Спектральное разрешение ПАОФ определяется как полная ширина на половине максимума главного лепестка выбранного оптического выхода, и зависит как от длины волны, так и конфигурации кристалла. Спектральное разрешение типового ПАОФ колеблется от единиц до десятков нанометров для видимой и ближней инфракрасной областей спектра.

Эффективная линейная апертура ПАОФ ограничена высотой акустического луча в одном измерении и с помощью акустического ослабления поперек оптической апертуры (акустическое транзитное расстояние) в другом измерении. Акустическое затухание в кристаллических материалах, таких как диоксид теллура пропорциональна квадрату акустической частоты, и, следовательно, является весьма проблематичным ограничением

линейного размера апертуры в диапазоне длин волн короче видимого света, что требует более высоких частот ВЧ для настройки.

Мощность, подводимая к ПП – величина мощности, необходимая для формирования стоячей дифракционной решетки в объеме кристалла. Величина подводимой к ПП мощности является одной из наиболее важных расчетных величин. Установленной закономерностью является то, что эта величина возрастает с увеличением оптической апертуры и длин акустических волн. Высокий уровень мощности может вызвать тепловой дрейф и ухудшение стабильности параметров фильтра.

Полное сопротивление ПАОФ – величина входного сопротивления фильтра. Классическим вопросом разработки ПП является преобразование его сопротивления. Проблема заключается в том, что ПП является комплексной нагрузкой [7], т.е. полное сопротивление ПП определяется активной частью - Re , на которой и происходит рассеивание подводимой мощности, и реактивной – Im , которая, в свою очередь, может иметь емкостной либо индуктивный характер.

Подавляющее число современных ВЧ генераторов имеет выходное сопротивление 50 Ом – $Z = 50 - j0$. Поэтому, для согласования источника и нагрузки рассчитываются цепи согласования, компенсирующие во всем частотном диапазоне мнимую составляющую комплексного импеданса ПП.

Экспериментальная часть

На рисунке 2 представлен образец кристалла диоксида теллура с напыленным на него ПП из ниобата лития общей толщиной 11 мкм. Толщина, последовательность материалов подобрана таким образом, чтобы обеспечить рабочий диапазон 90-120 МГц.



Рис.2. Образец исследуемого пьезопреобразователя

Необходимо учитывать, что одним из важнейших условий правильного функционирования ПАОФ является уровень подводимой ВЧ мощности. Ее избыток может привести к разогреву кристалла парателлурита и возникновению явления спектрального дрейфа – уход величин оптических параметров фильтра. В тоже время, недостаток уровня подводимой мощности приводит к ухудшению качества акустического столба, что в свою очередь, также не позволит обеспечить требуемую дифракционную эффективность и спектральное разрешение. Необходимо также отметить, что также существует необходимость учитывать неравномерность коэффициента усиления выходного каскада блока управления ПАОФ. Все это в совокупности позволяет утверждать, что контроль уровня подводимой и отраженной мощности от ПП позволит повысить эффективность управления параметрами ПАОФ.

В ходе исследований выполнены измерения комплексного импеданса ПП (рисунок 3). Из представленных зависимостей видно, что для сопряжения с этого ПП с 50-омным выходом блока управления ПАОФ, необходимо наличие согласующей цепи. На рисунке 4 представлен коэффициент стоячей волны (КСВ) тракта «выходной каскад блока управления – пьезопреобразователь». Применение пассивных согласующих цепей позволяет обеспечить достаточную степень согласования ($КСВ \leq 2$) источника сигнала с нагрузкой. Применение относительно малых (по габариту) согласующих цепей не позволяет обеспечить хорошую равномерность КСВ в рабочей полосе частот.

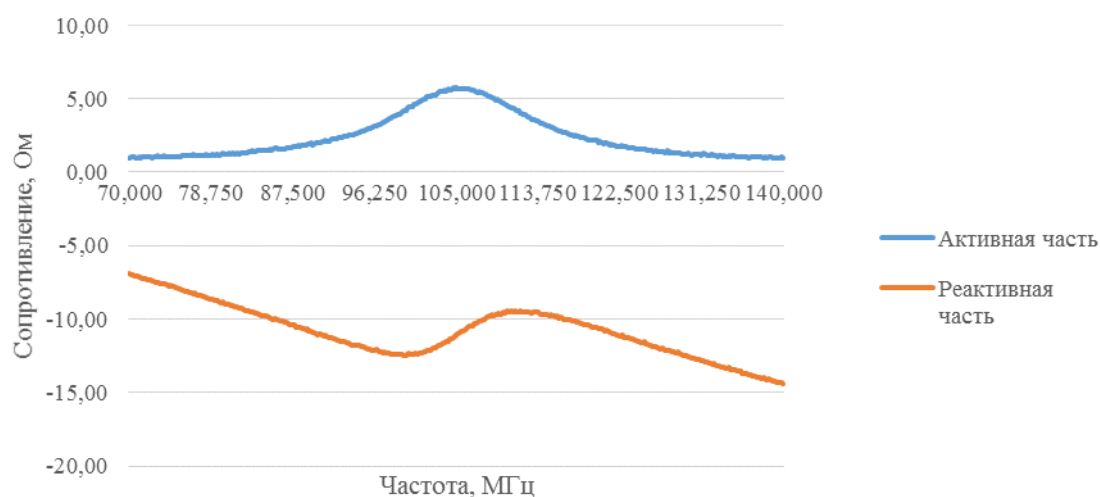


Рис. 3. Комплексный импеданс исследуемого пьезопреобразователя

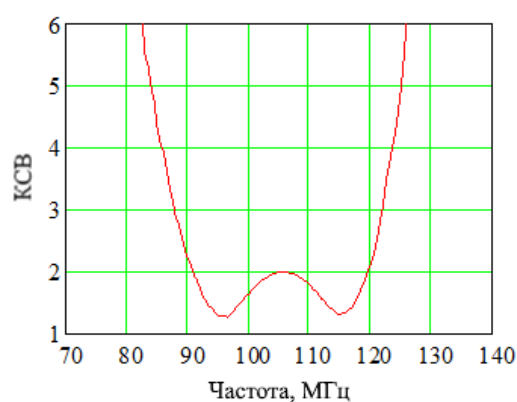


Рис. 4. Коэффициент стоячей волны тракта «выходной каскад блока управления – пьезопреобразователь»

Структурная схема аппаратной части системы

Анализ существующих блоков управления ПАОФ показал, что зачастую данный блок представляет собой генератор ВЧ- мощности требуемого диапазона. Для контроля уровня подводимой и отраженной мощности предложено дополнить структуру блока управления блоком оценки согласования. Необходимость этого обусловлена тем, что в процессе работы из-за разогрева кристалла возможен уход параметров акустического согласования, и, как следствие, параметров электрического согласования. Обеспечение контроля температуры кристалла в совокупности с контролем уровня согласования позволит также в режиме реального времени управлять уровнем подводимой мощности, что позволит повысить эффективность работы фильтра на граничных частотах рабочего диапазона при возрастающем рассогласовании. Структура блока оценки согласования представлена на рисунке 5.

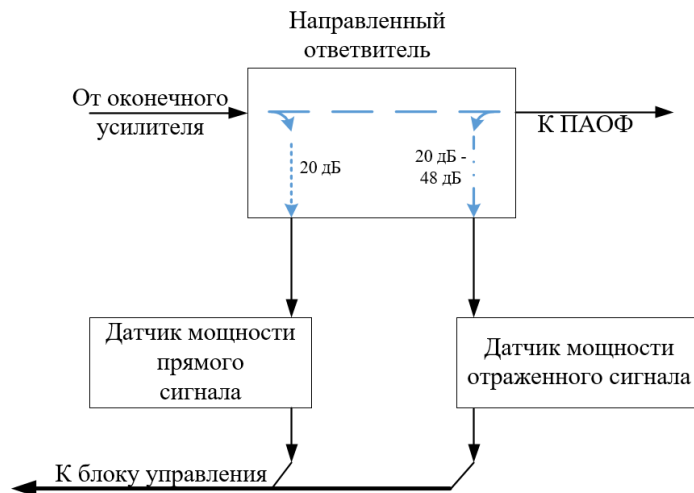


Рис. 5. Структура блока оценки согласования

В состав блока входят:

Двунаправленный ответвитель – устройство, обеспечивающее прохождение сигнала от источника к нагрузке с минимальным ослаблением (и отводом части энергии для измерения) и возможностью ответвления отраженного сигнала от нагрузки.

Датчики мощности – позволяют оценить, как реальный уровень передаваемой к нагрузке мощности, так и величину мощности отраженного сигнала.

Применение микропроцессора в составе блока управления ПАОФ позволяет пересчитывать данные от датчиков мощности в величины мощности прямого и отраженного сигналов и вводить коррекцию не только для уровней мощности необходимых для эффективной дифракции, но и для компенсации неравномерности коэффициента передачи ВЧ-тракта блока управления ПАОФ.

Заключение

Основываясь на полученных результатах экспериментальных исследований, а так же с учетом с учетом степени согласования тракта «выходной каскад блока управления – пьезопреобразователь» обобщенная методика управления параметрами ПАОФ состоит из следующих этапов:

1. Инициализация и первоначальная настройка блока управления;
2. Определение частоты управляющего ВЧ сигнала;
3. Определение расчетной величины мощности управляющего ВЧ сигнала;
4. Расчет поправочных коэффициентов для канала усиления для данной частоты управляющего сигнала;
5. Формирование управляющего сигнала;
6. Контроль степени согласования;
7. Контроль температуры кристалла
8. Коррекция уровня мощности с учетом степени согласования и температуры;

Методика важна для тех случаев, когда рабочая полоса ПАОФ может превышать одну октаву, т.к. в этом случае возможна работа при значениях КСВ более 2, что приводит к увеличению отраженной мощности, что может негативно сказаться на выходе задающего генератора.

Список литературы

- [1] Narasimha S.Pasad J. Deep-UV based acousto-optic tunable filter for spectral sensing applications [Электронный ресурс] режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060046594>. Дата доступа: 20.11.17

- [2] Вартанов, А.З. Методы и приборы контроля окружающей среды и экологический мониторинг/: А.З Вартанов, В.Л. Шкуратник, А.Д. Рубан; – Москва, Горная книга, 2009. – 647с.
- [3] Балакший, В. И. Физические основы акустооптики/ В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. И. Чирков; – Москва; Радио и связь, 1985. – 278 с.
- [4] Залесский, В. В. Анализ и синтез пьезоэлектрических преобразователей/ В. В. Залесский; Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского ун-та, 1971. – 152с.
- [5] Анчуткин, В.С. Акустооптический метод спектрально-поляризационного анализа изображений / В.С. Анчуткин// Прикладная физика – 2010. – №1 С.14 – 16.
- [6] Левин, В.М. Свет и звук: взаимодействие в среде/ В.М. Левин; – Москва: Знание, 1981. – 64 с.
- [7] Шакин, О. В. Методы инженерного расчета схемы электрического согласования акустооптического модулятора/ О. В. Шакин// Информационно-управляющие системы – 2013. – № 5. – С. 23 – 25.

References

- [1] Narasimha S.Pasad J. Deep-UV based acousto-optic tunable filter for spectral sensing applications [Electronic resource] access mode: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20060046594>. access date: 20.11.17
- [2] Vartanov, A.Z. Metody i pribory kontrolja okruzhajushhej sredy i jekologicheskij monitoring/: A.Z Vartanov, V.L. Shkuratnik, A.D. Ruban; – Moskva, Gornaja kniga, 2009. – 647s.
- [3] Balakshij, V. I. Fizicheskie osnovy akustooptiki/ V. I. Balakshij, V. N. Parygin, L. I. Chirkov; – Moskva; Radio i svjaz', 1985. – 278 s.
- [4] Zaleskij, V. V. Analiz i sintez p'ezoelektricheskikh preobrazovatelej/ V. V. Zaleskij; Rostov-na-Donu: Izd-vo Rostovskogo un-ta, 1971. – 152s.
- [5] Anchutkin, V.S. Akustoopticheskij metod spektral'no-poljarizacionnogo analiza izobrazhenij / V.S. Anchutkin// Prikladnaja fizika – 2010. – №1 S.14 – 16.
- [6] Levin, V.M. Svet i zvuk: vzaimodejstvie v srede/ V.M. Levin; – Moskva: Znanie, 1981. – 64 s.
- [7] Shakin, O. V. Metody inzhenernogo rascheta shemy jelektricheskogo soglasovanija akustoopticheskogo moduljatora/ O. V. Shakin// Informacionno-upravljajushhie sistemy – 2013. – № 5. – S. 23 – 25.

Сведения об авторах

Мальцев О.С., м.т.н., инженер Центра 1.6 НИЧ БГУИР.
 Давыдов М.В., к.т.н., доцент, зав.каф. ТОЭ БГУИР
 Федоринчик М.П., к.т.н., доцент, доцент кафедры ИРТ БГУИР.

Information about the authors

Maltsev O.S. master of science, engineer Center 1.6 RDU BSUIR
 Davydov M.V., PhD, associate professor, Head of department «Fundamental Electrical Engineering»
 Fedorinchik M.P. PhD, associate professor, associate professor of department «Information Radiotechnologies»

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь, Минск, П.Бровки, 6, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, +375(33) 3580857.
 e-mail: maltsev@bsuir.by
 Мальцев Олег Сергеевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus, Minsk, P. Brovki, 6, Belarusian state university of informatics and radioelectronics, +375(33) 3580857.
 e-mail: maltsev@bsuir.by
 Maltsev Oleg Sergeevich

О ПРОБЛЕМАХ МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ВОДЕ

А.Л. Чечётко, А. И. Парамонов

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Гикало, 9, Минск, 220005, Беларусь*

Поступила в редакцию

Аннотация. В работе приводится исследование проблемы чрезвычайных ситуаций на воде. Предложено решение для снижения риска их возникновения в виде информационной системы мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций. С целью создания модели чрезвычайных ситуаций рассмотрены их особенности и классификация.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация, экстремальная ситуация, системы слежения, идентификация, мониторинг.

Abstract. The paper contains a study of water emergencies problems. A solution to reduce the risk of their occurrence as a monitoring and preventing emergencies information system is proposed. To describe the emergency situations model, their features and classification are considered.

Keywords: emergency situation, extreme situation, tracking systems, identification, monitoring.

Введение

Для большинства людей летний отдых ассоциируется с поездками на море, озеро или реку. В жаркую погоду отдыхающих на водоемах становится особенно много. И, как следствие, повышается риск возникновения чрезвычайных ситуаций. По оперативным данным ОСВОД [1] только с начала года по ноябрь 2017 года в Республике Беларусь от утопления погибло 322 человека, из них 27 несовершеннолетних. Было спасено 268 человек, из них 92 несовершеннолетних. Предупреждено за нарушение правил охраны жизни людей на водах 14682 человека, из них 3207 несовершеннолетних. Такое количество случаев подчеркивает актуальность вопроса повышения безопасности пребывания граждан на водоёмах. На сегодняшний день контроль за ситуациями возле водоемов возложен в основном на спасателей. Однако в силу малого числа персонала и больших площадей для отдыха у воды, задача мониторинга и предупреждения чрезвычайных ситуаций на воде предполагает новых подходов. На текущий момент известны информационные системы слежения и сопровождения объектов, которые нашли свое применение в различных сферах, например, в охране объектов. В работе предлагается решение рассмотренного вопроса в виде информационной системы, которая позволит в режиме реального времени проводить мониторинг, идентифицировать и предупреждать возможность возникновения чрезвычайных и экстремальных ситуаций.

Информационные системы мониторинга

Сегодня известны разные методики и системы мониторинга, которые используют в своей основе различные датчики, спутники и т.д., например, методика обнаружения пожаров основана на сравнении температур (интенсивностей входного сигнала, полученного радиометром MODIS) каждого пикселя в двух инфракрасных спектральных каналах, 21 канал (4 мкм T4) и 31 канал (11 мкм T11). Эта методика реализована в рамках программы Scanex Modis Processor с возможностью диалоговой настройки входных и выходных параметров. При этом считается, что чем выше температура пикселя в 21 канале, тем больше вероятность пожара. Соответственно, чем больше разность температур в каналах, тем больше вероятность

пожара. Также с помощью датчиков можно проводить мониторинг загрязнения окружающей среды химикатами или радиацией. Но эти и подобные методики не применимы для ситуаций на воде, так как нет возможности задействовать датчики, а использование спутника проблематично из-за дороговизны и невозможности постоянного мониторинга.

Основная концепция предлагаемой системы заключается в размещении мобильной камеры наблюдения в прибрежной зоне.

Программное средство для системы мониторинга предполагает комплексное решение проблемы, которое включает целый ряд подзадач, таких как:

- 1) идентификация объектов и ситуации,
- 2) трекинг объектов,
- 3) анализ и прогнозирование событий.

Задача идентификации объектов на сегодняшний день имеет уже достаточно решений и готовые программные реализации в виде пакета библиотек. Однако задача идентификации ситуаций все еще слабо формализована в силу сложности представления информации. В работе вводится гипотеза, что ситуация – это объект или совокупность объектов, которые находятся в определенных состояниях, в частности в заданных положениях в пространстве. Таким образом, задача идентификации сводится последовательно к нахождению в кадре заданных объектов и определению их положений. При обнаружении объектов или ситуаций необходимо проконтролировать за их поведением – выполнить их трекинг в окне видеоизображения. Одной из ключевых задач данной системы мониторинга является анализ поведенческой модели контролируемых объектов и на его основе прогнозирование возможных чрезвычайных ситуаций с целью их предотвращения.

Для реализации всех означенных задач необходимо представить знания о возможных чрезвычайных ситуациях на воде в виде информационной модели.

Теоретический анализ проблемы

Разработка программного средства предполагает построение формальной модели ситуаций, которые необходимо будет выявлять. Для этого рассмотрим особенности возможных ситуаций в разрезе их понимая соответствующими службами. Ситуация на водоёме может быть чрезвычайной или экстремальной [2].

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. Классификацию ЧС принято производить по масштабам возможных последствий, скорости распространения и сфере возникновения ЧС [3]. Чрезвычайные ситуации на водоёмах относятся к чрезвычайным ситуациям техногенного характера и могут различаться в масштабах возможных последствий и скоростью распространения. ЧС техногенного характера – это аварии, к которым относятся транспортные катастрофы, взрывы или угрозы взрывов, некоторые виды пожаров, выброс или угроза выброса различных ядохимикатов, радиоактивных или биологических веществ, разрушение построек, зданий или сооружений.

Экстремальными называются такие ситуации, когда условия жизни и деятельности максимально усложняются и требуют от человека напряжения физических и эмоциональных сил. Например, когда человек тонет, задыхается, замерзает, истекает кровью и пр. Подобные ситуации требуют максимальной собранности и хорошей подготовки, как физической, так и моральной. Экстремальные ситуации на водоёмах относятся к экстремальным ситуациям природного характера. Природные ЭС – обычно возникают в независимости от человека. Примерами таких ситуаций могут послужить землетрясения, наводнения, лесные пожары, человек, заблудившийся в лесу, в горах и т.п. В особую группу можно выделить ситуации, которые возникли по вине человека. Пример: экологическая катастрофа, возникшая в результате деятельности людей и оказывающая неблагоприятное влияние на них в зоне действия.

Заключение

Создание системы мониторинга позволит предупреждать возможность возникновения чрезвычайной ситуации, например, предупредить случаи, когда плавательное средство движется в сторону людей, находящихся в воде, или идентифицировать ситуацию, когда человек тонет. Тем самым делается попытка уменьшить число случаев создания чрезвычайных ситуаций и увеличить оперативность реагирования при их возникновении.

Список литературы

17. Справка о несчастных случаях с людьми на водах в Беларуси на 08 ноября 2017 г. (оперативные данные). URL: <http://mgoosvod.by/na-08-noyabrya-2017>
18. Поведение человека в экстремальных и чрезвычайных ситуациях. URL: http://www.mchs.gov.ru/dop/info/smi/news/Novosti_glavnih_upravlenij/item/576175
19. Классификация чрезвычайных ситуаций. URL: https://studopedia.ru/5_116738_klassifikatsiya-chrezvichaynih-situatsiy.html

References

3. Information on accidents with people on water in Belarus on November 8, 2017 (operational data). URL: <http://mgoosvod.by/na-08-noyabrya-2017>
4. Human behavior in extreme and emergency situations. URL: http://www.mchs.gov.ru/dop/info/smi/news/Novosti_glavnih_upravlenij/item/576175
5. Classification of emergencies situations. URL: https://studopedia.ru/5_116738_klassifikatsiya-chrezvichaynih-situatsiy.html

Сведения об авторах

Чечётко А.Л., магистрант кафедры ПОИТ, БГУИР.

Парамонов А.И., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ПОИТ, БГУИР.

Information about the authors

A.L. Chechyotko, graduate student of Information Technologies Software sub-department, BSUIR.

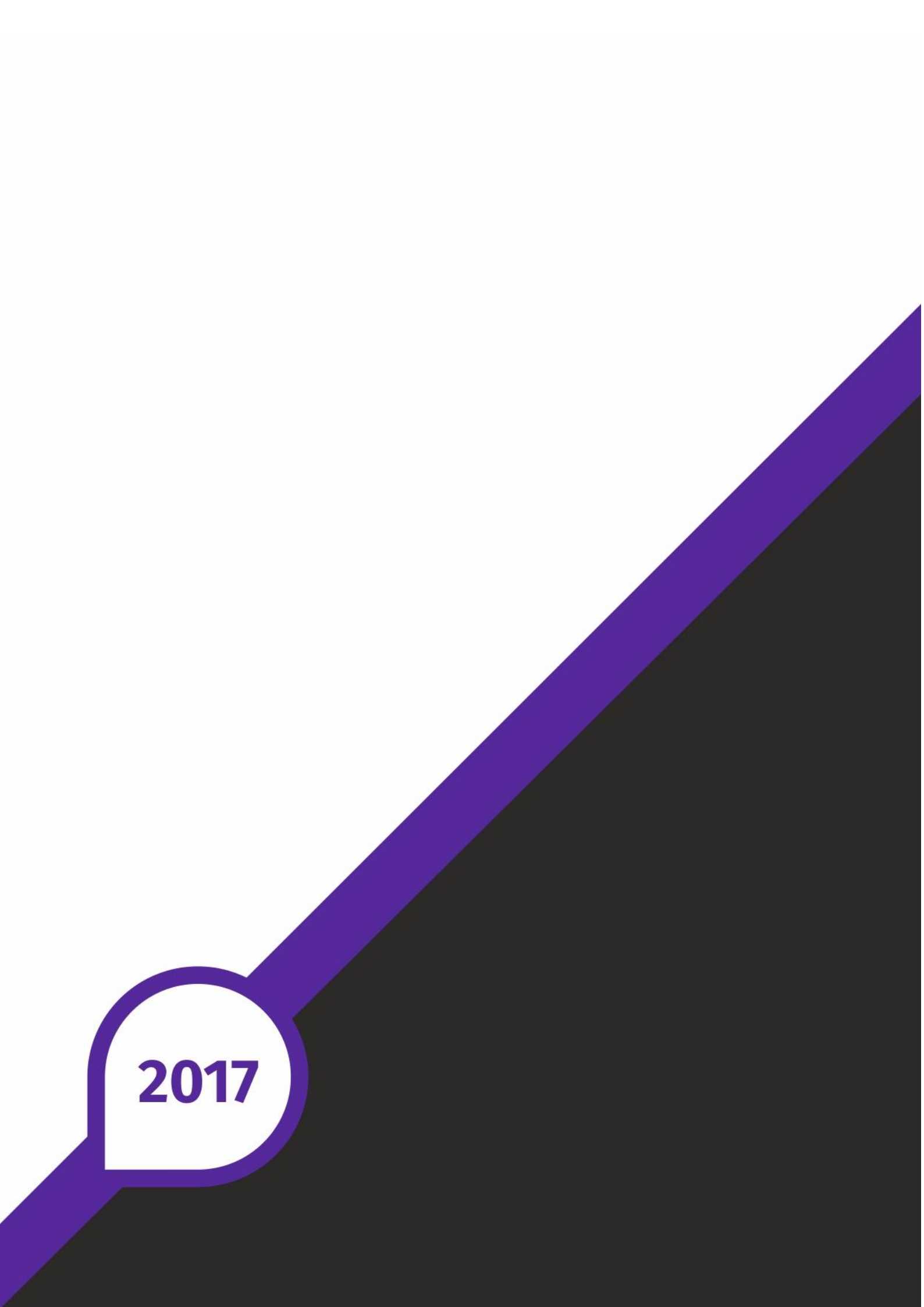
A.I. Paramonov, PhD, associate professor, associate professor of Information Technologies Software sub-department, BSUIR.

Адрес для корреспонденции

220005, Беларусь, Минск, Гикало, 9,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. + 375 17 293-85-67;
e-mail: dekfkss@bsuir.by
Чечётко Александр Леонидович

Address for correspondence

220005, Belarus, Minsk, Gikalo, 9,
Belarussian state university of informatics and radio
electorics
tel. + 375 17 293-85-67;
e-mail: dekfkss@bsuir.by
Chechyotko Alexander Leonidovich



2017