

Информационная система сейсмометрического мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений: опыт моделирования, разработки и внедрения*

Д. Б. Короленко[†], А. П. Кузьменко, В. В. Москвичев, В. С. Сабуров

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

[†]Контактный e-mail: dbkorolenko@gmail.com

Дан обзор систем сейсмометрического мониторинга зданий и сооружений, приведено описание инженерно-сейсмометрического метода оценки их технического состояния. Разработаны модель и структура информационной системы сейсмометрического мониторинга плотин ГЭС, отвечающие заданным функциональным требованиям. Описаны процессы сбора, обработки, хранения и анализа данных для регистрации сейсмических событий и контроля технического состояния. На основе модели системы и технологии анализа данных сейсмометрического мониторинга разработаны и запущены в эксплуатацию автоматизированные системы сейсмометрического контроля технического состояния Красноярской и Зейской ГЭС. Системы обеспечивают регистрацию сейсмических событий интенсивностью выше двух баллов по шкале MSK-64 на плотине и планово-периодическую регистрацию микросейсмических колебаний плотины в режиме штатной эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: сейсмометрический мониторинг технического состояния плотин ГЭС, динамические характеристики, информационная система, структурный анализ, функциональная модель, модель данных.

Библиографическая ссылка: Короленко Д.Б., Кузьменко А.П., Москвичев В.В., Сабуров В.С. Информационная система сейсмометрического мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений: опыт моделирования, разработки и внедрения // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 5. С. 13–37.

DOI: 10.25743/ICT.2019.24.5.003.

Введение. Требования федеральных и отраслевых нормативных документов

Воздействия фильтрации, температурного фактора, нагрузок от работы технологического оборудования, сейсмические воздействия и т. д. на строительные конструкции гидротехнических сооружений (ГТС) являются причинами ухудшения их эксплуатационных качеств, снижения несущей способности конструкций, изменения деформационных

*Title translation and abstract in English can be found on page 37.

© ИВТ СО РАН, 2019.

свойств подстилающего грунта. Плотины ГЭС относятся к особо опасным объектам, для которых в соответствии с требованиями нормативных документов регламентируется обязательная установка автоматизированных систем мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений, обеспечивающих контроль всех систем жизнеобеспечения объектов [1, 2].

К инструментальным наблюдениям за динамическими перемещениями ГТС первого класса в районах с сейсмичностью 7 баллов и выше и второго класса — в районах с сейсмичностью 8 баллов и выше относятся динамические тестовые (динамическое тестирование), инженерно-сейсмометрические (сейсмометрический мониторинг) и инженерно-сейсмологические (сейсмологический мониторинг) испытания ГТС [3–5].

Динамические тестовые испытания (ДТИ) предусматривают измерение колебаний плотины по плотной сетке наблюдения (400–1000 пунктов), что позволяет получить динамические характеристики ГТС с высокой точностью — идентифицировать частоты и формы собственных колебаний, определить скорости распространения упругих волн, параметры диссипации и т. д. Из совокупности контролируемых параметров выделяют наиболее значимые, которые называются диагностическими показателями.

Инженерно-сейсмометрические наблюдения основаны на непрерывной регистрации вибраций от функционирующего на ГЭС оборудования, внешних микросейсмических шумов, местных землетрясений и сейсмических волн от взрывов, контроле за параметрами колебаний сооружения и основания с целью определения особенностей поведения сооружения и отдельных его частей при различных динамических воздействиях, контроле их сейсмостойкости [4].

По результатам ДТИ разрабатывается схема наблюдения сейсмометрического мониторинга, определяются параметры и режимы работы автоматизированного комплекса, позволяющего регистрировать сейсмические события, микросейсмические колебания, определять по ним в процессе эксплуатации динамические характеристики объекта [6–9]. Параметры, характеризующие динамические свойства объекта, проявляются при динамических нагрузках и отражают техническое состояние строительной конструкции в целом (частоты и формы собственных колебаний, декременты затухания, статистические характеристики и др.). Значения собственных частот и эпюры форм собственных колебаний объекта позволяют оценить интегральные упругие характеристики конструкции и его основания — жесткость, модуль упругости и др., необходимые для оценки устойчивости массивных конструкций сооружений и наиболее точно отражающие их техническое состояние [10, 11].

Задачей сейсмологического мониторинга является регистрация сейсмических событий в ложе водохранилища вблизи створа ГЭС и на прилегающих территориях [12].

Оценка технического состояния гидротехнических сооружений [7] осуществляется в соответствии с критериями, принятыми в действующих строительных нормах и правилах при обеспечении безопасности эксплуатации зданий и сооружений согласно теории предельных состояний [13]. Под критериями безопасности ГЭС понимают предельные значения двух уровней К1 и К2 количественных и качественных показателей их состояния и условий эксплуатации, соответствующие допустимому уровню риска аварии сооружения и характеризующие его состояние (исправное, неисправное или предаварийное). Количественные критериальные значения диагностических показателей К1 и К2 устанавливаются на основе оценок реакции сооружения при основном и особом сочетании нагрузок соответственно или, если это затруднительно, статистическим методом по результатам анализа данных многолетних наблюдений за работой и состоянием

сооружения [8]. Кроме того, при наличии четких связей количественных диагностических показателей сооружения с уровнями нагрузок, воздействий и цикличностью их изменения во времени критерии безопасности могут быть установлены в виде функциональных зависимостей (закономерностей изменения) между ними [8]. Вычисляются критериальные значения согласно методике [14].

В работе [15] с целью повышения качества диагностического контроля плотины Саяно-Шушенской ГЭС наряду с традиционными двумя критериальными значениями K_1 и K_2 введено третье значение $[K]$ — допускаемая для каждого конкретного уровня верхнего бьефа (УВБ) величина диагностического показателя. Соответствующим образом была введена четырехуровневая шкала технического состояния и уровней безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Вычисленные с помощью эмпирических зависимостей от температурного фактора и УВБ прогнозной модели для радиальных перемещений и углов поворота горизонтальных сечений значения $[K]$ сведены в таблицу с шагом изменения УВБ 5 м. Для промежуточных отметок допускаемые значения $[K]$ определяются путем линейной интерполяции данных из таблицы.

Определение критериев безопасности для динамических характеристик традиционным способом является затруднительным. Сложная зависимость собственных частот от упругих характеристик плотины, отпорности основания, условий сопряжения плотины с береговыми примыканиями, а также факторов внешних воздействий и нагрузок, таких как, например, гидростатического напора в верхнем и нижнем бьефе, температурного фактора позволяет ввести критериальные значения для собственных частот колебаний плотины только статистическим методом, что требует проведения многолетних наблюдений.

1. Сравнительный анализ и формулировка требований к системе сейсмометрического мониторинга

Вопросы проектирования и разработки систем сейсмометрического мониторинга, а также использования динамических характеристик для контроля технического состояния зданий и сооружений, в том числе плотин ГЭС, освещаются в зарубежных и отечественных публикациях.

Стоит отметить ряд разработок в России и странах СНГ.

1. В Институте физики Земли РАН (ИФЗ РАН) совместно с ОАО “ЦНИИЭП жилища” и другими организациями разработаны следующие системы.

— Система мониторинга жилого комплекса “Континенталь”, включающего высотный 48-этажный корпус, г. Москва. Система обеспечивает геодезические измерения, инженерно-геологические наблюдения состояния грунтового массива в основании здания, измерения нагрузок на грунт и напряжений в конструкциях, регистрацию колебаний здания акселерометрами в высотной части и велосиметрами в подземных конструкциях. По мере строительства здания по спектрам мощности колебаний производились определение собственных частот и сравнение с расчетными значениями [16].

— Система мониторинга 44-этажного здания “Эдельвейс”, г. Москва [16]. Одновременно производилась регистрация колебаний здания и пульсаций атмосферного давления. При обработке по линиям спектра анализировался временной ход их амплитуд в сравнении с ходом вариаций атмосферного давления и определялись собственные частоты.

— Сейсмометрическая сеть станций для регистрации шумов природного и техногенного происхождения на плотине и в ложе водохранилища Чиркейской ГЭС, Дагестан [17]. Система позволяет одновременно регистрировать сейсмические события и микросейсмы, микротрески горных пород в примыканиях, а также осуществлять виброконтроль системы агрегат — водовод. Программное обеспечение системы позволяет с интервалом в 1 ч обрабатывать набор пиков спектров колебаний, создаваемых гидроагрегатами, и получать карту пространственного распределения относительных амплитуд — значений для каждого из пиков в разных точках относительно стационарной (опорной) точки.

2. Станция мониторинга деформационного состояния высотных зданий (СМДС-В), разработанная МНИИТЭП совместно с Российской инженерной академией и другими организациями, установлена на нескольких высотных зданиях и зданиях-комплексах г. Москвы. В режиме реального времени она осуществляет регистрацию колебаний сооружений, кренов, расчет основных динамических параметров зарегистрированных сигналов, расчет передаточных функций [18]. Автоматизированная система СМДС-В предназначена для мониторинга зданий и сооружений с большепролетными конструкциями, позволяет определять динамические параметры зданий и сооружений и сравнивать с расчетными значениями, что позволяет судить о степени приближения несущей способности конструкции к ее предельной проектной несущей способности [19].

3. Автоматизированные системы сейсмометрического контроля (АССК), разработанные во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, установлены на Бурейской ГЭС и каскаде низконапорных плотин ГЭС на р. Волге (Волжская и Камская ГЭС). На Бурейской ГЭС АССК состоит из пяти цифровых регистрирующих станций, обеспечивающих запись колебаний по 57 измерительным каналам. Система функционирует с 2003 г., она позволяет регистрировать сейсмические события, осуществлять непрерывную запись колебаний плотины, первичную обработку, формирование файла-протокола, занесение информации в базу данных сейсмических событий и оповещение по электронной почте по заданному списку адресатов вместе с полученными записями [20].

4. На Богучанской ГЭС установлена АССК на базе 16 четырехканальных регистраторов сейсмических сигналов Дельта-3 с четырехкомпонентными акселерометрами. Регистратор может непрерывно и согласно расписанию записывать данные на флеш-карту или передавать их по Ethernet.

5. Автоматизированный сейсмометрический комплекс “Регион-Гидро”, разработанный в НТЦ “Автоматика”, установленный на плотине Саяно-Шушенской ГЭС, осуществляет мониторинг реакций плотины на внешние геомеханические и внутренние возмущающие воздействия [21]. Комплекс также обеспечивает непрерывную регистрацию колебаний плотины трехкомпонентными акселерометрами в 21 пункте наблюдения, детектирование сейсмических событий по уставкам амплитуд ускорений колебаний, задаваемым оператором, оценку реакции сооружения на сейсмическое событие, передачу данных и обработанной информации в локальную сеть ГЭС посредством web-информера, архивирование информации в базе данных.

6. Мобильный диагностический комплекс “Стрела” разработан ООО “Центр исследований экстремальных ситуаций” по заказу МЧС. Комплекс позволяет осуществлять регистрацию вибраций обследуемого сооружения и при необходимости производить синхронную запись изменения давления скоростного напора ветра [22]. Комплекс обеспечивает расчет амплитудных спектров вибраций сооружения и ветровой нагрузки, построение передаточной функции (отношение спектров мощностей колебаний “пункт на-

блюдения–опорный пункт”) и выделение по ее экстремумам частот собственных колебаний конструкции, логарифмических декрементов, распределение амплитуд поперечных и продольных колебаний по высоте сооружения. В результате сравнения измеренных значений собственных частот с расчетными производится оценка снижения несущей способности и ресурса сейсмостойкости сооружения [22].

7. Система сейсμοдиагностики Токтогульской ГЭС [23], разработанная в Кыргызско-российском славянском университете (республика Кыргызстан, г. Бишкек), обеспечивает непрерывную запись колебаний, регистрацию землетрясений, пусков гидроагрегатов, микросейсм, а также других событий в десяти пунктах наблюдения. Система делится на две основные подсистемы, связь между которыми осуществляется через Интернет:

- подсистему сбора данных, расположенную на плотине, которая выполняет предварительную обработку (усреднение спектров колебаний и выделение сейсмических событий, архивацию);
- подсистему обработки данных, расположенную в Кыргызско-российском славянском университете.

Для анализа данных используются математические пакеты Matlab и MathCad. Микросейсмы накапливаются с часовым интервалом в виде осредненных амплитудных спектров колебаний. Амплитуды колебаний на частотах, генерируемых оборудованием ГЭС и гидроагрегатами, используются для контроля состояния сооружения и агрегатов.

Среди зарубежных разработок можно отметить следующие.

1. Предлагаемые компанией ESG Solutions (Канада) решения [24] позволяют осуществлять регистрацию и оценку реакции зданий и сооружений на сейсмические события. По данным обработки микросейсмических колебаний плотин определяется влияние уровня напора воды и температуры на уровень вибраций плотины.

2. Корпорацией Kyushu Electric Pauer, Co (Япония) разработана система мониторинга микросейсмических колебаний на больших плотинах. В работе [25] описывается исследование изменения собственных частот плотин под воздействием уровня напора воды в водохранилище и температурного фактора с использованием результатов измерений этой системой за пять лет. Идентификация частот и форм колебаний осуществлялась по результатам детального обследования, анализ сезонного изменения динамических характеристик осуществлялся по данным измерений колебаний по двум акселерометрам, установленным на плотине. Регистрация сейсмических событий в системе не выполняется.

3. Система для анализа динамического поведения плотины CABRIL (Португалия), разработанная в National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), позволяет регистрировать микросейсмические колебания плотины и сейсмические события [26]. Система осуществляет непрерывную запись микросейсмических колебаний в файлы продолжительностью в один час. По данным записи колебаний в автоматическом режиме рассчитываются осредненные амплитудные спектры, по пикам которых выделяются собственные частоты. Полученные частоты собственных колебаний (в направлении по потоку) сравниваются с результатами вычислений, выполненных с помощью конечно-элементной модели системы плотина — основание — водохранилище, и результатами вибрационных испытаний.

4. Исследования динамических характеристик колебаний мостов и плотин различной конструкции под воздействием микросейсмического фона проводит швейцарская фирма ЕМРА. Система, разработанная в ЕМРА и установленная на арочной плотине

Mauvoisin в Швейцарии, позволяет регистрировать сейсмические события и микросейсмические колебания с фиксацией параметров внешних воздействий (уровень воды в водохранилище). По амплитудным спектрам микросейсмических колебаний выполняются определение собственных частот и анализ их изменения [27].

В результате проведенного краткого анализа можно сделать вывод, что существующие системы сейсмометрического мониторинга в России и за рубежом обеспечивают лишь регистрацию сейсмических событий и архивирование записей микросейсмических колебаний зданий и сооружений. Контроль технического состояния осуществляется в основном по уровню вибраций конструкций и графикам изменения частот собственных колебаний объекта во время эксплуатации. При этом собственные частоты колебаний определяются как центральные частоты спектральных пиков амплитудных спектров колебаний, наиболее ярко выраженных по амплитуде. Построение эпюр форм собственных колебаний, которые используются для идентификации номеров частот собственных колебаний, на предварительном этапе не производится. Поэтому такие системы не позволяют достоверно идентифицировать собственные частоты и корректно решить обратную спектральную задачу по определению упругих характеристик системы плотина — основание. Осуществить оценку текущего технического состояния обследуемой строительной конструкции с вышеуказанными системами контроля оказывается проблематичным и требует дополнительных расчетных обоснований.

Система мониторинга технического состояния строительных сооружений должна обеспечивать контроль упругих характеристик сооружения и основания (модуля упругости, коэффициента Пуассона, жесткости сечений изгибу, сдвигу, сжатию-растяжению, жесткости основания относительно поперечного сдвига и т. п.), в большей степени отражающих необратимые изменения технического состояния строительной системы.

Таким образом, несмотря на значительный объем проведенных ранее исследований, проблема совершенствования систем сейсмометрического мониторинга плотин ГЭС, позволяющих осуществлять помимо регистрации сейсмических событий контроль технического состояния по динамическим характеристикам сооружения, остается актуальной.

В данной работе для решения задач сейсмометрического мониторинга предлагается использовать инженерно-сейсмометрический метод оценки технического состояния зданий и сооружений по их динамическим характеристикам [28, 29]. Суть метода заключается в выполнении следующих задач:

- регистрация микросейсмических колебаний в здании или сооружении по плотной сетке наблюдений;
- построение комплексных передаточных функций опорный пункт — пункт наблюдения, которые определяются как оптимальный фильтр Винера; идентификация частот собственных колебаний в рамках заданной замещающей модели [30];
- оценка конструкционной жесткости зданий и сооружений и отпорности основания по измеренным значениям собственных частот в рамках заданной математической расчетной модели колебаний здания или сооружения [10, 11];
- назначение схемы последующего сейсмометрического мониторинга с ограниченным количеством пунктов наблюдения, обеспечивающей измерение заданного количества диагностических показателей (собственных частот колебаний, параметров затухания колебаний, скоростей распространения упругих волн и т. д.) наилучшим образом.

Предложенный метод успешно использовался при обследовании плотин ГЭС, а также четырех мостов и более 70 различных зданий и сооружений.

На основе анализа нормативных документов и существующих систем сейсмометрического мониторинга определены следующие основные функциональные и технические требования к системе мониторинга:

- конфигурация работы измерительных каналов и системы;
- автоматическая регистрация сейсмических событий и оценка интенсивности и реакции объекта на событие;
- плано-периодическая регистрация микросейсмических колебаний объекта;
- непрерывная запись колебаний объекта, необходимая для анализа предыстории сейсмических событий природного или техногенного характера, чрезвычайных ситуаций, детектирования афтершоков, часто наблюдаемых после землетрясений, а также анализа уровня вибраций;
- оповещение ответственных лиц о сейсмических событиях и неполадках системы;
- хранение данных сейсмометрического мониторинга, зарегистрированных сейсмических событий и информации о функционировании системы;
- ведение журнала сообщений о действиях оператора и работе системы;
- обработка микросейсмических данных и определение динамических характеристик сооружения;
- анализ сезонных и необратимых изменений динамических характеристик с учетом внешних факторов, контроль уровня вибраций;
- оценка упругих характеристик плотины и основания с помощью расчетной модели сооружения, анализ их изменения.

В разработанной системе критерии безопасности ГТС в части сейсмометрического мониторинга должны быть установлены в виде функциональных зависимостей между динамическими характеристиками и параметрами внешних воздействий и нагрузок. Указанные зависимости определяются по результатам статистического анализа данных на этапе накопления, когда внешние нагрузки и воздействия проходят как минимум один полный цикл изменения.

Система мониторинга также должна отвечать требованиям, которые предъявляются при создании современной контрольно-измерительной аппаратуры:

1) модульность:

- декомпозиция системы на функциональные модули с четко определенными потоками данных между ними для уменьшения сложности системы, повышения независимости и универсальности модулей;
- выделение модуля работы с аппаратурой для поддержки аппаратуры разных производителей и соответственно разных входящих пакетов данных;

2) расширяемость, гибкость, обширная настройка приложения и системы;

3) открытость системы, поддержка форматов файлов данных как собственной разработки для программ Seismoteks, Main, Geoton, так и общеизвестных, таких как распространенный в сейсмологии формат css 3.0;

4) требования по времени функционирования:

- регистрация землетрясений — в режиме, близком к реальному времени;
- режим обработки файлов данных колебаний — периодический, регулярный;
- анализ динамических характеристик — после периода накопления данных, затем периодический и после каждого периода наполнения-сработки водохранилища;

5) требования к записи данных:

- регистрация сейсмических событий — сохранение предыстории сейсмического события заданной длительности, при этом начало и окончание записи файла сейсмического события должны происходить по триггеру и детриггеру события соответственно с учетом минимальных и максимальных границ;
- мониторинг — возможность записи сеансов мониторинга заданной длительности по расписанию, позволяющего учесть специфику работы конкретной плотины, а также различные исследовательские потребности (ежедневный мониторинг, периоды повышенной интенсивности изменения внешних воздействий, наличие необратимых процессов в плотине, синхронизация с другими важными процессами при эксплуатации ГТС), длина фрагментов записи данных в секундах должна быть кратна значению 2^n для эффективной обработки данных с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье;
- непрерывная запись колебаний — архивируемые данные должны разбиваться на файлы определенной длительности, например по 30 мин, при этом файлы должны храниться на сервере не менее 7 сут. с возможным последующим удалением;

6) требования к автоматизации обработки данных:

- вычисление статистических характеристик и их оценка — автоматические;
- выделение собственных частот — в автоматизированном режиме с возможным контролем специалиста-исследователя;
- оценка упругих характеристик — автоматическая.

2. Структура и модели информационной системы

Информационная система сейсмометрического мониторинга включает следующие взаимосвязанные и в то же время самостоятельные подсистемы: сбора данных, регистрации сейсмических событий и микросейсмических колебаний, мониторинга технического состояния, анализа реакции плотины на сейсмическое воздействие.

Для анализа и спецификации требований, исследования структуры системы и логических взаимосвязей ее элементов, построения модели системы использована методика структурного анализа. Основными принципами структурного анализа являются разбиение сложных задач на множество меньших независимых блоков для облегчения понимания и иерархическое упорядочивание каждого блока в древовидную структуру, каждый уровень которой детализирует предыдущий [31, 32].

Структурный подход использует средства графического представления описания системы, выполняемых функций, процессов и информационного пространства с помощью графических нотаций. Технология моделирования структурного анализа заключается в построении функциональной модели (IDEF0), модели потоков данных (DFD), модели описания последовательности процессов (IDEF3), модели данных ERD (IDEF1X) [32].

Модель IDEF0 (SADT) позволяет проследить логику и взаимодействие процессов системы, выявить недостатки в их взаимодействии: дублирование функций, отсутствие механизмов, регламентирующих данный процесс, отсутствие контрольных переходов и т. д. [31, 32].

DFD-диаграмма показывает внешние по отношению к системе источники и потребители информации, идентифицирует логические функции (процессы) и группы элементов данных, связывающие одну функцию с другой (потоки), а также идентифицирует

хранилища данных, к которым осуществляется доступ. Таким образом, диаграмма описывает взаимодействие источников и потребителей информации через процессы, которые должны быть реализованы в системе. Структуры потоков данных и определения их компонентов хранятся в словаре данных. Содержимое каждого хранилища также сохраняют в словаре данных, модель данных хранилища раскрывается с помощью диаграмм сущность — связь (ERD) [32].

IDEF3-технология позволяет анализировать систему с точки зрения последовательности выполнения процессов во времени и взаимосвязи между ними [32]. Модели, выполненные с помощью разных технологий, дополняют друг друга, создают более полное описание системы. В данной работе приведены выборочные диаграммы из моделей в разных нотациях для возможности дать представление о разных технологиях.

На рис. 1 показаны основные процессы системы сейсмометрического мониторинга в нотации IDEF0.

Сейсмическая станция обеспечивает предварительное усиление, аналоговую полосовую фильтрацию, дополнительное усиление, оцифровку сигналов сейсмоприемников и передачу сформированных пакетов данных на сервер, где происходит регистрация сейсмических событий и микросейсмических колебаний.

На основе анализа записи землетрясения с помощью специализированных программ осуществляется оценка реакции плотины на сейсмическое воздействие, определяются ускорения и перемещения на гребне плотины и в основании, статистические характеристики и др.

Основные процессы блока регистрации сейсмических событий и микросейсмических колебаний рассмотрены ниже с помощью нотации IDEF3 (рис. 2).

На основе алгоритмов блока “Управление”, строящихся на анализе сигнала для выделения сейсмических событий и планировании сеансов мониторинга по составленному расписанию, осуществляются конфигурация станции в соответствии с профилем реги-

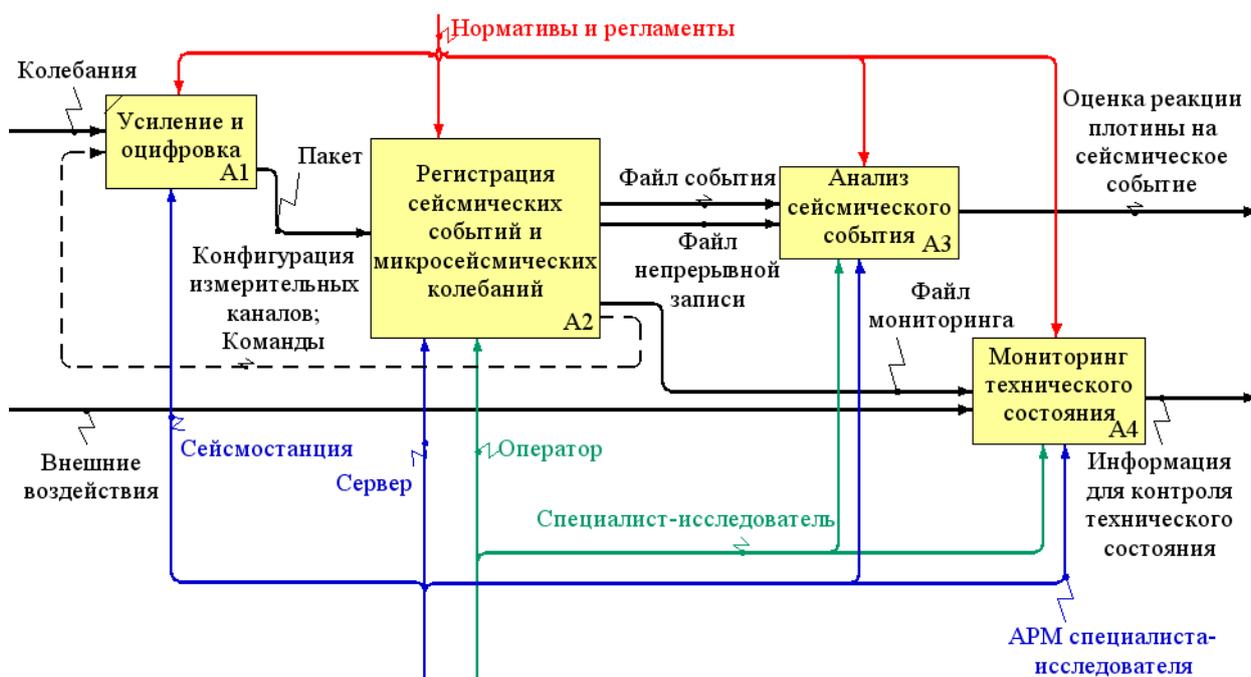


Рис. 1. Основные процессы системы сейсмометрического мониторинга в нотации IDEF0

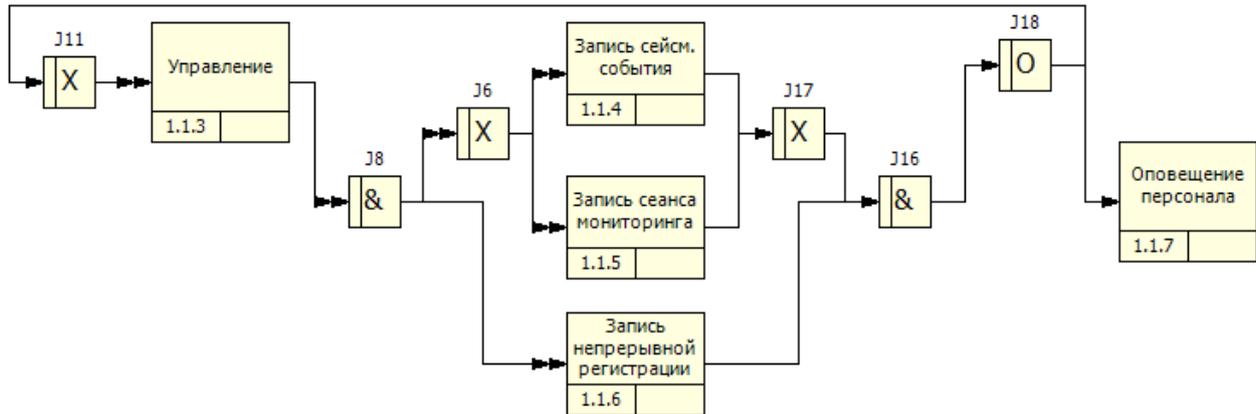


Рис. 2. Основные процессы блока регистрации сейсмических событий и микросейсмических колебаний в нотации IDEF3

страции и запись колебаний в файлы. В обоих случаях происходит непрерывная запись колебаний на случай чрезвычайных ситуаций. Данные регистрации колебаний сохраняются в виде файлов событий, мониторинга и непрерывной записи. Оповещение ответственных сотрудников по выбранным каналам связи происходит при превышении минимального порога интенсивности землетрясения, заданного для каждого сотрудника.

Мониторинг технического состояния сооружения осуществляется по данным обработки записей сеансов микросейсмических колебаний. Диаграмма потоков данных основных процессов в этом блоке представлена на рис. 3.

С помощью специализированных программ вначале вычисляются статистические параметры колебаний и комплексные передаточные функции “опорный пункт — пункт наблюдения”. По спектрам передаточных функций с возможным участием персонала

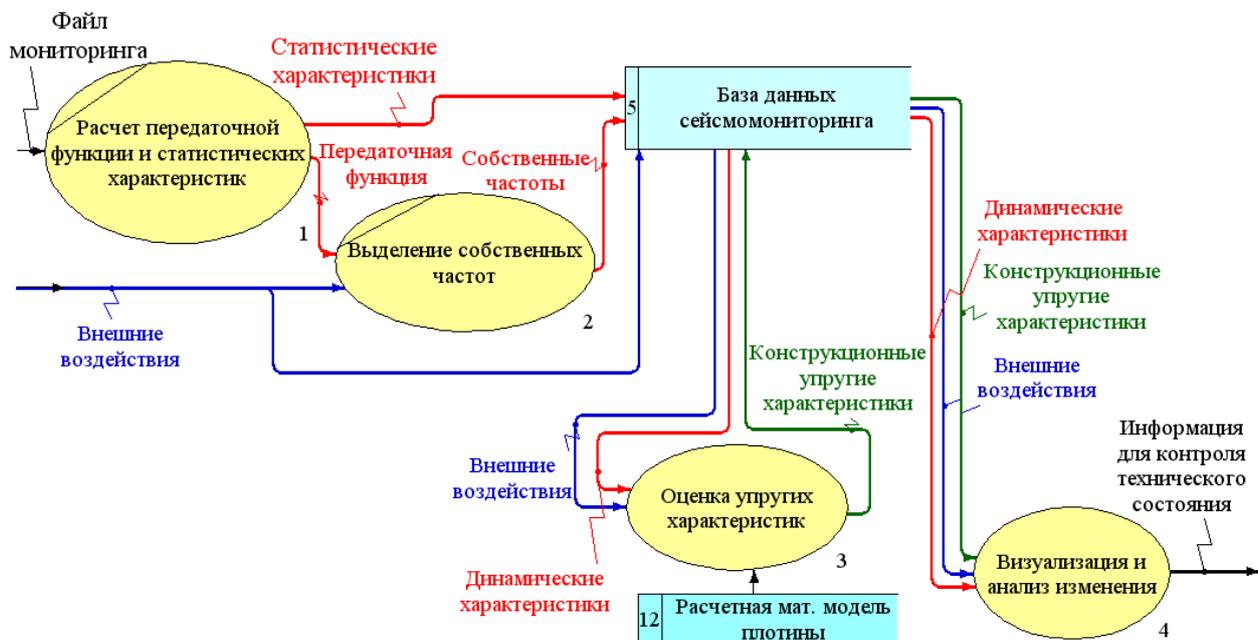


Рис. 3. Диаграмма потоков данных блока “Мониторинг технического состояния”

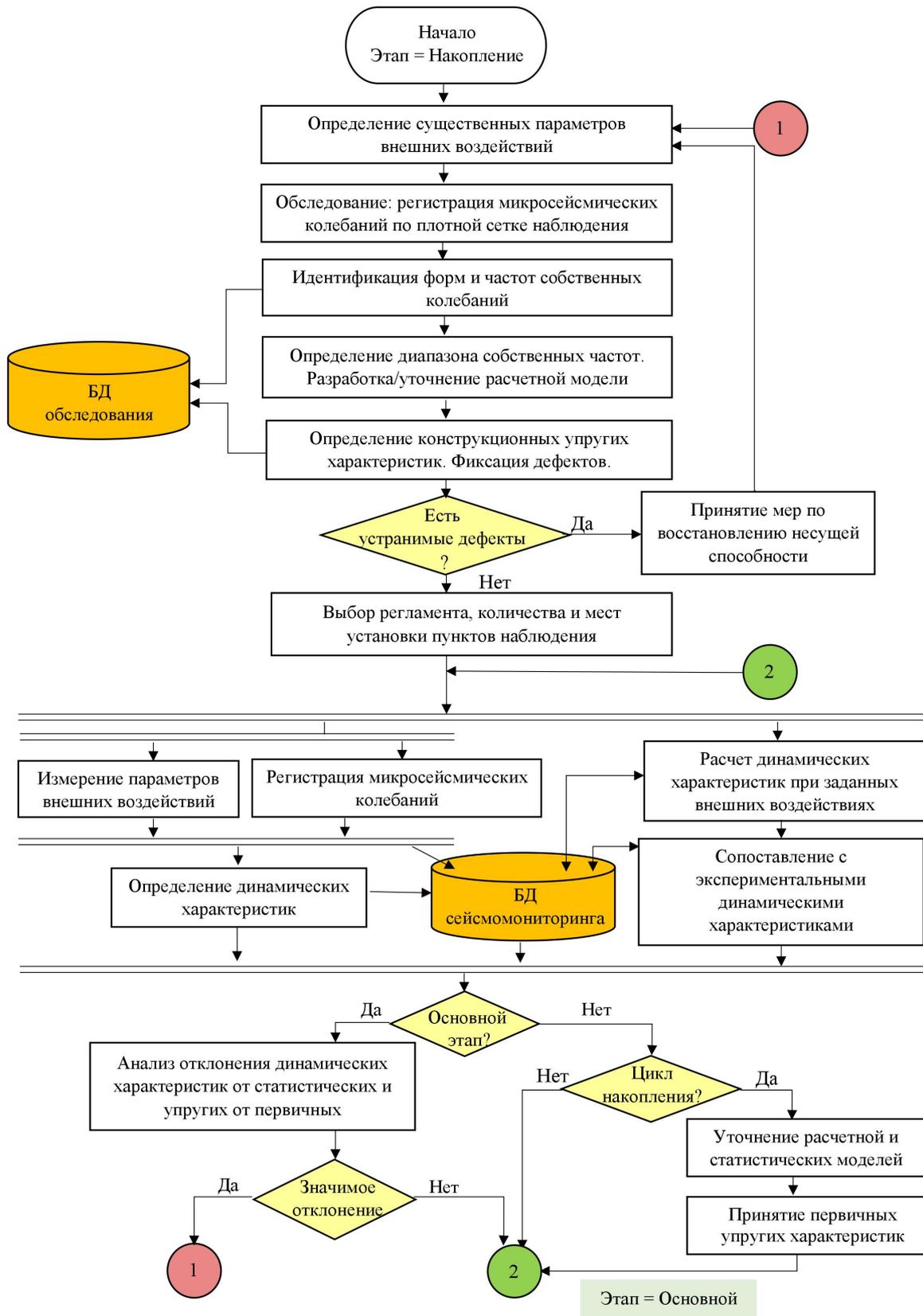


Рис. 4. Блок-схема технологии анализа данных сейсмометрического мониторинга плотин ГЭС

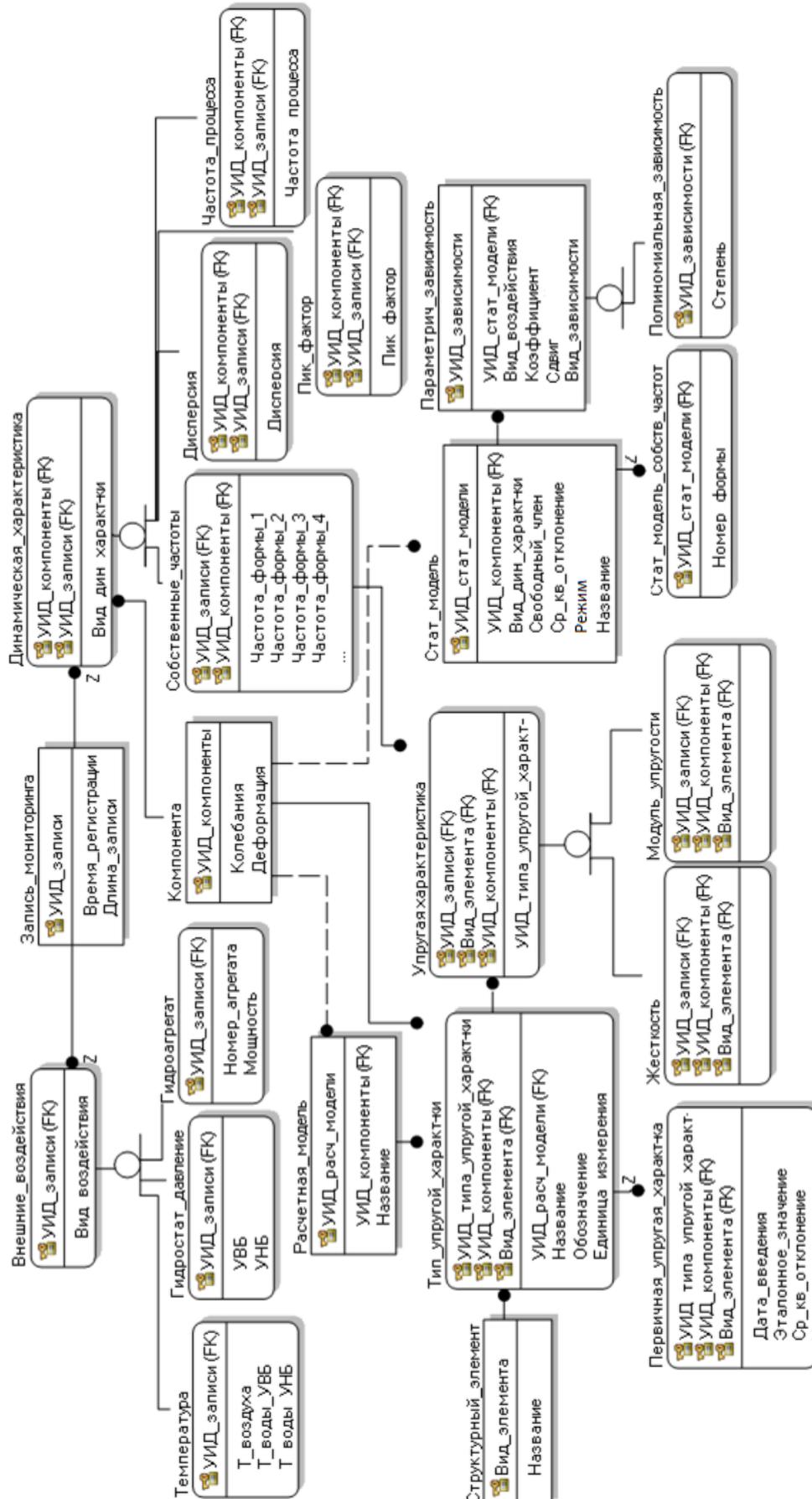


Рис. 5. Фрагмент логической модели данных предметной области мониторинга технического состояния плотин ГЭС

определяются значения собственных частот колебаний плотины. Далее производится оценка упругих характеристик системы плотина–основание, которая осуществляется в результате решения обратной спектральной задачи в рамках заданной замещающей модели колебаний и измеренных собственных частот. В качестве замещающей модели используется математическая расчетная модель колебаний плотины (аналитическая или конечно-элементная), которая разрабатывается по результатам инженерно-сейсмометрического обследования и связывает собственные частоты колебаний строительной системы с упругими характеристиками материалов ее структурных элементов. Полученные динамические и упругие характеристики вместе с параметрами внешних воздействий сохраняются в базе данных для последующего анализа.

Разработанная технология анализа данных сейсмометрического мониторинга плотин ГЭС состоит из двух этапов — начального и основного (рис. 4). На начальном этапе производится предварительное детальное обследование, в результате которого назначаются пункты стационарной системы наблюдения, количество частот собственных колебаний, контролируемых в процессе мониторинга, а также производится разработка замещающей модели. В течение заданного периода времени (обычно не менее года) производится накопление данных сейсмометрического мониторинга, которые вместе с параметрами внешних воздействий (температурный фактор, гидростатическая нагрузка, мощность работающих гидроагрегатов и др.) сохраняются в базе данных. По результатам начального этапа разрабатывается статистическая модель зависимости динамических характеристик от факторов внешних воздействий, уточняется расчетная модель и производится фиксация первичных (эталонных) упругих характеристик структурных элементов конструкции.

На основном этапе выполняются периодическое определение динамических и оценка упругих характеристик системы плотина — основание, анализ отклонения динамических характеристик от значений, полученных с помощью статистической модели с учетом текущих внешних воздействий, и упругих характеристик от первичных значений (эталонных). В случае выявления значимого отклонения динамических и упругих характеристик рекомендуется проведение детального обследования. Более подробно особенности технологии представлены в патенте [33].

На основе анализа сущностей и их связей в функциональной модели IDEF0 и на диаграмме потоков данных DFD построено формальное представление данных, способствующее пониманию системы с точки зрения их структуры.

Фрагмент логической модели данных блока мониторинга технического состояния плотин ГЭС в нотации IDEF1X приведен на рис. 5. В качестве целевой СУБД выбрана система MySQL.

3. Программно-аппаратный комплекс мониторинга состояния плотины Красноярской ГЭС

На основе модели информационной системы и технологии анализа данных сейсмометрического мониторинга плотин ГЭС разработан программно-аппаратный комплекс мониторинга и регистрации землетрясений гидротехнических сооружений (ПАК МЗ). Комплекс введен в эксплуатацию в марте 2010 г., после чего производились его расширение и модернизация [34, 35].

На этапе проектирования системы осуществлено детальное сейсмометрическое обследование плотины Красноярской ГЭС при минимальном и максимальном УВБ, выполнена идентификация частот форм собственных колебаний, разработана оптимальная схема системы, обеспечивающая при ограниченном числе пунктов наблюдения (10 пунктов) измерение значимых частот форм собственных колебаний и регистрацию сейсмических событий интенсивностью выше 2 баллов.

Преимуществом данной системы перед эксплуатируемыми на тот период являлось совмещение в ней на единой программно-аппаратной платформе двух таких основных функций, как регистрация сейсмических событий и запись микросейсмических колебаний для мониторинга технического состояния.

Контроль функционирования комплекса осуществляется в виде отображения по каждому каналу текущих амплитуд ускорений колебаний и их спектров, уровней вибраций в основных осях сооружения, усредненных по пунктам наблюдения.

Выделение сейсмических событий осуществляется по алгоритму STA/LTA (Short Time Average over Long Time Average). По завершении регистрации события происходит предварительная оценка его интенсивности по шкале MSK-64, полученная информация добавляется в журнал событий. Подробная информация о зарегистрированных событиях предоставляется при составлении отчетов за месяц, квартал, год или весь период работы системы. Формируется файл отчета в формате Microsoft Excel или txt с данными о максимальной амплитуде, интенсивности, фактическом значении STA/LTA (для обратной связи и дальнейшей корректировки в системе) по всем каналам регистрации колебаний и по каждому в отдельности.

Мониторинг обычно рекомендуется выполнять два раза в сутки (ночью и днем), но программное обеспечение позволяет составить план с заданным количеством сеансов. В соответствии с составленным планом программа определяет время ближайшего сеанса. При отсутствии землетрясения программа устанавливает необходимые параметры конфигурации измерительных каналов из профиля мониторинга и запускает регистрацию микросейсмических колебаний. После завершения записи сеанса мониторинга для измерительных каналов устанавливается конфигурация из профиля регистрации сейсмических событий. Для сохранения предыстории событий и на случай ЧС осуществляется непрерывная запись колебаний плотины.

Все действия оператора и параметры режима функционирования системы автоматически сохраняются в журнале сообщений с наглядной цветовой градацией по типу сообщения. При регистрации сейсмического события и неполадках системы (отсутствие связи, данных и пр.) информационная система осуществляет оперативное оповещение персонала ГЭС по электронной почте, через сообщение по локальной сети и по SMS в соответствии со списком ответственных сотрудников. Кроме контактных данных для каждого лица указывается минимальный порог интенсивности события, при превышении которого будет осуществляться оповещение.

Обработка записей колебаний выполняется с помощью специализированных программ (например, программы “Сейсмотекс: плотина”), которые позволяют вычислять статистические параметры колебаний (пик-фактор, дисперсию, частоту процесса и др.) и комплексные передаточные функции, по спектрам которых выделяются значения собственных частот сооружения в заданных границах [34]. Диапазон изменения частот определяется на этапе детального обследования при минимальном и максимальном УВБ. Полученные динамические характеристики вместе с факторами внешних воздействий экспортируются в файлы Microsoft Excel для последующего анализа.

Визуализация и проведение анализа изменения динамических и упругих характеристик осуществляются с помощью разработанной программы SeismoAnalytic. Программа позволяет осуществлять импорт в базу данных динамических характеристик и параметров окружающей среды, построение трендов динамических характеристик и факторов внешних воздействий, построение графиков зависимости и аппроксимацию динамических характеристик от параметров окружающей среды.

В программе предусмотрены оконное усреднение данных выбранной характеристики и фиксация одного из параметров внешних воздействий в выбранном диапазоне значений, что позволяет лучше исследовать характер зависимости динамической характеристики от внешнего воздействия. Например, можно зафиксировать температуру в диапазоне от -5 до -10 град. (считаем ее постоянной) и построить зависимость частот от УВБ, таким образом минимизируя влияние температурного фактора.

В качестве примера результата обработки ежедневных сеансов сейсмометрического мониторинга на рис. 6 приведены диаграммы изменения первых четырех частот собственных колебаний “по потоку” плотины Красноярской ГЭС и изменения УВБ.

Реализованное в программе конструирование статистических моделей динамических характеристик позволяет создать статистическую модель, полученную при аппроксимации от одного параметра внешних воздействий, а также более сложную многопараметрическую, полученную по результатам отдельных исследований. При этом для модели учитывается режим работы водохранилища.

Статистическая модель представляется в виде суммы зависимостей исследуемой величины (например, первой частоты собственных колебаний по X -компоненте) от параметров внешних воздействий. На данный момент характер зависимости может быть линейным, полиномиальным, экспоненциальным и логарифмическим.

Анализ изменения динамических характеристик осуществляется с помощью статистической модели в выбранном доверительном интервале ($\sigma, 2\sigma, 3\sigma$). Использование функциональных зависимостей для непрерывного вычисления допустимых значений при текущих параметрах внешних воздействий позволяет построить некоторый “коридор” критериальных значений и с заданной вероятностью определить, попадает ли в него текущее значение диагностического показателя или нет (рис. 7).

Оценка упругих характеристик системы плотина — основание осуществляется в результате решения обратной спектральной задачи в рамках математической модели колебаний плотины. Спектр частот форм собственных сдвиговых колебаний плотины “по потоку” аппроксимирован рядом собственных частот поперечных колебаний балки с жестко защемленными концами, лежащей на упругом полупространстве:

$$p_i = \sqrt{\lambda_i^2 a + b},$$

где $a = \frac{GFk'}{4\pi^2 L^2 m}$, $b = \frac{k_{sh||}}{4\pi^2 m}$; i — номер частоты собственных колебаний; λ_i — характеристическое число; GFk' [тс] — жесткость поперечного сечения тела плотины относительно поперечного сдвига; $k_{sh||}$ [тс/м²] — коэффициент жесткости основания относительно поперечного сдвига “по потоку” на погонный метр длины балки (плотины); L [м] — длина балки (эффективная длина плотины); m [тс · с²/м] — погонная масса плотины с учетом присоединенной массы воды (рассчитывается для каждого текущего УВБ согласно нормативному документу [36]).

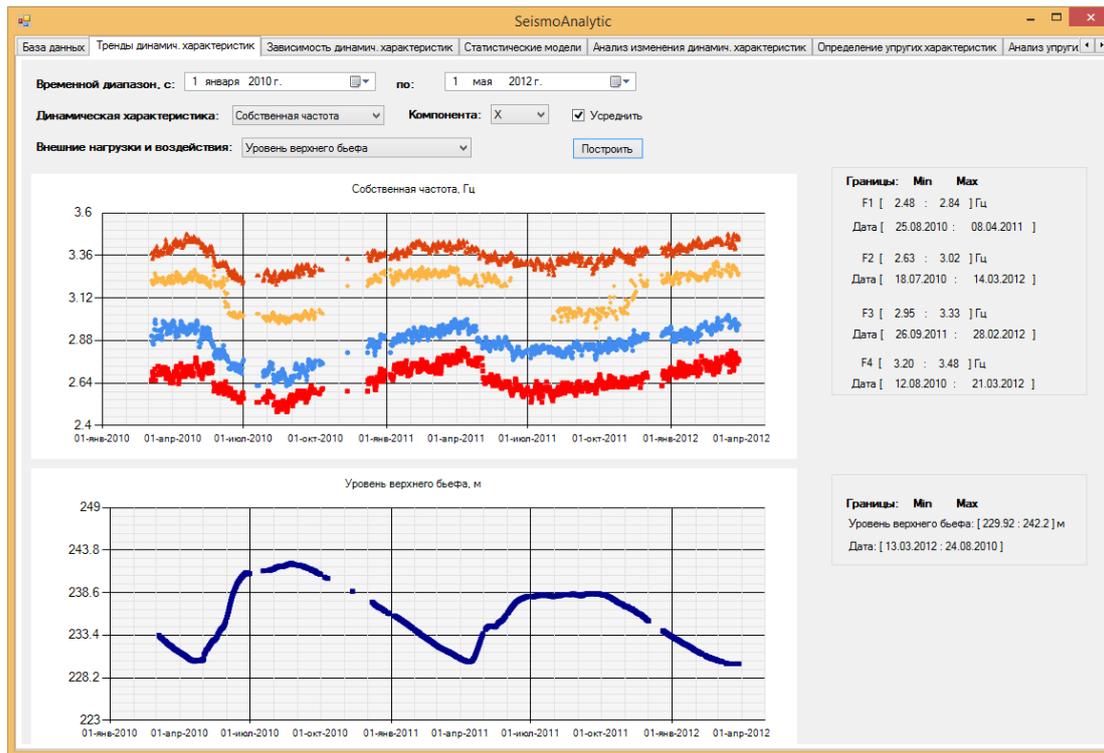


Рис. 6. Графики изменения частот собственных колебаний и УВБ (март 2010 г. — март 2012 г.)

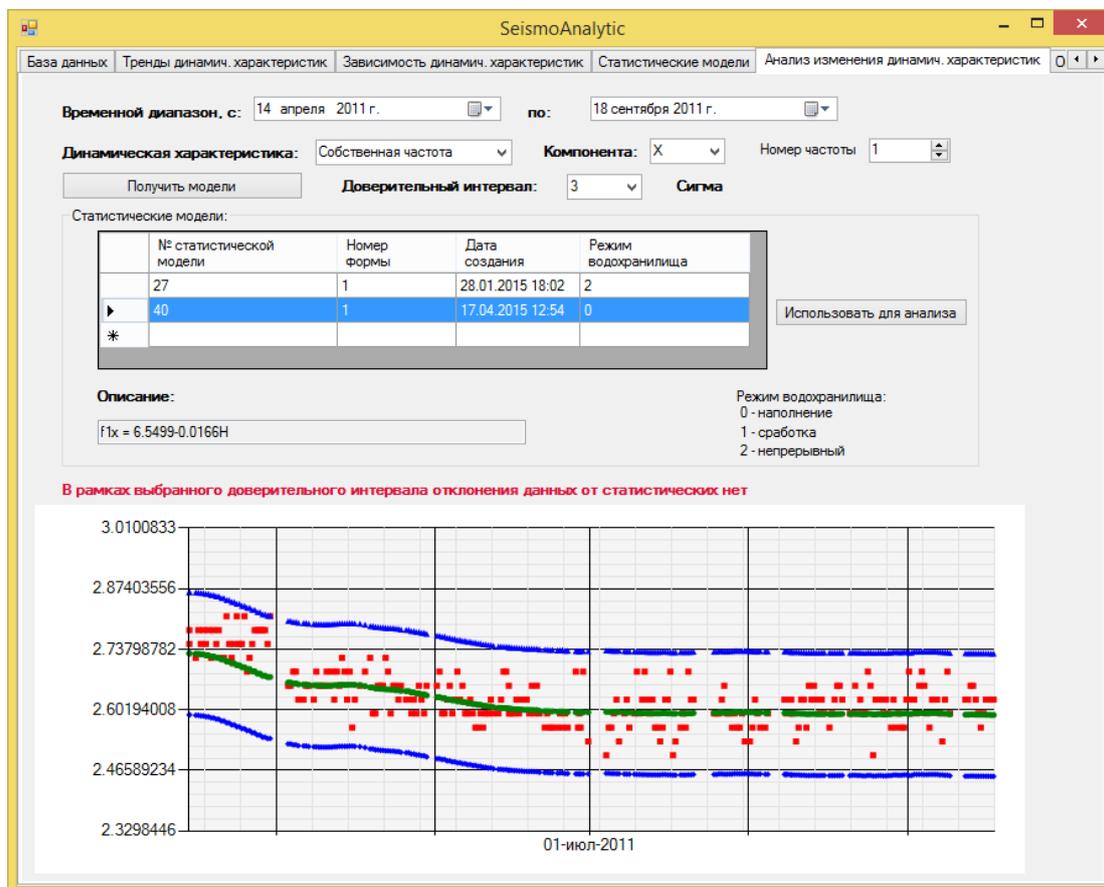


Рис. 7. Анализ изменения динамических характеристик плотины ГЭС

В общем случае коэффициенты λ_i определяются из частотного уравнения

$$\lambda_i^2 \sin \lambda_i - 2\lambda_i \eta \cos \lambda_i - \eta^2 \sin \lambda_i = 0,$$

где $\eta = (k_{sh||}L)/(GFk')$ — коэффициент жесткости поперечному сдвигу в опорных сечениях. Для жестко заземленной балки оно преобразуется в следующий вид: $\sin \lambda_i = 0$. Решением уравнения являются $\lambda_i = i\pi$.

Коэффициенты a и b вычисляются методом наименьших квадратов при аппроксимации экспериментально полученного ряда собственных частот расчетными значениями частот. По коэффициентам a и b определяются конструкционная жесткость поперечного сечения тела плотины поперечному сдвигу и коэффициент жесткости основания поперечному сдвигу. Данная замещающая модель разработана на этапе детального обследования и реализована в виде программного модуля.

На рис. 8 приведены диаграммы изменения упругих характеристик GFk' и $K_{sh||}$. Фиксация первичных (эталонных) значений осуществляется после этапа накопления — за выбранный промежуток времени вычисляются среднее значение и среднеквадратическое отклонение, которые сохраняются в базе данных. Оценка текущего технического состояния осуществляется также и по анализу отклонения упругих характеристик плотины и основания от первичных значений в выбранном доверительном интервале ($\sigma, 2\sigma, 3\sigma$). Для сравнения в таблице приведены результаты оценки упругих характеристик GFk' и $K_{sh||}$ плотины Красноярской ГЭС по спектру собственных частот

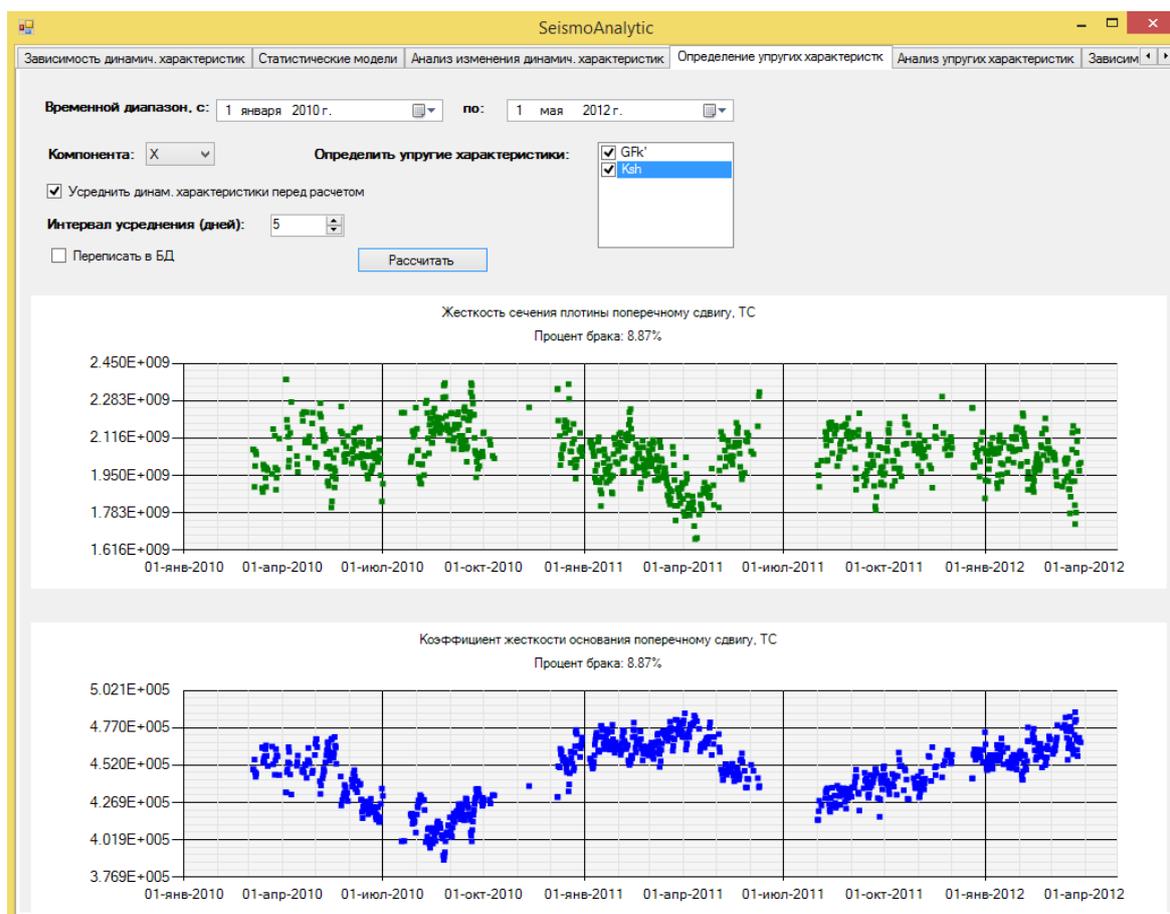


Рис. 8. Диаграммы изменения упругих характеристик плотины (март 2010 г. — март 2012 г.)

Расчет упругих характеристик плотины по частотам замещающей модели

Дата	УВБ, м	Gfk' , тс	$k_{sh }$, тс/м ²
Апрель 2000 г.	227.35	$1.92 \cdot 10^9$	$4.95 \cdot 10^5$
Апрель 2008 г.	229.4	$1.94 \cdot 10^9$	$4.75 \cdot 10^5$
Май 2013 г.	233.00	$1.74 \cdot 10^9$	$4.84 \cdot 10^5$
Октябрь 2000 г.	236.52	$1.80 \cdot 10^9$	$5.05 \cdot 10^5$
Сентябрь 2008 г.	236.45	$2.01 \cdot 10^9$	$4.79 \cdot 10^5$
Сентябрь 2013 г.	241.94	$2.08 \cdot 10^9$	$4.01 \cdot 10^5$

“по потоку” (частоты 1-й — 7-й форм) при инженерно-сейсмометрических обследованиях в 2000–2013 гг. При сравнении полученных в системе результатов с результатами детальных обследований Красноярской ГЭС видна корректность полученных данных.

4. Программно-аппаратный комплекс мониторинга состояния плотины Зейской ГЭС

Восьмилетний опыт эксплуатации ПАК МЗ Красноярской ГЭС явился основой для разработки новой усовершенствованной автоматизированной сейсмометрической системы контроля. Разработка и установка комплекса на Зейскую ГЭС осуществлена АО “НИИЭС” (генподрядчик), ООО НПК “СибГеофизПрибор” (аппаратная часть), ИВТ СО РАН (методическая и программная часть) летом 2018 г. Предварительно были осуществлены детальное сейсмометрическое обследование плотины при минимальном и максимальном УВБ, идентификация частот форм собственных колебаний и разработана оптимальная схема АССК (10 пунктов наблюдения).

Основные преимущества АССК Зейской ГЭС по сравнению с программно-аппаратным комплексом мониторинга и регистрации землетрясений Красноярской ГЭС:

- передача сигнала от датчика к станции осуществляется в цифровом виде, что существенно снизило уровень гармоник сетевой частоты 50 Гц;
- наличие системы контроля функционирования, неполадок системы и т. п.;
- программная часть системы АССК выполнена на базе современной клиент-серверной архитектуры;
- унифицированная структура программной части системы, позволяющая работать с различным оборудованием (при реализации драйвера оборудования);
- аутентификация пользователей в системе с разделением прав доступа;
- расширенная конфигурация сейсмической станции и системы.

Серверный компонент обеспечивает взаимосвязь с аппаратурой, получение данных, хранение и их обработку. Клиентский компонент обеспечивает интерфейс взаимодействия с пользователем, конфигурацию системы, представление задач и результатов системы в наглядном виде. Система позволяет подключаться нескольким “клиентам” одновременно.

Для визуального контроля функционирования системы и сооружения ведется отображение текущего сигнала и его спектра по измерительным каналам. Программа “Клиент” также предоставляет отображение уровней вибрации в основных осях сооружения, приведенных к максимальному значению амплитуды в соответствии с выбранной интенсивностью в баллах по шкале MSK-64. Мнемосхема сооружения (рис. 9) представляет

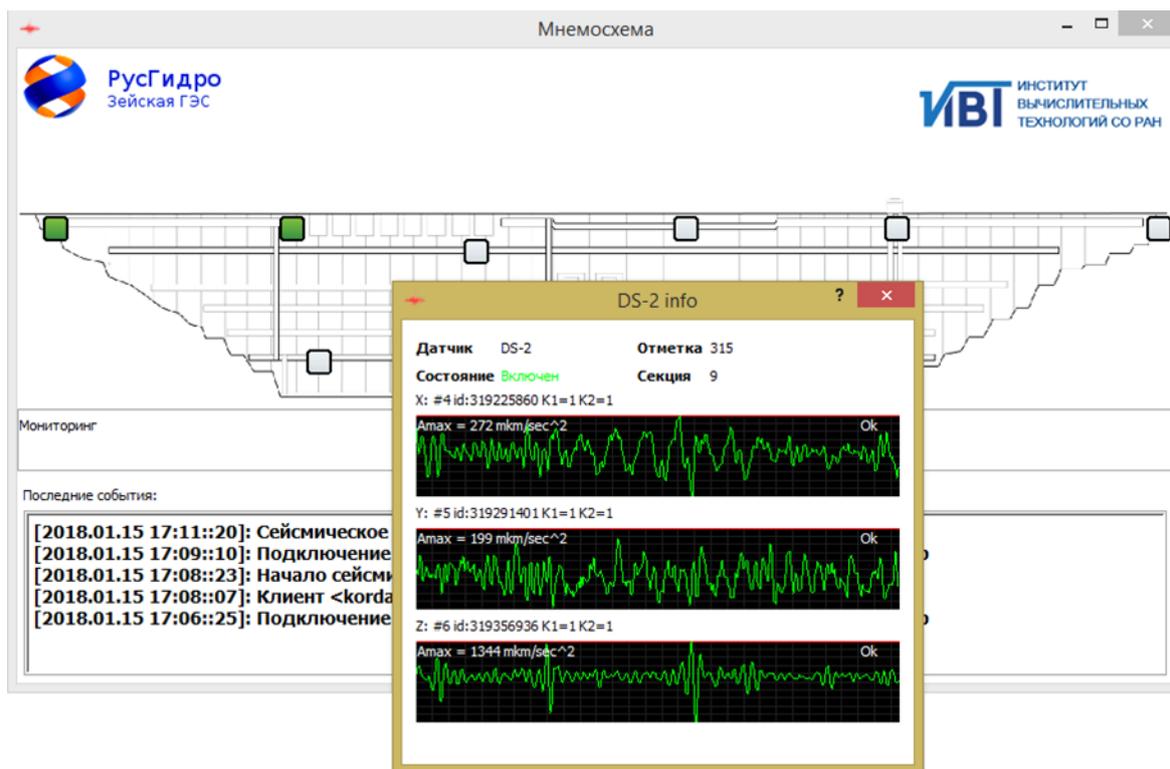


Рис. 9. Мнемосхема плотины с датчиками

всю основную информацию: отображение датчиков и их состояния, текущей конфигурации и сейсмограмм измерительных каналов, а также список последних сообщений в системе.

Для хранения сообщений о функционировании системы, действиях пользователя в программе “Сервер” ведется журнал сообщений с использованием компактной встраиваемой реляционной базы данных sqlite3, что позволяет при запросе эффективно фильтровать сообщения по выбранному типу события.

При запуске программы “Клиент” устанавливается связь с сервером, выполняется запрос актуальной конфигурации сейсмической станции и измерительных каналов, списка последних событий, конфигурации системы. При появлении нового сообщения в системе программа “Сервер” рассылает всем подключенным “клиентам” новое сообщение.

Оповещение ответственного персонала в соответствии со сформированным списком и конфигурацией уведомления осуществляется по электронной почте и SMS при регистрации сейсмического события интенсивностью более заданного значения и неполадках системы (больше N ошибок падения сервера за последний час, ошибки регистрации). Отправка сообщений по электронной почте происходит через SMTP-сервер, а оповещение персонала по SMS осуществляется через специальный модем.

Файлы записи хранятся на сервере в едином внутреннем формате в заархивированном виде и скачиваются с помощью программы “Клиент” на компьютер оператора. Для дальнейшей обработки в специализированных программах программа-конвертер может переформатировать файл в выбранный формат данных. Программа поддерживает как форматы собственной разработки ИВТ СО РАН (cibf, geoton), так и широко распространенный формат сейсмологических данных css 3.0.

Заключение

Совмещение задач регистрации сейсмических событий и мониторинга технического состояния по динамическим характеристикам на одной системе наблюдений, использующей одни и те же технические и программные средства, позволяет повысить эффективность как самой системы сейсмометрического мониторинга, так и системы контроля технического состояния ГЭС в целом.

Динамические характеристики — важные диагностические параметры ГЭС, так как являются интегральными показателями технического состояния всего сооружения и позволяют оценить упругие характеристики конструкции. Кроме того, сейсмометрический мониторинг позволяет производить изучение уровня вибраций плотины в зависимости от УВБ и температурного фактора, количества и номеров функционирующих гидроагрегатов, включая их пуск и останов, а также осуществлять оценку воздействия на плотину работы водослива при разных количестве и степени открытия затворов.

Важно отметить, что для осуществления мониторинга технического состояния по динамическим характеристикам нет необходимости в круглогодичной непрерывной записи колебаний плотины и хранении больших объемов данных. Обработать данные мониторинга значительно эффективнее по ежедневным отдельным сеансам определенной длительности, записанным в одно и то же время.

Применение структурного анализа на этапе проектирования информационной системы мониторинга позволило скорректировать и обосновать требования к системе, определить полное множество функций и их взаимосвязь, обеспечить логическую целостность и полноту описания системы для дальнейшей ее реализации и успешного использования. В данной работе представлены модели системы, выполненные с помощью разных технологий. Вместе они дополняют друг друга, создают более полное описание системы в разных аспектах: структура, логика и взаимосвязь процессов, потоки данных, источники и потребители информации, последовательность выполнения процессов и структура хранимых данных. Однако, несмотря на полученные результаты, проблема совершенствования систем сейсмометрического мониторинга плотин ГЭС остается актуальной.

Список литературы / References

- [1] Разрушение гидроагрегата № 2 Саяно-Шушенской ГЭС: причины и уроки. Сборник материалов. М.: Формат-Д, 2013. Часть 2. 496 с.
The destruction of the hydraulic unit No. 2 of Sayano-Shushenskaya HPP: causes and lessons. Collection of materials. Moscow: Format-D, 2013. Vol. 2. 496 p. (In Russ.)
- [2] Махутов М.А., Гаденин М.М., Москвичев В.В., Лепихин А.М., Черняев А.П. Формирование нормативной базы безопасности и защищенности ГЭС Сибири от тяжелых катастроф // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. № 4. С. 28–32.
Makhutov, N.A., Gadenin, M.M., Moskvichev, V.V., Lepikhin, A.M., Chernyaev, A.P. Safety and security standards creation for hydroelectric plants of Siberia // Problemy Bezopasnosti i Chrezvychaynykh Situatsiy. 2011. No. 4. P. 28–32. (In Russ.)
- [3] СТО РусГидро 02.01.80-2012. Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Правила эксплуатации. Нормы и требования. Введен 2012-10-29. М.: ОАО «РусГидро», 2012. 181 с.
STO RusGidro 02.01.80-2012. Hydraulic structures of HPP and GPP. Terms of use. Norms and requirements. Enacted 2012-10-29. Moscow: ОАО «RusGidro», 2012. 181 p. (In Russ.)

- [4] СТО 70238424.27.140.032-2009. Гидроэлектростанции в зонах с высокой сейсмической активностью. Геодинамический мониторинг гидротехнических сооружений. Нормы и требования. Введен 2009-12-31 М.: НП “Инвэл”, 2009. 45 с.
STO 70238424.27.140.032-2009. Hydroelectric power stations in areas with high seismic activity. Geodynamic monitoring of hydraulic structures. Standards and requirements. Enacted 2009-12-31. Moscow: NP “Invel”, 2009. 45 p. (In Russ.)
- [5] ВСН 42-70. Временные указания по организации и проведению инструментальных наблюдений за колебаниями высоких плотин при землетрясениях. Введен 1970-12-01. Л.: Энергия, 1971. 10 с.
VSN 42-70. Temporary guidelines for organizing and conducting instrumental observations of vibrations for high dams during earthquakes. Enacted 1970-12-01. Leningrad: Energiya, 1971. 10 p. (In Russ.)
- [6] РД 153-34.2-21.545-2003. Правила проведения натурных наблюдений за работой бетонных плотин ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Введен 2004-01-01. Санкт-Петербург: ОАО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, 2003. 32 с.
RD 153-34.2-21.545-2003. Rules for conducting of field observations for the operation of concrete dams by B.E. Vedeneev. Enacted 2004-01-01. St. Petersburg: ОАО “VNIIG im. B.E. Vedeneeva”, 2003. 32 p. (In Russ.)
- [7] СТО 70238424.27.010.011-2008. Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния. Введен 2008-10-31. М.: НП “Инвэл”, 2008. 182 с.
STO 70238424.27.010.011-2008. Buildings and structures of energy facilities. Methodology for assessing the technical condition. Enacted 2008-10-31. M.: NP “Invel”, 2008. 182 p. (In Russ.)
- [8] СТО 70238424.27.140.035-2009. Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования. Введен 2009-12-31. М.: НП “Инвэл”, 2009. 59 с.
STO 70238424.27.140.035-2009. Hydroelectric power stations. Monitoring and evaluation of technical structures during operation. Regulations and requirements. Enacted 2009-12-31. M.: NP “Invel”, 2009. 59 p. (In Russ.)
- [9] ГОСТ Р 22.1.12-2005 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования. Введен 2005-09-15. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии: Стандартиформ, 2005. 34 с.
GOST R 22.1.12-2005: Safety in emergency situations. A Structured monitoring and control system for engineering systems of buildings and structures. General requirements. Enacted 2005-09-15. M.: Federal’noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii: Standartinform, 2005. 34 p. (In Russ.)
- [10] **Сабуров В.С., Кузьменко А.П.** Обследование зданий повышенной этажности. Инженерно-сейсмометрический метод. Саарбрюкен, Германия: LAMBERT Acad. Publ., 2013. 184 с.
Saburov, V.S. and Kuz’menko, A.P. Investigations of high-rise buildings: Engineering seismometric method. Saarbrucken, Germany: LAMBERT Acad. Publ., 2013. 184 p. (In Russ.)
- [11] **Кузьменко А.П., Сабуров В.С.** Обследование плотин гидроэлектростанций. Инженерно-сейсмометрический метод. Ч. 1. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2017. 206 с.
Kuz’menko, A.P., Saburov, V.S. Investigations of dams of hydroelectric power stations. Engineering seismometric method. Pt 1. Novosibirsk: IVT SO RAN, 2017. 206 p. (In Russ.)
- [12] **Москвичев В.В., Сибгатулин В.Г., Перетокин С.А.** Контроль геодинамической опасности гидроузлов Центральной Сибири // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2011. № 4. С. 90–97.

- Moskvichev, V.V., Sibgatulin, V.G., Peretokin, S.A.** Geodynamic hazard control of waterworks of Central Siberia // Safety and Emergencies Problems. 2011. No. 4. P. 90–97. (In Russ.)
- [13] **Москвичев В.В.** Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений. В 3-х ч. Ч. 1. Постановка задач и анализ предельных состояний. Новосибирск: Наука, 2002. 106 с.
Moskvichev, V.V. Fundamentals of structural strength of technical systems and engineering structures. In 3 parts. Pt 1. Statement of problems and limit states analysis. Novosibirsk: Nauka, 2002. 106 p. (In Russ.)
- [14] РД 153-34.2-21.342-00 Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. Введен 2001-01-01. М.: ИПЦ “Глобус”, 2001. 24 с.
RD 153-34.2-21.342-00 Methodology for determining the safety criteria of hydraulic structures. Enacted 2001-01-01. Moscow: IPTs “Globus”, 2001. 24 p. (In Russ.)
- [15] **Гордон Л.А., Скворцова А.Е.** Актуализация критериев безопасности для основных диагностических показателей плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2013. № 4. С. 22–31.
Gordon, L.A., Skvortsova, A.E. Updating of the safety criteria for the main diagnostic indicators of the dam of Sayano-Shushenskaya HPP // Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2013. No. 4. P. 22–31. (In Russ.)
- [16] **Капустян Н.К., Антоновская Г.Н., Басакина И.М., Агафонов В.М., Сафонов М.В., Глотов В.А.** Сейсмометрическое сопровождение строительства и эксплуатации высотных зданий // Матер. науч. конф., посв. 100-летию со дня рожд. чл.-корр. АН СССР Е.Ф. Саваренского и 75-летию открытия сейсмической станции “Москва”. Обнинск: ГСРАН, 2012. С. 34–36.
Kapustyan, N.K., Antonovskaya, G.N., Basakina, I.M., Agafonov, V.M., Safonov, M.V., Glotov, V.A. Seismic support for the construction and operation of high-rise buildings // Mater. Nauch Konf., Posv. 100-letiyu so dnya rozhd. chl.-korr. AN SSSR E.F. Savarenskogo i 75-letiyu otkrytiya seysmicheskoy stantsii “Moskva”. Obninsk: GSRAN, 2012. P. 34–36. (In Russ.)
- [17] **Гамзатов Т.Г., Саидов М.А., Баксараев А.М., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н.** Инновационная сейсмологическая система мониторинга плотин ГЭС в Дагестане // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 5. С. 28–31.
Gamzatov, T.G., Saidov, M.A., Baksaraev, A.M., Kapustyan, N.K., Antonovskaya, G.N. Innovative seismological monitoring system of hydroelectric dams in Dagestan // Stroitel'nye Materialy, Oborudovanie, Tekhnologii XXI veka. 2014. No. 5. P. 28–31. (In Russ.)
- [18] **Дорофеев В.М., Катренко В.Г., Назьмов Н.В., Лысов Д.А.** Автоматизированная станция мониторинга технического состояния конструкций здания на объектах города // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 12. С. 24–26.
Dorofeev, V.M., Katrenko, V.G., Nazymov, N.V., Lysov, D.A. Automated station of monitoring of building structures technical state at city's objects // Industrial and Civil Engineering. 2008. No. 12. P. 24–36. (In Russ.)
- [19] **Лысов Д.А.** Разработка автоматизированной системы контроля механической безопасности зданий и сооружений с большепролетными конструкциями при их эксплуатации: Дис. ... канд. техн. наук. Москва, ГУП МНИИТЭП, 2013. 184 с.
Lysov, D.A. Development of an automated system for monitoring the mechanical safety of buildings and structures with long-span structures during their operation: Dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, GUP MNIITEP, 2013. 184 p. (In Russ.)

- [20] Храпков А.А., Егоров А.Ю., Злобин Д.Н. и др., Никифоров А.А., Скоморовская Е.Я., Харитонов М.Е. О новых возможностях автоматизированной системы сейсмометрического контроля Бурейской ГЭС // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 266. С. 3–11.
Khrapkov, A.A., Egorov, A.Yu., Zlobin, D.N., Nikiforov, A.A., Skomorovskaya, E.Ya., Kharitonov, M.E. On new possibilities of automated system for seismometric control of Bureiskaya HPP // *Izv. B.E. Vedeneev VNIIG*. 2012. Vol. 266. P. 3–11. (In Russ.)
- [21] НТЦ “Автоматика” — Контроль и автоматизация процессов — АСК “Регион-Гидро”. Адрес доступа:
<https://krasavt.ru/products/sejsmometriceskij-monitoring/ask-region-gidro>
(дата обращения 24.07.2019).
Scientific and Technical Center “Automation” — Control and automation of processes — ASK “Region-Hydro”. Available at:
<https://krasavt.ru/products/sejsmometriceskij-monitoring/ask-region-gidro>
(accessed 24.07.2019). (In Russ.)
- [22] Котляревский В.А., Суцев С.П., Ларионов В.И., Перепелицын А.И. Применение мобильных диагностических комплексов для оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2004. №. 3. С. 42–45.
Kotlyarevsky, V.A., Sushev, S.P., Larionov, V.I., Perepelitsyn A.I. The use of mobile diagnostic systems to assess the strength, stability and residual life of buildings and structures // *Occupational Safety in Industry*. 2004. No. 3. P. 42–45. (In Russ.)
- [23] Довгань В.И., Фролова А.Г. Сейсмический мониторинг Токтогульской ГЭС // Матер. докл. XI междунар. сейсмологической школы “Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных”, Кыргызстан, Чолпон-Ата, 2016. Бишкек: НС РАН, 2016. С. 52–64.
Dovgan’, V.I., Frolova, A.G. Seismic monitoring of the Toktogul HPS // *Mater. Dokl. XI Mezhdunar. Seysmologicheskoy Shkoly “Sovremennyye Metody Obrabotki i Interpretatsii Seysmologicheskikh Danykh”*, Kyrgyzstan, Cholpon-Ata, 2016. Bishkek: NS RAN, 2016. P. 52–64. (In Russ.)
- [24] Geotechnical | ESG Solution: A Spectris Company. Available at: <https://www.esgsolutions.com/mining-and-geotechnical/geotechnical> (accessed 24.07.2019).
- [25] Okuma, N., Ikeda K., Mazda, T., Kanazawa, K., Nagata, S. Structural Monitoring Test For An Aged Large Arch Dam Based On Ambient Vibration Measurement // *Proc. of the Fifteenth World Conf. on Earthquake Engineering (15 WCEE)*, Lisbon, Portugal. 2012. Vol. 2. P. 1093–1098.
- [26] Oliveira, S., Espada, M., Camara, R. Long-term dynamic monitoring of arch dams. The case of Cabril dam, Portugal // *Proc. of the Fifteenth World Conf. on Earthquake Engineering (15 WCEE)*, Lisbon, Portugal, 2012. Vol. 25. P. 1994–19953.
- [27] Darbre, G.R., Proulx, J. Continuous ambient-vibration monitoring of the arch dam of Mauvoisin // *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*. 2002. Vol. 31, No. 2. P. 475–480.
- [28] Патент РФ №2140625 С1. Способ определения физического состояния зданий и сооружений / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П. М.: Роспатент, 1999. 17 с.
Patent RF No. 2140625 C1. Method determining physical condition of buildings and structures / *Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Baryshev, V.G., Kuz’menko, A.P.* Moscow: Rospatent, 1999. 17 p. (In Russ.)

- [29] Патент РФ №2151233 С1. Способ определения динамических характеристик основания и тела плотины гидротехнических сооружений / Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Барышев В.Г., Кузьменко А.П., Бах А.А. М.: Роспатент, 2000. 15 с.
Patent RF No. 2151233 C1. Method for determining dynamic characteristics of base and body of hydraulic structure dam / Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Baryshev, V.G., Kuz'menko, A.P., Bakh, A.A. Moscow: Rospatent, 2000. 15 p. (In Russ.)
- [30] **Кузьменко А.П., Сабуров В.С.** Идентификация форм собственных колебаний при сейсмометрическом обследовании и мониторинге плотин ГЭС // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2015. Т. 274. С. 22–41.
Kuz'menko, A.P., Saburov, S.V. Identification of Natural Oscillation Modes for Purposes of Seismic Assessment and Monitoring of HPP Dams // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50, No. 2. P. 152–163.
- [31] **Марка Д.А., МакГоуэн К.Л.** Методология структурного анализа и проектирования. М.: МетаТехнология, 1993. 240 с.
Marca, D.A., McGowan, C.L. Structured Analysis and Design Technique. New York: McGraw-Hill, 1987. 392 p.
- [32] **Черемных С.В., Семенов И.О., Ручкин В.С.** Структурный анализ систем. IDEF-технологии. М.: Финансы и статистика, 2003. 208 с.
Cheremnykh, S.V., Semenov, I.O., Ruchkin, V.S. Structural analysis of systems. IDEF-technology. Moscow: Financy i Statistika, 2003. 208 p. (In Russ.)
- [33] Патент РФ № RU 2515130 С1. Сейсмометрический способ мониторинга технического состояния зданий и/или сооружений / Воробьева Д.Б., Золотухин Е.П. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент), 2014. 20 с.
Patent RF No. RU 2515130 C1. Seismometric method to monitor technical condition of buildings and/or structures / Vorob'eva, D.B., Zolotukhin, E.P. Moscow: Rospatent, 2014. 20 p. (In Russ.)
- [34] **Кузьменко А.П., Воробьева Д.Б., Кузьмин Н.Г.** Контроль динамических характеристик с помощью системы регистрации землетрясений и мониторинга технического состояния плотины Красноярской ГЭС // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2012. Т. 266. С. 12–21.
Kuzmenko, A.P., Vorobyeva, D.B., and Kuzmin, N.G. Control for dynamic characteristics with system of earthquake record and monitoring of technical state of Krasnoyarskaya HPP dam // Izv. B.E. Vedeneev VNIIG. 2012. Vol. 266. P. 12–21. (In Russ.)
- [35] **Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Короленко Д.Б., Кузьмин Н.Г.** Контроль уровня вибраций плотины Красноярской ГЭС по данным системы мониторинга // Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2015. Т. 275. С. 24–32.
Kuzmenko, A.P., Saburov, V.S., Korolenko, D.B., and Kuzmin, N.G. Control for the vibration level of Krasnoyarskaya HPP dam according to the data of the monitoring system // Izv. B.E. Vedeneev VNIIG. 2015. Vol. 275. P. 24–32. (In Russ.)
- [36] СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Введен 2018-11-25. М.: Минстрой России: Стандартиформ, 2018. 122 с.
SP 14.13330.2018. Seismic Building Design Code. SNiP II-7-81*. Enacted 2018-11-25. M.: Minstroy Rossii: Standartinform, 2018. 122 p. (In Russ.)

Information system for seismometric monitoring of the technical condition of hydraulic structures: experience in modelling, development and implementation

KOROLENKO, DARIA B.^{1,*}, KUZMENKO, ALEKSANDR P.¹,
MOSKVICHEV, VLADIMIR V.¹, SABUROV, VLADIMIR S.¹

¹Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

*Corresponding author: Korolenko, Daria B., e-mail: dbkorolenko@gmail.com

The purpose of this study is to create information system for seismometric monitoring of the technical condition of hydroelectric dams. To achieve this, the authors of the article used modern methods and principles for designing software and technical systems.

The methodological basis of this system is the engineering-seismometric method. The registered vibrations determine the dynamic and elastic characteristics of the structure. Analyzing their variations and taking into account the influence of factors of external influences, it is possible to estimate the technical condition of the structure.

The authors provide a survey of seismometric monitoring systems for buildings and structures, defined main technical and functional requirements, which a monitoring system should provide. A model and a structure of the information system for seismometric monitoring of hydroelectric dams were developed using structural analysis technique. The paper describes the processes of collecting, processing, storing and analyzing data for seismic events recording and monitoring the technical condition.

Based on the system model and the technology for seismometric monitoring data, automated systems for seismometric monitoring for the dams of Krasnoyarsk and Zeya hydroelectric stations were developed and put into operation. The systems provide registration of seismic events with an intensity of more than 2 points on the MSK-64 scale on the dam and scheduled periodic recording of microseismic dam oscillations in the normal operation of equipment for monitoring the technical condition.

Keywords: seismometric monitoring the technical condition of hydroelectric dam, dynamic characteristics, information system, structural analysis, functional model, data model.

Cite: Korolenko, D.B., Kuzmenko, A.P., Moskvichev, V.V., Saburov, V.S. Information system for seismometric monitoring of the technical condition of hydraulic structures: experience in modelling, development and implementation // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 5. P. 13–37. DOI:10.25743/ICT.2019.24.5.003. (In Russ.)

Received September 11, 2019