

Разработка программного обеспечения автоматизированной системы сейсмометрического мониторинга технического состояния и численное моделирование плотины Красноярской ГЭС

Д. Б. КОРОЛЕНКО

*Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН,
Новосибирск, Россия
e-mail: dbkorolenko@gmail.com*

Рассматривается программное обеспечение для регистрации землетрясений на плотине ГЭС и контроля технического состояния гидротехнических сооружений с помощью их динамических характеристик, а также вопросы численного моделирования системы плотина-основание Красноярской ГЭС.

Ключевые слова: автоматизированная система сейсмометрического мониторинга, регистрация землетрясений, мониторинг технического состояния, динамические характеристики плотины, микросейсмические колебания.

За последние 75 лет в мире произошло свыше одной тысячи аварий крупных плотин ГЭС. Человеческие жертвы и материальный ущерб при авариях современных плотин сопоставимы с последствиями природных катаклизмов, поэтому постоянный контроль за состоянием таких сооружений является важной задачей.

Для контроля технического состояния гидротехнических сооружений специалистами КТИ ВТ СО РАН разработана и установлена на плотине Красноярской ГЭС автоматизированная система регистрации землетрясений и мониторинга технического состояния плотины (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614526). Автоматизированная система сдана в промышленную эксплуатацию в марте 2010 г., после чего производилась периодическая регистрация стационарных колебаний плотины.

Автоматизированная система имеет трёхуровневую архитектуру [1]. Первый (нижний) уровень — пункты наблюдения, состоящие из десяти трёхкомпонентных пьезоэлектрических датчиков ускорения. Второй уровень (средний) — пункт сбора, оцифровки и предварительной обработки сейсмометрической информации. Третий уровень (верхний), рассматриваемый далее, представляет собой информационно-аналитический центр, состоящий из сервера с автоматизированным рабочим местом (АРМ) оператора и АРМ специалиста-исследователя. Программное обеспечение сервера АРМ оператора предназначено для регистрации и хранения записей колебаний сооружения, оповещения персонала и управления всей системой. АРМ специалиста-исследователя включает программу автоматизированного определения динамических характеристик плотины ГЭС, программу их визуализации и анализа, а также программу моделирования поведения сооружения.

В соответствии с нормативными требованиями РФ система выполняет автоматическую регистрацию колебаний в теле плотины, вызванных землетрясениями интенсивностью более 2 баллов по шкале MSK-64. Для этого на сервере система постоянно находится в режиме ожидания сейсмического события (основной режим), т. е. происходит непрерывный анализ амплитуд колебаний плотины. Определение сейсмических событий осуществляется по алгоритму скользящего окна STA/LTA (Short Time Average over Long Time Average). Для каждого канала вычисляется среднеквадратическое отклонение сигнала в коротком временном окне (2 с) и сравнивается с порогом, который определяется как среднеквадратическое отклонение сигнала в длинном окне (40 с), умноженное на заданный коэффициент срабатывания.

Коэффициент срабатывания — это весовой коэффициент, устанавливаемый для каждого канала в зависимости от местоположения сейсмоприемника с целью адекватной регистрации и оценки интенсивности сейсмического события. В центре плотины колебания сооружения имеют максимальную амплитуду, а в береговых примыканиях и у основания максимально приближены к колебаниям грунта.

Автоматизированная система осуществляет запись файла сейсмического события следующим образом: в начале файла записывается 80 с предыстории события и не менее 160 с с момента его появления. Полная длительность записи составляет 240 с. Если во время регистрации события обнаружено повторное превышение заданного порога, то по окончании этого времени регистрация будет автоматически продолжена. По завершении записи файла землетрясения по максимальным ускорениям в пунктах наблюдения, расположенных в береговых примыканиях, происходит предварительная оценка интенсивности сейсмического события по шкале MSK-64. Основные параметры землетрясения заносятся в журнал событий (рис. 1).

За период эксплуатации системы зарегистрировано три землетрясения интенсивностью около трёх баллов. Записи сейсмических событий используются для определения реакции плотины (перемещения, ускорения гребня и подошвы плотины) на произошедшее землетрясение. Более подробная информация о зарегистрированном событии

| № | Время регистрации | Интенсивность, баллы | A max 1, см/с ² | A max 2, см/с ² | A max 4, см/с ² | A max 6, см/с ² | A max 8, см/с ² | A max 10, см/с ² |
|---|---------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 15.05.2013 23:58:28 | 3 | 1,9155 | 4,6035 | 5,5520 | 7,7361 | 4,9792 | 3,9582 |
| 2 | 16.05.2013 0:01:58 | 2 | 0,0958 | 0,2306 | 0,3666 | 0,8752 | 0,5499 | 0,2383 |
| 3 | 16.05.2013 22:07:38 | 2 | 0,1640 | 0,5926 | 0,7438 | 1,1104 | 0,5575 | 0,3666 |

Рис. 1. Журнал событий

предоставляется при составлении отчёта за месяц, квартал, год или весь период работы системы. При этом формируется файл отчёта 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 и по каждому в отдельности.

После окончания регистрации сейсмического события осуществляется оповещение персонала ГЭС по электронной почте, по локальной сети через стандартное сообщение службы Microsoft Windows и по SMS. Система позволяет формировать список персонала с расширенными настройками оповещения: способа, типа сообщения (полное или короткое), минимального значения интенсивности события, при котором осуществляется оповещение, а также выбирается опция оповещения при неполадках в работе системы (отсутствие сети, данных и др.). При неполадках работы почтового сервера система формирует список неотправленных писем и отправляет их при первой возможности подключения к серверу.

Для осуществления плано-периодического мониторинга технического состояния оператор составляет на сервере расписание, согласно которому автоматически запускаются сеансы записи микросейсмических колебаний сооружения (рис. 2). Количество сеансов в сутки не ограничено, по умолчанию — дважды в сутки.

Периодический микросейсмический мониторинг позволяет решать следующие задачи:

— определять общий уровень вибрации плотины при разных режимах работы оборудования, разных значениях уровня верхнего бьефа (УВБ, уровень воды в водохранилище) и при изменении температурного фактора;

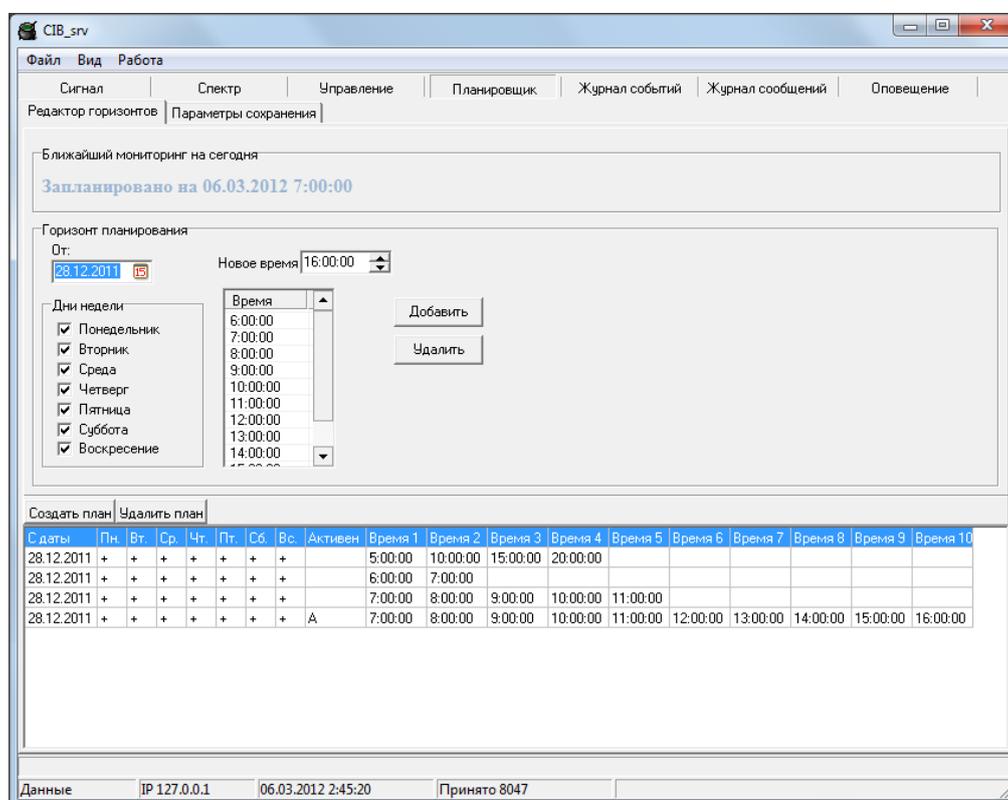


Рис. 2. Планировщик сеансов мониторинга

— определять по регистрационным записям динамические характеристики плотины (частоту, форму собственных колебаний, статистические параметры колебания и др.), являющиеся важными диагностическими параметрами, и на основе анализа их изменения осуществлять мониторинг технического состояния сооружения в процессе эксплуатации.

Помимо этого, осуществляется непрерывная запись колебаний плотины для сохранения предыстории событий с последующим возможным удалением по решению оператора, но не менее чем через семь суток.

Файлы записей регистрации сейсмических событий, сеансов мониторинга и непрерывной записи хранятся в файловом хранилище на сервере. Система предоставляет расширенные возможности по настройке длительности записи файлов, места хранения, а также редактирования профилей регистрации землетрясений и микросейсмических колебаний (возможна установка коэффициентов усиления для каждого канала).

Для визуального контроля функционирования системы и сооружения ведется отображение текущего сигнала ускорения колебания и его спектра по каждому каналу, уровней вибрации в основных осях сооружения, усреднённых по пунктам наблюдения.

На сервере осуществляется ведение журнала сообщений обо всех действиях оператора и функционировании системы с наглядной цветовой градацией по типу сообщения.

Определение и анализ динамических характеристик. Обработка данных мониторинга и определение динамических характеристик осуществляется с помощью специализированной программы Seismoteks (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012619757, авторы: А.Е. Гуськов, В.С. Сабуров, А.П. Кузьменко). Выделение собственных частот происходит по спектрам комплексной передаточной функции, усреднённой по всем каналам, в заданных границах (рис. 3) [2].

В результате обработки данных мониторинга получены данные о сезонных изменениях первых четырёх частот форм собственных поперечных колебаний плотины за

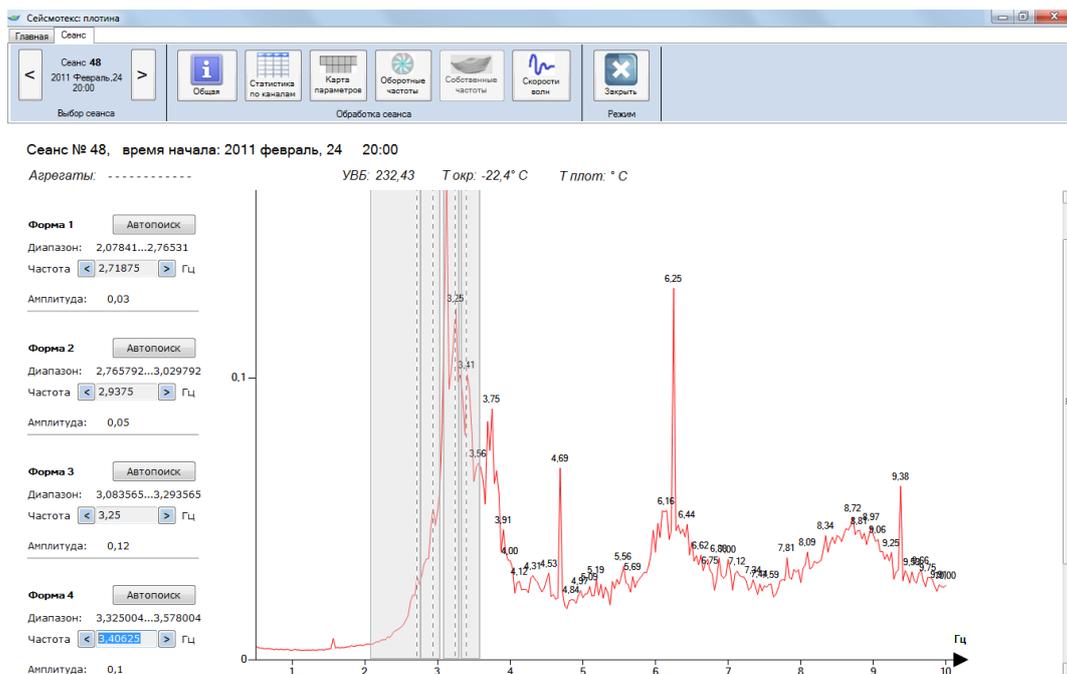


Рис. 3. Автоматизированное определение собственных частот

два года (март 2010 г. — март 2012 г.). Для хранения и удобства последующего анализа полученных временных рядов динамических характеристик и факторов, определяющих сезонное изменение работы сооружения (УВБ, температуры воздуха и др.), разработана база данных на основе MySQL. Для визуализации и анализа изменения динамических характеристик, контроля технического состояния разработано программное обеспечение, зарегистрированное в Федеральной службе по интеллектуальной собственности РФ (№ 2013660328), позволяющее осуществлять:

- чтение данных из базы, построение графиков динамических характеристик и параметров окружающей среды за выбранный промежуток времени, нахождение их минимальных и максимальных значений;

- построение графиков зависимости динамических характеристик от параметров окружающей среды за выбранный промежуток времени;

- аппроксимацию зависимости динамических характеристик от факторов внешней среды (построение статистических моделей);

- ведение базы данных статистических моделей, построение графиков изменения статистических моделей для анализа тренда динамических характеристик с учётом сезонных изменений работы сооружения.

Анализ трендов динамических характеристик с учётом влияния сезонных факторов окружающей среды позволяет определять необратимые изменения динамических характеристик и контролировать текущее техническое состояние всего сооружения.

Моделирование плотины Красноярской ГЭС. Для оценки напряжённо-деформированного состояния сооружения под действием статических нагрузок и динамических воздействий разработана трёхмерная расчётная конечно-элементная модель системы плотина–основание с помощью программного комплекса ANSYS.

Геометрическая модель плотины Красноярской ГЭС построена по строительным чертежам сооружения. На границах массивного основания заданы граничные условия — нулевые перемещения.

Модули упругости и коэффициент Пуассона материала плотины (бетон) определены по скоростям продольной P - и поперечной S -волн, которые экспериментально получены по результатам детальных сейсмометрических обследований сооружения в 2000, 2008 и 2013 гг. Параметры материала основания приняты из справочных данных для гранита. Для учёта воздействия водохранилища на плотину к напорной грани сооружения добавлена присоединённая масса жидкости, рассчитанная согласно документу [3], которая прибавляется к массе плотины и движется вместе с ней.

При выполнении модального анализа (вычисление частот, форм собственных колебаний объекта) учитывается преднагруженное состояние по результатам расчёта статического анализа (определение напряжённо-деформированного состояния сооружения под действием гидростатического давления воды, веса плотины, тепловых нагрузок и др.). На рис. 4 представлены результаты статического анализа при УВБ, равном 231 м, и температуре окружающей среды 10 °С.

По результатам модального анализа плотины получены первые четыре собственные частоты для разных параметров окружающей среды. В качестве примера на рис. 5 приведены первые четыре формы поперечных колебаний плотины при УВБ и температуре воздуха, аналогичных параметрам расчёта статического анализа (см. рис. 4). Значения отношения частоты формы к первой частоте собственных колебаний, полученные по результатам расчёта и зарегистрированным микросейсмическим колебаниям плотины ГЭС, достаточно близки, что подтверждает адекватность модели.

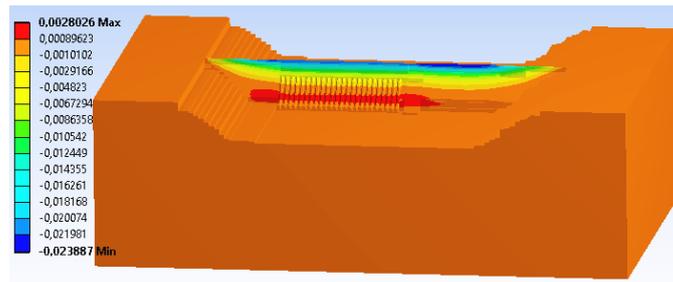


Рис. 4. Статический анализ. Перемещения в поперечном направлении плотины, м

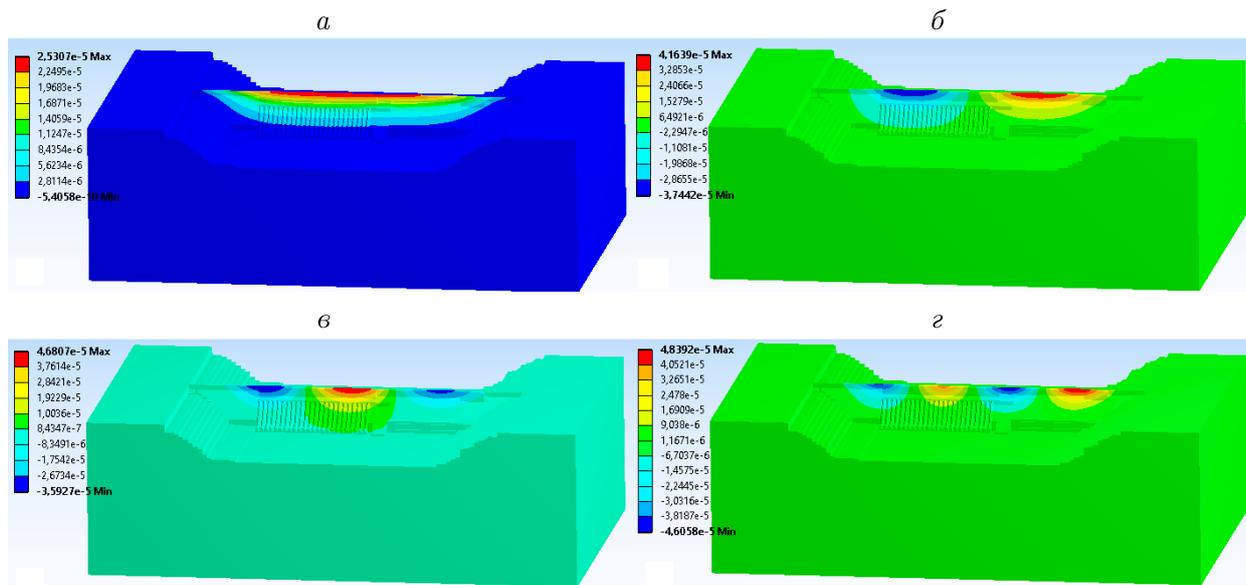


Рис. 5. Модальный анализ. Форма поперечных колебаний, перемещения, м: *а* — первая, частота 2.4 Гц; *б* — вторая, частота 3.0 Гц; *в* — третья, частота 3.16 Гц; *г* — четвертая, частота 3.52 Гц

Разработанная модель позволяет проводить анализ напряжённо-деформированного состояния плотины, сравнивать максимальные напряжения с прочностными характеристиками отобранных образцов керна бетона и гранитного основания, а также выявлять возникающие изменения в системе плотина — основание на основе сравнения текущих динамических характеристик с расчётными, полученными с учётом внешних условий.

Список литературы

- [1] Золотухин Е.П., Кузьменко А.П. Система контроля динамических характеристик плотин гидроэлектростанций по микросейсмическим колебаниям // Проблемы информатики. 2009. № 4. С. 24–33.
- [2] Кузьменко А.П., Воробьёва 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.
- [3] СНиП II-7-81(1995 с изм. 4.1997) Строительство в сейсмических районах и Свод правил СП 14.13330.2011 Актуализация редакции СНиП.

Поступила в редакцию 29 ноября 2013 г.