

Д. Б. Короленко

*Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН
ул. Акад. Ржанова, 6, Новосибирск, 630090, Россия*

dbkorolenko@gmail.com

МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОТИН ГЭС

Разработана модель и структура информационной системы сейсмометрического мониторинга плотин ГЭС. В работе описаны процессы сбора, обработки, хранения и анализа данных для регистрации сейсмических событий и контроля технического состояния.

Ключевые слова: информационная система сейсмометрического мониторинга гидротехнических сооружений, динамические характеристики, контроль технического состояния, регистрация сейсмических событий.

Введение

Расчетная продолжительность эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) составляет около ста лет. В результате процессов старения бетона, грунтовых материалов оснований плотин за счет процессов фильтрации, температурного фактора, периодических нагрузок происходит деградация строительных конструкций сооружений. Человеческие жертвы и материальный ущерб при авариях современных плотин сопоставимы с последствиями природных катаклизмов. Поэтому постоянный контроль за состоянием таких сооружений является важной задачей.

Мониторинг и оценка технического состояния плотин ГЭС – сложная и многокритериальная задача не только с технической, но и с организационной стороны. Любой строительный объект характеризуется большим числом возможных контролируемых параметров. Совокупность таких параметров определяется задачей, которую решает система мониторинга.

Необходимыми контролируемыми параметрами при мониторинге технического состояния зданий и сооружений являются динамические характеристики строительной конструкции – параметры, характеризующие динамические свойства объекта и проявляющиеся при динамических нагрузках¹. Это связано с тем, что в процессе эксплуатации при изменении прочностных характеристик строительных материалов, а также условий сопряжения конструкции с основанием изменяются и динамические характеристики сооружения (частоты, формы собственных колебаний, декремент затухания, статистические характеристики и др.). Кроме того, по собственным частотам и эпюрам значимых форм колебаний объекта можно оценить некоторые упругие характеристики – жесткость конструкции и его основания, модуль упругости и др. Таким образом, величины частот форм собственных колебаний отображают техническое состояние сооружения интегрально [1; 2].

¹ ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

Проведение инженерно-сейсмометрических наблюдений регламентируется для ГТС первого класса в районах с сейсмичностью 7 баллов и выше, и на сооружениях второго класса – в районах с сейсмичностью 8 баллов². Для этого гидротехнические сооружения должны быть оборудованы автоматизированными приборами и комплексами, позволяющими регистрировать кинематические характеристики в ряде точек сооружений и береговых примыканий во время землетрясений.

В работе [3] предложен способ измерения динамических характеристик конструкций ГТС под воздействием эксплуатационных динамических нагрузок от функционирующего оборудования, т. е. без применения специальных источников колебаний, который был апробирован авторами при обследовании плотин ГЭС.

Для совмещения задач регистрации сейсмических событий и мониторинга технического состояния по динамическим характеристикам на одной системе наблюдений в работе [4] была предложена концепция системы, использующей те же технические средства автоматизированного сбора микросейсмических колебаний, что и для регистрации землетрясений.

Однако для осуществления контроля состояния плотины по динамическим характеристикам необходимо выделять сезонные и необратимые изменения динамических характеристик в процессе эксплуатации. Сезонные изменения динамических характеристик, в основном, обусловлены изменением уровня верхнего бьефа (напора воды на плотину) и температурным фактором. Необратимые изменения связаны обычно с изменением изгибно-сдвиговой жесткости сооружения, упруго-механических свойств основания или условий сопряжения тела плотины с основанием [5].

Функциональные требования к информационной системе

На основе анализа существующих систем сейсмометрического мониторинга и нормативных документов, регулирующих контроль технического состояния ГТС, были определены следующие функциональные требования:

- автоматическая регистрация сейсмических событий в ожидающем режиме с последующей оценкой интенсивности события по шкале MSK-64 и занесением в базу данных событий;
- планово-периодическая регистрация микросейсмических колебаний;
- управление и конфигурация измерительных каналов;
- непрерывная запись колебаний плотины для сохранения предыстории событий в течение 7 суток с последующим стиранием по решению оператора;
- хранение данных сейсмометрического мониторинга, зарегистрированных сейсмических событий и информации о функционировании системы;
- оповещение персонала ГЭС при регистрации события по электронной почте, локальной сети и SMS с учетом минимального порога интенсивности события для каждого сотрудника;
- составление отчетов о зарегистрированных сейсмических событиях за выбранные промежутки времени;
- ведение журнала сообщений обо всех действиях оператора и функционировании системы;
- определение динамических характеристик сооружения;
- оценка упругих характеристик строительной конструкции с помощью расчетной математической модели;
- визуализация информации о сезонных изменениях динамических и упругих характеристик, а также параметров внешних воздействий для анализа их влияния.
- анализ изменения динамических и упругих характеристик с учетом сезонных факторов внешних воздействий.

² СТО РусГидро 02.01.80-2012 Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Правила эксплуатации. Нормы и требования.

Для анализа и спецификации требований, исследования структуры системы и логических взаимосвязей ее элементов, построения модели информационной системы был выбран структурный анализ.

Определение модели в структурном анализе

Метод структурного анализа и проектирования был разработан Дугласом Россом для создания сложных систем [6]. Структурный подход использует средства представления описания системы, выполняемых функций, процессов и информационного пространства с помощью графических нотаций. Основными технологиями моделирования структурного анализа являются методы функционального моделирования IDEF0, метод описания бизнес-процессов IDEF3 и метод построения диаграмм потоков данных DFD [7].

Основные принципы структурного анализа – разбиение сложных задач на множество меньших независимых блоков для облегчения понимания и иерархическое упорядочивание каждого блока в древовидную структуру, каждый уровень которой детализирует предыдущий.

Для создания функциональной модели, отображающей структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, связывающие эти функции, используется методология IDEF0³, которая основана на следующих концептуальных положениях: «Модель – это искусственный объект, представляющий собой отображение (образ) системы». Согласно [6], «*M* моделирует *A*, если *M* отвечает на вопросы относительно *A*», где *M* – модель, *A* – моделируемый объект (оригинал).

Описание модели и структуры информационной системы

Контекстная диаграмма верхнего уровня информационной системы сейсмометрического мониторинга отражает цель системы: на основе данных колебаний и измерений параметров внешних воздействий на плотину ГЭС осуществлять оценку реакции сооружения на сейсмическое воздействие и предоставлять необходимую информацию для оценки технического состояния строительной конструкции в соответствии с нормативными документами и регламентами (рис. 1).

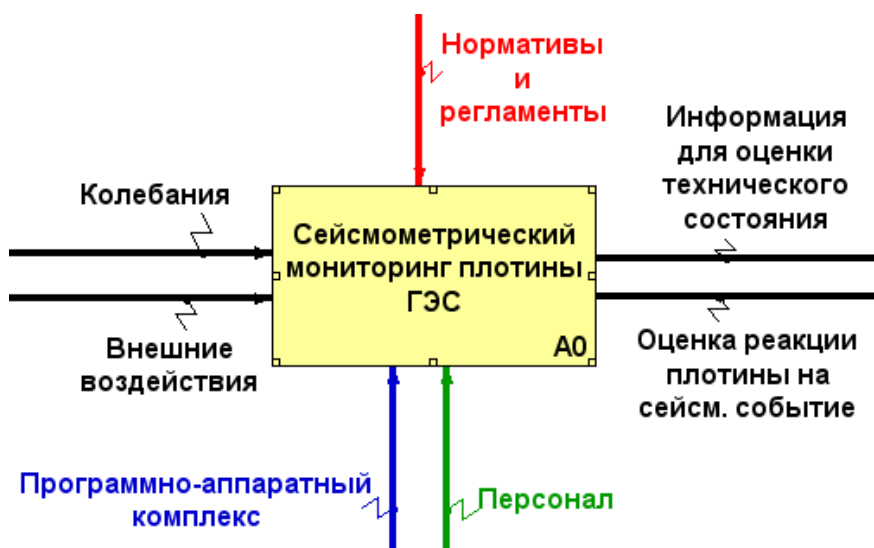


Рис. 1. Контекстная диаграмма системы сейсмометрического мониторинга

³ РД IDEF 0 – 2000 Методология функционального моделирования IDEF0. Госстандарт России. М., 2000.

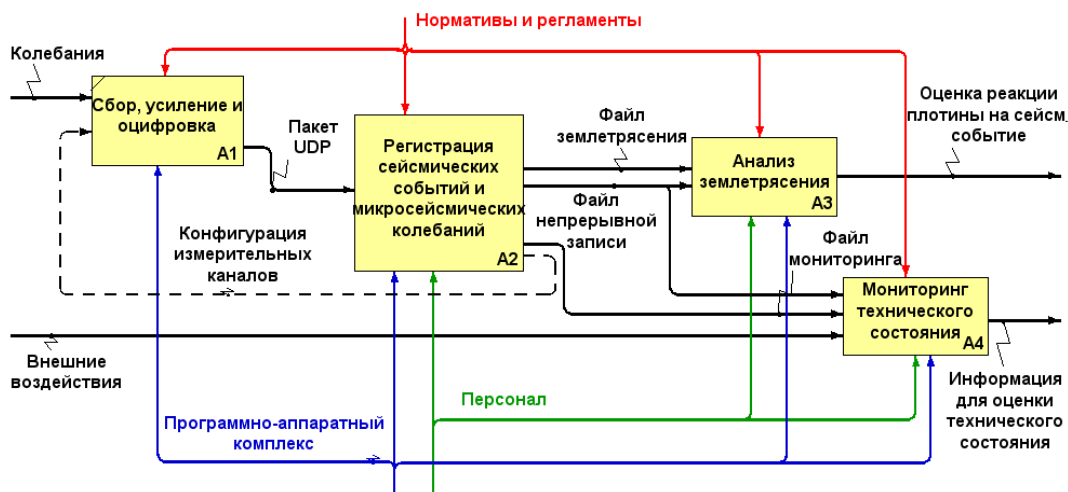


Рис. 2. Основные бизнес-процессы системы сейсмометрического мониторинга

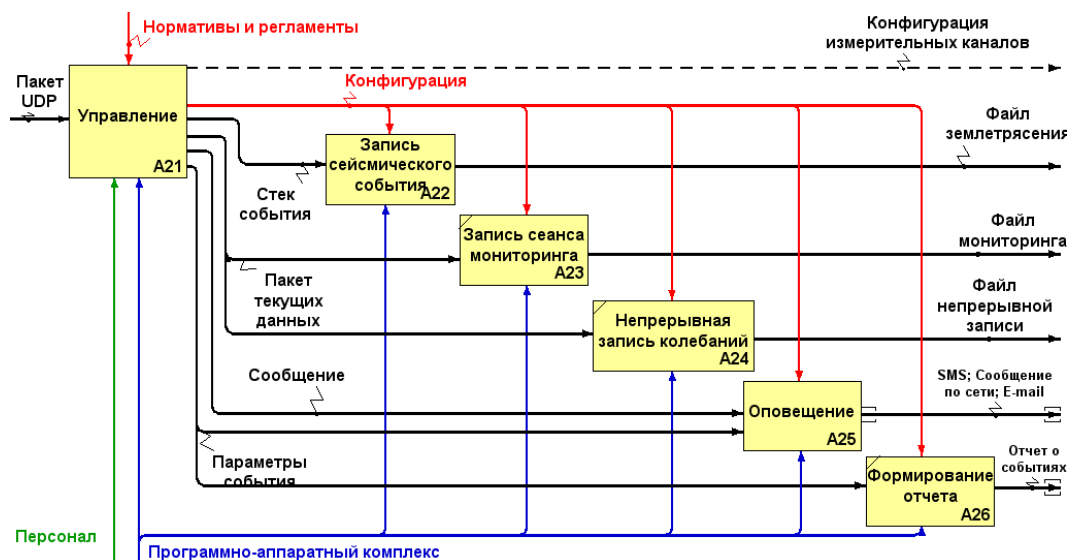


Рис. 3. Описание бизнес-процессов блока регистрации сейсмических событий и микросейсмических колебаний

На рис. 2 представлены основные бизнес-процессы системы. На сейсмической станции осуществляется сбор, усиление, фильтрация и оцифровка данных колебаний, передача сформированных пакетов на сервер, где происходит регистрация сейсмических событий и микросейсмических колебаний. Данные записи колебаний сохраняются в виде файлов землетрясения, мониторинга (микросейсмических колебаний) и непрерывной записи и передаются для дальнейшей обработки на автоматизированное рабочее место (АРМ) специалиста-исследователя.

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. [8].

Основные процессы блока регистрации сейсмических событий и микросейсмических колебаний рассмотрены ниже (рис. 3).

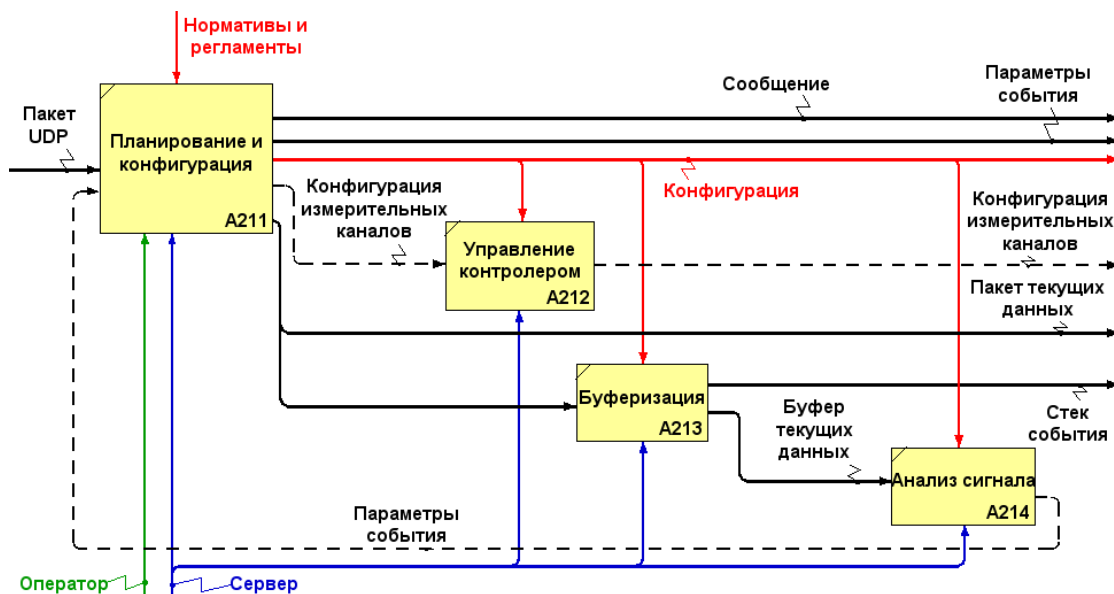


Рис. 4. Модель бизнес-процессов блока «Управление»

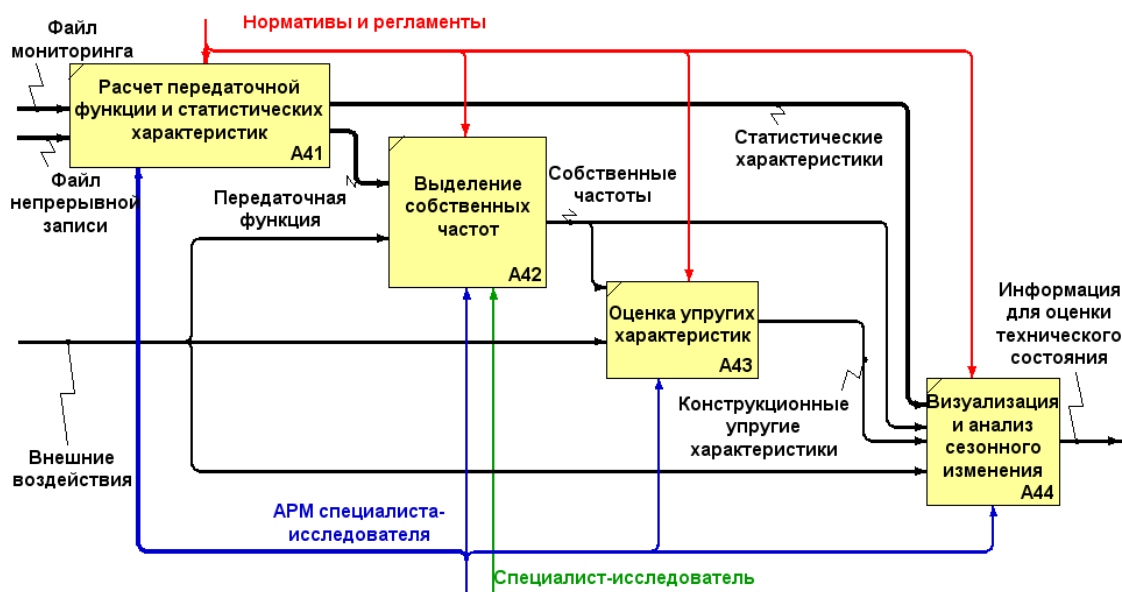


Рис. 5. Модель бизнес-процессов блока «Мониторинг технического состояния»

На основе анализа сигнала для выделения сейсмических событий, составленного плана мониторинга и механизмов управления осуществляется запись сейсмического события или сеанса мониторинга. В обоих случаях происходит непрерывная запись колебаний для возможного анализа предыстории сейсмических событий природного или техногенного характера, чрезвычайных ситуаций, а также анализа уровня вибраций в условиях эксплуатации сооружения.

После записи и оценки сейсмического события основные его параметры сохраняются в базу данных и журнал событий, происходит оповещение ответственных сотрудников по выбранным каналам связи с учетом минимального порога интенсивности.

Подробная информация о зарегистрированных событиях предоставляется при составлении отчета за выбранный промежуток времени. При этом формируется файл в формате Microsoft Excel или txt с данными о максимальной амплитуде, интенсивности, фактическом значении STA/LTA (для обратной связи и уточнения конфигурации системы) по всем каналам и по каждому в отдельности.

Блок «Управление» осуществляет получение и буферизацию пакетов данных для последующего анализа (рис. 4). Для регистрации землетрясений система постоянно находится в режиме ожидания сейсмического события, т. е. происходит непрерывный анализ амплитуд колебаний плотины. Определение сейсмических событий осуществляется по алгоритму STA/LTA (Short Time Average / Long Time Average). В основе алгоритма лежит определение коэффициента между отношением среднеквадратического отклонения значения амплитуды колебаний в скользящем малом окне (STA) и среднеквадратического отклонения значения амплитуды колебаний в скользящем длинном временном окне (LTA). При превышении полученного коэффициента заданного порога у большинства каналов осуществляется регистрация сейсмического события.

Согласно плану для записи сеанса мониторинга осуществляется конфигурация измерительных каналов для режима регистрации микросейсмических колебаний. По завершении записи файла происходит обратная конфигурация каналов для обеспечения регистрации землетрясений.

По данным записей сеансов микросейсмических колебаний осуществляется мониторинг технического состояния (рис. 5). Для этого с помощью специализированных программ по регистрационным записям вычисляются комплексные передаточные функции во множестве точек измерения и статистические параметры колебаний. Выделение собственных частот происходит по спектрам комплексной передаточной функции, усредненной по всем измерительным каналам [5].

Для оценки упругих характеристик системы плотина – основание по ряду собственных частот используется математическая расчетная модель колебаний плотины, которая разрабатывается по результатам инженерно-сейсмометрического обследования и описывает изменение частот собственных колебаний при заданных параметрах внешних воздействий [1]⁴. Полученные динамические и упругие характеристики сохраняются в базе данных для последующего анализа.

Основная задача мониторинга – выявление зависимости между нагрузками (величина напора воды на плотину, температурный фактор и т. п.) и контролируемыми параметрами. Для этого строятся графики зависимости динамических и упругих характеристик от параметров внешних воздействий за период наполнения или сработки водохранилища, выполняется аппроксимация зависимости, сохранение коэффициентов полученного уравнения, величины среднеквадратического отклонения (σ) в базу данных с указанием режима водохранилища. Затем осуществляется анализ отклонения линий уравнений зависимости параметров в доверительном интервале $\pm 2\sigma$ за несколько годовых циклов. Если в рамках этого интервала линии расходятся, значит, произошли какие-то изменения напряженно-деформированного состояния, и необходимо проводить обследование.

Таким образом, в структуре информационной системы были выделены следующие подсистемы:

- сбора данных;
- регистрации сейсмических событий и микросейсмических колебаний;
- мониторинга технического состояния;
- анализа реакции плотины на сейсмическое воздействие.

⁴ Пат. 2515130 Российская Федерация, МПК G01M 7/00, G01V 1/28. Сейсмометрический способ мониторинга технического состояния зданий и/или сооружений / Д. Б. Воробьева, Е. П. Золотухин; заявитель и патентообладатель ФГБУН Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН. № 2012145088/28; заявл. 23.10.2012; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13.

Заключение

Разработанная модель была реализована в виде подсистемы регистрации сейсмических событий и микросейсмических колебаний, подсистемы мониторинга технического состояния Программно-аппаратного комплекса сейсмометрического мониторинга гидротехнических сооружений Красноярской ГЭС [9]. Использование описанной модели может быть также применено для разработки информационной системы сейсмометрического мониторинга и других ответственных зданий и сооружений.

Список литературы

1. Кузьменко А. П., Сабуров В. С. Мониторинг технического состояния каркасных зданий повышенной этажности // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Электронный журнал. URL: <http://www.pamag.ru/pressa/monitoring-tskz>.
2. Золотухин Е. П., Кузьменко А. П., Сабуров В. С. и др. Сейсмометрический мониторинг технического состояния несущих строительных конструкций зданий и сооружений по динамическим характеристикам // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, спец. вып. С. 29–36.
3. Барышев В. Г., Кузьменко А. П., Сабуров В. С. и др. Динамическое тестовое обследование плотин под воздействием эксплуатационных динамических нагрузок // Гидротехническое строительство. 2002. № 10. С. 26–36.
4. Золотухин Е. П., Кузьменко А. П. Система контроля динамических характеристик плотин гидроэлектростанций по микросейсмическим колебаниям // Проблемы информатики. 2009. № 3. С. 24–33.
5. 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. Веденеева. 2012. Т. 266. С. 12–21.
6. Марка Д., МакГоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования: Пер. с англ. М., 1993. 240 с.
7. Черемных С. В., Семенов И. О., Ручкин В. С. Структурный анализ систем. IDEF-технологии. М.: Финансы и статистика, 2003. 208 с.
8. Кузьменко А. П., Сабуров В. С., Кузьмин Н. Г., Осеев В. Г. Определение динамических характеристик плотин под воздействием землетрясений // Изв. ВНИИГ им. Веденеева. 2012. Т. 265. С. 15–25.
9. Короленко Д. Б. Разработка программного обеспечения автоматизированной системы сейсмометрического мониторинга технического состояния и численное моделирование плотины Красноярской ГЭС // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, спец. вып. С. 123–128.

Материал поступил в редколлегию 22.10.2014

D. B. Korolenko

*Design Technological Institute of Digital Techniques SB RAS
6 Rzhanov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

dbkorolenko@gmail.com

MODEL OF INFORMATION SYSTEM OF SEISMOMETRIC MONITORING FOR THE TECHNICAL CONDITION CONTROL OF DAMS OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS

A model and a structure of the information system of seismometric monitoring of dams of hydroelectric power plants are developed. Collection, processing, storage and analysis of data for seismic event detection and monitoring the technical condition are described in the paper.

Keywords: information system of seismometric monitoring of hydrotechnical facilities, dynamic characteristics, monitoring the technical condition, earthquake detection.

References

1. Kuzmenko A. P., Saburov V. S. Monitoring tehničeskogo sostoyaniya karkasnyih zdaniy povyishennoy etazhnosti [Monitoring of technical condition of frame high-rise buildings]. *Prevent Accidents of Buildings and Structures: Electronic Journal*. URL: <http://www.pamag.ru/prensa/monitoring-tskz> (in Russ.)
2. Zolotukhin E. P., Kuzmenko A. P., Saburov V. S. et al. Seysmometricheskii monitoring tehničeskogo sostoyaniya nesuschih stroitelnyih konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy po dinamicheskim karakteristikam [Seismometric monitoring of the technical condition of load bearing constructions of buildings and structures by their dynamic characteristics]. *Computational Technologies*, 2013, vol. 18, special issue, p. 29–36. (in Russ.)
3. Baryshev V. G., Kuzmenko A. P., Saburov V. S. et al. Dinamicheskoe testovoe obsledovanie plotin pod vozdeystviem ekspluatatsionnyih dinamicheskikh nagruzok [Dynamic test survey of dams under impact of operational dynamic loads]. *Hydrotechnical Engineering*, 2002, vol. 10, p. 26–36. (in Russ.)
4. Zolotukhin E. P., Kuzmenko A. P. Sistema kontrolya dinamicheskikh karakteristik plotin gidroelektrostantsiy po mikroseyzmicheskim kolebaniyam [A system for monitoring of dynamic characteristics of dam of hydroelectric power plants by their microseismic vibrations]. *Problems of Informatics*, 2009, vol. 3, p. 24–33. (in Russ.)
5. Kuzmenko A. P., Vorobyeva D. B., Kuzmin N. G. Kontrol dinamicheskikh karakteristik s pomoshchyu sistemyi registratsii zemletryaseniya i monitoringa tehničeskogo sostoyaniya plotiny Krasnoyarskoy GES [Control for dynamic characteristics with system of earthquake record and monitoring of technical state of Krasnoyarskaya HPP dam]. *Izvestiya B. E. Vedeneev VNIIG*, 2012, vol. 266, p. 12–21. (in Russ.)
6. Marca D., McGowan C. *Metodologiya strukturnogo analiza i proektirovaniya* [Structured Analysis and Design Technique]. Translation from English. Moscow, 1993, 240 p. (in Russ.)
7. Cheremnikh S. V., Semenov I. O., Ruchkin V. S. *Strukturnyy analiz sistem. IDEF-tehnologii* [Structural systems analysis. IDEF-technologies]. Moscow, Finance and Statistics, 2003. 208 p. (in Russ.)
8. Kuzmenko A. P., Saburov V. S., Kuzmin N. G., Oseev V. G. Opredelenie dinamicheskikh karakteristik plotin pod vozdeystviem zemletryaseniya [Determination of dynamic characteristics of dams under earthquake impact]. *Izvestiya B. E. Vedeneev VNIIG*, 2012, vol. 265, p. 15–25. (in Russ.)
9. Korolenko D. B. Razrabotka programmnoy obespecheniya avtomatizirovannoy sistemyi seysmometricheskogo monitoringa tehničeskogo sostoyaniya i chislennoe modelirovanie plotiny Krasnoyarskoy GES [Development of software for automated system of seismometric monitoring of the technical condition of a dam of Krasnoyarsk hydroelectric power plant as well as for numerical modeling of the dam]. *Computational Technologies*, 2013, vol. 18, special issue, p. 123–128. (in Russ.)