

# Система контроля динамических характеристик плотин гидроэлектростанций по микросейсмическим колебаниям

Е. П. Золотухин, А. П. Кузьменко

Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, 630090, Новосибирск, Россия  
Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий, 628011, Ханты-Мансийск, Россия

Предложена система сейсмометрического мониторинга плотины ГЭС, которая способна на одних и тех же технических средствах решать две задачи для обеспечения безопасности гидротехнических сооружений: регистрации сейсмических колебаний от землетрясений и оценки динамических характеристик гидротехнических сооружений по микросейсмическим шумам. Описана структура системы, которую предлагается включать в качестве подсистемы в разрабатываемую или действующую автоматизированную систему контроля и диагностики гидротехнических сооружений.

**Ключевые слова:** автоматизированная система сейсмометрического мониторинга, безопасность гидротехнических сооружений, землетрясения, динамические характеристики гидротехнических сооружений.

Proposed in the paper is a system of seismic monitoring of a hydro-electric plant (HEP) dam – a system capable of solving the two tasks necessary to provide the safety of water-development structures (WDS): registration of seismic vibrations from earthquakes and estimation of the structure dynamics characteristics from microseismic noises. The structure of the system is described which the authors propose to include as a subsystem in an automated WDS monitoring and diagnostic system being developed or one already existing.

**Key words:** water-development structures, safety estimation, seismometric monitoring, structure dynamic characteristics, microseismic vibrations.

**Введение.** Безопасность гидротехнических сооружений (ГТС) гидроэлектростанций (ГЭС), в том числе плотин, от проектирования до промышленной эксплуатации регламентируется более чем пятьюдесятью федеральными и ведомственными нормативными документами включая [1–3]. Начиная с 1998 г. для всех ГТС 1–3 классов собственник или эксплуатирующая организация обязаны составлять декларацию безопасности ГТС [4], являющуюся основным документом, в котором обосновывается безопасность ГТС, содержатся сведения о соответствии этого сооружения критериям безопасности, оценивается степень риска аварии, определяются меры по обеспечению безопасности ГТС с учетом его класса.

Одним из обязательных и важнейших разделов декларации является оценка технического состояния ГТС, которая осуществляется с помощью натуральных наблюдений и численных моделей ГТС. Натурные исследования проводят визуально и с помощью контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). На основе натуральных наблюдений уточняются математические модели и рассчитываются показатели технического состояния ГТС включая состояние плотины.

Согласно методике, изложенной в работе [5], одними из важных показателей, по которым необходимо диагностировать состояние ГТС (нормальное, потенциально опасное или предаварийное), являются параметры динамической реакции сооружений во время возможного сейсмического события техногенного (взрыв) или естественно-го (землетрясение) происхождения как мощного импульсного воздействия на плотину. Это обусловлено, прежде всего, динамическим характером воздействия, которое может многократно превосходить максимальное статическое воздействие, и случайным характером события.

Поэтому на ГТС 1 класса, расположенных в районах с сейсмичностью 7 баллов и выше, и на сооружениях 2 класса – в районах с сейсмичностью 8 баллов и выше в соответствии с Правилами [6] требуется проводить специальные наблюдения и испытания. К ним относятся: инженерно-сейсмометрические наблюдения за работой со-

оружий и береговых примыканий (сейсмометрический мониторинг), инженерно-сейсмологические наблюдения в зоне ложа водохранилища вблизи створа сооружений и на прилегающих территориях (сейсмологический мониторинг) и испытания по определению динамических характеристик этих сооружений (динамическое тестирование) с составлением динамических паспортов.

Для проведения инженерно-сейсмометрических наблюдений ГТС должны быть оборудованы автоматизированными приборами и комплексами, позволяющими регистрировать кинематические характеристики в ряде точек сооружений и береговых примыканий во время землетрясений при сильных движениях земной поверхности, а также оперативно обрабатывать полученную информацию. После каждого сейсмического толчка интенсивностью 5 баллов и выше должны оперативно регистрироваться показания всех видов контрольно-измерительной аппаратуры, установленной в сооружении, с осмотром сооружения и анализом его прочности и устойчивости. Выбор точек регистрации землетрясений на плотинах и аппаратных средств регистрации регламентируется требованиями ВСН 42–70 [7].

Несмотря на значительность всех мер безопасности, риск возможной аварии на ГТС хотя и мал, однако не равен нулю. Поэтому постоянно ведутся научные исследования по разработке новых методов контроля и диагностики ГТС на безопасность. Одними из таких методов являются вибросейсмические методы обследования зданий и сооружений на сейсмостойкость. В основе методов, например [8, 9], лежит определение динамических характеристик – собственных частот и эпюр основных форм колебаний объекта, по которым можно оценить жесткость и прочность конструкции. Известно [10–13], что по мере старения сооружения частоты форм собственных колебаний понижаются. Например, при обследовании Чарвакской грунтовой плотины в Узбекистане установлено, что частота первой собственной формы колебаний плотины в течение девяти лет эксплуатации снизилась для гребня на 11 %, для бермы на 9 %. Аналогичные изменения частот собственных форм отмечают для зданий различного назначения и мостов различной конструкции. Кроме того, в случае значительного изменения пространственной жесткости строительной конструкции образуются дополнительные частоты собственных колебаний. По изменению частот первых форм собственных колебаний сооружения в процессе эксплуатации оценивают износ конструкции [14, 15]. Таким образом, величины частот форм собственных колебаний отображают состояния сооружения в целом, интегрально, как индикаторы безопасности. С другой стороны, оцененные динамические параметры вместе с другими данными (свойства грунта, тип плотины, характеристики материала и пр.) могут быть использованы в выбранной для анализа и прогноза математической модели, например [16–20], для оценки состояния ГТС при различных сценариях развития сейсмических событий.

Для определения динамических характеристик используются различные источники возбуждения колебаний – импульсные и вибрационные. Однако для таких массивных сооружений, как плотина, подобные источники создать невозможно.

В работе [21] предложен способ измерения динамических характеристик конструкций ГТС под воздействием эксплуатационных динамических нагрузок от функционирующего оборудования, т. е. без применения специальных источников колебаний. Этот способ запатентован [22], апробирован на Красноярской, Саяно-Шушенской и Зейской ГЭС, может быть автоматизирован и реализован в качестве одной из подсистем автоматизированной системы контроля и диагностики (АСКД) ГТС [6]. В настоящей работе данный способ предлагается использовать в качестве дополнительного и экономичного экспресс-метода диагностики и прогноза технического состояния ГТС, использующего те же технические средства автоматизированного сбора сейсмической информации, что и для регистрации землетрясений, которые необходимо устанавливать на ГТС [6, 7].

**Описание сейсмометрического способа оценки динамических параметров технического состояния ГТС.** Динамические характеристики плотины определяются ее типом, геометрическими соотношениями, конструктивными особенностями, свойствами и состоянием пород основания, контакта плотины с берегами, напряженно-деформированным состоянием, условиями строительства, эксплуатации, являются индивидуальными и существуют независимо от уровня и типа воздействия на плотину внешних и внутренних шумов в реальных условиях эксплуатации ГЭС.

Способ [22] основан на том, что при изменении в процессе эксплуатации прочностных характеристик строительных материалов и конструкций сооружения обычно изменяются динамические характеристики сооружения, и по степени их изменения можно косвенно судить об изменении прочности сооружения.

Предлагается контролировать следующие динамические характеристики:

- частоты форм собственных пространственных колебаний плотины;
- логарифмический декремент затухания на частотах форм собственных колебаний;
- скорости распространения упругих колебаний по объекту, интегральные упруго-механические характеристики материала сооружения;
- передаточные функции между стационарными точками наблюдения, расположенными в основании и в строительной конструкции сооружения.

*Собственные частоты и формы колебаний.* Необходимость расчета собственных частот и соответствующих им форм колебаний возникает при анализе динамического поведения конструкции под действием переменных нагрузок. Наиболее важным при анализе является установление факта, что в условиях эксплуатации в элементах конструкции сооружения не возникнет механический резонанс, суть которого заключается в значительном (в десятки раз и более) увеличении амплитуд вынужденных колебаний на определенных частотах внешних воздействий – так называемых резонансных частотах. Многократное увеличение амплитуд колебаний при резонансе и вследствие этого повышение уровней напряжений – одна из основных причин выхода из строя объектов, эксплуатируемых в условиях вибрационных нагрузок. Известно, что резонансы наблюдаются на частотах, близких к частотам собственных колебаний конструкции. Если имеется возможность оценить спектр собственных частот конструкции, то можно со значительной долей вероятности прогнозировать риск возникновения резонансов в известном диапазоне частот внешних воздействий. Во избежание или для значительного уменьшения вероятности появления резонансов необходимо, чтобы большая часть нижних собственных частот конструкции не лежала в диапазоне частот внешних воздействий.

В первом приближении, в предположении, что конструкция описывается системой из  $n$  линейных дифференциальных уравнений второго порядка, собственные или свободные частоты колебаний находятся из общего решения этой системы:  $y_s(t) = A_s e^{-\alpha_s t} \sin(\omega_s t + \varphi_s)$ ,  $s = 1, \dots, n$ , где  $\omega_s$ ,  $\varphi_s$ ,  $\alpha_s$ ,  $A_s$  –  $s$ -я собственная частота, фаза, показатель затухания и амплитуда колебаний соответственно, вычисляемые преобразованием комплексно-сопряженных корней характеристических уравнений второго порядка из алгебраического представления чисел в тригонометрическое представление.

Формы собственных колебаний представляют собой относительные амплитуды перемещений конструкции в узлах конечноэлементной сетки. Для протяженных объектов, таких как высотные здания и плотины, рассматривают формы по профилям вдоль протяженной части объекта для определения места наибольшего перемещения конструкции на данной частоте и соответственно наибольшей деформации и напряжения. Каждая форма собственных колебаний плотины имеет конфигурацию (эпюру) в пространстве и коэффициент формы, который определяет соотношение амплитуд колебаний на разных формах. Чем больше коэффициент формы, тем больше амплитуда колебаний на частоте этой формы. Формы с высоким коэффициентом называют значимыми, так как по ним в основном производят расчеты плотин на сейсмостойкость.

Определение частот и форм собственных колебаний на стадии проектирования сооружения выполняют на расчетных моделях. Для таких сложных конструкций, как высотное здание или плотина, это очень трудоемкий процесс. Так, в работе [23] для анализа объемной твердотельной конструкции используется модель, состоящая из более чем 10 000 элементов. Используя пакеты программ, проектировщики могут определить различные динамические характеристики, в том числе частоту и форму собственных колебаний. В качестве примера на рис. 1 показаны первые три формы собственных колебаний металлической башни, полученные расчетным путем. Однако реальная частота и форма могут отличаться от расчетных.

В предлагаемой системе определение частот и форм собственных колебаний конструкций сооружений (в частности, плотин) выполняется экспериментально. Изучение фактической конструкции объекта необходимо только на стадии разработки схемы наблюдений и выбора местоположения опорных точек. Для выделения частот и форм собственных колебаний, определения динамических характеристик колебаний объекта в спектральной области предварительного моделирования объекта не требуется.

Передаточная функция между  $k$ -й точкой наблюдения со спектром  $C_k(x, y, z, \omega)$  и опорной точкой со спектром  $C_0(x, y, z, \omega)$  определяется по формуле

$$P_k(x, y, z, \omega) = \frac{\sum_{j=1}^N C_{kj}(x, y, z, \omega) C_{0j}^*(x, y, z, \omega)}{\sum_{j=1}^N C_{0j}^2(x, y, z, \omega)}, \quad (1)$$

где (\*) – комплексное сопряжение. Суммирование для каждой  $k$ -й точки осуществляется по ансамблю из  $N$  реализаций в спектральной области.

Комплексную передаточную функцию  $P_k(x, y, z, \omega)$  можно представить в виде двух компонент: амплитудно-частотной характеристики  $R_k(x, y, z, \omega) = |P_k(x, y, z, \omega)|$  и фазочастотной характеристики

$$\varphi_k(x, y, z, \omega) = \arctg \left( \frac{\text{Im}(P_k(x, y, z, \omega))}{\text{Re}(P_k(x, y, z, \omega))} \right).$$

Выполняя обратное преобразование Фурье, из передаточной функции можно получить импульсную характеристику системы в каждой точке наблюдения  $h_k(x, y, z, t)$ . Импульсные характеристики являются реакцией системы в точках наблюдения на импульсный сигнал, заданный в виде дельта-функции Дирака в опорной точке. В каждой точке наблюдения  $h_k(x, y, z, t)$  импульсные характеристики системы характеризуют распространение от опорной до измеряемой точки сейсмического импульса, заданного в виде дельта-функции в опорной точке с направлением поляризации по трем компонентам. По импульсным характеристикам можно определить скорости распространения упругих колебаний по объекту, а также упруго-механические характеристики материала объекта (модули упругости и сдвига, коэффициент Пуассона) [24].

*Логарифмический декремент затухания колебаний.* При определении упругих и диссипативных свойств строительной конструкции, как правило, предполагается [21], что колебания конструкции описываются линейными уравнениями второго порядка с постоянными значениями массы, упругости и коэффициента поглощения (модель линейного осциллятора с вязким трением). Для этого экспериментальную кривую амплитудно-частотной характеристики  $P_k(\omega)$  конструкции в точке  $k$  аппроксимируют кривой второго порядка, описывающей резонанс в линейной системе с вязким трением:

$$A_k(\omega, \varepsilon) = F_{0k} / M_{0k} \sqrt{(\omega_{0k}^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon_k^2 \omega^2}, \quad (2)$$

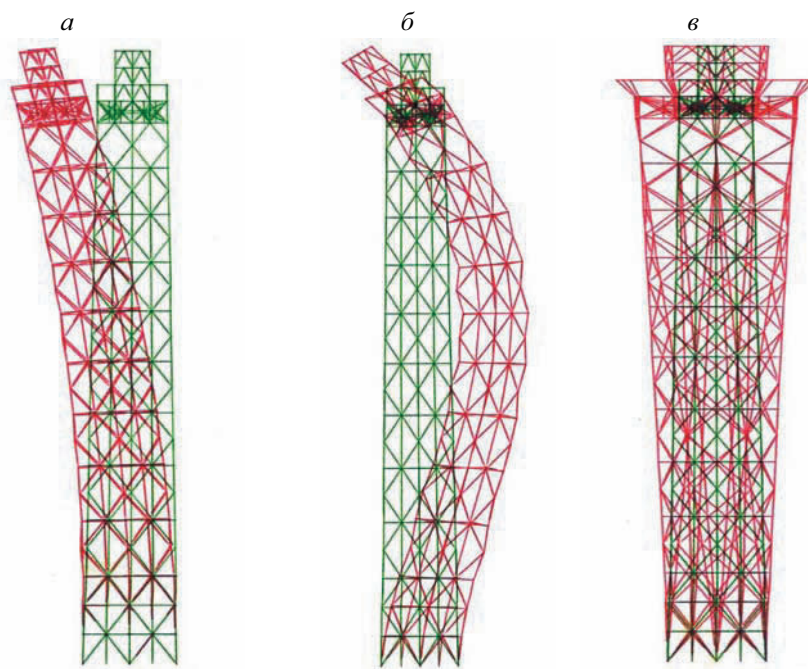


Рис. 1. Формы собственных колебаний металлической башни, полученные расчетным путем:

$a$  – на частоте 0,45 Гц,  $b$  – на частоте 2,00 Гц,  $v$  – на частоте 2,38 Гц

где  $A_k(\omega, \varepsilon)$  – амплитуда смещения;  $F_{0k}$  – амплитуда внешней вынуждающей силы;  $M_{0k}$  – масса конструкции;  $\omega_{0k}$  – резонансная частота;  $\varepsilon_k$  – коэффициент затухания (демпфирования) в точке  $k$ ;  $\omega$  – частота вынуждающей силы. Значение коэффициента затухания  $\varepsilon_k$  определяют по методу наименьших квадратов в выбранном диапазоне частот  $\{\omega_1, \omega_2\}$  с некоторым шагом  $\Delta\omega$ :

$$\varepsilon_k = \text{Arg min}_{\varepsilon} \left( \sqrt{\sum_{\omega_1=0}^{\omega_2=\omega_r/2} (P_k(\omega) - A_k(\omega, \varepsilon))^2} \right) \quad (3)$$

( $\omega_r = 2\pi f_r$  – круговая частота дискретизации сейсмического сигнала).

Логарифмический декремент затухания определяется по формуле

$$\delta_k = 2\pi\varepsilon_k / \omega_0. \quad (4)$$

Логарифмический декремент  $\delta_k$ , характеризующий затухание колебаний конструкции в точке  $k$ , равен натуральному логарифму отношения амплитуд свободных колебаний с интервалом в один период. Чем больше декремент затухания, тем "мягче" конструкция, тем быстрее затухают колебания конструкции, тем больше ее демпфирование и соответственно в меньшей степени проявляется действие резонанса. Зная декремент в точках  $k$  конструкции, можно определить его среднее значение для всего сооружения и величину среднеквадратичного отклонения по всем измерениям.

Для обеспечения необходимой точности определения динамических характеристик (частот и форм, декрементов и т. п.) сооружения необходимо осуществлять измерения микроколебания объекта по достаточно густой сетке наблюдений с последующим осреднением параметров по всем точкам наблюдения. Для плотины, чтобы получить высокое разрешение при определении динамических характеристик, размер элементной ячейки должен быть равен примерно 10 м вдоль по смотровым галереям (шесть галерей по высоте плотины). Это, в свою очередь, требует соответствующего количества точек наблюдения. Например, для плотины Красноярской ГЭС, длина которой по гребню составляет 1072 м, а высота 128 м, наблюдения проводились в 650 точках по шести галереям с шагом по длине галереи 7,5 м.

В разрабатываемой системе в соответствии с работой [32] мониторинг технического состояния предлагается осуществлять путем регистрации микроколебаний в 8–10 стационарных точках наблюдения, в которых устанавливаются трехкомпонентные сейсмоприемники. Для обоснованного выбора точек наблюдения с целью обеспечения постоянного контроля состояния плотины проводится предварительное детальное сейсмометрическое обследование. При проведении этого обследования регистрация сигналов производится ограниченным числом сейсмоприемников (не менее двух), один из которых расположен в "опорной" точке (в основании или гребне плотины), а другие в точках сетки наблюдения с необходимым размером густоты. По способу [25] разновременные записи – два массива трехкомпонентных сейсмограмм в  $k$ -й точке наблюдения  $\tilde{U}_k(x, y, z, t)$  и в опорной точке  $U_0(x, y, z, t)$  – приводятся к одновременным  $U_k(x, y, z, t)$ . Это позволяет посредством преобразования Фурье определить приведенные комплексные спектры колебаний объекта  $C_k(x, y, z, \omega)$  для каждой  $k$ -й пространственной точки плотины. Анализируя поведение амплитудного и фазового спектров вдоль профиля наблюдения – "текущего" спектра – выделяют "узлы" (минимальные колебания) и "пучности" (максимальные колебания) значимых форм собственных поперечных и продольных колебаний плотины.

Для плотин гидроэлектростанций с целью выявления обратимых сезонных изменений динамических параметров необходимо проводить два обследования при минимальном и максимальном напорах на плотину. Для плотин Саяно-Шушенской, Красноярской и Зейской ГЭС в 1998–2008 гг. были проведены первичные обследования, получены основные динамические характеристики [21], которые представлены в динамических паспортах этих плотин. В предлагаемой системе обеспечить большое количество стационарных точек наблюдения на плотине прак-

тически невозможно. Однако при известном местоположении "узлов" и "пучностей" значимых форм колебаний плотины изменение динамических характеристик можно контролировать значительно меньшим количеством датчиков, чем то, которое требуется при первичном обследовании. Поскольку динамические характеристики меняются медленно, предлагается контролировать только важнейшие точки конструкции плотины, а точность определения динамических характеристик обеспечить посредством осреднения множества регистрационных записей, полученных в процессе мониторинга [32].

На основе данных первичного обследования выбирается месторасположение сейсмоприемников. Места установки датчиков не должны попадать в "узлы" значимых форм собственных поперечных и продольных колебаний плотины; должны охватывать максимально возможную область тела плотины для оценки технического состояния как плотины в целом, так и ее отдельных блоков и элементов; должны обеспечивать определение коэффициентов динамического усиления колебаний в отдельных секциях водосливной и станционной плотины, а также контроль состояния берегового примыкания тела плотины. Выбранная таким образом схема наблюдений позволяет также удовлетворить требованиям [7], т. е. пригодна для регистрации сейсмических воздействий от землетрясений, поскольку позволяет зарегистрировать колебания основных частей плотины на частотах значимых собственных форм, определить коэффициент динамического усиления при значительных динамических воздействиях от землетрясений.

Так, исходя из предварительного детального обследования плотины Красноярской ГЭС [26], при размещении по сетке 7,5 м по длине и 10 м по высоте плотины определены десять наиболее информативных точек измерения, в которых обеспечивается выделение следующих форм собственных поперечных колебаний: в секции 8 – второй, четвертой, пятой и седьмой; в секции 22 – первой, второй, пятой; в секции 37 – первой, второй, седьмой; в секции 54 – первой, второй, четвертой, седьмой. Исходя из этого два сейсмоприемника были размещены на береговых примыканиях и по два (в основании и ближе к гребню плотины) сейсмоприемника в 8, 22, 37 и 54 секциях плотины. Данный вариант размещения сейсмоприемников для плотины Красноярской ГЭС показан на рис. 2.

Используя выбранную минимальную систему измерений, при проведении мониторинга динамических характеристик  $m$  выбранных точек плотины, размещенных в теле плотины с каждого  $k$ -го ( $k = 1, \dots, m$ ) трехкомпонентного  $(x, y, z)$  сейсмоприемника, преобразованный в цифровую форму сейсмический сигнал  $U_i(x, y, z, t)$  в заданный интервал времени  $i \{t_i \leq t < t_{i+1}\}$  одновременно от всех сейсмоприемников вводится в систему мониторинга. Повторяя измерения  $N$  раз до получения оценки спектров с заданной среднеквадратичной ошибкой в выбранных  $k$  точках, рассчитываются частоты значимых форм собственных колебаний, передаточные функции, импульсные характеристики, скорости распространения волн и декременты затуханий согласно (1)–(4). Значения вычисленных характеристик сравниваются с ранее определенными значениями характеристик, заносятся в базу данных и по условию или запросу оператора выдаются на экран или печать. Кроме того, по запросу оператора результаты реальных измерений могут быть выведены в виде объемного графического изображения, которое в увеличенном масштабе наглядно демонстрирует движение плотины в пространстве и основные динамические характеристики.



Рис. 2. Схема размещения сейсмоприемников на плотине Красноярской ГЭС

Ведение базы данных позволяет эксперту проследить историю изменения параметров от времени предварительного обследования и увидеть, может быть медленное, но опасное изменение в состоянии строительной конструкции плотины. Это может служить сигналом для последующего детального обследования плотины. Такой подход к организации схемы мониторинга позволяет значительно снизить стоимость системы при обеспечении необходимого контроля выбранных динамических параметров и регистрации землетрясений.

**Структура автоматизированной системы сейсмометрического мониторинга плотин гидроэлектростанций.** Для регистрации землетрясений на гидротехнических сооружениях разработаны специализированные сейсмометрические станции разного типа (см., например, работу [27]). Станции предназначены только для регистрации землетрясений и практически не могут быть использованы для мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений. С другой стороны, комплексы для сейсмометрической диагностики зданий [14, 15, 28] не предназначены для мониторинга землетрясений. Поэтому авторами данной работы предлагается разработать систему сейсмической регистрации, которая могла бы совмещать выполнение этих двух задач.

Исходя из современного уровня развития новых методов и технологий, структура проектируемой автоматизированной системы сейсмометрического мониторинга должна удовлетворять следующим главным технико-экономическим требованиям [29, 30]:

- обеспечение решения всего набора задач;
- возможность изменения и расширения его структуры в случае изменения набора задач и совершенствования методики и технологии;
- возможность общения персонала с техническими средствами обработки информации;
- использование только унифицированных устройств, блоков и узлов;
- возможность гибкого изменения структуры применяемого комплекса;
- высокая надежность и ремонтпригодность.

Для реализации указанных требований предлагаемая структура АССМ должна удовлетворять основным принципам построения системы сбора и обработки сейсмической информации (модульность программного и аппаратного обеспечения, открытость программных и аппаратных спецификаций) и базироваться на современной концепции построения систем сбора и обработки сейсмической информации. Аппаратные компоненты АССМ должны быть созданы на основе перспективной современной технологии, поддержанной многими производителями (отечественными и зарубежными). Это позволяет модифицировать и развивать АССМ.

Предлагаемая авторами структурная схема АССМ приведена на рис. 3.

В структуре автоматизированной системы сейсмометрического мониторинга выделяется три уровня:

- первый (нижний) уровень – пункты наблюдения, состоящие из трехкомпонентных пьезоэлектрических сейсмометрических датчиков с кабелями;
- второй (средний) уровень – пункт сбора сейсмической информации, представляющий собой функциональный блок сбора и предварительной обработки микросейсмических колебаний;
- третий (верхний) уровень – информационно-обрабатывающий центр, представляющий собой сервер и автоматизированное рабочее место пользователя, включенное в вычислительную сеть предприятия.

Согласно [29, 30] работа предлагаемой АССМ должна осуществляться путем взаимодействия технического, программного, информационного, метрологического, лингвистического, математического и организационного обеспечений.

В отличие от существующих систем предлагаемая автоматизированная система сейсмометрического мониторинга плотин гидроэлектростанций выполняет две функции: 1) непрерывного слежения за колебаниями плотины в режиме реального времени (по стеку) для безусловного выполнения регистрации землетрясений с последующей оценкой их воздействия на плотину; 2) интервальной (по заданному расписанию) регистрации микроколебаний плотины для мониторинга ее динамических характеристик и оценки технического состояния. Выполнение данных функций происходит на одной и той же системе наблюдений, но в разное время. Приоритетной функцией является регистрация землетрясения. В системе интервальная регистрация для мониторинга динамических характеристик прекращается сразу же после появления предвестников землетрясения, усилители регистрации переключаются на режим малого усиления, и начинается регистрация землетрясений. Регистрация землетрясения выполняется в те-

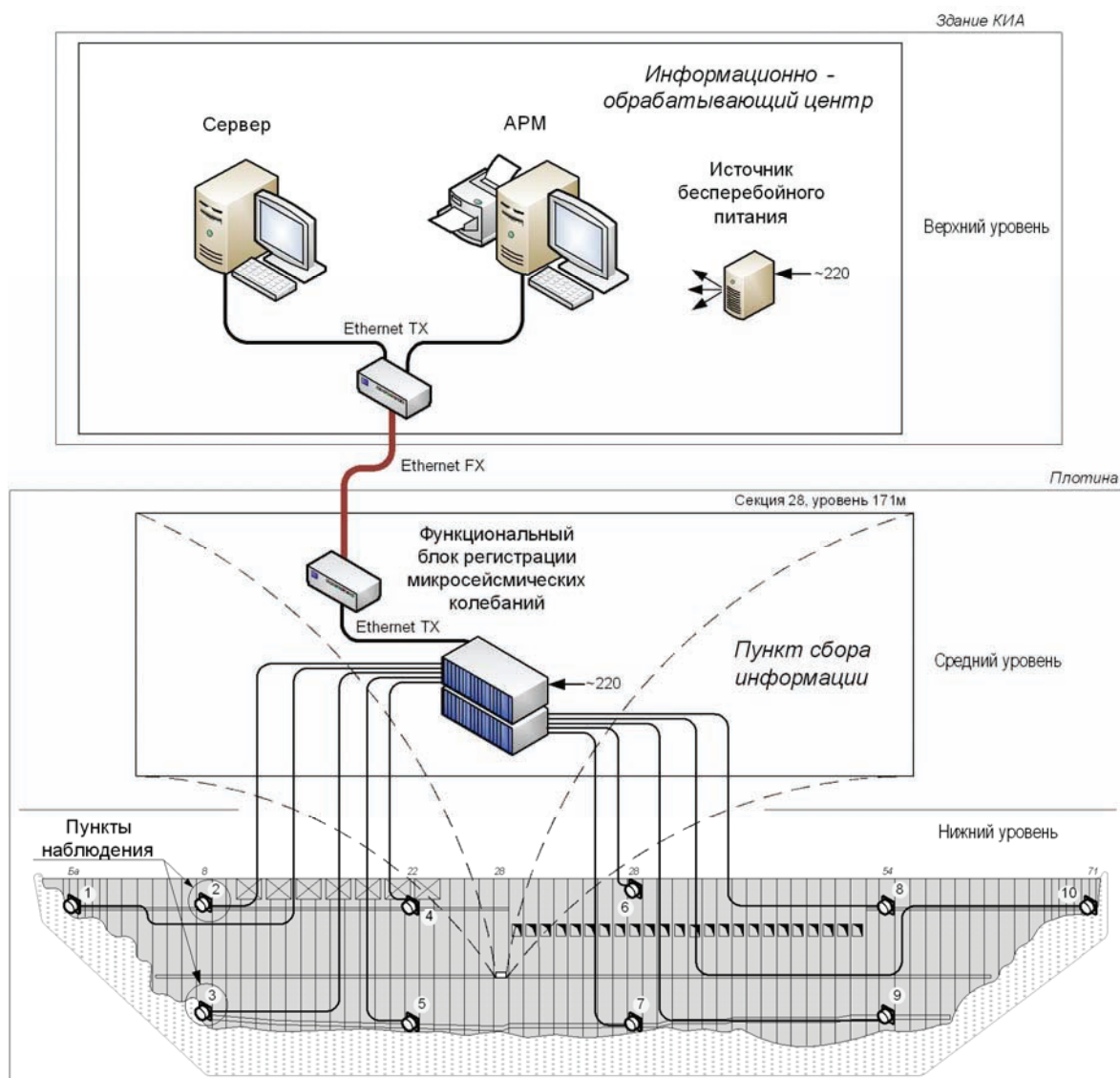


Рис. 3. Структурная схема автоматизированной системы сейсмометрического мониторинга плотин гидроэлектростанций

чение периода времени, на 3 мин большего длительности землетрясения от начала до исчезновения признаков его окончания. После прохождения землетрясения, независимо от расписания мониторинга, проходит регистрация сигналов для оценки технического состояния плотины. В дальнейшем мониторинг осуществляется согласно расписанию.

Полученные в процессе мониторинга данные собирают на сервер сбора данных, на котором осуществляется вычисление динамических характеристик. Вычисленные характеристики заносятся в базу данных и по требованию могут быть выданы на АРМ пользователя в виде графиков или таблиц.

Предлагаемая автоматизированная система сейсмометрического мониторинга (АССМ) может быть интегрирована в автоматизированную систему контроля и диагностики (АСКД) ГТС в качестве подсистемы. В свою очередь, АСКД ГТС предлагается интегрировать в структурированную систему мониторинга и управления (ССМУ) инженерными системами зданий и сооружений [31]. Данные в виде заданных диагностических параметров или при необходимости в виде первичных записей с использованием стандартных протоколов, реализуемых автоматизированной системой, передаются на сервер базы данных АСКД ГТС. На сервере осуществляется более полная обработка данных, полученных со всех контрольно-измерительных приборов, установленных на ГТС, и данных визуальных наблюдений. В соответствии с установленным в работе [31] регламентом оперативные данные также



передаются в информационно-аналитический центр (ССМУ). Таким образом, АССМ является частью большой системы предупреждения и оповещения о чрезвычайных ситуациях.

Предлагаемая автоматизированная система сейсмометрического мониторинга в настоящее время проектируется в Конструкторско-технологическом институте вычислительной техники СО РАН и Югорском НИИ информационных технологий и установлена для опытной эксплуатации на Красноярской ГЭС.

Авторы выражают благодарность Майнагашеву С., Нескородеву В., Гурьеву В. и Комарову А. за ряд полезных замечаний и консультаций.

### Список литературы

1. Федеральный закон РФ от 26.03.2003 № 35-ФЗ "Об электроэнергетике".
2. Федеральный закон от 21.07.97 г. № 117-ФЗ "О безопасности гидротехнических сооружений".
3. Федеральный закон от 21.12.94 г. № 66-ФЗ "О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера".
4. Постановление Правительства РФ от 06.11.98 № 1303 "Об утверждении Положения о декларировании безопасности гидротехнических сооружений".
5. РД 153-34.2-21.342-00. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений.
6. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ. (Утверждены Приказом Минэнерго России № 229 от 19.06.2003; зарегистрированы Минюстом РФ № 4799 20.06.2003).
7. ВСН 42-70. Временные указания по организации и проведению инструментальных наблюдений за колебаниями высоких плотин при землетрясениях. Л.: Минэнерго СССР, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1971.
8. Маиляна Л. Р. Конструкции зданий и сооружений с элементами статики. М.: ИНФРА-М, 2009.
9. БЕРЖИНСКИЙ Ю. А., ПАВЛЕНОВ В. А., БЕРЖИНСКАЯ Л. П. и др. Оценка сейсмостойкости зданий с помощью вибрационных испытаний // Тр. II Междунар. симп. "Активный геофизический мониторинг литосферы Земли". Новосибирск.
10. БОРДЖЕС Дж. Ф. Проектирование железобетонных конструкций для сейсмических районов / Дж. Ф. Борджес, А. Равара. М.: Стройиздат, 1978.
11. ПЛОТНИКОВА Л. М., КАРНАУХОВА О. В. Геофизическая интерпретация переходных характеристик грунтовых плотин по данным натуральных наблюдений // Сейсмологические исследования. 1989. № 11.
12. Проектирование и строительство больших плотин. Вып. 1 Строительство плотин в сложных природных условиях. М.: Энергия, 1972. С. 107–125.
13. Волновые процессы в конструкциях зданий при сейсмических воздействиях. М.: Наука, 1987. С. 22–23.
14. КОТЛЯРЕВСКИЙ В. А., СУЩЕВ 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.
15. СУЩЕВ С. П. Мониторинг устойчивости и остаточного ресурса высотных зданий и сооружений с применением мобильного диагностического комплекса "Стрела": Сб. материалов. 2004. С. 68–71.
16. ЗАРЕЦКИЙ Ю. К. Статика и динамика грунтовых плотин / Ю. К. Зарецкий, В. Н. Ломбардо. М.: Энергоатомиздат, 1983.
17. САЛЯМОВА К. Д., НУРТАЕВ Б. С. Исследование динамического поведения грунтовой плотины при сейсмических воздействиях // Геология и минеральные ресурсы. 1999. № 5.
18. СЕЙМОВ В. М. Динамика и сейсмостойкость гидротехнических сооружений / В. М. Сеймов, Б. Н. Островерх, А. И. Ермоленко. Киев: Наук. думка, 1983.
19. ОСТРОВЕРХ Б. Н. Численная модель для исследования упругих волн из очага в виде развивающейся трещины сдвига в напряженной неоднородной полуплоскости // Вопр. инж. сейсмологии. 1985. № 26. С. 108–116.
20. СЕЙМОВ В. М., ЕРМОЛЕНКО А. И., ОСТРОВЕРХ Б. Н., ТРОФИМЧУК А. Н. Нестационарные взаимодействия конструкций с усложненными средами // Гидромеханика. 1996. № 70. С. 126–141.
21. 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.
22. Пат. 2151234 РФ, МПК7 7 E 02 B 1/02, G 01 M 7/00. Способ определения динамических характеристик основания и тела плотины ГЭС под воздействием импульсов, возникающих при запуске гидроагрегатов / В. С. Селезнев, А. Ф. Еманов, А. П. Кузьменко, В. Г. Барышев, В. С. Сабуров. Опубл. 20.06.2000. Бюл. № 17.

23. СУЩИХ А., АНУФРИКОВ П. Расчет собственных частот и форм колебаний конструкций в среде T-FLEX Анализ // САПР и графика. 2004. №11.
24. КУЗЬМЕНКО А. П., САБУРОВ В. С. Определение упругих свойств бетона плотин ГЭС по скоростям сейсмических волн // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2006. Т. 245. С. 259–269.
25. КУЗЬМЕНКО А. П., БОРТНИКОВ П. Б., САБУРОВ В. С. Контроль технического состояния бетонных плотин по динамическим характеристикам их колебаний // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2007. Т. 248. С. 64–76.
26. Пат. 2150684 РФ, G 01 M 7/00, G 01 V 1/00. Способ приведения к единому времени регистрации разновременных записей измерений. Опубл. 10.06.2000. Бюл. № 16.
27. КУЗЬМЕНКО А. П. и др. Отчет по договору № 2277/2000 от 04.02.2000. Инженерно-сейсмологическое обследование плотины Красноярской ГЭС. Новосибирск, 2001.
28. ХРАПКОВ А. А., НИКИФОРОВ А. А., СКОМОРОВСКАЯ Е. Я. и др. Автоматизированная система сейсмометрического контроля на Бурейской ГЭС // Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2007. Т. 249. С. 32–38.
29. ОСТРЕЦОВ В. М., ГЕНДЕЛЬМАН Л. Б., ВОЗНЮК А. Б., КАПУСТЯН Н. К. Станция стационарного мониторинга высотного здания: оборудование и опыт эксплуатации // Сб. материалов ОАО "ЦНИИЭП жилища". М.: Б. и., 2004. С. 86–90.
30. ГОСТ 34.003-90. Информационные технологии. Автоматизированные системы. Термины и определения.
31. ГОСТ 34.602-89. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы.
32. ГОСТ Р 22.1.12-2005. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2005.

*Золотухин Евгений Павлович – канд. техн. наук, доцент, зам. директора Конструкторско-технологического ин-та вычисл. техники СО РАН; тел. (383) 330-90-61; e-mail: zep@kti.nsc.ru;*  
*Кузьменко Александр Павлович – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Югорского науч.-исслед. ин-та информационных технологий; тел. (346) 735-90-75*