

УДК 621.3.11.25

С. С. Карапетян, Б. М. Мамиконян

**Исследование динамических характеристик сложных систем**

(Представлено академиком А. А. Терзяном 27/1 2005)

Исследование динамических характеристик сложных систем, таких, как гидросооружения, атомные электростанции, плотины водохранилищ, является актуальной задачей, особенно для сейсмоопасных регионов. В ходе долгосрочной эксплуатации в теле сооружения происходят необратимые процессы, которые могут отрицательно проявляться при землетрясениях. Для установления степени сейсмической стойкости сооружения необходимо определить параметры и спектральный состав сейсмических колебаний основания сооружения, а также реакцию сооружения на сейсмические воздействия разной силы. Достаточно сложными динамическими системами являются высокие плотины действующих водохранилищ. При исследовании сейсмической стойкости плотины необходимо учитывать следующие основные факторы, определяющие характер её динамического поведения: нестационарность сейсмического воздействия и взаимодействия сооружения с основанием и жидкой средой; характер распространения волн в основании, жидкости и сооружении; пространственные условия работы сооружения; неоднородности материала основания и плотины. Теоретическое определение сейсмической стойкости плотин с учётом перечисленных факторов связано с большими трудностями аналитического и вычислительного характера. Поэтому для решения поставленных задач используются экспериментально-теоретические методы [1,2].

Исследование выполнено на плотине Гегардаличского водохранилища в Республике Армения. Территория водохранилища находится в зоне  $I \geq 9$  - балльной интенсивности при ожидаемом максимальном горизонтальном ускорении (ОМГУ)  $A_{\max} = 0.4g$  для средних грунтовых условий. С целью уточнения допустимых МГУ различных точек тела плотины были проведены инструментальные исследования. Возбуждение колебаний грунтов основания и тела плотины производилось с помощью ряда тестовых взрывов небольшой мощности на расстоянии 450 м от основания плотины вдоль нормали к её створу. Разработанная и использованная система мониторинга включает: сеть точек наблюдения за сейсмическими событиями, где размещаются сейсмометрические приборы: многоканальный регистрационный комплекс, содержащий сейсмоприёмники, аналоговый коммутатор, АЦП, компьютер, коммуникации. Точки наблюдения определялись по известной методике [3], которая позволяет уверенно выявить интересующие формы собственных колебаний плотины. Весь комплекс сейсмоприёмников и регистрационной системы с программным обеспечением разработан и изготовлен в СОКТИ НАН РА [4]. Для регистрации скоростей смещения наблюдаемых точек использованы сейсмоприёмники типа С-069 (модификация сейсмоприёмника СМ-3) с частотой собственных колебаний 0.3 Гц. Полученные от сейсмоприёмников осциллограммы записей преобразованы в цифровой код и введены в

компьютер для последующей обработки. Сравнительно низкий частотный диапазон (0 - 20 Гц) сейсмических сигналов позволяет коммутировать выходные сигналы сейсмоприёмников, поочерёдно подключая их к измерительному каналу. Для коммутации использован коммутатор аналоговых сигналов С-036, имеющий следующие характеристики: число каналов: однополярных - 64; дифференциальных - 32; входное напряжение 0...1 В; выходное напряжение 0...10 В; коэффициент усиления 10; подавление помех при дифференциальном соединении 500 раз.

В качестве АЦП использован стандартный модуль типа А116-5-STB фирмы LAN Automatic. Модуль выполнен в стандарте MicroPC и предназначен для преобразования 16-ти аналоговых сигналов напряжения или тока в 14/12-разрядный цифровой код. Модуль выполнен в виде платы и вставляется непосредственно в слоты компьютера IBM PC. Основные метрологические характеристики платы: 14/12-разрядный АЦП: 0...+5/± 10 В; 0...5/ 0...20 мА; 8 изолированных цифровых выходов; внутренние тестовые сигналы (REF = 2.5 V, AGND); ОЗУ выборка 16 К слов; запуск АЦП: программный или по таймеру; считывание из АЦП: в режиме опроса, по прерыванию или по каналу DMA; время преобразования АЦП 6 мкс; время установления входов и/или изменения коэффициентов усиления 3.6 мкс; степень подавления поперечных помех < - 80 дБ; входное сопротивление > 10 МОм; коэффициент усиления: 1, 2, 5, 10 (1, 10, 100, 1000); точность измерения с усреднением до ± 0.1 МЗР; скорость выдачи данных из АЦП с переключением входов и изменением коэффициента усиления по DMA: 100000 выб/с.

Определение ОМГУ по высоте створа плотины решается с помощью эмпирических передаточных функций или их временных аналогов - импульсных переходных функций. При этом делается допущение, что система "плотина - жидкость - основание" при сейсмических воздействиях линейна. В принципе определение сейсмических нагрузок следует выполнять на основе нелинейной теории сейсмостойкости. Однако результаты использования нелинейной теории показывают, что сейсмические силы, определённые по линейной теории сейсмостойкости, больше, чем определённые с учётом упруго-пластического деформирования системы. Следовательно, для оценки запаса прочности и устойчивости плотины вполне оправданно вычисление сейсмических ускорений в линейной постановке задачи. Таким образом, считаем, что плотина является линейной системой с постоянными параметрами. Для такой системы последовательности входного и выходного сигналов связаны соотношением типа свёртки

$$u(x,t) = \int_0^t h(x,t - \tau)w(\tau)d\tau, \quad (1)$$

где  $t$  - время,  $w(t)$  - входная последовательность (перемещение, скорость или ускорение основания плотины);  $u(x,t)$  - выходная последовательность или отклик плотины в точке  $x$  ( $x_1, x_2, x_3, \dots$ );  $h(x,t)$  - импульсная переходная функция (ИПФ) системы в точке  $x$ .

Как известно, ИПФ  $h(x,t)$  является исчерпывающей характеристикой системы и полностью определяет её динамические свойства. Если экспериментальным путём определить входную

$w(t)$  и выходную  $u(x,t)$  последовательности, то ИПФ может быть найдена из выражения (1). Определённая таким образом ИПФ даёт возможность вычисления отклика плотины на любое произвольное воздействие, например, на потенциально ожидаемое землетрясение. Основным методом решения поставленной задачи служит математический аппарат преобразования Фурье. Применяя это преобразование к выражению (1), получаем

$$U(x,\omega) = H(x,\omega)W(\omega), \quad (2)$$

откуда определяем передаточную функцию (ПФ)

$$H(x,\omega) = U(x,\omega)/W(\omega), \quad (3)$$

где  $W(\omega)$  и  $U(x,\omega)$  - преобразования Фурье экспериментально зарегистрированных последовательностей входного воздействия (основание плотины) и отклика (точки  $x$  тела плотины);  $H(x,\omega)$  - ПФ плотины между входом и точкой  $x$ .

Для вычисления отклика точки  $x$  плотины на реальное сейсмическое воздействие достаточно умножить частотную характеристику этого воздействия на ПФ и с помощью обратного преобразования Фурье перейти во временную область:

$$u^*(x,t) = F^{-1}[H(x,\omega)W^*(\omega)], \quad (4)$$

где  $W^*(\omega)$  - преобразование Фурье реального сейсмического воздействия, например, полученной акселерограммы;  $u^*(x,t)$  - отклик в точке  $x$ .

Известно [5], что интегральные уравнения типа (1) составляют один из классов некорректных задач. Решение (3) может не существовать, а если и существует, то не обладает свойством устойчивости к ошибкам экспериментально определённых функций  $u(x,t)$  и  $w(t)$ . С физической точки зрения ПФ  $H(x,\omega)$  реальной системы стремится к нулю при  $|\omega| \rightarrow \infty$ . В нашем случае особый интерес представляет спектральный состав сейсмических воздействий в интервале (0,07...30) Гц. Поэтому с достаточной точностью можно считать, что функция  $H(x,\omega) \equiv 0$  вне некоторого интервала  $(\omega_1 \dots \omega_2)$ , т. е.  $h(x,t)$  является функцией с финитным спектром [6]. Учитывая данное обстоятельство, можно определить устойчивую к помехам ПФ следующим образом:

$$H_f(\omega) = H(\omega)f(\omega), \quad (5)$$

где  $f(\omega)$  - стабилизирующий множитель, являющийся полосовым фильтром. С учётом выражения (5) получаем из (4) устойчивую расчётную формулу

$$u_f^*(x,t) = F^{-1}[H_f(x,\omega)W^*(\omega)], \quad (6)$$

Для определения ОМГУ необходимо иметь характеристики (акселерограмму) реального сейсмического воздействия для исследуемого объекта. Для расчетов ответственных объектов (атомные электростанции, гидросооружения и др.) используется исходная информация в виде акселерограмм с соответствующим амплитудным уровнем, продолжительностью и спектральным составом колебаний. При недостаточно полной инструментальной информации (отсутствие акселерограмм сильных землетрясений для данных районов) производится выдача синтетических акселерограмм или реальных записей-аналогов других местностей. Для площадки Гегардаличской плотины использовался так называемый "двухколенчатый" метод подбора акселерограмм-аналогов, суть которого заключается в следующем.

1. Из множества акселерограмм подбираются такие, которые соответствуют землетрясениям, возможным в данном районе. Они в основном соответствуют тем параметрам, которые максимально возможны для данного района (потенциально опасны для исследуемой площадки). Такая грубая классификация позволила произвести первичный подбор акселерограмм.

2. Вторая ступень представляет собой более детализованный подход. Техника подбора акселерограмм-аналогов заключалась в том, что по ранее произведенным оценочным значениям  $A_{\max}$ ,  $T_{\text{пр}}$  и  $t$  (максимальное ускорение грунта, преобладающий период колебаний грунта, ширина импульса) выбирались те акселерограммы, которые наиболее соответствовали акселерограммам из первичной группы.

При этом учитывались также другие косвенные показатели: приблизительная идентичность грунтовых условий, механизмы очагов землетрясений и т. д. По принципу этого подхода на основе оценочных расчетных значений параметров  $A_{\max}$ ,  $T_{\text{пр}}$  и  $t$  для исследуемого гидросооружения выбрана акселерограмма-аналог EUREKA, COMP N79E, 21.12.1954 г. (США).

По изложенной здесь методике определены для Гегардаличского водохранилища эпюры распределения ОМГУ по высоте створа плотины. Определение эпюры ОМГУ по результатам одного взрыва (взрыв №3) состоит из следующих этапов.

1. Регистрация с помощью сигналов сейсмоприёмников скоростей смещения точек наблюдения (точки  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ), расположенных по высоте плотины по различным профилям; при этом точка  $i = 5$  располагалась на грунте в непосредственной близости от верхнего бьефа плотины и принималась в качестве входной по отношению к точкам 1, 2, 3 и 4, а точка 2 профиля Пр-1, для которой в качестве примера представлены ниже кривые, располагалась на середине гребня плотины (рис. 1,а,б).

2. Вычисление спектров Фурье образов экспериментально зарегистрированных записей (амплитудные спектры представлены на рис. 1,в,г):

$$V_i(\omega) = F[v_i(t)], \quad i = 1, 2, 3, 4, 5.$$

3. Определение ПФ:  $H_{i5}(\omega) = V_i(\omega)/V_5(\omega)$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ .

4. Фильтрация ПФ с помощью полосового фильтра:  $H_{i5}^f(\omega) = H_{i5}(\omega)f(\omega)$ .

Амплитудные спектры отфильтрованных и сглаженных ПФ показаны на рис. 1, д, импульсные переходные функции  $h_{15}^f(t)$  - на рис.1, е.

5. Анализ акселерограммы (рис. 2, а) выбранного исходного реального сейсмического воздействия, вычисление Фурье-образа ускорения этого воздействия:

$$Y_0(\omega) = F[y_0^u(t)].$$

Амплитудный спектр выбранной акселерограммы показан на рис. 2,б.

6. Получение частотных характеристик откликов от воздействия  $y_0^u(t)$  :

$$X_i(\omega) = Y_0(\omega) H_{15}^f(\omega), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5.$$

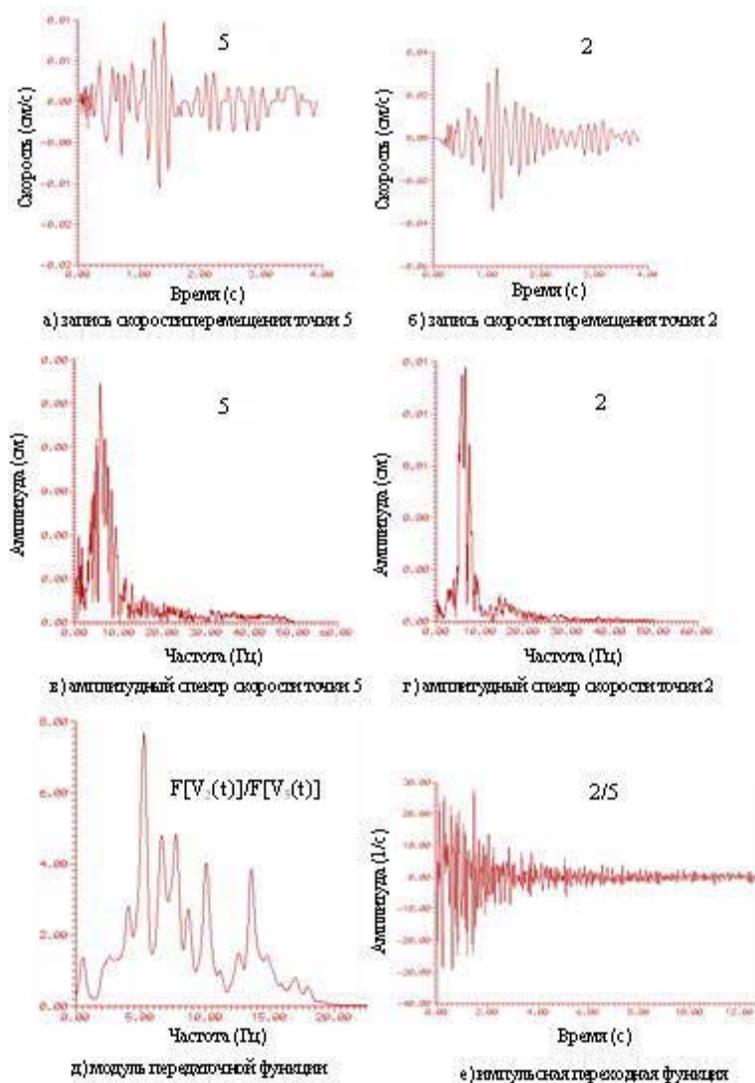


Рис. 1. Временные и частотные характеристики (взрыв №3)

Амплитудный спектр отклика в точке 2 показан на рис. 2, в.

7. Вычисление ускорений от реального сейсмического воздействия в точках наблюдений:  
 $= F^{-1}[X_i(\omega)], i = 1, 2, 3, 4, 5.$
8. Вычисление абсолютных ускорений (рис. 2, г):

$$x_{abi}''(t) = x_i''(t) + y_0''(t), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5.$$

9. Определение максимального значения абсолютного ускорения

$$A_{\max}^i = \max |x_{abi}''(t)|.$$

Эпюры ОМГУ по высоте створа плотины по точкам трёх профилей Пр-1 (по середине плотины), Пр-2 и Пр-3 по результатам двух характерных взрывов (взрыв №2 и взрыв №3) представлены на рис.3. Теоретически значения вычисленных ускорений в соответствующих точках должны совпадать независимо от номера эксперимента (номера взрыва), так как вычисляемые импульсные переходные функции являются внутренними и постоянными характеристиками плотины и не зависят от номера эксперимента. Результаты

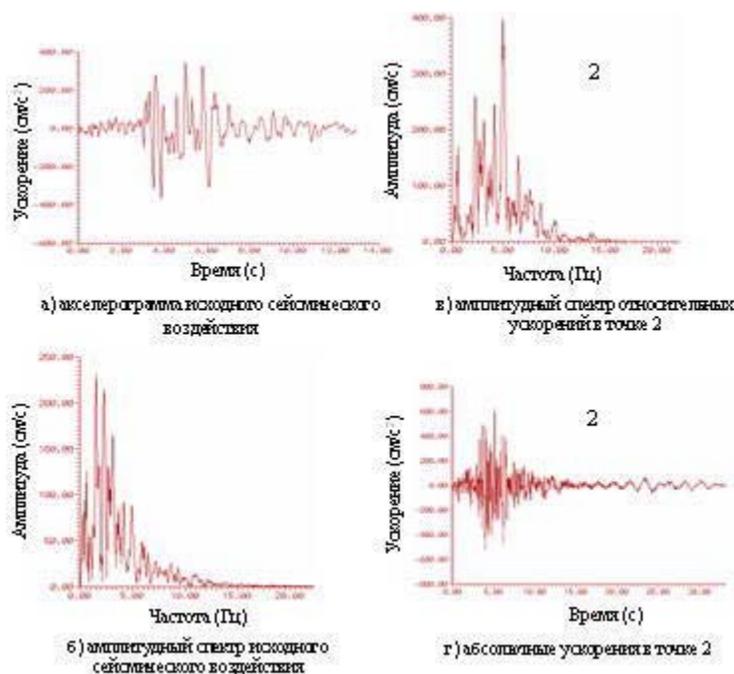


Рис. 2. Временные и частотные характеристики (исходное сейсмическое воздействие)

численных расчётов неплохо согласуются с теорией. Так, в точке №1 вычисленное ускорение при взрыве №2 равно  $7.429 \text{ м/с}^2$ , при взрыве №3 ускорение в той же точке равно  $7.317 \text{ м/с}^2$ , разница составляет всего 1.5%. Максимальная разница получилась в точке №2: здесь при взрыве №2 значение ускорения равно  $7.266 \text{ м/с}^2$ , а при взрыве №3 -  $6.206 \text{ м/с}^2$ , разница составляет 14.6%.

Материал данного исследования можно использовать при проектировании плотин с целью правильного учёта сейсмических сил, а также разработки необходимых антисейсмических мероприятий, а методика исследования применима также и для других гидросооружений и атомных электростанций.

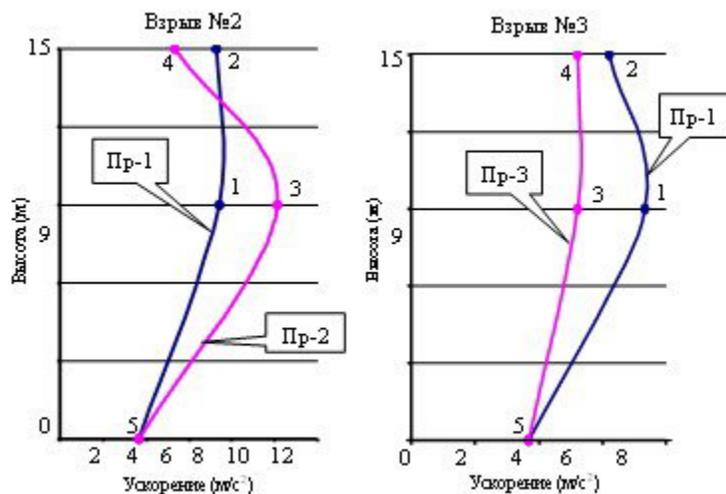


Рис. 3. Эпюры ОМГУ по высоте плотины

Государственный инженерный университет Армении,  
Гюмрийский филиал

### Литература

1. *Карпетян С. С., Бабаян Т. О., Манукян Л. А.* - Сб. науч. трудов конференции, посвящённой памяти А. Г. Бабаджаняна. Гюмри. Изд-во "Гитутюн" НАН РА. 1999. С. 281-289.
2. *Карпетян С.* - Сб. науч. трудов конференции, посвящённой 60-летию основания НАН РА (28-31 октября 2003 г., г. Гюмри). Гюмри. Изд-во "Гитутюн" НАН РА. 2004. С. 258-262.
3. *Напетваридзе Ш. Г.* Вопросы организации инженерно-сейсмометрической службы на плотинах из местных материалов. Душанбе. Дониш. 1968. 40 с.
4. *Сарксян Р., Карпетян С., Саргсян К.* - Сб. науч. трудов конференции, посвящённой 40-летию основания ИГИС им. А. Назарова НАН РА (9-12 октября 2001 г., г. Гюмри). Гюмри. Изд-во "Гитутюн" НАН РА. 2002. С. 401-405.
5. *Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.* Методы решения некорректных задач. М. Наука. 1986. 224 с.
6. *Тихонов А. Н., Самарский А. А.* Уравнения математической физики. М. Наука. 1977. 724 с.

**Ս. Ս. Կարապետյան, Բ. Մ. Մամիկոնյան**

**Բարդ համակարգերի դինամիկ բնութագրերի հետազոտումը**

Որպես բարդ համակարգի օրինակ դիտարկվել է Գեղարդալճի ջրամբարի բարձր պատվարը: Նման օբյեկտների դինամիկ հատկությունների որոշման և ստուգման խնդիրը հրատապ է, հատկապես դրանց սեյսմակայունությունը պարզելու առումով: Բերված են օգտագործված չափիչ-գրանցիչ համակարգի նկարագրությունը, հետազոտության մեթոդիկան և արդյունքները: Կառուցված են սպասվող առավելագույն հորիզոնական արագացումների էպյուրներն ըստ պատվարի բարձրության: Ստացված արդյունքները կարելի է օգտագործել պատվարների նախագծման ընթացքում սեյսմիկ ուժերի ճիշտ հաշվառման համար, ինչպես նաև անհրաժեշտ հակասեյսմիկ միջոցառումների մշակման նպատակով:

**S. S. Karapetyan, B. M. Mamikonyan**

**Investigation of Compound Systems Dynamic Characteristics**

In the article there are stated the method and results of dynamic parameters measuring with the aim of seismic stability determination of functioning Geghardalich water storage dam in Republic of Armenia. By experimental-theoretical method the epures of expected maximal horizontal accelerations (EMHA) are constructed on dam location height in its different profiles. The article's main regulations can be used in monitoring of other hydroconstructions and atomic power plants.