

ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

С. А. НИРУЗЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРА ПРИВЕДЕННЫХ
СЕЙСМИЧЕСКИХ УСКОРЕНИЙ НА ОСНОВЕ СЕЙСМОГРАММ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

При решении задач инженерной сейсмологии и сейсмостойкости сооружений необходимо располагать зарегистрированными инженерными характеристиками интенсивности землетрясений. Поскольку в нашей стране и за рубежом в основу расчета сооружений принимается спектр приведенных сейсмических ускорений $\tau(T)$ или его модификации, то, естественно принять этот же спектр за искомую меру интенсивности землетрясений [1, 2]. В частности, спектр приведенных сейсмических ускорений лежит в основе разработанного А. Г. Назаровым [3] инструментального метода определения сейсмической нагрузки, заключающегося в непосредственном интегрировании уравнений движения почвы многомаятниковыми сейсмометрами, состоящими из серии линейных осцилляторов, моделирующих поведение зданий и сооружений по периоду свободных колебаний и декременту затухания, присущих последним при сейсмических воздействиях.

Приведенное сейсмическое ускорение представляет из себя максимальную величину сейсмической силы при данном землетрясении, отнесенную к единице сосредоточенной массы линейного осциллятора при заданном демпфировании. Так, например, если имеем линейный осциллятор с сосредоточенной массой m , периодом свободных колебаний T и коэффициентом внутреннего трения α (или сооружение с этими же параметрами), то для изменяющейся во времени сейсмической нагрузки получим

$$S = m \cdot \tau(T, \alpha, t), \quad (1)$$

где функция $\tau(T, \alpha, t)$ представляет собой спектр приведенных сейсмических ускорений*, являющийся мерой интенсивности землетрясения.

Спектр $\tau(T)$ связан с расчетными коэффициентами C_H и C_V [1] соотношением

* Сокращенно спектр $\tau(T)$.

$$\tau(T, x, t)_{\max} = K_c g \beta, \quad (2)$$

где K_c — коэффициент сейсмичности, являющийся ускорением колебания грунта в долях g ; β — коэффициент динамичности, зависящий от периода свободных колебаний сооружения.

Спектры $\tau(T)$, как указано в [4] в принципе возможно получить на основе инструментальных наблюдений следующими способами:

а) непосредственно с помощью многожгутиковых сейсмометров АИС-2, АИС-2П или АИС-2М, способных регистрировать сильные землетрясения, начиная с 3—4 баллов;

б) по записям акселерографов;

в) на основе обработки сейсмограмм.

По первому из перечисленных способов в настоящее время получено большое количество спектров $\tau(T)$ по данным регистрации многочисленных сильных и умеренной силы землетрясений и сейсмоземлетрясений [5, 6, 7, 8]. По второму способу спектры $\tau(T)$ или его модификации были получены американскими исследователями с помощью механического интегратора [2] или с помощью интегрирующей установки, действующей на принципах электро-механической аналогии [9]. Отечественными исследователями были разработаны метод получения спектральных кривых сейсмических нагрузок на основе приближенного почленного интегрирования дифференциальных уравнений колебаний сооружений при заданной закономерности ускорения колебания почвы с использованием полученных в США акселерограмм сильных и разрушительных землетрясений [10]; затем, точный метод численного интегрирования этих уравнений с помощью электронно-вычислительных машин на основе тех же американских акселерограмм [11]. Однако эти методы не получили широкого практического применения, поскольку исследователи не располагают выше акселерограммами землетрясений, происходящих в сейсмических районах нашей страны.

Третья возможность получения спектров $\tau(T)$ на основе обработки сейсмограмм пока является гипотетической, так как до настоящего времени не разработана методика использования сейсмограмм для этих целей с достаточной точностью, что связано с большими трудностями в решении дифференциальных уравнений колебания механических систем при заданном законе перемещения колебательного процесса почвы. Между тем на многочисленных стационарных и временных сейсмических станциях продолжает накапливаться огромное количество сейсмограмм землетрясений, и эта ценная инструментальная информация о закономерностях сейсмических колебаний почвы остается, к сожалению, недоступной для использования со стороны инженеров-антисейсмиков.

В 1956 г. С. В. Медведевым [12] был предложен метод определения так называемого спектра действия, по записям сейсмических станций (сейсмограмм, представляющего по сути дела спектр перемещения механической системы при сейсмическом воздействии. Спектр $\tau(T)$ связан с указанным спектром действия $\chi(T)$ соотношением

$$\tau(T) = \chi(T) \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2. \quad (3)$$

Однако метод определения спектра $\chi(T)$ также является приближенным и требует значительного объема вычислительных работ, так как в основе метода лежит графоаналитический способ обработки записи (способ фазовых плоскостей или векторных диаграмм), причем отрезки сейсмограмм с нестационарными колебаниями преобразуются в форму модулированных синусоид.

Нами при решении задач сейсмического микрорайонирования на инструментальной основе [13] была сделана попытка разработать более точный метод определения спектра приведенных сейсмических ускорений с использованием современной вычислительной техники.

Здание, в первом приближении, рассматривается как невесомый брус, заделанный одним концом в основании и несущий на другом конце сосредоточенный груз, т. е. как система с одной степенью свободы. Перемещение основания бруса $y_0(t)$ при землетрясении (сейсмограмма), период основного тона свободных колебаний бруса T и мера его затухания α задаются условием задачи. Требуется вычислить значение спектра приведенных сейсмических ускорений по формуле

$$\tau(T, \alpha, t) = p^2 y(t, \alpha) = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 y(t, \alpha), \quad (4)$$

где $y(t, \alpha)$ — перемещение бруса во времени при данной мере затухания;

T — период свободных колебаний бруса.

Функция $y(t, \alpha)$ определяется решением следующего дифференциального уравнения колебания системы с одной степенью свободы с учетом затухания по гипотезе Фохта [3]

$$y''(t) + 2n y'(t) + p^2 y(t) = -y_0(t), \quad (5)$$

где

$$n = \frac{\alpha p}{2}, \quad p = \frac{2\pi}{T}, \quad \delta = \alpha \cdot \pi. \quad (5')$$

Здесь α — коэффициент внутреннего трения, p — круговая частота колебания, δ — логарифмический декремент затухания.

Ставится задача решить уравнение (5) на электронно-вычислительной машине, минуя операцию двукратного дифференцирования функции перемещения грунта $y_0(t)$, поскольку дифференцирование графически заданной функции (сейсмограммы), в особенности быстро изменяющейся, приводит к большой погрешности.

Интегрируя дважды обе части уравнения (5), получим

$$y(t) + 2n \int_0^t y(t) dt + p^2 \int_0^t \int_0^t y(t) dt = -y_0(t). \quad (6)$$

Преобразуем третий член левой части уравнения (6), пользуясь формулой Коши. Согласно этой формуле [14]

$$\int_{x_0}^x dx \int_{x_0}^x dx \dots \int_{x_0}^x \varphi(x) dx = \frac{1}{(n-1)!} \int_{x_0}^x (x-z)^{n-1} \varphi(z) dz. \quad (7)$$

Уравнение (7) является решением дифференциального уравнения $y^{(n)} = \varphi(x)$, при начальных условиях

$$y = 0, y' = 0, \dots, y^{(n-1)} = 0, \text{ при } x = x_0.$$

В силу (5') и (7) уравнение (6) примет вид

$$y(t) + \frac{2\pi \cdot \alpha}{T} \int_0^t y(t) dt + \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \int_0^t (t-z) y(z) dz = -y_0(t). \quad (8)$$

Уравнение (8) является интегральным уравнением второго рода типа Вольтерры с известной правой частью, и в принципе возможно составить программу для его численного решения на электронно-вычислительной машине, при заданных значениях T и α , и представлении значений амплитуд перемещения почвы y_0 и соответствующих им малых отрезков времени Δt в виде таблиц. Получив из решения уравнения (8) значения $y(t, \alpha)$ для каждого значения $t = t_i$, определяем соответствующие значения $\tau(t_i, \alpha, T)$ по формуле (4) для ряда комбинаций значений T и α , представляющих практический интерес. Затем, выбирая максимальные значения $\tau(t_i, \alpha, T)$ для отдельных T , строим спектральную кривую $\tau_{\max}(T)$ при фиксированном значении α .

Таким образом создается возможность использовать сейсмограммы для определения меры интенсивности землетрясения — спектра $\tau(T, \alpha, t)$. Этот прием даст достаточно точные результаты для длинно-периодных колебаний почвы. С уменьшением периода колебаний почвы погрешность вычисления может возрасти.

Институт геофизики и инженерной сейсмологии

АН Армянской ССР

Поступило 20.V 1965.

Ս. Ա. ԳԻՐԻՉՅԱՆ

ԵՐԿՐԱՇՈՐԺՆԵՐԻ ՍԵՅՍՄՈԳՐԱԳՐԱՆԵՐԻ ԶԻՄՆԱ ՎԵՍՏՆԱԿՆ ԱՐՁԳԿԱՅՈՒԹՅՆԵՐԻ
ՈՊԵԿՏՐԻ ԲՐՈՇՈՒՄՆ ԽԵԹՈՒԹՅ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ն Վ

Ինժեներային սեյսմոլոգիայի և շինությունների սեյսմակայունության միջաբար հանդուստյան ինժեներները յուժեղու համար անհրաժեշտ է ունենալ երկրաշարժի ուժի գործիքային եղանակով գրանցված ինժեներային ցուցանիշներու Այդպիսի բավարար ցուցանիշ է հանդիսանում Ա. Գ. Կապարովի կողմից մշակված սեյսմիկ ուժերի ինժեներային անալիզի տեսության հիմքում ընկած բերված արագացումների սպեկտրը [3], որը ըստ գործող նորմաների պիտու է

շինությունների սեյսմակայունության հաշվարկումների հիմքում [1]. նշված սպեկտրի ստացման մինչ այժմ գոյություն ունեցող մեթոդները [1—12] հնարավորություն չեն տալիս այդ նպատակի համար բավարար ճշտությամբ օգտագործելու բազմաթիվ սեյսմիկ կայաններում կուտակված հեղաշարժային քանակի սեյսմոգրամները, այդ թվում թույլ երկրաշարժների սեյսմոգրամները:

Շեղինակը փորձ է արել մշակելու բերված արագացումների սպեկտրի սրոշման ճշգրիտ մեթոդ՝ երկրաշարժի ժամանակ գեանահաղի ակզափոխման գրանցումների (սեյսմոգրամների) հիման վրա օդտագործելով ժամանակակից էլեկտրոնային հաշվողական սխեմիկան:

Բերված արագացումների $\tau(T)$ սպեկտրը կարելի է հաշվել (A) բանաձևով, յուրաքանչյուր սրոշակի շների համար, ըստ նրա տատանման սեփական T պարբերության: Բանաձևի մեջ մտնող $y(t, z)$ ֆունկցիան սրոշվում է մեկ սպատություն աստիճան ունեցող սխեմիկ տատանման հաճախարման լուծելու ճանապարհով: Հալասարումն իր վերջնական տեսքով (S) ներկայացնում է Վոլտերրի տիպի երկրորդ տեսակի ինտեգրալ հալասարում, որն ունի լուծման կլասիկ մեթոդներ [15]: էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի օգնությամբ հալասարումը կարելի է լուծել անհրաժեշտ ճշտությամբ՝ սխեմիկ տատանումների ժամանակ սեփական պարբերության տրված մեծությունների դեպքում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Строительные нормы и правила. Часть II, раздел А, глава 12. Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. СНиП II—А. 14—62 М., 1963.
2. *Bain* M. A. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 31 № 2, 1941.
3. *Назаров А. Г.* Метод инженерного анализа сейсмических сна. Ереван, 1959.
4. *Назаров А. Г., Карапетян Б. К., Пирูзян С. А.* Сейсмическое микрорайонирование на инструментальной основе. ДАН АрмССР, № 3, 1961.
5. *Пирูзян С. А.* Фиксация землетрясения 14 февраля 1957 г. в г. Ереване многомаятниковыми сейсмометрами АИС—2. Известия АН Армянской ССР, серия ТН, № 5, 1958.
6. *Карапетян Б. К., Пирูзян С. А.* Изучение сейсмозрывных колебаний в тоннеле Армаволостроя на Лусаванском карьере. Тр. АН СМ-а, вып. 1. Ереван, 1959.
7. *Шагинян С. А.* Приведенные сейсмические ускорения при землетрясениях. Бюллетень Совета по сейсмологии № 14. М., 1963.
8. *Карапетян Б. К.* Многомаятниковые сейсмометры и результаты их применения в инженерной сейсмологии. Ереван, 1963.
9. *Hausner G. W. and Mc Cann G. D.* The Analysis of Strong-Motion Earthquake Records with the Electric Analog Computer. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 39, № 1, 1949.
10. *Корф М. Г.* Применение материалов сейсмометрии к расчетам сооружений на сейсмические воздействия. Тр. Ин-та физики Земли АН СССР, № 10 (177), М., 1960.
11. *Хачян М. Г.* Использование вычислительных машин для определения сейсмической нагрузки по акселерограммам сильных землетрясений. Бюл. Совета по сейсмологии, № 14. М., 1963.
12. *Меоведев С. В.* Записимость сейсмических воздействий от периодов собственных колебаний сооружений. Тр. геофизического Института № 36 (136), М., 1956.
13. *Пирúзян С. А.* О сейсмическом микрорайонировании на основе инструментальных наблюдений. Известия АН Армянской ССР, серия ТН, т. XV, № 4, 1962.
14. *Степанов В. В.* Курс дифференциальных уравнений. Л., 1950.