



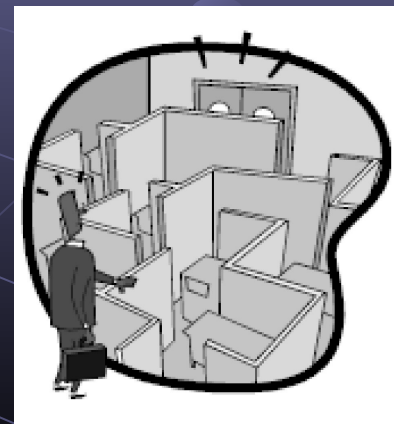
А.В. Перельмутер
Э.З. Криксунов

**Применение SCAD Office для расчета
сооружений сложной
геометрической формы на
сейсмические воздействия
(нормы и опыт расчетов)**

СХЕМА ИЗЛОЖЕНИЯ

Проблема сейсмического расчета ставит множество вопросов среди которых довольно легко заблудиться. В качестве путеводной нити в этом лабиринте используется следующая схема изложения:

1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ SCAD OFFICE
2. О НИЖНЕЙ ГРАНИЦЕ СЕЙСМИЧНОСТИ
3. ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СООРУЖЕНИЯ
4. РАСЧЕТ ПО СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ
5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НА СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ
6. РЕДАКТИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ
7. НАПРАВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
8. РАСЧЕТ ПО АКСЕЛЕРОГРАММАМ
9. УРАВНОВЕШИВАНИЕ АКСЕЛЕРОГРАММ
10. ЭФФЕКТ «ПИ – ДЕЛЬТА»
11. СПЕКТРЫ ОТВЕТА
12. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ



1. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ SCAD OFFICE

Программная система SCAD Office предоставляет широкие возможности для выполнения сейсмических расчетов:

- отыскание собственных частот и форм колебаний с обеспечением необходимого процента модальных масс;
- спектральный расчет по нормам различных стран;
- редактирование графиков коэффициента динамичности;
- расчет по задаваемым акселерограммам;
- построение спектров ответа;
- уравнивание акселерограмм



В докладе мы хотим не только прокомментировать особенности SCAD, но и указать на те сложности, которые возникают в машинном сейсмическом расчете в связи с различиями подходов машинного счета по универсальной программе и формулировками норм, во многом ориентированным на ручные вычисления.

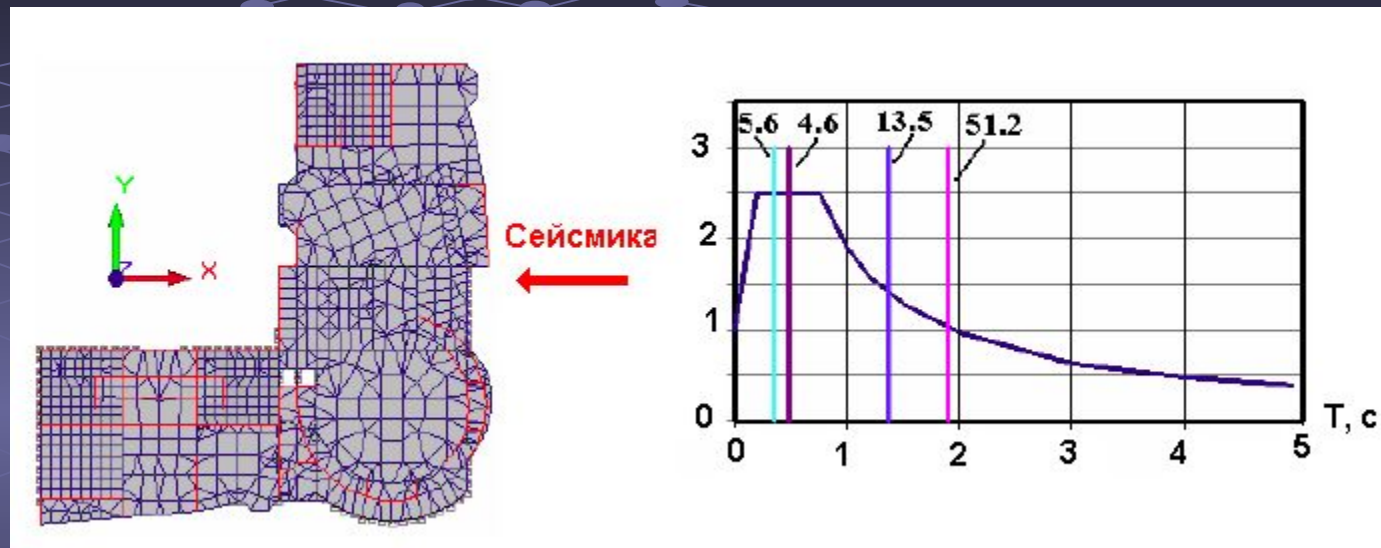
2. НИЖНЯЯ ГРАНИЦА СЕЙСМИЧНОСТИ

Действующими нормами предусмотрено, что проверяются только здания и сооружения, расположенные на площадках с сейсмичностью 7 баллов и выше.

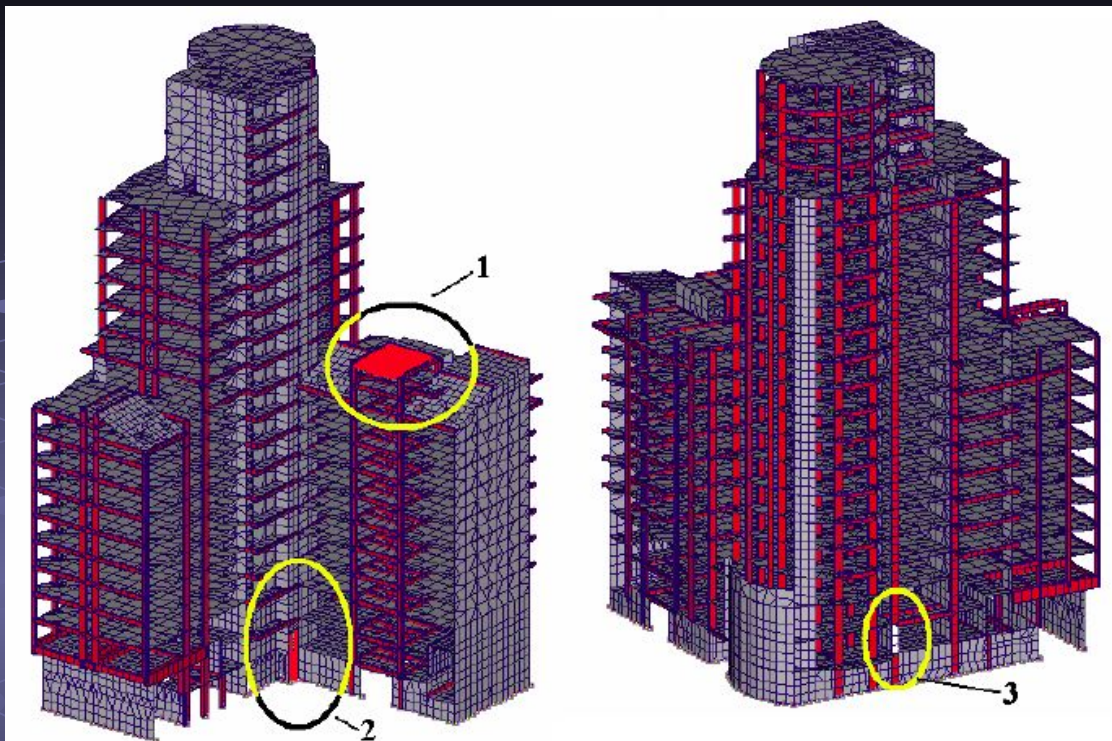
Предположение, что на площадках с меньшей сейсмичностью никакие меры обеспечения сейсмостойкости не нужны, обосновано лишь анализом поведения зданий обычной конструкции и относительно небольшой этажности. Переход к рассмотрению зданий повышенной этажности со сложной конструктивной схемой заставил пересмотреть это положение.

Еврокод-8, Московские городские нормы МГСН 4.19-05 и проект ДБН располагают уже нижнюю границу своих требований на площадки с сейсмичностью 6 баллов.

В связи с этим был предпринят ряд расчетов некоторых зданий современной постройки в г. Киеве.



Сознательно взято здание «не сейсмостойкой формы», поскольку имеются многочисленные примеры увеличения уровня сейсмичности уже застроенных территорий, например, вследствие техногенных влияний. Кроме того, проект ДБН также предусматривает увеличение сейсмичности некоторых территорий.



По сравнению с расчетом, не учитывающим сейсмическое воздействие, расчетные усилия в некоторых несущих элементах возросли на 15% при сейсмичности 5 баллов и на 40% при 6 баллах.

Напряжения, т/м²

Элемент	Сейсмика	Постоянные	Ветровая
Покрытие (1)	3540	2491	390
Стена (2)	808	715	177
Колонна (3)	776	637	167

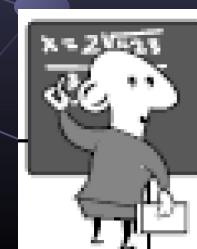
Таким образом, было показано, что имеется проблема расчета зданий «несеismicкой» конфигурации на сейсмические воздействия, при этом многие рекомендации действующих норм на применение в таких условиях ориентированы не в полной мере.

В частности, требуют критического анализа рекомендации по выбору :

- динамических расчетных моделей сооружений;
- значений коэффициентов редукации, с помощью которых учитывается возможное снижение расчетных нагрузок при допущении тех или иных повреждений конструкции;
- учету неоднородности поля ускорений под основанием сооружения

и др.

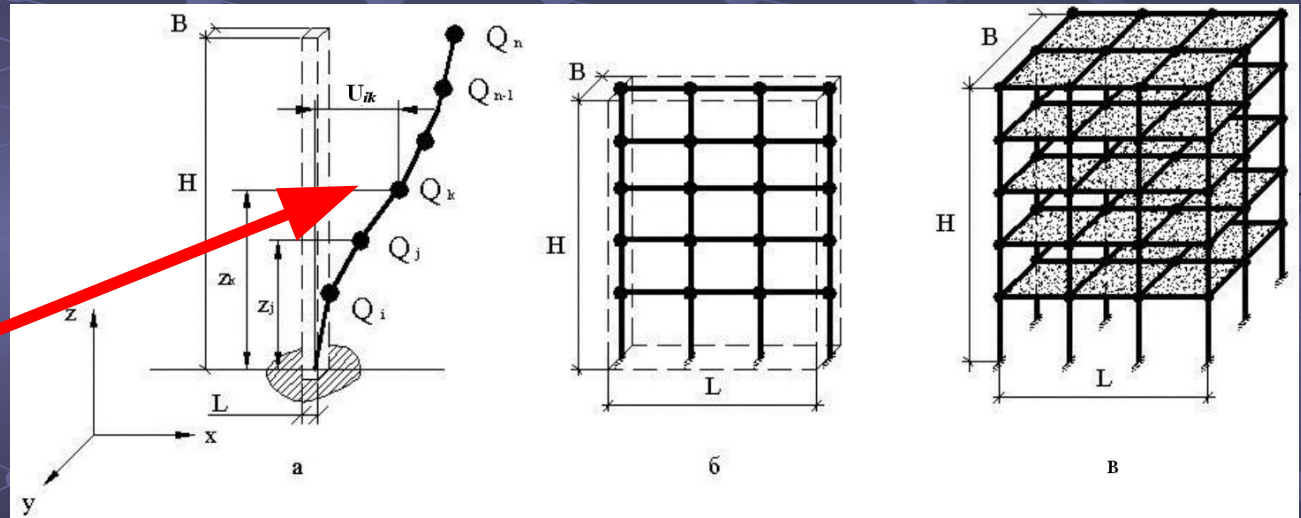
Все это требует проведения специальных исследований



3. ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СООРУЖЕНИЯ

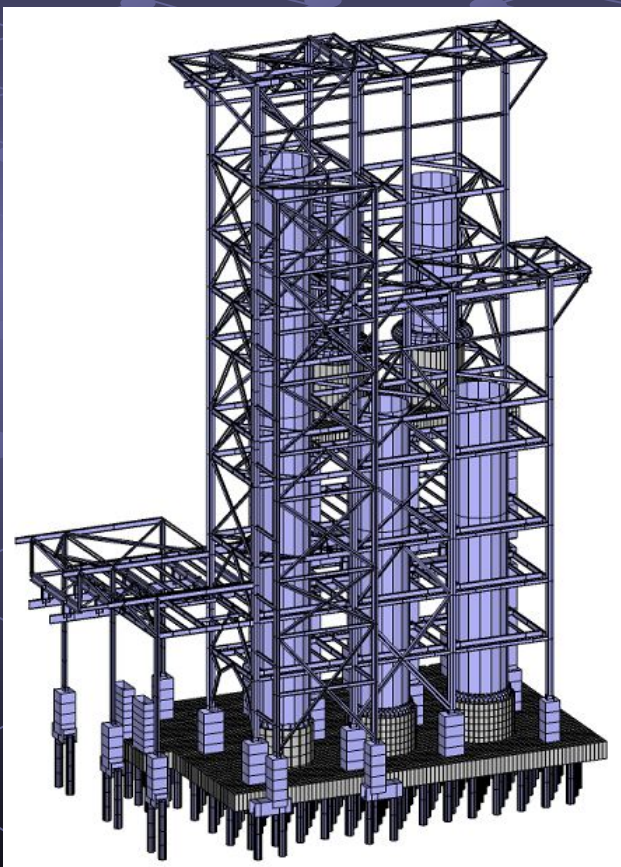
В отличие от СНиП, рекомендации проекта ДБН ориентируют не только на расчетную схему в виде невесомого упруго деформируемого консольного стержня.

Но и здесь еще сохранилась инерция ориентации на ручные методы расчета.



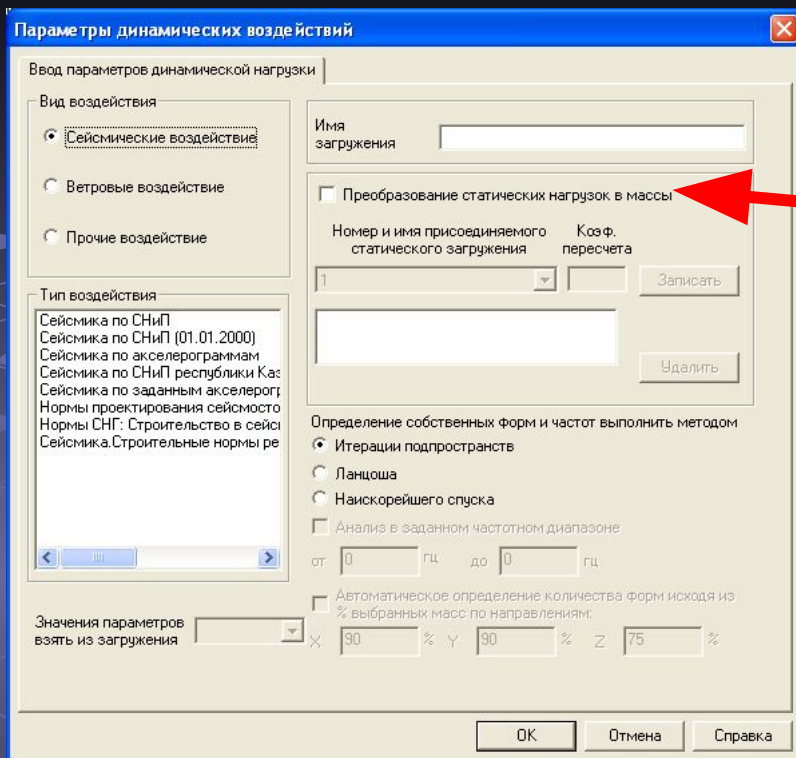
Машинные расчеты выполняются по пространственным схемам с сосредоточенными и распределенными массами (последние приводятся к узловым в рамках МКЭ) и проблема состоит в том, что многие положения норм все же тяготеют к консольной расчетной модели.

Практически все формулировки норм ориентированы на регулярное многоэтажное здание, где используются понятия «этаж», «центр жесткости» и т.п.



НИГДЕ НЕ ОПРЕДЕЛЕНО ТОЧНОЕ И В ДОСТАТОЧНОЙ МЕРЕ УНИВЕРСАЛЬНОЕ ПОНЯТИЕ ЦЕНТРА ЖЕСТКОСТИ.

Вот довольно типичный пример объекта, где начинаются затруднения. Кстати, объекты такого рода не попадают и под действие рекомендаций по конструированию, которые приведены в нормах.

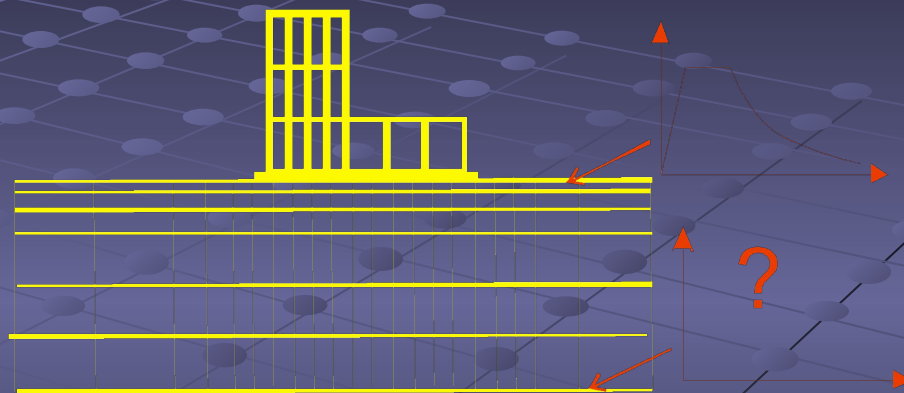


При построении динамических расчетных моделей большое значение имеет способ задания инерционных характеристик. Имеется возможность использовать для этой цели статические загрузки, которые уже содержали в себе данные о нагрузках от собственного веса сооружения и расположенного на нем оборудования, материалах и т.п.

Важно, чтобы были учтены все элементы инерции, при этом следует помнить, что некоторые из них создаются временными нагрузками и, следовательно, необходимо выполнять несколько сейсмических расчетов с различными вариантами расположения масс.

При расчете сооружения совместно с основанием влияние податливости основания легко смоделировать путем включения в расчетную схему некоторой «области влияния».

Проблема состоит в том, что при использовании спектрального метода мы практически считаем, что колебания возбуждаются на границе этой области влияния, в том числе и на ее нижней границе, а все записи, на основании которых построен спектральный коэффициент динамичности относятся к уровню дневной поверхности.



Аналогичные вопросы возникают при расчете свайных оснований, когда сейсмическое возбуждение по сути переносится на уровень острия сваи.

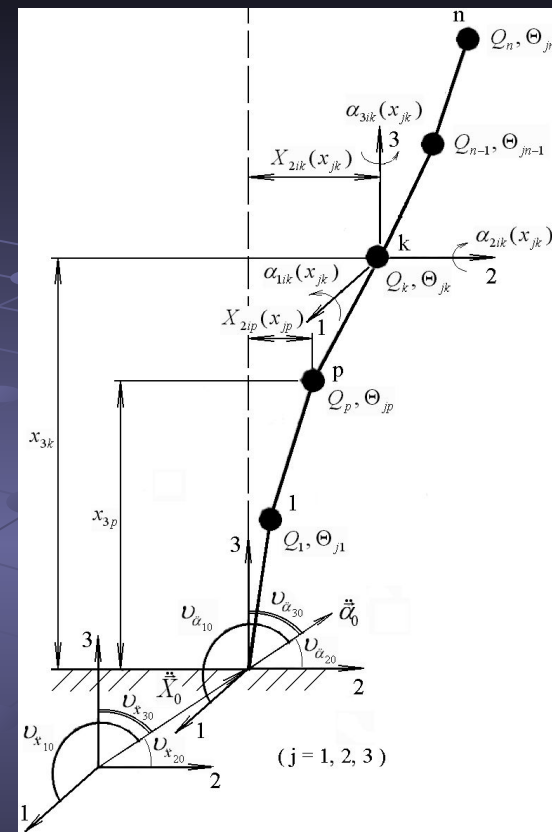
Для учета неравномерности поля ускорений и возникающей за счет этого крутильной компоненты в приложении Г к ДБН предлагается динамическая модель с диском, кручение которого связано с центральным осевым моментом инерции Θ . Она является корректной лишь в том случае, когда диск присоединен к вертикальным элементам жесткости только в одной точке (консольная схема).

Имеются существенные замечания:

1. При задании моментов инерции опущены недиагональные члены матрицы инерции. Остается не ясным:

- можно ли ими попросту пренебречь ?
- следует ли использовать только главные центральные оси инерции?

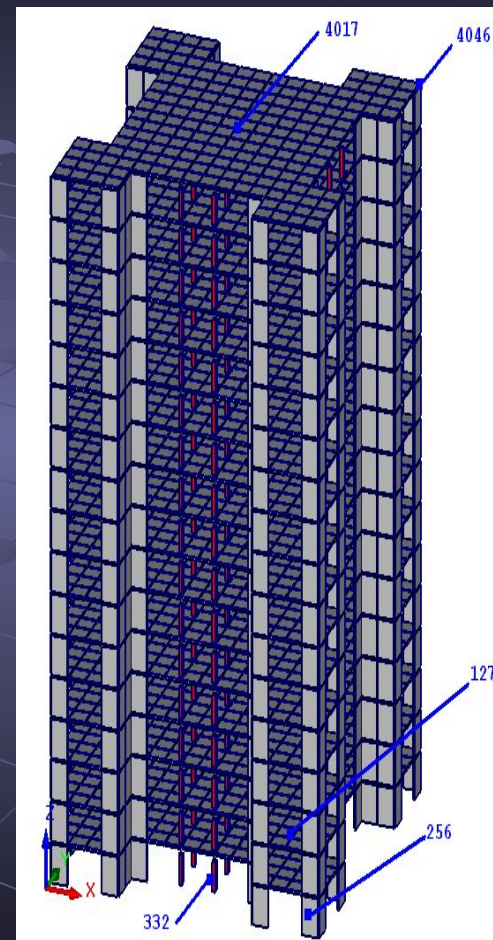
2. Не определена точка приведения векторов ускорения и ротации.



Вот результаты расчетов при разных способах задания вектора ротации:

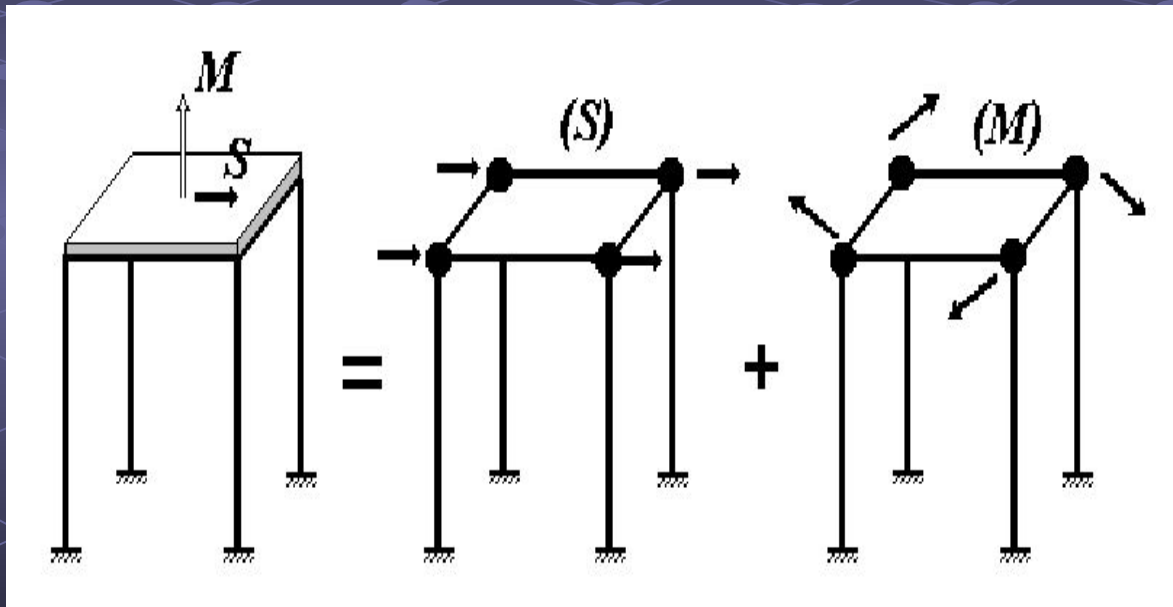
Вариант	X-4046	Y-4046	X-4017	Y-4017
Без ротации	216,2	17,1	216,3	17,0
Ротация Y	708,8	59,6	707,2	59,9
Ротация Z (центр)	582,5	471,3	343,6	28,9
Ротация Z (угол)	935,9	720,9	809,5	546,6

Если точку приведения отнести от здания или расположить на некоторой глубине (например на отметке низа свайного основания), то перемещения будут еще большими.



Требуется разработка детального пособия.

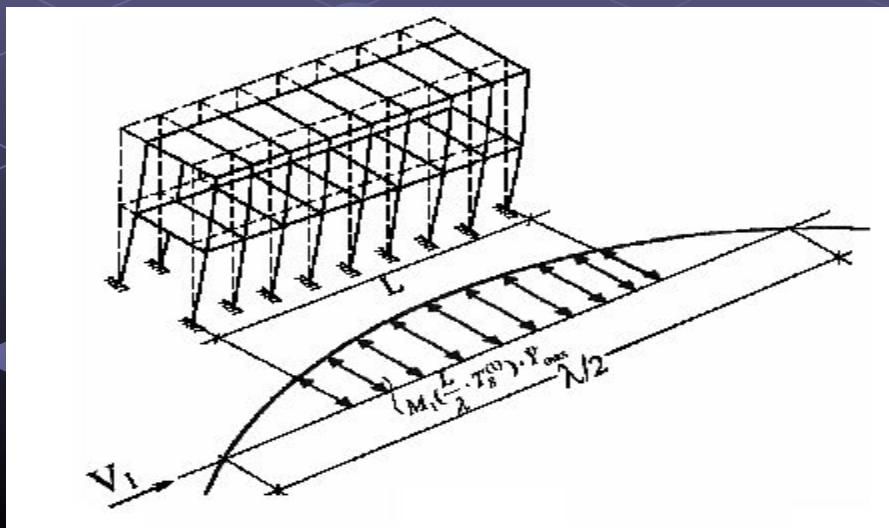
Что касается моментов инерции, то при детальном разбиении системы на конечные элементы приемлемая точность достигается при приведении инерционных характеристик только к узловым силам (инерционные моменты по сути заменяются парами сил, приложенными к узлам системы).



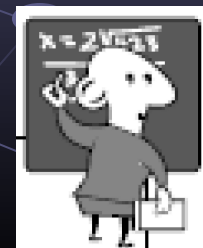
Фактически используется метод вычисления моментов инерции тел с помощью редуцирования площадей.

В программе SCAD не реализованы рекомендации приложения В из проекта ДБН, поскольку не очень ясно каковы ограничения на область применения этих рекомендаций. Кроме того не ясны некоторые формулировки этого приложения:

- что такое направление вдоль здания и поперек здания, как их определить для объектов непрямоугольной формы в плане;
- от какого места отсчитываются координаты точек приведения масс x_k и y_k ;
- как определяется направление движения сейсмической волны

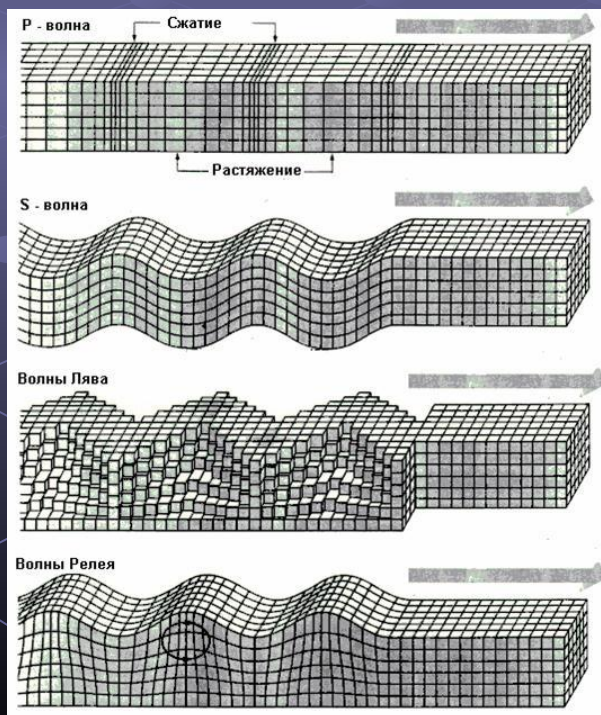


Как и в случае приложения Г здесь требуется разработка детального пособия.



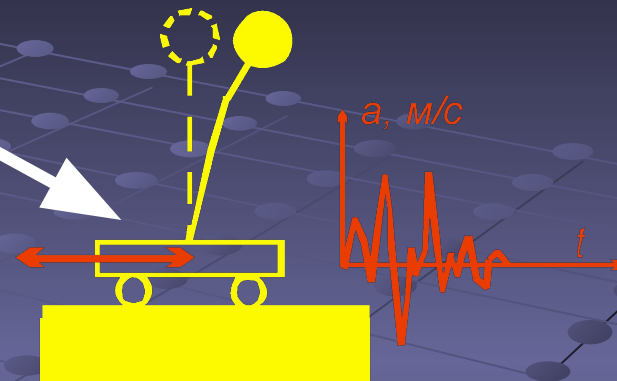
4. РАСЧЕТ ПО СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ

То, что обычно называют сейсмической нагрузкой, нагрузкой в строгом смысле этого слова не является. Сооружение подвергается воздействию колебательных движений основания, которое возбуждают пришедшие из очага землетрясения сейсмические волны.

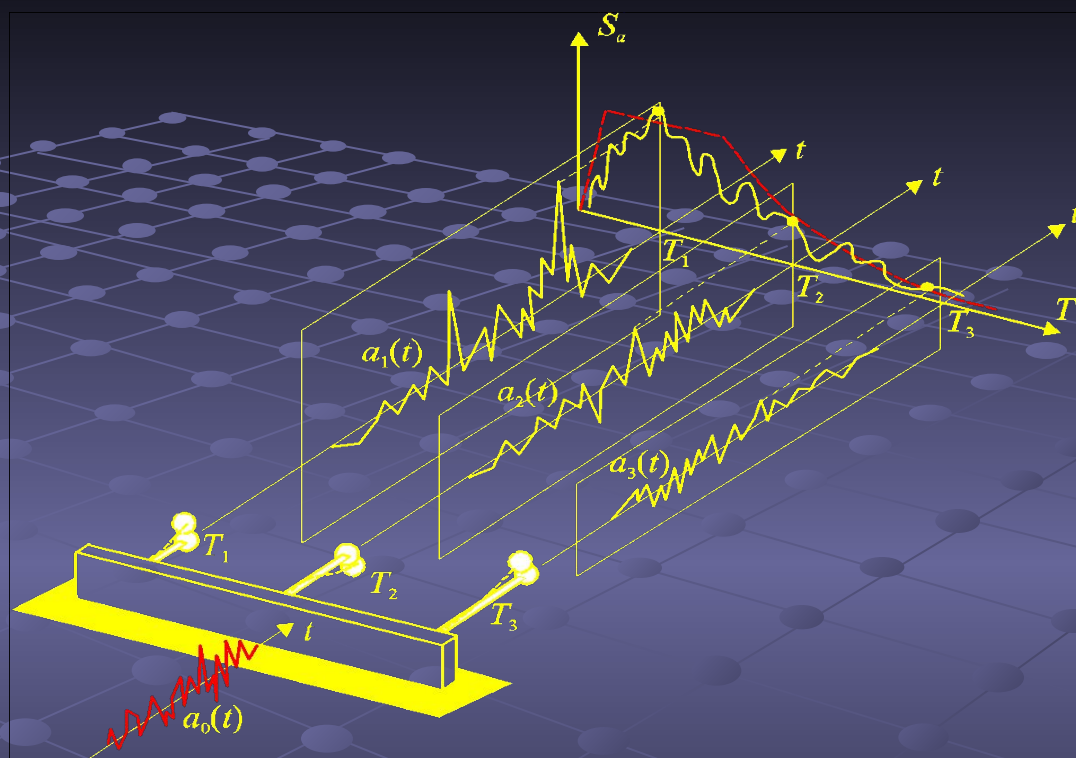


При движении сооружения, вызванном кинематическим возбуждением, возникают инерционные силы, которые и принято называть сейсмическими нагрузками.

Предполагается, что кинематическое возбуждение связано с движением того абсолютно жесткого тела («земля» расчетной схемы), к которому прикреплено своими опорными устройствами сооружение.



Это означает, что движутся все связи расчетной модели, в том числе и те, которые могли быть введены для парирования изменчивости или для выделения некоторой подсистемы из общей схемы. Здесь следует проявлять особую осторожность, чтобы не оказаться в плену ложных эффектов.



В основе линейно-спектральной теории лежит анализ реакции простых осцилляторов на сейсмическое воздействие, который представлен в форме огибающей экстремальных значений для каждого осциллятора.

Такой подход дает возможность использовать разложение движения по формам собственных колебаний и каждая такая форма (простой осциллятор) определяет инерционные силы (сейсмическую нагрузку), определяемую как

$$S_{kp} = k_{k1} k_2 Q_k A_k \beta_i$$

Различия в нормативных документах разных стран связаны с определением спектрального коэффициента динамичности β_i и системы поправочных коэффициентов k_{kp}, k_2, k

Основные расчетные проблемы связаны с определением коэффициента формы

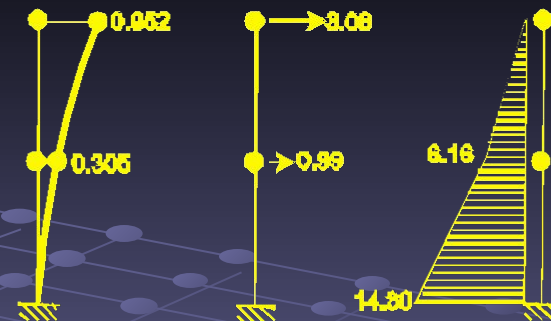
$$\eta_{ki} = \frac{X_i(z_k) \sum_{j=1}^n Q_j X_i(z_j)}{\sum_{j=1}^n Q_j X_j^2(z_j)}$$

При разложении по формам собственных колебаний суммирование вкладов каждой формы выполняется по правилу «корень из суммы квадратов».

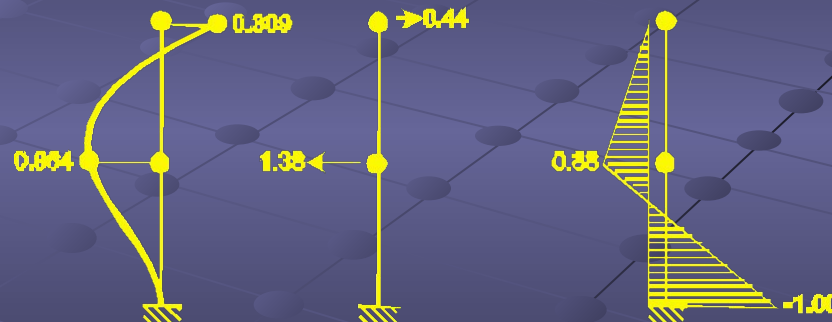
$$X_k = \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ki} S_{ki})^2}$$

Следовательно теряются знаки отдельных компонент и нет соответствия между перемещениями и внутренними силами.

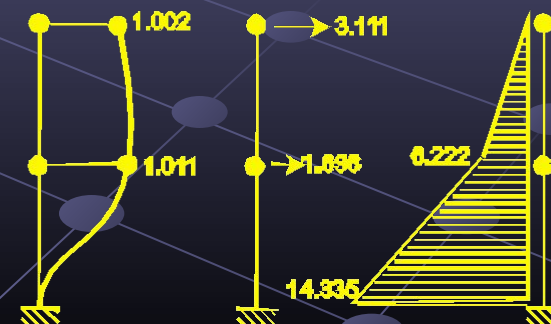
1-я форма (3.575 1/сек)

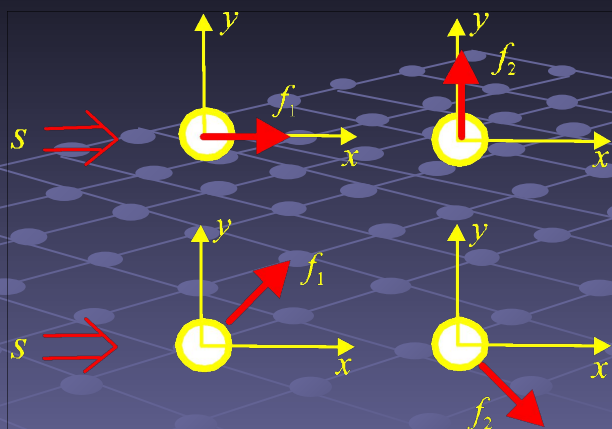


2-я форма (23.787 1/сек)



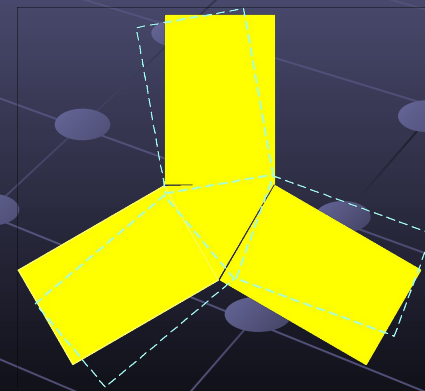
Суммарные значения





Часто возникают проблемы, связанные с наличием кратных форм, которые порождаются правилом суммирования модальных откликов «корень из суммы квадратов» и произволом в выборе пространственного положения кратных собственных векторов

Определенные затруднения могут быть связаны с наличием вращательных форм собственных колебаний. Для некоторых объемно-планировочных решений эти формы оказываются связанными с низшими частотами.



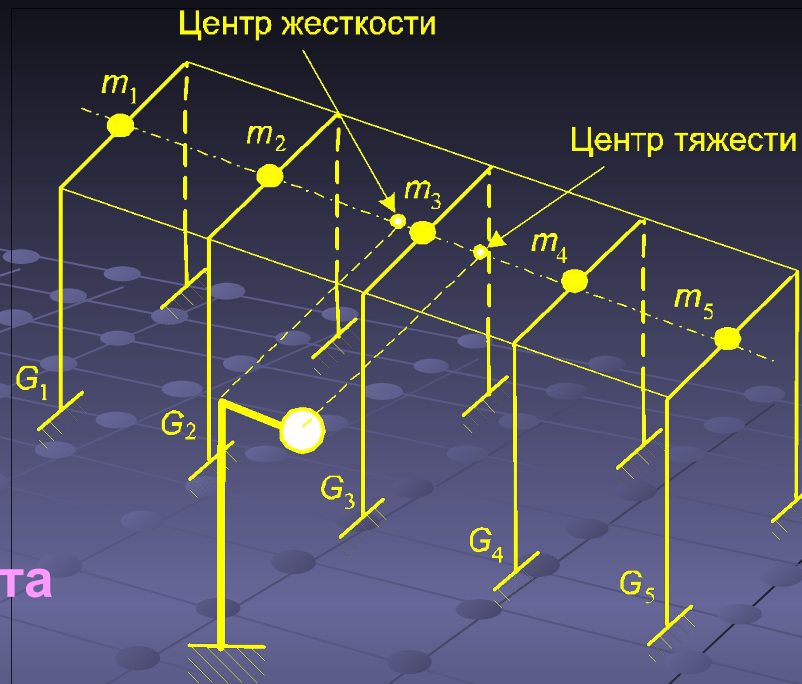
Если вести расчет по СНиП, то вращательное движение не возбуждается. Для его учета Нормы предусматривают прием введения искусственного эксцентриситета в картину распределения масс.

В программе SCAD такого же эффекта можно добиться, если на одной половине схемы принимать нагрузки от собственного веса с коэффициентом надежности

$$\gamma_f = 1 + \Delta$$

а на другой половине – с коэффициентом

$$\gamma_f = 1 - \Delta$$



В программе SCAD
спектральный метод
представлен
полностью

Реализовано несколько
вариантов расчета,
соответствующих
различным
нормативным
документам

Параметры динамических воздействий

Ввод параметров динамической нагрузки

Вид воздействия

Сейсмические воздействие

Ветровые воздействие

Прочие воздействие

Тип воздействия

Сеймика по СНиП
Сеймика по СНиП (01.01.2000)
Сеймика по акселерограммам
Сеймика по СНиП республики Каз
Сеймика по заданным акселерогр
Нормы проектирования сейсмосто
Нормы СНГ: Строительство в сейс
Сеймика.Строительные нормы ре

Имя загрузки

Преобразование статических нагрузок в массы

Номер и имя присоединяемого статического нагружения

Коеф. пересчета

1 1

Записать

Удалить

Определение собственных форм и частот выполнить методом

Итерации подпространств

Ланцоша

Наискорейшего спуска

Анализ в заданном частотном диапазоне

от 0 гц до 0 гц

Автоматическое определение количества форм исходя из % выбранных масс по направлениям:

X 0 % Y 90 % Z 75 %

Значения параметров взять из загрузки

OK Отмена Справка

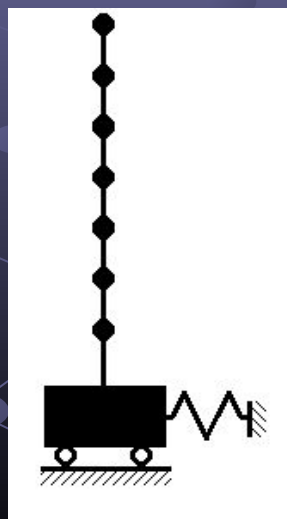
Имеется возможность удержать необходимое число форм,
обеспечить заданный процент выбранных масс

5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НА СОБСТВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

Для определения частот и форм собственных колебаний используется блочный алгоритм Ланцоша со сдвигами.

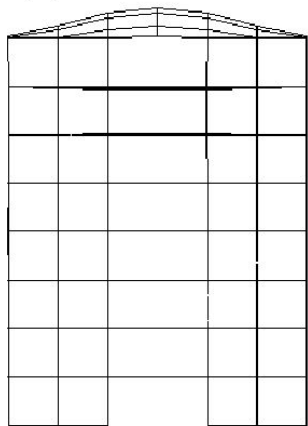
Реализованный в SCAD алгоритм оснащен механизмом подсчета процента учтенной модальной массы.

i	T , сек	Об- общ. масса	Учтено, %
1	1,273	11,706	11,7
2	0,431	1,660	13,4
3	0,242	0,613	Для опреде ления частот и форм собств енных колеба ний

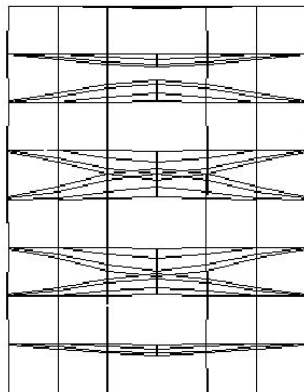


Для каждой учитываемой формы собственных колебаний коэффициент вклада равен работе сил инерции на перемещениях переносного движения системы. Если учесть все формы, то сумма коэффициентов вклада будет равна единице, при удержании части форм подсчитывается процент выбранных масс

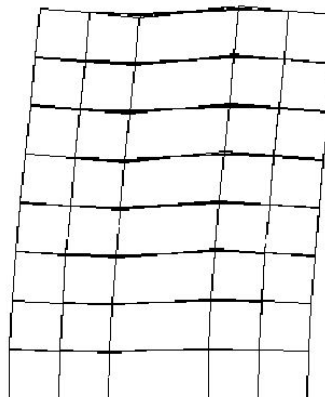
1-я форма



2-я форма

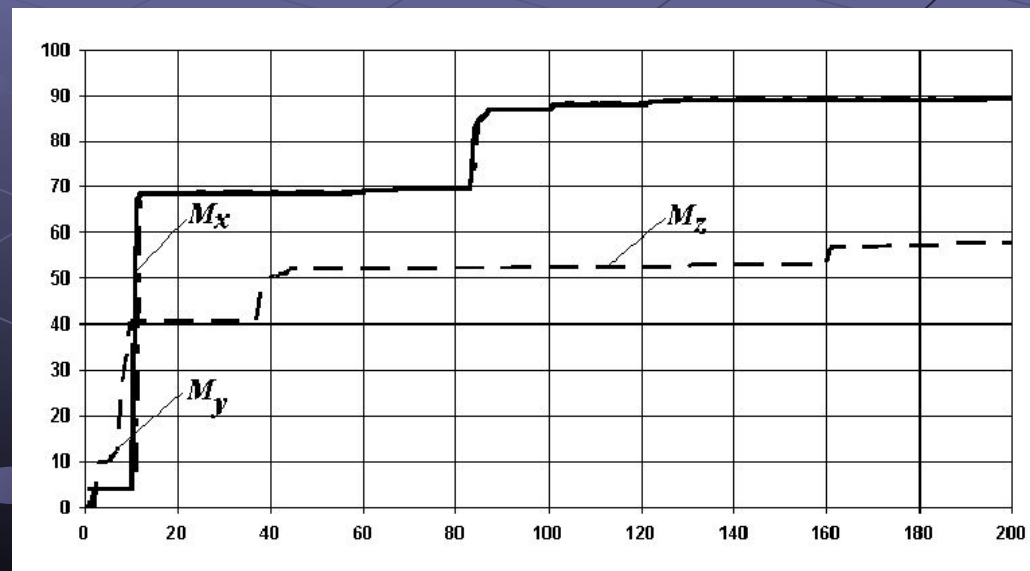


10-я форма

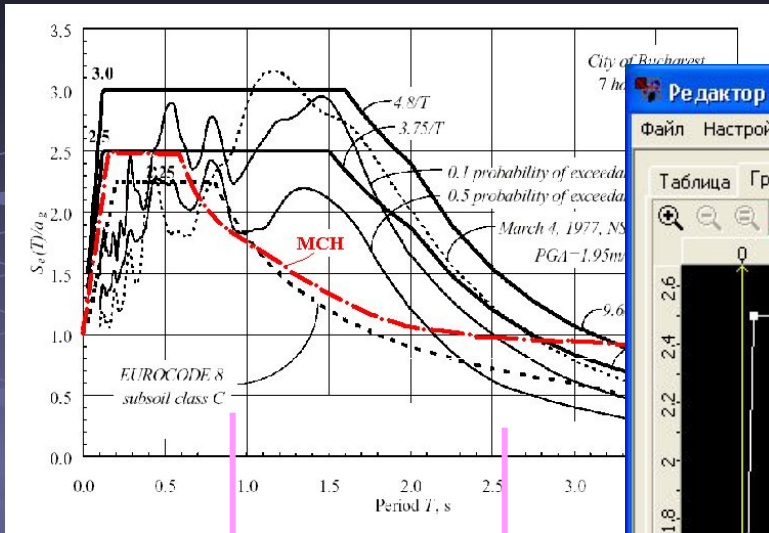


Первые 6-7
собственных форм
не влияют на
решение

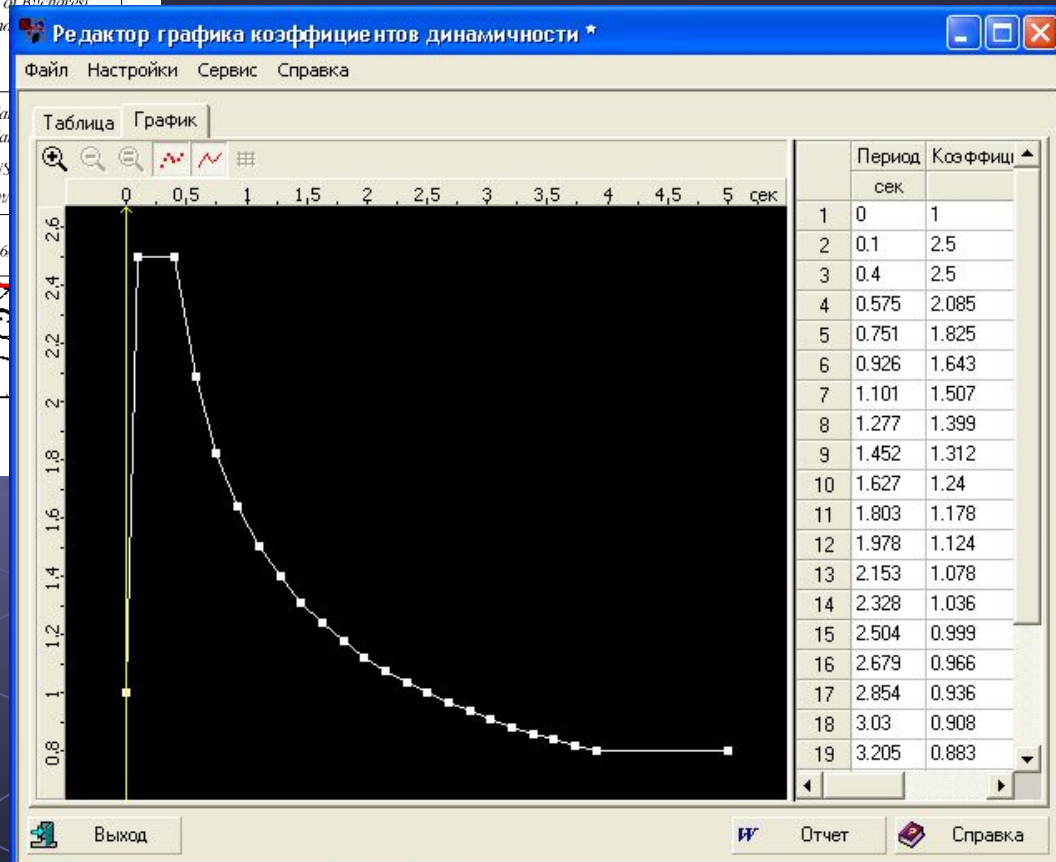
Характер возрастания
процента модальных масс
является немонотонным.
Это справедливо для
большинства задач со
сложной конструктивной
схемой.



6. РЕДАКТИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧНОСТИ



Здания
12-16 этажей



Нормы различных стран отличаются зависимостью спектрального коэффициента динамичности. Для большей гибкости система SCAD предусматривает возможность его редактирования.

7. НАПРАВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Программа SCAD дает возможность указать произвольное направление сейсмического воздействия. Но с точки зрения согласования с нормами здесь имеются проблемы.

Параметры динамических воздействий

Ввод параметров динамической нагрузки | Сейсмические нормы Республики Армения

Число учитываемых форм собственных колебаний

Направление нагрузки

Косинусы направлений по осями:

X	<input type="text"/>
Y	<input type="text"/>
Z	<input type="text"/>

Поправочный коэффициент

Поправочный множитель к A для вертикального направления

Категория грунта

Коэффициент грунтовых условий (табл 1.3)

Коэффициент учитывающий допустимые повреждения конструкций (табл. 2.4)

Коэффициент ответственности сооружений (табл 2.5)

Коэффициент сейсмичности (п. 2.9)

OK Отмена Справка

Много вопросов вызывают нормативные требования по учету вертикальной составляющей сейсмического воздействия. В одних местах декларируется, что это воздействие может иметь произвольное направление, в других указываются случаи, когда следует учитывать вертикальную компоненту.

При этом из пп. 2.6 и 2.11 проекта ДБН не ясно, идет ли речь о вертикальной составляющей (п.2.6) или вертикальной сейсмической нагрузке (п.2.11).

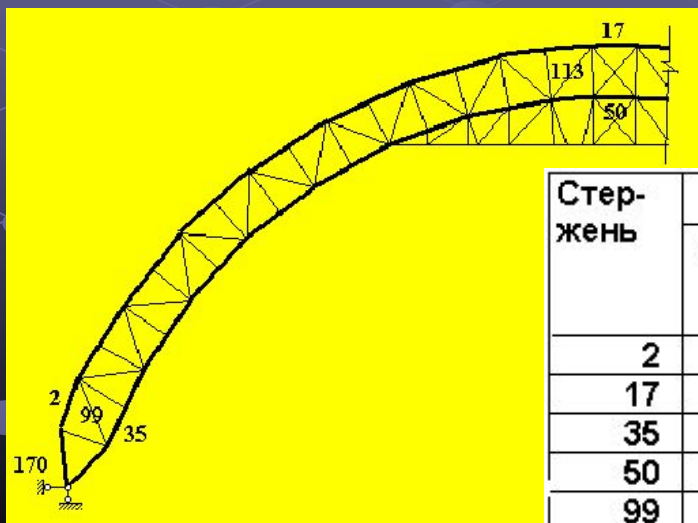
При первой трактовке вертикальные компоненты сейсмической нагрузки отбрасываются, если только речь не идет о конструкциях, перечисленных в п.2.6.

Вторая трактовка приводит к необходимости рассматривать вертикальное направление вектора сейсмического движения и требует, чтобы в формуле (2.3) присутствовали направляющие косинусы этого вектора.

Формулировка п.2.11, может интерпретироваться как:

- нужна проверка на действие комбинации нагрузжений S_x и S_z (последнее с учетом множителя 0,7 к коэффициенту A);
- при совместном действии S_x и S_z последние берутся с коэффициентом 0,5;
- следует рассматривать направление сейсмического воздействия под углом 27° к горизонту, когда направляющие косинусы относятся как 1,0 к 0,5.

SCAD Office в сейсмических расчетах



Стержень	Усилия, полученные как:					Коэффициент вариации
	$S_x+0,7S_z/2$	$S_x+0,7S_z/2$ по формам	$S_x+S_z/2$	$S_x+S_z/2$ по формам	Под углом 27°	
2	43,58	44,11	51,36	57,54	43,25	0,244
17	45,11	80,27	62,14	114,26	32,52	0,808
35	155,90	142,54	174,73	168,45	176,29	0,156
50	8,02	13,66	10,96	19,54	7,87	0,728
99	66,47	59,45	72,57	66,16	82,24	0,163
113	37,42	35,93	38,05	35,99	56,91	0,201
170	86,66	80,28	97,98	96,75	95,23	0,161

8. РАСЧЕТ ПО АКСЕЛЕРОГРАММАМ

Прямой динамический расчет, обязательный для самых ответственных сооружений, однако в нормах он практически не подкреплен конкретными рекомендациями относительно:

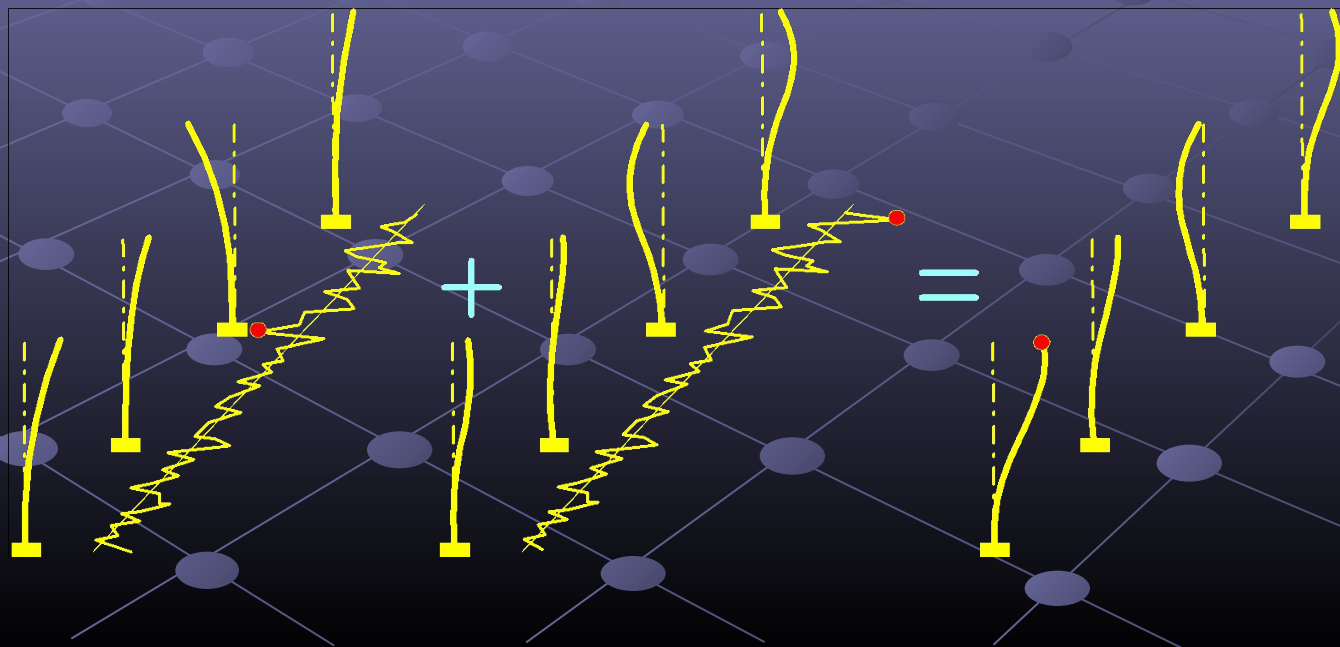
- числа используемых акселерограмм (Еврокод-8 называет 5),
- способа обработки результатов (средние значения усилий, средние плюс стандарт, 70%-ная обеспеченность или что-либо другое);
- необходимости учета нелинейной стадии работы или возможности использования коэффициента редукции k_1 ;
- правил комбинирования результатов расчета, соответствующих различным направлениям сейсмического воздействия.

Необходима разработка специального пособия, где найдут себе место ответы на эти и другие вопросы.



Возможны два метода интегрирования уравнений движения - разложения по формам собственных колебаний или шаговое интегрирование (Рунге-Кутта, Вильсон и др.).

В программе SCAD пока реализован первый метод, второй на этапе отладки. Здесь SCAD не использует сомнительный способ получения расчетных усилий в виде корня из суммы квадратов экстремумов, реализующихся на каждой форме в разные моменты времени.

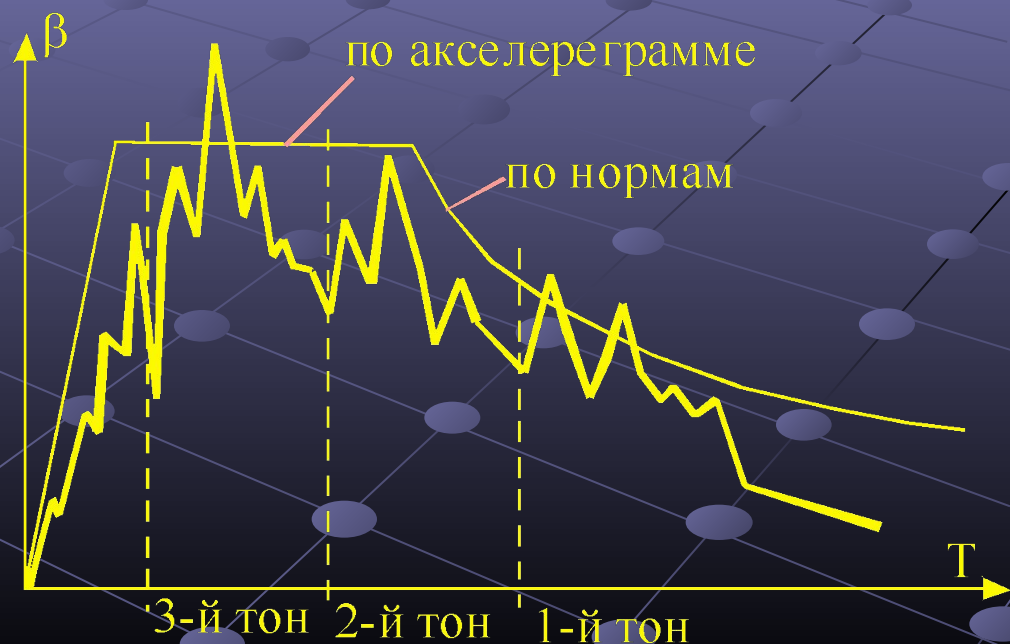


Мы выполняем суммирование модальных движений, что обеспечит совпадение результатов по двум упомянутым выше методам решения.

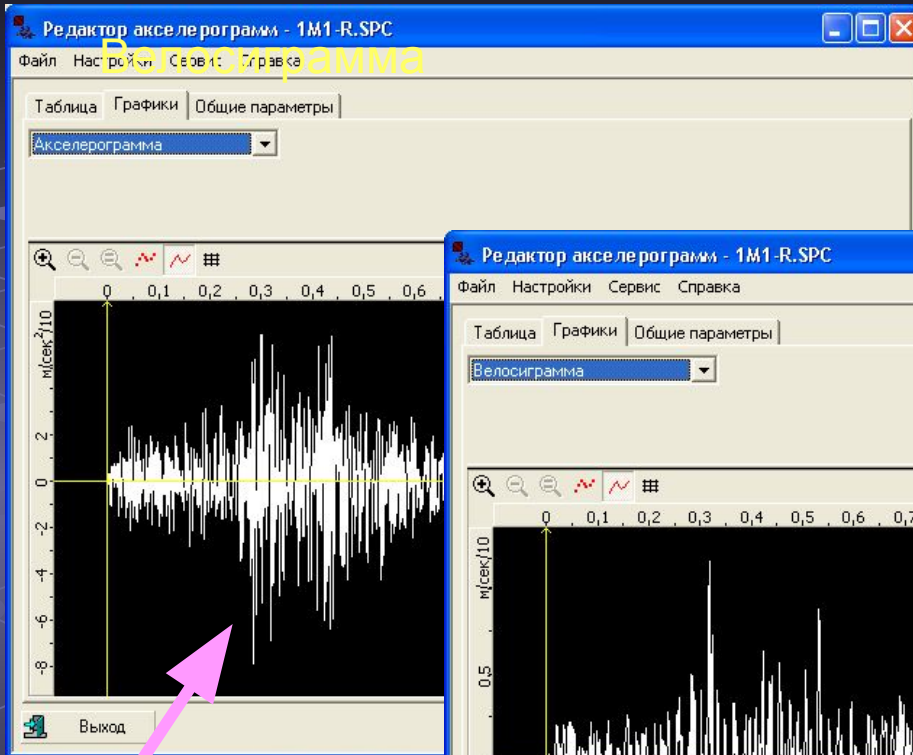
При интегрировании уравнений движения мы чаще всего получаем значения параметров НДС намного выше, чем при расчете по нормам. Это связано с тем, что :

- нормативный спектральный коэффициент динамичности норм соответствует среднему значению из нескольких акселерограмм;
- в нормах используется коэффициент редукции, косвенно учитывающий неупругую работу сооружения.

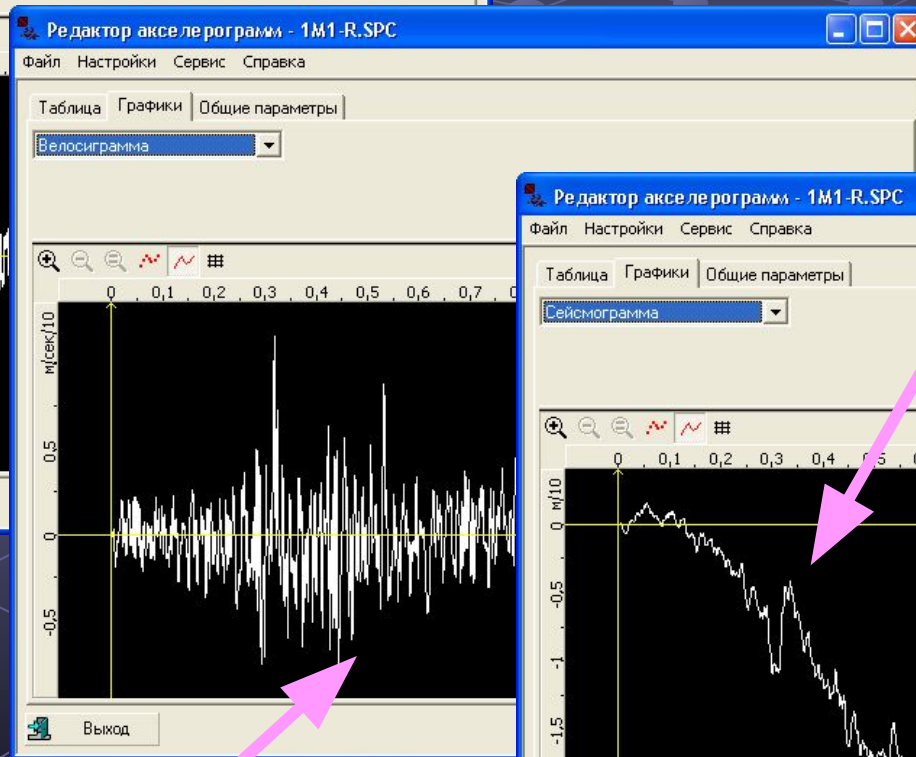
Можно рекомендовать построение спектра, соответствующего заданной акселерограмме и дальнейший расчет по нормам, но с использованием этого спектра вместо спектрального коэффициента динамичности из норм.



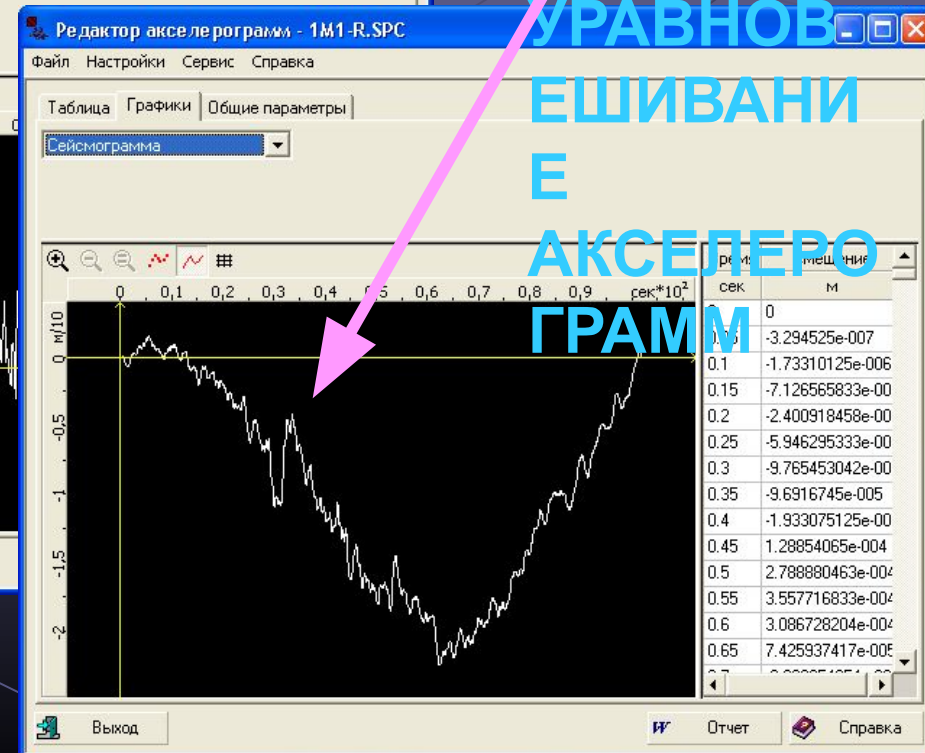
9. УРАВНОВЕШИВАНИЕ АКСЕЛЕРОГРАММ



Акселерограмма



Велосигграмма



9.
УРАВНОВЕШИВАНИЕ
АКСЕЛЕРОГРАММ

Из-за ошибок оцифровки, неполноты инструментальной записи и по ряду других причин акселерограмма может оказаться неуравновешенной, например, в конце процесса скорость окажется не равной нулю. Редактор акселерограмм позволяет устранить этот дефект.

Редактор акселерограмм - Turkey.spc

Файл Настройки Сервис Справка

Таблица | Графики | Общие параметры

Максимальное ускорение $-6.1594047 \text{ м/сек}^2$ достигается в момент времени

Максимальная скорость -0.743 м/сек достигается в момент времени 6.32 с

Максимальное перемещение -0.387 м достигается в момент времени 7.29 с

Отношение максимальной скорости к максимальному ускорению 0.121 сек

Среднеквадратичное ускорение $1.2183026 \text{ м/сек}^2$

Среднеквадратичная скорость 0.187 м/сек

Среднеквадратичное перемещение 0.143 м

Выход

Редактор акселерограмм - Turkey.spc

Файл Настройки Сервис Справка

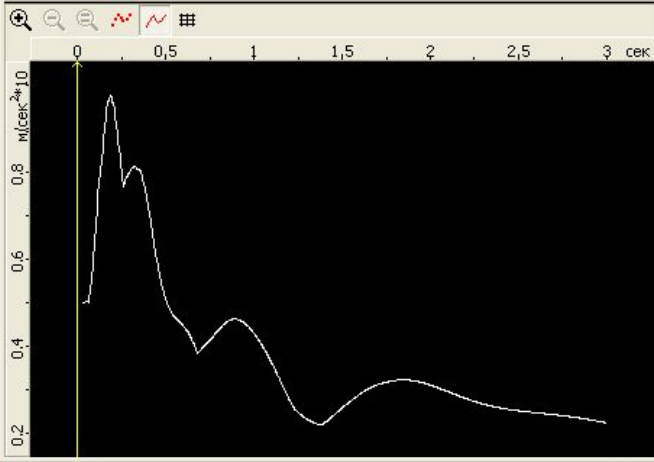
Таблица | Графики | Общие параметры

Спектр отклика

Логарифмические декременты колебаний δ

Количество графиков 1 | 1.26

Применить



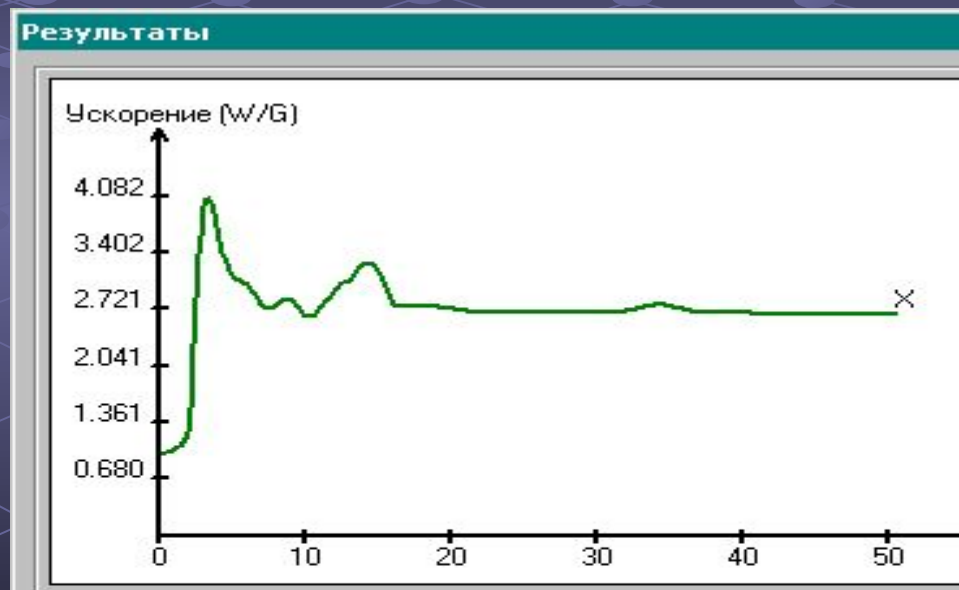
Период сек	Ускорение $\delta=1.26$ м/сек^2
0.03	4.9993998
0.033	5.0041532
0.036	5.0087581
0.039	5.0130458
0.042	5.0167962
0.045	5.0197732
0.048	5.0217259
0.051	5.0223225
0.054	5.0212464
0.057	5.0185566
0.06	5.0146148
0.063	5.107659
0.066	5.2201224
0.069	5.323794

Выход Отчет Справка

Определяются также общие параметры и спектральные характеристики

11. СПЕКТРЫ ОТВЕТА

Можно построить спектр ответа в произвольных точках модели для заданной акселерограммы



Спектры ответа

Список узлов: 1613

Исходные	Имена акселерограмм	Выбранные
1-h.spc	Добавить ->	1p1-h.spc
1m1-r.spc		
1m1-z.spc	<- Вернуть	
1p1-r.spc		

Направление действия: X Y Z

Коэффициент диссипации: .12

Коэффициенты диссипации по формам: 1

Динамическое воздействие (номер, число форм, имя): 4 7

OK Отмена Справка Результаты

Номер узла	Номер загрузки	Имя акселерограммы	Диапазон частот (Гц)	Направление действия
3	2	sinot.spc	от 0 до 50	<input checked="" type="checkbox"/> X <input type="checkbox"/> Y <input type="checkbox"/> Z

OK Отмена Справка Печать графиков Результаты (таблицы)

12. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОГРАММЫ

Ближайшие планы разработчиков SCAD Office содержат следующие направления развития, связанные с сейсмическими расчетами:

- модернизация режимов интегрирования уравнений движения с созданием целого ряда новых аналитических возможностей и существенного улучшения способов отображения;
- создание калькулятора, с помощью которого можно «опустить» акселерограмму на уровень подземной части сооружения;
- выпуск специальной брошюры с рекомендациями по использованию SCAD Office в сейсмических расчетах.