

Динамические расчеты в системе SCAD



Порядок изложения

1. Мотивация
2. Расчетные модели в задачах динамики
3. Собственные частоты и формы
4. Демпфирование колебаний
5. Резонансные кривые (АЧХ)
6. Гармоническое возбуждение
7. Спектры ответа
8. Пульсации ветрового потока



1. Мотивация

Система инженерного образования построена таким образом, что задачам динамики уделяется незаслуженно малое внимание. Многочисленными упражнениями у студентов и вырабатывается определенная интуиция по проблемам статического анализа конструкций, но **«динамическое чутье» остается совсем неразвитым.**

Отсюда многие ошибки, а также формальная подготовка исходной информации для решения динамической задачи средствами автоматизированного проектирования.



2. Расчетные модели

Расчетная схема, с помощью которой описывается упругое сопротивление конструкции в процессе анализа динамической реакции сооружения, чаще всего принимается такой же, как и при статическом расчете. Естественно, в такую схему добавляются инерционные характеристики и данные о силах сопротивления движению; кроме того, более детально описываются и внешние воздействия, которые могут быть представлены как некоторые функции времени.

В задачах динамики основной интригой является взаимодействие и взаимовлияние сил упругости (жесткости сооружения) и сил инерции.



2. Расчетные модели

Отметим определенную опасность использования описания несущей конструкции, одинакового для статического и динамического расчетов.

Имеется два основных источника расхождений между расчетными схемами в статике и в динамике:

- структура конструктивной системы;
- характеристики материалов.



2. Расчетные модели

2.1. Структура конструктивной системы

При статических расчетах, ориентированных на предельные состояния, из расчетной модели удаляются элементы, которые мало сказываются на предельном сопротивлении (перегородки, элементы ограждающих конструкций и др.). Но при анализе динамического поведения, особенно в части оценки вклада высших собственных частот, соответствующие амплитуды колебаний могут оказаться намного меньшими, чем те перемещения, при которых эти «ненесущие» конструктивные элементы выбывают из работы.



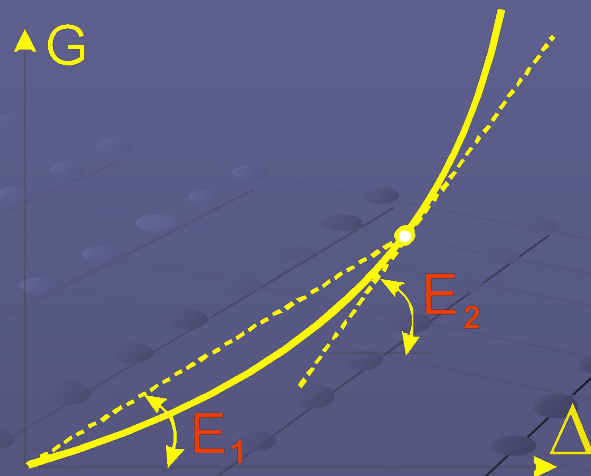
2. Расчетные модели

2.2. Характеристики материалов

Жесткостные характеристики многих материалов (и, в особенности, оснований) при статическом расчете берутся с учетом изменений, развивающихся при длительном нагружении под действием нагрузок высокой интенсивности.

Например, податливость грунтовых оснований определяется по «секущему» модулю E_1 , который определяется в результате компрессионных испытаний.

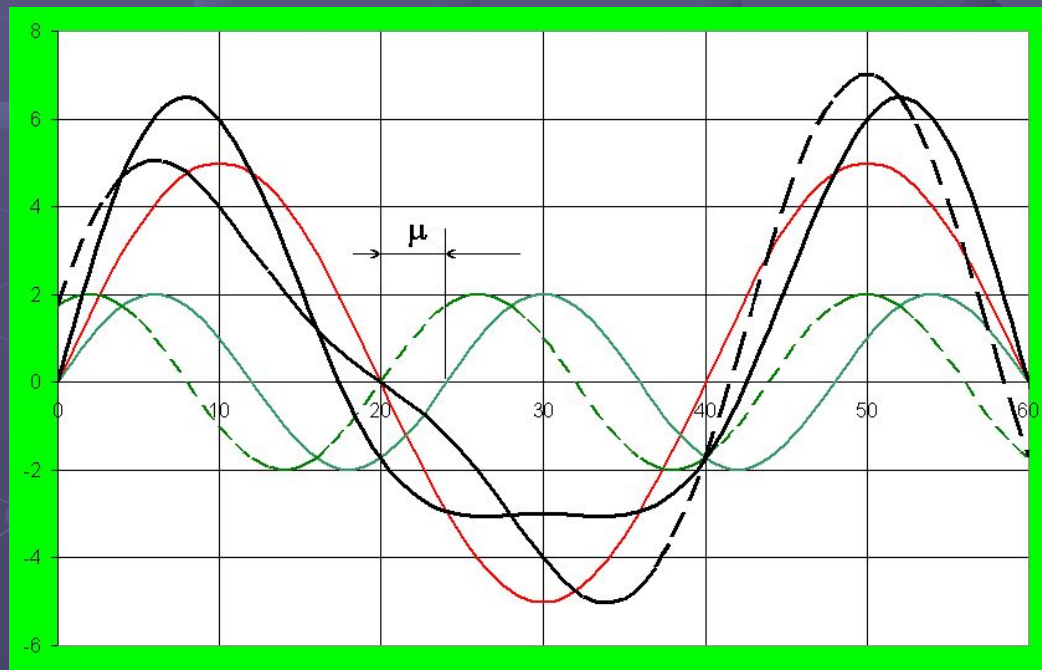
При динамическом расчете для умеренного уровня эксплуатационных нагрузок динамическая жесткость близка к «мгновенной» статической жесткости и определяется касательным модулем E_2 . Его значение можно найти, например, в СНиП «Аэродромные покрытия».





2. Расчетные модели

Неточность вычисления собственных частот и погрешности в оценке логарифмического декремента **наиболее сильно сказываются на величине угла сдвига фаз μ** между возмущающей силой и реакцией конструкции (запаздывание реакции).





2. Расчетные модели

Для систем, где учитываются много форм собственных колебаний ошибка простого суммирования значений, соответствующих одному и тому же моменту времени может быть достаточно большрй.

В виду этой неточности часто полагают угол μ , равномерно распределенной случайной величиной, что приводит к расчетной формуле типа «корень из суммы квадратов» (формула Розенблюма):

$$X_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(a_i |X_{i,\max}| \right)^2}$$



2. Расчетные модели

2.3. Массы

При динамических расчетах необходимо рассматривать различные варианты распределения масс по конструкции, которые возникают от нагружения системы временными длительно действующими нагрузками.

Если массы создаются из статического нагружения, то следует позаботиться, чтобы в расчетные сочетания попадали соответствующие друг другу пары результатов статического и динамического расчета, для этого динамическое нагружение следует назначить сопутствующим.



3. Собственные частоты

3.1. Количество учитываемых частот

Имеется эмпирическое правило - для системы с n динамическими степенями свободы надежно вычисляются примерно $n/2$ первых частот и форм собственных колебаний.

Требование использования вдвое большего числа степеней свободы, чем число собственных форм, включено в нормы Комиссии по атомной энергии США в качестве альтернативного к тому, чтобы при увеличении n результаты менялись не более чем на 10%.



3. Собственные частоты

Бывают случаи, когда первые собственные частоты связаны с формами колебаний, которые не возбуждаются действующей нагрузкой. Это заставляет увеличивать n .



У этой конструкции несколько десятков первых форм собственных колебаний соответствуют локальным вибрациям «спиц». Для расчета основной несущей системы необходимо использовать более высокие моды.



3. Собственные частоты

Есть случаи, когда в нормативных документах рекомендуется учет определенного числа форм собственных колебаний (СНиП 2.01.07–85* — диапазон частот, СНиП II–7–81 — не менее 10 форм для бетонных и не менее 15 форм для земляных плотин).

Однако большинство рекомендаций наших норм ориентировано на простые схемы типа консоли и требуют учета немногих частот. **Для сложных схем следует использовать большее число собственных форм.**

Нормы США, например, требуют, чтобы при расчетах на сейсмику сумма обобщенных масс по учитываемым формам собственных колебаний была не меньшей, чем 90% общей массы системы.



3. Собственные частоты

В систему SCAD, начиная с версии 7.31.R3, включен модуль определения частот и форм собственных колебаний по методу Ланцоша, обеспечивающий возможность отыскания такого числа частот, которое гарантирует заданный процент учтенной массы, или же отыскания всех частот в заданном интервале.

Параметры динамических воздействий

Ввод параметров динамической нагрузки

Категория воздействия

- ☒ Сейсмические воздействия
- ☐ Ветровые воздействия
- ☐ Прочие воздействия

Загрузка: 2 Modal

Имя загрузки: Modal

☒ Преобразование статических нагрузок в массы

Номер и имя присоединяемого статического нагружения: 1 Did

Козф. пересчета: 1 2.5

Записать

Удалить

Тип воздействия

- Сейсмика по СНиП
- Сейсмика по СНиП (01.01.2000)
- Сейсмика по акселерограммам
- Сейсмика по СНиП республики К
- Сейсмика по заданным акселеро

Определение собственных форм и частот выполнить методом

- ☐ Итерации подпространств
- ☐ Ланцоша
- ☐ Нискорейшего спуска

Анализ в заданном частотном диапазоне

от 0 гц до 0 гц

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

X: 90 % Y: 90 % Z: 75 %

OK Отмена Справка

Параметры динамических воздействий

Ввод параметров динамической нагрузки

Категория воздействия

- ☐ Сейсмические воздействия
- ☒ Ветровые воздействия
- ☐ Прочие воздействия

Загрузка: 2 Modal

Имя загрузки: Modal

☒ Преобразование статических нагрузок в массы

Номер и имя присоединяемого статического нагружения: 1 Did

Козф. пересчета: 1 2.5

Записать

Удалить

Тип воздействия

- Пulsации ветра
- Ветровые pulsации по МГСН

Определение собственных форм и частот выполнить методом

- ☐ Итерации подпространств
- ☐ Ланцоша
- ☐ Нискорейшего спуска
- ☒ Анализ в заданном частотном диапазоне

от 0.5 гц до 3.0 гц

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

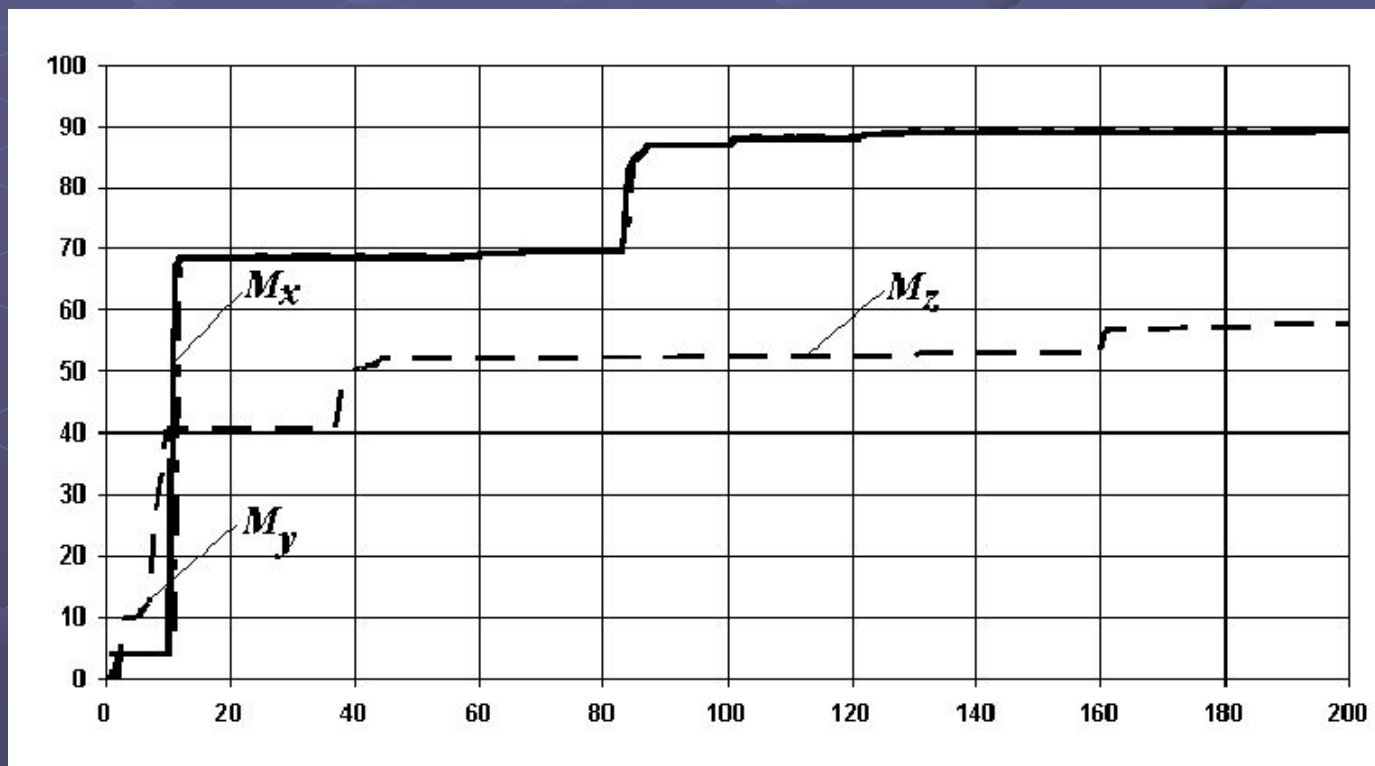
X: 90 % Y: 90 % Z: 75 %

OK Отмена Справка



3. Собственные частоты

Опыт показывает, что приращение значения учтенной массы происходит негладко, и многие собственные формы практически ничего не приносят в этот показатель.





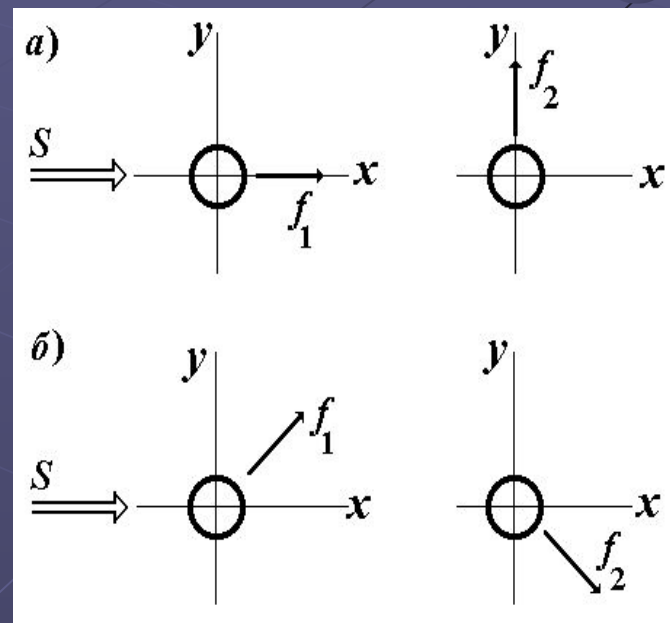
3. Собственные частоты

3.2. Кратные частоты

Все формы, соответствующие кратным частотам следует учитывать одновременно.

Кратные формы определяются неоднозначно.

Например, вертикально расположенный консольный стержень с одинаковыми главными жесткостями имеет кратные формы, которые определяются **с точностью до произвольного поворота вокруг оси Z**

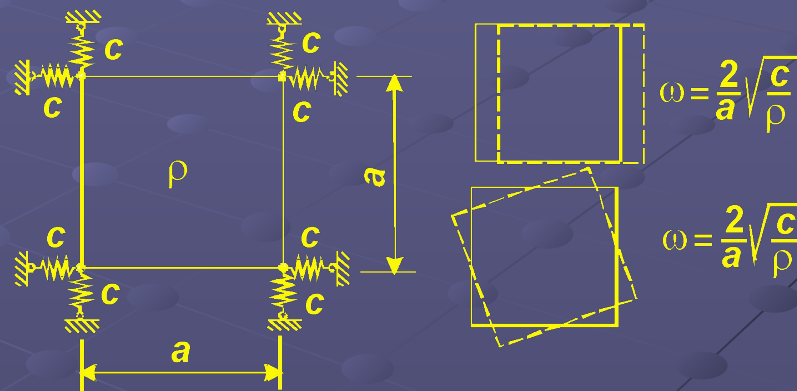




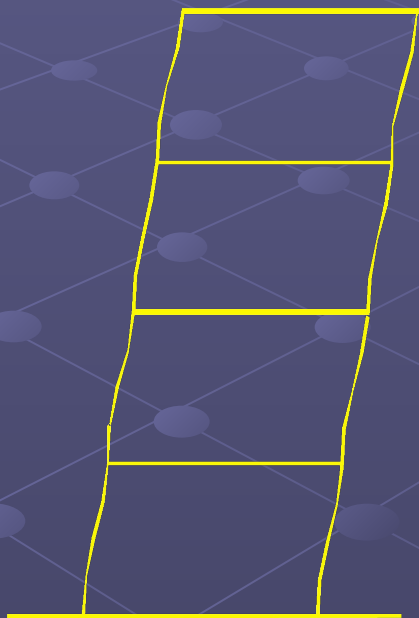
3. Собственные частоты

3.3. О крутильных формах

Достаточно часто встречаются случаи когда первая форма собственных колебаний является крутильной.



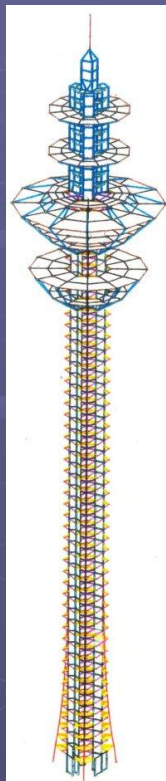
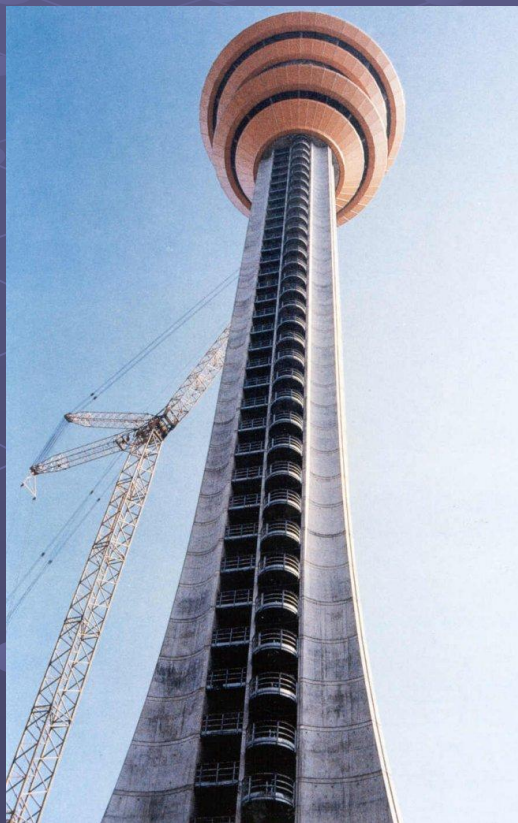
Если преобладающим является **сдвиговой тип деформирования**, то появление крутильной формы весьма вероятно.



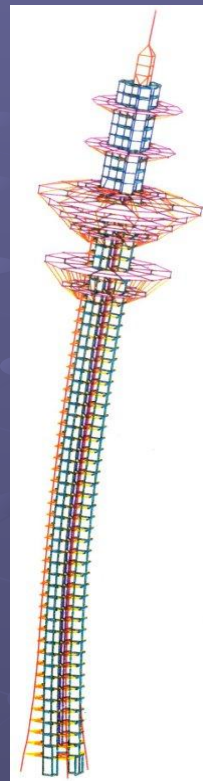


3. Собственные частоты

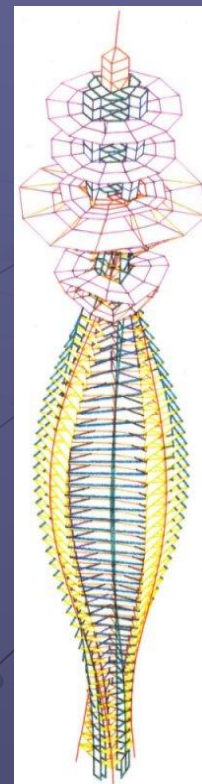
Присутствие крутильных форм в числе первых характерно и для высотных сооружений



Конечно-элементная модель



1-я форма
(изгибная)
 $f_1 = 0,22 \text{ Гц}$

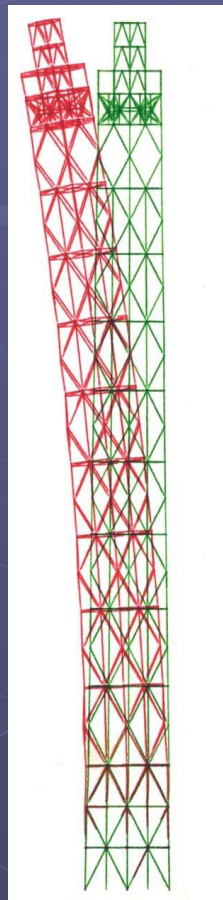


2-я форма
(крутильная)
 $f_2 = 1,89 \text{ Гц}$

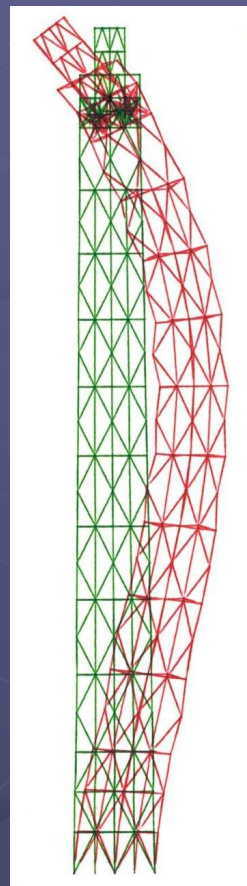
Телебашня в Милане



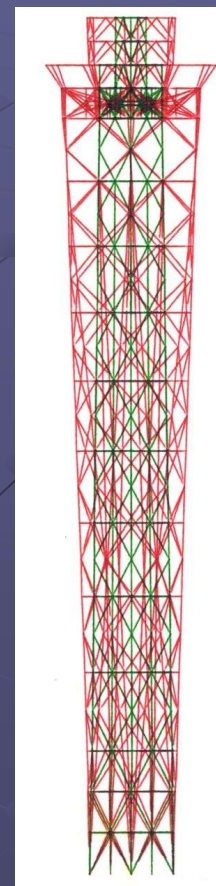
3. Собственные частоты



$f_1 = 0,45 \text{ Гц}$



$f_2 = 2,00 \text{ Гц}$

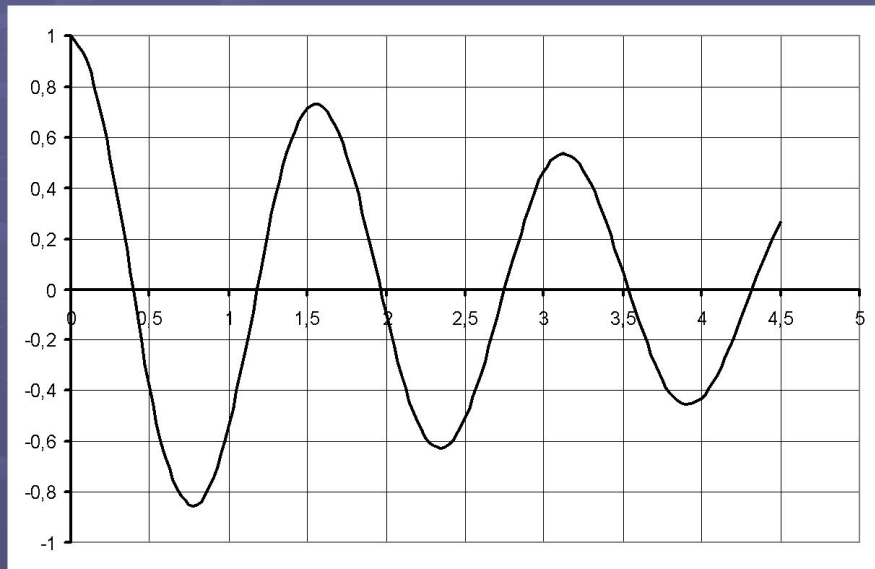


$f_3 = 2,38 \text{ Гц}$



4. Демпфирование колебаний

Логарифмический декремент δ характеризует затухание колебаний, он равен натуральному логарифму отношения амплитуд с интервалом в один период.



При установившихся вынужденных колебаниях логарифмический декремент выражается через коэффициент поглощения $\psi = E^*/E$ (E^* – поглощенная энергия; E – потенциальная энергия) по формуле $\delta = \psi/2$.



4. Демпфирование колебаний

Один из главных механизмов демпфирования – излучение в окружающую среду. Энергия теряемая конструкцией за цикл колебаний

$$E = \pi \omega \rho C r^2,$$

ρ — плотность среды, C — скорость звука в этой среде и r — амплитуда вибрации. Тогда энергия, рассеянная за цикл, соответствует вязкому трению с коэффициентом демпфирования $B = \rho C$ для области единичного размера.

Для естественных оснований под колеблющимися фундаментами можно использовать приближенные формулы, которые связывают параметры B с коэффициентами жесткости C_z :

$$B_z = 0,014 F C_z^{1/2}$$

Здесь F - площадь подошвы.



5. Резонансные кривые (АЧХ)

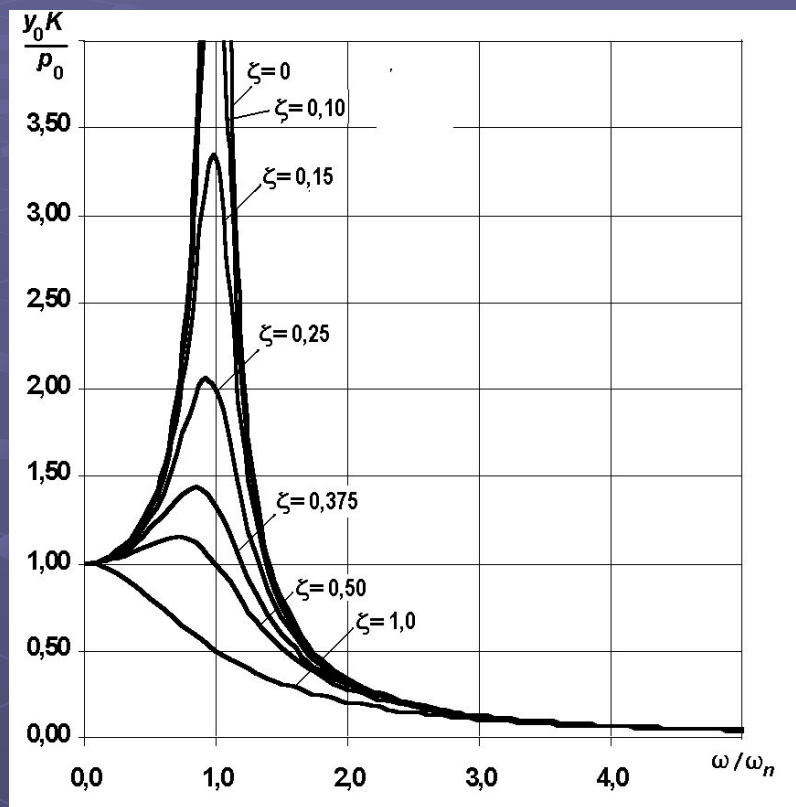
Понятно стремление избежать резонанса, создав такую систему, собственная частота которой не совпадает с частотой возмущающей силы.

Но, насколько она должна не совпадать?

Что выгоднее: чтобы собственная частота была большей или меньшей частоты возмущения? Ответ на эти вопросы дает анализ так называемых резонансных кривых.



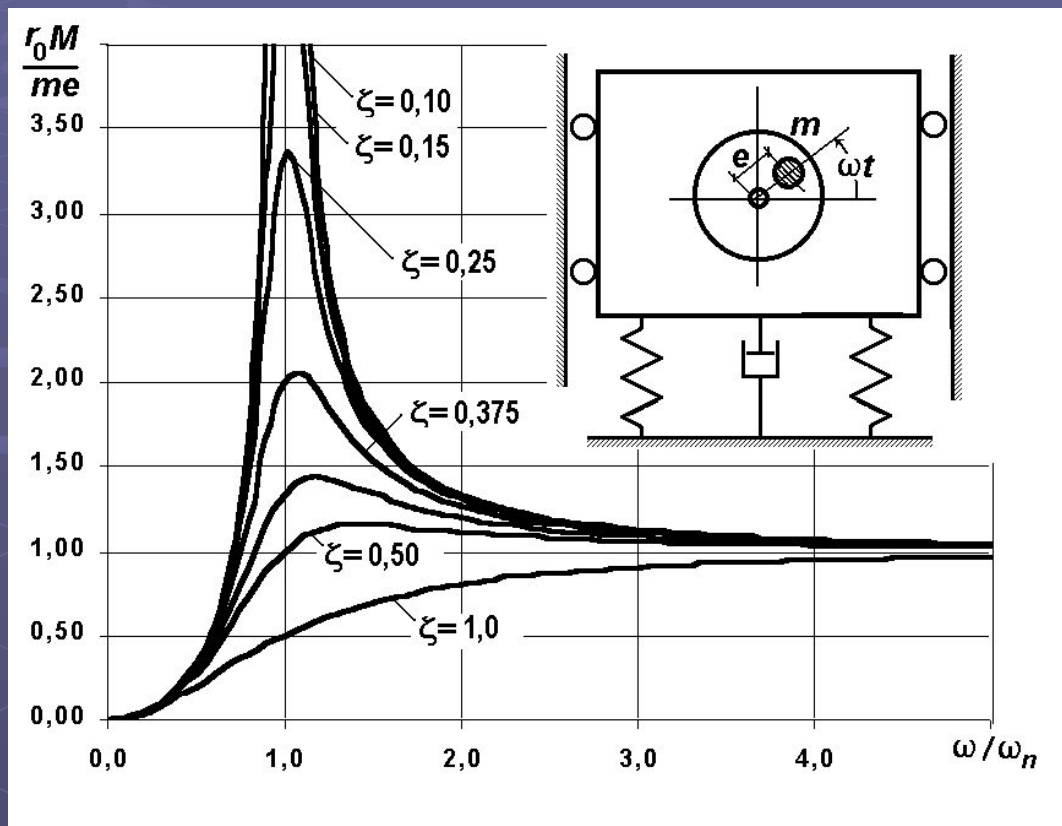
5. Резонансные кривые (АЧХ)



Силовое гармоническое возбуждение $p = p_0 \sin \omega t$ – более выгодным является **увеличение частоты собственных колебаний.**



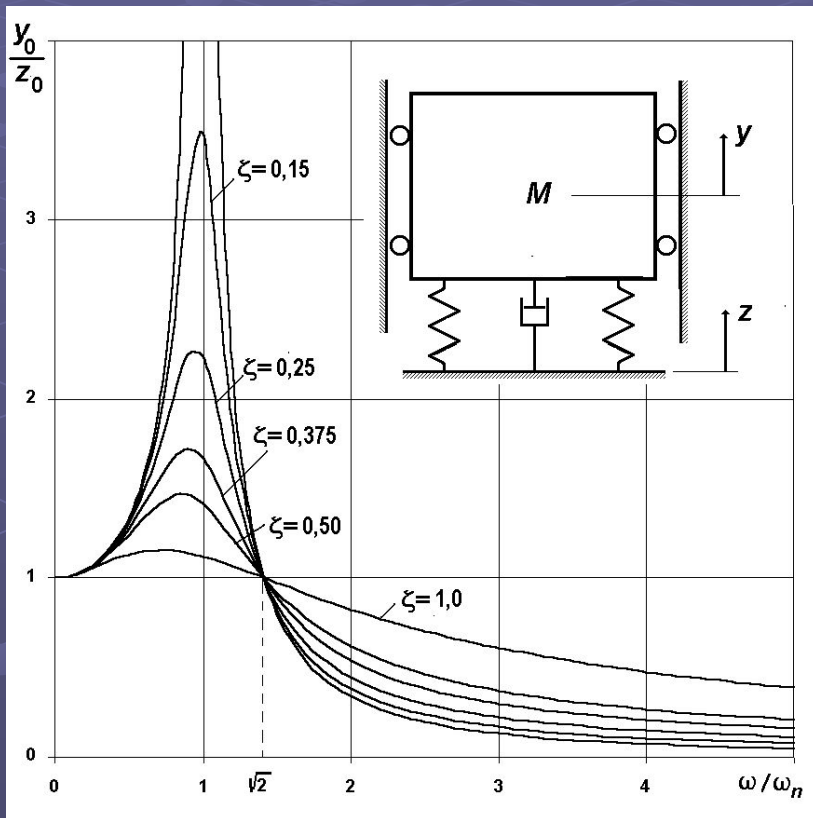
5. Резонансные кривые (АЧХ)



Возбуждение неуравновешенной массой – рекомендация по уходу от резонанса имеет **прямо противоположный характер.**



5. Резонансные кривые (АЧХ)

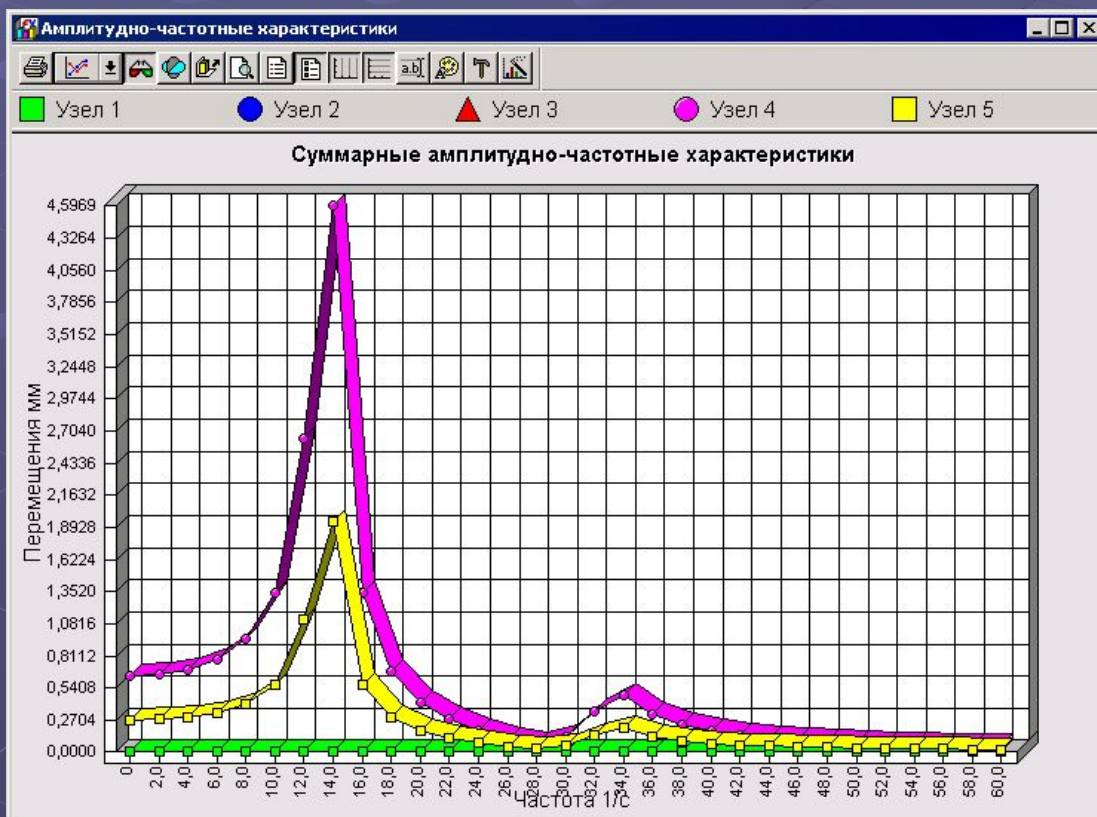


Гармоническое возбуждение основания – отношение y_0 / z_0 в некотором смысле характеризует **качество виброизоляции**, которая является эффективной лишь при частотах $\omega / \omega_n > 0,707$, а наличие в ней затухания, вообще говоря, является нежелательным.



5. Резонансные кривые (АЧХ)

Можно построить амплитудно-частотную характеристику любого перемещения или усилия, которая покажет, как меняется этот фактор при изменении частоты возбуждения





6. Гармоническое возбуждение

Учитывается, что при разгоне частота f меняется от нуля до заданного значения

Нагрузка меняется по закону $P = P_0 \sin f t$

Параметры динамических воздействий

Ввод параметров динамической нагрузки | Гармонические колебания

☐ Учет промежуточных резонансных состояний

☒ Расчет на заданную частоту

Число учитываемых форм собственных колебаний

Коэффициент неупругого сопротивления материала

Круговая частота внешнего воздействия рад/сек.

Точность вычисления частоты

OK Отмена Справка



8. Ветровые пульсации

**Ветровая нагрузка
является определяющей
для высотных и
большепролетных систем**

Висячий мост пролетом 1990 м, Япония



Самое высокое здание мира
(Petronas tower, высота = 452 м)

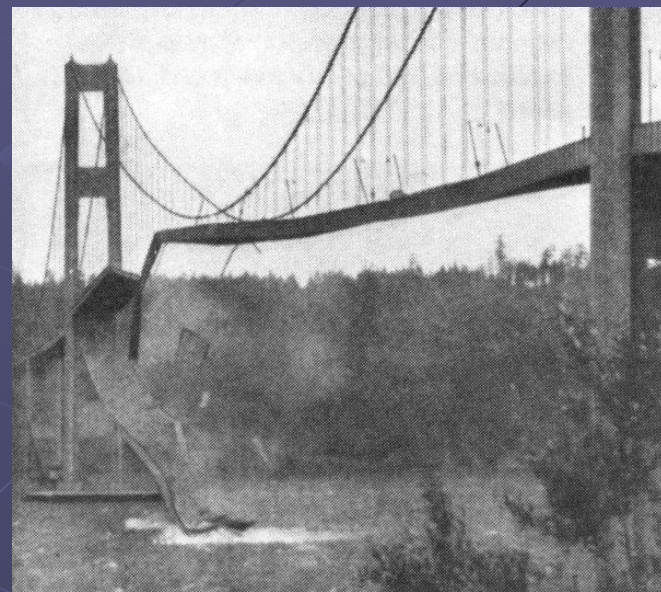
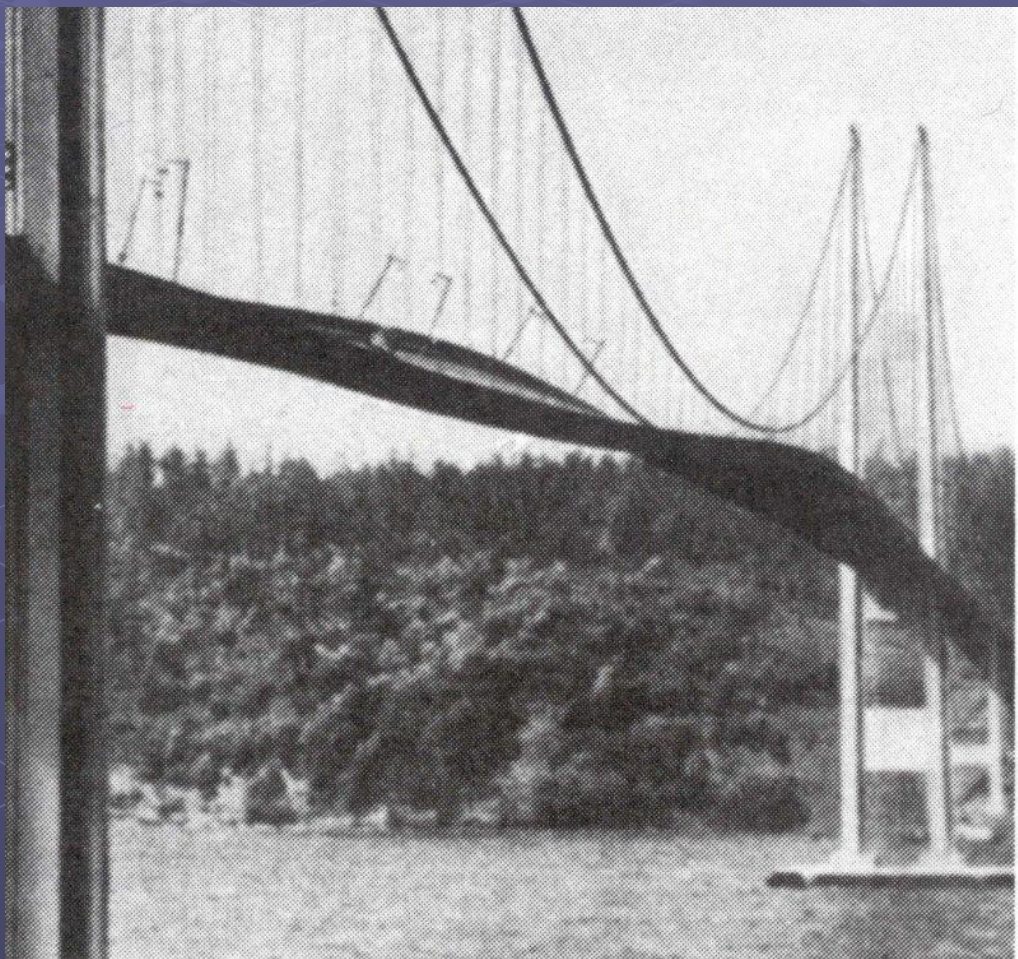




Динамические расчеты в системе SCAD

8. Ветровые пульсации

Такомский мост, 7 ноября 1940





8. Ветровые пульсации

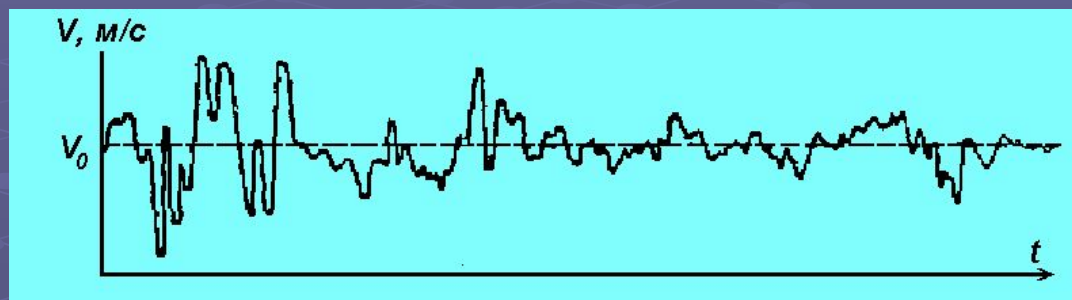
Градирни электростанции Феррибридж,
Великобритания, 1965



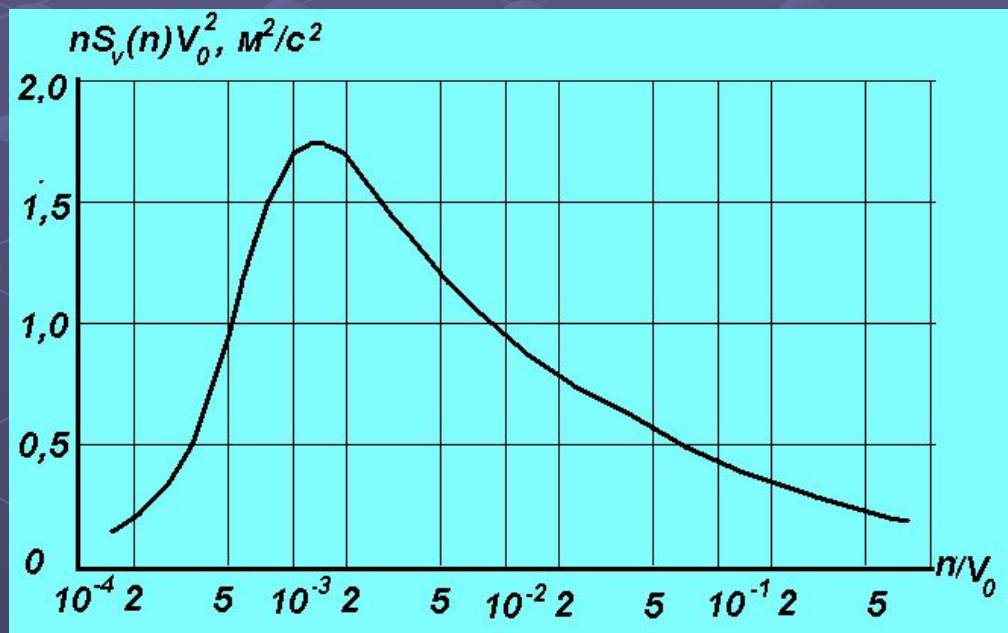


8. Ветровые пульсации

Типичная запись скорости ветра



Спектр пульсаций





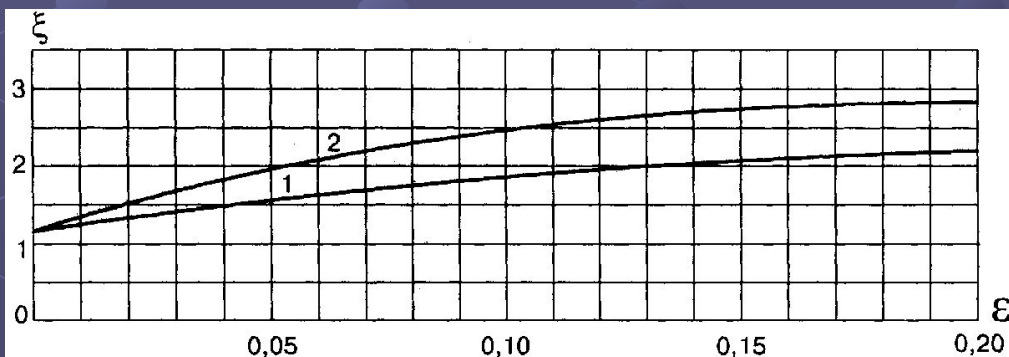
8. Ветровые пульсации

Безразмерный период

$$\varepsilon = 1/n = V_0 / 1200 f$$

Квадрат коэффициента динамичности

$$\xi_i^2 = \frac{2}{3} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon^{11/3} d\varepsilon}{(1 + \varepsilon^2)^{4/3} \left[\varepsilon^4 - 2(1 - \gamma^2 / 2) \varepsilon_i^2 \varepsilon^2 + \varepsilon_i^4 \right]}$$



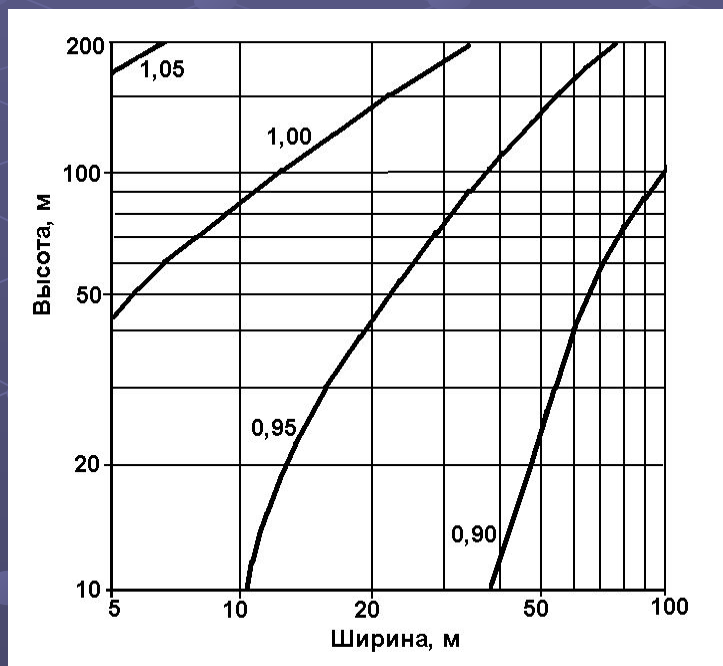
Черт. 2. Коэффициенты динамичности

1 — для железобетонных и каменных сооружений, а также зданий со стальным каркасом при наличии ограждающих конструкций ($\delta = 0,3$); 2 — для стальных башен, мачт, футерованных дымовых труб, аппаратов колонного типа, в том числе на железобетонных постаментов ($\delta = 0,15$)

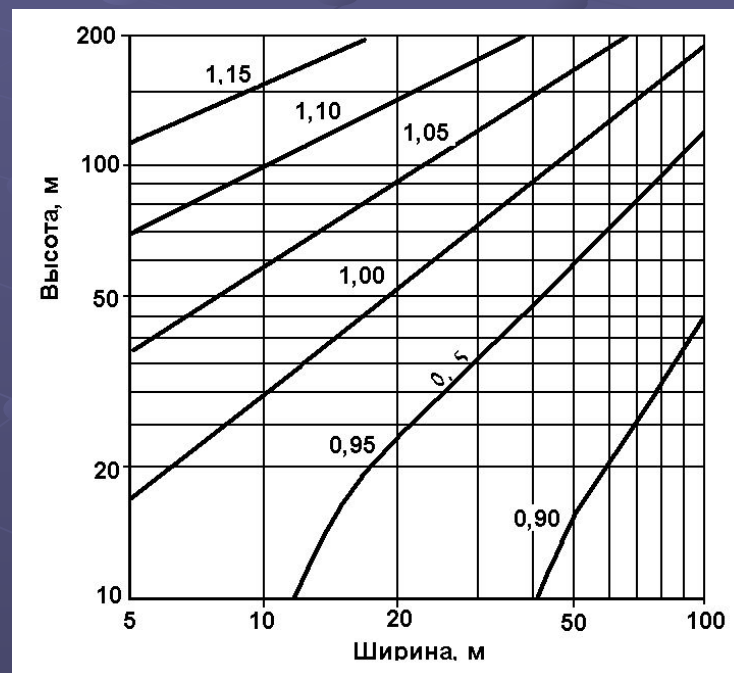


8. Ветровые пульсации

Для обычных зданий эффект влияния ветровых пульсаций относительно невелик. Ориентировку дает Еврокод, в соответствии с которым для зданий обычного типа динамический коэффициент принимается по таким графикам:



железобетонный каркас

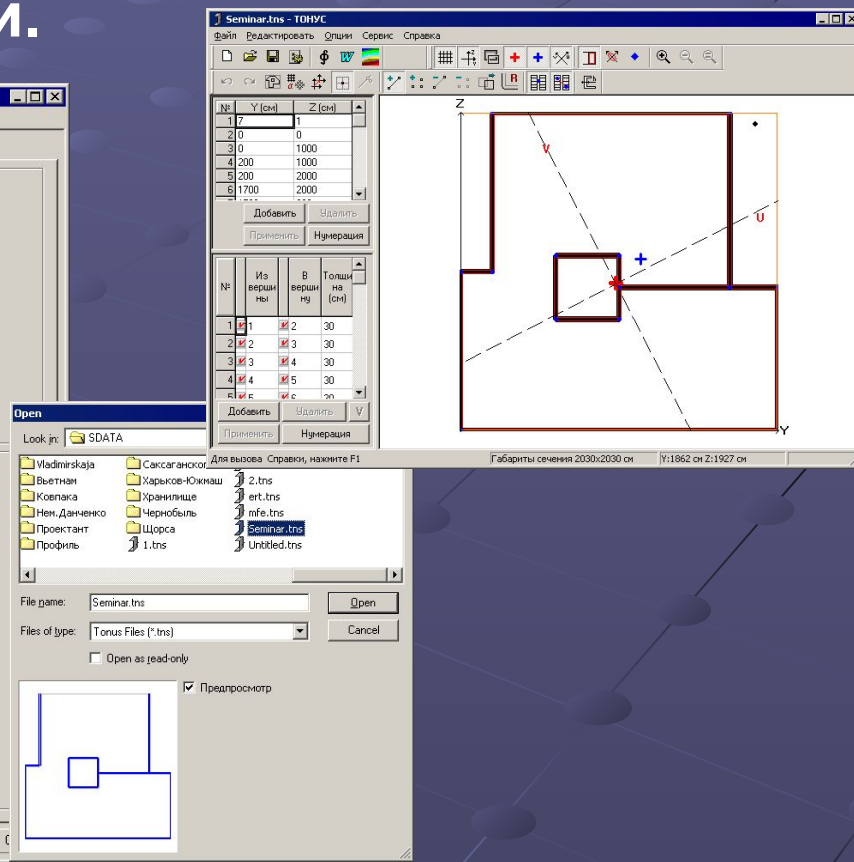
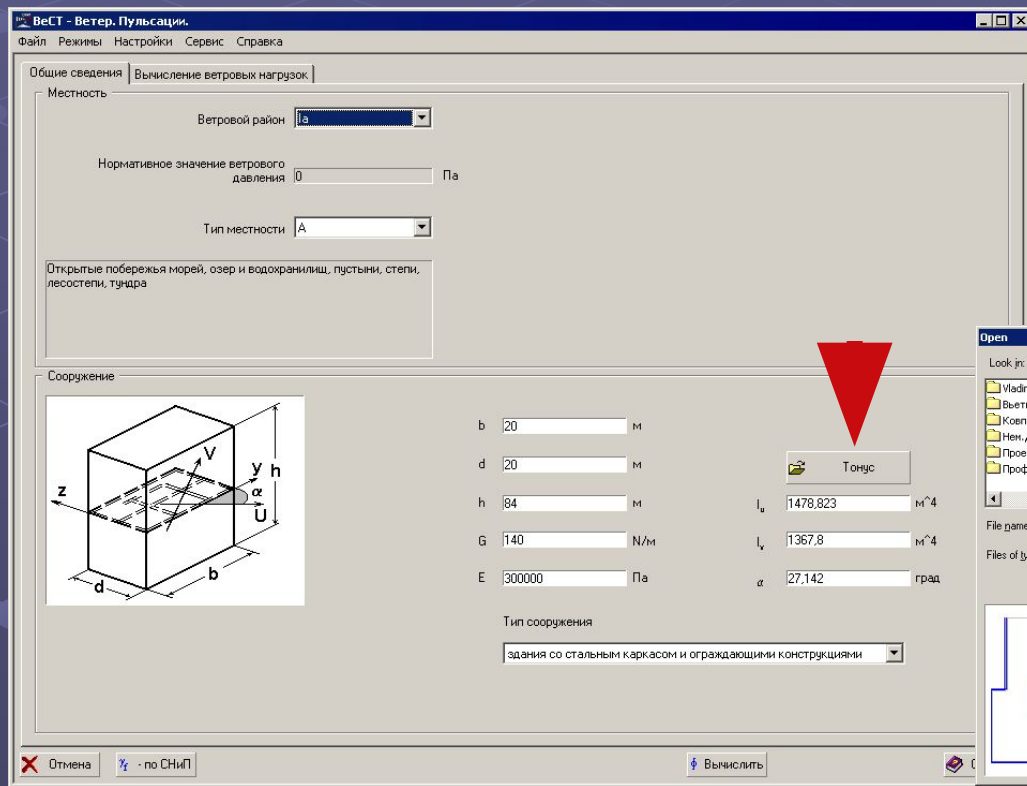


стальной каркас



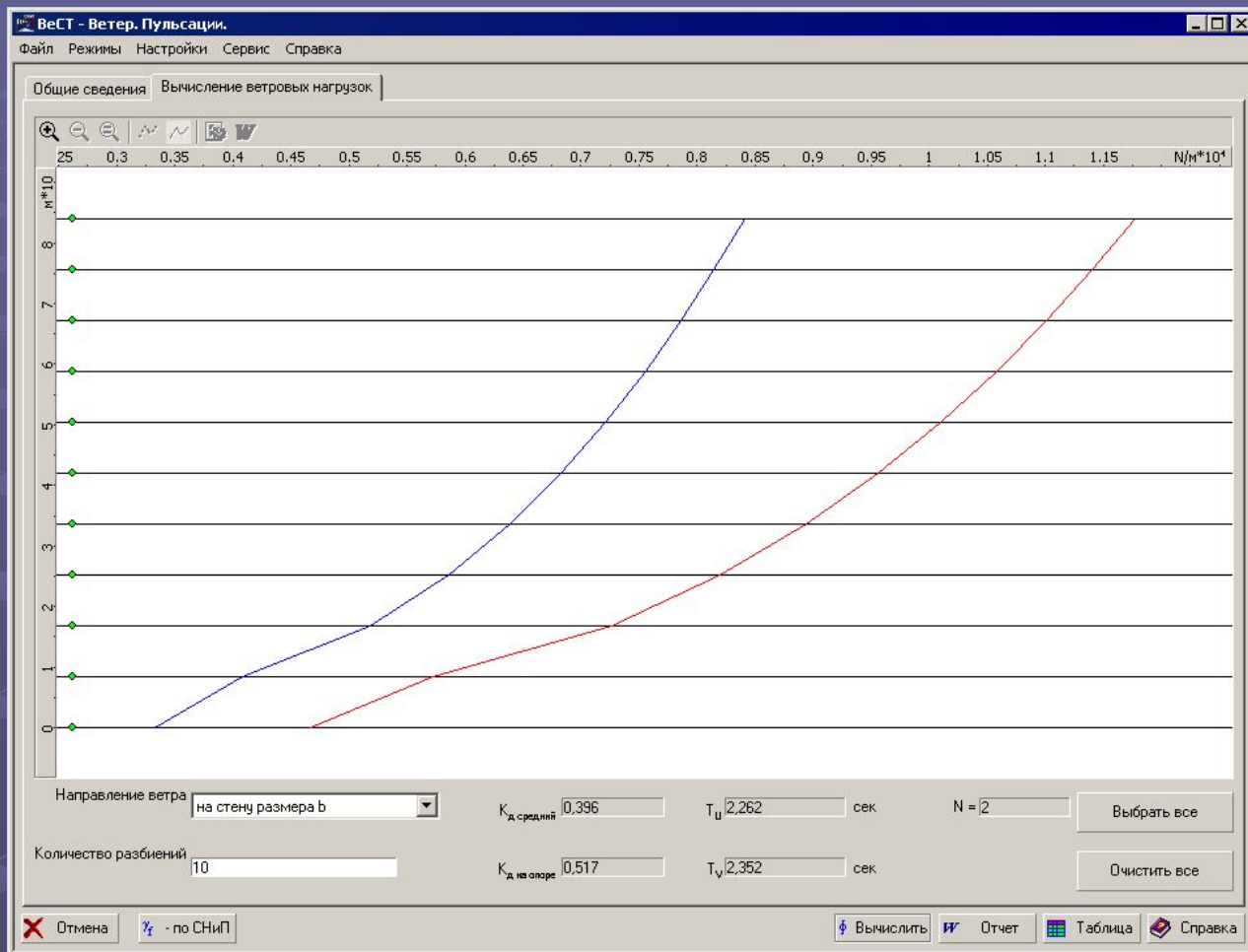
8. Ветровые пульсации

В программе ВеСТ появился новый режим, с помощью которого можно получить предварительную грубую оценку динамического эффекта ветровой нагрузки для зданий простой конфигурации.





8. Ветровые пульсации



Определяются коэффициенты динамичности по перемещению верха и общему моменту в основании



8. Ветровые пульсации

Кроме того, в системе SCAD включен режим расчета ветровых пульсаций по рекомендациям Московских городских строительных норм МГСН 4.04-94, где более тонко учитываются эффекты взаимодействия различных форм собственных колебаний, в том числе и крутильных.

Параметры динамических воздействий

Ввод параметров динамической нагрузки

Вид воздействия

- ☐ Сейсмические воздействие
- ☒ Ветровые воздействие
- ☐ Прочие воздействие

Тип воздействия

- Пульсации ветра
- Ветровые пульсации по МГСН

Имя загрузки

☐ Преобразование статических нагрузок в массы

Номер и имя присоединяемого статического нагружения

1 Постоянная нагрузка

Козф. пересчета

Записать

Удалить

Определение собственных форм и частот выполнить методом

- ☐ Итерации подпространств
- ☒ Панцоша
- ☐ Наискорейшего спуска

☐ Анализ в заданном частотном диапазоне

от 0 гц до 0 гц

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

Значения параметров взять из загрузки

90 % Y 90 % Z 75 %

OK Отмена Справка



8. Ветровые пульсации

В МГСН 4.04-94 учитывается взаимная спектральная плотность ветровых пульсаций

$$S_{ij} = w_i^m w_j^m \zeta(z_i) \zeta(z_j) \frac{n^2 \exp(-\chi_{ij})}{3 f (1 + n^2)^{4/3}}$$

$$\chi_{ij} = 0,0067(\Delta x_{ij} + \Delta z_{ij}) + 0,0167 \Delta y_{ij}$$

в отличие от СНиП, где



8. Ветровые пульсации

Расчет по МГСН 4.04-94 намного медленнее, кроме того нельзя иметь результаты по отдельным формам собственных колебаний, поскольку общий результат состоит не только из изолированных вкладов каждой учетной формы, но и из их взаимодействия.

Сопоставление расчетов по СНиП и МГСН 4.04-94 показало, что для зданий с реальными параметрами расхождение измеряется единицами процентов.