



**ЛИРА**  
СОФТ

# Анализ сейсмостойкости сооружений нелинейными статическими методами

Джинчвелашвили Г.А., д.т.н., проф. МГСУ,  
Кафедра «Сопротивление материалов»



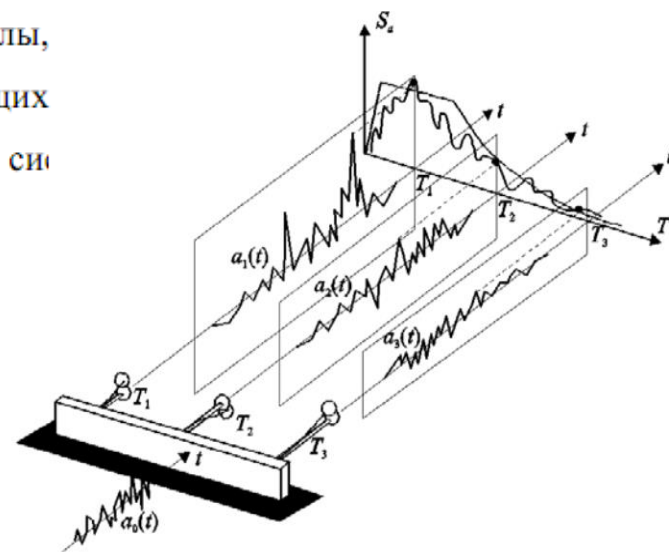
[lira-soft.com](http://lira-soft.com)

# Современное состояние теории сейсмостойкости

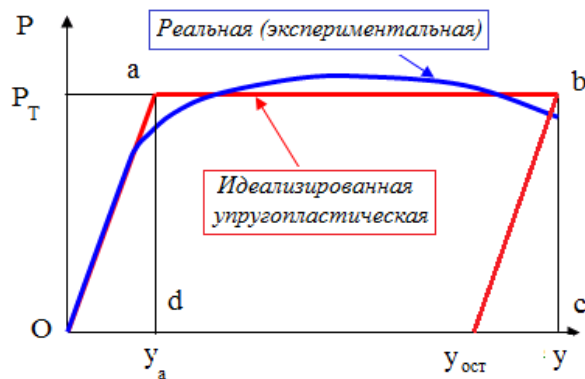
В настоящее время, сейсмостойкое проектирование зданий основано на силовом расчете и представлении эффекта землетрясения статическими эквивалентными силами, которые рассчитываются, используя упругие спектры реакций (линейно-спектральный метод или ЛСМ), связывающие закон движения грунта с абсолютным ускорением модели в виде линейного осциллятора (рис. 2.1). Такой подход непосредственно не учитывает ни влияния длительности сильных движений, ни пластического поведения конструкции.

Анализ современных подходов обеспечения сейсмостойкости сооружений показал, что существующие методики основаны на представлении эффекта землетрясения как статической эквивалентной силы, которая рассчитывается из упругих спектров реакций, связывающих пиковое ускорение грунта (PGA) с абсолютным ускорением упругой системы.

Эти методы недостаточно адекватно описывают поведение системы во время землетрясения.

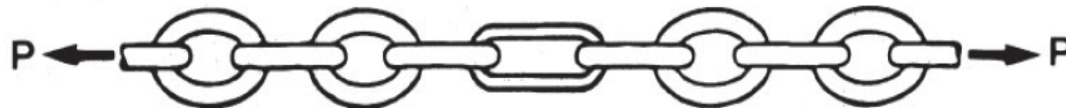


# 1 Концепции целенаправленного проектирования

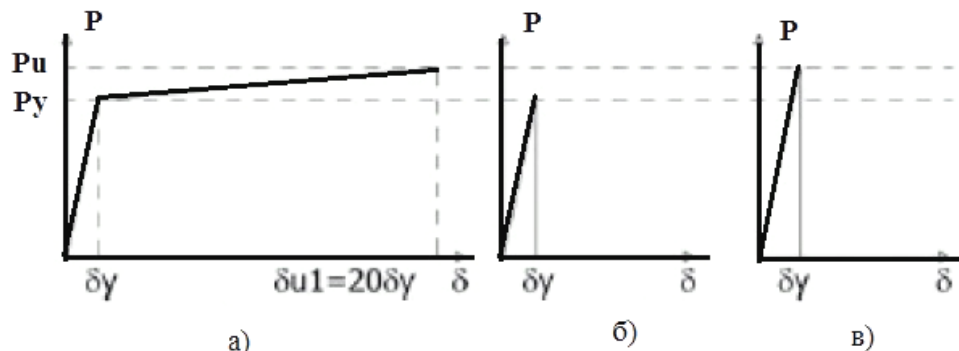


Чтобы разрушить конструкцию, необходимо затратить определенное количество энергии – произвести работу, по величине равную площади  $Oabc$ . Эту работу производит внешняя нагрузка, для чего она должна обладать соответствующим количеством энергии.

$$\delta u = 5\delta y$$



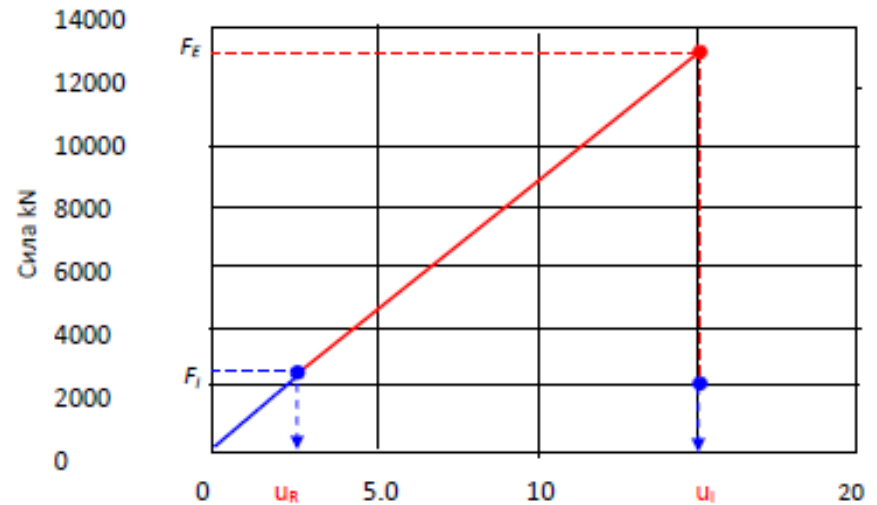
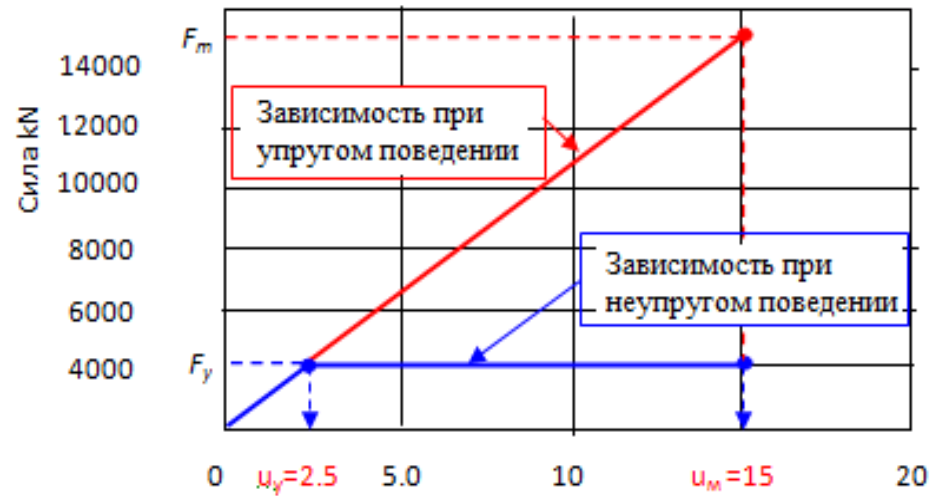
Хрупкие связи      Пластическая связь      Хрупкие связи



$$\delta u = 4\delta y + \delta u_1 = 4\delta y + 20\delta y = 24\delta y$$

# 2 Энергетические критерии оценки несущей способности сооружений

## 2.1 Концепция эквивалентных перемещений

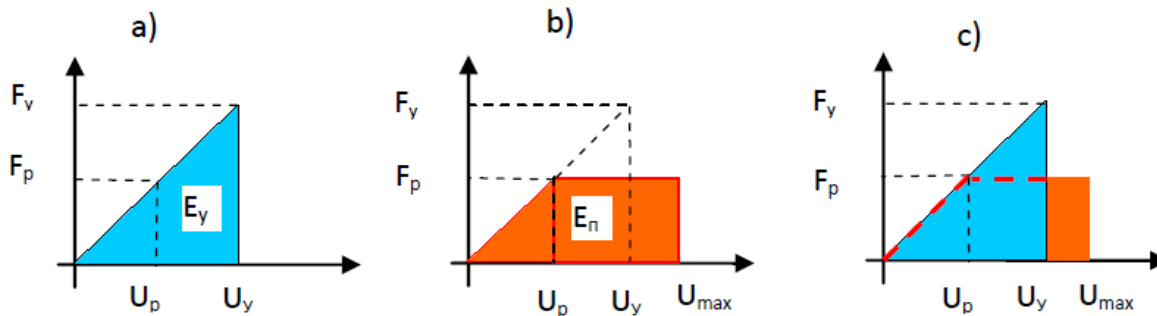


$$\mu = \frac{u_m}{u_y}$$

$$F_I = \frac{F_E}{\mu}$$

# 2 Энергетические критерии оценки несущей способности сооружений

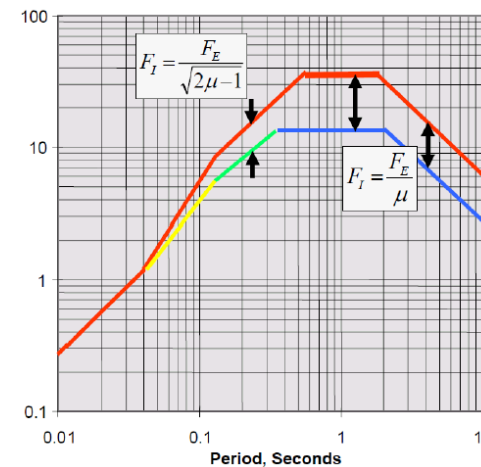
## 2.2 Концепция эквивалентных энергий



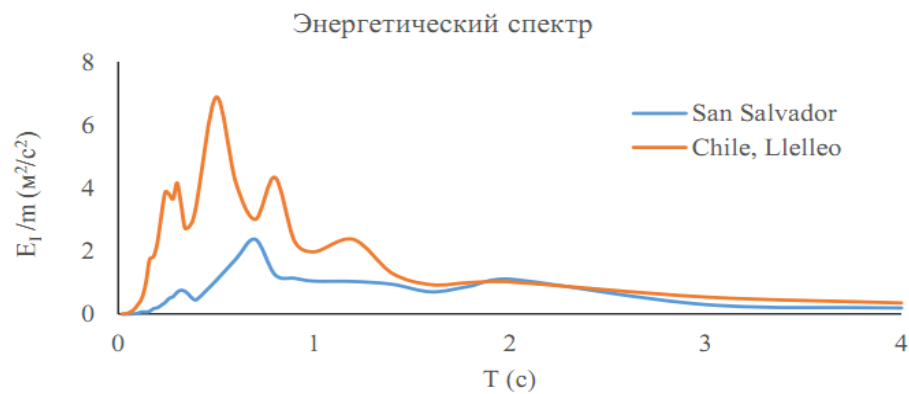
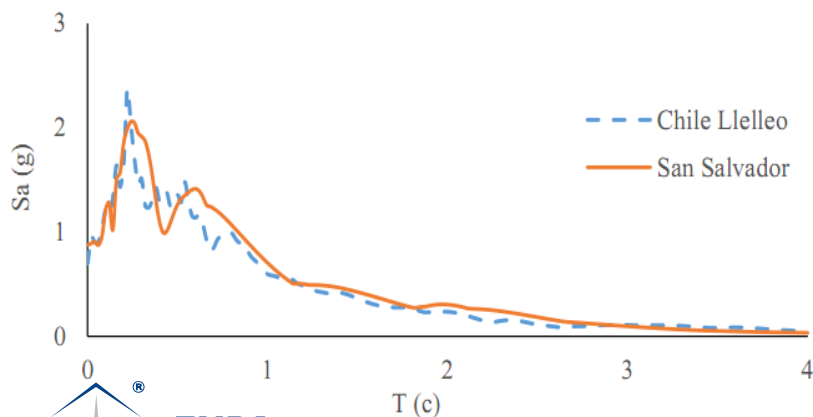
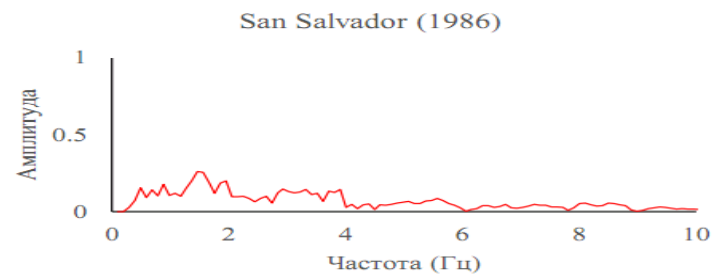
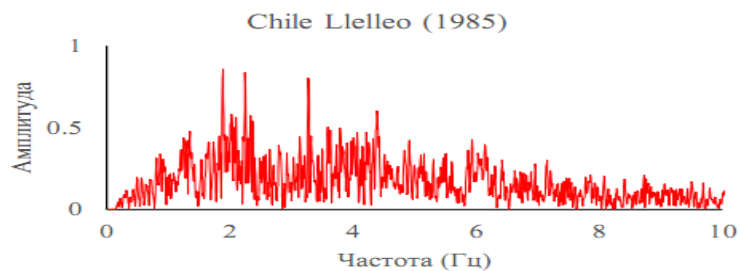
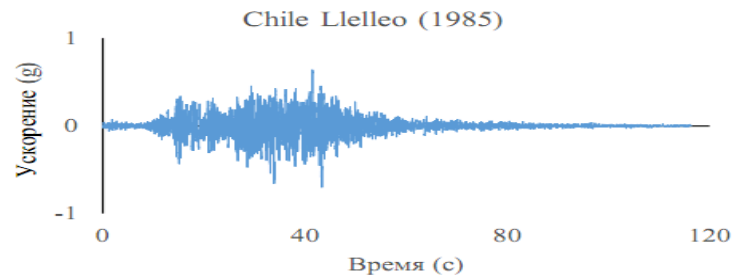
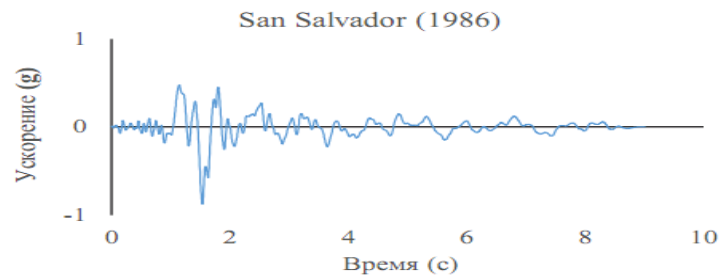
$$E_y = \frac{F_y U_y}{2} = \frac{F_y^2 U_p}{2F_p}$$

$$E_n = F_p U_{\max} - \frac{F_p U_p}{2} = F_p U_p \left( \mu - \frac{1}{2} \right)$$

$$R = \frac{P_y}{P_T} = \sqrt{2\mu - 1} \quad K_1 = \frac{1}{R} = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}}$$



## 2.3 Недостатки использования спектра реакции



# 3 Уравнение энергетического баланса

$$\ddot{u} + 2\xi\omega\dot{u} + f(u, \dot{u}) = -\ddot{u}_g.$$

$$\int_0^t \ddot{u}\dot{u}dt + \int_0^t 2\xi\omega\dot{u}^2 dt + \int_0^t f(u, \dot{u})\dot{u}dt = -\int_0^t \ddot{u}_g\dot{u}dt,$$

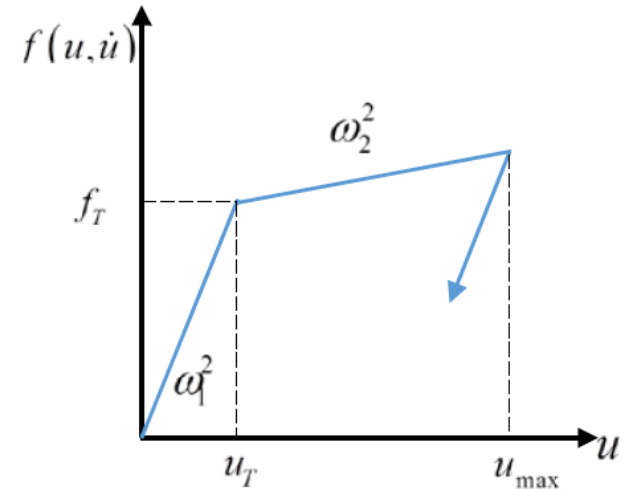
$$E_K + E_\xi + E_A = E_I,$$

$$E_K = \int_0^t M\dot{u}(t)d\dot{u} = \frac{1}{2}M\dot{u}^2 \text{ — относительная кинетическая энергия,}$$

$$E_\xi = \int_0^t c\dot{u}^2 dt \text{ — энергия демпфирования,}$$

$$E_A = \int_0^t F(u, \dot{u})\dot{u}dt, \quad E_A = E_S + E_H = \int_0^t F(u, \dot{u})\dot{u}dt,$$

$$E_I = -\int_0^t \ddot{u}_g\dot{u}dt \text{ — относительная входная энергия.}$$



$E_S = [f(u, \dot{u})]^2 / 2k = ku^2 / 2$  — потенциальная энергия упругой деформации,

$E_H$  — энергия, рассеянная посредством пластических деформаций (невозвратимая гистерезисная энергия).

$$E_A \leq f_{\max} \sqrt{\bar{t}} \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g^2 dt = f_{\max} \sqrt{\bar{t} SED} = ESED,$$

где  $\bar{t}$  — существенная продолжительность сейсмического воздействия,

$ESED$  — сейсмическая энергия, как функция от удельной плотности энергии,

$$SED = \int_0^{\bar{t}} \dot{u}_g^2 dt \text{ — удельная плотность энергии.}$$

## 4. Индексы интенсивности землетрясений

Обозначение	Название	Определение
<u>Связанные с ускорением</u>		
PGA	Пиковое ускорение основания ( <i>Peak ground acceleration</i> )	$PGA = \max  \ddot{u}_g(t) $ , где $\ddot{u}_g(t)$ ускорение на осциллограмме (acceleration on time history)
$I_A$	Интенсивность Ариаса ( <i>Arias intensity</i> - Arias 1970)	$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} \ddot{u}_g^2(t) dt$ , где $t_f$ - общая продолжительность (total duration)
CAV	Кумулятивная абсолютная скорость ( <i>Cumulative absolute velocity</i> - EPRI 1998)	$CAV = \int_0^{t_f}  \dot{u}_g(t)  dt$
$I_c$	Характерная интенсивность (Characteristic intensity - Park et al. 1985)	$I_c = a_{rms}^{1.5} \sqrt{t_d}$ ; где $a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_d} \int_{t_s}^{t_{os}} \ddot{u}_g^2(t) dt}$



## 4. Индексы интенсивности землетрясений

Связанные со скоростью		
PGV	Пиковая скорость основания ( <i>Peak ground velocity</i> )	$PGV = \max  \dot{u}_g(t) $ , где $\dot{u}_g(t)$ - скорость на осциллограмме (velocity on time history)
$I_F$	Интенсивность Файфера (Fajfar), ( <i>Fajfar intensity</i> - Fajfar et al. 1990)	$FI = PGV \cdot t_d^{0.25}$
CAD	Кумулятивное абсолютное перемещение (Cumulative absolute displacement - Mackie and Sojadinovic, 2003)	$CAD = \int_0^{t_f}  \dot{u}_g(t)  dt$
SED	Удельная плотность энергии ( <i>Specific energy density</i> )	$SED = \int_0^{t_f} [\dot{u}_g(t)]^2 dt$
Связанные с перемещением		
PGD	Пиковое перемещение основания ( <i>Peak ground displacement</i> )	$PGD = \max  u_g(t) $
$I_d$	Compound displacement-related intensity measure (Riddell and Garcia 2001)	$I_d = PGD \cdot t_d^{1/3}$

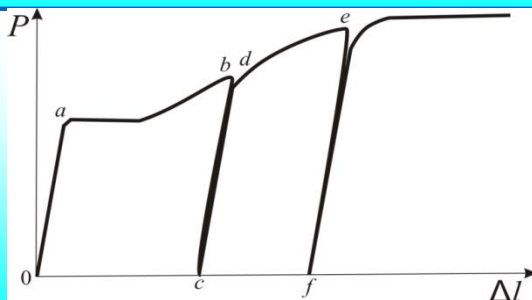
## 5. Характеристики акселерограмм в интервале активной фазы

Акселерограмма	PGA (g)	SED ( $m^2/c$ )	$T_p$ (с)	$t_{td}$ (с)	$t_{sd}$ (с)
Chi-Chi	0.44	2.54585	0.9	26.49	16.885
Friuli	0.35	0.14528	0.26	4.24	3.305
Kobe	0.51	0.16386	0.46	9.73	5.84
Kocaeli	0.36	0.31652	0.38	10.56	6.935
Northridge	0.93	0.40133	0.28	8.53	6.13
Ano Liosia_K	0.31	0.04719	0.22	4.41	2.97
Ano Liosia_S	0.24	0.02708	0.26	3.86	2.57
Avej	0.44	0.02806	0.18	6	3.96
Kozani	0.21	0.02262	0.2	6.46	4.27
Montenegro	0.27	0.02757	0.4	9.95	5.85

Примечание: PGA - пиковое ускорение грунта, SED – удельная плотность энергии,  $T_p$  – преобладающий период,  $t_{td}$  - общая продолжительность,  $t_{sd}$  - существенная продолжительность

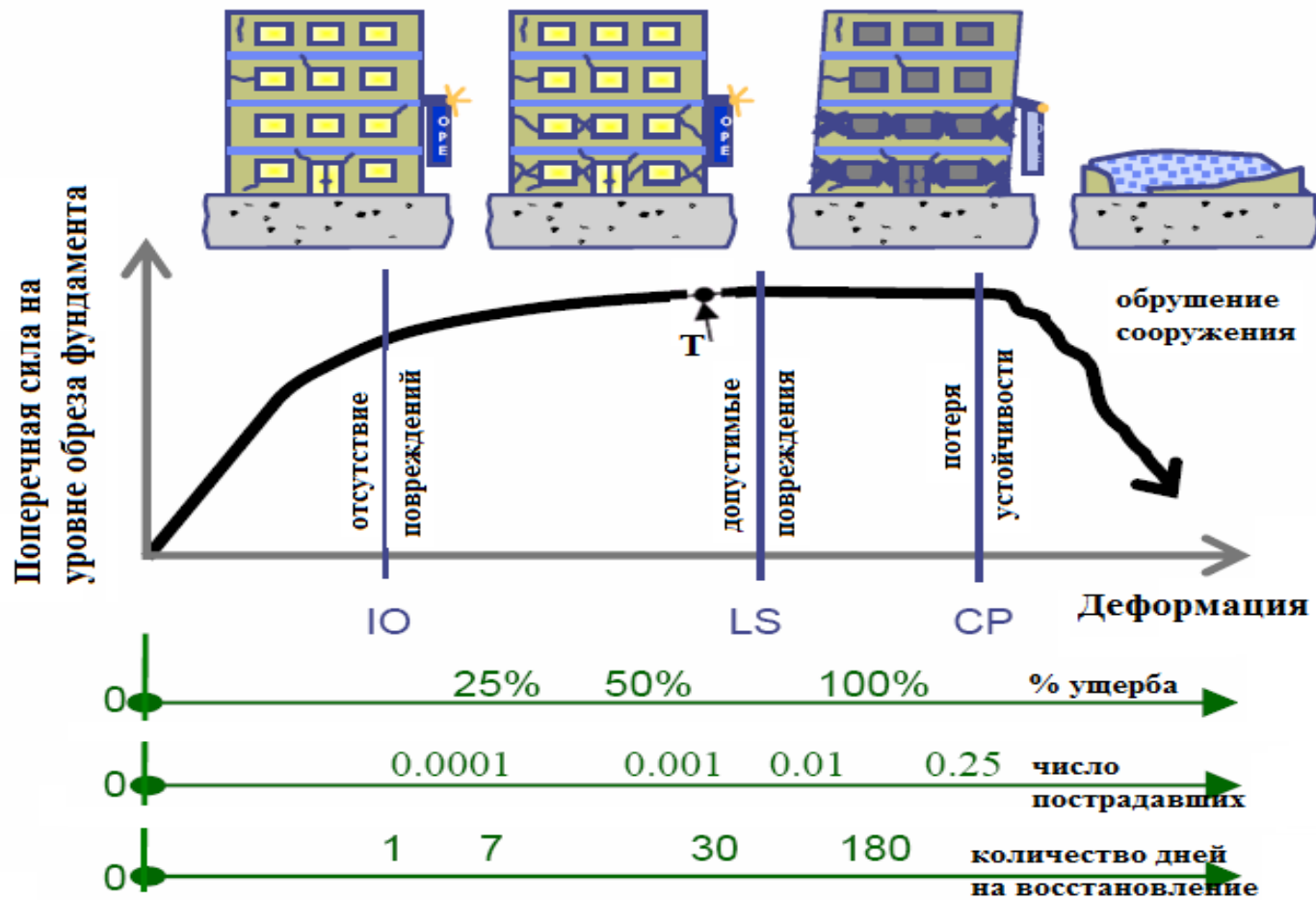
# Основные теоремы для обоснования концепции эквивалентных энергий

*Теорема 1. При повторных нагружениях происходит постепенное расходование потенциала несущей способности материала, пока он весь не окажется израсходованным. Тогда и наступает разрушение.*



*Теорема 2. Для разрушения материала должно быть затрачено определенное количество энергии, причем безразлично, будет ли эта энергия затрачена сразу одновременно или отдельными порциями за  $n$ -е число нагружений.*

# Принципы обеспечения сейсмобезопасности зданий и сооружений в зарубежных нормах



# Принципы обеспечения сейсмобезопасности зданий и сооружений в зарубежных нормах

Уровни сейсмического воздействия с периодом повторяемости, , лет	Требуемые рабочие характеристики здания			
	Полностью работоспособное	Работоспособное	Безопасное для проживания	Близкое к обрушению
	Отсутствие повреждений	Допустимые повреждения	Потеря устойчивости сооружения	Обрушение сооружения
Частые, 95 лет				
Редкие, 474 года				
Очень редкие, 2475 лет				

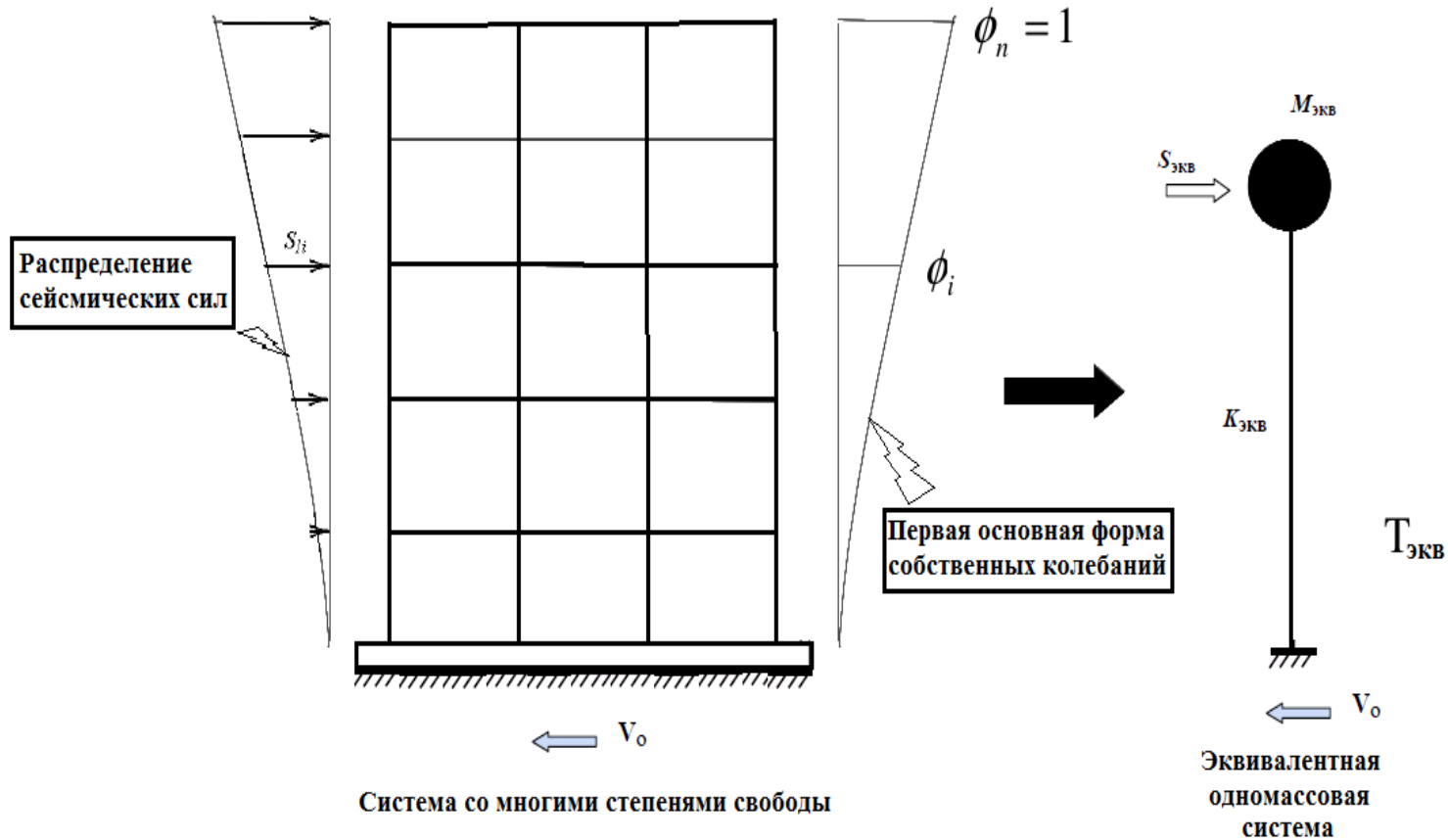
обозначения	Классификация зданий по уровню ответственности	
	Согласно SEAOC Vision 2000	Класс зданий согласно ГОСТ 27751-2014
	Неприемлемые характеристики	

	Performance for Ordinary Buildings Требования к обычным зданиям	КС-1, объекты пониженной ответственности
--	--	--

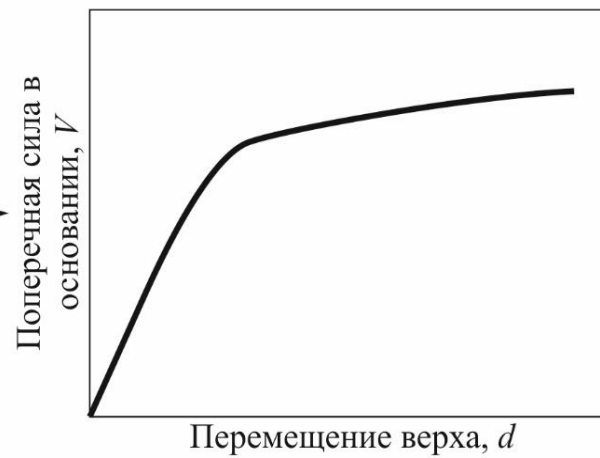
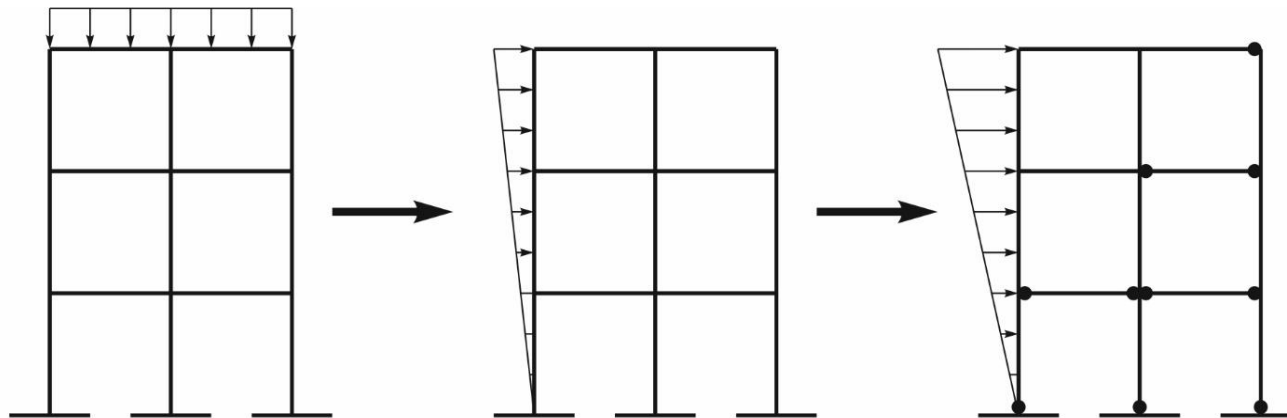
	Performance for Essential Buildings Требования к важным зданиям	КС-2, объекты нормальной ответственности
--	--	--

	Performance for Hazardous Facilities Требования к опасным объектам	КС-3, здания и сооружения особо опасных и технически сложных объектов, объекты повышенной ответственности
--	---	---

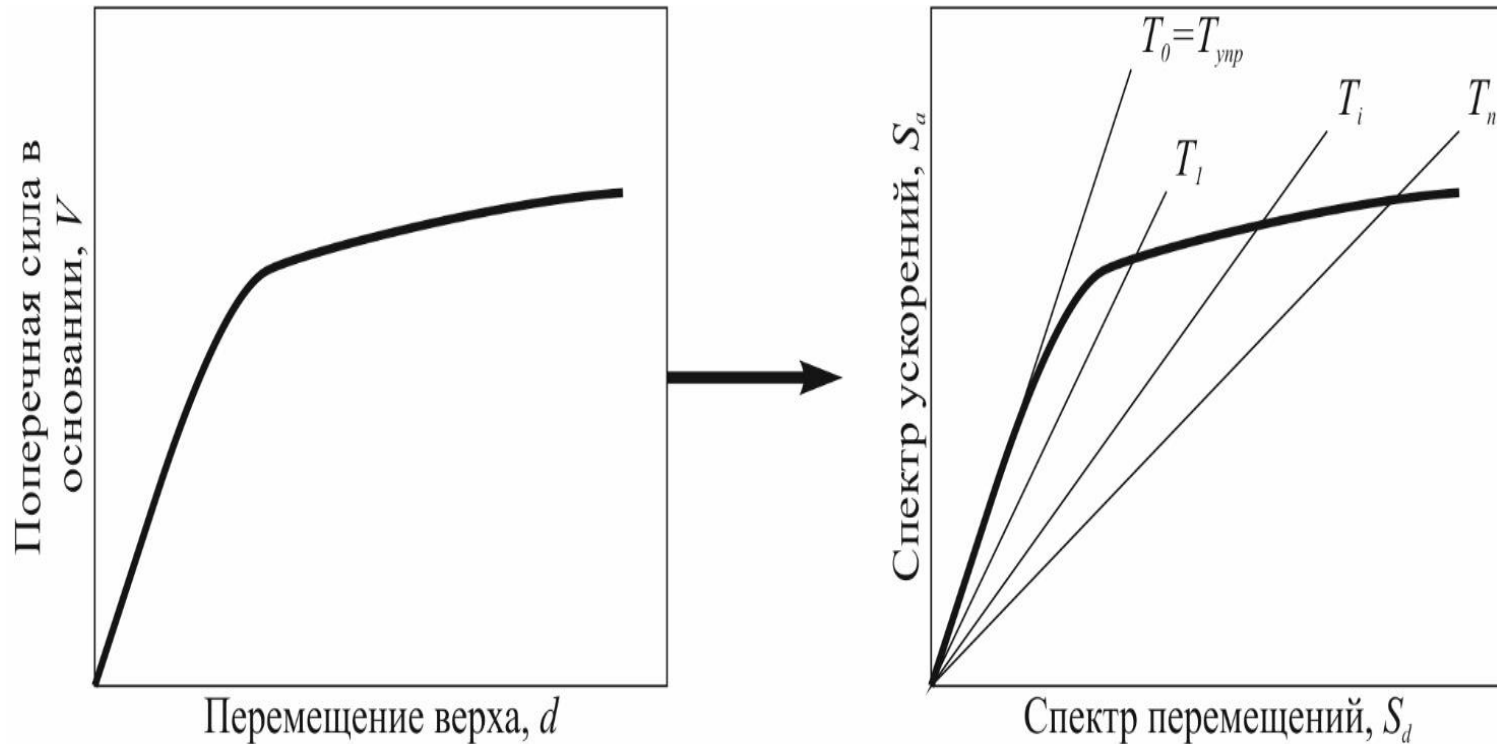
# Нелинейный статический метод (Pushover Analysis)



# Нелинейный статический метод (Pushover Analysis)

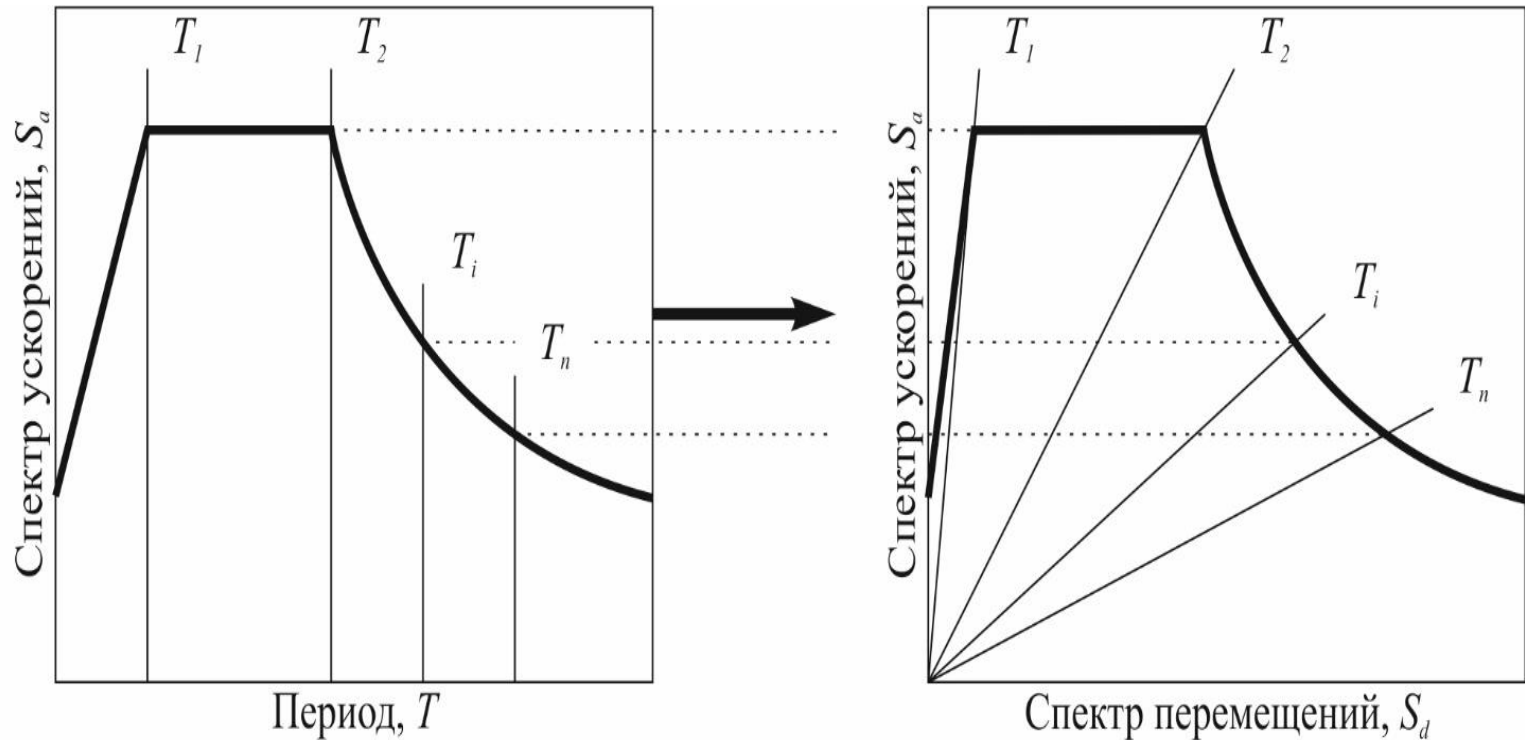


# Преобразование кривой несущей способности в спектр несущей способности

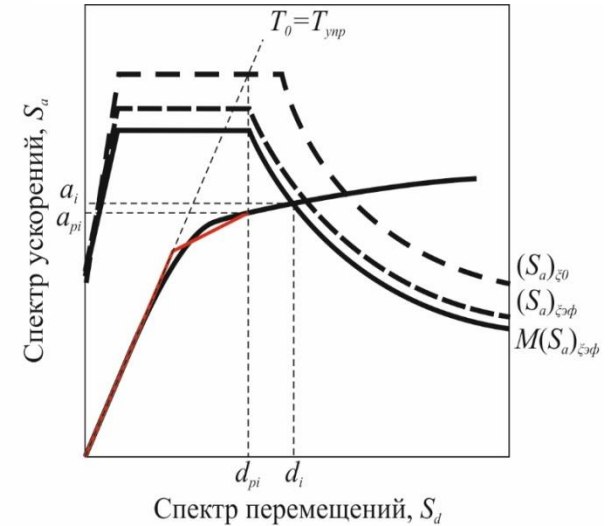
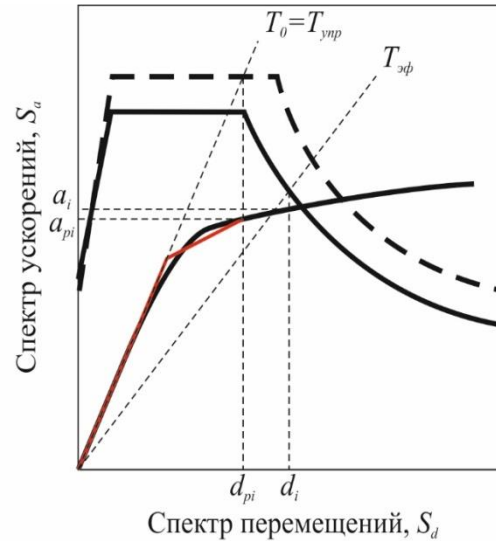
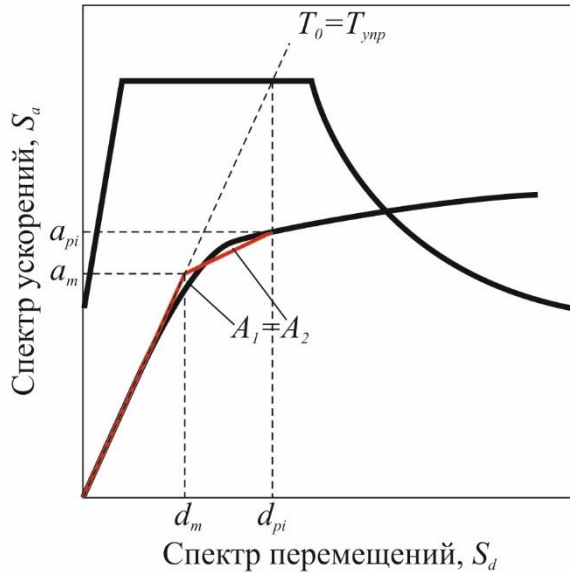




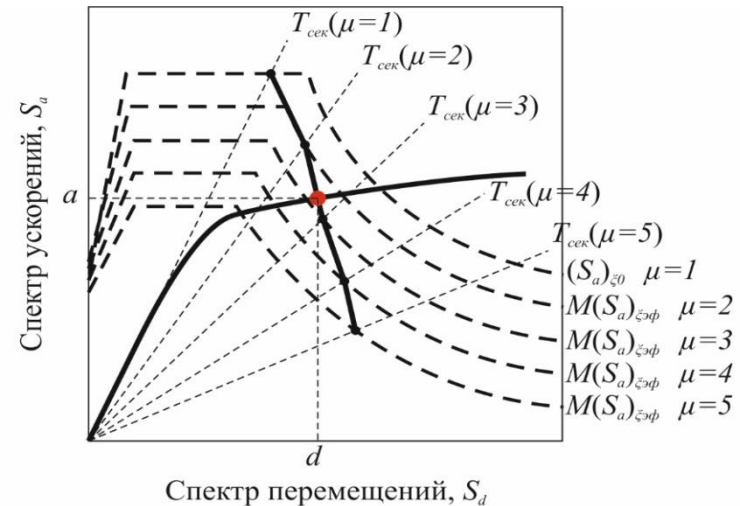
# Преобразование расчетного спектра в формат ADRS



# Определение характеристической точки

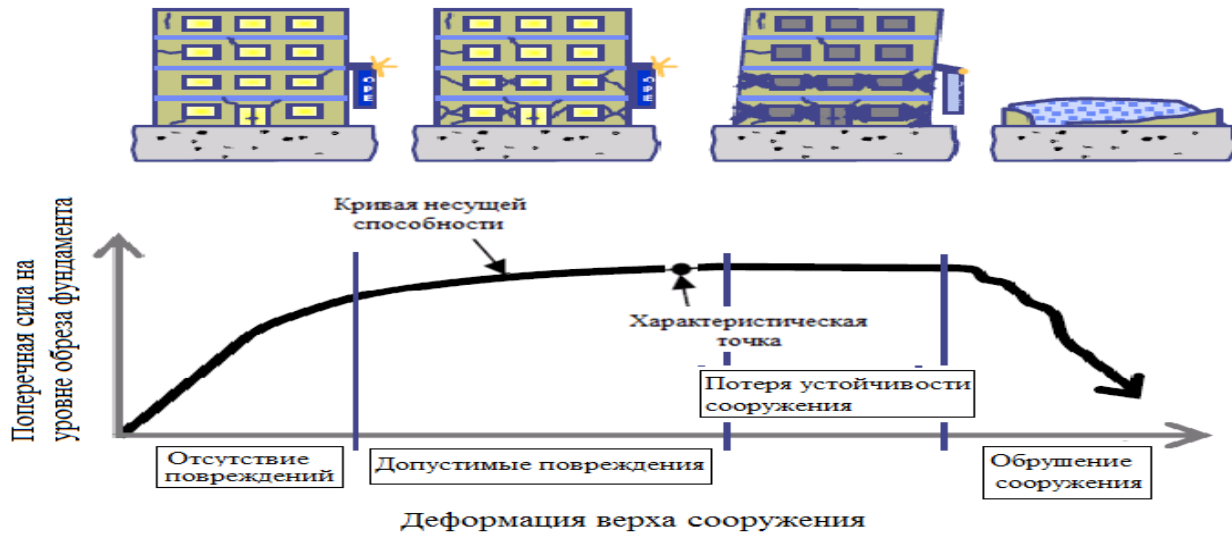
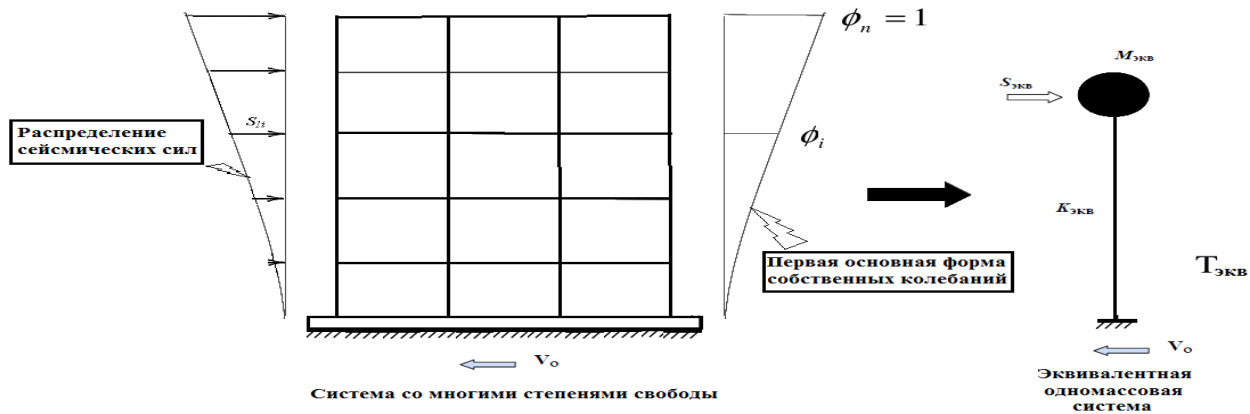


$$\alpha = \left( \frac{a_{pi} - a_m}{d_{pi} - d_m} \right) / \left( \frac{a_m}{d_m} \right)$$

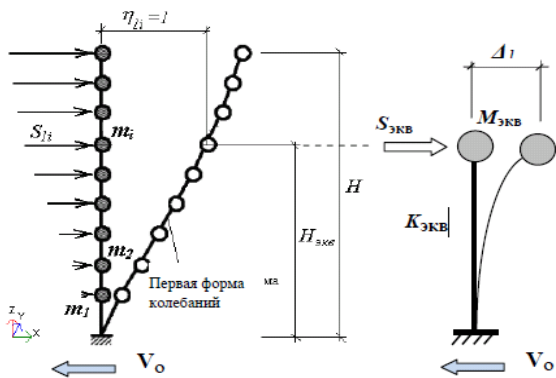
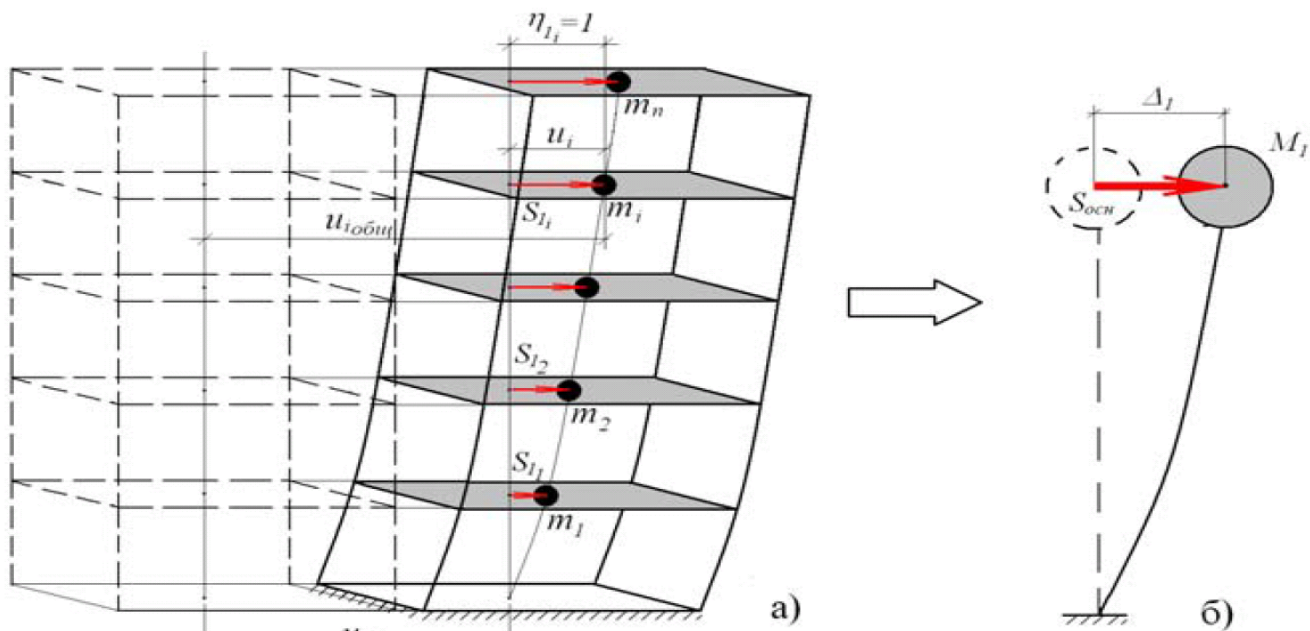


ЛИРА  
СОФТ

# Нелинейный статический метод

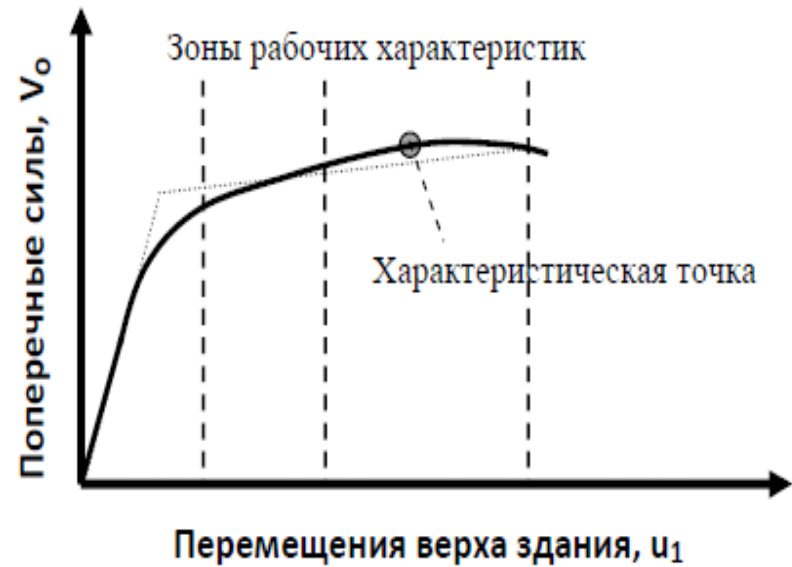
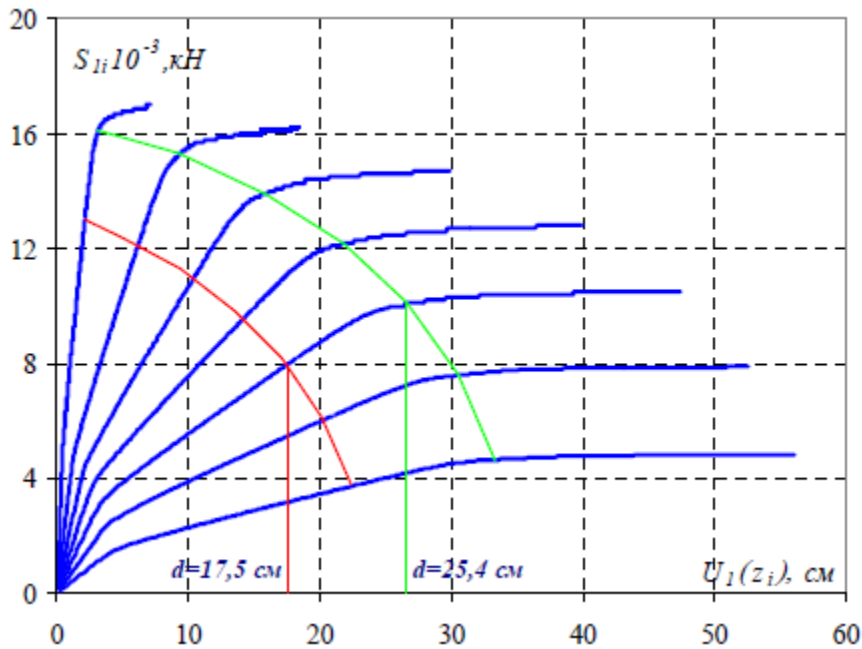


# I этап. Преобразование многомассовой системы в одномассовую

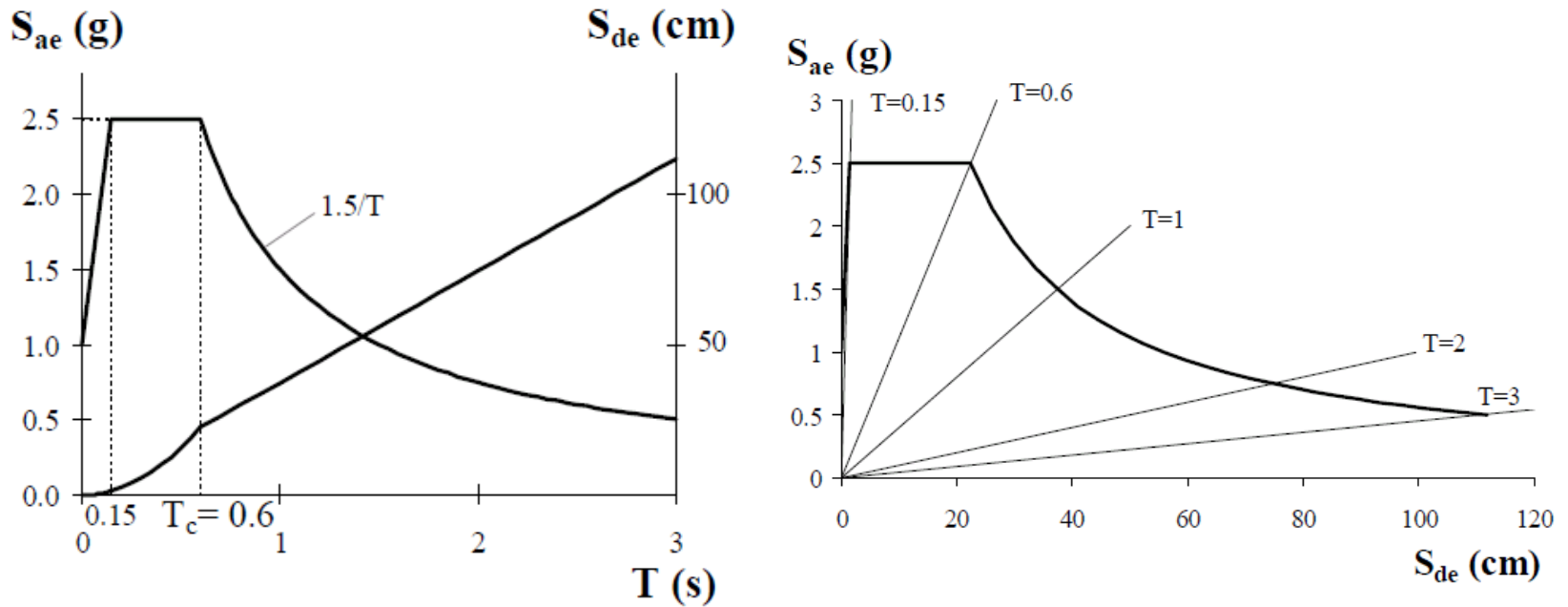


$$T_{ЭКВ} = 2\pi \sqrt{\frac{M^*}{K^*}}, \quad (1), \quad \text{где} \quad K_{ЭКВ} = K^* = \frac{F_y^*}{u_y}. \quad (2)$$

## II этап. Построение кривой несущей способности сооружения



III этап. Построение спектра воздействия, как функции спектра ускорения от спектра перемещения

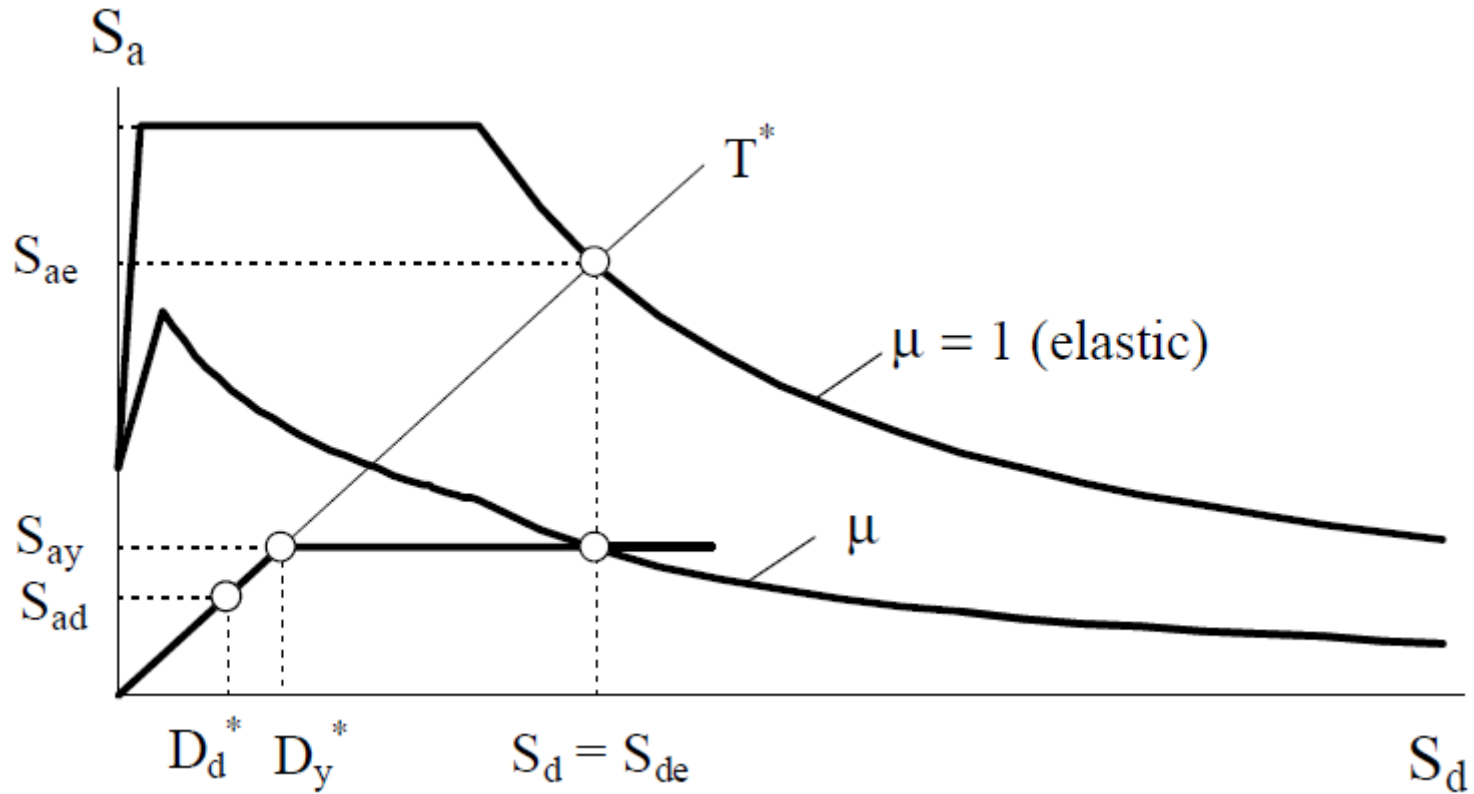


$$S_a = \omega^2 S_d. \quad (3)$$

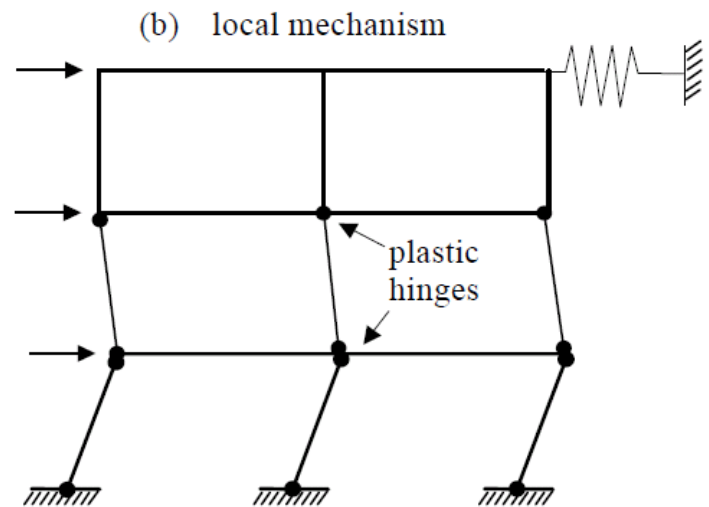
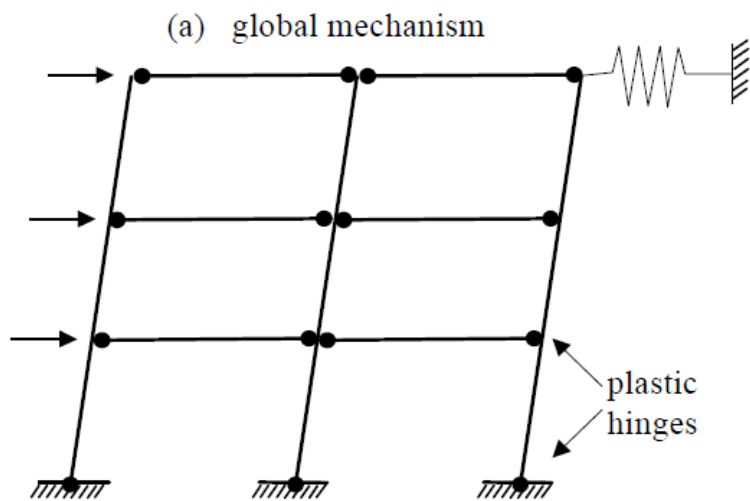
или

$$S_{di} = \frac{T_i^2}{4\pi^2} S_{ai} g, \quad (4)$$

IV этап. Наложение спектра несущей способности на спектр воздействия и определение точки состояния

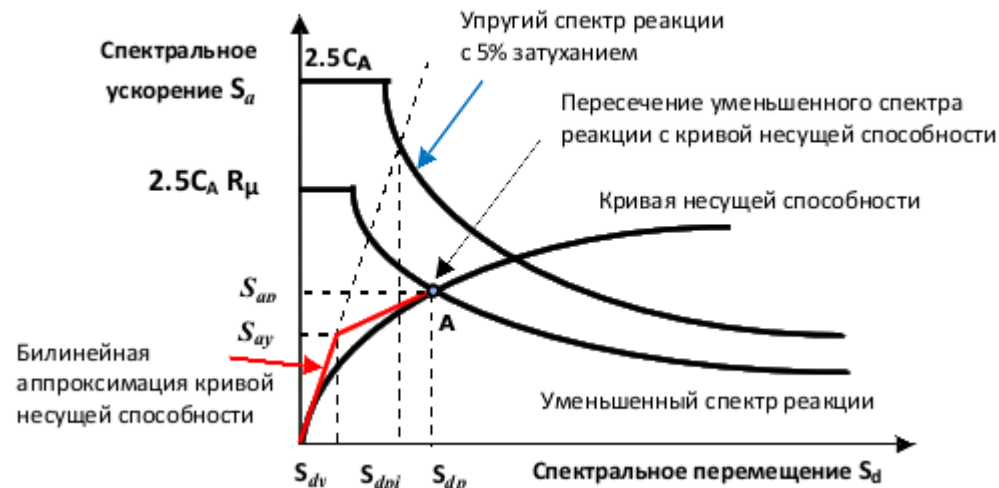


# V этап. Определение глобального механизма обрушения системы





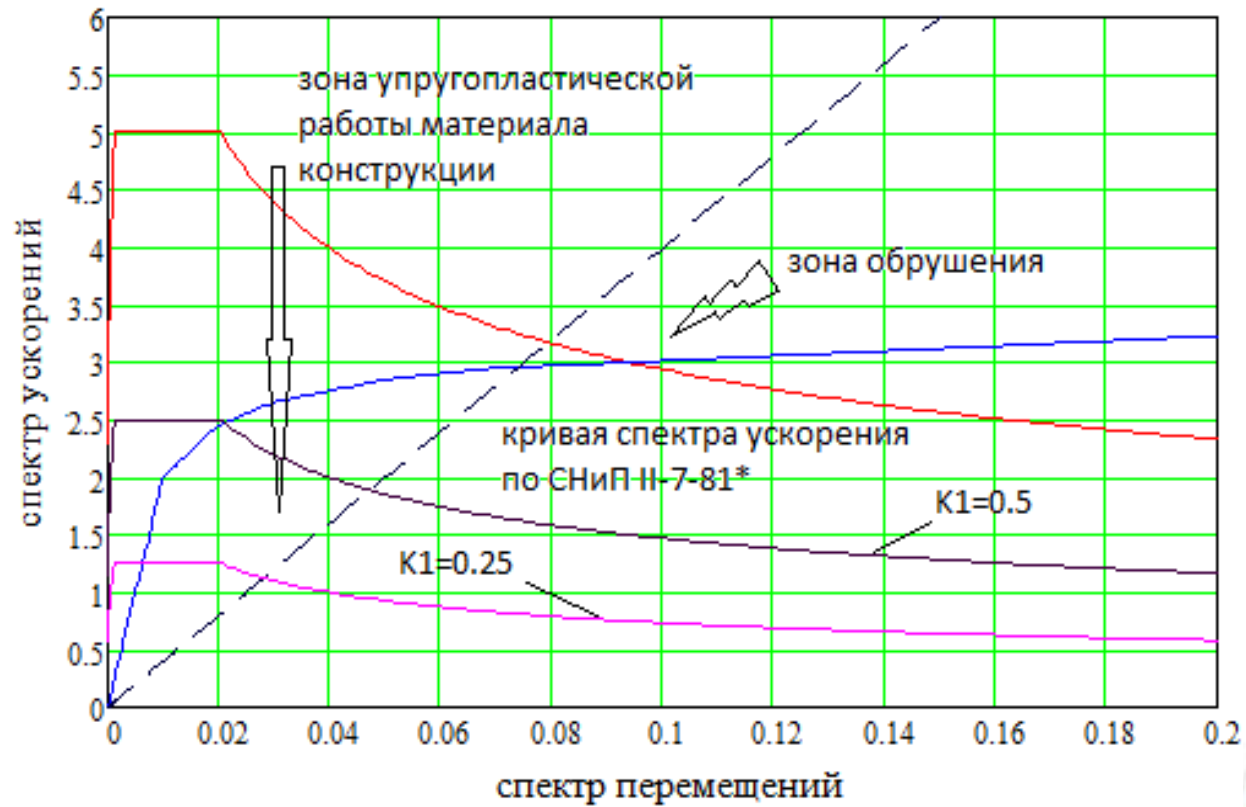
VI этап. Построение уменьшенного спектра реакции с применением коэффициентов редукции  $R_\mu$  (если система позволяет). Точка А определяет резерв несущей способности конструкции, запроектированной по ЛСМ



## VII этап. Проверка рабочих характеристик путем сравнения с нормативными требованиями

<b>Пределы рабочих характеристик, удовлетворяющих требованиям</b>				
Пределы межэтажных перекосов	Возможность незамедлительного заселения	Допустимые повреждения	Безопасность жизнедеятельности	Устойчивость конструкции
Общий максимальный перекося	0,01	0,01...0,02	0,02	$0,03 \frac{V_i}{P_i}$
Максимальный неупругий перекося	0,005	0,005...0,015	Нет ограничений	Нет ограничений

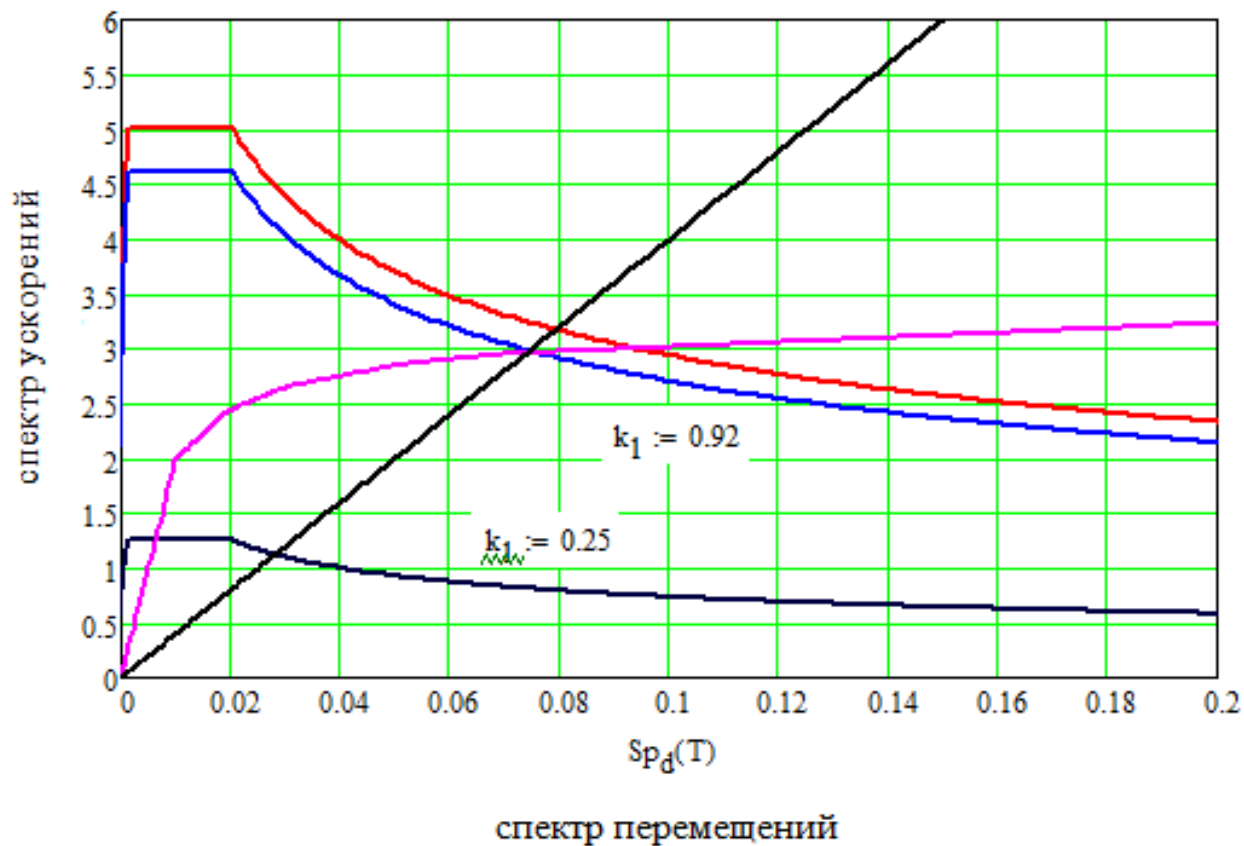
# Наложение кривой несущей способности на спектр ускорения, построенного по СНиП II-7-81\*



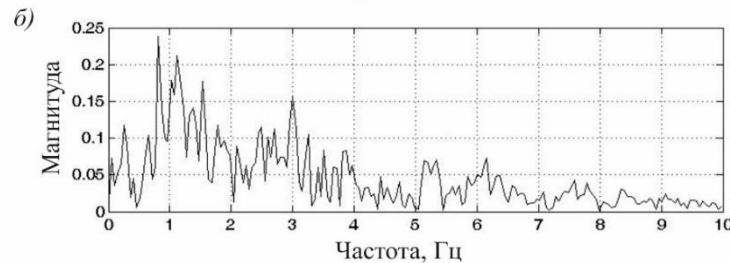
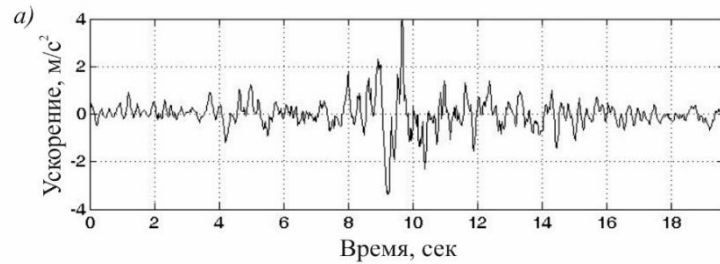
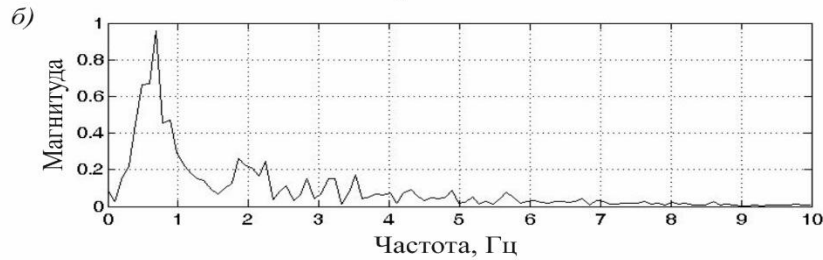
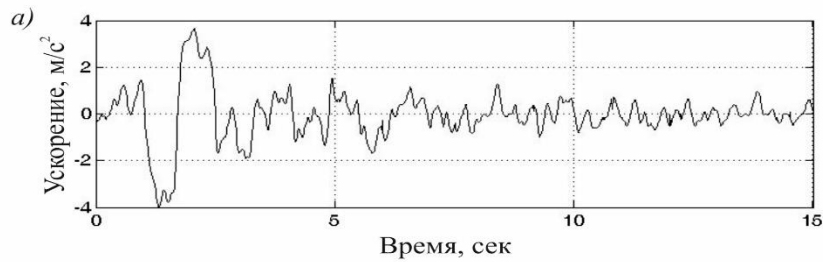
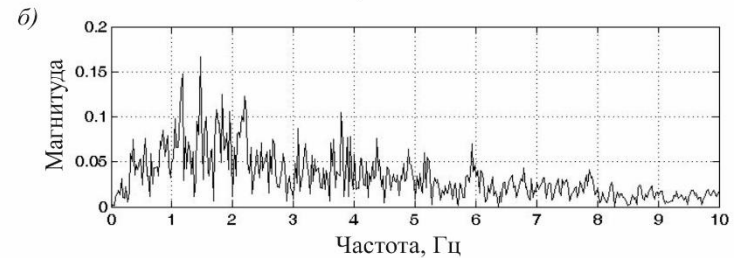
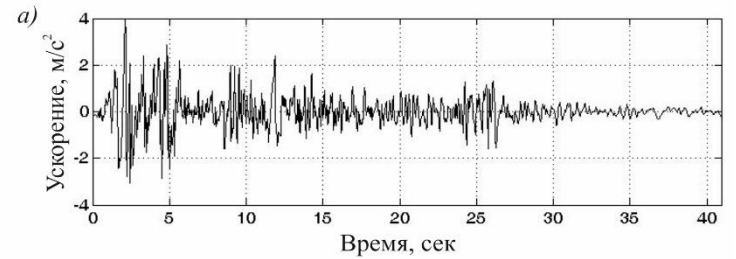
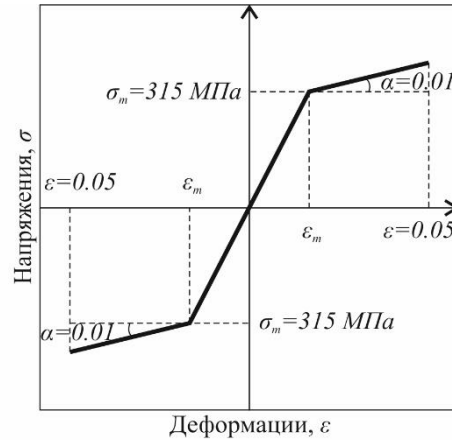
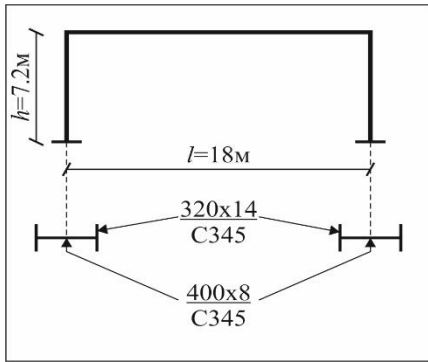
Для сравнения покажем как будет располагаться спектральная кривая если принять коэффициент

$$K_1 = 0.25$$

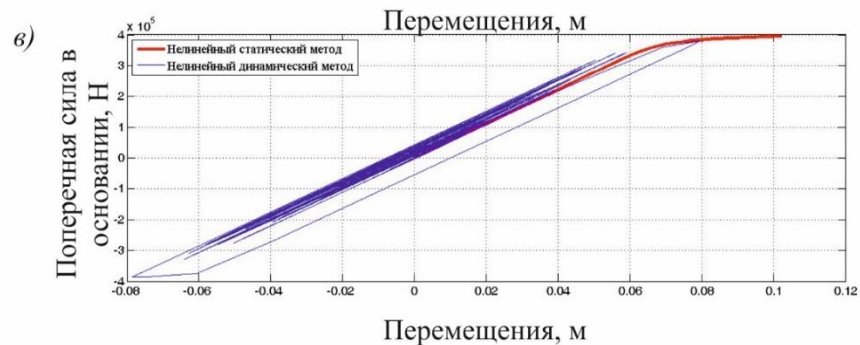
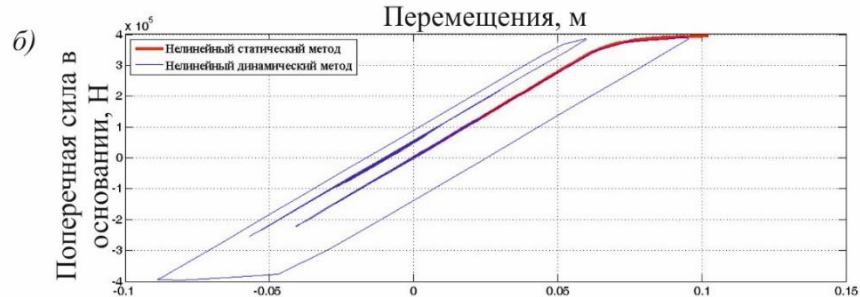
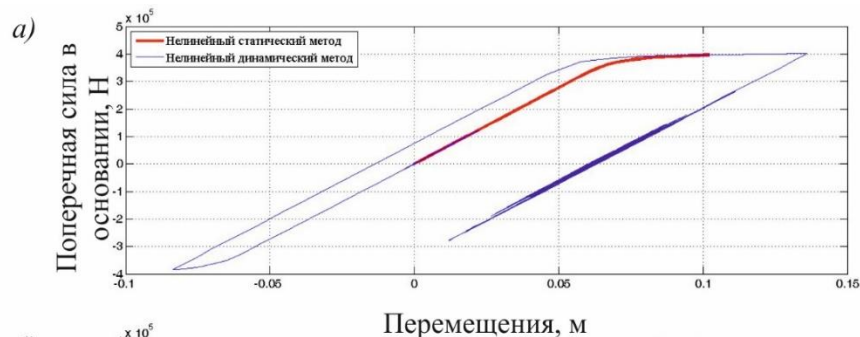
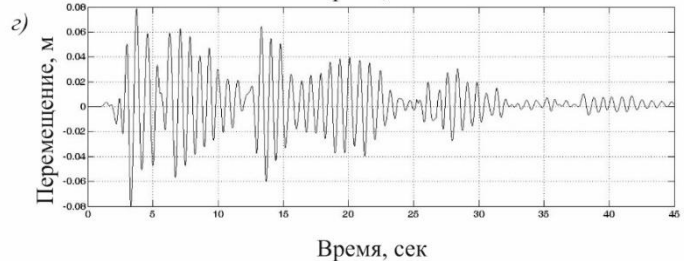
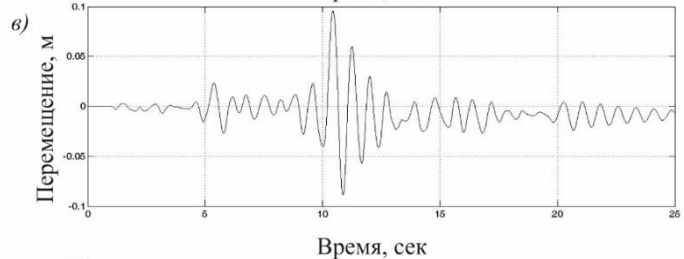
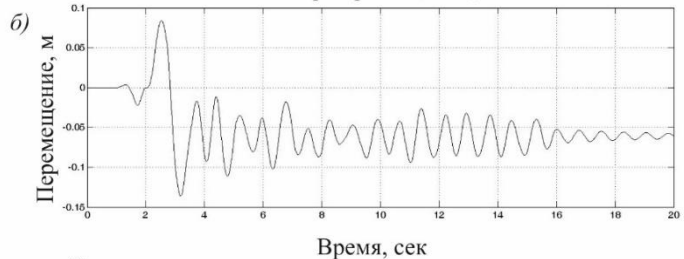
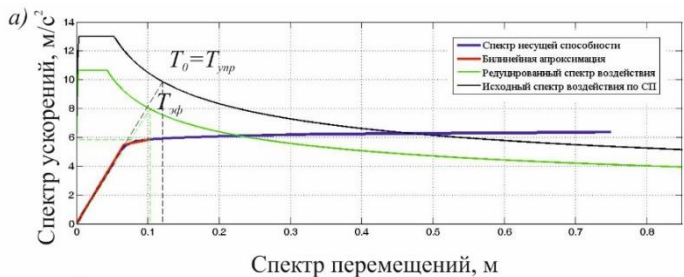
$$K_1 = 0.92$$



# Оценка точности нелинейного статического метода



# Оценка точности нелинейного статического метода



# Оценка точности нелинейного статического метода

	Доминирующая частота воздействия, Гц	Разница с основной собственной частотой конструкции, %	Магнитуда	Максимальное перемещение верха, м	Разница с нелинейным статическим методом, %
Нелинейный статический метод	-	-	-	0.103	-
Бухарестское землетрясение	0.684	-52.99	0.958	0.136	32.04
Спитакское землетрясение	0.815	-43.99	0.238	0.095	-7.77
Калифорнийское землетрясение	1.47	1.03	0.166	0.080	-22.33

# Основные выводы

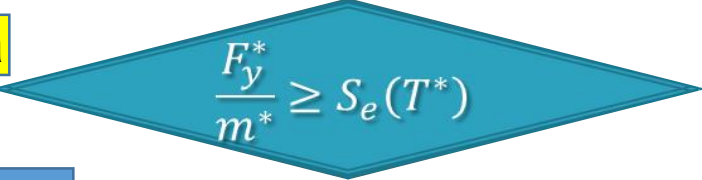
1. Предложена методика нелинейного статического анализа.
2. Апробация предложенной методики нелинейного статического расчета в сравнении с нелинейным динамическим расчетом показала приемлемые результаты для Спитакского землетрясения и большие расхождения для Бухарестского и Калифорнийского землетрясений.
3. Это связано с тем, что:
  - а) Бухарестское землетрясение содержит узкий спектр частот, сосредоточенный на частоте, близкой к основной частоте колебаний конструкции. Это приводит к неконсервативной оценке реакции системы с помощью нелинейного статического метода;
  - б) Спитакское землетрясение содержит несколько доминантных частот, близких к основной частоте колебаний конструкции. Таким образом, нелинейный статический метод с использованием проектного спектра воздействия достаточно точно описывает реакцию системы;
  - в) Калифорнийское землетрясение содержит широкий спектр частот, которые вносят свой вклад в реакцию конструкции. Тем самым, расчет нелинейным статическим методом по первой форме колебаний завышает реакцию системы.
4. Проведенное исследование показывает значимость высших форм колебаний и необходимость анализа их влияния на реакцию системы.



# Нелинейный статический расчет

Диапазон краткосрочного периода  
 $T^* < T_C$

Да



Нет

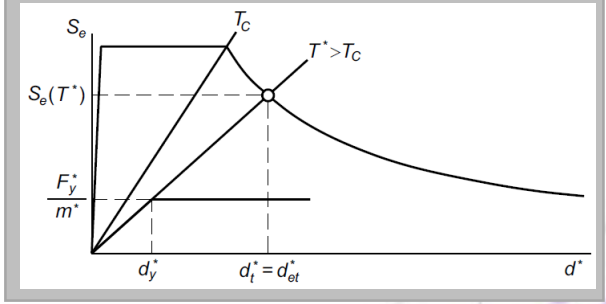
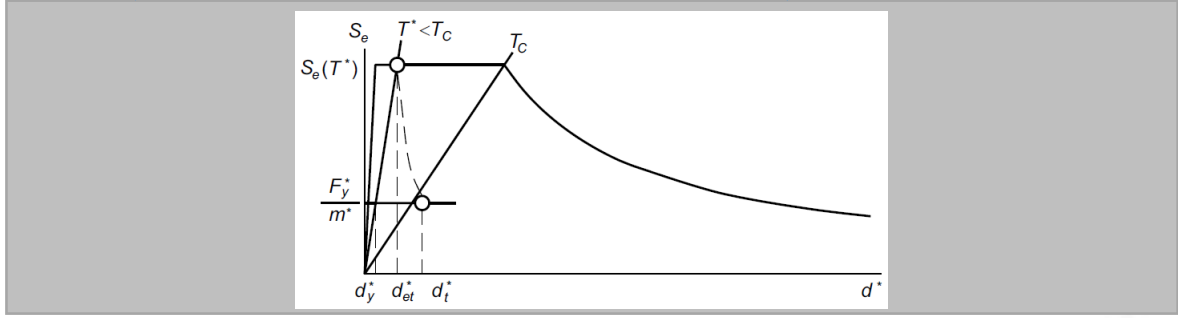
$$d_t^* = d_{et}^*$$

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \cdot \left( 1 + (q_u - 1) \cdot \frac{T_C}{T^*} \right) \geq d_{et}^*$$

$$q_u = \frac{S_e(T^*) \cdot m^*}{F_y^*}, d_t^* \leq 3 \cdot d_{et}^*$$

Диапазон среднесрочного и долгосрочного периодов  
 $T^* \geq T_C$

$$d_t^* = d_{et}^*$$



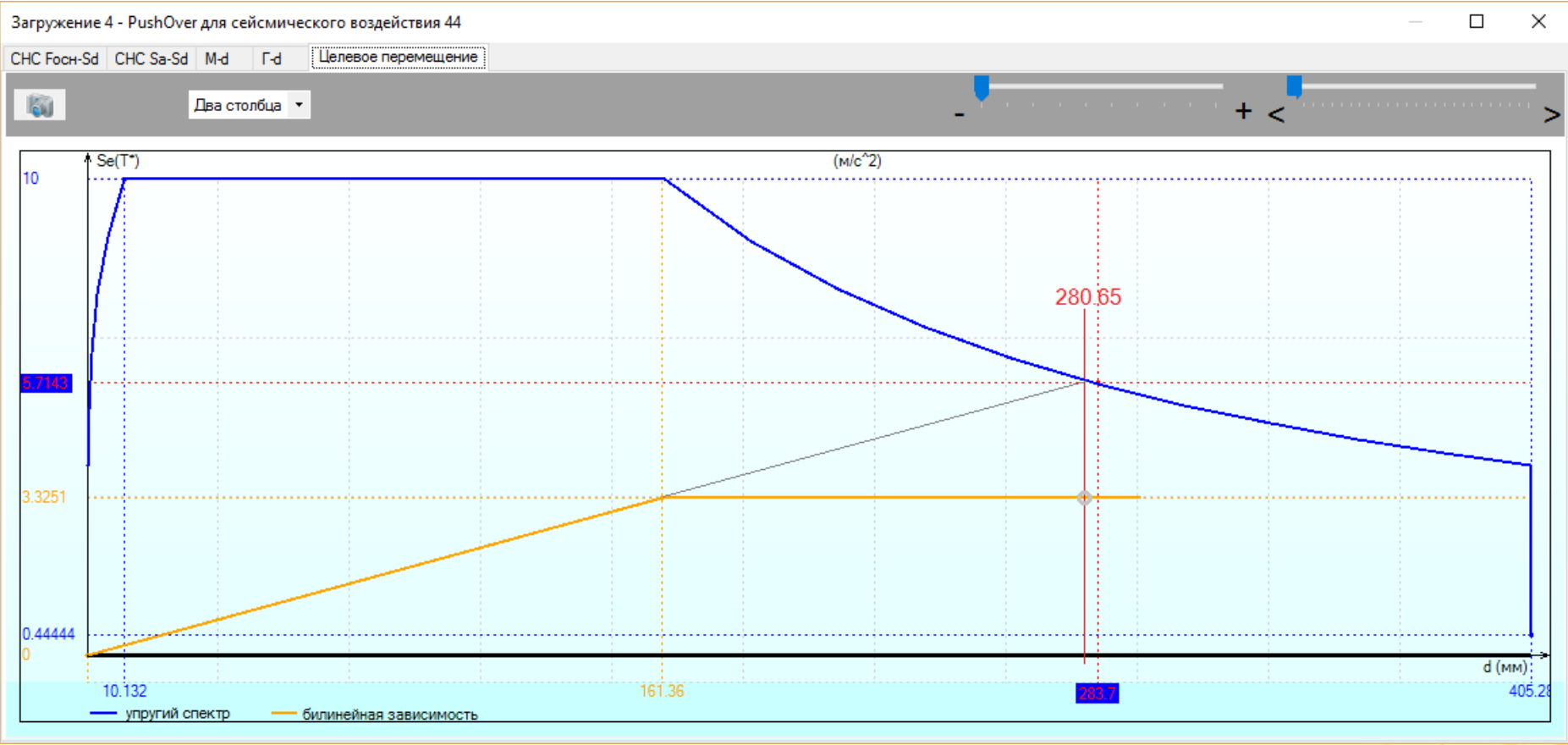
Целевое перемещение для системы

со многими степенями свободы

$$d_t = \Gamma \cdot d_t^*$$



# Нелинейный статический расчет



Перемещение эквивалентной системы с одной степенью свободы  
 Коэффициент преобразования  
 Целевое перемещение для системы со многими степенями свободы

$$d_t^* = 280.65 \text{ мм}$$

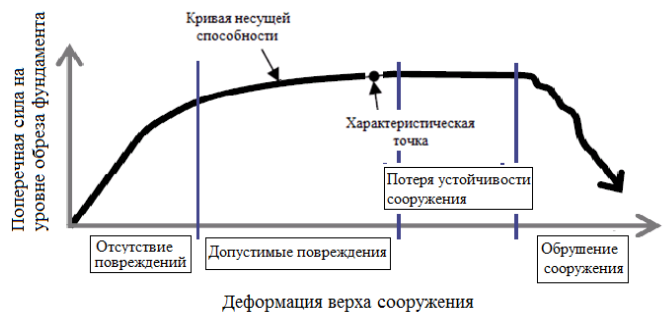
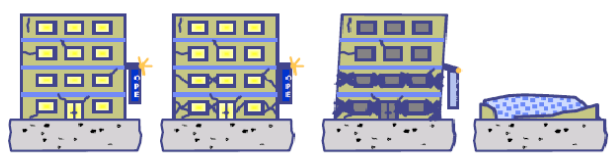
$$\Gamma = 1.4932$$

$$d_t = 419.07 \text{ мм}$$

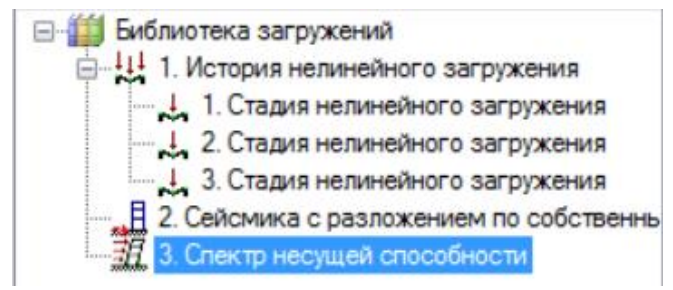
Диаграмма определения целевого перемещения



# График кривой несущей способности



- В задаче будут присутствовать нелинейные элементы
- В задаче будет использоваться система « МОНТАЖ »
- В задаче будет использоваться система « ДИНАМИКА + »
- В задаче будет использоваться система « МОСТ »
- В задаче будет использоваться система « PUSHOVER »



6.400-1  
Загр.1. Лок.загр.6, шаг=67.

1. Расчетная схема:  
 - Уравнений 650  
 - Элементов 170  
 - Узлов 135  
 - Загружений 6  
 - Физ.нелинейность

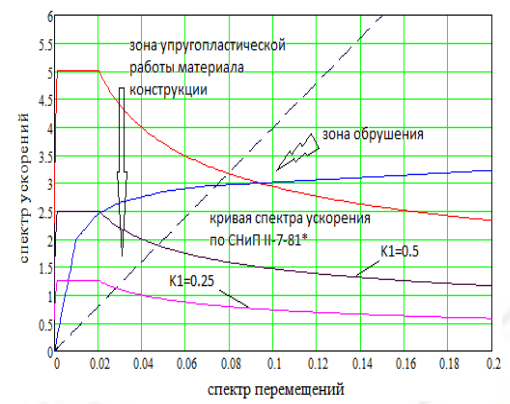
2. Расчет:  
 - Шагов

3. Ресурсы:  
 - Диск.память 1.419 М  
 - Время расчета 1-2 мин.

РАЗРУШЕНИЯ:  
 Разрушение элемента  
 Растяжение  
 Трещины  
 Сжатие

М183x 15:42 29\_ Геометрически изменяемая система.ТИП СВЯЗИ 1. УЗЛЫ:  
 I:0x 124.  
 S160x 15:42 48\_ Вывод перемещений.

Отмена 15:42





## Наложение спектра несущей способности на спектр воздействия и определение точки состояния

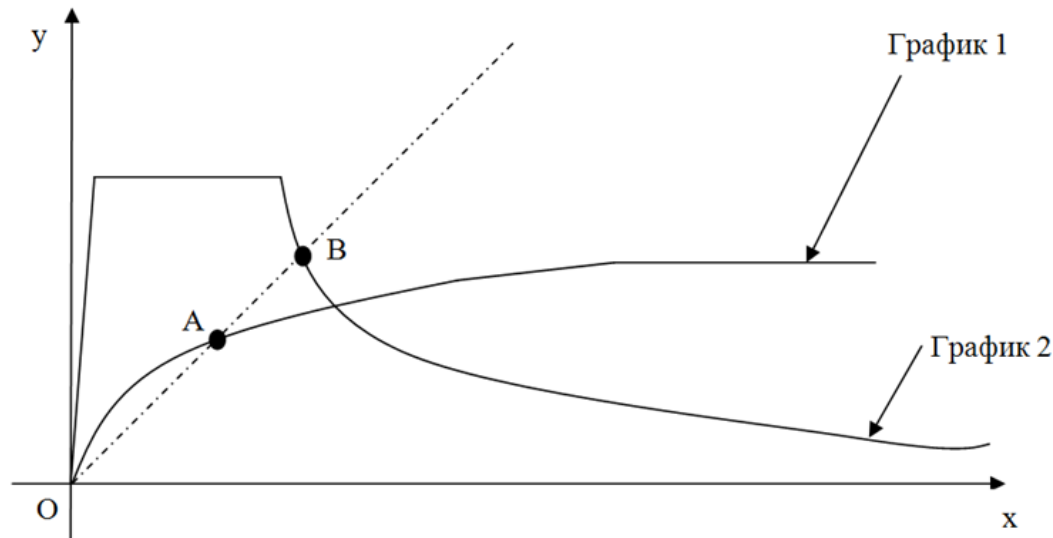


График 1:  $Q^{осн}$  ( $u$  точка в перекрытии)

Кривая несущей способности

График 2  $SPa(SPd)$

График «сейсмического требования»

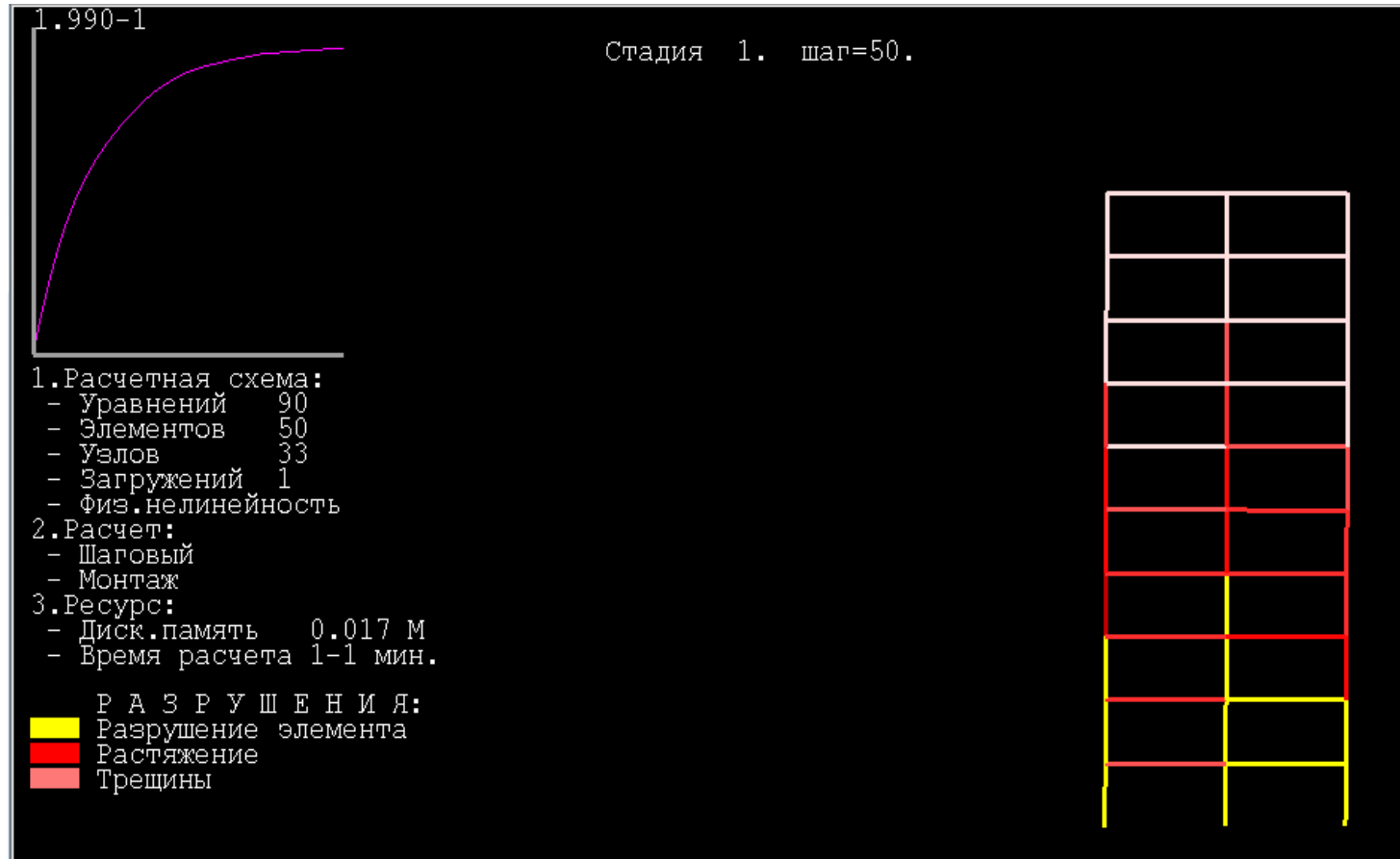
$$SPa = \beta g K_c K_{\psi}$$

$$SPd = \frac{SPa}{\omega^2}$$

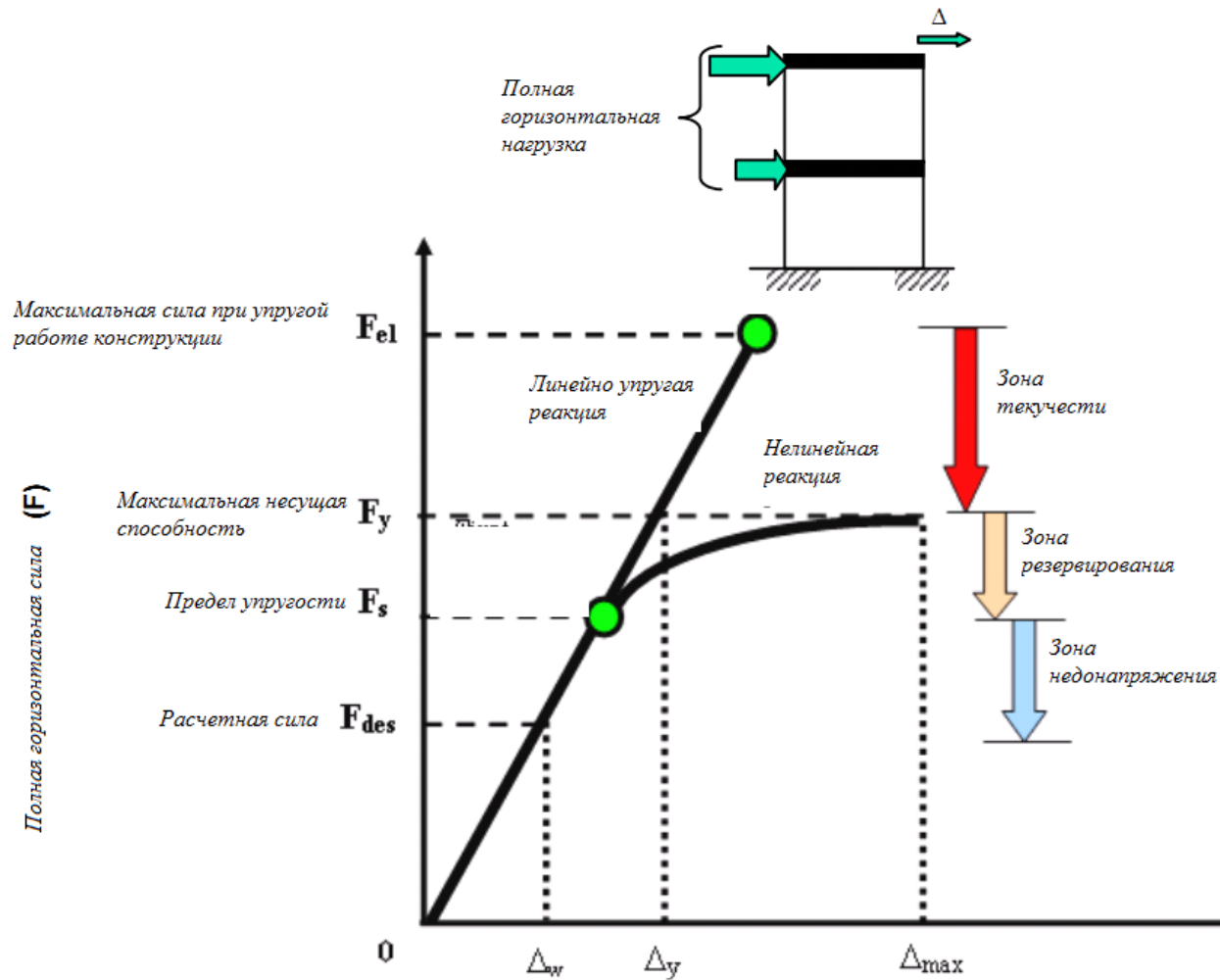
При этом коэффициент редукции определяется как:  $K_1 = \frac{OA}{OB}$



# Обрушение конструкции



# Концепция коэффициента редукции R (или k1)

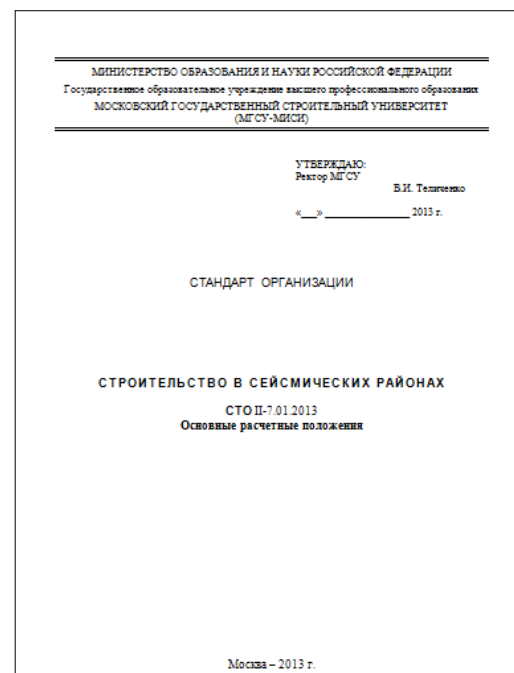


## Основные выводы

Предложен подход количественной оценки сейсмического риска, формализующий принятие решений по антисейсмическим мероприятиям.

Разработаны нормы сейсмостойкого строительства, позволяющие проектировать здания и сооружения с заданным уровнем сейсмостойкости.

Разработанный в МГСУ СТО использует достижения современных методов расчета, он гармонизирован с Еврокодом 8 и не противоречит системе отечественных нормативных документов.



# Спасибо за внимание!



[www.lira-soft.com](http://www.lira-soft.com)



Москва, Дмитровское ш. д.  
60а  
Тел./факс +7 (499) 922-00-02  
[lira@lira-soft.com](mailto:lira@lira-soft.com)

Техническая поддержка  
[support@lira-soft.com](mailto:support@lira-soft.com)

9.6 10.0 10.2 10.4 10.6