

Перельмутер А.В. (SCAD Soft, Киев)
Кабанцев О.В. (НИУ МГСУ, Москва)

О МЕТОДАХ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА ПРИ ВНЕЗАПНОМ ОТКАЗЕ ЭЛЕМЕНТА НЕСУЩЕЙ СИСТЕМЫ

Предварительные замечания

Доклад посвящен **методике** расчетного анализа и прогноза НДС несущей системы в условиях отказа несущего элемента в целях оценки устойчивости к прогрессирующему обрушению.

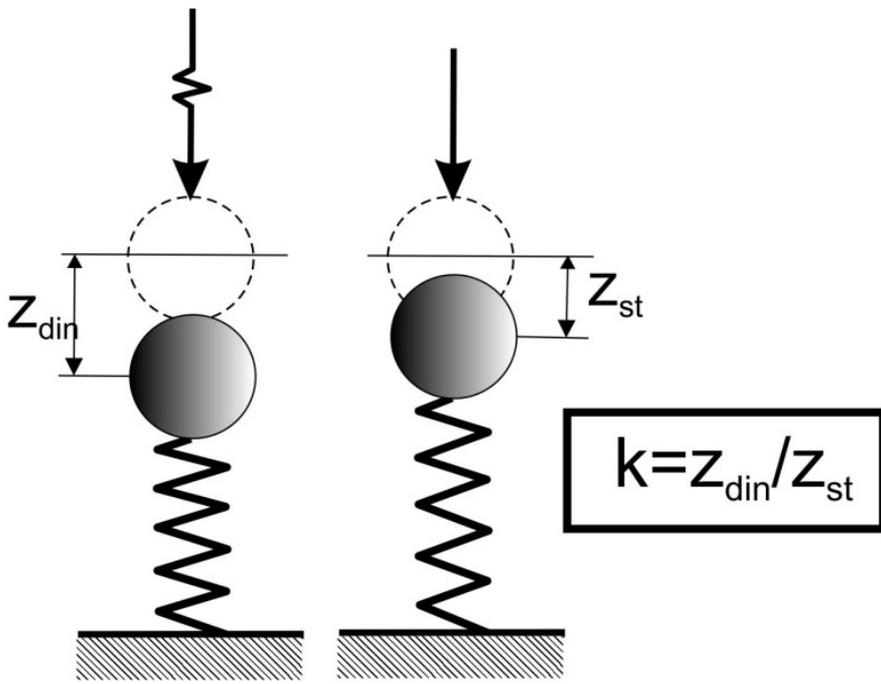
В качестве инструмента исследования использован программный комплекс SCAD, но это не является принципиальным.

Примеры демонстрируют поведение **стальных несущих конструкций**. Это сделано для того, чтобы можно было абстрагироваться от специфических особенностей работы железобетона при высоких скоростях деформирования.

Постановка задачи

Проверку конструкции на прогрессирующее обрушение традиционно производят по методу **квазистатического расчета**, где к системе с удаленным элементом прикладывают реакцию этого элемента, взятую с обратным знаком и с некоторым **коэффициентом динамичности**.

В силу своей простоты, расчет, основанный на использовании коэффициента динамичности, пользуется популярностью. Кроме того, для системы **с одной степенью свободы**, на которую действует кратковременная нагрузка, **известна верхняя оценка** коэффициента динамичности ($k_d = 2,0$).



Квазистатический расчет с использованием коэффициента динамичности **обоснован лишь** для систем с **одной степенью свободы**.

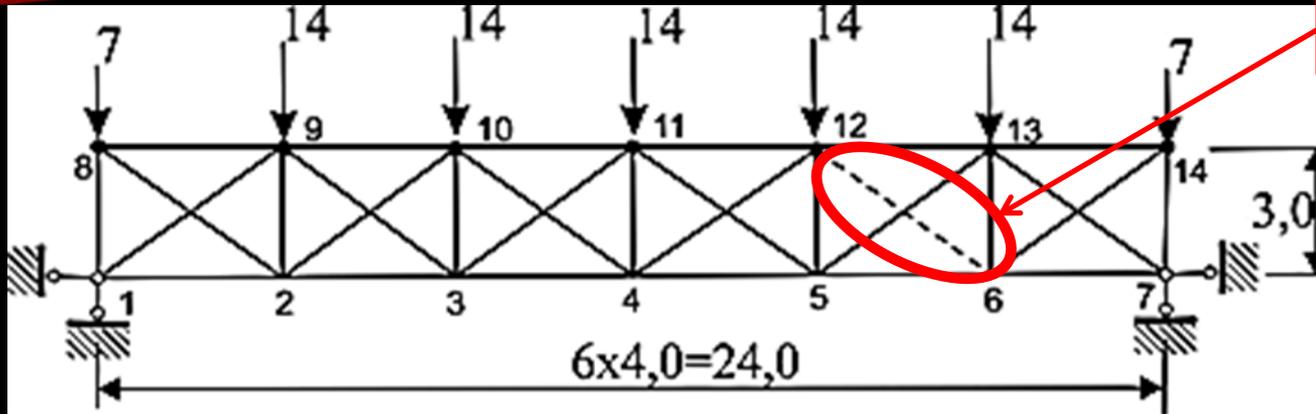
Тогда коэффициент динамичности определяется как соотношение перемещений, вызванных одной и той же нагрузкой при ее динамическом и статическом воздействии.

Корректные результаты можно получить в тех случаях, когда **форма движения системы близка к форме ее статического равновесия без удаленного элемента**.

Лишь тогда можно говорить о соотношении перемещений, общем для всех узлов системы.

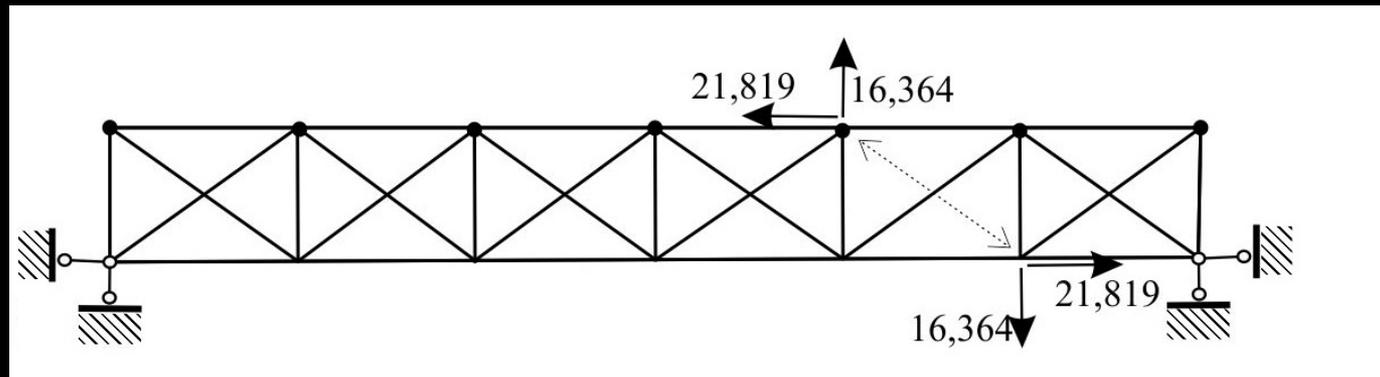
Для анализа корректности результатов расчетов **НЕОБХОДИМО проверить динамическое поведение системы**.

Тестовая задача (Бондарев Ю.В., Нгуен Тханх Суан. 2010)



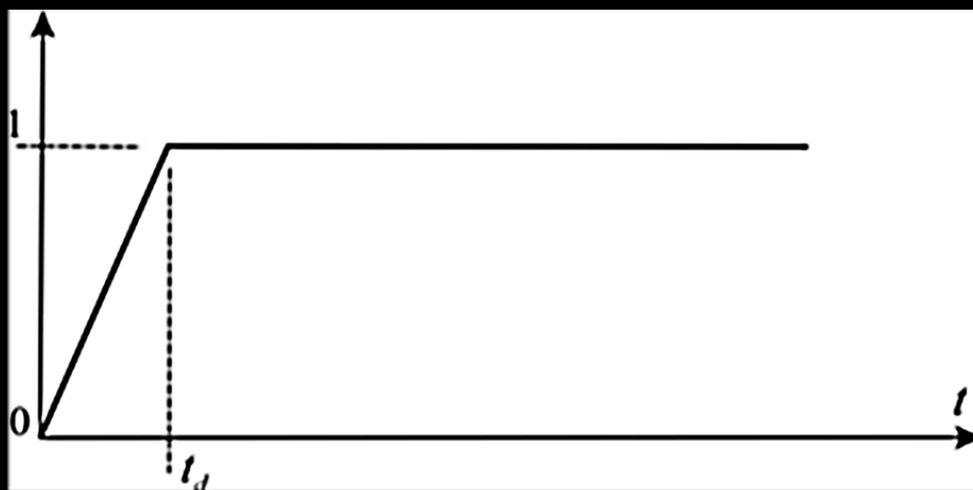
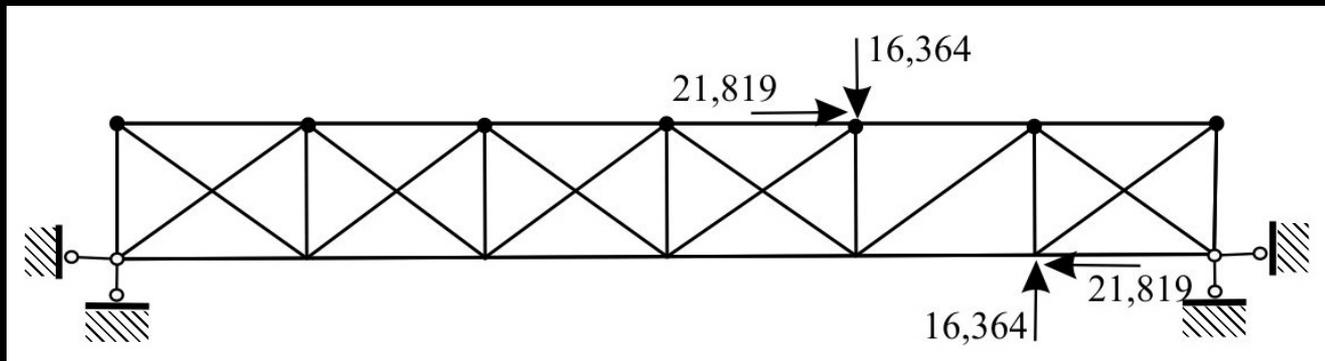
Отказ элемента конструкции

Эквивалентная расчетная схема



Физическое выбытие раскоса 6-12 связано с внезапным (очень быстрым) исчезновением нагрузок, указанных на эквивалентной схеме, что в расчете реализуется созданием нового нагружения с противоположно направленными силами, которые **возрастают во времени от нуля (начало процесса) до полного значения.**

Эквивалентная расчетная схема с новым нагружением (с противоположно направленными силами), которые **возрастают во времени** от нуля (начало процесса) до полного значения.

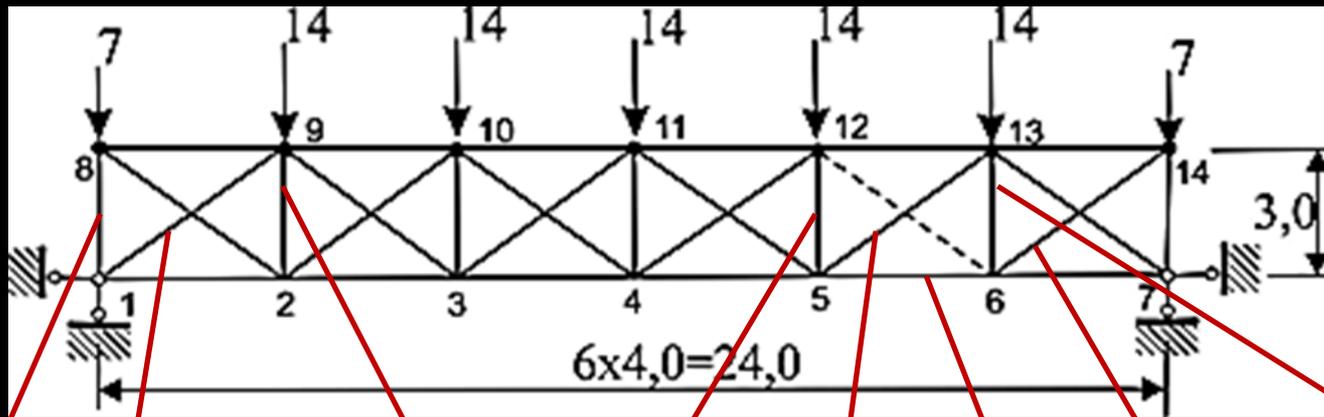


Динамическое воздействие может быть описано билинейной зависимостью силы от времени:

t_d – время отказа, в течение которого конструкция, получив «отрицательный импульс», **«зависает»** в своем исходном положении за счет сил инерции, а **затем начинает движение уже в поврежденном виде.**

Решение задачи выполнено расчетным комплексом SCAD в режиме **«Прямого интегрирования движения»** - указана величина модального демпфирования, указан шаг интегрирования (0,01 сек.) и время действия процесса (2 сек.)

Сопоставление результатов расчета методом прямого интегрирования движения (А) с результатами расчета с коэффициентом динамичности (Б) усилия в тоннах, %% от Б



A: 22,4
Б: 16,8
+25,1%

A: 12,3
Б: 5,7
+53,3%

A: 18,8
Б: 40,8
-116,9%

A: 19,9
Б: 52,1
-162,1%

A: 10,3
Б: 38,4
-272,1%

A: 59,6
Б: 41,9
+29,5%

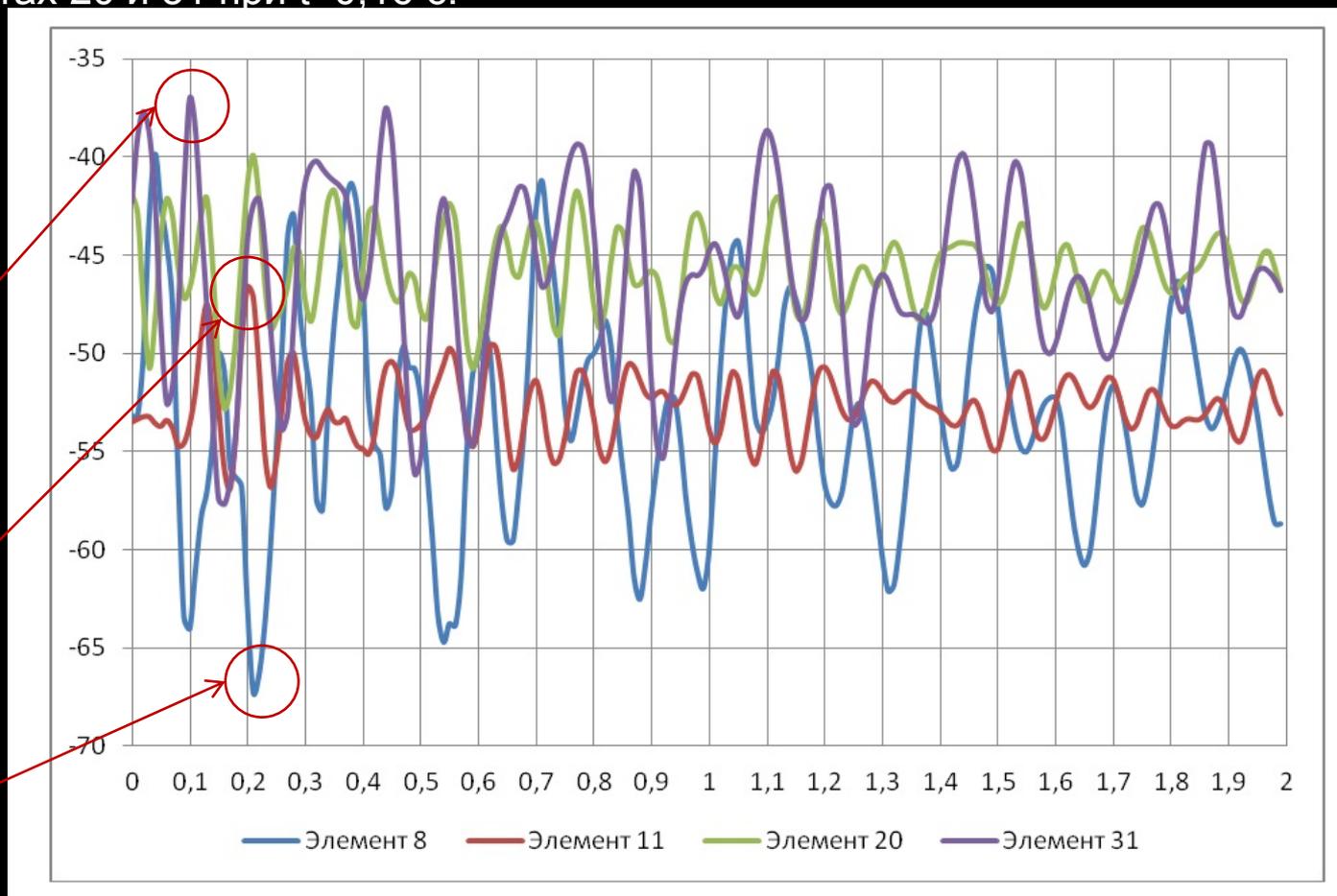
A: 47,9
Б: 91,3
-90,6%

A: 30,2
Б: 13,2
+56,4%

Для анализа состояния элементов расчетной схемы во времени необходимо рассматривать **графики изменения усилий в элементах**.

Анализ НДС элементов модели во времени показывает, что **экстремальные значения** усилий в элементах системы (как и перемещений узлов) **достигаются неодновременно** (см. рисунок).

Так в элементе 8 экстремум достигается в момент времени $t=0,21$ с, в элементе 11 при $t=0,17$ с, а в элементах 20 и 31 при $t=0,16$ с.



Экстремум
Эл-т 31

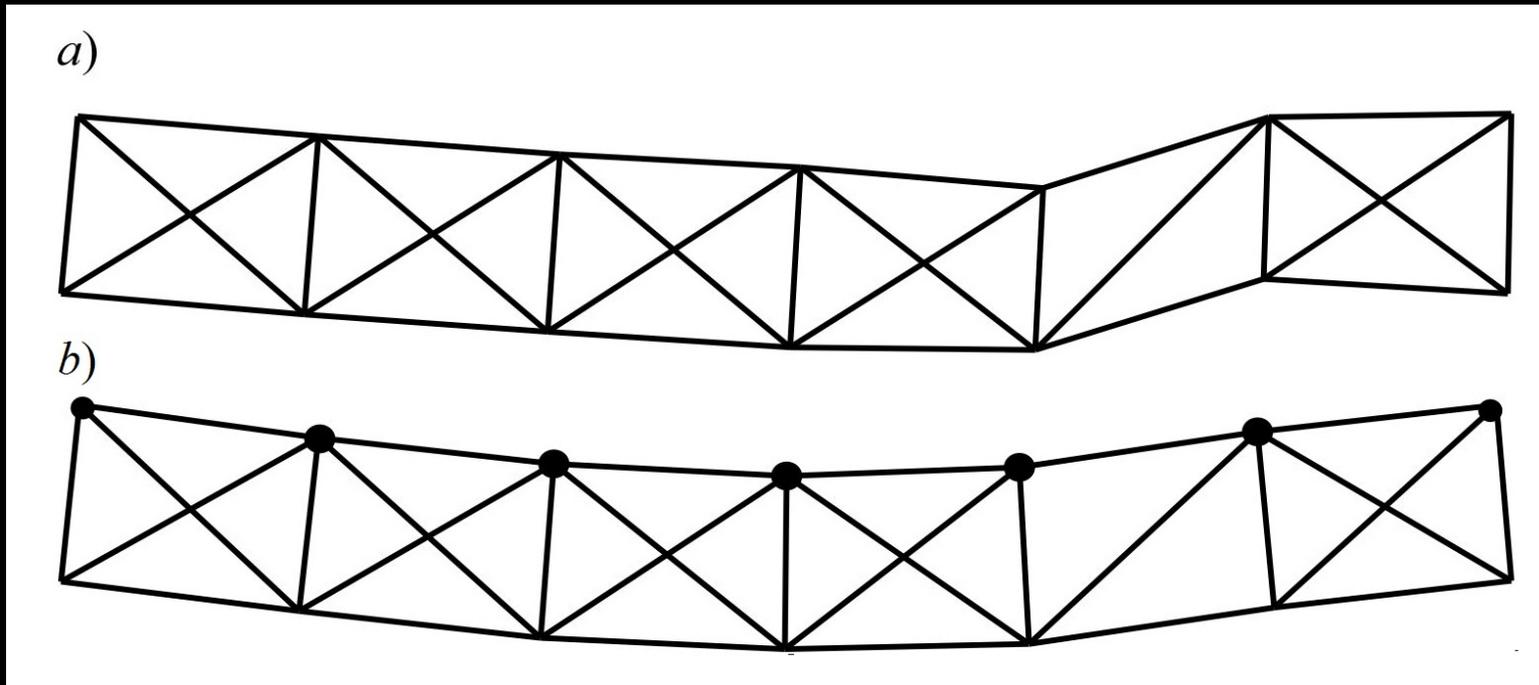
Экстремум
Эл-т 11

Экстремум
Эл-т 8

Такое принципиальное расхождение результатов объясняется несовпадением формы статического равновесия модели без удаленного элемента и первой формой собственных колебаний (см. рисунок):

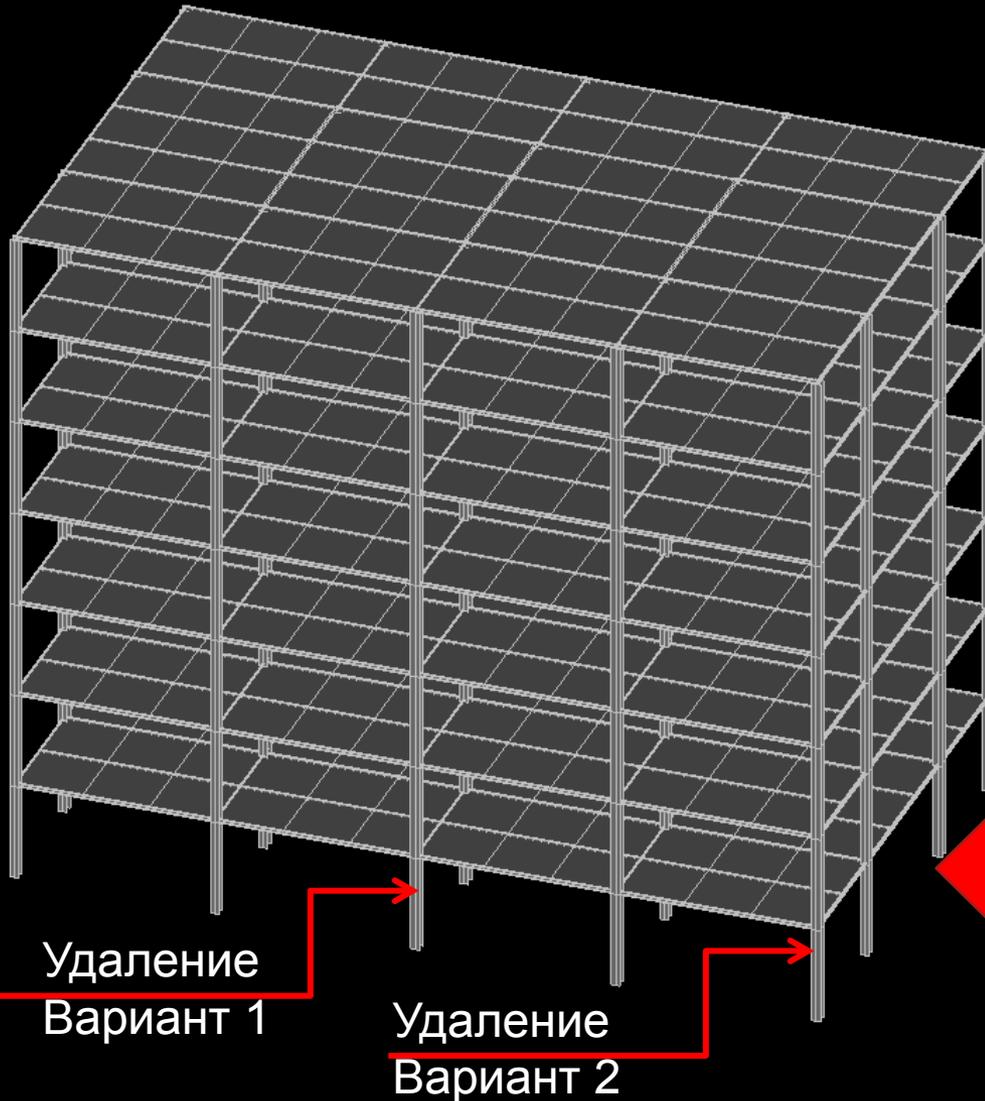
а - форма статического равновесия модели без удаленного элемента

б - первая форма собственных колебаний модели

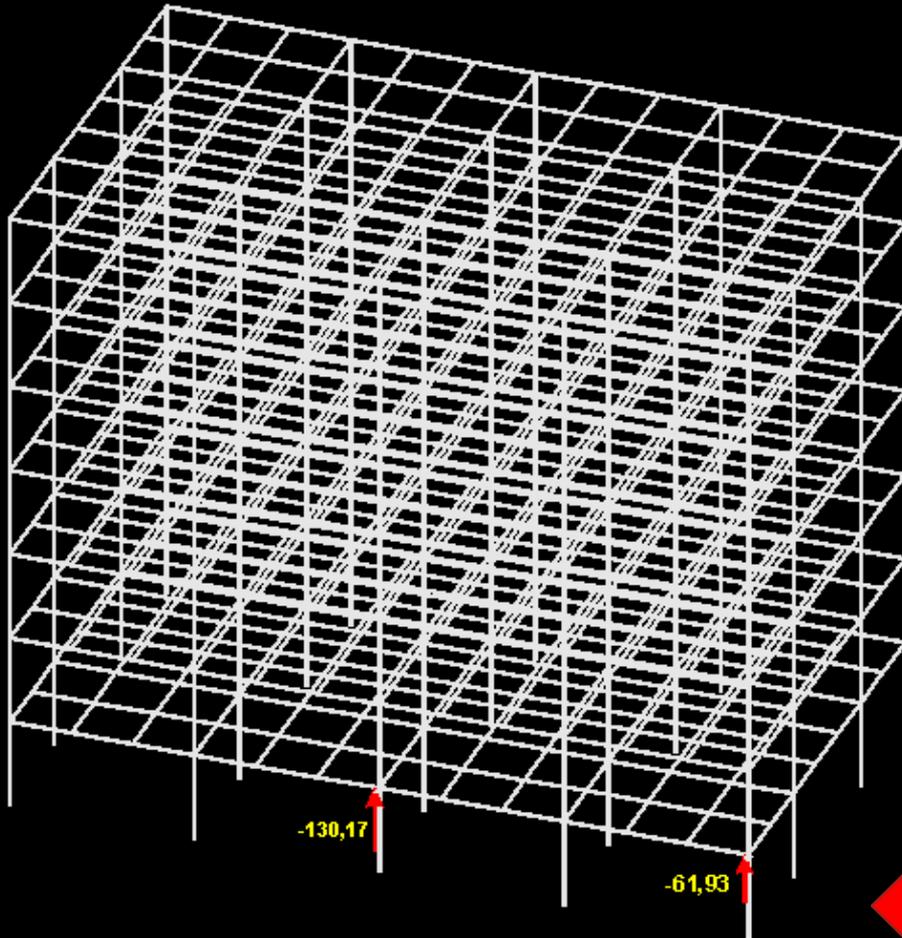


Таким образом, само понятие коэффициента динамичности как множителя к статической картине деформирования лишено смысла.

Исследование динамической реакции рамных несущих систем



Для проверки
правомерности
применения
квазистатического
расчета была
выполнена серия
динамических
расчетов каркасного
сооружения



В первую очередь в системе, нагруженной только постоянной и длительно действующими нагрузками (проверка прогрессирующего обрушения выполняется для такого состояния системы) были определены реакции от удаляемых элементов. Использовался режим СКАДа **НАГРУЗКИ ОТ ФРАГМЕНТА СХЕМЫ.**

Показаны только компоненты R_z

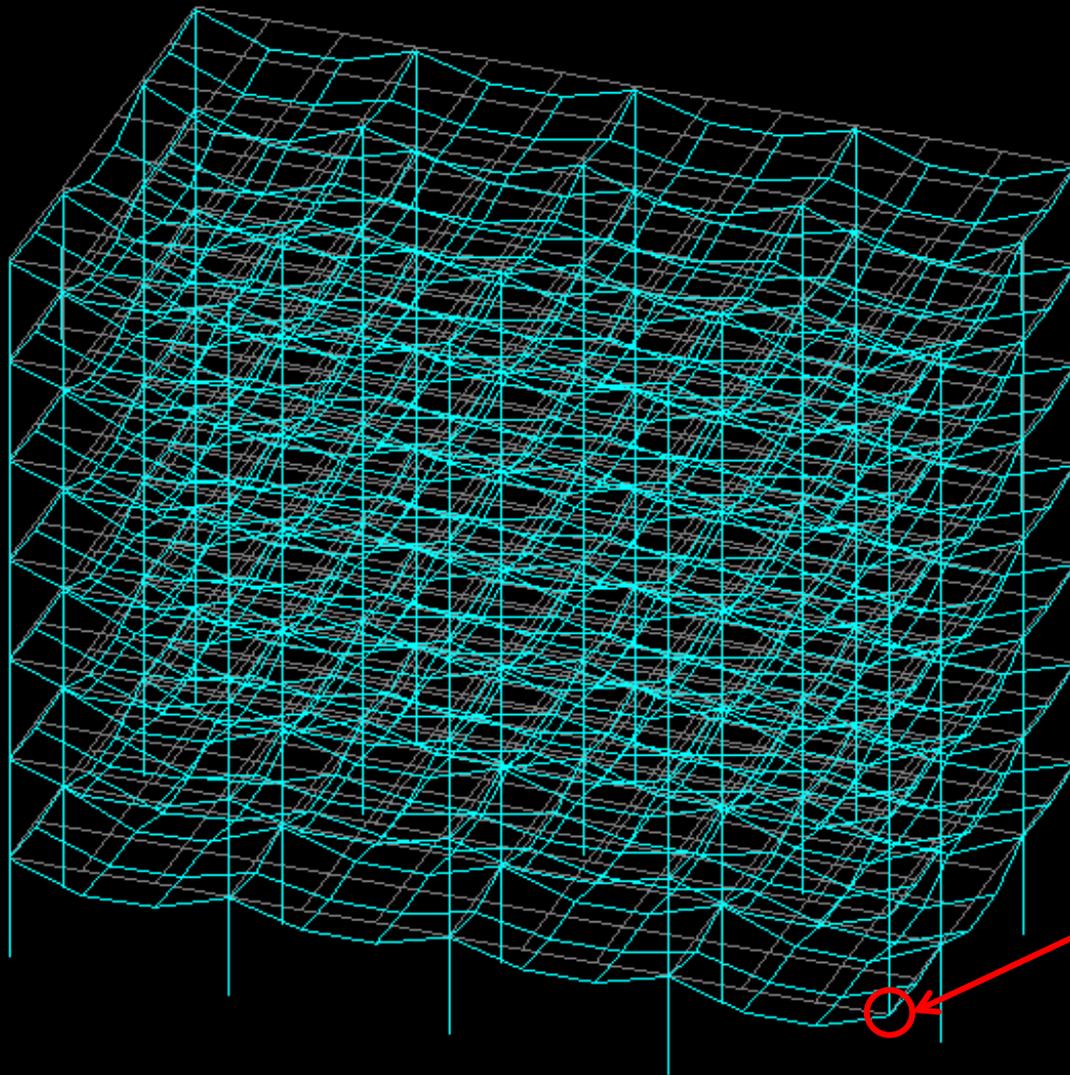
Вариант 1. Отказ крайней колонны

Динамический расчет

Создаются **два статических** нагружения для схемы с удаленным элементом:

- 1. Start:** К схеме приложены все нагрузки, для которых выполняется проверка, и вдобавок реакции от удаленной колонны.
- 2. Reaction:** Приложены только реакции от удаленной колонны.

В нагружении Start НДС должно быть таким же, как у исходной конструкции, в частности, узел примыкания удаленной колонны остается неподвижным (точнее он имеет только упругие перемещения от нагрузки. Это может служить контролем.



Контроль построения
нагрузки **Start**
дает картина
перемещений.

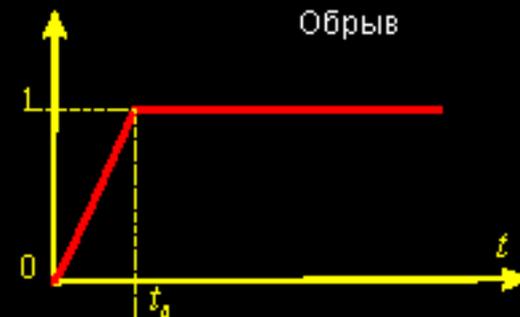
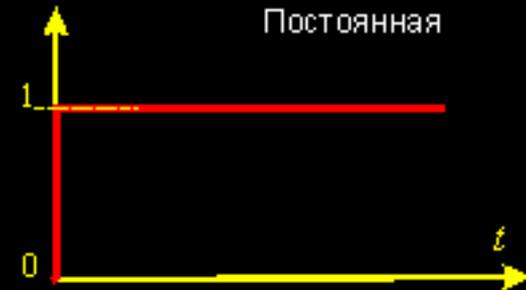
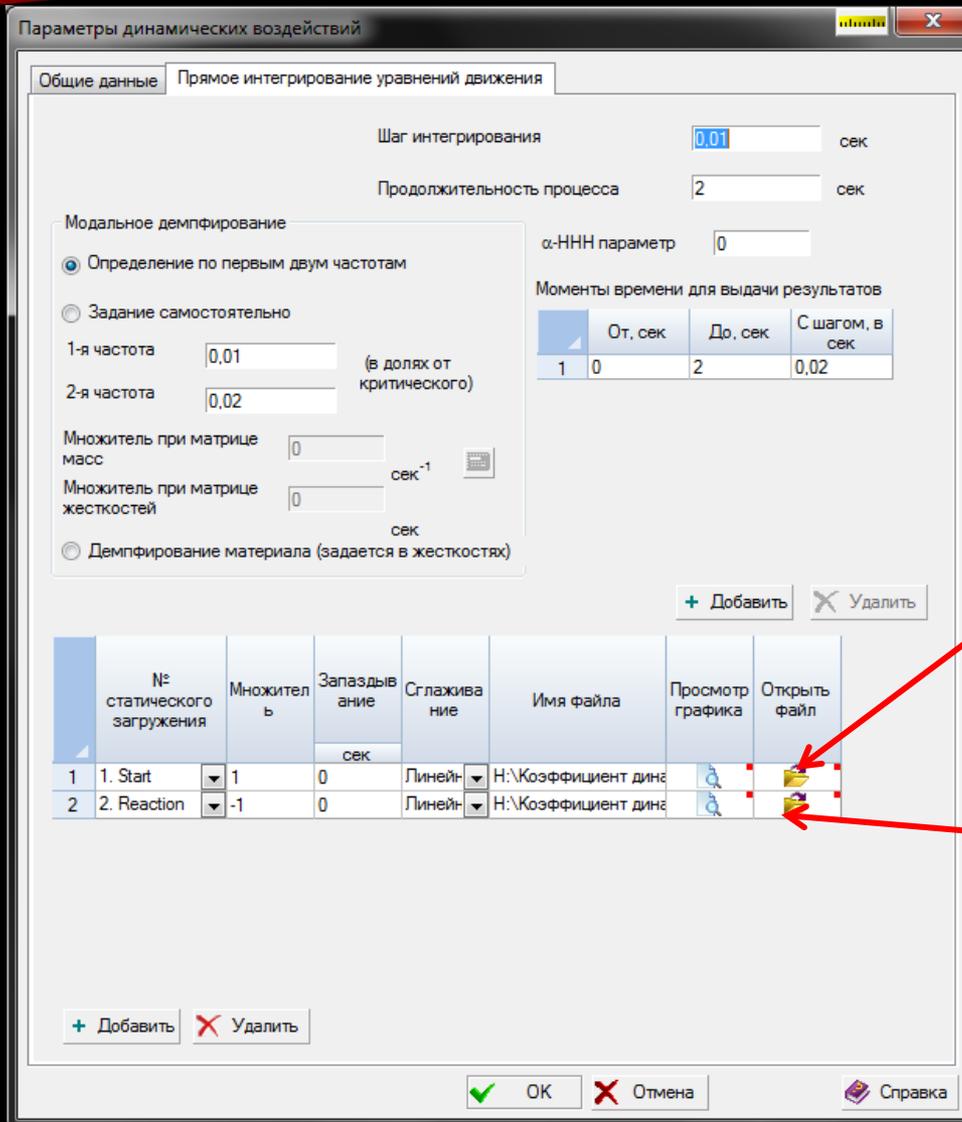
$$\begin{aligned} X &= X_0; Y = Y_0; Z = Z_0; \\ UX &= UX_0; UY = UY_0; UZ = UZ_0 \end{aligned}$$

Разрушение удаляемой колонны соответствует очень быстрому удалению ее реакции. Следует учитывать, что все движения системы начинаются от того положения равновесия, которое конструкция приобрела в момент, предшествующий разрушению элемента (состояние нагружения **Start**).

Поэтому динамический расчет выполнялся следующим образом. При формировании динамического нагружения **Dinamica** в режиме **ИНТЕГРИРОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ** вводятся ссылки на два статических нагружения:

- нагружение **Start** с множителем **1,0** и со ссылкой на текстовый файл **Постоянная**;
- нагружение **Reaction** с множителем **-1,0** и со ссылкой на текстовый файл **Обрыв**.

В текстовых файлах
Постоянная и **Обрыв**
представлены
следующие
закономерности:



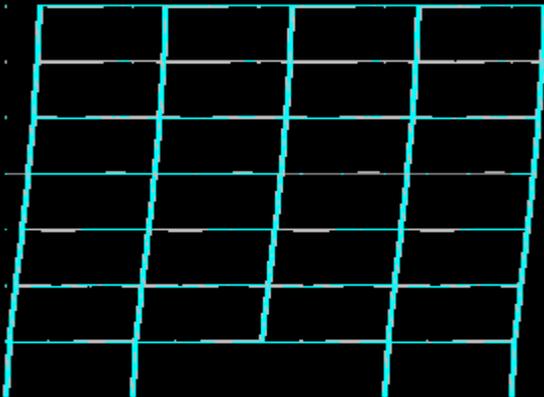
t_0 - продолжительность разрушения

Важным параметром динамического расчета является продолжительность разрушения t_0 .

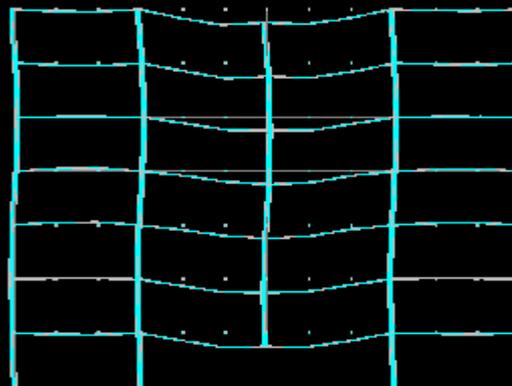
Имеется рекомендация американских норм “Progressive collapse analysis and design guideline (GSA. 2013)” где указывается, что $t_0 \leq 0,1T$, где T есть период колебаний конструкции без выбывшего элемента по форме колебаний напоминающей статическую деформацию системы.

Как правило, такая форма не относится к числу первых, что видно из результатов модального анализа:

1-я форма ($T=3,49$ с)

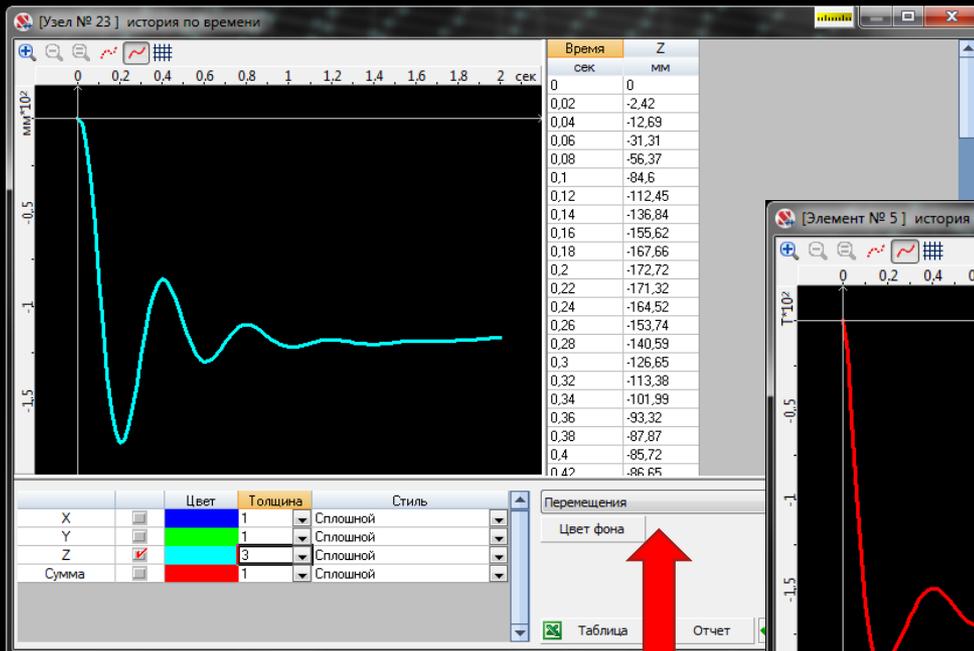


9-я форма ($T=0,37$ с)

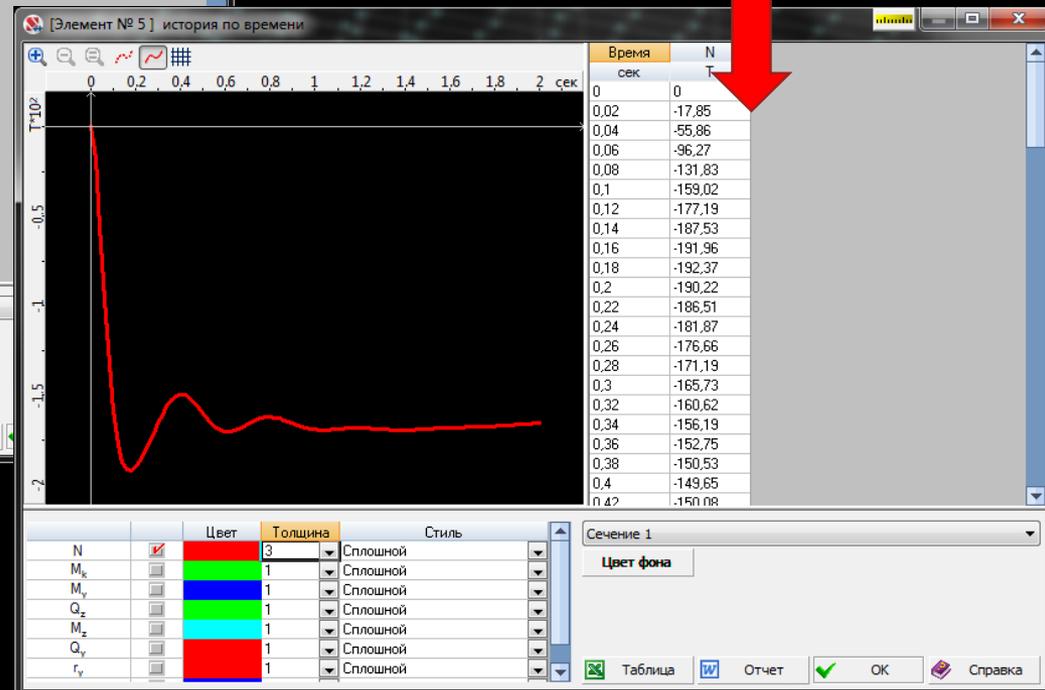


Результаты расчета наглядно иллюстрируются по графиками изменения во времени перемещений и усилий.

Усилие в колонне, расположенной рядом с выбитой



Перемещения узла над выбитой колонной



Сопоставление с квазистатическим расчетом

Чтобы оценить эффективность динамического расчета выполним традиционный при проверке на прогрессирующее обрушение **квазистатический расчет.**

Этот расчет выполняется на действие комбинации нагрузений

$$S_{\text{quazistatic}} = S_{\text{start}} - k_d * \text{Reaction}$$

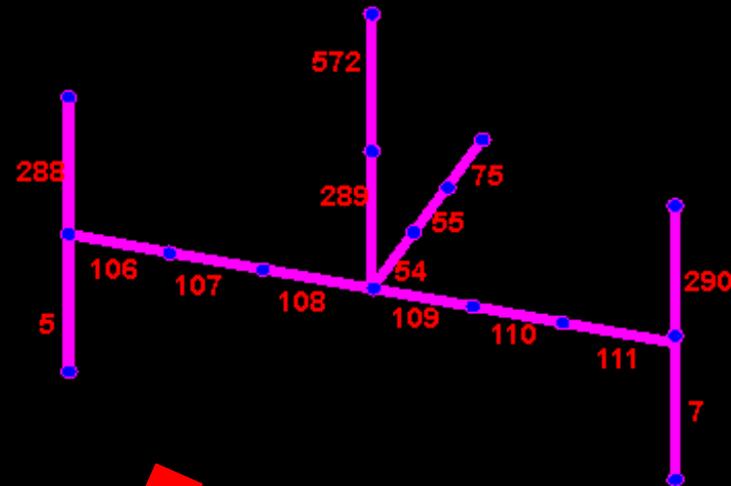
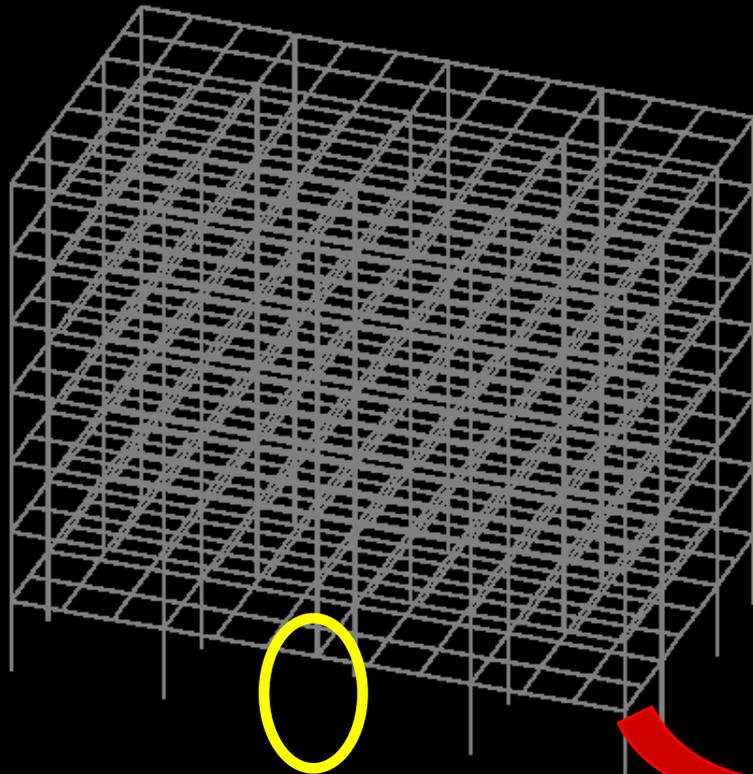
при этом коэффициент динамичности будем принимать равным $k_d = 2,0$.

В качестве коэффициента динамичности часто рассматривают отношение динамического и статического смещения узла, расположенного над выбитой колонной $k=Z_{din}/Z_{stat}$.

Такие отношения были вычислены в процессе анализа, направленного на оценку влияния продолжительности разрушения. Проверка проводилась в интервале от $0,3T1$ до $0,003T1$ ($T1$ – период первой формы собственных колебаний).

Длительность разрушения элемента, с	$0,03T1=0,1$ с	$0,3T1=1$ с	$0,003T1=0,01$ с	$0,01T9=0,03$ с
Перемещение Z_{din} , мм	166	119	173	172
Отношение $Z_{din}/Z_{cvazistst}$	0,71	0,52	0,73	0,74
Эквивалентный коэффициент динамичности в квазистатическом расчете	1,43	1,06	1,47	1,48

Использование уточненного значения коэффициента динамичности **не решает проблему**, поскольку картина распределения внутренних усилий заметно отличается в динамическом и квазистатическом расчете. Покажем это для фрагмента системы



Dinamica				Cvazistatic				Din/Cvazi			
Элемент	N	My	Mz	Элемент	N	My	Mz	Элемент	N	My	Mz
5	-190,217	-3,013	2,937	5	-196,83	-9,155	3,363	5	0,966	0,329	0,873
7	-190,109	-3,009	-2,938	7	-196,703	-9,192	-3,217	7	0,966	0,327	0,913
54	-0,463	4,1	4,17E-08	54	-0,713	6,076	-2,62E-05	54	0,649	0,675	-0,002
55	-0,179	2,223	-3,56E-07	55	-0,28	1,908	3,78E-06	55	0,639	1,165	-0,094
75	-0,304	-16,358	1,76E-06	75	-0,483	-17,584	-5,12E-05	75	0,629	0,930	-0,034
106	0,107	-4,073	-9,90E-05	106	0,127	-4,31	-1,25E-04	106	0,843	0,945	0,793
107	0,019	0,137	6,82E-05	107	0,029	-0,238	9,11E-05	107	0,655	-0,576	0,748
108	-0,139	2,1	-1,40E-04	108	-0,189	1,877	-2,18E-04	108	0,735	1,119	0,645
109	-0,139	-0,629	2,60E-04	109	-0,243	0,533	3,92E-04	109	0,572	-1,180	0,664
110	0,019	1,705	-1,40E-04	110	0,004	1,618	-2,11E-04	110	4,750	1,054	0,664
111	0,107	0,901	6,82E-05	111	0,113	0,537	8,81E-05	111	0,947	1,678	0,774
288	-163,364	-12,272	8,181	288	-168,933	-16,811	9,324	288	0,967	0,730	0,877
289	-1,364	31,664	-0,004	289	110,345	50,5	-2,871	289	-0,012	0,627	0,001
290	-163,273	-12,266	-8,18	290	-168,939	-16,875	-9,025	290	0,966	0,727	0,906
572	-2,188	12,633	-0,002	572	90,409	17,685	0,635	572	-0,024	0,714	-0,003

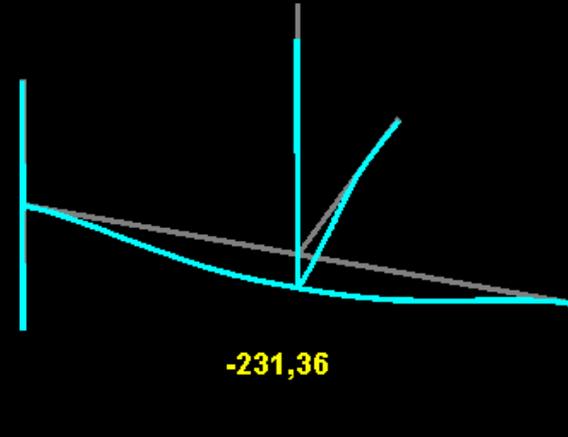
Особенно сильно расходятся результаты для колонн, расположенных над выбитой (элементы 289 и 572)..



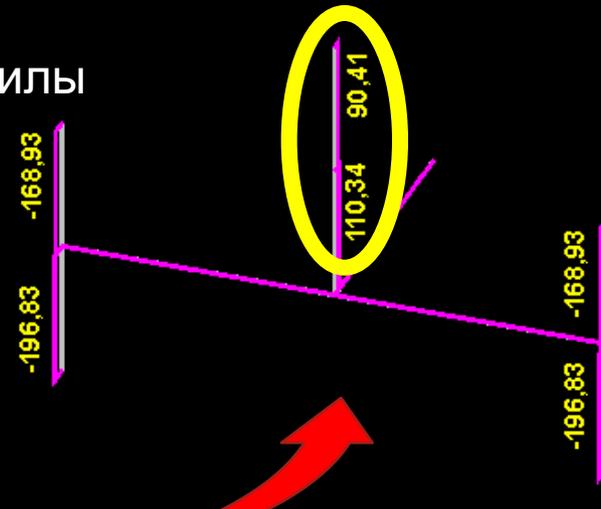
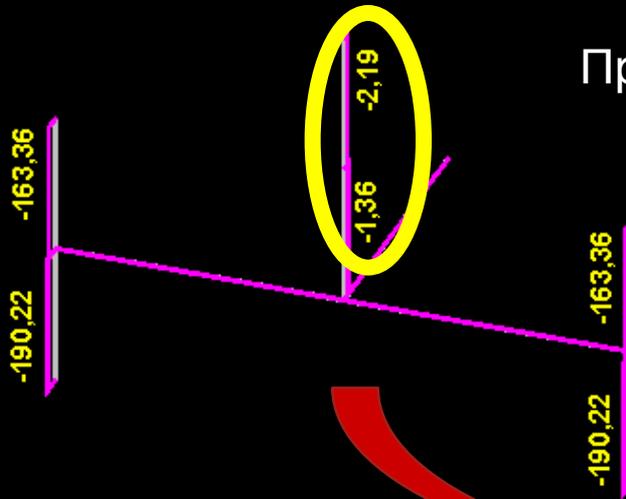
Dinamica

Cvazistatic

Перемещения

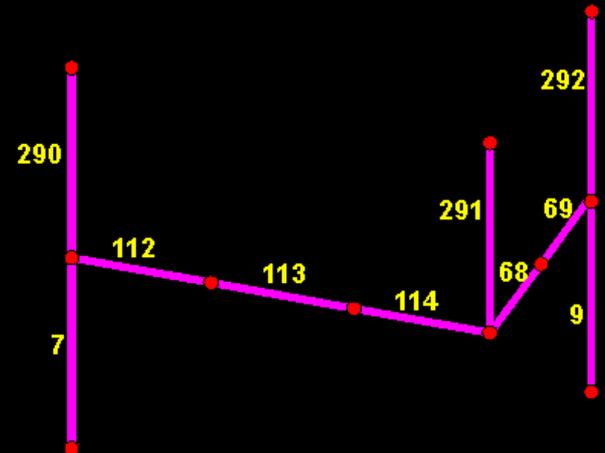
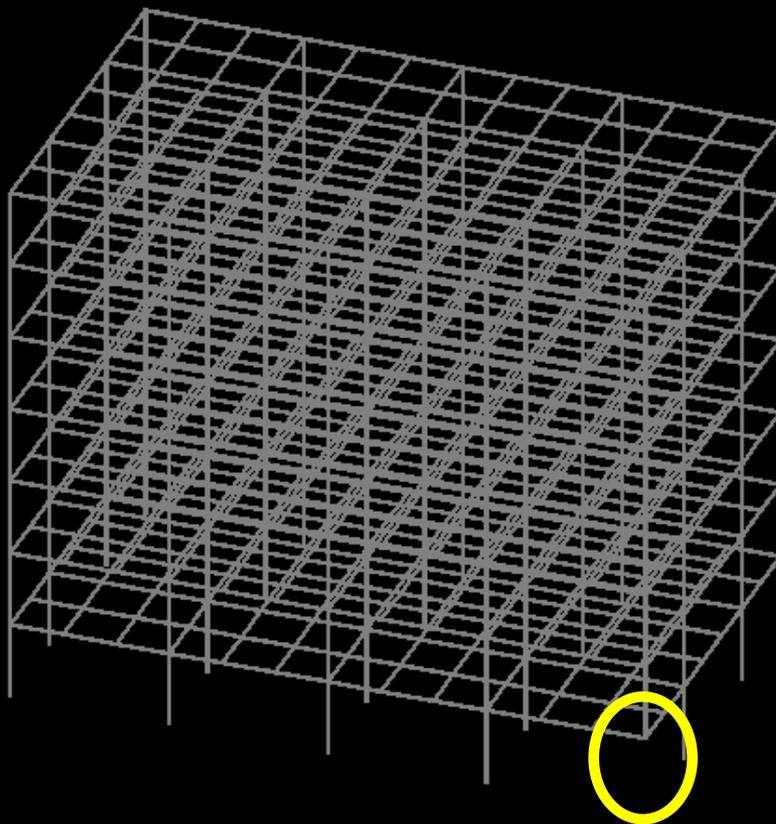


Продольные силы

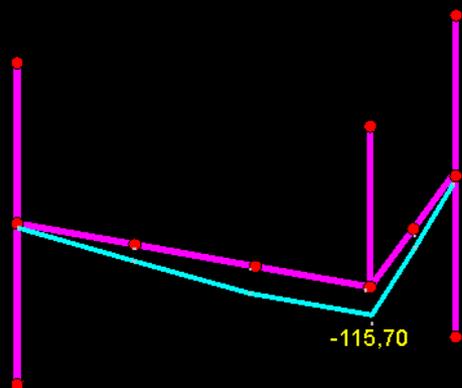


Вариант 2. Отказ угловой колонны

Все действия аналогичны варианту 1, коэффициент динамичности оказался равным **0,53**. А сопоставление выполняется для другого фрагмента.

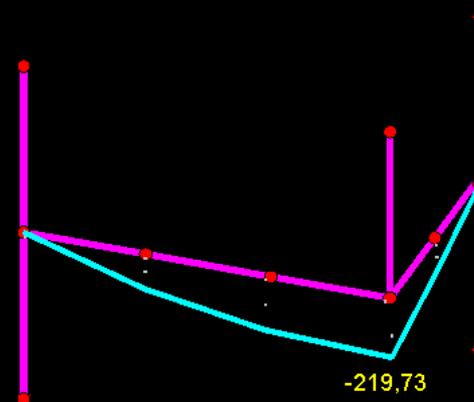


Dinamica

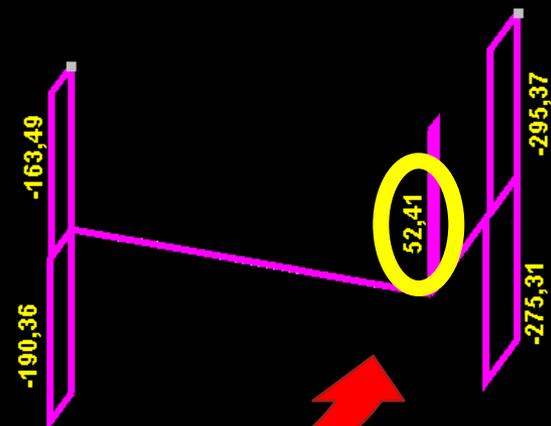
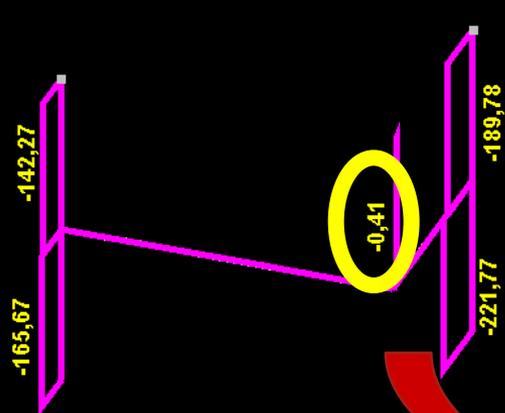


Перемещения

Cvazistatic



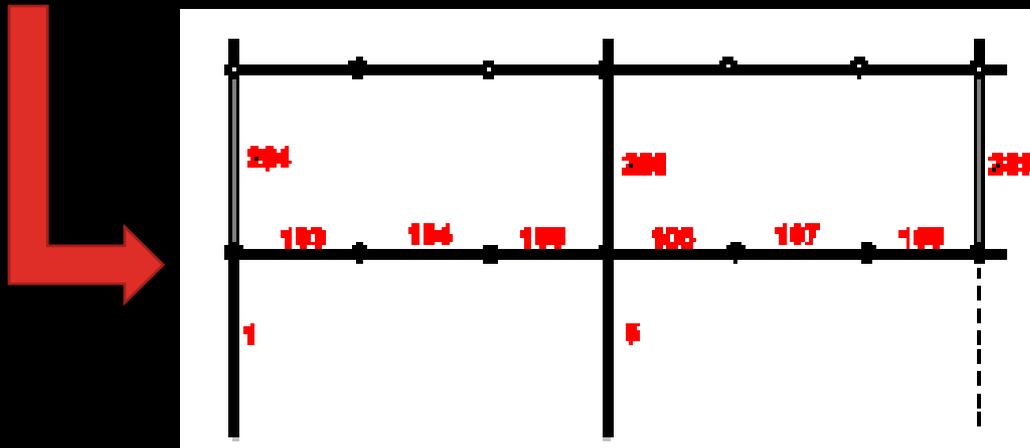
Продольные силы



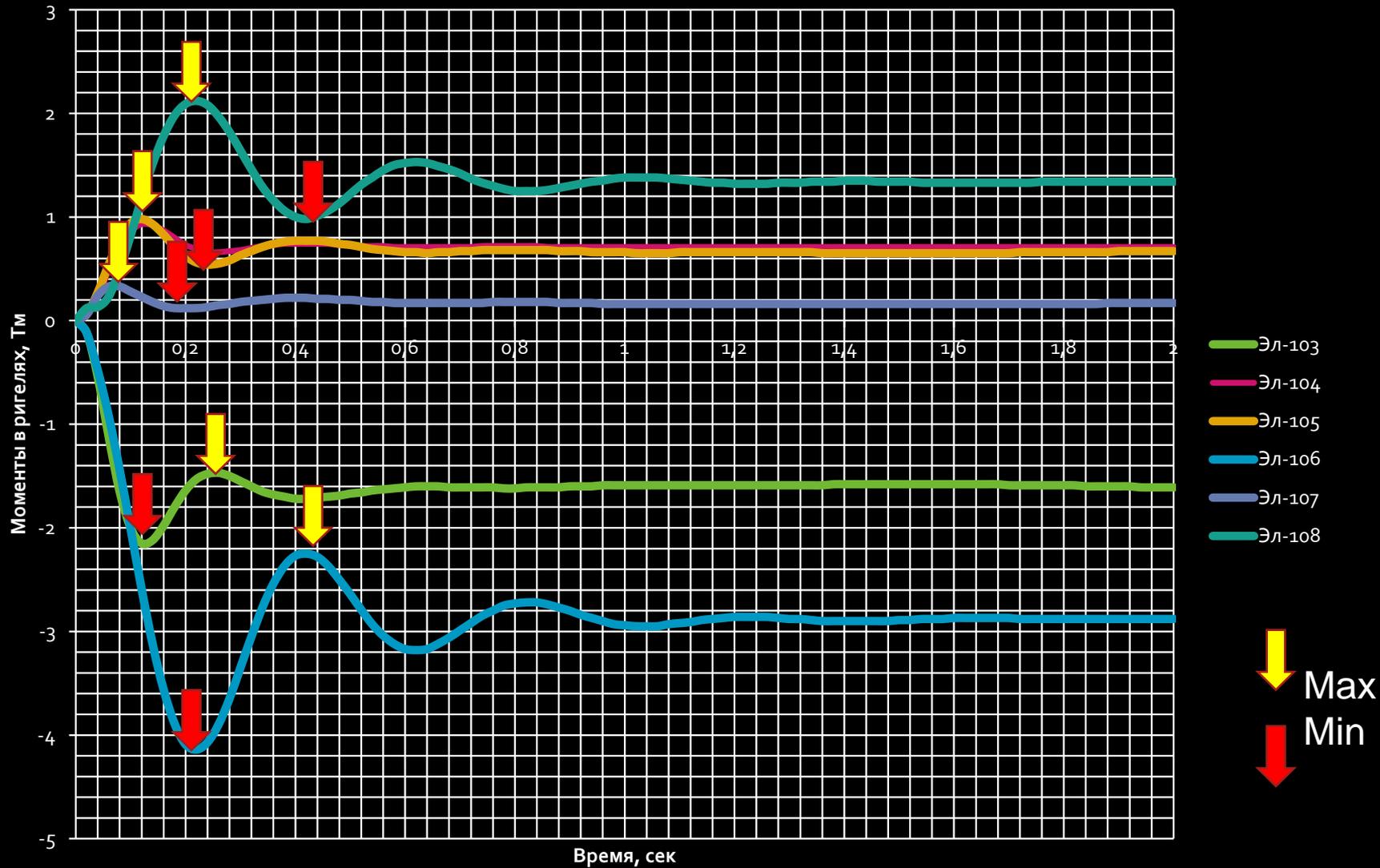
Об использовании результатов динамического расчета

В результате расчета мы имеем значения усилий и перемещений **в форме функций от времени**. Очевидно, что в условиях динамики экстремальные значения компонент напряженно-деформированного состояния **реализуются в различные моменты времени**, и в принципе **необходимо** выполнить проверку несущей способности для **ряда состояний системы, отличающихся временем реализации**.

На следующем слайде представлены графики изгибающих моментов этих элементах ригеля:



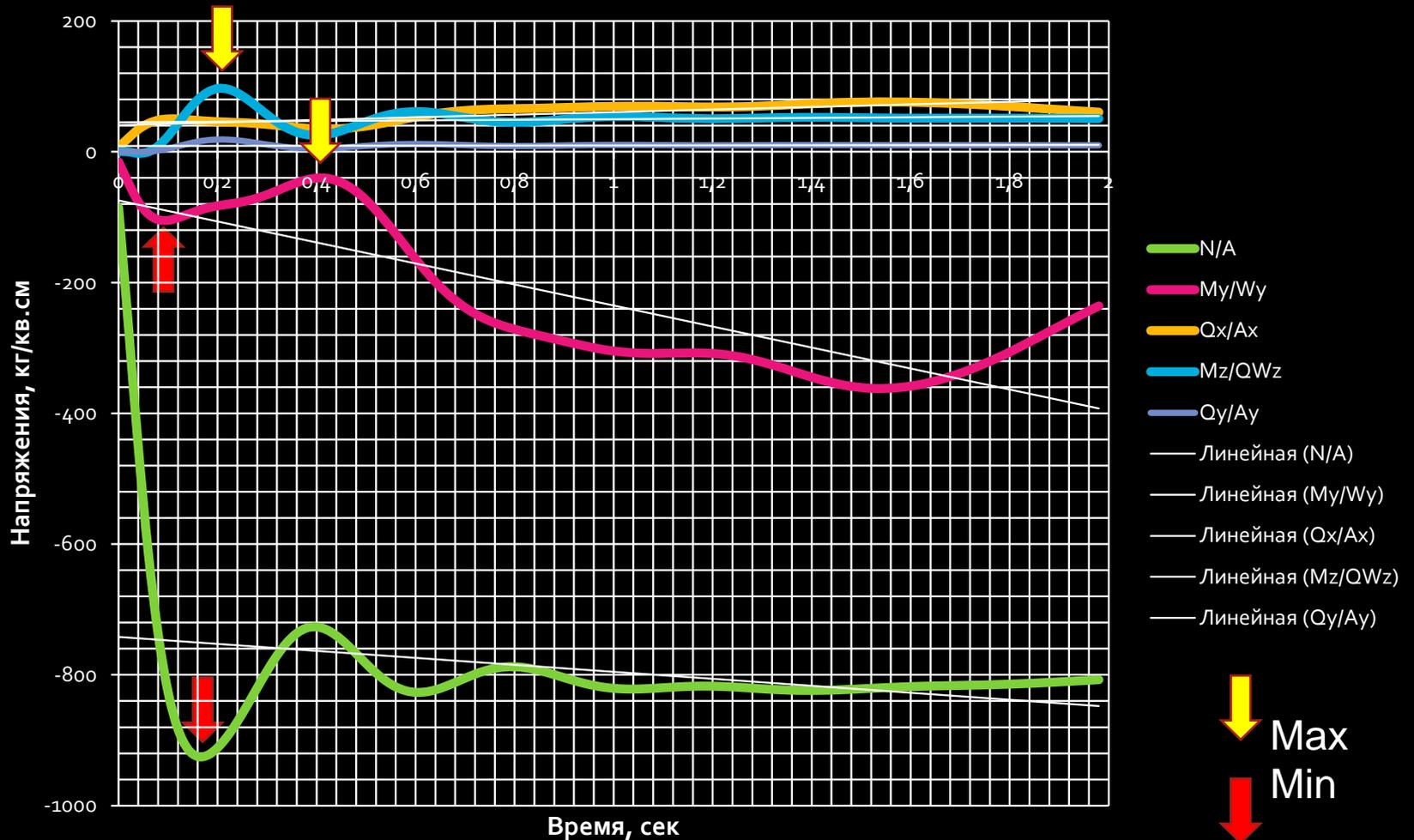
Неодновременность экстремума - ригель



Экстремальные значения различных компонент напряженного состояния одного и того же элемента также могут **наступать в различные моменты времени** (иллюстрация на следующем слайде).

Поэтому в комплексе СКАД предусмотрено, что для определения РСУ для каждого элемента системы передаются значения компонент НДС, **соответствующие максимальному по времени значению** проверяемого критерия (например, напряжения в контрольной точке сечения).

Неодновременность экстремума разных компонент напряжений колонны



ОСНОВНОЙ ВЫВОД

Квазистатистический расчет **не обеспечивает**
В ПРИНЦИПЕ приемлемое качество
результатов.

Для получения достоверных результатов
следует выполнять **анализ**
динамического поведения.

Тем более, что при наличии соответствующих опций
в программной системе, особых трудностей он не
вызывает.