

ГЛАВА 13. СИСТЕМА ДИНАМИКА+

Общие положения

Расчетно-графическая система ДИНАМИКА + реализует метод прямого интегрирования уравнений движения по времени, что позволяет производить компьютерное моделирование отклика конструкции на динамические воздействия как во время воздействия, так и после его завершения. Система ДИНАМИКА + применяется для решения линейных и нелинейных задач.

К расчету задач динамики во времени допускаются следующие типы конечных элементов:

- все линейные элементы;
- односторонние связи (с трением и без);
- элементы грунта — плоские и объемные;
- все физически нелинейные элементы, основанные на теории упругопластичности;
- все геометрически нелинейные элементы.

Задача линейного динамического расчета формулируется в виде:

$$b\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, v\right) + c\left(\frac{\partial u}{\partial t}, v\right) + a(u, v) = (f(t), v), \quad t > 0,$$

$$u(0) = u_0, \quad \partial u / \partial t(0) = u_1$$

Эта задача решается методом конечных разностей по безусловно устойчивой разностной схеме второго порядка точности:

$$b(\gamma_m u, v) + c(\beta_m u, v) + a(\alpha_m u, v) = (f_m, v);$$

$$t_m = m\theta; \quad u_m = u(t_m); \quad \alpha_m u = \frac{u_{m+1} + u_{m-1}}{2};$$

$$\beta_m u = \frac{u_{m+1} - u_{m-1}}{2\theta}; \quad \gamma_m u = \frac{u_{m+1} - 2u_m + u_{m-1}}{\theta^2}.$$

Это система уравнений относительно u_{m+1} , правые части которой зависят от u_m, u_{m-1} . Матрица не зависит от m . Значения u_0, u_1 определяются из начальных условий.

В результате расчета определяются перемещения, скорости и ускорения узлов, а также усилия и напряжения в элементах, вычисленные во все моменты времени t_m .

Для нелинейной задачи в уравнение добавляется нелинейное слагаемое $d(u, v)$, зависящее от характера нелинейности, а в разностную схему — слагаемое $d(u_m, v)$, которое попадает в правую часть.

13.1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СХЕМЫ

Для создания расчетной схемы необходимо установить флажок **В задаче будет использоваться система «ДИНАМИКА +»** в окне **Параметры проекта** (рис. 13.1).

Рис. 13.1. Параметры проекта

Расчет с учетом динамики во времени доступен как в линейной, так и в нелинейной постановке. Таким образом, для расчета нелинейных задач в окне **Параметры проекта** (рис. 13.1) нужно также установить флажок **В задаче будут присутствовать нелинейные элементы**.

13.1.1 Создание загрузений

Приступая к созданию **Загрузений** (рис. 13.2), в первую очередь необходимо создать **Статическое загрузение**, которое в дальнейшем может быть преобразовано в массы для формирования **Матрицы масс динамического загрузения**. При необходимости создать более одного статического загрузения следует добавить к ранее созданному загрузению **Сопутствующее статическое загрузение**.

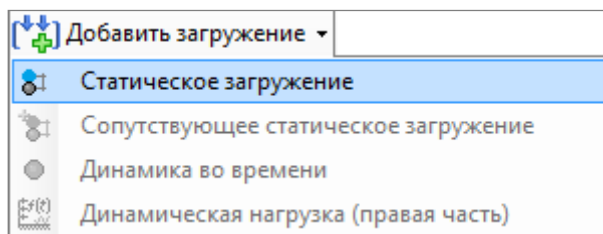


Рис. 13.2. Добавить загрузение

Обратите внимание на то, что **Статическое загрузение** и все **сопутствующие** ему в ходе расчета будут объединены в одно загрузение. Таким образом, в результатах расчета не будет возможности отображения результатов для каждого статического загрузения отдельно.

После добавления **Статического нагружения** становится доступным добавление **Динамики во времени**. Для этого нужно выбрать соответствующий элемент в раскрывающемся списке **Добавить нагружение** (рис. 13.2). В появившемся окне (рис. 13.3) задаются **Шаг интегрирования** и **Время интегрирования**, на основании которых будет получено минимальное количество моментов времени, для каждого из которых будут сформированы результаты.

Рис. 13.3. Задание данных для динамики во времени

Задание **Скорости распространения сейсмического воздействия** требуется в случае задания нагрузки типа сейсмограмма.

Далее необходимо выбрать из раскрывающегося списка получаемые **Результаты расчета**:

- только перемещения;
- перемещения и усилия;
- перемещения, усилия и РСУ.

Формирование матрицы масс может быть выполнено путем **Преобразования статических нагрузок в массы** или же получением масс **Из плотности элементов**. Для этого следует выбрать необходимый критерий, задать **Коэффициент преобразования** в соответствующем поле и нажать кнопку **Добавить**. При преобразовании статических нагрузок в массы требуется выбрать нагружение из раскрывающегося списка, для которого будет выполнено преобразование.

Коэффициент преобразования полученных масс может быть отредактирован. Для этого нужно выделить соответствующую строку, ввести новое значение коэффициента и нажать кнопку **Изменить**. Удаление масс производится путем выбора соответствующей записи и нажатия кнопки **Удалить**.

Загружение **Динамка во времени** включает в себя следующие загрузки:

- **Динамическая нагрузка (узловые силы)**
- **Демпфирование**
- **Динамическая нагрузка (правая часть)**

При необходимости учета **Демпфирования** (рис. 13.4) необходимо перейти к соответствующему пункту **Библиотеки загрузений**, установить флажок **Учитывать демпфирование**. Демпфирование может быть задано одним из двух способов:

1. Непосредственным указанием коэффициентов альфа и бета.
2. Вычислением коэффициентов через две формы колебания.

Параметры демпфирования					
<input checked="" type="checkbox"/> Учитывать демпфирование					
<input checked="" type="radio"/> Вычисление α и β через 2 частоты собственных колебаний			<input type="radio"/> Матрица демпфирования $C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K$		
	Частота		Логарифмический декремент колебаний		
ω_1	0 Рад/с	61	0	α	0 1/с
ω_2	0 Рад/с	62	0	β	0 с

Рис. 13.4. Демпфирование

Последней составляющей загрузки **Динамика во времени** является **Динамическая нагрузка (правая часть)**, позволяющая пользователю задать общий закон изменения сил во времени. Для задания правой части необходимо сначала выбрать загрузку **Динамика во времени**, а затем нажать кнопку **Добавить загрузку** (рис. 13.2) и выбрать соответствующий элемент из раскрывающегося списка.

В рабочей области данного режима предоставляется возможность задать закон действия сил вручную либо же прочитать из файла. Для загрузки из файла необходимо нажать кнопку **Прочитать из файла** и в появившемся диалоговом окне выбрать соответствующий файл на диске. Таким же образом можно сохранить созданный закон, воспользовавшись функцией **Сохранить закон в файл**.

Для задания закона вручную доступно 3 шаблона, выбор шаблона производится из соответствующего раскрывающегося списка. При использовании шаблона **Произвольный шаг ломаной** (рис. 13.5) требуется указать только **Количество точек**. При этом промежутки времени между точками на графике могут быть произвольными. Для завершения формирования закона необходимо заполнить таблицу, указав в ней **Время** и **Коэффициент к правой части** для каждого момента времени.

Динамика во времени : Динамическая нагрузка (правая часть) (Динамическая нагрузка (правая часть))

Имя Динамическая нагрузка (правая часть)

Описание

Закон изменения правой части

Шаблон закона Произвольный шаг лом Масштабный множитель к закону 1

	Время, с	Коэффициент к правой части
▶ 1	0	0
2	0.1	0.00675585375...
3	0.2	0.02647384593...
4	0.4	0.05753879867...
5	0.5	0.09736869514...
6	0.7	0.14257332720...
7	0.8	0.18916418688...
8	0.81	0.23280413624

Прочитать закон из файла... Сохранить закон в файл... Количество точек 100 Шаг дискретизации, с 0

Рис. 13.5. Произвольный шаг ломаной

При выборе шаблона **Равномерный шаг ломаной** (рис. 13.6) необходимо дополнительно указать **Шаг дискретизации**, таким образом первая колонка таблицы заполнится автоматически, в отличие от предыдущего варианта. При выборе данного шаблона появляется возможность указать **Масштабный множитель к закону**.

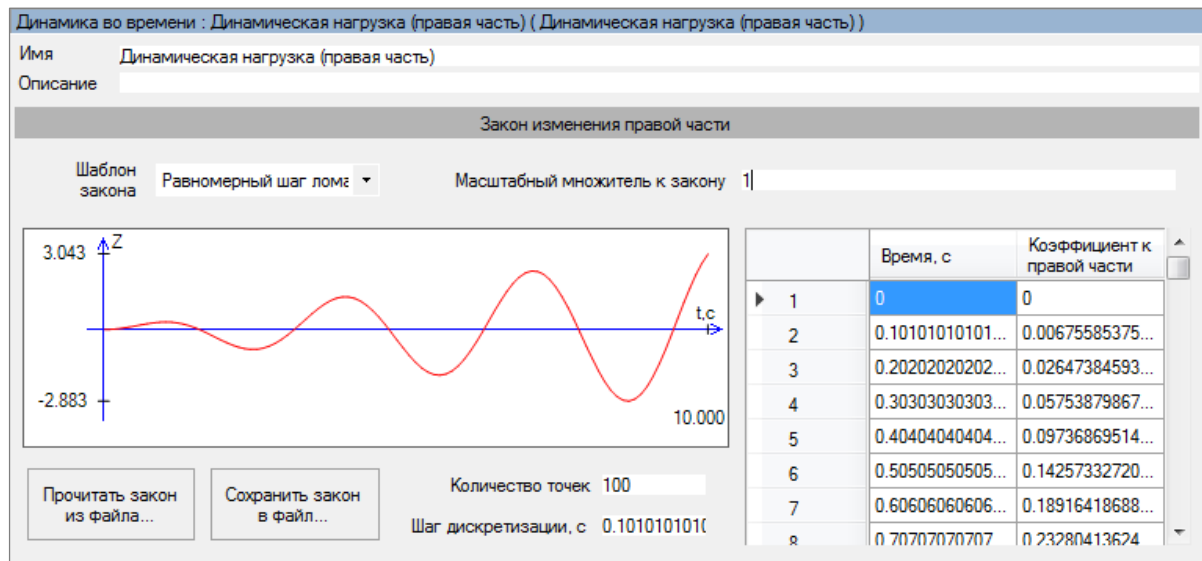


Рис. 13.6. Равномерный шаг ломаной

Последним шаблоном задания закона является **Ломаная как функция от времени** (рис. 13.7). Для задания закона таким образом необходимо выбрать соответствующий шаблон из раскрывающегося списка, задать функцию $Z(x)$, где x — время. Также необходимо указать время начала функции и продолжительность. Следует обратить внимание на то, что время функции задается всегда в секундах, частоты — в рад/с, углы — в рад.

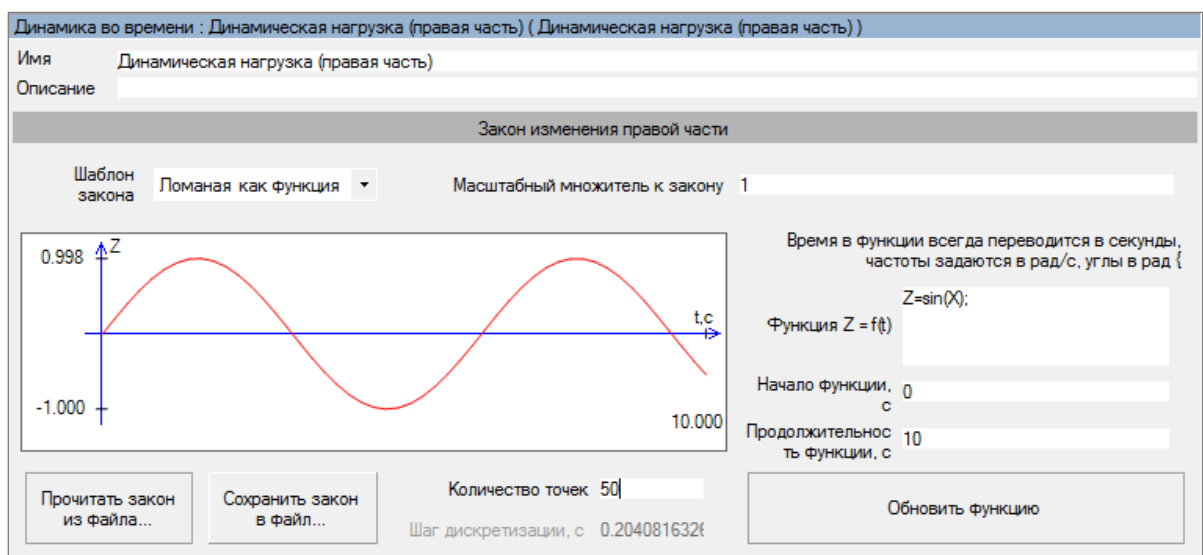


Рис. 13.7. Ломаная как функция от времени

13.1.2 Назначение нагрузок

Нагрузки для статических загрузений аналогичны нагрузкам из статических задач, и их назначение происходит таким же образом.

Для загрузения **Динамика во времени** (рис. 13.8) доступно назначение элементам и узлам схемы весов динамических и узловых масс соответственно (рис. 13.9).

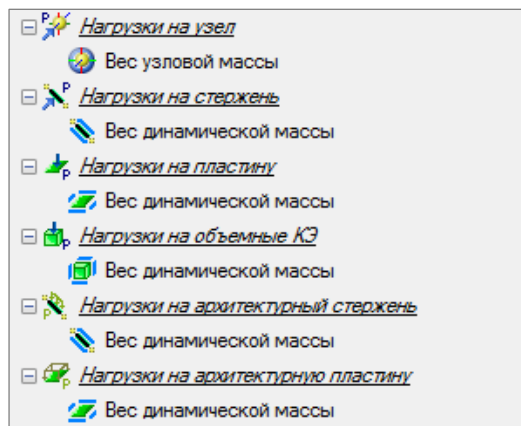


Рис. 13.8. Нагрузки: Динамика во времени

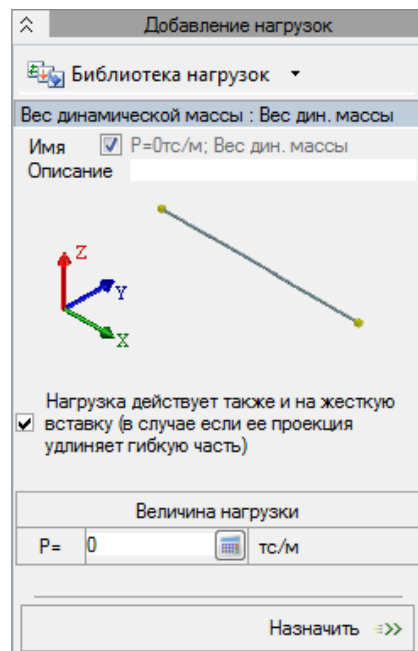


Рис. 13.9. Назначение веса динамических масс

Для назначения веса динамических масс на появившейся панели режима необходимо ввести значение **P**, выделить элементы и нажать кнопку **Назначить**. Также, при необходимости учета действия нагрузки на жесткую вставку (в случае, если ее проекция удлиняет гибкую часть), нужно указать это в окне режима, установив флажок.

Для загрузения **Динамическая нагрузка (узловые силы)** является доступным назначение нагрузок только узлам и в виде функции от времени (рис. 13.10). Благодаря данному загрузению предоставляется возможность задать нагрузки, действующие по разным законам в отличии от задания **Правой части**.

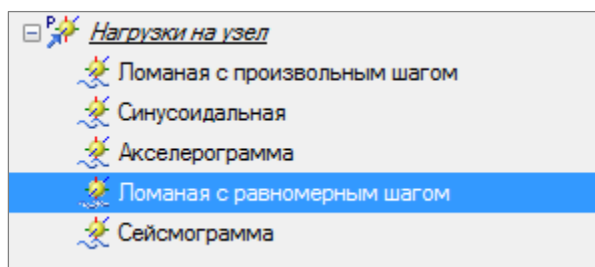


Рис. 13.10. Нагрузки. Узловые силы

Нагрузки, доступные в загрузении **Демпфирование**, аналогичны нагрузкам, доступным в статическом загрузении, за исключением недопустимости назначения заданных смещений и поворотов. Нагрузки, назначенные в данном загрузении, в ходе расчета будут интерпретироваться как демпферы и будут включены в матрицу демпфирования.

При задании **Правой части** для назначения доступны все постоянные нагрузки, кроме заданного смещения и поворота. Несмотря на то, что данные нагрузки являются

постоянными, в ходе расчета они будут изменяться по закону, указанному в загрузке **Динамическая нагрузка (Правая часть)**.

13.1.3 Утилита преобразования записей сейсмического движения грунта

Утилита преобразования записей сейсмического движения грунта становится доступна при загрузке **Динамическая нагрузка (узловые силы)** и выборе соответствующей нагрузки на узел. Для нагрузки **Акселерограмма** доступно преобразование из имеющейся сейсмограммы, для нагрузки **Сейсмограмма**, напротив, — из имеющейся акселерограммы (рис. 13.11).

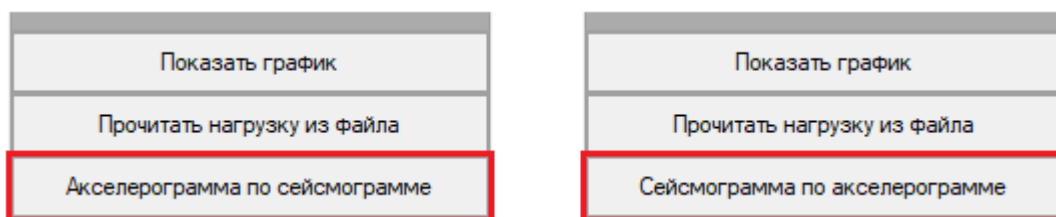


Рис. 13.11. Кнопки вызова утилиты

Для вычисления сейсмограммы/акселерограммы следует выбрать необходимый файл и, в случае необходимости, задать дополнительные условия вычисления (**Удаление тренда акселерограммы**, **Метод получения сейсмограммы/акселерограммы**, **Удаление тренда сейсмограммы**, **поворот нулевой линии**). Каждый из полученных результатов может быть визуализирован.

- **Удаление тренда акселерограммы/сейсмограммы** — в этом случае вычитаются средние значения, полученные линейной, квадратичной или кубической аппроксимацией (рис. 13.12).

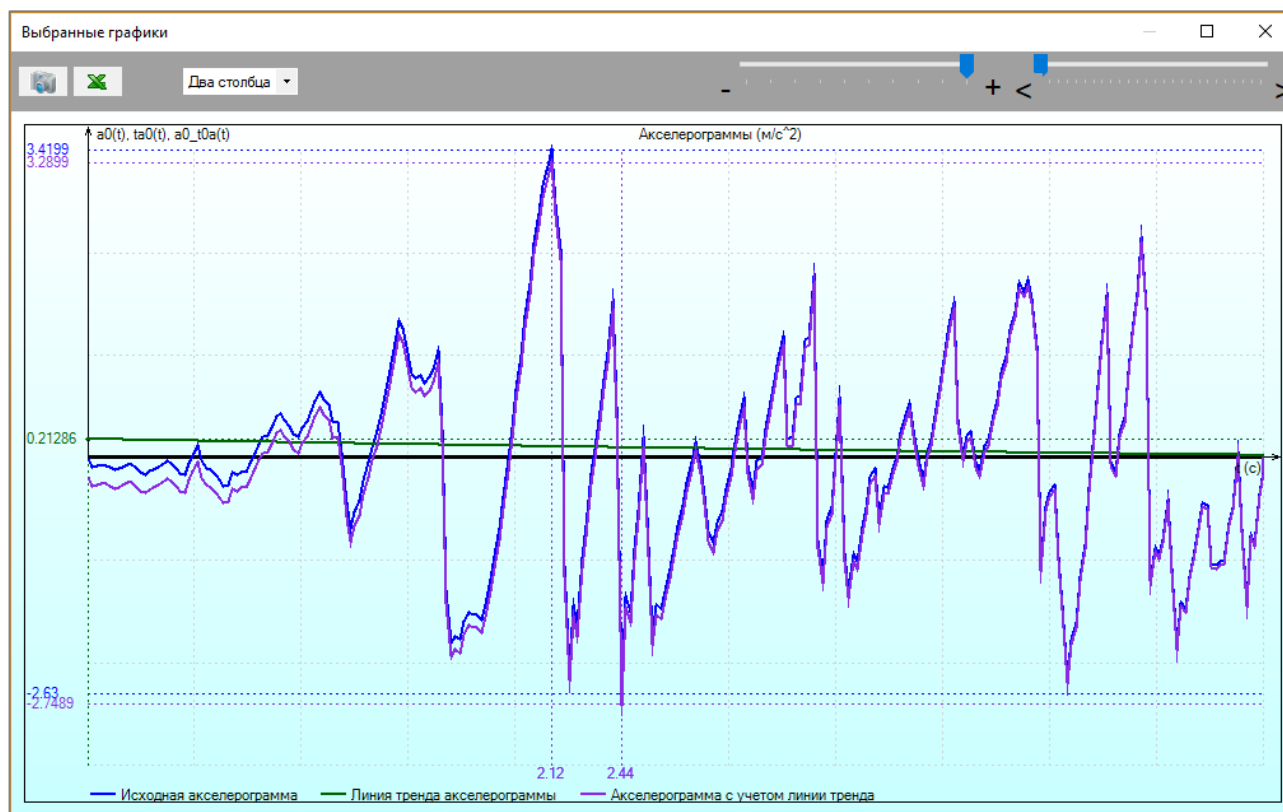


Рис. 13.12. Удаление тренда с помощью кубической аппроксимации

- **Метод получения сейсмограммы/акселерограммы** представляет собой совокупность формул и методов для преобразования данных:
 - **Метод равноускоренного движения** — кинематическое преобразование данных, при котором вектор ускорения остается неизменным по модулю и направлению. Доступен только для расчета сейсмограммы по акселерограмме.
 - **Метод центральных разностей** — конечно-разностная аппроксимация, исходное дифференциальное уравнение заменяется конечно-разностным относительно сеточной функции.
 - **Преобразование Фурье** — преобразование функции акселерограммы в частотные компоненты с помощью алгоритма ДПФ.
- **Поворот нулевой линии** — вычитание из входных данных координат прямой, проходящей через первую и последнюю точку исходного графика (рис. 13.13).

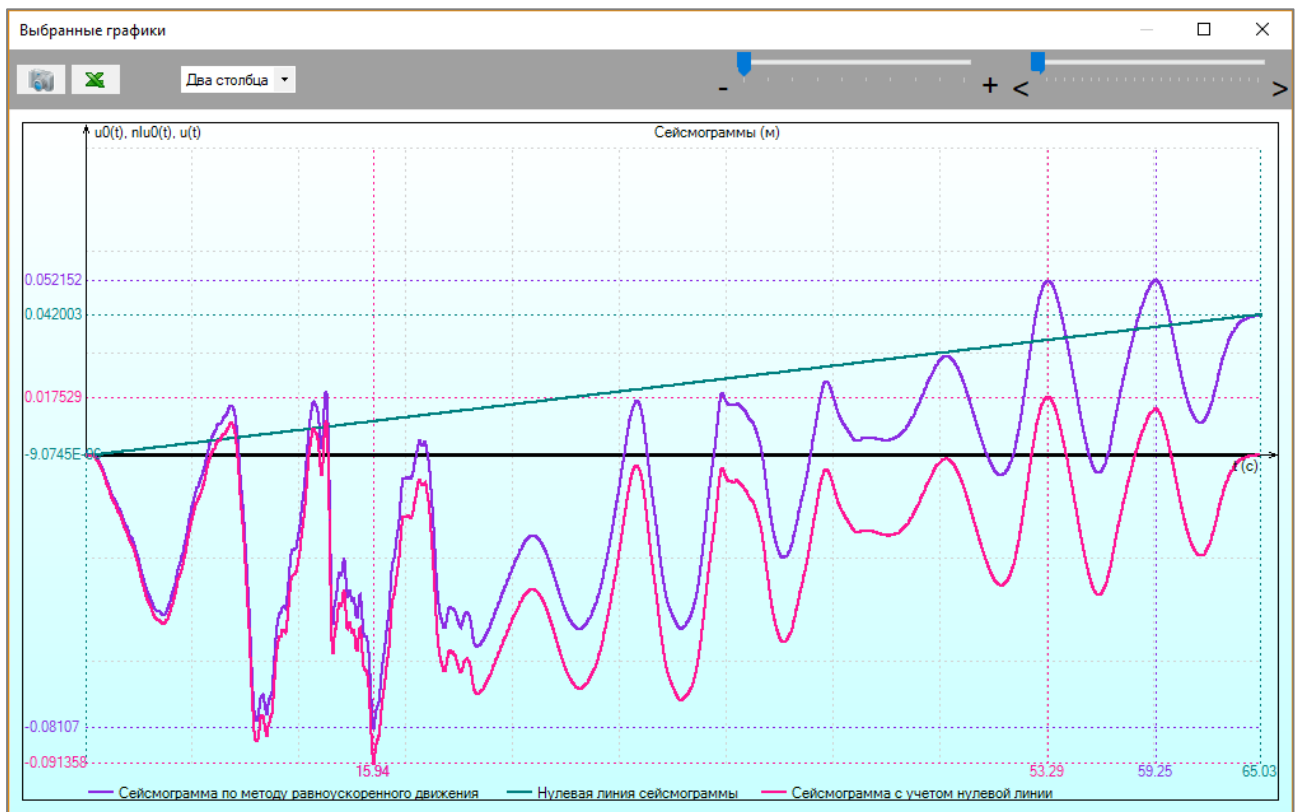


Рис. 13.13. Поворот нулевой линии

Помимо вышеперечисленных функций, утилита дает для выбранной акселерограммы землетрясения возможность анализа частотного состава с помощью преобразования Фурье, получения спектров реакции ускорений, скоростей и перемещений при указанном относительном затухании (рис. 13.14).

✍️ Обратите внимание, что визуализация исходных данных и полученных результатов возможна только для графиков с совпадающими единицами измерения.

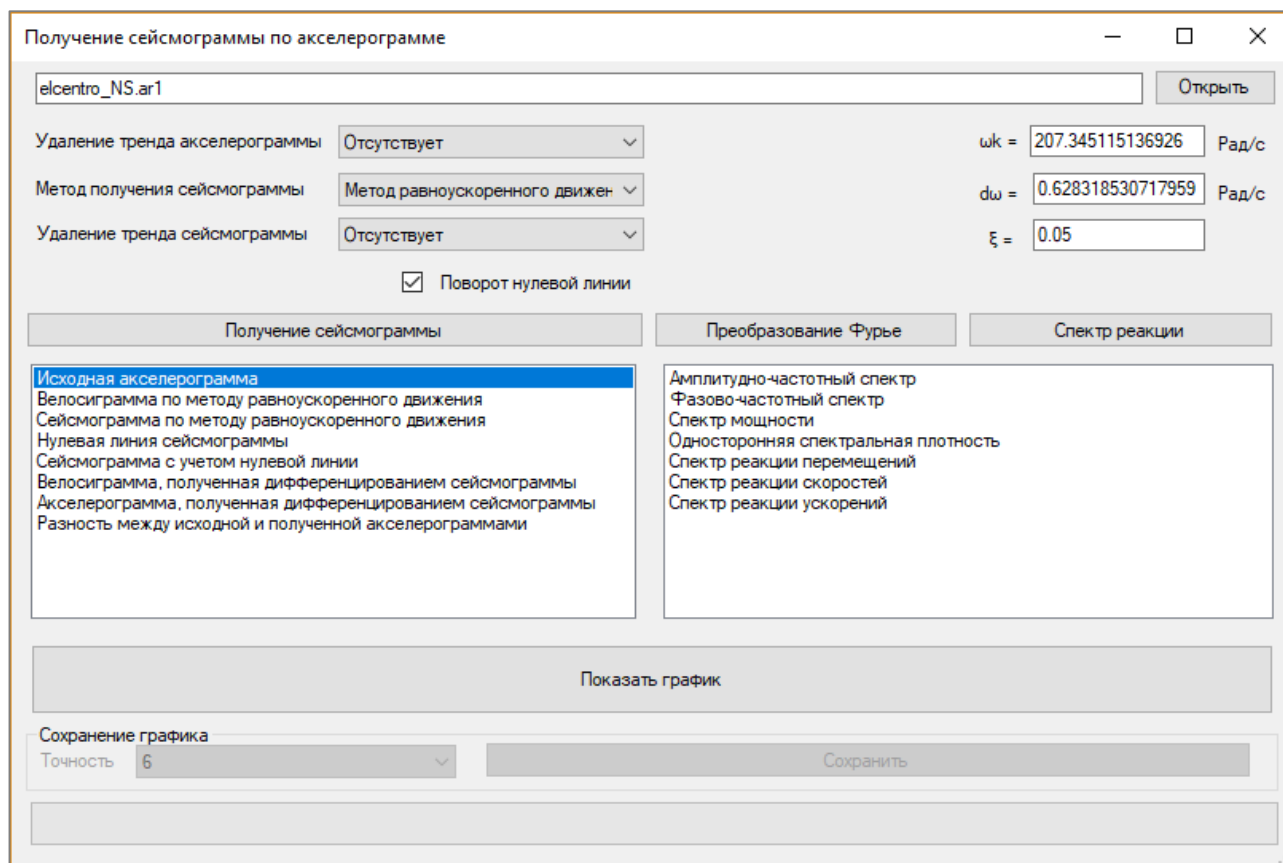





Рис. 13.14. Преобразование Фурье и получение спектров реакции указанной акселерограммы

Полученная в результате преобразований сейсмограмма может быть использована при расчете на сейсмические воздействия в динамике во времени (ДИНАМИКА +), а вычисленные спектры реакции ускорений, скоростей и перемещений — и в расчете на сейсмическое воздействие по спектру реакции одномассового осциллятора для метода разложения по формам собственных колебаний.

Сохранение полученных результатов с указанной точностью осуществляется в файлы:

- **.ar1** (для *акселерограммы* при сейсмической нагрузке **Сейсмограмма**);
- **.sr1** (для *сейсмограммы* при сейсмической нагрузке **Акселерограмма**);
- **.vr1** (для *велосиграммы*, независимо от представления сейсмической нагрузки);
- **.rsa** (для *спектра реакции ускорений*);
- **.rsv** (для *спектра реакции скоростей*);
- **.rsd** (для *спектра реакции перемещений*).

При отображении графиков имеется возможность создать копию изображения с экрана (щелкнув на кнопке ) и выполнить экспорт данных в .xlsx-файл (щелкнув на кнопке ) , см. рис. 13.15.

 Преобразование Фурье и вычисление спектров реакции доступны при выборе исходной или полученной акселерограммы, независимо от выбора представления сейсмической нагрузки.

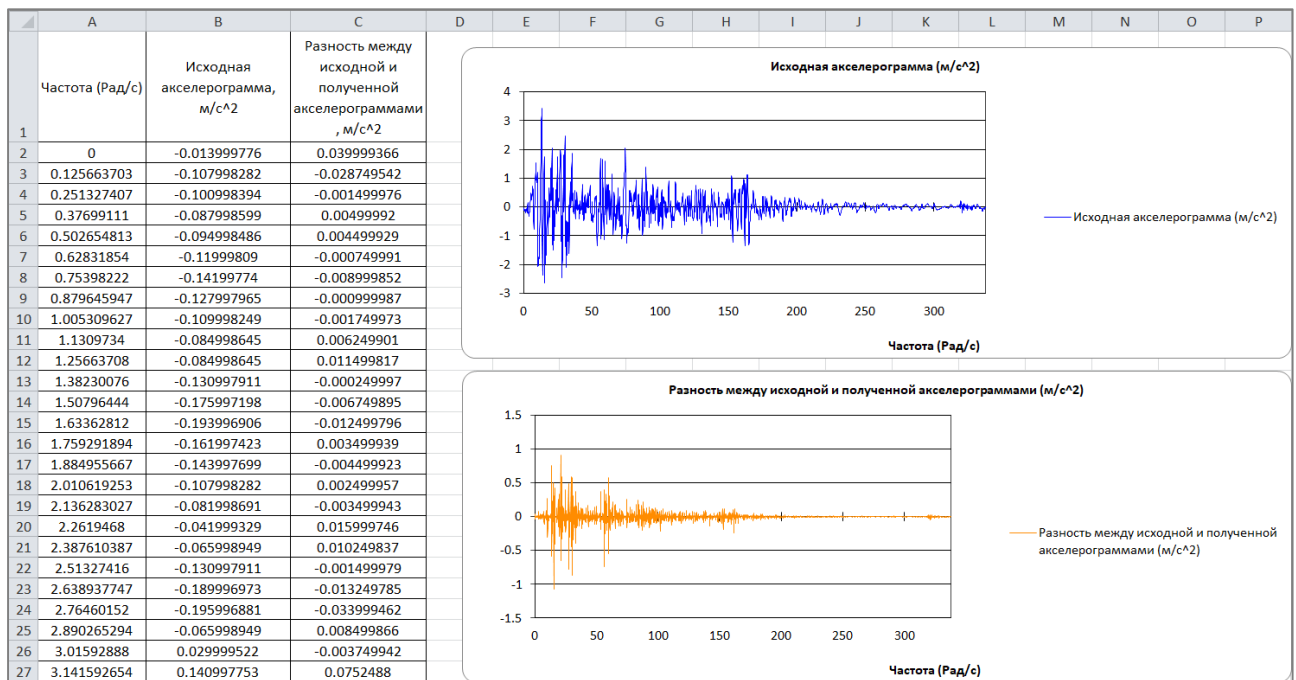



Рис. 13.15. Экспорт данных в .xlsx-файл

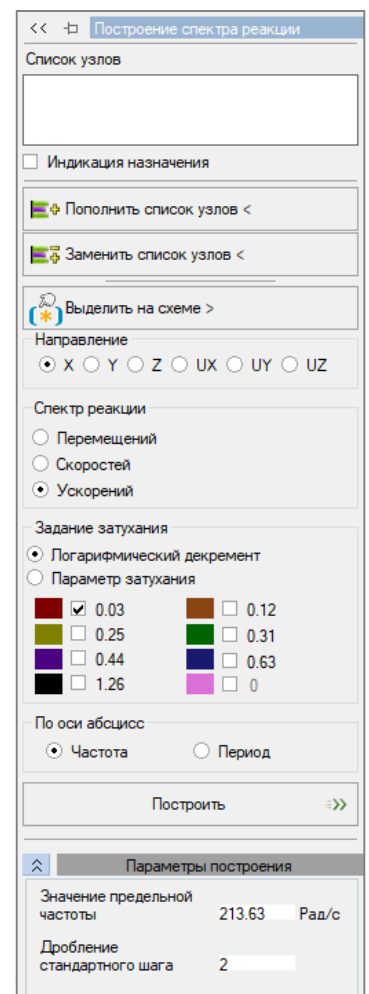
13.2 Анализ результатов

Для статических загрузений в режиме **Результаты расчета** данные отображаются для суммы всех статических загрузений. Для суммарного загрузения можно отобразить перемещения узлов, усилия в стержнях и пластинах, усилия в спец. элементах, напряжения в объемных элементах, результаты РСУ, главные и эквивалентные напряжения в пластинах и объемных элементах.

Результаты расчета **Динамики во времени** отображаются для каждого момента времени. Помимо результатов, описанных выше, имеется возможность отображения графиков **Ускорений, Скоростей, Перемещений** и **Построения спектра реакции**.

Для построения спектра реакций необходимо выполнить команду **Спец. результаты** ⇒ **Построение спектра реакции**

либо нажать кнопку  на панели инструментов. В появившемся окне (рис. 13.16) необходимо указать узлы, для которых будет построен спектр реакции, выделив их на схеме и нажав **Пополнить список узлов** или же **Заменить список узлов**, если необходимо изменить уже существующий. Далее нужно указать **Направление** (X, Y, Z, UX, UY, UZ) и **Спектр реакции** (**Перемещений, Скоростей, Ускорений**). Также необходимо выбрать критерий затухания (**Логарифмический декремент** либо **Параметр затухания**) и его значение, установив флажок напротив нужного значения. Последним параметром является указание величины, которая будет отложена по оси абсцисс — **Частота** или **Период**. При необходимости задания **Значения предельной частоты** и **Дробления стандартного шага** следует воспользоваться вкладкой **Параметры построения**.




спектра реакции

Значения предельной частоты и Дробления стандартного шага

При построении спектра реакции для двух и более узлов суммарная реакция всех узлов вычисляется как среднее арифметическое реакций в каждом узле.

Полученный спектр реакции (рис. 13.17) можно импортировать MS Excel, сохранить в файл или же сохранить как изображение. Также с помощью двух полос прокрутки можно масштабировать и перемещать спектр.

Для построения графиков зависимости ускорений, скоростей и перемещений от времени необходимо перейти в режим **Результаты по узлам** (воспользовавшись командой **Результаты** ⇒ **Узлы** либо щелкнув на кнопке  на панели инструментов) и отобразить вкладку **Графики** на панели активного режима (рис. 13.18). На данной вкладке требуется указать направление и факторы вывода (перемещения, скорости, ускорения). После этого нужно выбрать узел, для которого будут отображены графики, нажав на него левой кнопкой мыши.

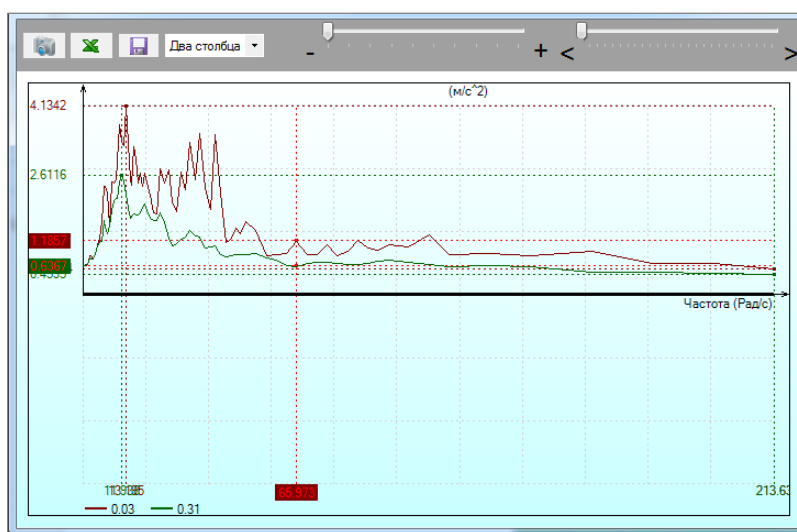


Рис. 13.17. Спектр реакции

Для построения графиков зависимости усилий от времени для стержневых, пластинчатых или объемных элементов необходимо перейти в режим **Результаты по стержням**, **Результаты по пластинам** или **Результаты по объемным КЭ**. В появившемся окне режима (рис. 13.19) требуется перейти на вкладку **Графики** и отметить флажками усилия, которые будут отображены. Далее нужно щелкнуть на элементе, для которого будут построены графики.

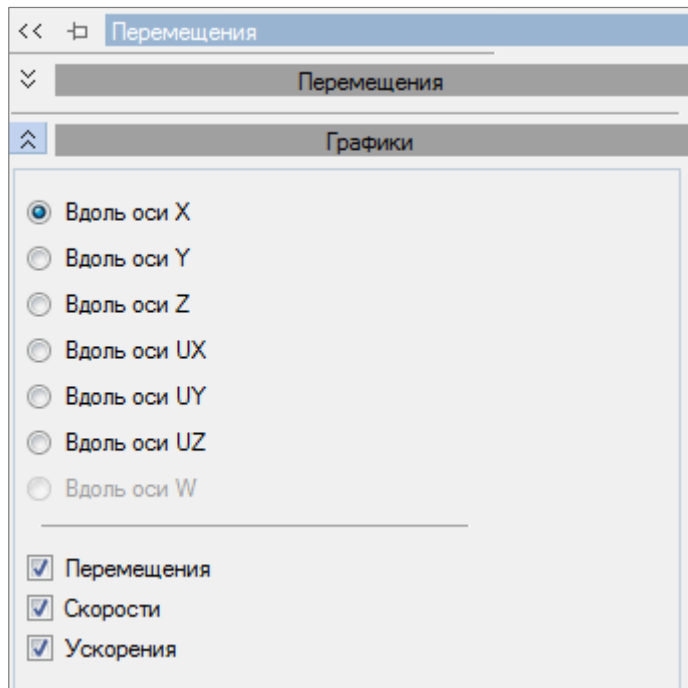


Рис. 13.18. Построение графиков

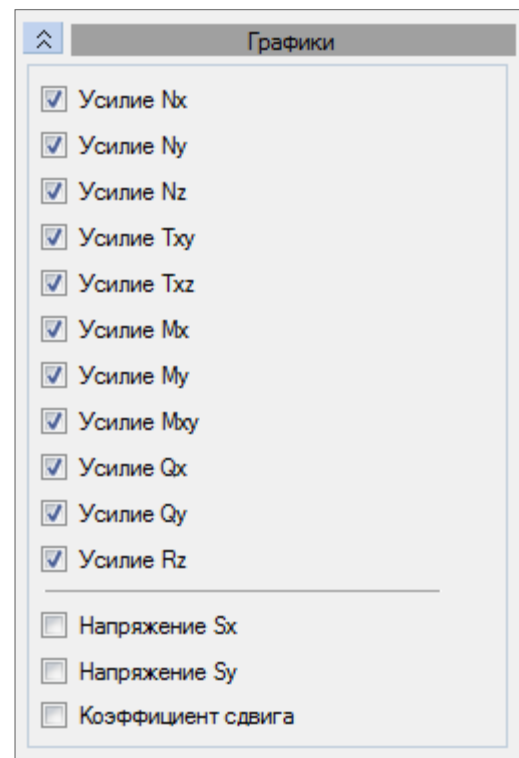


Рис. 13.19. Усилия в пластинах