

Дробот Дмитрий, конструктор

ЛИРА 10.4: ПРОСТОЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА БАЛКИ НА ЕЕ СТРУКТУРНОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ В ВИДЕ ОТКАЗА ОДНОЙ ИЗ ОПОР

1. Ниже рассмотрим условный пример, для которого выбрана простая несущая конструкция, что позволяет любому специалисту, ознакомившемуся с предметом нижеприведенным материалом, быстро и самостоятельно выполнить для анализа результатов все необходимые «ручные» прикидки.

В качестве объекта анализа выбрана двухпролетная неразрезная металлическая балка (см. рис. 2). Оба пролета равны, длина каждого из них составляет 6 м. Сечение балки – двутавр (профиль 45 Б1 по СТО АСЧМ 20-93). Ориентация сечения – стенка двутавра лежит в вертикальной плоскости. Материал профиля – низкоуглеродистая сталь С245 по ГОСТ 27772-88. Нагрузка, заданная на балки в виде системы узловых сил загрузки № 1, эквивалентна равномерно-распределенной интенсивностью $q = 1$ тс/пм. Закрепления: левая опора закреплена по степеням X, Y, Z; средняя и правая – Z. Шаг разбиения конечных элементов балки – 1 м. Использован тип КЭ 10 (для учета эффектов геометрической нелинейности для стержневых КЭ необходимо применять КЭ 309, КЭ 310).

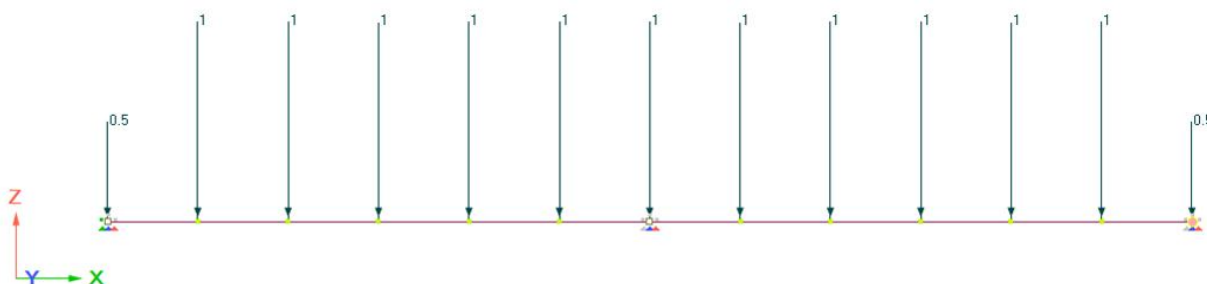


Рис. 2 – Математическая модель до повреждения отказом крайней правой опоры (загружение № 1)

Для упрощения предположим, что вопросы устойчивости не актуальны.

В качестве аварийного повреждения рассматривается «мгновенный» отказ правой опоры в вертикальном направлении.

На первом этапе после создания конечно-элементной схемы выполняется статический расчёт с целью определения деформаций и внутренних усилий в «неповрежденной» математической модели.

Далее в расчётной схеме для правого узла необходимо удалить закрепление по оси Z . В общем случае для опорных узлов может рассматриваться отказ не всех закреплений, а одного или нескольких из них. Тогда в расчетной схеме необходимо удалить закрепления только по тем степеням свободы, отказ которых рассматривается. Для восстановления статического равновесия в новом нагружении № 2 к правой опоре конечно-элементной модели прикладывается нагрузка, по величине и направлению равная действовавшей в этой опоре реакции (см. рис. 3). В нашем случае – $R_{\text{неповрежд.}} = 2,7708 \text{ тс}$.

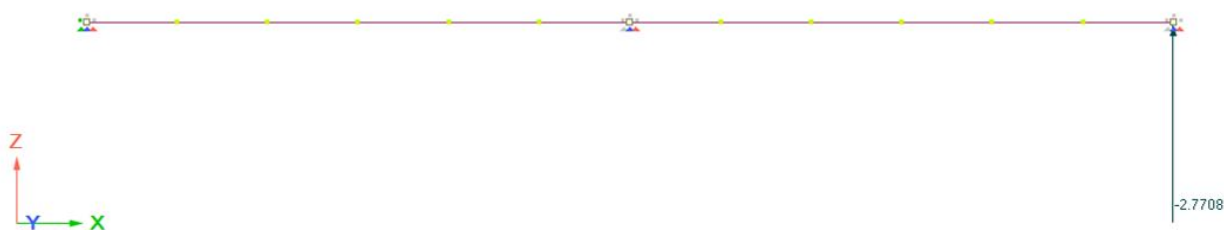


Рис. 3 – Математическая модель с измененными закреплениями (удалена связь по оси Z для крайней правой опоры, в которой для восстановления статического равновесия приложена опорная реакция, нагружение № 2)

После этого, чтобы убедиться в эквивалентности замены элемента соответствующими внешними силами, можно выполнить проверочные статические расчёты.

2. Затем применительно к ПК Лира (версии 10 и выше) в меню «Редактор загрузений» нужно создать новое нагружение, выбрав в подменю

«Динамика во времени». Здесь же задаются необходимые исходные данные для расчета: время интегрирования, шаг интегрирования, демпфирование и т.д.

Некоторые из вышеперечисленных исходных данных следует задавать с определенной степенью «осторожности», в том числе потому, что часть из них может измениться (быть уточнена) после анализа результатов расчета – реакции расчетной схемы строительной конструкции на рассматриваемое аварийное повреждение.

Проблема выбора величины времени интегрирования T среди прочего заключается в следующем. Если задать малое время интегрирования, то существует опасность не увидеть в результатах расчетов наиболее неблагоприятные параметры напряженно-деформируемого состояния. В то же время задание слишком большого времени интегрирования для многоузловых расчетных схем может привести к необоснованно долгому времени расчета.

Исходя из накопленного опыта подобных расчетов, стартовую (для первых предварительных расчетов) величину времени интегрирования T рекомендуется выбирать для «рядовых» строительных конструкций более 5-10 сек, а в общем случае в зарубежной литературе рекомендуется брать не менее $0.5 \cdot T_{1,повр}$ (где $T_{1,повр}$ - период колебаний по первой частоте поврежденной отказом расчетной схемы, т.е. **расчетной схемы, в которой уже удален элемент, отказ которого рассматривается**).

В большинстве случаев (в инженерном понимании) максимумы внутренних усилий после отказа будут реализовываться в момент времени $0.5 \cdot T_{i,повр}$ (где $T_{i,повр}$ - период колебаний по i -й частоте поврежденной отказом расчетной схемы, по своей форме колебаний «наиболее соответствующей» внешнему виду формы деформаций модели при отказе элемента).

Шаг интегрирования рекомендуется задавать не менее $1/10 \dots 1/20 T_{1,повр}$. При необходимости можно задать опцию учета демпфирования, параметры которого в некоторых случаях можно принять в соответствии с п. 11.1.10 СП 20.13330.2011. В нашем примере время интегрирования условно задано равным $T = 1.5$ сек, шаг интегрирования $t = 0,0015$ сек, параметры демпфирования: логарифмический декремент колебаний $\delta = 0,3$ и частота $\omega = 2.416$ Гц. Значение которой было взято соответствующим первой форме колебаний (см. рис. 4) и вычислено в отдельном расчетном файле, для этого в нем выполнен модальный анализ при удаленной правой опоре.

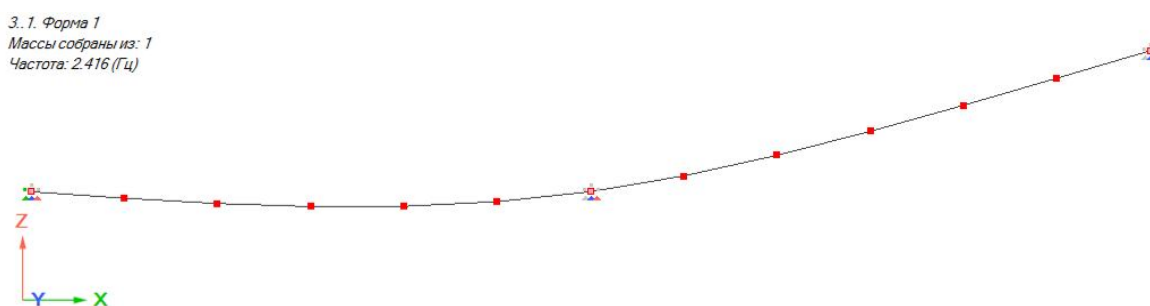


Рис. 4 – Первая форма колебаний математической модели, «поврежденной» отказом правой опоры

Формирование матрицы масс для текущего динамического нагружения выполним путем использование опции «сформировать матрицу масс из плотности элементов», коэффициент преобразования $k_{преобр.} = 1$.

3. Далее в созданном на 2-м этапе динамическом нагружении необходимо повторно в узле правой опоры приложить внешнюю сосредоточенную силу, соответствующую ранее действовавшей опорной реакции. Отличие в том, что сила должна быть обратного знака, плюс ее

нужно задать переменной от времени (см. рис. 5, 6), для ПК Лира имеющей следующий вид функциональной зависимости¹:

$$R(t) = \begin{cases} \frac{R_{\text{неповрежд.}}}{t_{\text{отк}}} \cdot t, & \text{при } 0 \leq t \leq t_{\text{отк}} \\ R_{\text{неповрежд.}} & \text{при } t > t_{\text{отк}} \end{cases},$$

где $t_{\text{отк}}$ – 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.

Для первых оценочных расчетов можно задать $t_{\text{отк}} = 0,01$ сек (также поступим и в нашем примере). При этом стоит отметить, что существуют определенные проблемы, которые необходимо учитывать, при выборе величины времени отказа $t_{\text{отк}}$. Так не стоит забывать, что в общем случае при задании времени отказа t_2 , большего чем время t_1 , взятого для относительного сравнения, могут реализоваться и выявиться более «неблагоприятные» параметры НДС, чем при времени отказа t_1 .

Также можно отметить, что «обычно» при времени отказа более 1...1,5 с величина динамического всплеска усилий после разрушения элемента становится несущественной в сравнении с последствиями отказа в статической постановке ($k_{\text{дин, max}} \leq 1,25$).

¹ В идеале вид такой зависимости должен устанавливаться экспериментальным путём и быть разным для разных усилий, но, учитывая высокую скорость отказа, зависимость можно принять кусочно-линейной и одинаковой для всех усилий.

Правомерность использования кусочно-линейной функции при «больших» значениях времени отказа вызывает сомнения, т. к. не известно влияние усиливающейся «неравновесности» внутренних усилий в сечении.

Интересными представляются научные исследования, в которых может быть осуществлена следующая постановка: используется альтернативный подход отказа несущих элементов, заключающийся в «обнулении» модуля упругости E . В таком случае можно будет проанализировать по каким законам во времени за время отказа $t_{\text{отк}}$ падают усилия в сечении элементов, отказ которых рассматриваются.

Поэтому в общем случае, а в первую очередь для сооружений I-го уровня ответственности, рекомендуется выполнить серию расчетов при варьировании $t_{отк} = 0.001 \text{ сек.} \dots 2 \cdot T_{1,повр.}$

2.1. Динамическая нагрузка (узловые силы)

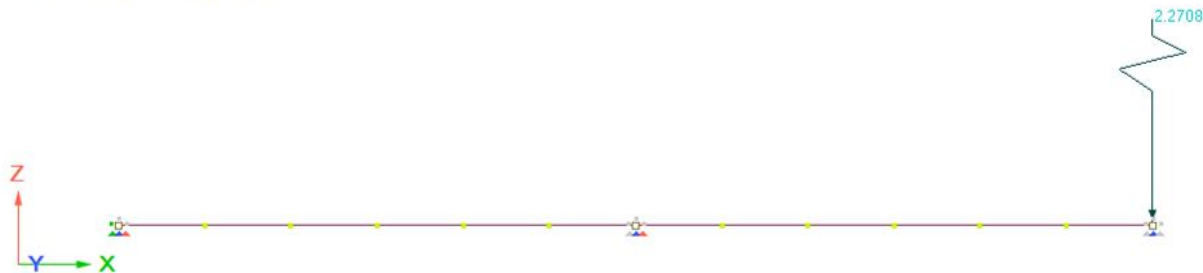


Рис. 5 – Математическая модель с заданной внешней силой, имитирующей практически мгновенный отказ правой опоры

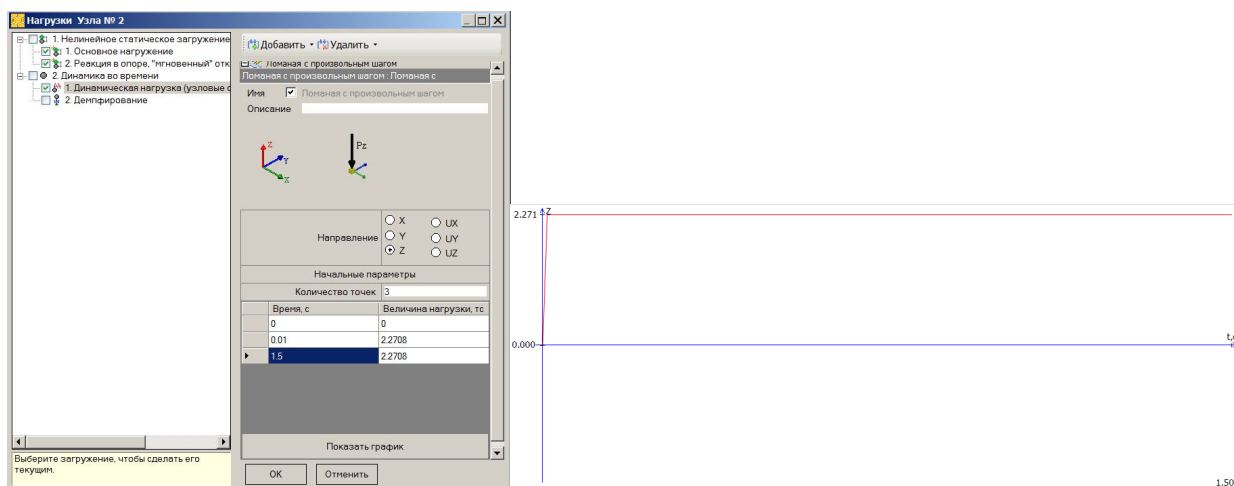


Рис. 6 – Задание переменной от времени нагрузки для расчета на отказ опоры (справа задание в табличном виде, слева – графическое представление)

4. Далее следует запустить программный комплекс на расчет. Для удобства анализа результатов можно воспользоваться возможностью ПК Лира отображать результаты в виде графиков (см. рис. 7.1, 7.2).

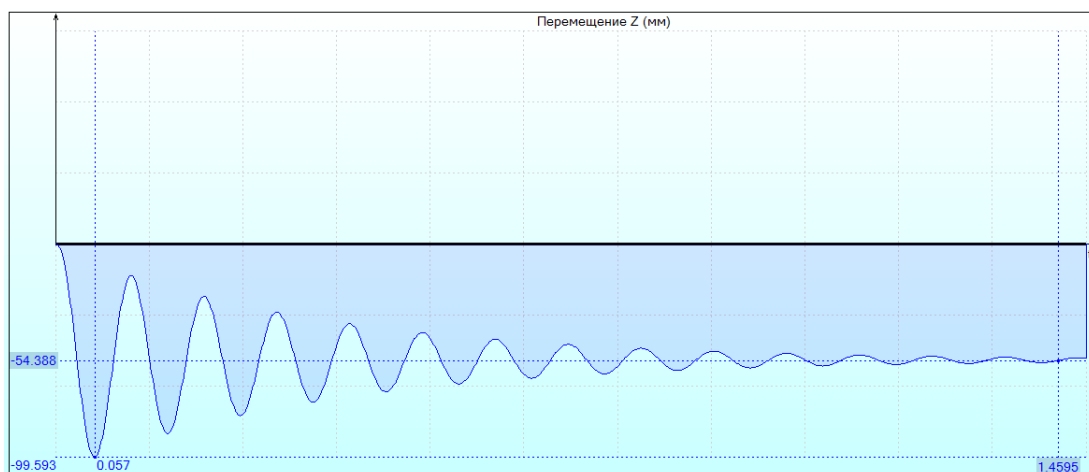


Рис. 7.1 – Перемещения опорного узла во времени после отказа
(ед. изм. – мм, время по оси абсцисс в сек.)

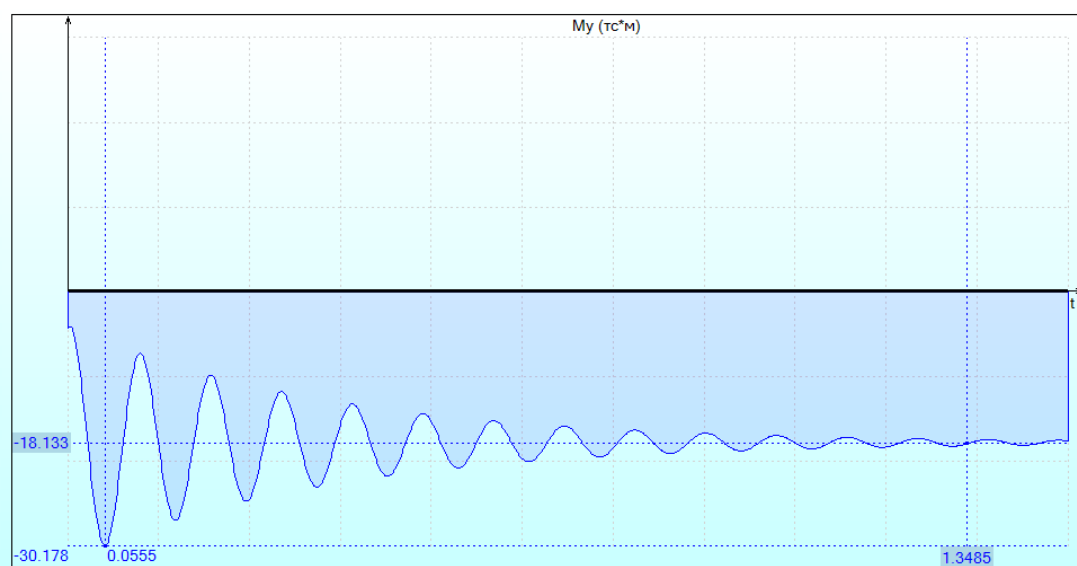


Рис. 7.2 – Изменение изгибающего момента над центральной опорой во времени
(ед. изм. – тс·м, время по оси абсцисс в сек.)

В разобранный выше условном простом примере коэффициент динамичности для параметров НДС, представленных на рис. 7.1 и 7.2 составил $k_{\text{дин}} \approx 2$.

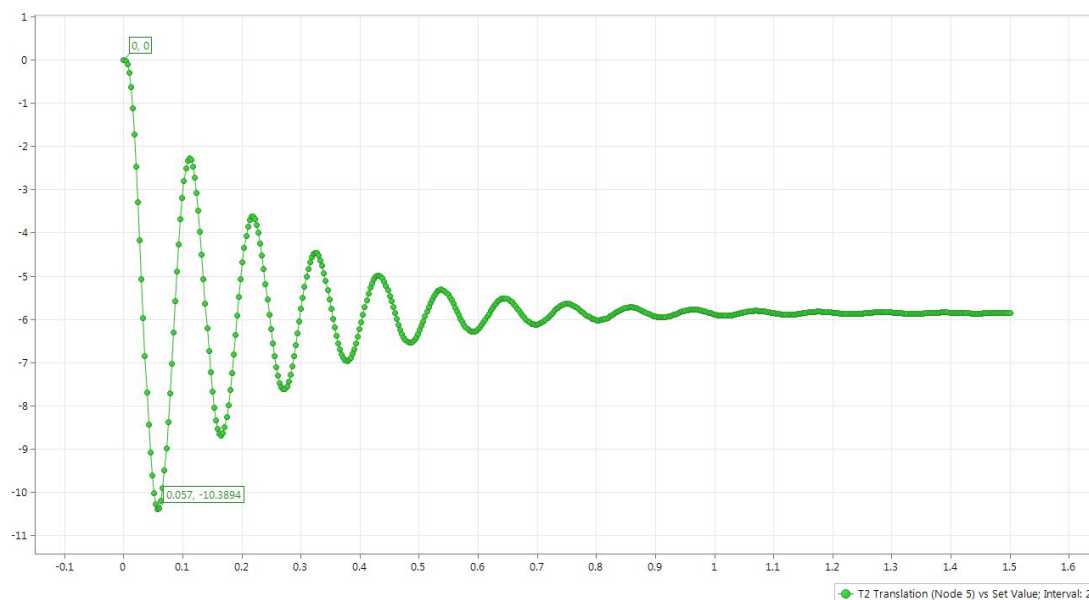


Рис. 8 – Перемещения опорного узла во времени после отказа при расчете в ПК Nastran NX (ед. изм. – см, время по оси абсцисс в сек.)

...

Ключевые слова: *живучесть, механическая безопасность, внезапные структурные повреждения.*