



Руководство пользователя



Моделирование движения железнодорожных экипажей по упругим мостам

Рассматривается модель взаимодействия железнодорожных экипажей с упругим мостом при движении. Предлагаются способы удобного описания мостов, представлены инструменты анализа их динамики

Оглавление

21. МОДУЛЬ UM VBI: МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ ПО МОСТАМ	1-3
21.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	1-3
21.2. МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭКИПАЖА С МОСТОМ.....	1-3
21.3. ПОДВИЖНАЯ НАГРУЗКА.....	1-6
21.4. ПОДГОТОВКА МОДЕЛИ МОСТА.....	1-8
21.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МОСТА	1-15
21.6. ПРИМЕР МОДЕЛИРОВАНИЯ	1-20

1. МОДУЛЬ UM VBI: МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ЭКИПАЖЕЙ ПО МОСТАМ

1.1. Общие сведения

Модуль позволяет строить и анализировать модели, учитывающие взаимное влияние динамики движущихся железнодорожных экипажей и упругих мостов. Для его использования программный комплекс «Универсальный механизм» (ПК УМ) должен включать модули UM Loco, с помощью которого моделируется динамика экипажей, и UM FEM, необходимый для анализа динамики мостов.

Моделирование динамики железнодорожных экипажей описано в [Главе 4](#). При движении по упругому мосту все переменные, относящиеся к экипажу, рассчитываются с учетом влияния динамики моста.

Мост является упругой подсистемой, модель которой строится в соответствии с модальным подходом. Алгоритм создания подсистемы на основе импорта данных из программ конечно-элементного анализа ANSYS и MSC.NASTRAN, а так же инструменты анализа ее динамики, описаны в [Главе 11](#).

В этой главе будет рассмотрена модель взаимодействия экипажа с мостом и основные правила использования предлагаемого модуля.

1.2. Модель взаимодействия экипажа с мостом

В программе «Универсальный механизм» рельс моделируется как безынерционный упруго-диссипативный силовой элемент. Предположения, на основе которых построена модель рельса, и ее подробное описание изложены в п. 4.3.1. Силы в контакте колесо-рельс зависят от текущего положения и скорости точек рельса под колесом (в зоне пятна контакта).

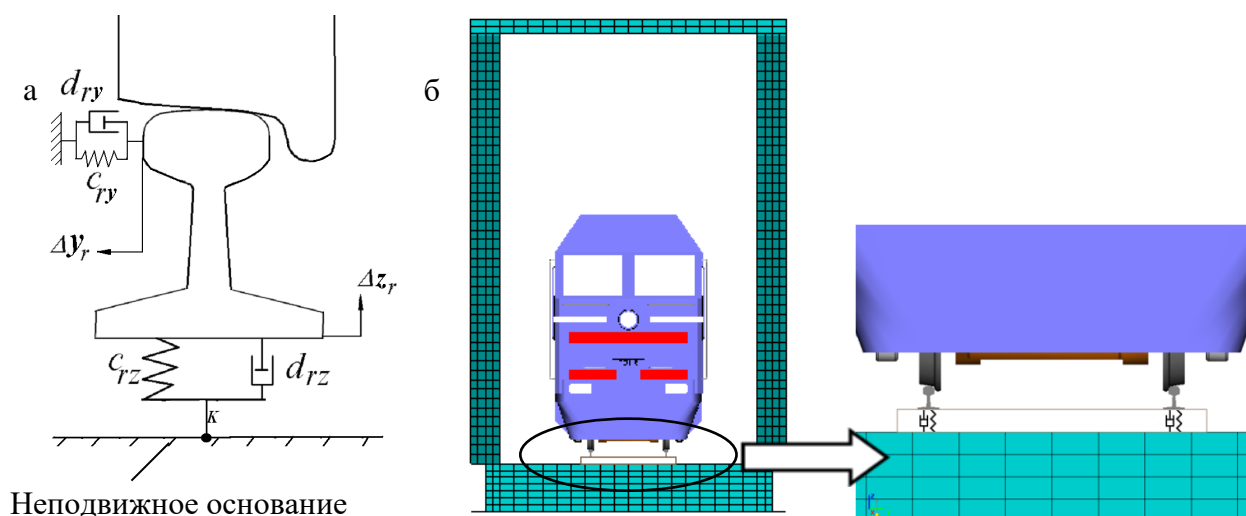


Рис. 1.1. (а) – модель рельса как безынерционного упруго-диссипативного силового элемента; (б) – модель упруго-диссипативного основания рельса, включающая мост

Поперечная и вертикальная силы, возникающие в силовом элементе, рассчитываются по следующим формулам (рис. 1.1):

$$R_y = -c_{ry}\Delta y_r - d_{ry}\Delta \dot{y}_r$$

$$R_z = -c_{rz}\Delta z_r - d_{rz}\Delta \dot{z}_r,$$

где R_y, R_z – поперечная и вертикальная силы; c_{ry}, c_{rz} , – коэффициенты поперечной и вертикальной жесткости рельса; d_{ry}, d_{rz} – коэффициенты демпфирования в поперечном и вертикальном направлениях; $\Delta y_r, \Delta z_r$ – поперечное и вертикальное смещения рельса.

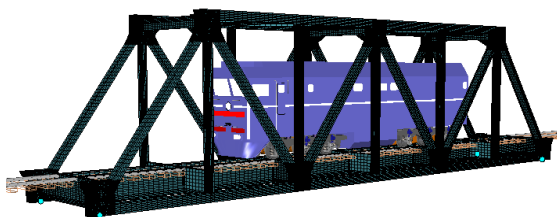
Смещения рельса относительно основания, а также их первые производные по времени зависят от положения и скорости точки К прикрепления силового элемента. Напомним, что поворот рельса вокруг продольной оси не учитывается. Если рельс лежит на неподвижном основании, например, земле, продольная координата точки К определяется текущим положением колеса, а ее скорость равна нулю.

Если рельс лежит на упругом мосту, перемещение рельса в глобальной системе координат рассчитывается как сумма его перемещения относительно моста и перемещения моста в точке К. Относительное смещение зависит от жесткости шпал, балластного слоя и других элементов пути. При интегрировании уравнений движения положение точки К определяется текущим положением колеса. Сила демпфирования зависит от скорости рельса относительно моста. Заметим, что, в общем случае скорость точки К не равна нулю.

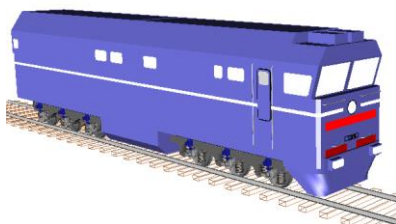
Предлагаемый инструмент учитывает упругость моста при расчете сил в контакте колесо-рельс и позволяет анализировать динамику моста с учетом подвижной нагрузки от колеса, приложенной через рельс.

Основным объектом исследования может быть как экипаж, так и мост. Для исследования динамики моста можно использовать два подхода: совместное и раздельное моделирование. Совместная модель учитывает взаимное влияние динамики экипажа и моста. То есть, она строится в полном соответствии с правилами, которые кратко описаны выше.

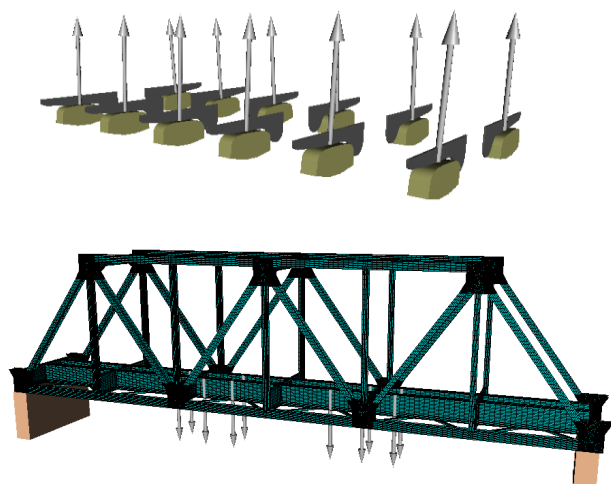
Раздельная, или упрощенная модель не учитывает прогибы и скорости точек моста при расчете сил в контакте колесо-рельс. На рис. 1.2 поясняется алгоритм раздельного моделирования.



При движении железнодорожного экипажа по мосту на каждом шаге интегрирования выполняется следующий алгоритм.



Строятся уравнения движения железнодорожного экипажа без учета его взаимодействия с мостом.



Рассчитываются силы в контакте колесо-рельс.

Полученные контактные силы прикладываются к мосту в точках, соответствующих текущим положениям колес экипажа.

Рис. 1.2. Алгоритм раздельного моделирования динамики моста и экипажа.

То есть, при раздельном подходе подвижная нагрузка на мост со стороны экипажа не зависит от динамики моста. При движении экипажей в режиме выбега по ровному пути на мост действуют силы, соответствующие развеске экипажа, то есть, распределению сил тяжести между колесами. Если путь неровный, на динамику экипажа, а, следовательно, и на значения сил в контакте колесо-рельс влияют неровности пути.

Для железнодорожного экипажа раздельное моделирование ничем не отличается от движения по абсолютно твердому основанию (земле).

Обе модели строятся при следующих допущениях:

- учитываются вертикальные и поперечные силы в контакте «колесо-рельс»;
- вертикальные силы прикладываются независимо для каждого колеса железнодорожного экипажа;
- поперечные силы усредняются для каждой колесной пары.

Раздельное моделирование выполняется быстрее. Взаимное влияние динамики моста и экипажа можно оценить путем сравнения результатов, полученных с использованием обеих моделей.

Выбор модели для анализа динамики моста описан ниже в п. 1.5. "Моделирование динамики моста", с. 1-15.

1.3. Подвижная нагрузка

При движении отдельного железнодорожного экипажа или поезда по мосту на мост действуют подвижные силы, точки приложения которых в данный момент времени соответствуют положению колес экипажей.

Сила (нагрузка) называется *неподвижной*, если координаты точки ее приложения относительно локальной системы координат упругой подсистемы изменяются только вследствие деформации. В противном случае сила является *подвижной*.

Все силы, кроме контактной силы, рассмотренной в п. 11.4.3.1 являются неподвижными. Биполярный силовой элемент, сайлент-блок и другие силовые элементы задаются точкой прикрепления, которой соответствует узел конечно-элементной сетки упругого тела. Координаты этой точки относительно локальной СК для недеформированного тела не меняются.

Подвижная нагрузка может быть приложена в любой точке поверхности и не связана с каким-либо узлом. Для ее моделирования применяются два простых алгоритма: быстрый поиск точки приложения силы и ее преобразование к узловым силам.

Для алгоритма быстрого поиска точки приложения нагрузки используется понятие «контрольная площадка». Она строится из конечно-элементных полигонов поверхности упругого тела и включает контрольный полигон, внутри которого в данный момент находится точка приложения силы, и окружающие полигоны (рис. 1.3). При выходе точки за границу контрольного полигона новый контрольный полигон ищется среди окружающих полигонов, число которых невелико, после чего контрольная площадка перестраивается.

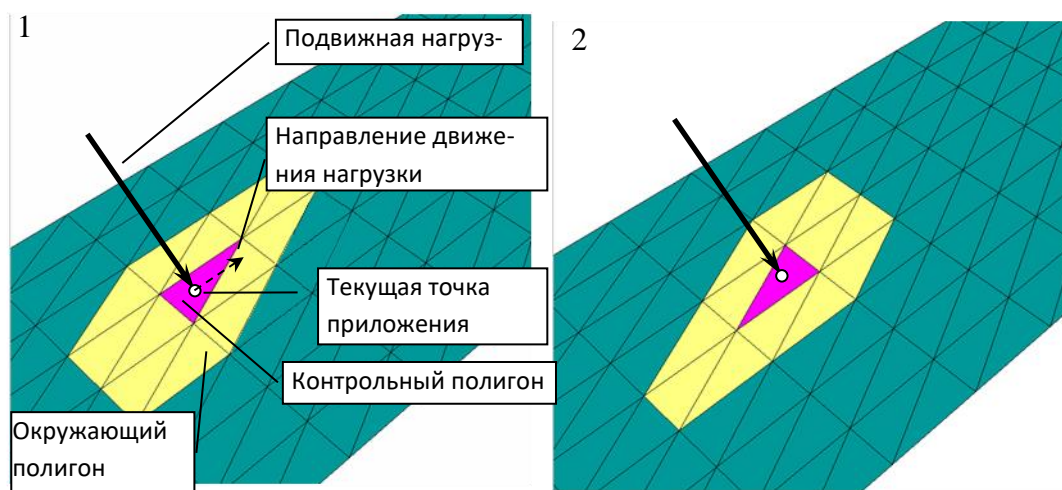


Рис. 1.3. Использование контрольных площадок для быстрого поиска точки приложения силы.

При моделировании движения железнодорожного экипажа по мосту можно показать контрольные площадки в анимационном окне. Необходимые для этого настройки будут описаны ниже в п. 1.5. "Моделирование динамики моста", с. 1-15.

Скорость v_K произвольной точки K поверхности рассчитывается по скоростям трех ближайших узлов с использованием линейных соотношений, которые поясняются на

рис. 1.4. Здесь v_1, v_2, v_3 – скорости узлов в глобальной системе координат; v_{31}, v_{21}, v_{K1} – скорости третьего, второго узлов и точки K относительно первого узла.

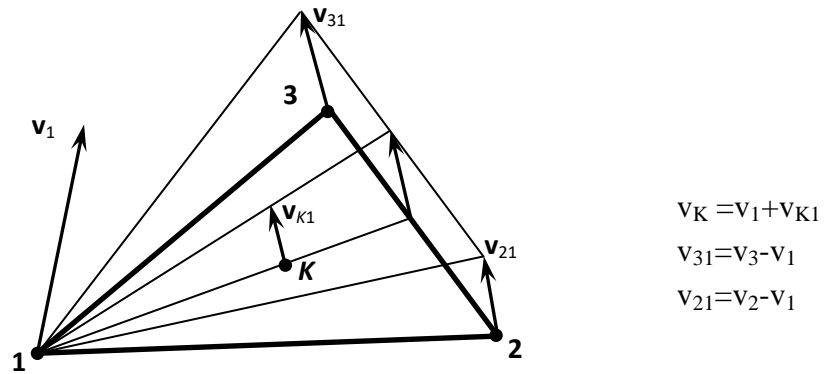


Рис. 1.4. Расчет скорости произвольной точки.

Преобразование подвижной нагрузки к узловым силам описано в п. 11.4.3.1. Приведенный ниже рис. 1.5 повторяет рис. 11.57. Подвижная сила и результат ее преобразования к узловым силам могут быть отображены в анимационном окне на каждом шаге интегрирования. Для этого используются переменные типа «Векторы, рассчитываемые пользователем» (п. 4.3.2.9). Инструкция создания данных переменных и отображения их в окне приводится ниже в п. 1.5. "Моделирование динамики моста", с. 1-15.

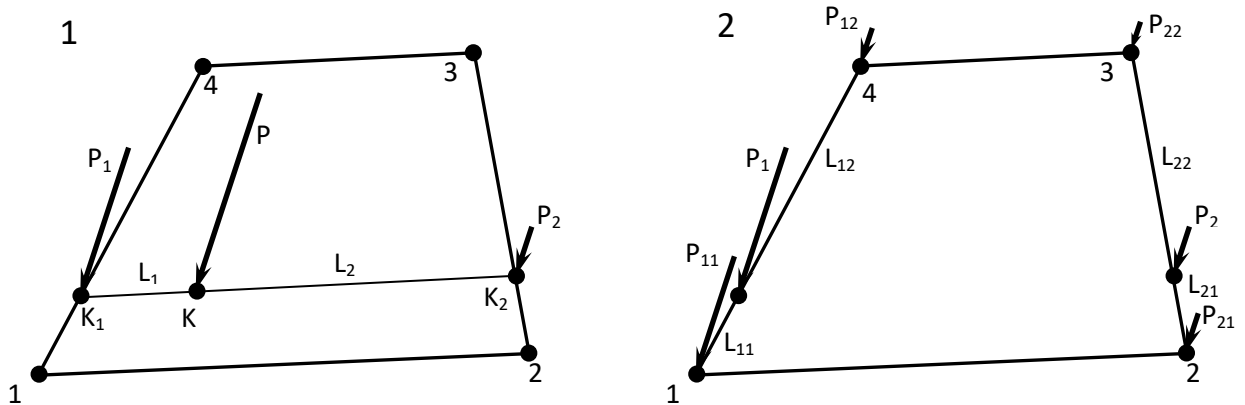


Рис. 1.5. Преобразование силы, приложенной в произвольной точке, к узловым силам.

1.4. Подготовка модели моста

Модель моста создается в соответствии с общими правилами подготовки данных упругой подсистемы, описанными в п. 1.2. "Модель взаимодействия экипажа с мостом", с. 1-3 - п. 1.4. "Подготовка модели моста", с. 1-8. Кроме того, необходимо удовлетворить следующие требования.

1. Продольная ось моста должна совпадать с осью **X** глобальной системы координат (СК0).
2. Плоскость качения моста, то есть плоскость, на которую кладут рельсы, должна совпадать с плоскостью **XY** СК0.
3. Чтобы упругая подсистема рассматривалась программой моделирования как железнодорожный мост, её комментарий должен содержать ключевую подстроку **@rwbridge=true@** в любой части, регистр не важен. Например, "Подсистема моделирует мост длиной 60 метров @rwbridge=true@".
4. В исходном положении отдельный железнодорожный экипаж или первый экипаж поезда должен быть расположен не ближе пяти метров от ближнего края моста. Это необходимо для исключения нежелательных переходных процессов, возникающих при въезде на мост.

Рассмотрим некоторые особенности описания моста на примере. Модель TGV_Bridge вы можете скачать по адресу:

www.universalmechanism.com/download/samples/um_samples_vbi.zip.

Пролетное строение моста, представленное упругой подсистемой **Bridge**, опирается на три абсолютно твердые опоры в девяти точках – по три точки на опору. В опорных точках упругая подсистема взаимодействует с базовым телом посредством девяти шарниров типа **6 ст. свободы**. Связи на передней опоре запрещают любые перемещения, связи на средней и задней опорах запрещают вертикальные и поперечные смещения. То есть, динамическая модель УМ не содержит тела, моделирующие опоры. Однако для наглядности она включает графический объект, который их изображает. Этот объект назначен сцене. На рис. 1.6 изображен общий вид модели. На рис. 1.7 показаны интерфейсные узлы, в которых выбираются шарнирные точки опор, в табл. 1.1 приведены их координаты в локальной системе координат упругой подсистемы. Рис. 1.8 представляет графический объект **Bridge footing**, который трижды включается в графический объект сцены **3 bridge footing**.

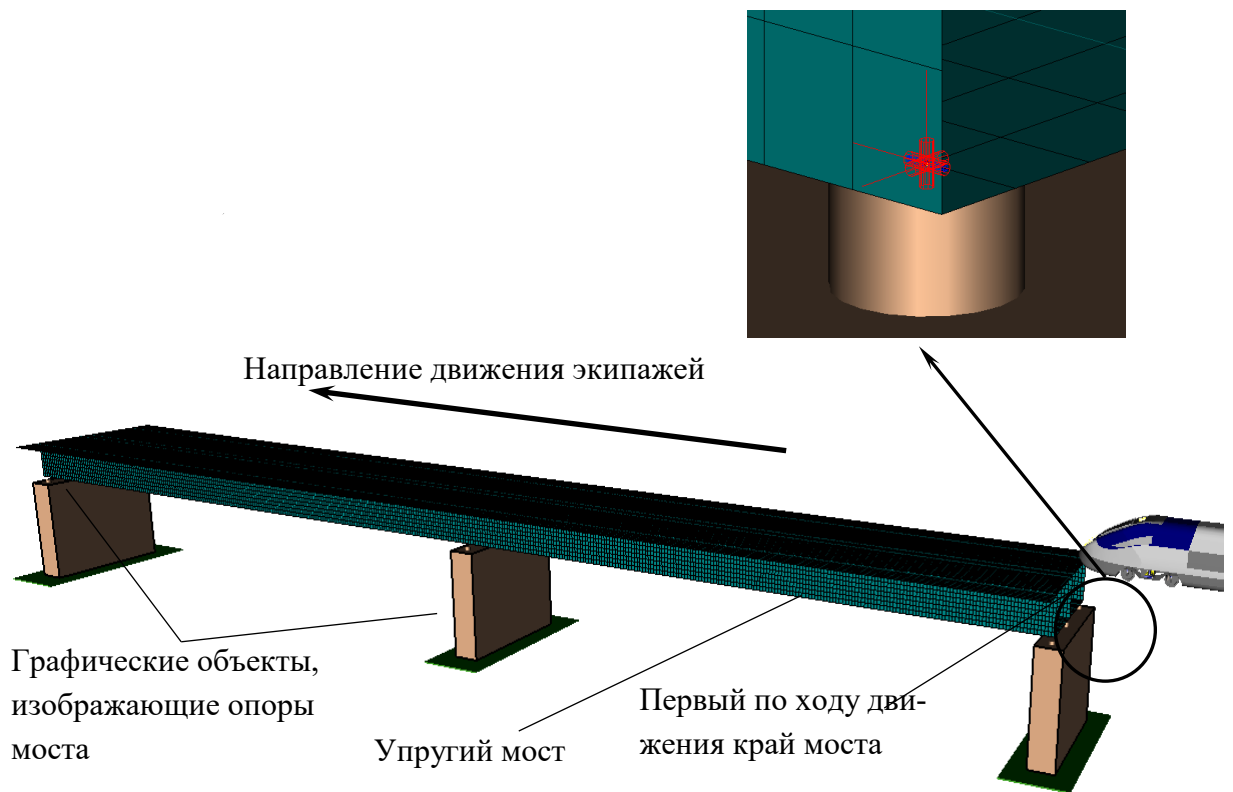


Рис. 1.6. Общий вид модели моста и пример задания шарнира, связывающего подсистему **Bridge**, с базовым телом **Base0**

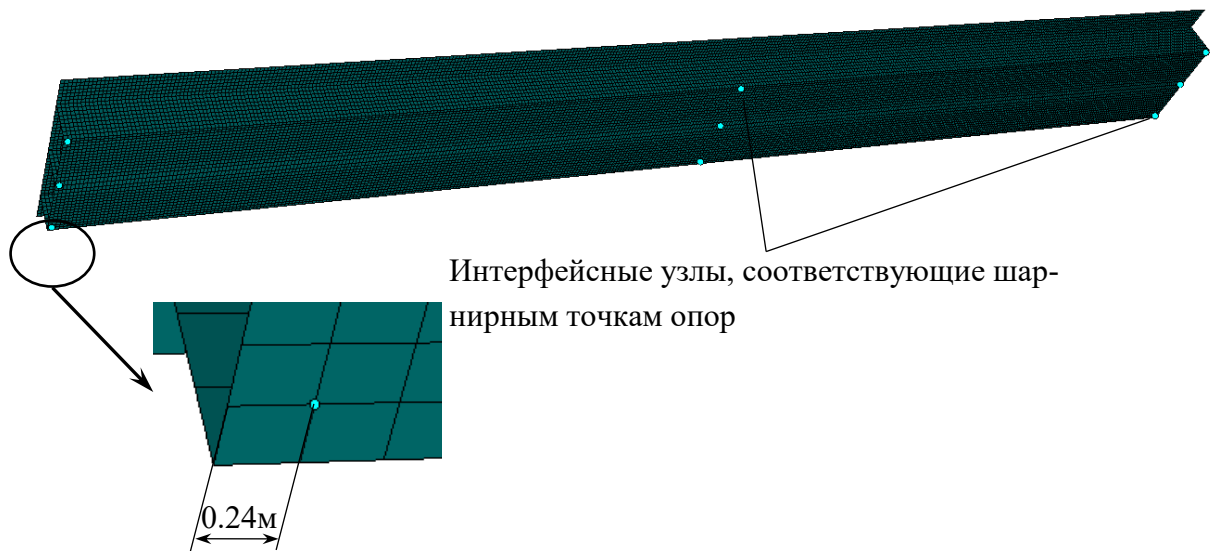


Рис. 1.7. Интерфейсные узлы упругой подсистемы Bridge.

Таблица 1.1

Координаты шарнирных точек опор в локальной системе координат Bridge

№ пп	X	Y	Z	Примечание
1.	47.76	4.185	-1.66	Передняя левая опора
2.	47.76	0.000	-1.66	Передняя средняя опора
3.	47.76	-4.185	-1.66	Передняя правая опора
4.	0.00	4.185	-1.66	Центральная левая опора
5.	0.00	0.000	-1.66	Центральная средняя опора
6.	0.00	-4.185	-1.66	Центральная правая опора
7.	-47.76	4.185	-1.66	Задняя левая опора
8.	-47.76	0.000	-1.66	Задняя средняя опора
9.	-47.76	-4.185	-1.66	Задняя правая опора

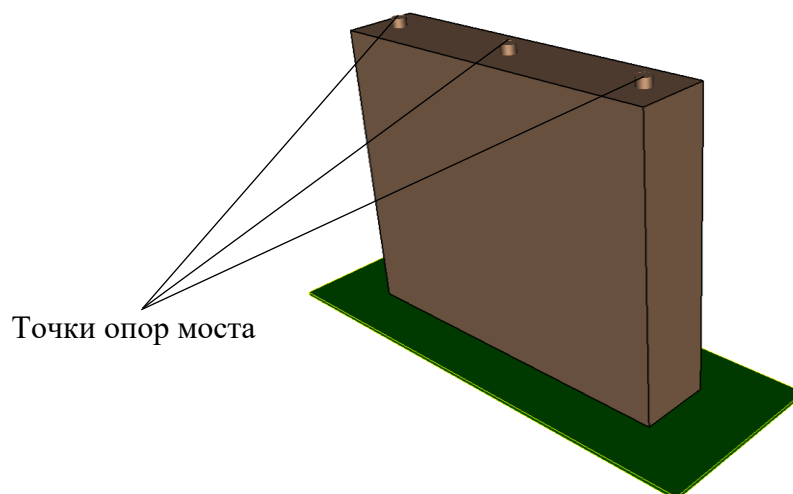


Рис. 1.8. Графический объект **Bridge footing** – основа для создания графического объекта сцены.

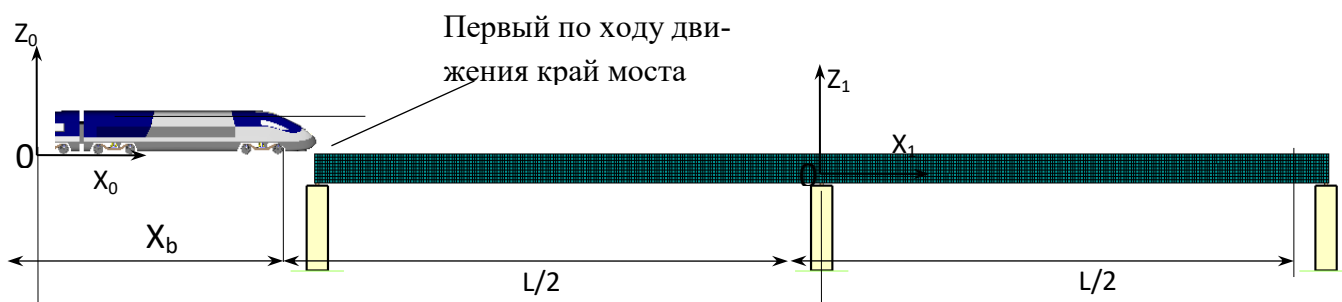


Рис. 1.9. Описание положения подсистемы **Bridge**, соответствующего положению моста на пути

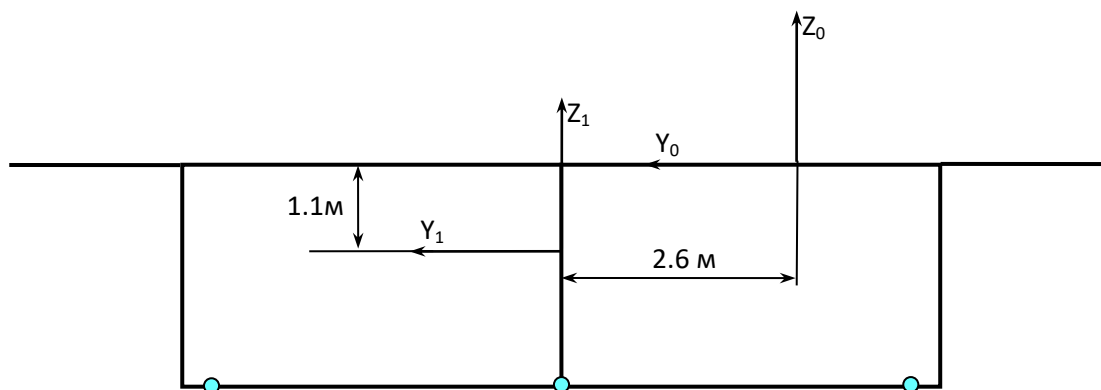


Рис. 1.10. Поперечное сечение моста и относительное положение локальной системы координат.

Модель желательно описать таким образом, чтобы иметь возможность быстро изменять положение моста на пути. Это может потребоваться, например, для проведения многовариантных расчетов, в которых будет варьироваться координата **X** моста.

Введем три переменные для описания положения моста.

Параметр модели	Значение	Комментарий
BridgeXBeginning	$X_b=10$ м	Расстояние от начала отсчета глобальной СК0 до заднего края моста.
ShiftXBridge	$X_b+L/2=10+48=58$ м	Сдвиг моста вдоль оси X СК0
ShiftYBridge	2.6 м	Сдвиг моста вдоль оси Y СК0
ShiftZBridge	-1.1 м	Сдвиг моста вдоль оси Z СК0

В примере рассматривается модель двухпутного моста. Она смещается по оси **Y**, чтобы совместить путь в модели **УМ** с правой колеей моста. Сдвиг по оси **Z** совмещает плоскость качения моста с плоскостью **XY** СК0.

Ниже на рисунках приводится описание положения подсистемы (рис. 1.11), графического объекта (рис. 1.12) и координат шарнира задней левой опоры (рис. 1.13, см. также рис. 1.6). Параметр **bf_height** (рис. 1.12) задает высоту параллелепипеда опоры, 0.25м – высота цилиндра под шарнирной точкой.

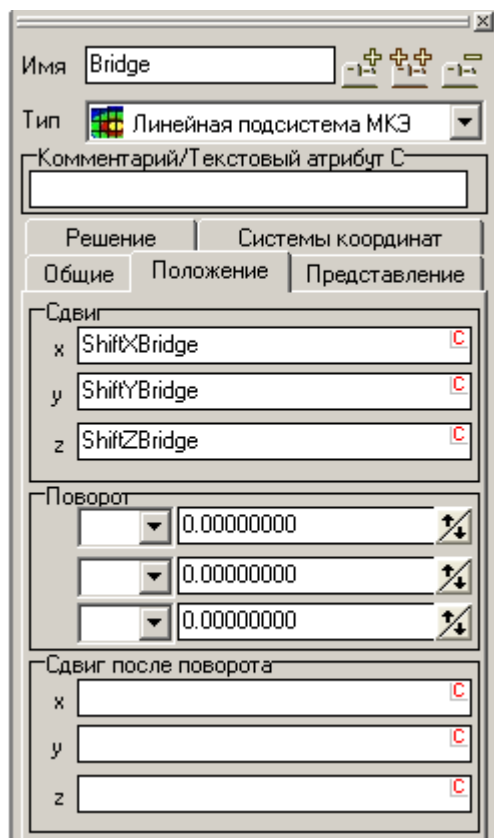


Рис. 1.11. Закладка **Положение** упругой подсистемы **Bridge**.

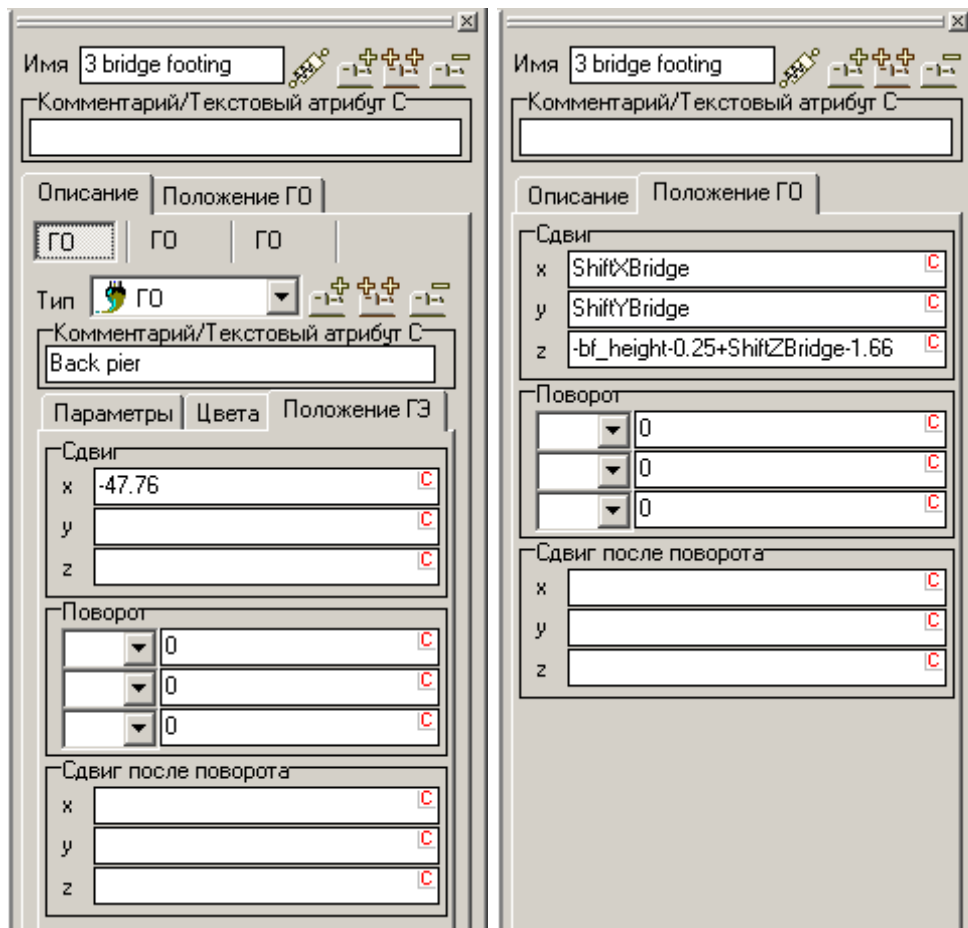


Рис. 1.12. Положение графического объекта задней опоры (слева) и положение графического объекта **3 bridge footing**, назначаемого сцене (справа).

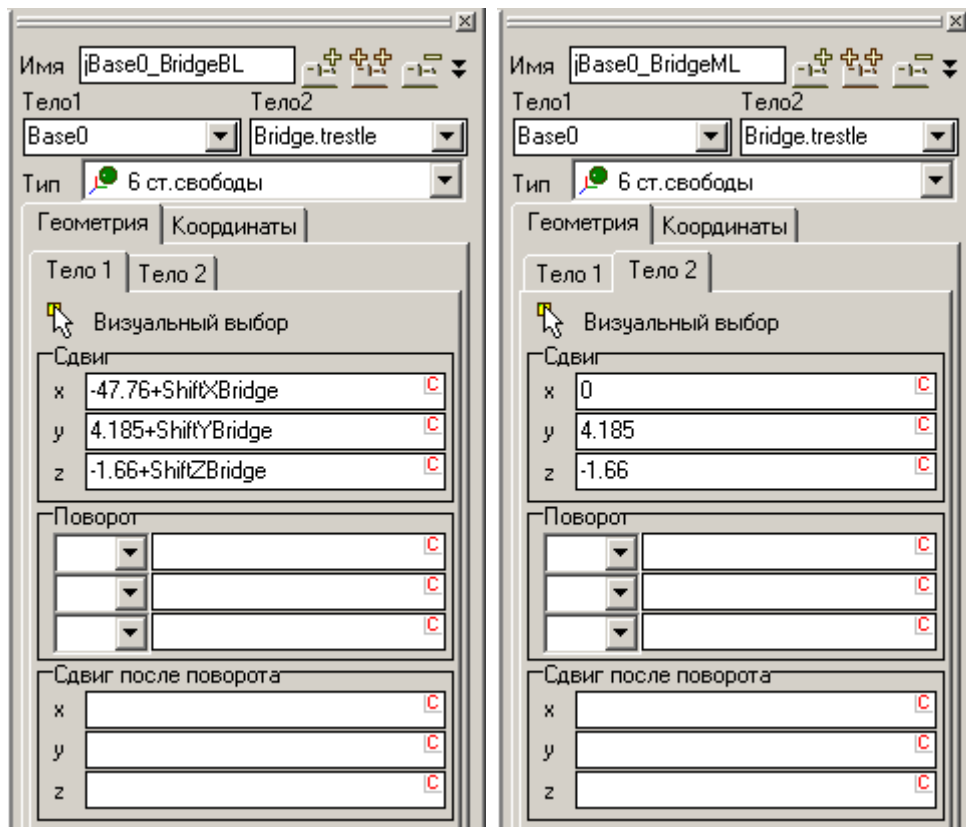


Рис. 1.13. Координаты шарнирной точки задней левой опоры в СК0 (слева) и в локальной СК моста (справа).

Положение моста на пути теперь может быть легко изменено идентификатором **BridgeXBeginning**.

1.5. Моделирование динамики моста

Рассмотрим особенности моделирования динамики железнодорожных мостов. Если модель механической системы содержит железнодорожные экипажи, то на закладке **Моделирование** упругой подсистемы появляется закладка **Железнодорожный мост** (рис. 1.14). Признак моста включается флажком **Подсистема – железнодорожный мост**.

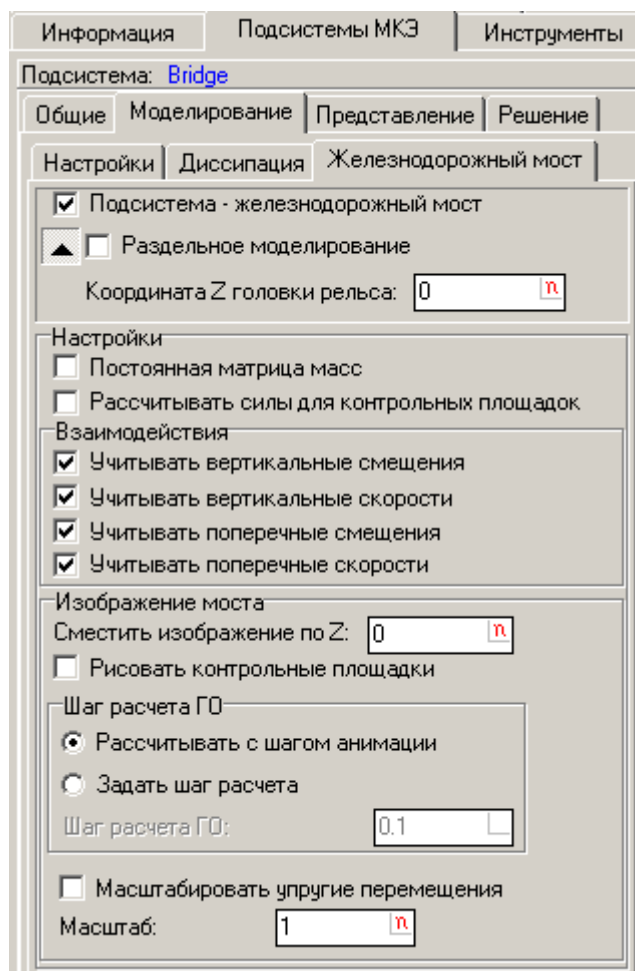



Рис. 1.14. Закладка Железнодорожный мост упругой подсистемы в программе моделирования. Настройки по умолчанию.

Необходимая информация задается с помощью элементов, расположенных на панели сверху закладки.

- Флажок **Раздельное моделирование** выключает взаимное влияние динамики моста и динамики экипажа (см. п. 1.2. *"Модель взаимодействия экипажа с мостом"*, с. 1-3).
- В поле **Координата Z головки рельса** вводится значение, соответствующее положению экипажа относительно базовой системы координат. Оно задается в программе **UM Input**. Как правило, начало координат расположено на уровне головок рельсов (см. п. 8.2.2). То есть, координата Z нижней точки круга катания колеса равна нулю, что соответствует нулевому значению данного поля.

Группа дополнительных настроек показывается и скрывается кнопкой . Опишем эти настройки.

- Флажок **Постоянная матрица** масс выключает расчет матрицы масс моста на каждом шаге интегрирования. Если модель моста содержит большое число форм, данная настройка ускоряет расчет на 5-10% без существенной потери точности. Используется матрица масс недеформированного моста.
- Флажок **Рассчитывать силы для контрольных площадок** включает изображение сил взаимодействия рельса с мостом и результат их преобразования к узловым силам в анимационном окне. Чтобы отобразить векторы этих сил, выполните следующие действия.

1. Откройте мастер переменных.
2. Выберите закладку **User | Векторы**. Если среди подсистем есть мосты, список на данной закладке включает векторы, которые именуются по следующим правилам.

- Сила взаимодействия рельса с мостом $VBIForce+Номер\ колесной\ пары+L(R)$, где VBI – аббревиатура англоязычного термина Vehicle-Bridge Interaction, означающего взаимодействие экипажа с мостом, Force – сила, L(R) – левое колесо (Left) или правое (Right).

Пример. **$VBIForce3R$** – сила взаимодействия экипажа с мостом под правым колесом третьей колесной пары.

- Имена результатов преобразования силы взаимодействия к узловым силам получают прибавлением к имени силы порядкового номера узла контрольного полигона. Таких узлов может быть не более четырех.

Пример. **$VBIForce3R.2$** – результат преобразования силы взаимодействия – сила, действующая во втором узле контрольного полигона.

3. Выберите векторы, которые хотите отображать, сформируйте векторные переменные (рис. 1.15) и перенесите их мышкой в анимационное окно.

Флажком **Рассчитывать силы для контрольных площадок** можно выключить (включить) изображение VBI векторов моста. То есть данный флажок дублирует последовательность действий «Выбрать все VBI векторы», «Скрыть (Показать)» в анимационном окне.

- Группа флажков **Взаимодействия** позволяет включить/выключить учет вертикальных и горизонтальных смещений и скоростей точек моста при расчете сил взаимодействия. Все флажки по умолчанию включены. Включение-выключение какого-либо флажка позволяет оценить влияние соответствующего фактора на значение сил взаимодействия экипажа с мостом.
- Группа элементов **Изображение моста** позволяет задать некоторые параметры графического объекта, которые характерны только для мостов.
- В поле **Сместить изображение по Z** вводится смещение графического образа моста по нормали к плоскости пути. Данный параметр может использоваться для формирования изображения, включающего рельсы и шпалы (см., например, рис. 1.16). Динамическая модель строится так, что поверхность качения моста совпадает по высоте с головкой рельса. Сместив изображения моста по Z, можно построить графический образ, соответствующий реальному положению компонентов модели.

- Флажок **Рисовать контрольные площадки** включает их изображение в анимационном окне при движении экипажа по мосту (рис. 1.16). Напомним, что контрольные площадки строятся вокруг точек приложения подвижной нагрузки. Число площадок равно числу колес на мосту в данный момент времени.
- Переключатель **Шаг расчета ГО** совместно с одноименным полем позволяет задать периодичность расчета данных, необходимых для изображения прогибов моста. Возможные значения переключатель: **Рассчитывать с шагом анимации и Задать шаг расчета**. По умолчанию графический образ обновляется на каждом шаге анимации. Если модель моста включает много узлов (более 70 000) и много упругих форм (более 100), то формирование изображения при малом шаге анимации (например, 0.001 с) может занимать больше времени, чем интегрирование уравнений движения. С другой стороны, прогибы моста за один шаг анимации изменяются незначительно. Поэтому в подобных случаях рекомендуется увеличить шаг обновления графического образа моста в 10-100 раз.
- Флажок **Масштабировать упругие перемещения** позволяет нарисовать прогибы моста с учетом масштаба, который задается в поле **Масштаб**. Значение большее единицы соответствует увеличенному изображению.

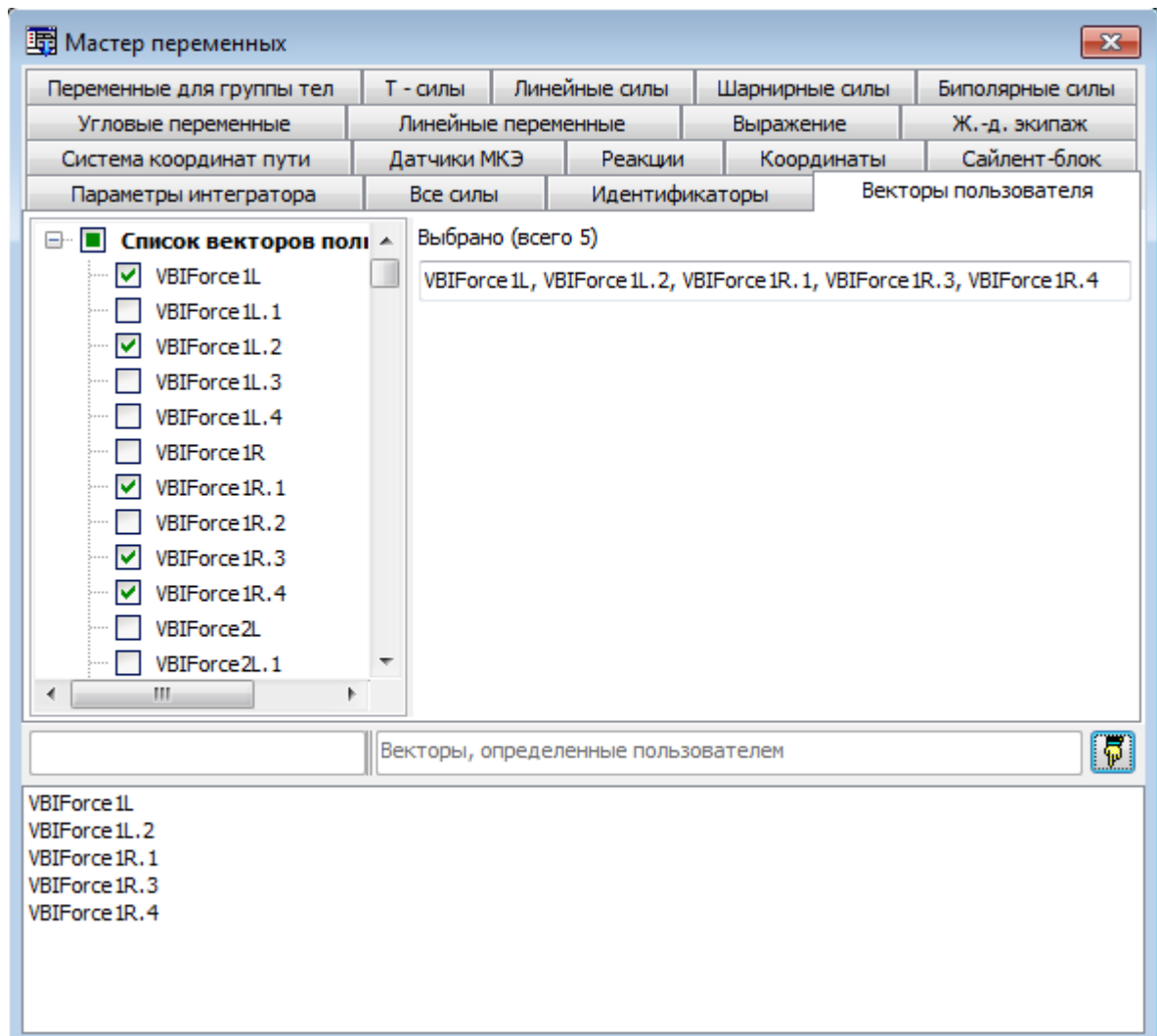


Рис. 1.15. Создание векторных переменных, отображающих силы взаимодействия экипажа с мостом

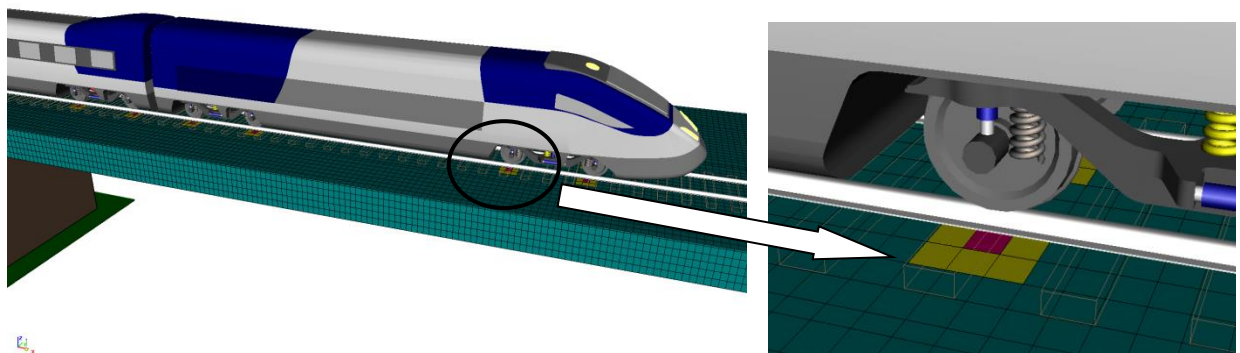


Рис. 1.16. Изображение контрольных площадок в анимационном окне при движении экипажа по мосту.

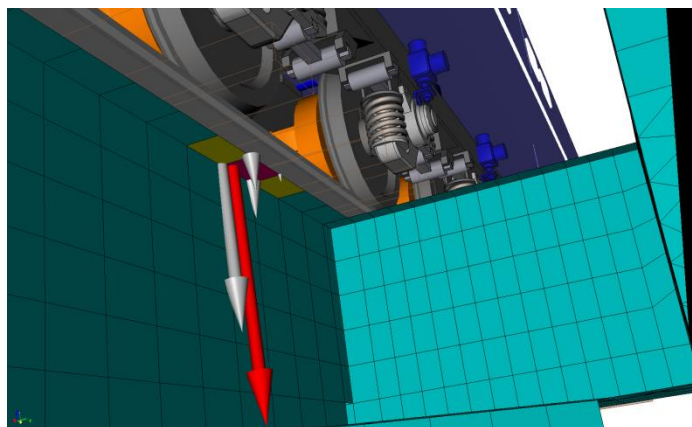


Рис. 1.17. Изображение силы взаимодействия экипажа с мостом и результата ее преобразования к узловым силам.

1.6. Пример моделирования

Рассмотрим пример моделирования движения поезда по упругому мосту. Модель TGV_Bridge вы можете скачать по адресу:

www.universalmechanism.com/download/samples/um_samples_vbi.zip.

Модель включает упругий мост и высокоскоростной пассажирский поезд (рис. 1.18).

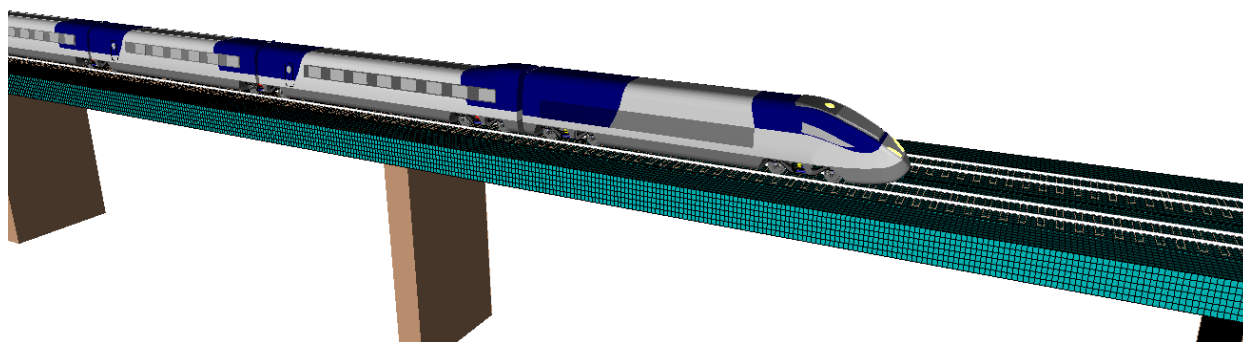


Рис. 1.18. Общий вид модели, включающей упругий мост и поезд TGV, во время интегрирования уравнений движения.

Основные особенности описания моста приведены выше в п. 1.4. "Подготовка модели моста", с. 1-8. Там же представлены рисунки, изображающие его.

Кратко остановимся на модели поезда. Она разработана на основе исходных данных поезда TGV. Состав поезда изображен на рис. 1.19, на рис. 1.20 представлены типы экипажей, включенных в состав. Он содержит два моторных вагона, два комбинированных и шесть прицепных вагонов. Суммарное число степеней свободы поезда 294, суммарный вес – 438 тонн.

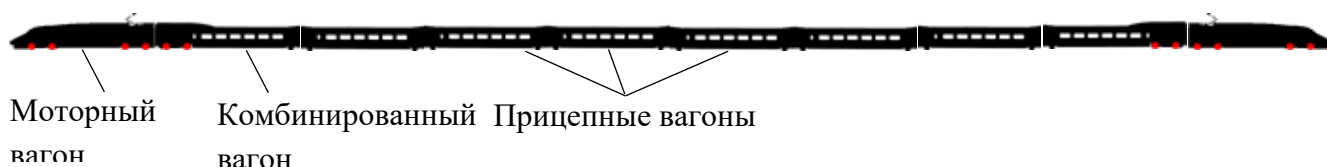


Рис. 1.19. Состав поезда TGV, представленного в примере.



Моторный вагон.
Масса 68 тонн.

Комбинированный вагон.
Масса 48 тонн

Прицепной вагон.
Масса 33,5 тонны


Рис. 1.20. Модели экипажей, входящих в состав поезда TGV.

Список переменных примера включает:

- вертикальные и поперечные смещения точек, расположенных на верхней поверхности моста в серединах пролетов;
- продольные напряжения в тех же точках;
- вертикальные и поперечные силы в контактах колесо-рельс для колес головного моторного вагона;
- критерий Надаля и комбинированный коэффициент безопасности для тех же колес.

Конфигурация модели: расположение окон на рабочем столе, динамические параметры, настройки интегратора, хранятся в файле **tgw_bridge.icf**.

Порядок работы с моделью следующий:

- запустите программу моделирования **UM Simulation**;
- прочитайте конфигурацию с помощью пункта основного меню **Файл | Прочитать конфигурацию | tgw_bridge**;
- откройте форму инспектора моделирования кнопкой  на панели инструментов или клавишей **F9**;
- проинтегрируйте уравнения движения, нажав кнопку **Интегрирование** инспектора моделирования или клавишу **F9**;
- проанализируйте полученные результаты.

Основные инструменты анализа описаны в п.п. 4.3.4-4.3.8 руководства пользователя. Новые переменные для исследования интересующих параметров пользователь может создать с помощью Мастера переменных, работа с ним описана в п. 4.3.2.