



Лабораторные работы



Исследование факторов, влияющих на коэффициент запаса устойчивости от схода колеса с рельса по условию вкатывания

Лабораторная работа №1

Лабораторная работа ориентирована на студентов, обучающихся по специальности "Подвижной состав железных дорог", с целью освоения методики оценки устойчивости железнодорожного экипажа от схода с рельсов

Команда "Универсального механизма" благодарит за помощь в разработке методических материалов **Антипина Дмитрия Яковлевича**, к.т.н., доцента кафедры "Подвижной состав железных дорог" Брянского государственного технического университета.

Консультант:

Д.Я. Антипин, к.т.н., доцент

Разработчики:

А.В. Сакало, к.т.н.

В.А. Сак, инженер

Оглавление

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	4
2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	5
3. ЗАГРУЗКА МОДЕЛИ В UM SIMULATION	6
4. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ	8
4.1. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ	8
4.2. ВЛИЯНИЕ ВОЗВЫШЕНИЯ НАРУЖНОГО РЕЛЬСА	11
4.3. ВЛИЯНИЕ МАССЫ ВАГОНА	12
4.4. ВЛИЯНИЕ РАДИУСА КРИВОЙ	14
4.5. ВЛИЯНИЕ ТИПА ПУТИ	15
5. РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ	16

1. Основные теоретические сведения

Устойчивость колёсной пары против схода с рельса проверяется для наиболее опасных случаев сочетания большой поперечной силы взаимодействия набегающего колеса с рельсом и малой вертикальной нагрузки на это колесо. При одновременном в течение некоторого времени действия такого сочетания указанных сил возможно вкатывание гребня набегающего колеса на головку рельса и последующий сход вагона с рельсов. Критическое сочетание действующих на колёсную пару сил может возникать в следующих трёх случаях:

- при ударном входе вагона в кривую, при проходе стрелок на боковой путь, при интенсивном вилянии тележки, при интенсивных боковых колебаниях кузова и сопутствующих невыгодных обстоятельствах взаимодействия колёсной пары и пути;
- при экстренном торможении поезда повышенного веса на малой скорости с головного локомотива, при прохождении составом кривого участка пути, когда возникающие значительные квазистатические усилия сжатия состава могут привести к перекосу (сдвигу) вагона в колее и появлению больших поперечных сил взаимодействия колёс с рельсами, а в экстремальных случаях и к «выжиманию» легковесного (например, порожнего) вагона;
- при проходе с малой скоростью вагоном переходной кривой, когда происходит силовое замыкание скользунов, расположенных по диагонали вагона и, как следствие, возникновение кососимметричных сил и обезгрузка колёс.

В соответствии с ГОСТ 33211-2014 коэффициент устойчивости колёсной пары против схода с рельса по условию вкатывания определяется по следующей формуле:

$$K_{yc} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\beta} \cdot \frac{P_B}{P_B} \geq [K_{yc}], \quad (1.1)$$

где β – угол наклона образующей конусообразной поверхности гребня колеса к горизонтали, для колёс без износа по ГОСТ 10791-2011 принимают $\beta = 60^\circ$;

μ – коэффициент трения поверхностей колёс и рельсов, принимают $\mu = 0,25$;

P_B – вертикальная нагрузка от набегающего колеса на рельс, Н;

P_B – боковое усилие взаимодействия гребня набегающего колеса и рельса, Н;

$[K_{yc}]$ – допускаемое значение коэффициента запаса устойчивости, причем:

$[K_{yc}] = 1,6$ – для пассажирских вагонов;

$[K_{yc}] = 1,4$ – для изотермических вагонов;

$[K_{yc}] = 1,3$ – для грузовых вагонов.

Введём обозначение $q_0 = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu \cdot tg\beta}$, тогда формула (1.1) примет вид

$$K_{yc} = q_0 \cdot \frac{P_B}{P_B} \geq [K_{yc}]. \quad (1.2)$$

Рост опасности схода соответствует уменьшению коэффициента запаса устойчивости. Приведенный критерий не оценивает процесс вкатывания колеса на рельс, когда происходит отрыв колеса от круга катания.

2. Описание лабораторной работы

Лабораторная работа ориентирована на студентов железнодорожного направления с целью освоения методики оценки устойчивости железнодорожного экипажа от схода с рельсов с помощью программного комплекса "Универсальный механизм" (ПК УМ). ПК УМ состоит из двух частей: программы ввода **UM Input** и программы моделирования **UM Simulation**. В программе ввода создаётся динамическая модель, а в программе моделирования производятся расчёты. На данном этапе не рассматриваются принципы создания динамической модели и её структура, а используется готовая модель со всеми настройками.

Цель работы: определение коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса по условию вкатывания K_{yc} для железнодорожного экипажа в ПК УМ и исследование факторов, влияющих на критерий безопасности в отношении вкатывания колеса на рельс.

В лабораторной работе будем использовать модель грузового вагона *simple_18_100* из свободно распространяемой библиотеки ПК УМ. Упрощённая компьютерная модель четырёхосного грузового вагона на трёхэлементных тележках модели 18-100 с центральным рессорным подвешиванием представлена на рис. 1.

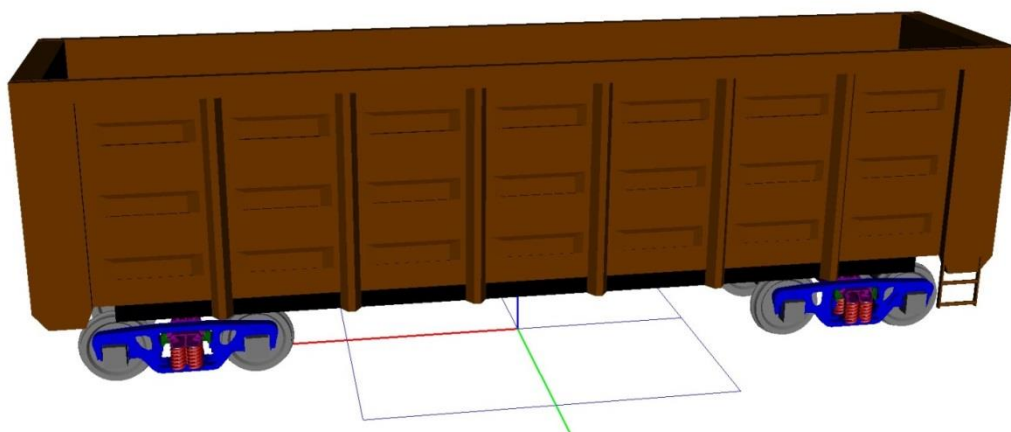


Рис. 1. Общий вид готовой модели грузового вагона в программе ввода **UM Input**

Расположение файлов модели грузового вагона зависит от версии установленного на вашем компьютере ПК УМ:

- ПК УМ 2023 (ПК УМ 10), готовую модель можно найти в папке [{Данные УМ}\samples\Rail_Vehicles\simple_18_100](#)
- ПК УМ 9, готовую модель можно скачать по адресу http://www.universalmechanism.com/download/models/simple_18_100x2.zip

Для версий ПК УМ, предшествующих девятой, модель недоступна.

Описание лабораторной работы выполнено с использованием ПК УМ 9. В ПК УМ последующих версий некоторые элементы интерфейса программы могут отличаться от приведенных в этом документе.

3. Загрузка модели в UM Simulation

Запустите программу моделирования **UM Simulation** и откройте модель грузового вагона. Для этого выполните следующие действия:

1. Запустите программу **UM Simulation** с помощью **Пуск | Все программы | Универсальный механизм 9 | UM Simulation**.
2. Выберите пункт меню **Файл | Открыть** или нажмите кнопку **F3**. В появившемся окне перейдите в папку с моделью, выберите указанный путь к модели в окне слева, в окне справа появится образ модели, и нажмите кнопку **Принять** (рис. 2). После этого модель грузового вагона будет отображаться в анимационном окне.

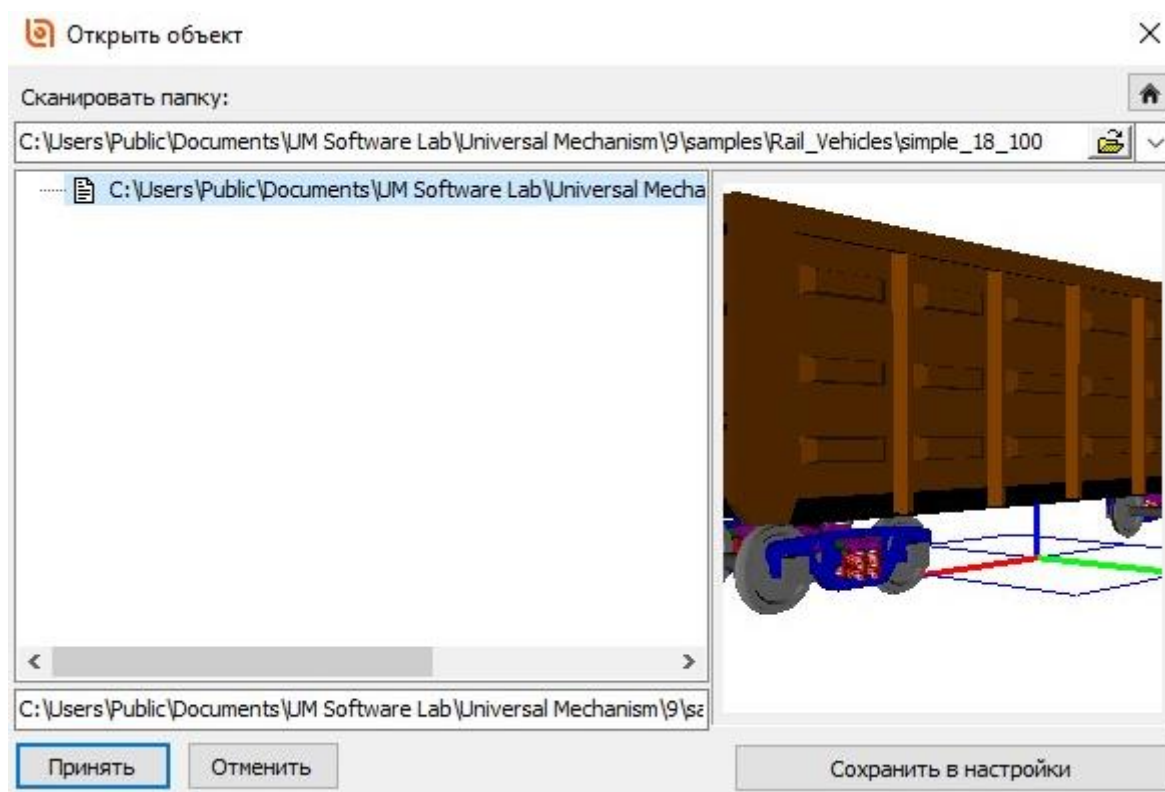


Рис. 2. Открытие модели в программе моделирования **UM Simulation**

Прежде чем перейти к расчётам для модели необходимо настроить некоторые железнодорожные параметры: путь, неровности, профили колёс и др. На данном этапе эти шаги опускаются, и загружается подготовленная конфигурация для модели со всеми её настройками. Для этого выберите пункт меню **Файл | Загрузить конфигурацию | lab_1**. (рис. 3). Конфигурация включает в себя следующие основные настройки: степень загрузки вагона – порожний, тип пути – кривая радиуса 300 м, скорость экипажа 25 м/с.

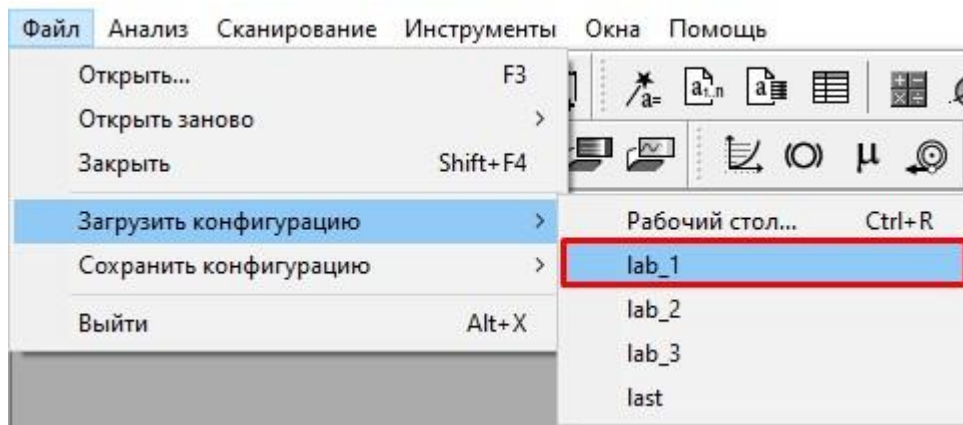


Рис. 3. Загрузка конфигурации

После загрузки конфигурации будут открыты три окна: *анимационное окно*, *окно анимации контакта* и *графическое окно*. В *анимационном окне* при прохождении тестов можно наблюдать за процессом моделирования вагона. *Окно анимации контакта* является специальным анимационным окном для визуализации относительного положения колёс и рельсов и сил взаимодействия колёс с рельсами при движении экипажа (для более подробного ознакомления см. [Главу 8](#) пп. 8.5.3.3 "Окно анимации контакта"). В *графическом окне* выведены коэффициенты запаса устойчивости для каждого колеса экипажа, в котором при моделировании будет отображаться их изменение во времени.

4. Факторы, влияющие на коэффициент запаса устойчивости

4.1. Влияние скорости

Рассмотрим зависимость коэффициента запаса устойчивости K_{yc} от скорости вагона. Для этого смоделируем движение порожнего вагона в кривой радиуса 300 м сначала со скоростью 25 м/с, а затем 33 м/с, и выясним, будет ли меняться коэффициент запаса устойчивости.

1. Выберите пункт меню **Анализ | Моделирование** или нажмите горячую клавишу **F9**. После этого появится окно **Инспектора моделирования объекта**.
2. Перейдите на вкладку **Идентификаторы | Список идентификаторов | Весь список**. Здесь отображаются все параметры модели. Убедитесь, что у идентификатора скорости $v0$ задано значение **25 м/с** (рис. 4).

Замечание. Обратите внимание на строку *Последний файл параметров: Empty car.par*. Это готовый файл параметров, в котором масса, положение центра масс и моменты инерции кузова соответствуют порожнему вагону.

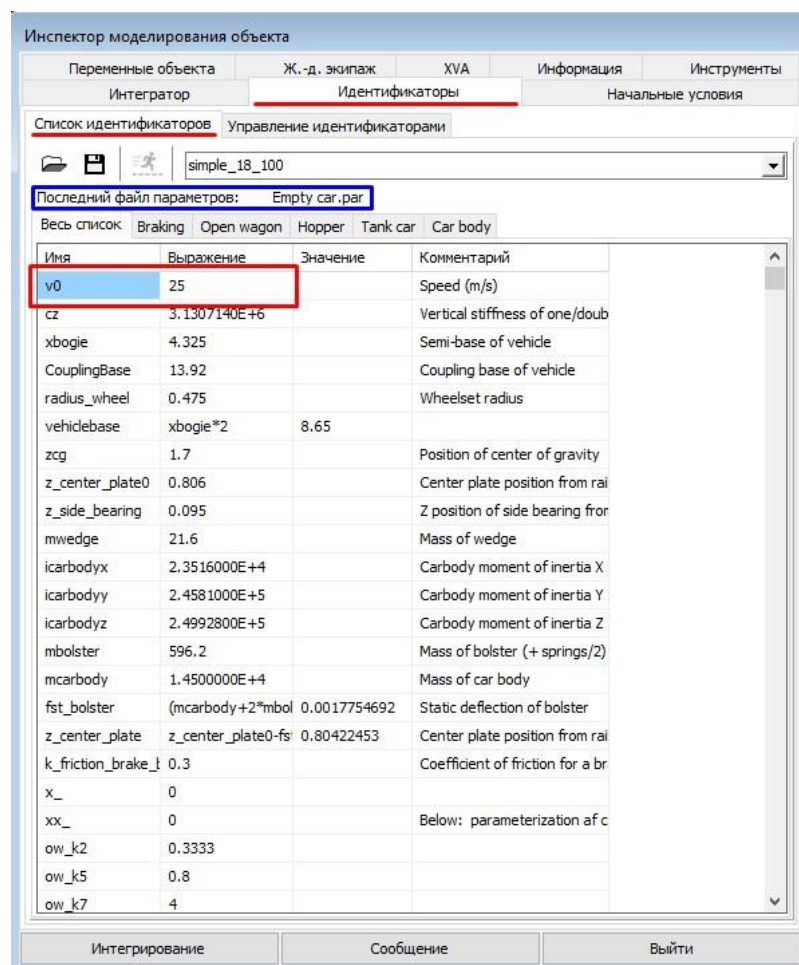



Рис. 4. Окно **Инспектора моделирования объекта**

3. Нажмите кнопку **Интегрирование**. Наблюдайте за процессом моделирования в анимационном окне. По окончании моделирования появится окно с соответствующим сообщением, нажмите **ОК**. После этого будет активно окно **Режима паузы процесса моделирования**, не закрывайте его.
4. Оценим минимальное значение коэффициента запаса устойчивости. Для этого воспользуемся встроенным табличным процессором для переменных. Выберите пункт меню **Инструменты | Табличный процессор** или нажмите кнопку табличного процессора  на панели быстрого доступа.
5. В графическом окне выделите все переменные и перетащите их с помощью левой кнопки мыши в окно табличного процессора. В левой части окна табличного процессора выберите функционал **Min** (рис. 5).

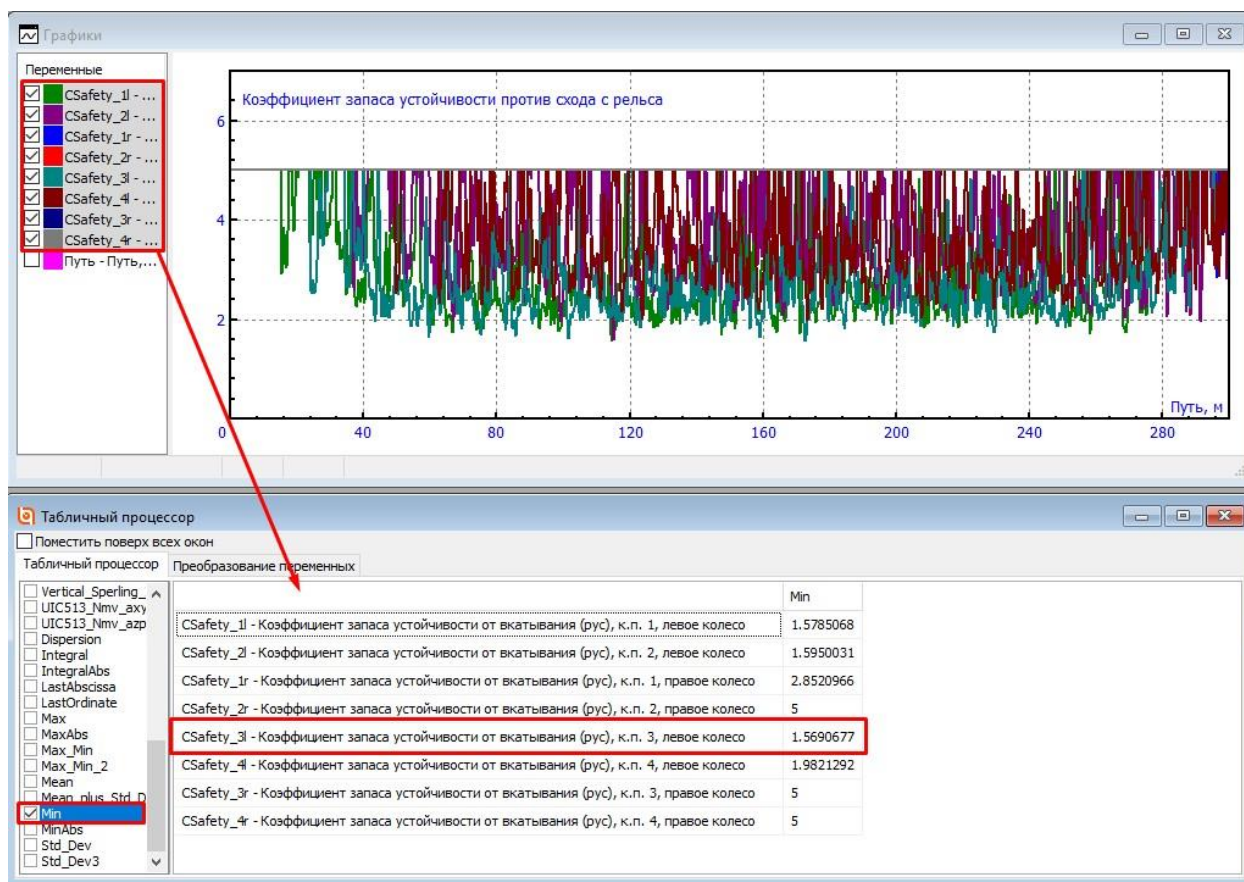


Рис. 5. Обработка результатов в табличном процессоре при скорости экипажа 25 м/с

Как мы видим, минимальное значение коэффициента устойчивости K_{yc} составляет **1,569** для левого колеса третьей колёсной пары. Согласно ГОСТ 33211-2014 допусаемое значение коэффициент запаса устойчивости для грузовых вагонов $[K_{yc}] = 1,3$, следовательно, при скорости вагона 25 м/с безопасность в отношении вкатывания колеса на рельс обеспечена.

6. Теперь проедем со скоростью 33 м/с и сравним результаты. Для этого необходимо выйти из режима паузы, нажав кнопку **Прервать** в окне **Режим паузы процесса моделирования**.

7. В окне инспектора моделирования объекта вернитесь на вкладку **Идентификаторы | Список идентификаторов | Весь список**, назначьте идентификатору $v0$ значение 33 м/с и нажмите **Enter**. В появившемся окне **Одноименные идентификаторы** нажмите кнопку **Принять**. Это означает, что мы поменяли скорость для всех элементов вагона, где идентификатор скорости использовался при описании модели.
8. Нажмите кнопку **Интегрирование**. Наблюдайте за процессом в анимационном окне. После завершения процесса интегрирования в окне информации нажмите кнопку **ОК**. Не закрывайте появившееся окно **Режим паузы процесса моделирования**.
9. Перетащите рассчитанные переменные из графического окна в окно табличного процессора. Для удобства можно открывать новое окно табличного процессора.

Как видно, для левого колеса первой колёсной пары коэффициент запаса устойчивости K_{yc} равняется **1,27** (рис. 6), что меньше предельного значения $[K_{yc}]$, следовательно, при скорости вагона 33 м/с безопасность в отношении вкатывания колеса на рельс не обеспечена.

	Min
CSafety_1l - Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус), к.п. 1, левое колесо	1.2702767
CSafety_2l - Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус), к.п. 2, левое колесо	1.3358045
CSafety_1r - Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус), к.п. 1, правое колесо	1.8597102
CSafety_2r - Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус), к.п. 2, правое колесо	5
CSafety_3l - Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус), к.п. 3, левое колесо	1.3571378
CSafety_4l - Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус), к.п. 4, левое колесо	1.3708161
CSafety_3r - Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус), к.п. 3, правое колесо	5
CSafety_4r - Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус), к.п. 4, правое колесо	5

Рис. 6. Обработка результатов в табличном процессоре при скорости экипажа 33 м/с

4.2. Влияние возвышения наружного рельса

Возвышение наружного рельса в криволинейных участках пути необходимо для уравновешивания центробежных сил, действующих на подвижной состав, предотвращения его опрокидывания, обеспечения одинакового вертикального износа рельсов обеих рельсовых нитей и снижения у пассажиров неприятных ощущений, возникающих при движении поезда по криволинейному участку пути.

Определим, как влияет возвышение наружного рельса на коэффициент запаса устойчивости. Для того чтобы посмотреть описание тестовой кривой, откройте инспектор моделирования объекта перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Путь | Макрогеометрия** (Рис. 7).

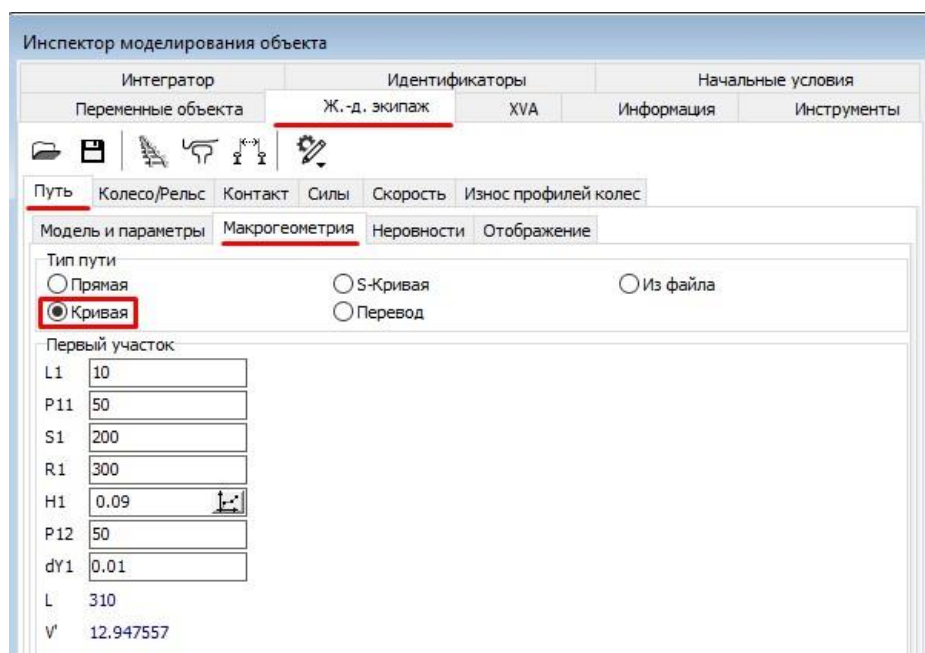


Рис. 7. Описание макрогеометрии пути

В предыдущем тесте мы выяснили, что для порожнего вагона при скорости **33 м/с** коэффициент запаса устойчивости K_{yc} составляет **1,27**. Измените значение в поле **N1** (возвышение) на **0,02** м и запустите интегрирование. После окончания процесса интегрирования обработайте переменные коэффициентов запаса устойчивости в табличном процессоре.

При радиусе кривой **R1 = 300** м и возвышении **N1 = 0,02** м минимальное значение коэффициента запаса устойчивости составляет **1,253**. Сравнивая результаты с предыдущими, можно сделать вывод, что при уменьшении значения возвышения в кривом участке пути коэффициент запаса устойчивости K_{yc} уменьшается, то есть уменьшается безопасность в отношении вкатывания колеса на рельс.

4.3. Влияние массы вагона

Как мы выяснили из теста "Влияние скорости", для порожнего вагона при движении в кривой радиуса 300 м со скоростью 33 м/с значение коэффициента запаса устойчивости опускается ниже предельного значения. Сравним, чему будет равен коэффициент запаса устойчивости при этой же скорости для гружёного вагона.

1. Перейдите в окно **Инспектора моделирования объекта**. Сейчас загружен файл параметров для порожнего вагона (рис. 8). Для того чтобы исследовать движение вагона в гружёном состоянии, необходимо загрузить соответствующий файл параметров.
2. На вкладке **Идентификаторы | Список идентификаторов** нажмите кнопку **Загрузить из файла** (рис. 8).

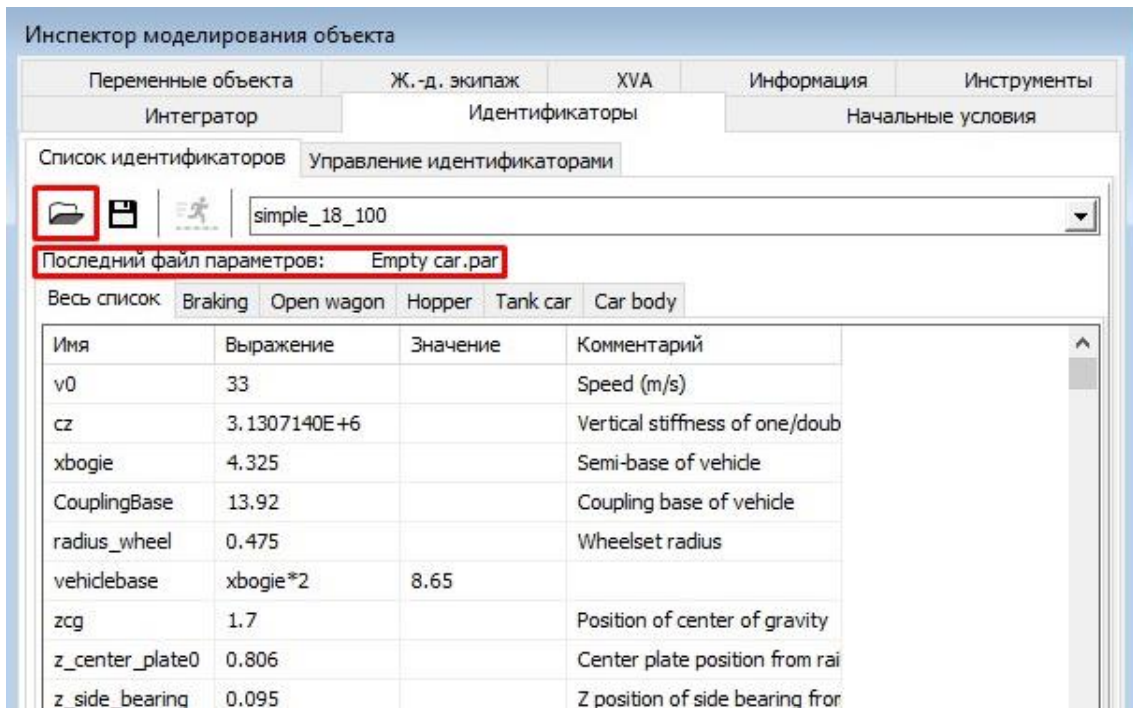


Рис. 8. Загрузка файла параметров для гружёного вагона

3. В появившемся окне выберите **Loaded car.par** и нажмите кнопку **Открыть**.
4. В появившемся окне **Список прочитанных идентификаторов** (рис. 9) отображены значения идентификаторов, которые отличаются от предыдущих. Нажмите кнопку **Принять**.
5. Файл параметров для гружёного вагона загружен. Назначьте начальную скорость $v_0 = 33$ м/с.

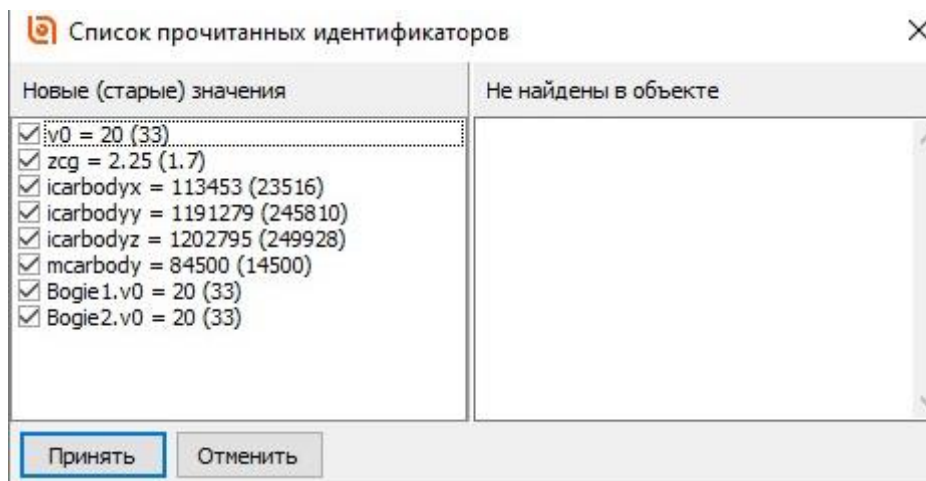



Рис. 9. Список прочитанных идентификаторов

Теперь нужно загрузить файл с начальными условиями для вагона в груженом состоянии. Дело в том, что после создания модели она не находится в положении равновесия, и перед началом моделирования необходимо проходить тест равновесия и определять начальные условия. В нашем случае начальные условия заранее рассчитаны и сохранены в файлах **equilibrium_empty_car.xv** и **equilibrium_loaded_car.xv** для порожнего и гружёного вагона соответственно.

6. В окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Начальные условия | Координаты** и нажмите кнопку **Загрузить значения координат и скоростей из файла** . В появившемся окне выберите файл **equilibrium_loaded_car.xv** и нажмите **ОК**. После этого будут загружены начальные условия для гружёного вагона.
7. Перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Путь | Макрогеометрия** и установите возвышение наружного рельса **Н1** равное **0,09**.
8. В окне **Инспектора моделирования объекта** нажмите кнопку **Интегрирование**. По окончании процесса моделирования перетащите переменные из графического окна в табличный процессор.

Минимальное значение коэффициента запаса устойчивости составило **2,254**, что выше предельного значения $[K_{yc}]$, следовательно, безопасность в отношении вкатывания колеса на рельс для гружёного вагона при движении в кривой радиуса 300 м со скоростью 33 м/с обеспечена.

4.4. Влияние радиуса кривой

Определим, как влияет радиус кривой на коэффициент запаса устойчивости. В окне **Инспектора моделирования объекта (Анализ | Моделирование)** перейдите на вкладку **Ж.-д. экипаж | Путь | Макрогеометрия** (рис. 10). Сейчас для кривой задан радиус **R1 300 м** (рис. 10). Из предыдущего теста мы выяснили, что для гружёного вагона при движении в кривой радиуса **300 м** со скоростью **33 м/с** коэффициент запаса устойчивости составил **2,254**.

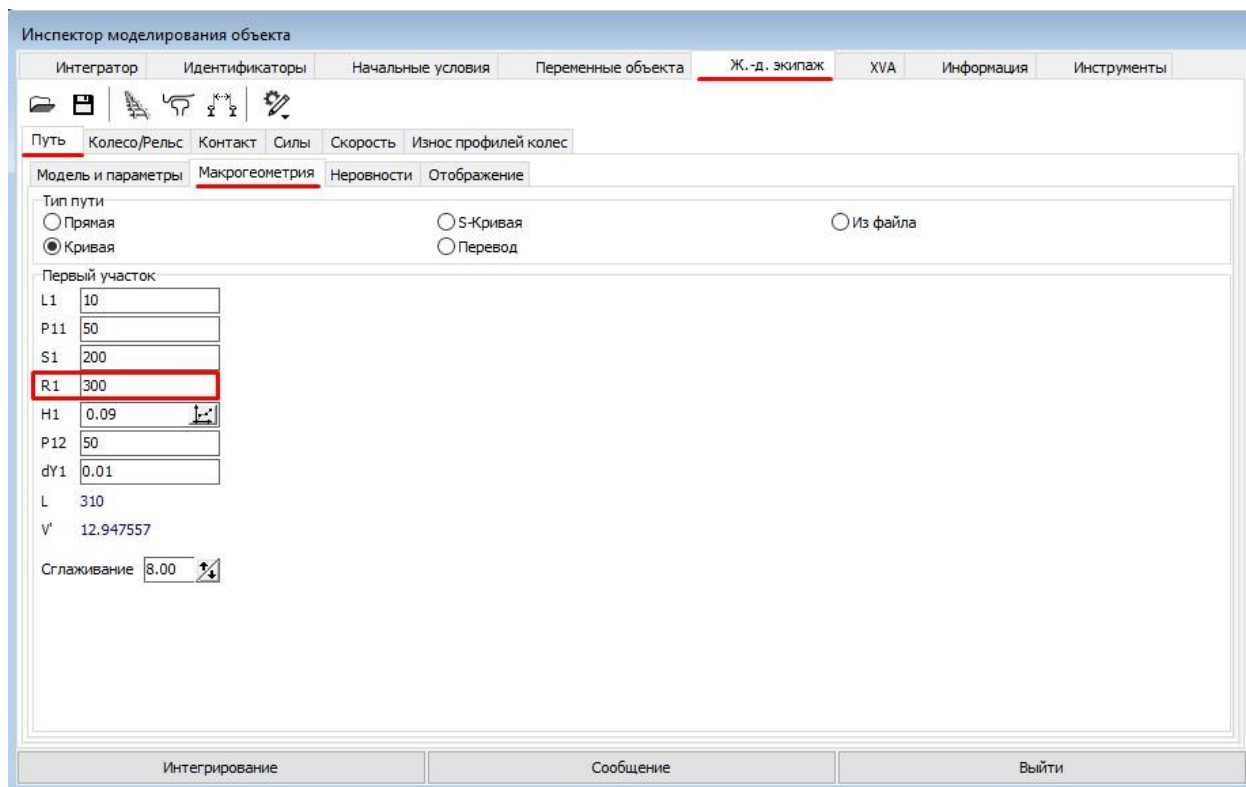


Рис. 10. Описание макрогеометрии пути

1. Измените в поле **R1** значение на **600** и нажмите **Enter**.
2. В появившемся окне подтверждения нажмите **Да**. Запустите интегрирование.
3. После окончания процесса интегрирования обработайте значения переменных коэффициентов запаса устойчивости в табличном процессоре, как это делалось для предыдущих тестов.

Минимальное значение коэффициента запаса устойчивости составило **2,296**. Следовательно, при увеличении радиуса кривой коэффициент запаса устойчивости K_{yc} увеличивается, то есть повышается безопасность в отношении вкатывания колеса на рельс.

4.5. Влияние типа пути

Все предыдущие тесты выполнялись для движения вагона в кривом участке пути. Выполним моделирование на прямом участке для движения вагона со скоростью **33 м/с** и сравним получившиеся результаты с результатами предыдущих тестов. В окне инспектора моделирования объекта на вкладке **Ж.-д. экипаж | Путь | Макрогеометрия** в поле **Тип пути** выберите **Прямая** (рис. 11) и запустите моделирование.

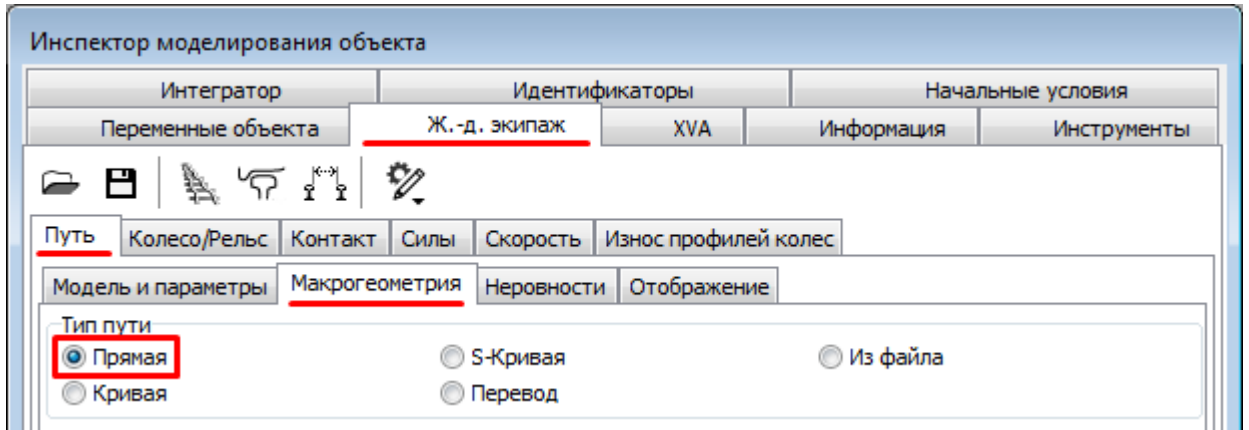


Рис. 11. Выбор типа пути

Наименьшее значение коэффициента запаса устойчивости составило **2.378** (рис. 12). Следует отметить, что коэффициент запаса устойчивости K_{yc} ограничивается по значению. Коэффициент принимается $K_{yc} = 5$ либо при значении $K_{yc} > 5$, либо при отсутствии контакта колеса с рельсом, то есть при полном отрыве колеса.







Рис. 12. Коэффициент запаса устойчивости для прямого участка пути

Результаты теста показывают, что безопасность в отношении вкатывания колеса на рельс для гружёного вагона при движении на прямом участке пути со скоростью 33 м/с обеспечена. Кроме того, можно сделать вывод, что безопасность в отношении вкатывания колеса на рельс выше при движении на прямом участке пути, чем в кривой.

5. Расчёт коэффициента запаса устойчивости

Рассчитаем аналитически коэффициент запаса устойчивости K_{yc} в момент времени t для левого колеса первой колёсной пары и сравним результат со значением встроенной переменной в ПК УМ. Используем для расчёта формулу (1.2), в которой

$$q_0 = \frac{tg(60^\circ) - 0.25}{1 + 0.25 \cdot tg(60^\circ)} = 1,034.$$

1. Выберите пункт меню **Файл | Загрузить конфигурацию | lab_1**.
2. В ПК УМ вертикальная нагрузка P_B и боковое усилие P_B являются встроенными переменными. Для того чтобы отобразить их на графике выберите пункт меню **Инструменты | Мастер переменных** или на панели инструментов нажмите кнопку **Открыть мастер переменных** .
3. В окне **Мастера переменных** перейдите на вкладку **Колесо/Рельс**. На дереве элементов в левой части окна выберите **simple_18_100 | Bogie1 | Левые колеса | к.п. 1 левое** (рис. 13).
4. В правой части окна найдите переменную **Y(L)** с комментарием **Суммарная сила в поперечном направлении** (рис. 13). Это переменная и есть боковое усилие взаимодействия гребня набегающего колеса на рельс P_B .
5. Выберите переменную и нажмите кнопку **Добавить переменную в контейнер**  в нижней правой части окна (рис. 13). Переменная отобразится в контейнере переменных в нижней части окна.
6. После того, как переменная **Y(L)** помещена в контейнер, её можно поместить в графическое окно. Для этого выделите её в контейнере переменных и нажмите кнопку **Отобразить переменную в новом окне**  (рис. 13). Переменная отобразится в появившемся графическом окне.
7. Теперь среди переменных найдите переменную **Q(V)**, которая соответствует вертикальной нагрузке от набегающего колеса на рельс P_B . Выберите переменную и нажмите кнопку **Добавить переменную в контейнер** .
8. Перетащите переменную **Q(V)** из контейнера в графическое окно к переменной **Y(L)**.
9. Добавим в графическое окно коэффициент запаса устойчивости K_{yc} для левого колеса первой колёсной пары. Для этого в мастере найдите переменную **CSafety** с комментарием **Коэффициент запаса устойчивости от вкатывания (рус)** и проделайте те же действия, что для переменной **Q(V)**: добавьте её в контейнер и перетащите в графическое окно к переменным **Y(L)** и **Q(V)**.

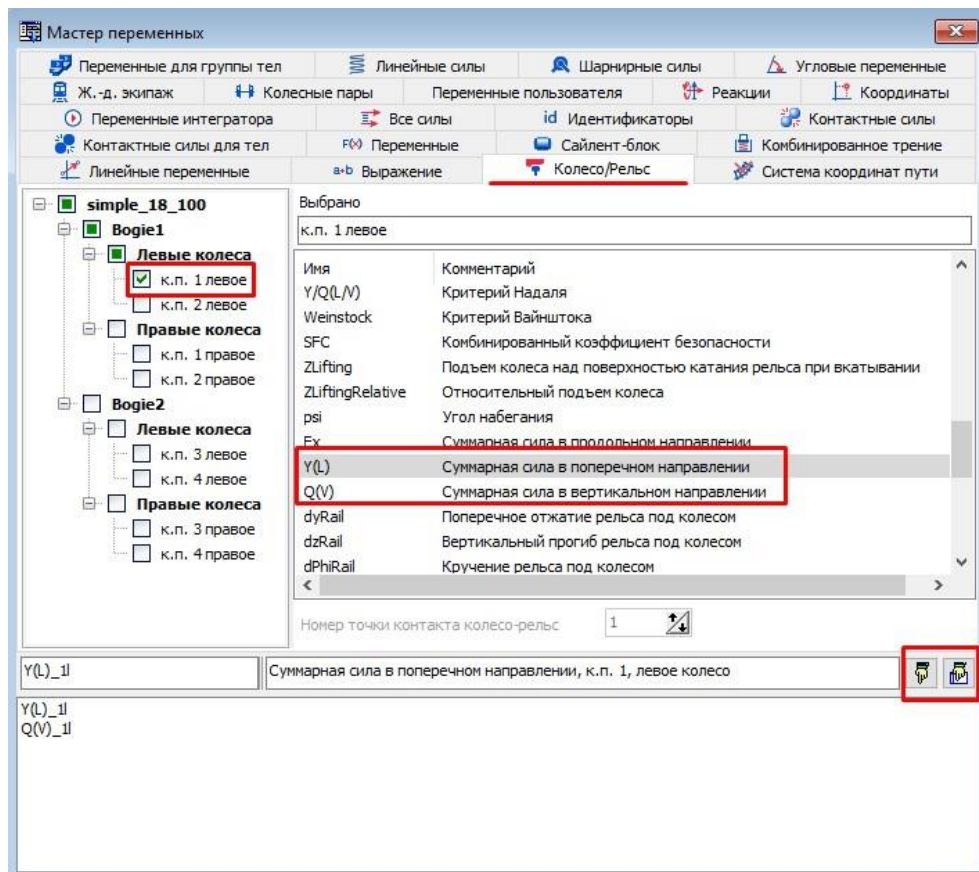



Рис. 13. Окно **Мастера переменных**

10. Запустим процесс моделирования. Откройте инспектор моделирования объекта через пункт меню **Анализ | Моделирование** или нажмите кнопку на панели быстрого доступа **Моделирование** . В инспекторе моделирования объекта нажмите кнопку **Интегрирование**.
11. После окончания моделирования не закрывайте окно режима паузы процесса моделирования.

Результаты моделирования показаны на рис. 14.

Рассчитаем по формуле (1.2) значение коэффициента запаса устойчивости K_{yc} в момент времени $t = 6,04$ с и сравним со значением переменной **CSafety** в этот же момент времени.

$$K_{yc} = q_0 \cdot \frac{P_B}{P_{\text{Б}}} = 1.034 \cdot \frac{42041,842}{18815,857} = 2,31.$$

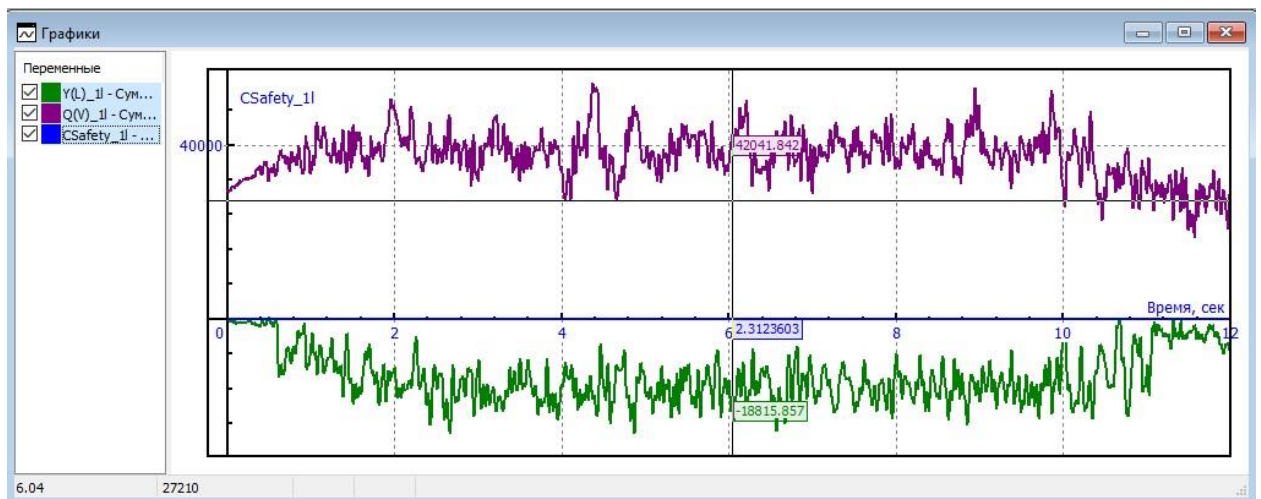


Рис. 14 Графики коэффициента запаса устойчивости **CSafety**, вертикальной **Q(V)** и боковой силы **Y(L)**

Самостоятельно рассчитайте коэффициент запаса устойчивости для левого колеса третьей колёсной пары в момент времени $t = 10$ с.

Замечание. Для того чтобы установить курсор мыши наиболее близко к значению 10 с можно увеличить масштаб графика по оси абсцисс. Поместите указатель мыши в поле графиков и перемещайте мышь вправо, удерживая *правую* кнопку. Удерживая *левую* кнопку мыши, вы можете перемещать графики без изменения масштаба по осям. При перемещении мыши текущие значения абсциссы и ординаты курсора указываются в нижнем левом углу графического окна в строке статуса. Работа с графическим окном подробно описана в [Главе 4](#) пп. 4.3.4. "Окно для построения графиков".