



Лабораторные работы



# Определение курсовой устойчивости автотранспортного средства при испытаниях "рывок руля"

Лабораторная работа №2

Лабораторная работа ориентирована на студентов, обучающихся по специальности "Автомобили и автомобильное хозяйство", с целью ознакомления с современными подходами к проведению виртуальных экспериментов с автомобилями

## Оглавление

1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....	4
2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ .....	6
3. ЗАГРУЗКА МОДЕЛИ В UM SIMULATION .....	8
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АТС ПРИ ИСПЫТАНИИ "РЫВОК РУЛЯ" .....	11
5. ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА МАСС АТС НА КУРСОВУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ .....	19

Команда "Универсального механизма" благодарит за помощь в разработке методических материалов старшего преподавателя Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) кафедры ТиАМ **Демидова Леонида Владимировича**.

**Консультант:**

Л.В. Демидов, старший преподаватель

**Разработчики:**

А.В. Сакало, к.т.н.

В.А. Сак, инженер

# 1. Основные теоретические сведения

Испытания "рывок руля" для автотранспортного средства (АТС) проводят с целью определения курсовой устойчивости, которая оценивается характеристиками поворачиваемости и чувствительности к управлению автомобиля, забросом угловой скорости и временем 90 %-ной реакции по угловой скорости. Требования распространяются на АТС (за исключением троллейбусов) категорий М и N. Перед испытаниями АТС нагружают до полной массы, заявленной предприятием-изготовителем.

АТС испытывают при скоростях:

- $(80 \pm 3)$  км/ч – для АТС категорий  $M_1, M_2$  и  $N_1$ ;
- $(60 \pm 3)$  км/ч – для АТС категорий  $M_3, N_2$  и  $N_3$ .

При этой скорости АТС движется равномерно и прямолинейно до начала поворота рулевого колеса. При испытаниях производят максимально быстрый, с угловой скоростью не менее  $200$  °/с, поворот рулевого колеса в заданное положение. Рулевое колесо удерживают в этом положении до начала установившегося кругового движения или, если криволинейное движение не становится установившимся, в течение 3 с.

Характеристика поворачиваемости и чувствительности к управлению автомобиля представляет собой зависимость угла поворота рулевого колеса  $\delta_n$  от установившегося бокового ускорения  $a_y$ .

Заброс угловой скорости автомобиля вычисляют по формуле:

$$\Delta\psi_1 = f(a_y). \tag{1.1}$$

**Замечание.** Заброс угловой скорости автомобиля  $\Delta\psi_1$  – это превышение угловой скорости автомобиля над установившимся ее значением, возникающим при переходе от прямолинейного движения к движению по окружности.

В соответствии с ГОСТ 31507-2012 заброс угловой скорости  $\Delta\psi_1$  автомобиля над установившимся значением не должен превышать указанного в табл. 1.

Таблица 1

Категория АТС	Значение заброса $\Delta\psi_1$ угловой скорости, %, не более, при установившемся боковом ускорении $a_y$ , м/с <sup>2</sup>	
	2	4
$M_1, M_2, N_1$	30	80
$M_3, N_2, N_3$	10	–

Характеристика времени 90 %-ной реакции автомобиля  $t_{90} = f(a_y)$  при боковых ускорениях от 2 до 4 м/с<sup>2</sup> не должна превышать:

- 0,3 с – для автомобилей категорий  $M_1, M_2, N_1$ ;
- 2,0 с – для автомобилей категорий  $M_3, N_2, N_3$ .

В процессе испытаний измеряют и непрерывно регистрируют во времени:

- $\delta_n$  – угол поворота рулевого колеса, °;
- $\psi$  – угловую скорость автомобиля, °/с;
- $a_{y.}$  – боковое ускорение автомобиля, м/с<sup>2</sup>;
- $v$  – скорость автомобиля, м/с.

При обработке результатов определяют:

- установившееся значение угла  $\delta_n$  и момент времени достижения 50% этого значения;
- параметры записи угловой скорости автомобиля;
- $\psi$  – установившееся значение угловой скорости автомобиля;
- $\Delta\psi_1$  – заброс угловой скорости автомобиля над установившимся значением;
- момент времени достижения значения угловой скорости автомобиля, равного 90% установившейся угловой скорости;
- $\Delta t_{90}$  – время 90 %-ной реакции автомобиля, представляющее собой интервал времени между моментами достижения 50% установившегося значения угла поворота рулевого колеса и 90% установившегося значения угловой скорости автомобиля.

Образец записи угла поворота рулевого колеса и угловой скорости автомобиля приведен на рис. 1.

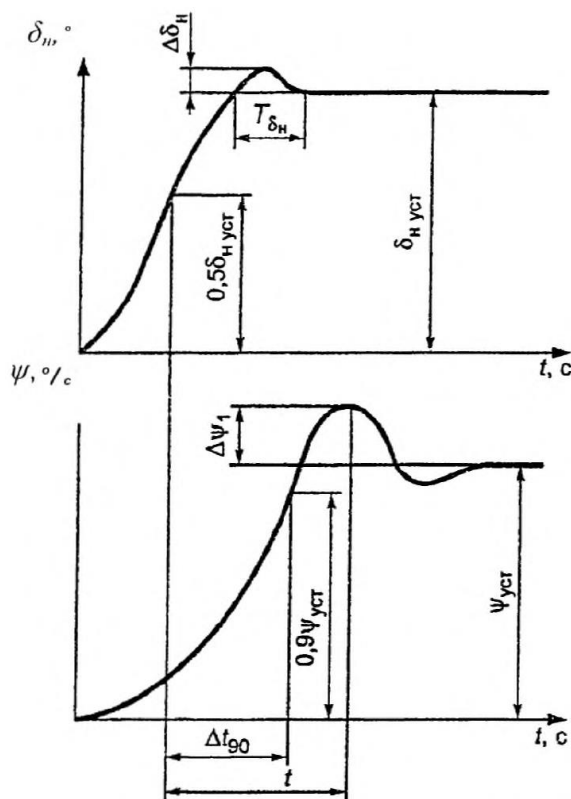


Рис. 1. Записи угла поворота рулевого колеса  $\delta_n$  и угловой скорости  $\psi$  автомобиля при испытании "рывок руля"

## 2. Описание лабораторной работы

Лабораторная работа ориентирована на студентов автомобильного направления с целью ознакомления с возможностями программного комплекса "Универсальный механизм" (ПК УМ). Универсальный механизм 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:** освоение методики определения курсовой устойчивости АТС при испытании "рывок руля" в ПК УМ и исследование факторов, влияющих на устойчивость АТС.

В лабораторной работе будем использовать прототип трёхосного бортового крупнотоннажного грузового автомобиля *truck\_3\_axles* (рис. 2).

Все основные характеристики модели параметризованы. Грузоподъёмность модели *truck\_3\_axles* составляет **22500 кг**, соответственно АТС относится к категории  $N_3$  (транспортные средства, предназначенные для перевозки грузов, имеющие технически допустимую максимальную массу более 12 тонн).

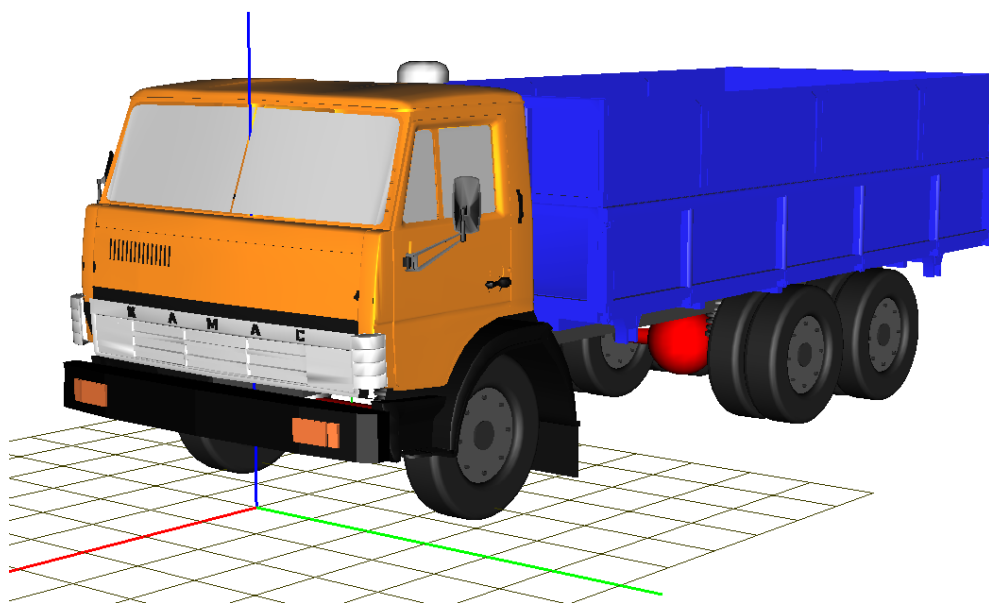


Рис. 2. Общий вид модели трёхосного бортового грузового автомобиля *truck\_3\_axles* в программе ввода **UM Input**

Расположение файлов модели седельного тягача зависит от версии установленного на вашем компьютере ПК УМ:

– УМ 2023 (УМ 10), готовую модель можно найти в папке

[{Данные УМ}\samples\Automotive\truck\\_3\\_axles](#)

– УМ 9, готовую модель можно скачать по адресу

[http://www.universalmechanism.com/download/models/truck\\_3\\_axles.zip](http://www.universalmechanism.com/download/models/truck_3_axles.zip)

Для версий УМ, предшествующих девятой, модель недоступна.

Описание лабораторной работы выполнено с использованием УМ 9. В 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 автомобиля. 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. 3). После этого откроется модель трёхосного грузового автомобиля.

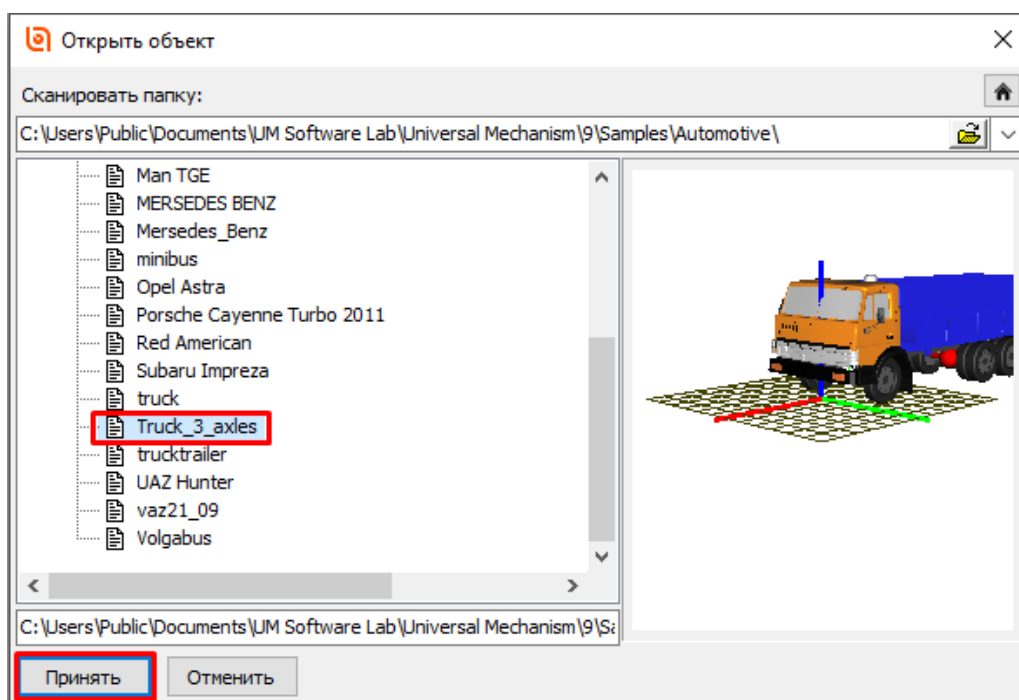


Рис. 3. Открытие модели в программе моделирования **UM Simulation**

Для выполнения расчётов необходимо сделать предварительные настройки: найти положение равновесия модели, открыть графические окна, создать переменные и разместить их в графических окнах. 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\_2** (рис. 4).

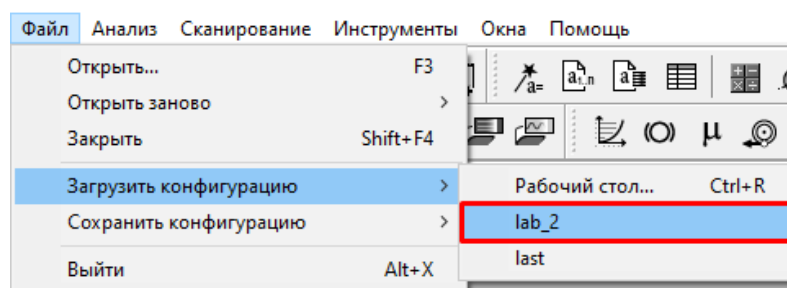


Рис. 4. Загрузка подготовленной конфигурации

На экране появятся три графических и одно анимационное окно. В анимационном окне отображается модель грузового автомобиля на полигоне (рис. 5). Список векторов и траекторий в верхней части анимационного окна содержит траекторию точки в центре переднего правого колеса. Эта траектория будет отображаться в анимационном окне во время моделирования.

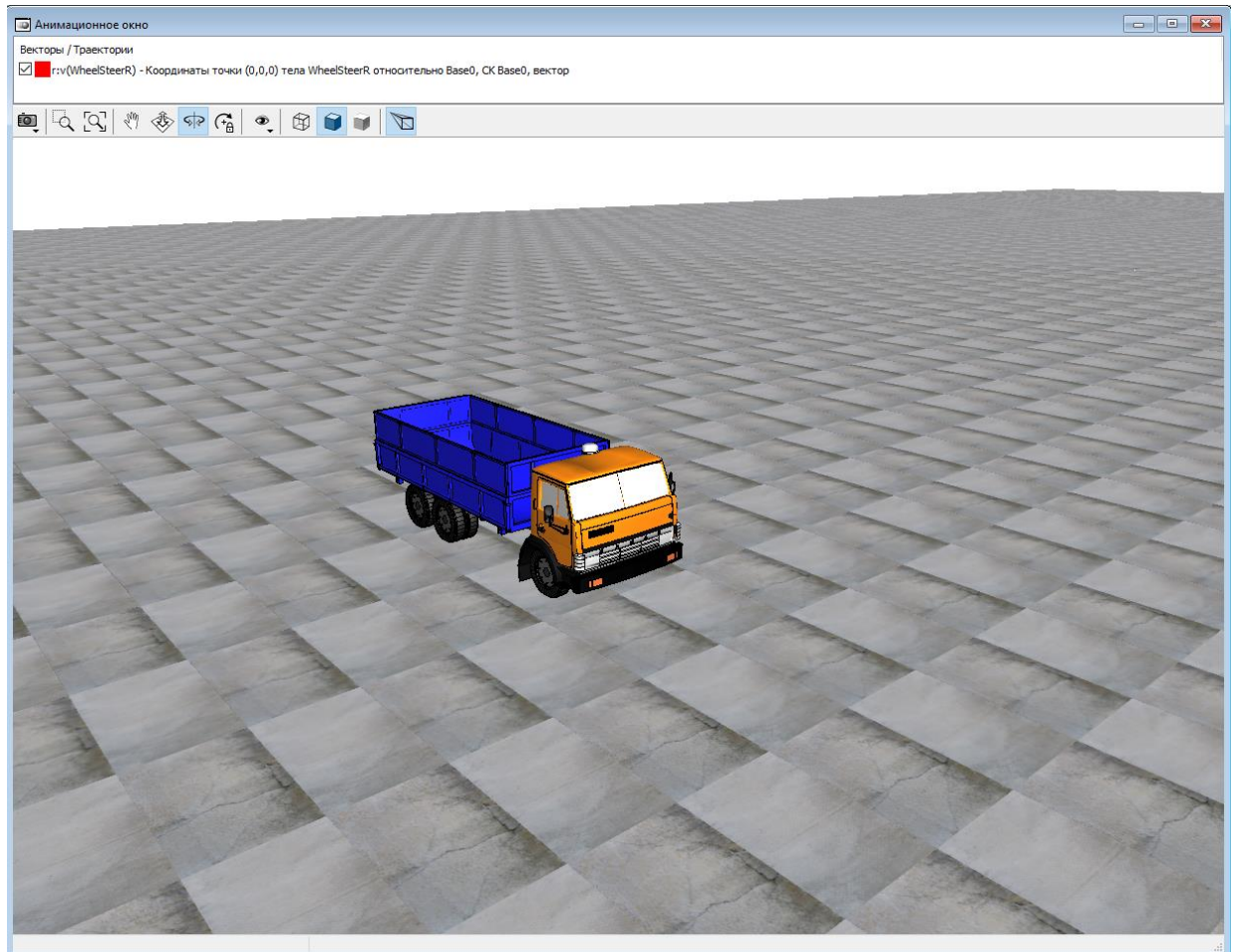


Рис. 5. Анимационное окно

Графическое окно "*Боковое ускорение АТС*" содержит переменную  $a_y$  – боковое ускорение кузова грузового автомобиля (рис. 6).

Графическое окно "*Угловая скорость АТС*" содержит переменную  $psi$  – угловая скорость кузова грузового автомобиля (рис. 7).

Графическое окно "*Угол поворота рулевого колеса АТС*" содержит переменную  $delta$  – угол поворота рулевого колеса грузового автомобиля (рис. 8).

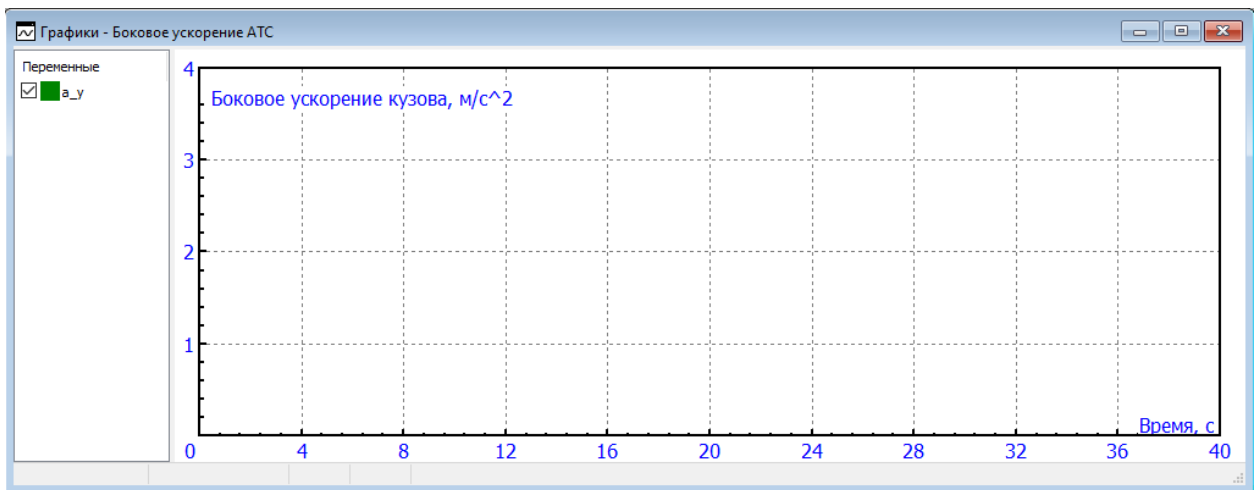


Рис. 6. Окно для построения графика бокового ускорения кузова грузового автомобиля

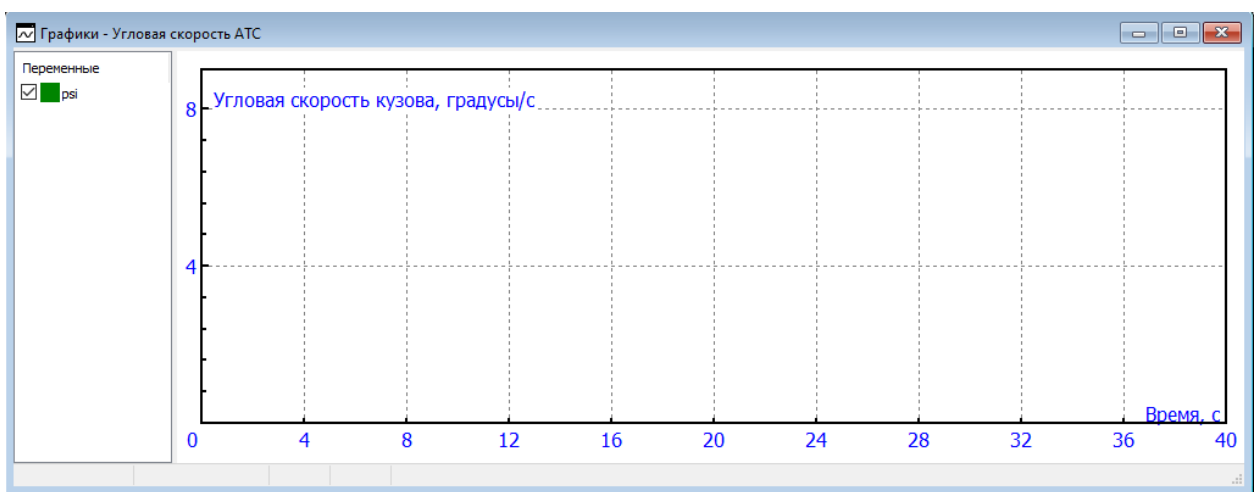


Рис. 7. Окно для построения графика угловой скорости кузова грузового автомобиля



Рис. 8. Окно для построения графика угла поворота рулевого колеса грузового автомобиля

## 4. Определение устойчивости АТС при испытании "рывок руля"

Выполним тест на определение устойчивости грузового автомобиля.

1. В этой лабораторной работе для задания скорости будем использовать единицы м/с. Выберите пункт меню **Инструменты | Настройки** и убедитесь, что в появившемся окне **Настройки** на вкладке **Общие** в поле **Единица измерения скорости для идентификатора v0** выбраны м/с (рис. 9).

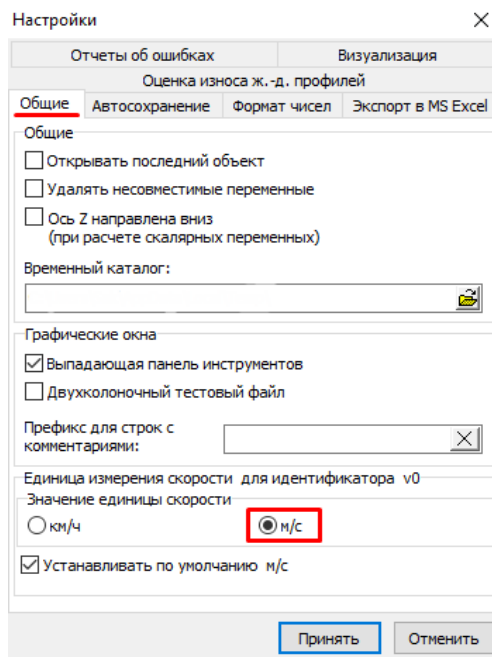



Рис. 9. Окно настроек

2. С помощью пункта меню **Анализ | Моделирование** или кнопки **Моделирование**  откройте окно **Инспектора моделирования объекта**.
3. В появившемся окне перейдите на вкладку **Идентификаторы | Список идентификаторов | Весь список** (рис. 10). Здесь отображаются параметры модели.

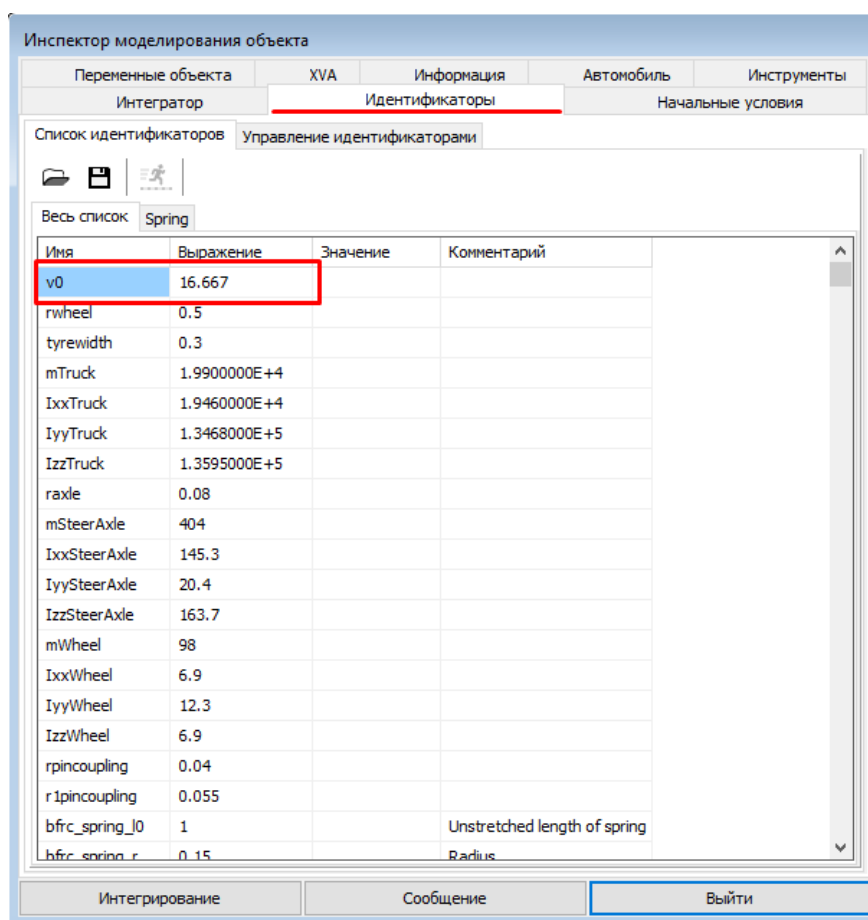


Рис. 10. Окно инспектора моделирования объекта

4. В соответствии с ГОСТ 31507-2012 для АТС категории  $N_3$  тест "рывок руля" проходят при скорости **60 км/ч**, соответственно, параметр **v0**, отвечающий за скорость грузового автомобиля, равен **16,667 м/с** (рис. 10).
5. Движение грузового автомобиля задается с помощью графика рулевого управления. Согласно ГОСТ 31507-2012 для оценки результата теста для грузового автомобиля был подобран такой график управления, при котором обеспечивается боковое ускорение  $a_y$ , равное **2 м/с<sup>2</sup>** (см. табл. 1), и угловая скорость рулевого колеса составляет более **200 °/с**. Чтобы посмотреть график управления, в окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Автомобиль | Тесты** и в поле **График управления** нажмите на кнопку **Показать** (рис. 11).

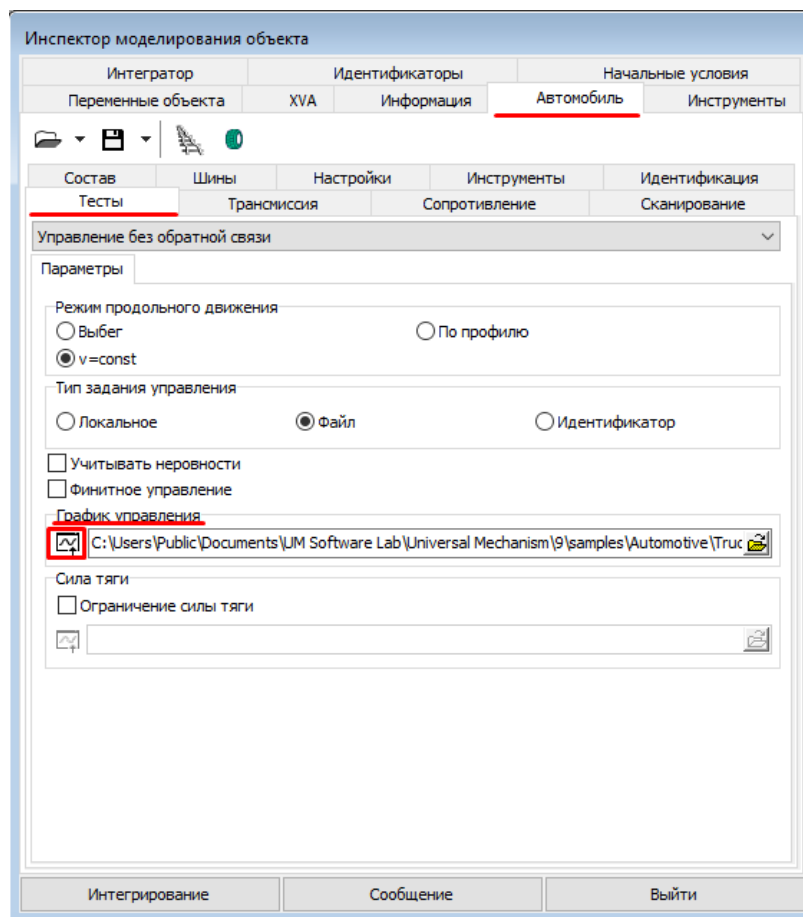


Рис. 11. Настройки теста

6. В соответствии с графиком грузовой автомобиль **1 с** едет по прямой, а затем за **0,35 с** поворачивает управляемые колеса на **0,046 рад (2,64°)** и переходит в круговое движение (рис. 12).

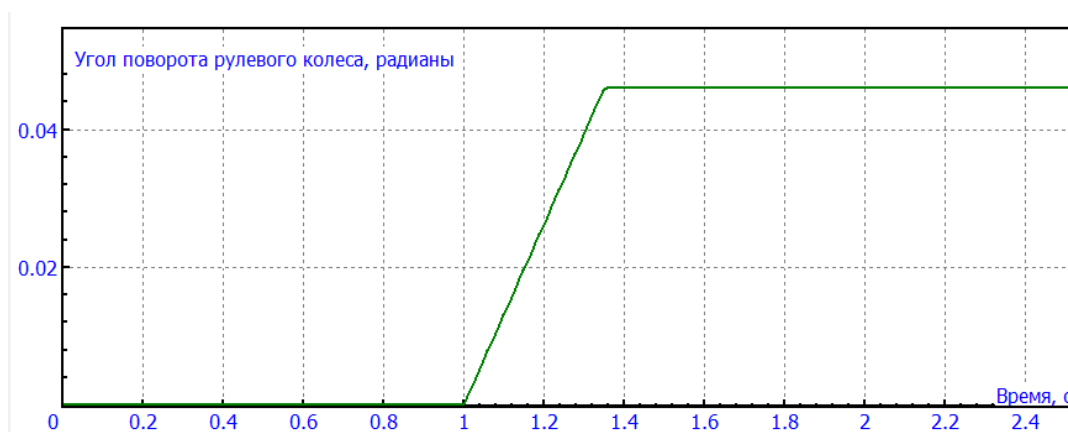


Рис. 12. График рулевого управления

**Замечание.** В модели автомобиля не описано рулевое колесо и его связь с управляемыми колёсами. Управление реализовано напрямую через поворот управляемых колёс. При таком описании рулевого управления передаточное число равняется единице, соответственно на рис. 12 выводится угол поворота

управляемого колеса, численно равный углу поворота рулевого колеса. Подробную информацию об идентификации системы рулевого управления можно найти в [Главе 12](#) в пп.12.7.7 "Управление скоростью продольного движения" и пп.12.9.1.2 "Идентификация рулевого управления".

7. Теперь перейдём к выполнению теста и оценим устойчивость нашей модели. Для этого в окне **Инспектора моделирования объекта** нажмите кнопку **Интегрирование** (рис. 11).
8. После этого начнётся процесс моделирования. В анимационном окне грузовой автомобиль начнёт движение, кривой линией будет отображаться траектория движения центра правого переднего колеса. В графических окнах начнётся построение графиков для переменных.
9. После окончания процесса моделирования в появившемся окне **Информация** нажмите **ОК** (рис. 13). Программа перейдёт в режим паузы процесса моделирования.

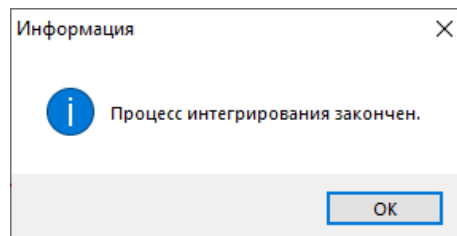


Рис. 13. Окно информации о завершении процесса интегрирования

Проанализируем результаты. В графическом окне *Боковое ускорение АТС* значение переменной бокового ускорения кузова  $a_y$  в установившемся режиме равняется  $2 \text{ м/с}^2$ , см. рис. 14.

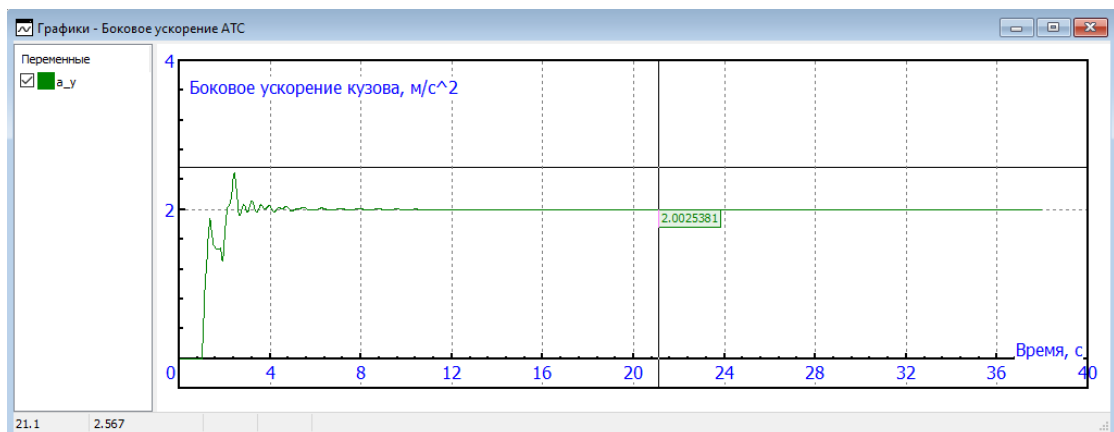


Рис. 14. Оценка бокового ускорения  $a_y$  в установившемся режиме

**Замечание.** Чтобы на графике при его пересечении с вертикальной линией курсора мыши отображалось численное значение переменной, в графическом окне необходимо переместить курсор к границе между заголовком окна и областью построения графика и на появившейся панели инструментов выбрать **Показывать значение ординаты** (рис. 15).

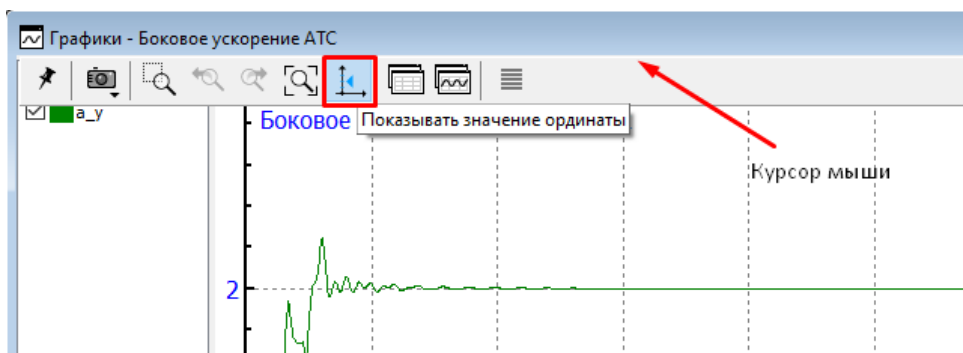



Рис. 15. Настройка отображения ординаты в графическом окне

Оценим значение заброса угловой скорости  $\Delta\psi_1$ . Согласно ГОСТ 31507-2012 значение заброса угловой скорости  $\Delta\psi_1$  не должно превышать **10%** от установившегося значения угловой скорости автомобиля  $\psi$  (см. табл. 1). Заброс угловой скорости  $\Delta\psi_1$  – это разница между максимальным значением угловой скорости и его установившимся значением  $\psi$  (см. рис. 1). Для определения заброса выполним следующие действия.

10. В графическом окне *Угловая скорость АТС* активируйте кнопку **Показывать значение ординаты** (см. рис. 15).
11. Определим установившееся значение угловой скорости **psi**. В графическом окне для установившегося режима наведите курсор мыши в области построения графика, например, на 24 секунду. Установившееся значение угловой скорости **psi** равняется **7 °/с** (рис. 16).



Рис. 16. Определение установившегося значения угловой скорости  $\psi$

12. Определим максимальное значение угловой скорости кузова. Выберите пункт меню **Инструменты | Табличный процессор** или на панели быстрого доступа нажмите кнопку **Табличный процессор** . На экране появится окно табличного процессора.
13. В графическом окне *Угловая скорость АТС* выделите переменную **psi** и перетащите её с помощью левой кнопки мыши в окно табличного процессора. В левой части окна табличного процессора выберите функционал **Max** (рис. 17), который определяет максимальное значение ординаты. Как мы видим, максимальное значение угловой скорости кузова составляет **7,392 °/с**.

14. Определим разницу в процентах между максимальным и установившимся значениями угловой скорости кузова:

$$\left(\frac{7,392}{7} - 1\right) \cdot 100\% = 5,6\%.$$

Заброс угловой скорости  $\Delta\psi_1$  при установившемся боковом ускорении  $a_y$ , равном  $2 \text{ м/с}^2$ , составляет **5,6%**, что меньше **10%**, следовательно, устойчивость АТС по показателю заброса угловой скорости  $\Delta\psi_1$  обеспечена.

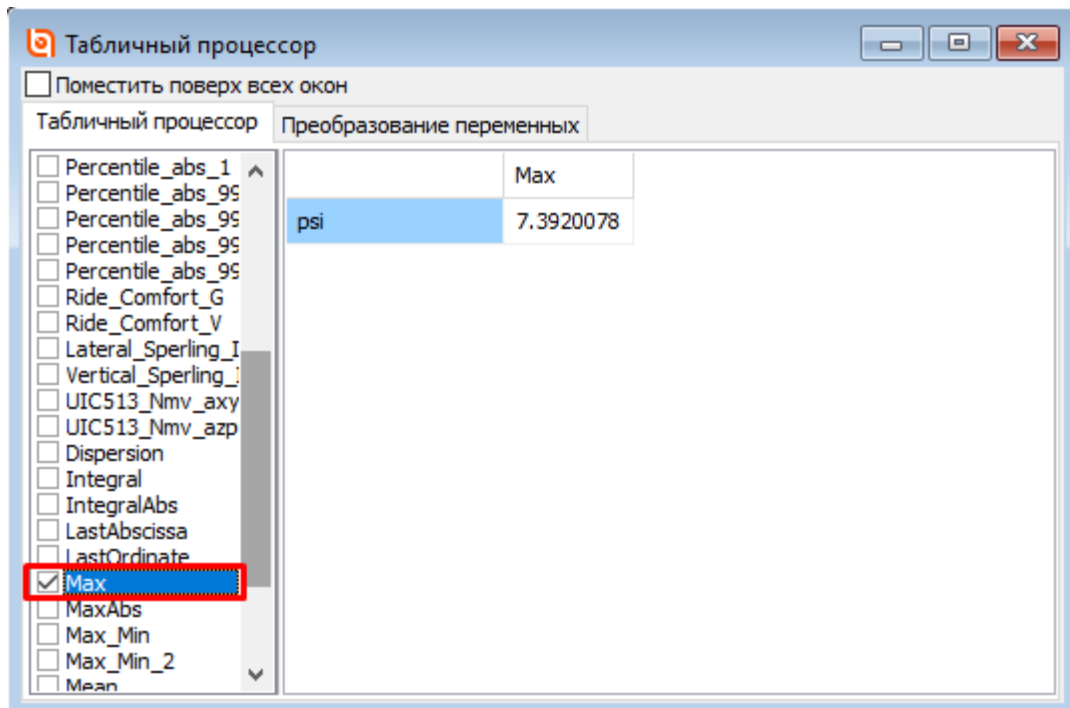


Рис. 17. Окно табличного процессора

Теперь оценим устойчивость АТС по показателю времени 90%-ной реакции автомобиля  $\Delta t_{90}$ . Для определения времени 90%-ной реакции необходимо определить момент времени  $t_{\delta_{50\%}}$  достижения 50% установившегося значения угла поворота рулевого колеса  $\delta_{50\%}$  и момент времени  $t_{\psi_{90\%}}$  достижения значения угловой скорости, равной 90% установившейся угловой скорости  $\psi_{90\%}$ .

15. В п.10 мы выяснили, что установившееся значение угловой скорости  $\psi$  равняется  $7 \text{ }^\circ/\text{с}$ , тогда  $\psi_{90\%} = 0,9 \psi = 6,3 \text{ }^\circ/\text{с}$ .
16. Определим момент времени  $t_{\psi_{90\%}}$ , при котором угловая скорость  $\psi$  достигает значения  $6,3 \text{ }^\circ/\text{с}$ . Для этого в графическом окне *Угловая скорость АТС* колесиком мыши увеличьте масштаб графика до необходимой точности. На рис. 18 видно, что значение угловой скорости  $\psi_{90\%}$  достигается в момент времени  $t_{\psi_{90\%}} = 1,652 \text{ с}$ .



Рис. 18. Определение времени  $t_{\psi_{90\%}}$

17. Теперь по графику *Угол поворота рулевого колеса АТС* определим установившееся значение угла поворота рулевого колеса  $\delta_n$ . Для этого активируйте кнопку **Показывать значение ординаты** (см. рис. 15) и для переменной **delta** определите в установившемся режиме, например, в момент времени 20 с, значение угла поворота рулевого колеса. Из рис. 19 видно, что **delta** в установившемся режиме равняется **2,02 °**.



Рис. 19. Определение установившегося значения угла поворота рулевого колеса  $\delta_n$

18. Определим значение угла поворота рулевого колеса при достижении 50% от установившегося значения  $\delta_n$ , равного **2,02°**:  $\delta_{50\%} = 0,5 \delta_n = \mathbf{1,01^\circ}$ .
19. Определим момент времени  $t_{\delta_{50\%}}$ , при котором угол поворота рулевого колеса **delta** достигает значения **1,01°**. Для этого в графическом окне *Угол поворота рулевого колеса АТС* колесиком мыши увеличьте масштаб графика до необходимой точности. На рис. 20 видно, что значение угла поворота рулевого колеса  $\delta_{50\%}$  достигается в момент времени  $t_{\delta_{50\%}} = \mathbf{1,186}$  с.



Рис. 20. Определение времени  $t_{\delta_{50\%}}$

20. Определим время 90%-ной реакции автомобиля  $\Delta t_{90}$ :

$$\Delta t_{90} = |t_{\delta_{50\%}} - t_{\psi_{90\%}}| = |1,186 - 1,652| = 0,466 \text{ с.}$$

В соответствии с ГОСТ 31507-2012 время 90 %-ной реакции автомобиля при боковом ускорении  $2 \text{ м/с}^2$  для категории  $N_3$  не должна превышать **2 с**. Время 90%-ной реакции грузового автомобиля составляет **0,466 с**, что меньше предельно допустимого значения, следовательно, устойчивость АТС по показателю времени 90%-ной реакции автомобиля обеспечена.

Таким образом, устойчивость грузового автомобиля *truck\_3\_axles* по показателям заброса угловой скорости  $\Delta\psi_1$  и времени 90%-ной реакции автомобиля  $\Delta t_{90}$  при испытании "рывок руля" обеспечена.

Результаты расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Показатель	Нормативное значение	Полученное значение	Устойчивость по одному показателю
Заброс угловой скорости $\Delta\psi_1$ , %, не более, при установившемся боковом ускорении $a_y=2 \text{ м/с}^2$	10	5,6	Обеспечена
Время 90%-ной реакции автомобиля $\Delta t_{90}$ , не менее	2 с	0,466 с	Обеспечена
Устойчивость по двум показателям			Обеспечена

## 5. Влияние положения центра масс АТС на курсовую устойчивость

Для безопасной перевозки и сохранности груза в зависимости от типа груза и его габаритов необходимо правильно загружать кузов автомобиля. В зависимости от того, как распределена нагрузка, меняется положение центра масс всего АТС. Определим влияние положения центра масс АТС на его курсовую устойчивость. Модель грузового автомобиля описана в грузённом состоянии, дополнительное тело для описания груза не вводилось. Поэтому для изменения координат центра тяжести АТС изменим положение центра масс кузова грузового автомобиля. Для этого выполните следующие действия.

1. В окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Идентификаторы | Список идентификаторов**.
2. Найдите идентификаторы  $X\_COG\_Truck$ ,  $Y\_COG\_Truck$ ,  $Z\_COG\_Truck$ , которые описывают положение центра масс кузова грузового автомобиля (рис. 21).

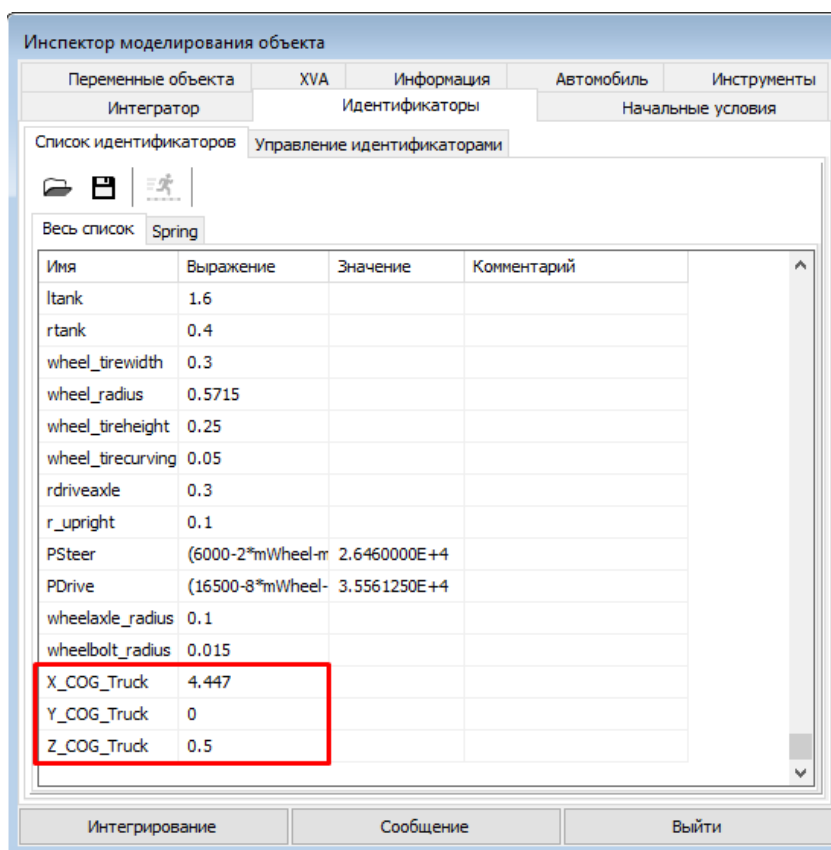


Рис. 21. Идентификаторы, описывающие положение центра масс кузова грузового автомобиля

3. Изменим координаты положения центра масс. Задайте  $X\_COG\_Truck=4$ ,  $Y\_COG\_Truck=0.02$ .
4. После изменения положения центра масс боковое ускорение кузова грузового автомобиля изменится, поэтому для данного положения центра масс заранее был подготовлен новый график управления автомобилем, при котором соблюдается боковое ускорение  $a_y$ , равное  $2 \text{ м/с}^2$ .

- Для того чтобы загрузить новый график управления, в окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Автомобиль | Тесты** и в поле **График управления** нажмите кнопку **"Открыть"** (рис. 22).

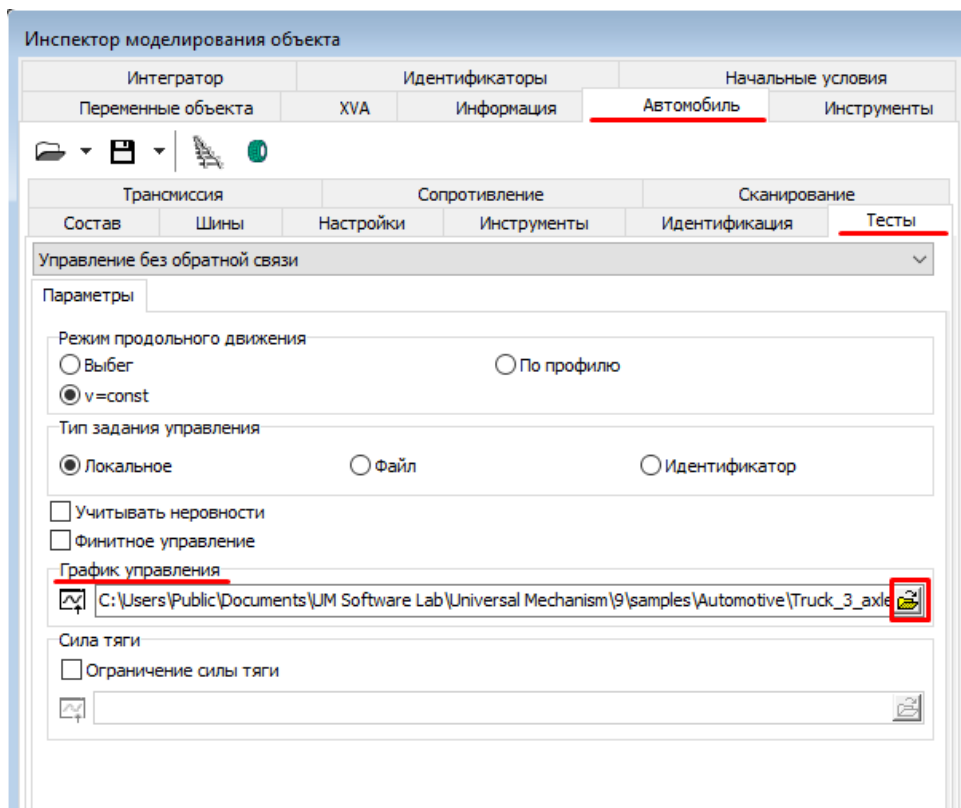


Рис. 22. Загрузка графика рулевого управления

- После этого в появившемся окне перейдите в папку модели, выберите файл **"График рулевого управления\_2.ols"** и нажмите кнопку **Открыть** (рис. 23).

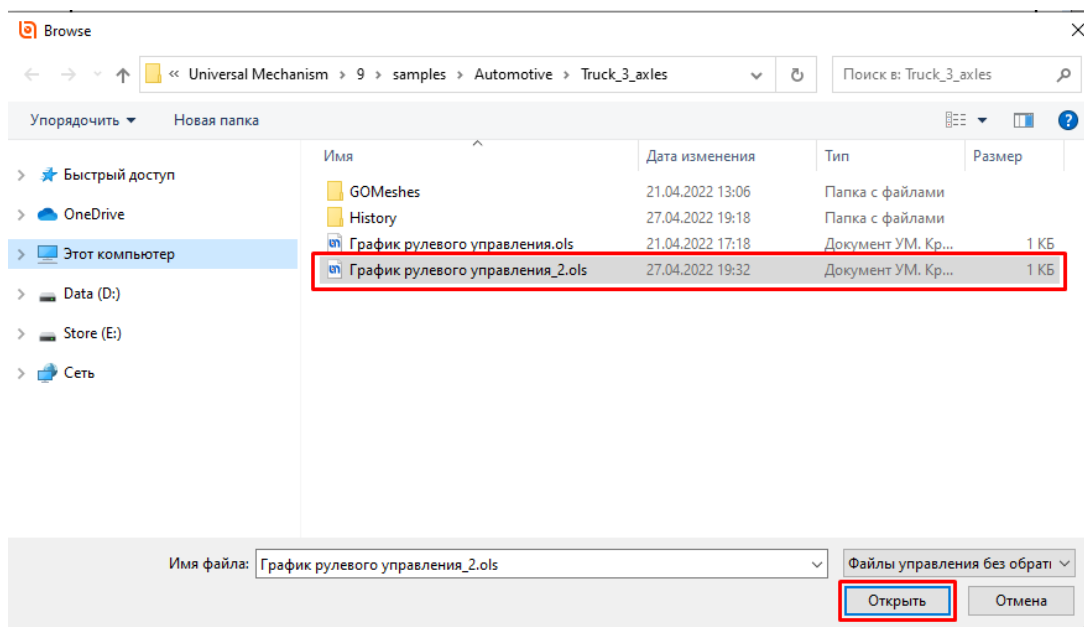


Рис. 23. Файл с графиком рулевого управления в папке модели

7. Перейдём к моделированию. Нажмите кнопку **Интегрирование** и наблюдайте за процессом в анимационном и графических окнах.
8. После окончания процесса моделирования перейдём к обработке результатов. Как видим, в графическом окне *Боковое ускорение АТС* значение переменной бокового ускорения кузова  $a_y$  в установившемся режиме равняется  $2 \text{ м/с}^2$ , см. рис. 24.

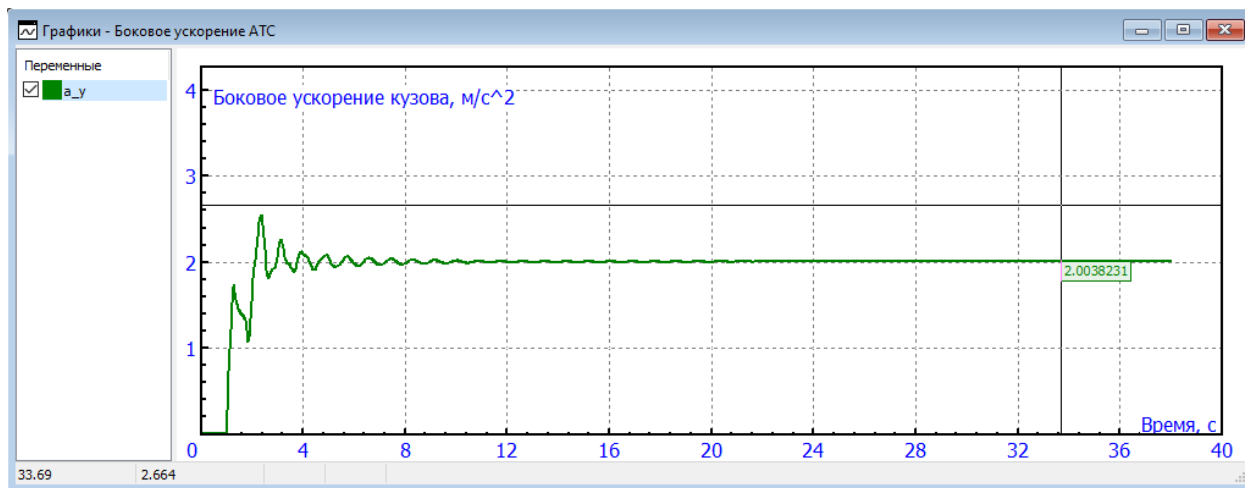


Рис. 24. Оценка бокового ускорения  $a_y$  в установившемся режиме

Самостоятельно исследуйте курсовую устойчивость грузового автомобиля, как это выполнялось в п. 4 "Определение устойчивости АТС при испытании "рывок руля", повторяя пп. 10-19. Сделайте выводы и занесите результаты в табл. 3.

Таблица 3

Показатель	Нормативное значение	Полученное значение	Устойчивость по одному показателю
Заброс угловой скорости $\Delta\psi_1$ , %, не более, при установившемся боковом ускорении $a_y=2 \text{ м/с}^2$	10		
Время 90%-ной реакции автомобиля $\Delta t_{90}$ , не менее	2 с		
Устойчивость по двум показателям			