



Лабораторные работы



# Исследование усилий, возникающих в элементах гусеничного двигателя при движении в транспортном режиме

Лабораторная работа №1

Лабораторная работа ориентирована на студентов, обучающихся по специальности "Гусеничные машины", с целью ознакомления с современными подходами к компьютерному моделированию динамики гусеничных машин и проведению виртуальных экспериментов с ними

## Подготовка к лабораторной работе

Для выполнения лабораторной работы для отображения фотореалистичной визуализации необходимо установить модуль фотореалистичного окружения **UM Scene**, подробнее о модуле можно почитать в главе 30 руководства пользователя "[Подготовка и использование фотореалистичного окружения с помощью модуля UM Scene](#)".

1. Установите базу стандартных 3D моделей по следующей ссылке: <http://www.universalmechanism.com/download/umscenecollection.exe>. Ссылку на последнюю версию базы стандартных 3D моделей можно найти в разделе "Универсальный механизм/Загрузки" на странице <http://www.umlab.ru/pages/index.php?id=3>.
2. Проверьте, что у вас есть лицензия на модуль **UM Scene**. Для этого запустите программу **UM Simulation**, в главном меню выберите пункт меню **Помощь | О программе** и убедитесь, что напротив модуля **UM Scene** стоит "+", см. рис. 1.

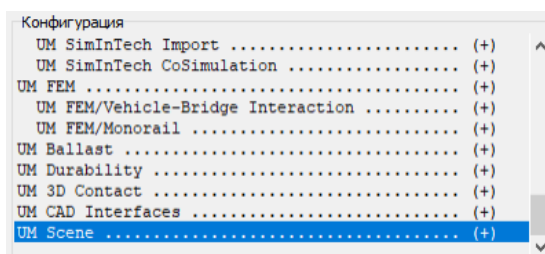


Рис. 1. Модуль UM Scene в конфигурации УМ

3. В **UM Simulation** перейдите на вкладку **Инструменты | Настройки** или нажмите горячую клавишу **F10**. В появившемся окне **Настройки** перейдите на вкладку **Визуализация**, установите галочку **Загружать ресурсы для модуля Scene** и нажмите кнопку **Принять**, см. рис. 2. Для дальнейшей работы программу **UM Simulation** требуется перезапустить.

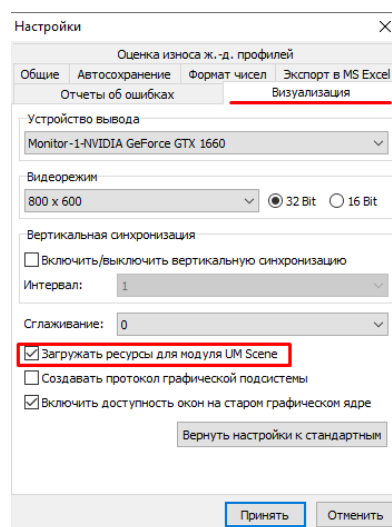


Рис. 2. Настройка визуализации

## Оглавление

<b>1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....</b>	<b>5</b>
<b>2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ .....</b>	<b>6</b>
<b>3. ДВИЖЕНИЕ ГМ В ТРАНСПОРТНОМ РЕЖИМЕ ПО ПРЯМОЙ .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1. ЗАГРУЗКА МОДЕЛИ В UM SIMULATION.....</b>	<b>8</b>
<b>3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ГД БЕЗ КРЮКОВОЙ НАГРУЗКИ .....</b>	<b>11</b>
<b>3.3. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ГД С КРЮКОВОЙ НАГРУЗКОЙ .....</b>	<b>17</b>

Команда "Универсального механизма" благодарит за помощь старшего преподавателя кафедры НТТС Алтайского государственного технического университета **Корнева Никиту Сергеевича** в разработке методических материалов и динамической модели ДТ-75 и доктора технических наук **Коростелева Сергея Анатольевича**.

**Разработчик:**

В.А. Сак, инженер

**Консультанты:**

Н.С. Корнев, старший преподаватель

С.А. Коростелев, д.т.н., доцент

Р.В. Ковалев, к.т.н.

# 1. Основные теоретические сведения

Основным элементом гусеничной машины (ГМ) является гусеничный движитель (ГД), который определяет основные качества техники. Основным недостатком ГМ является то, что механизм ГД более сложный, чем колесо. К недостаткам ГМ также относятся низкая скорость передвижения, высокая стоимость и большой износ элементов гусеницы. Наряду с колесными машинами ГМ имеют ряд плюсов: повышенная проходимость машины, высокая тяговая способность, маневренность техники и равномерное распределение давления на грунт. Основными требованиями к ГМ являются высокая проходимость, надежность и долговечность.

В этой лабораторной работе проанализируем значения сил в, возникающих в элементах гусеничного движителя при различных эксплуатационных режимах при помощи компьютерного моделирования в программном комплексе "Универсальный механизм".

## 2. Описание лабораторной работы

Лабораторная работа ориентирована на студентов, изучающих динамику гусеничных машин, с целью ознакомления их с современными подходами к компьютерному моделированию и проведению виртуальных экспериментов с ними. Для компьютерного моделирования используется программный комплекс "Универсальный механизм" (ПК УМ). ПК "Универсальный механизм", который состоит из двух частей: программы описания моделей **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 динамических нагрузок, возникающих в элементах конструкции ГД в ПК УМ при движении в транспортном режиме.

В лабораторной работе будем использовать модель сельскохозяйственного трактора общего назначения ДТ-75. Каталог с моделью трактора в УМ называется *dt75* (рис. 3).

Модель состоит из двух подсистем "гусеница". Все основные характеристики модели параметризованы.

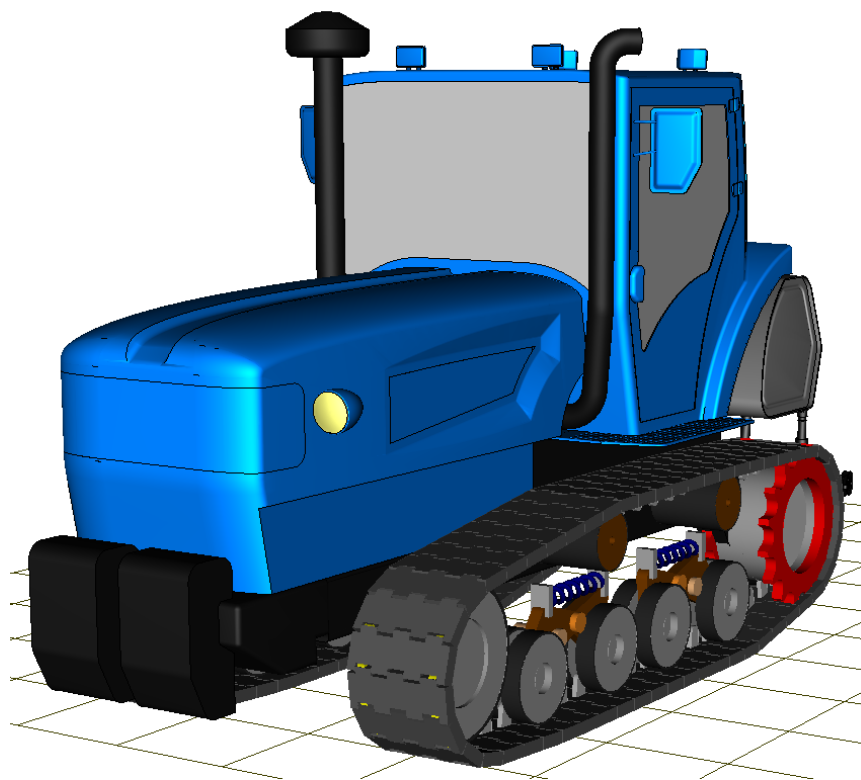


Рис. 3. Общий вид модели гусеничного трактора ДТ-75 в **UM Input**

Расположение файлов гусеничного трактора ДТ-75 зависит от версии установленного на вашем компьютере ПК УМ:

- ПК УМ 2023 (ПК УМ 10), готовую модель можно найти в папке [{Данные УМ}\samples\tracked\\_vehicles\dt75](#)
- ПК УМ 9, готовую модель можно скачать по адресу

<http://www.universalmechanism.com/download/models/dt75.zip>

Для версий ПК УМ, предшествующих девятой, модель недоступна.

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

### 3. Движение ГМ в транспортном режиме по прямой

Рассмотрим два случая, когда ГМ движется в транспортном режиме на максимальной скорости без приложения крюковой нагрузки и с приложением крюковой нагрузки.

#### 3.1. Загрузка модели в UM Simulation

Запустите программу моделирования **UM Simulation** и откройте модель *dt75*. 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. 4). После этого откроется модель трактора ДТ-75.

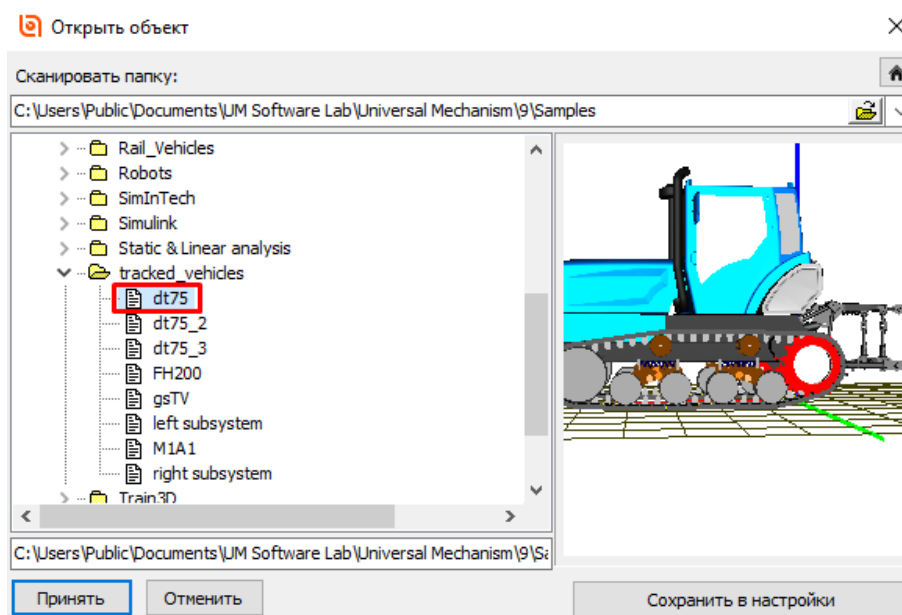


Рис. 4. Открытие модели в программе моделирования **UM Simulation**

Для выполнения расчётов необходимо сделать некоторые предварительные действия: найти положение равновесия ГМ, открыть графические окна, создать переменные и разместить их в графических окнах, настроить параметры отображения векторов нормальных контактных сил. На данном этапе эти шаги опускаются, и загружается заранее подготовленная конфигурация для модели со всеми её настройками. Для этого выберите пункт меню **Файл | Загрузить конфигурацию | lab\_1** (рис. 5).

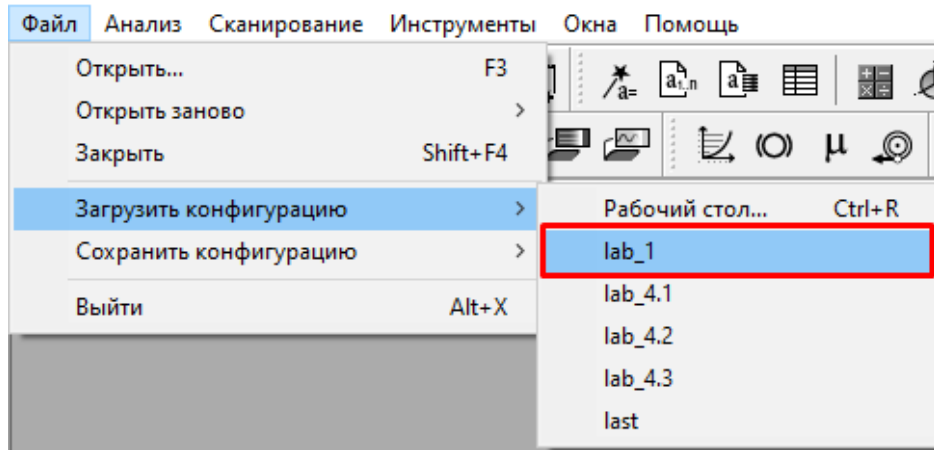


Рис. 5. Загрузка подготовленной конфигурации

На экране появятся четыре графических и два анимационных окна. В верхнем анимационном окне показаны вектора растягивающих усилий между звеньями гусеничной цепи, рис. 6. В нижнем анимационном окне расположен список векторов нормальных сил, возникающих в опорных катках, рис. 7.

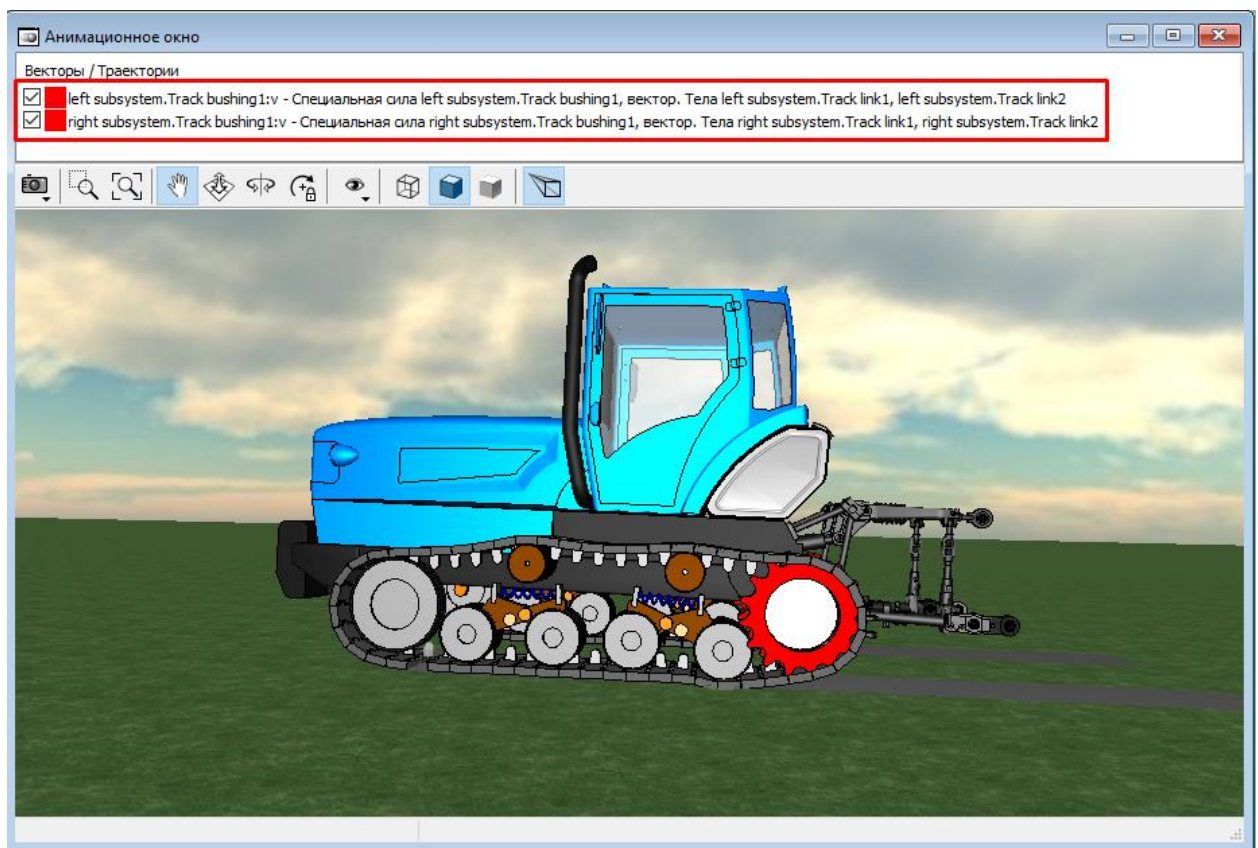


Рис. 6. Первое анимационное окно

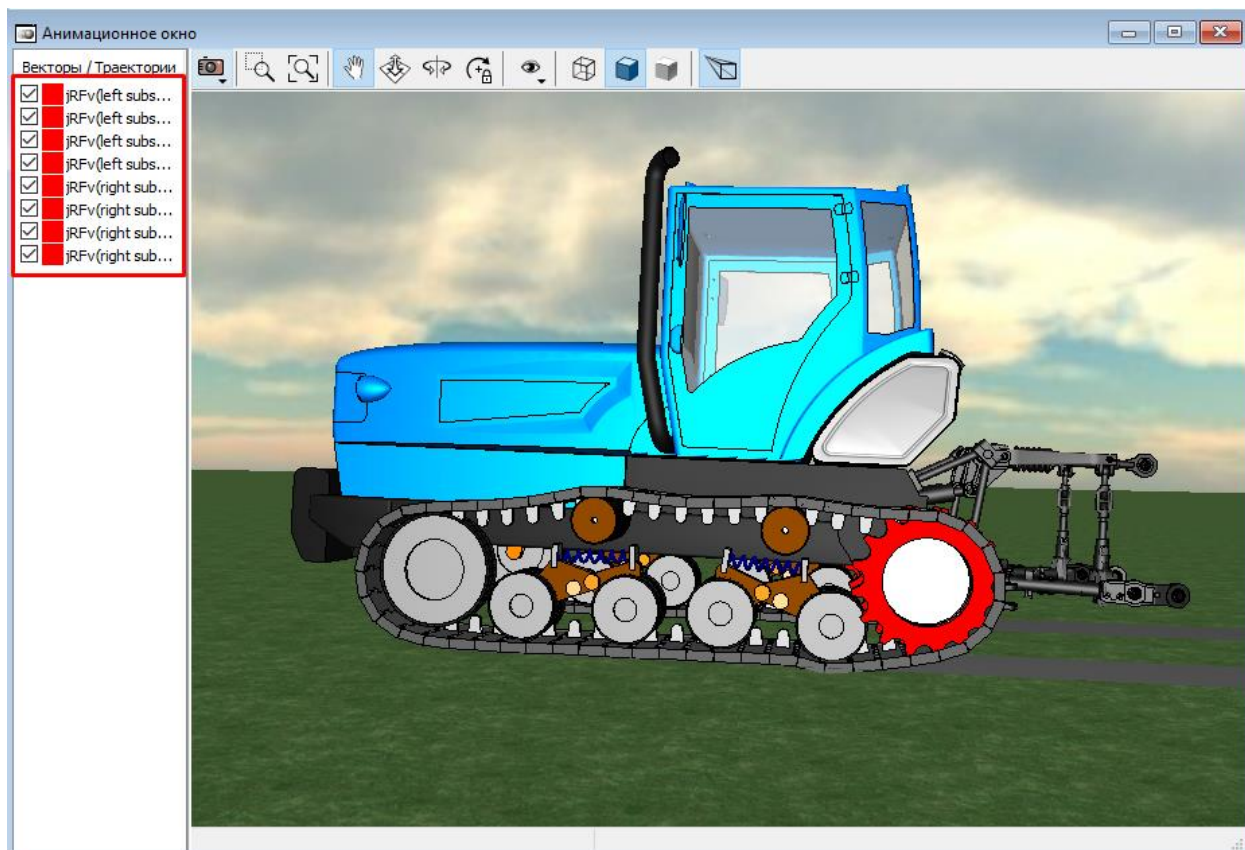


Рис. 7. Второе анимационное окно

В окнах для построения графиков выводятся силы в шарнире между некоторыми двумя смежными траками (в верхнем окне), графики углов поворота между ними (во втором окне сверху), нормальные реакции в опорных катках (в третьем окне), а также угол поворота кузова относительно поперечной оси (в нижнем окне).

Все графики даны в зависимости от положения на гусеничном обводе траков. Всего обвод ГД содержит 53 трака. Переменные на графиках будут выводиться для первого трака относительно второго трака согласно нумерации на рис. 8.

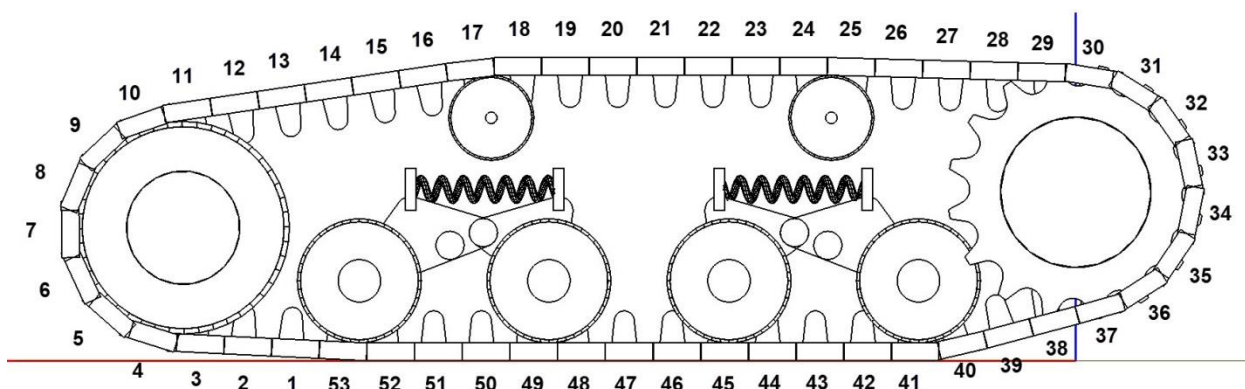



Рис. 8. Положение траков на гусеничном обводе

## 3.2. Исследование усилий в элементах ГД без крюковой нагрузки

Перейдем к исследованию усилий в элементах гусеничного движителя. Рассмотрим прямолинейное движение с максимальной скоростью **11 км/ч** без крюковой нагрузки. В модели скорость трактора задаётся через постоянную угловую скорость звёздочки.

1. С помощью пункта меню **Анализ | Моделирование** или кнопки **Моделирование**  откройте окно **Инспектора моделирования объекта**.
2. В окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Идентификаторы | Список идентификаторов** (рис. 9). Здесь отображаются все параметры модели. Все величины заданы в системе СИ. Например, идентификатором **v0** задана продольная скорость трактора, равная **11 км/ч** (или **3,056 м/с**), см. рис. 9.

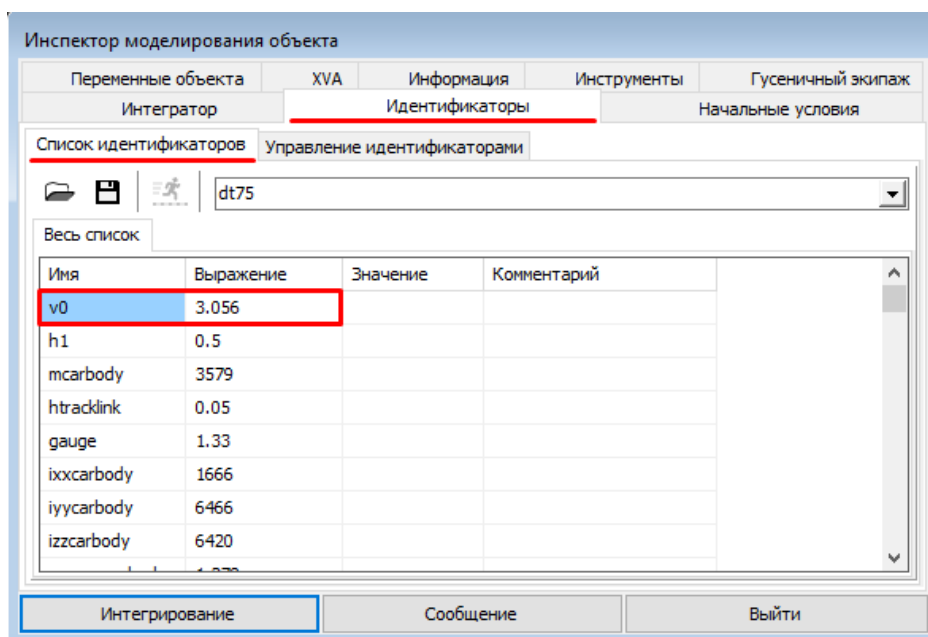


Рис. 9. Параметризация продольной скорости трактора

3. В выпадающем списке подсистем выберите **left subsystem** и найдите идентификатор **w**, параметризующий угловую скорость звёздочки, рис. 10. Угловая скорость рассчитывается по следующей формуле:

$$w = \frac{v}{R}, \quad (1.1)$$

где  $v$  – продольная скорость трактора, м/с;

$R$  – радиус ведущего колеса, равный 0,336 м.

Убедитесь, что значение идентификатора  $w$  равно 9,095 рад/с, что соответствует продольной скорости трактора в 11 км/ч.

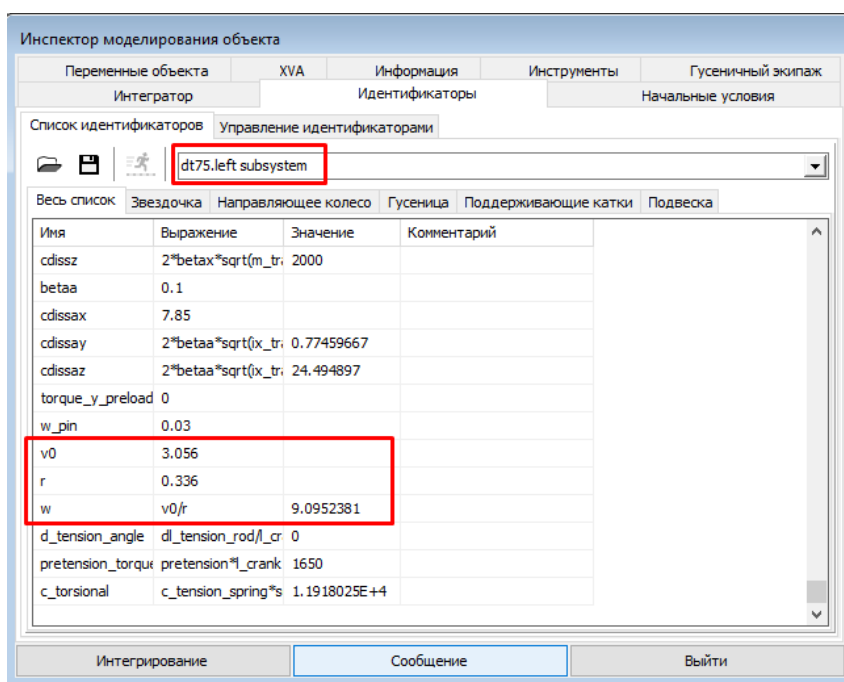


Рис. 10. Параметризация угловой скорости ведущего колеса

В окне инспектора моделирования объекта перейдите на вкладку **Гусеничный экипаж | Тесты | Настройки**. Обратите внимание, что в поле **Режим продольного движения** задан режим **Выбег**, рис. 11. Это означает, что начальная продольная скорость кузова трактора задается через стандартный идентификатор **v0**. Со значением начальной скорости **v0** должна быть синхронизирована угловая скорость на ведущем колесе **w**. Таким образом, вращение ведущего колеса задано кинематически и реализует бесконечную мощность.

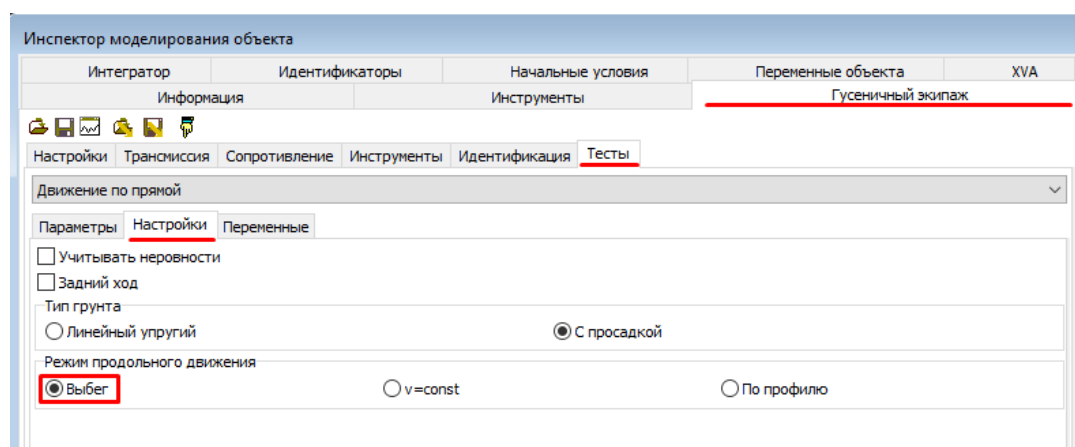


Рис. 11. Режим задания продольного движения

Перед началом моделирования необходимо убедиться, что значение единиц измерения скорости задано в **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**, см. рис. 12).

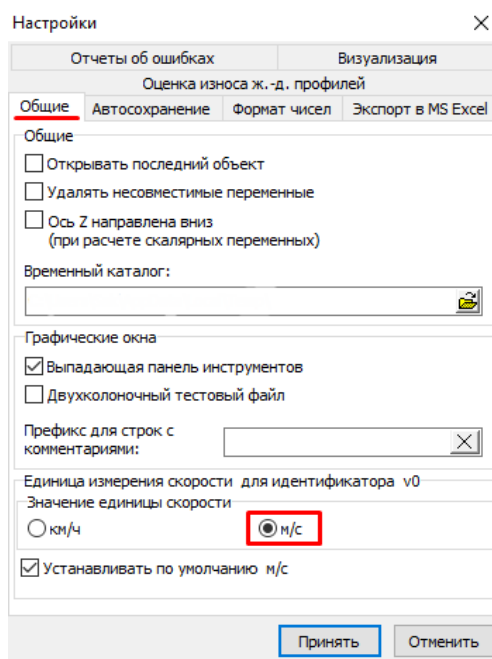


Рис. 12. Окно настроек

Теперь перейдем к процессу моделирования. В окне **Инспектора моделирования объекта** нажмите кнопку **Интегрирование**, см. рис. 9. После этого начнётся процесс моделирования, в анимационных окнах отобразятся векторы сил, рис. 13, рис. 14. Тест настроен так, что за все время моделирования гусеничные движители сделают два полных оборота. При первом обороте гусеничных движителей будут присутствовать переходные процессы, которые искажают картину динамических характеристик. Это будет ярко выражено в анимационных окнах при начале моделирования – будут наблюдаться колебания гусениц. В связи с этим графики в графических окна будут отображаться на втором обороте.

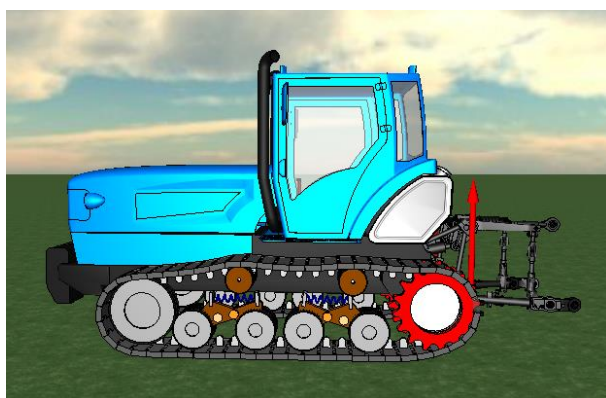


Рис. 13. Динамические нагрузки в шарнире между смежными звеньями при  $t=3,19$  с

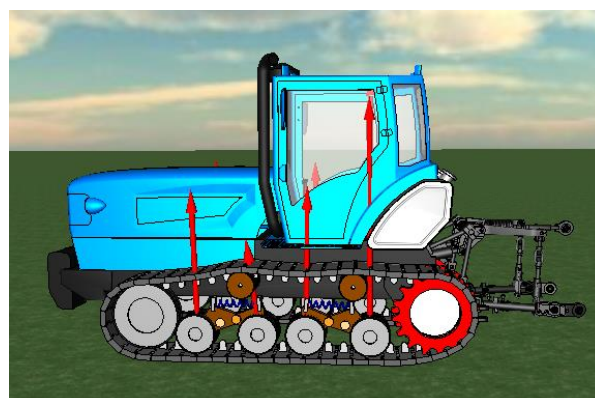


Рис. 14. Нормальные силы в опорных катках при  $t=3,19$  с

- После окончания процесса моделирования в появившемся окне **Информация** нажмите **ОК**, рис. 15. Программа перейдёт в режим паузы процесса моделирования.

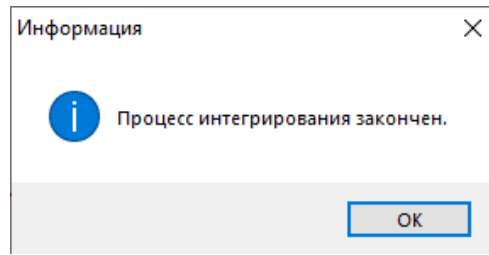


Рис. 15. Окно информации о завершении процесса интегрирования

Результаты моделирования представлены на рис. 16-.

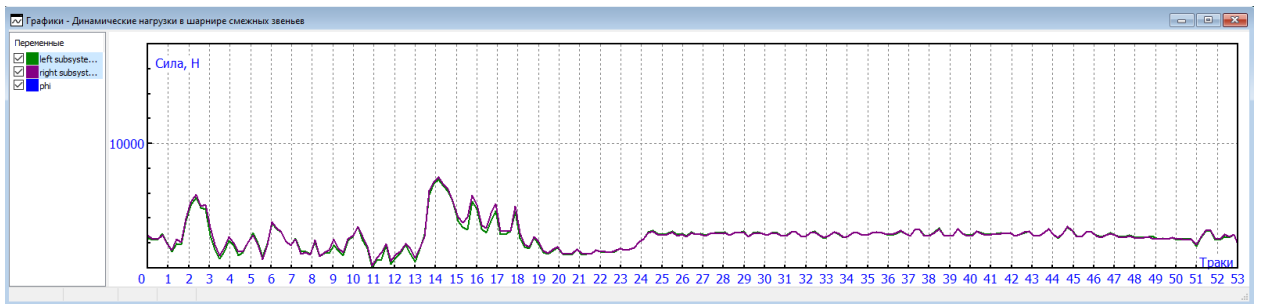


Рис. 16. Графики динамических нагрузок в шарнире между смежными звеньями гусеничной цепи

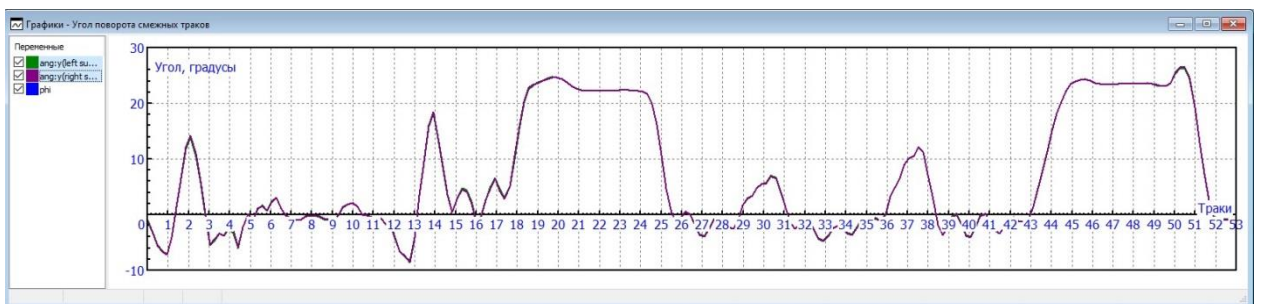


Рис. 17. Графики углов поворота смежных звеньев гусеничной цепи

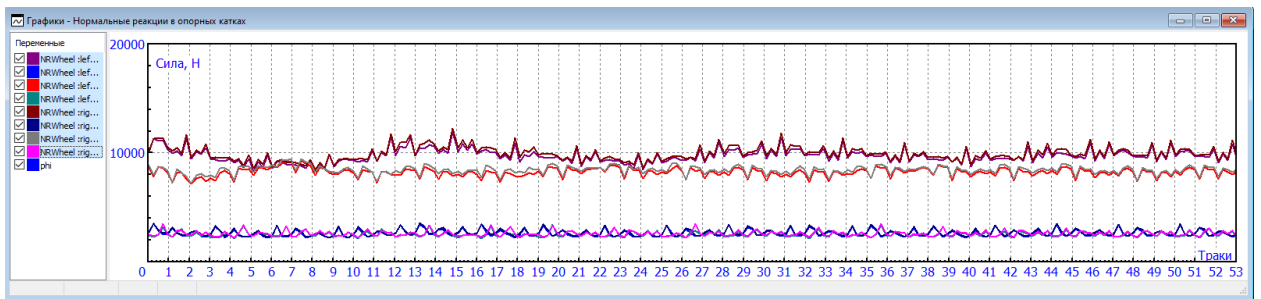


Рис. 18. Графики нормальных сил в опорных катках гусеничных движителей

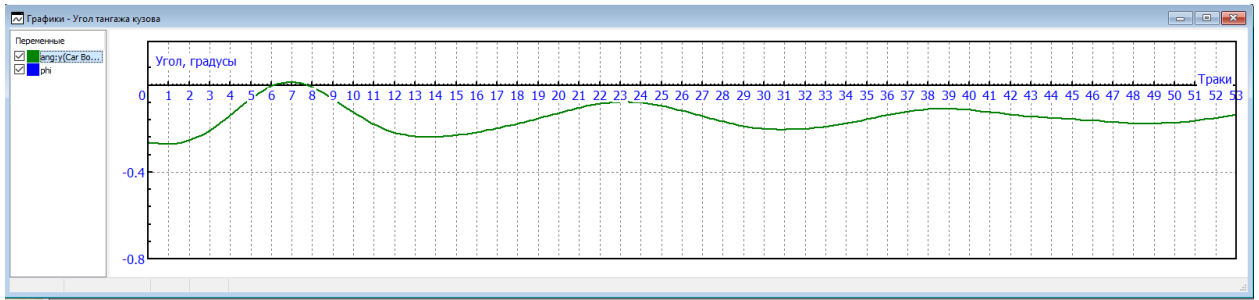


Рис. 19. Угол поворота кузова относительно поперечной оси

Проанализируем графики сил, действующих в гусеничном обводе. На рис. 20 представлены усилия в шарнире между первым и вторым тракком в зависимости от положения первого трака на гусеничном обводе. Позиция 0 на оси абсцисс соответствует положению трака на гусеничном обводе в начальный момент времени. На участке между 2-ой и 14-ой позициями трак находится на опорной ветви и проходит под опорными катками. В момент прохождения трака под опорными катками усилие в шарнирном соединении с соседними катками резко увеличивается, что отображается на графике резкими увеличениями нагрузки. С 14-ой по 17-ую позицию трак находится на ведущем участке цепи (между опорным катком и ведущим колесом). Этот участок цепи характеризуется наибольшей пульсацией усилия. Это объясняется периодическим удлинением ведущего участка при выходе очередного звена из-под заднего опорного катка. С 17-ой по 18,5-ую позиции трак находится на дуге зацепления, а с 18,5-ой по 24,4-ую – в контакте с ведущим колесом. При движении по участку между ведущим и направляющим колесом с позиции 25,5 по 43 усилие в траках равно примерно усилию натяжения гусениц. Небольшие колебания обусловлены провисанием цепи на верхней ветке. С 45-ой по 50,1 позицию трак находится в контакте с направляющим колесом.

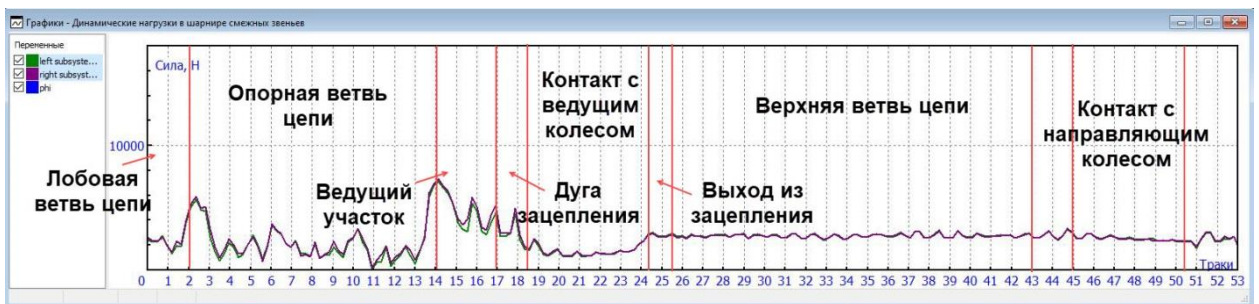


Рис. 20. Анализ графика динамических сил в гусеничном обводе

Проанализируем графики относительного угла поворота звеньев. На рис. 21 приведен угол поворота первого трака относительно второго трака в зависимости от положения первого трака на гусеничном обводе (рис. 21). На участке между 2-ой и 14-ой позициями в моменты прохождения опорного катка по траку наблюдается относительный поворот смежных звеньев (позиции 2, 6, 10, 14). Положение 17 соответствует моменту соприкосновения трака с ведущим колесом, из-за чего угол между звеньями начинает резко возрастать. На участке 18,5-24,4 трак находится в зацеплении с ведущим колесом, что характеризуется постоянным относительным углом поворота. На участке 24,5-25,5 трак выходит

из зацепления с ведущим колесом, что характеризуется уменьшением относительного угла поворота между смежными звеньями. В позиции 29-31 и 36-38 трак проходит по поддерживающим каткам на верхней ветке, что приводит к возрастанию относительных углов поворота. На участке 43-45 трак начинает контактировать с направляющим колесом, из-за чего угол между звеньями начинает резко возрастать. Момент соприкосновения трака с направляющим колесом определяется положением 45, а выход на лобовую ветвь – позицией 51. На интервале с 45-ой по 50,5 позицию трак находится в контакте с направляющим колесом, что характеризуется постоянным относительным углом поворота. С 50,5-ой по 52-ю позицию трак выходит на наклонную ветвь, что характеризуется резким уменьшением относительного угла поворота между смежными звеньями.



Рис. 21. Анализ графика относительных углов поворота звеньев

Проанализируем графики нормальных сил, возникающих в опорных катках (рис. 18). Самые большие нагрузки возникают в 1-ых и 4-ых катках, считая от носа кузова к звездочке, а самые маленькие – во 2-ых и 3-их. В процессе движения кузов трактора совершает небольшие колебательные движения вокруг поперечной оси (рис. 19), что приводит к незначительному перераспределению нагрузки на опорные катки пропорционально изменению угла.

### 3.3. Исследование усилий в элементах ГД с крюковой нагрузкой

Добавим нагрузку на крюке и рассмотрим случай, когда трактор ДТ-75 едет по прямой с крюковой нагрузкой **23,8 кН** на рабочей скорости **7 км/ч**. Нагрузка приложена на подвесное устройство на высоте **400 мм** от опорной поверхности.

Для того чтобы избежать больших переходных процессов в начале моделирования сила на крюке будет нарастать в течение двух секунд до своего максимального значения после одной секунды от начала моделирования. Таким образом, через три секунды модельного времени будем наблюдать движение трактора по прямой с приложенной крюковой нагрузкой.

Прежде чем приступить к настройкам теста, скопируем графические результаты без приложения крюковой нагрузки для того, чтобы позже сравнить их с результатами с приложением крюковой нагрузки.

1. В графическом окне "*Динамические нагрузки в шарнире смежных звеньев*" нажатием на первой переменной правой кнопкой мыши вызовите контекстное меню и выберите **Скопировать как статические** (рис. 22). После этого появится копия рассчитанной переменной. Выполните данную процедуру для всех переменных в трех графических окнах, **не включая** переменную **Distance**.

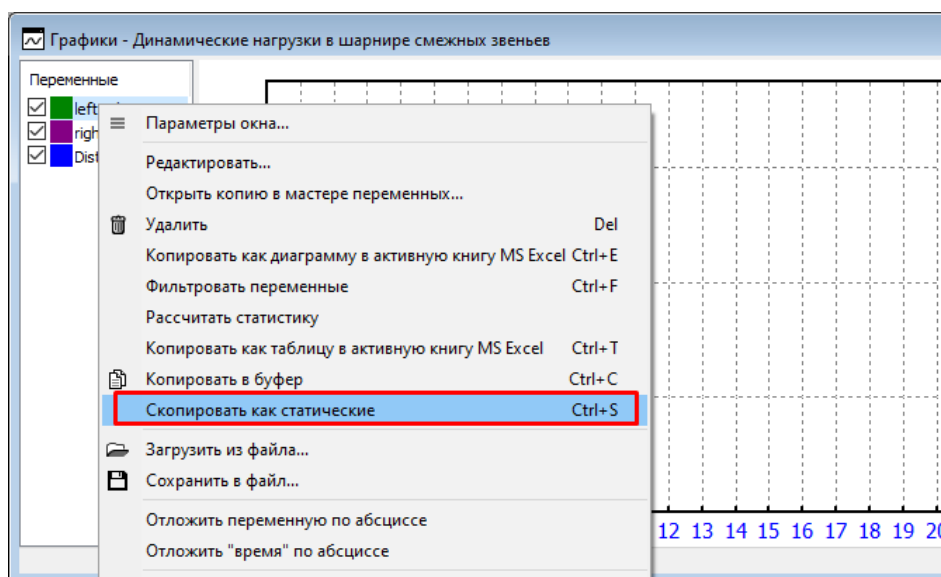


Рис. 22. Вызов контекстного меню и копирование результатов

Перейдем к настройкам теста. Для начала необходимо изменить продольную скорость движения трактора **v0**. Для этого выполните следующие действия.

2. В окне **режима паузы процесса моделирования** нажмите кнопку **Прервать**, рис. 23.

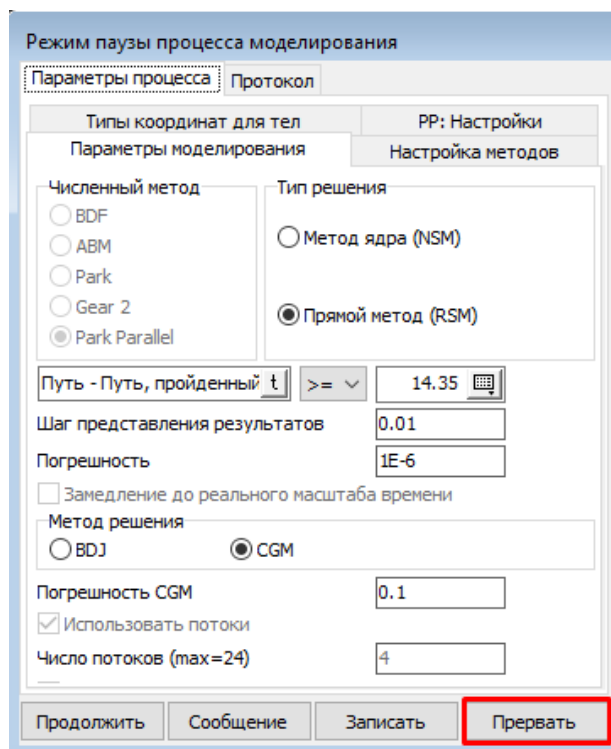


Рис. 23. Окно режима паузы процесса моделирования

- В окне **Инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Идентификаторы** и в подсистеме **dt75** идентификатору **v0** установите значение **1,94** и нажмите кнопку **Enter**. После этого появится окно **Одноименные идентификаторы**, см. рис. 24. Значение продольной скорости присутствует в описании выражения угловой скорости ведущих колес **w** в подсистемах левой и правой гусениц. Если убрать галочки, то идентификатор **v0** не поменяет значение, соответственно, не поменяется угловая скорость. Нам нужно поменять значение продольной скорости в обоих ГД, поэтому оставляем галочки и нажимаем кнопку **Принять**.

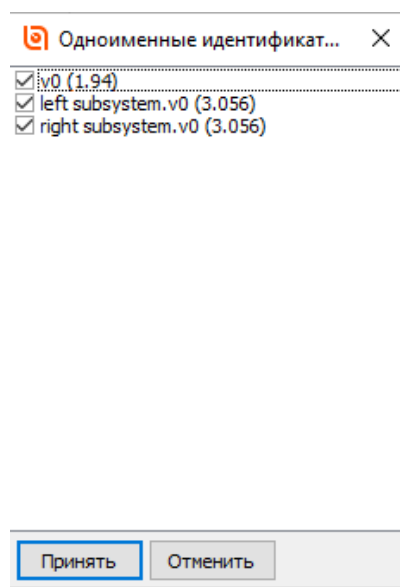


Рис. 24. Окно одноименных идентификаторов

4. Теперь необходимо приложить крюковую нагрузку. В описании силы крюковой нагрузки введен флажок **factor\_1**. При значении флажка **factor\_1=0** сила равна нулю, при значении флажка **factor\_1=1** сила становится активной. Установите параметру **factor\_1** значение **1** (рис. 25).

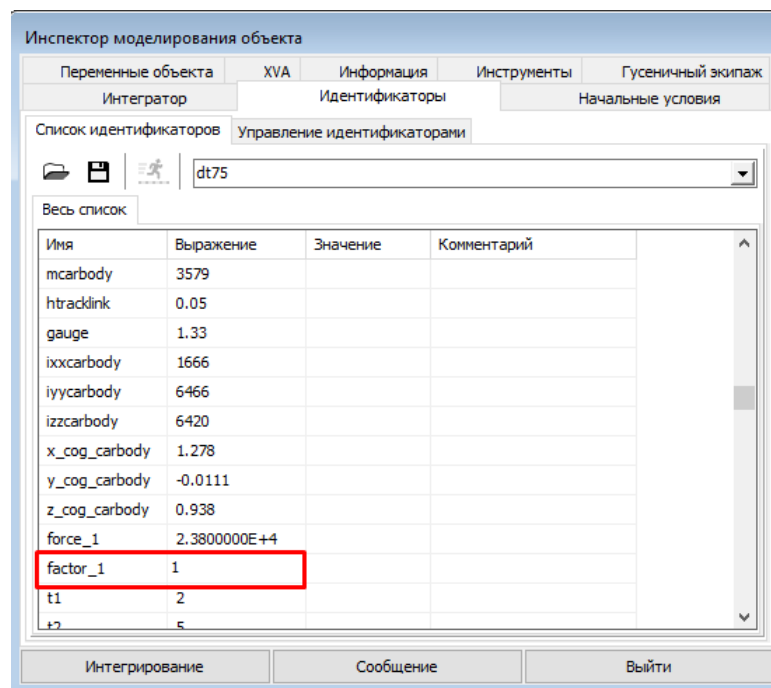



Рис. 25. Список идентификаторов

5. Выведем для наглядности силу на крюке на график и вектор силы в анимационное окно. Для этого выберите **Инструменты | Мастер переменных**, появится окно мастера переменных (рис. 26). В окне перейдите на вкладку **T-силы** и слева в списке сил поставьте галочку возле силы **Force\_1**. В поле **Исследуемая величина** выберите **Сила**. В поле **Компонента** выберите модуль силы (**|V|**). В поле **Действует на...** выберите **тело2:Car Body** (рис. 26).
6. При помощи кнопки **Отобразить переменную в новом окне**  (рис. 26) поместите переменную **Fm(Force\_1)** в новое графическое окно. Разместите графическое окно так, как вам удобно.

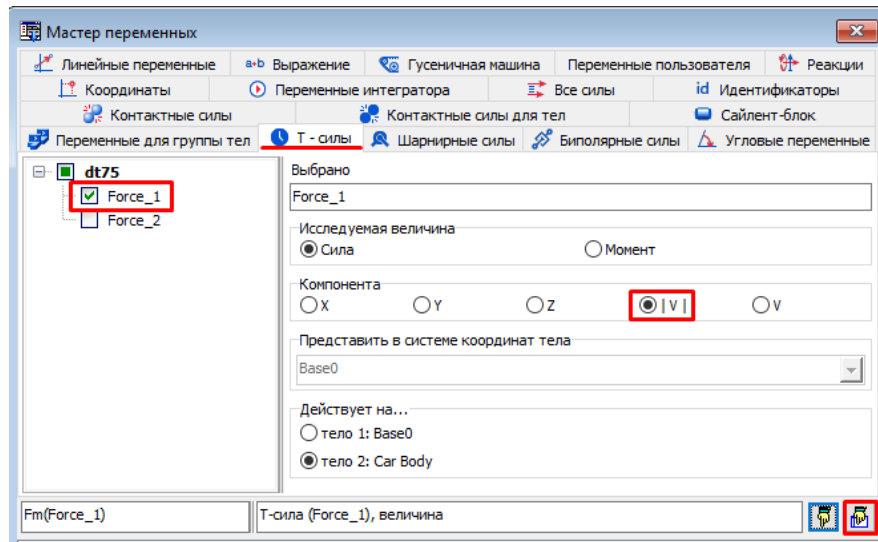



Рис. 26. Окно мастера переменных: добавление силы

Теперь добавим вектор силы в анимационное окно. Для этого в окне мастера переменных в поле **Компонента** выберите вектор (**V**) и добавьте переменную в контейнер при помощи кнопки **Добавить переменную в контейнер** . После этого в контейнере появится переменная **Fv(Force\_1)** (рис. 27).

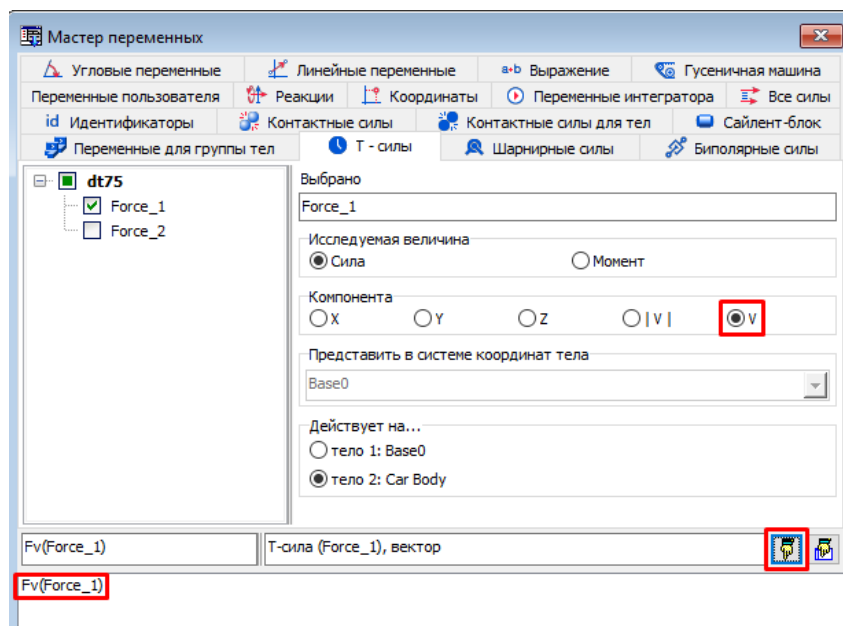


Рис. 27. Окно мастера переменных: добавление вектора силы

7. Перетащите переменную в любое анимационное окно или в оба окна. Окно **Мастера переменных** можно закрыть. После этого в анимационном окне в списке векторов отобразится вектор **Fv(Force\_1)**, см. рис. 28. При желании можно поменять цвет вектора. Для этого вызовите **окно настроек вектора** двойным щелчком по самому вектору, см. рис. 29.



Рис. 28. Список векторов в анимационном окне

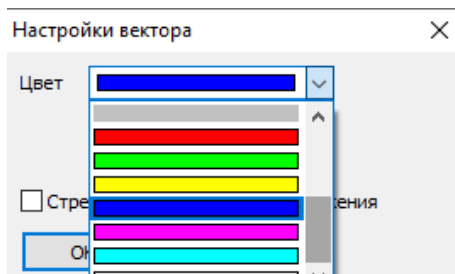


Рис. 29. Окно настроек вектора

8. Теперь перейдем к процессу моделирования. В окне инспектора моделирования объекта нажмите кнопку **Интегрирование**. Наблюдайте за процессом в анимационных и графических окнах. Дождитесь окончания процесса моделирования. Результаты моделирования представлены на рис. 30-.

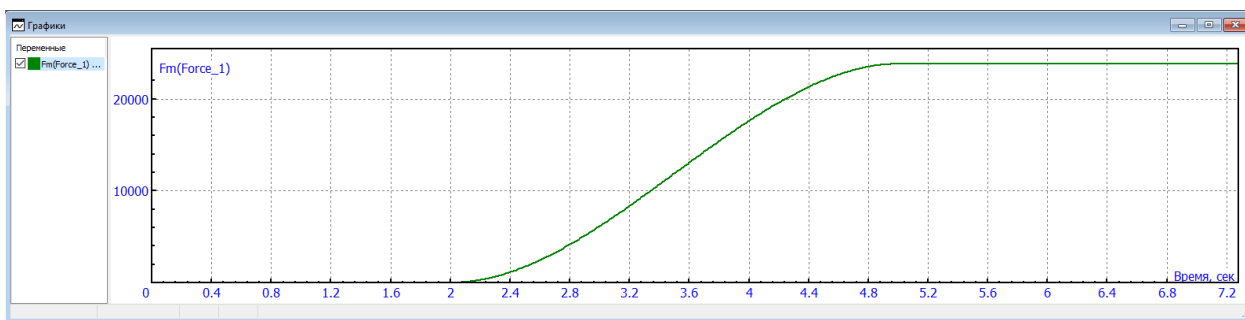


Рис. 30. Изменение крюковой силы в процессе моделирования объекта



Рис. 31. Графики растягивающих усилий между звеньями гусеничной цепи с приложением крюковой нагрузки

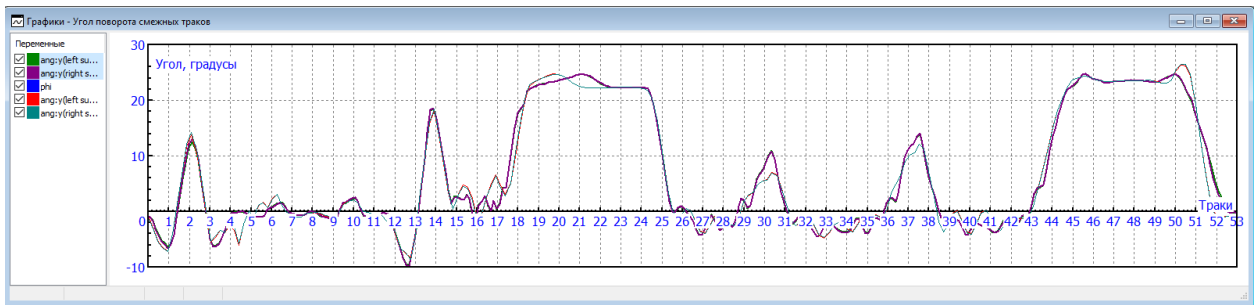


Рис. 32. Графики углов закручивания смежных звеньев с приложением крюковой нагрузки

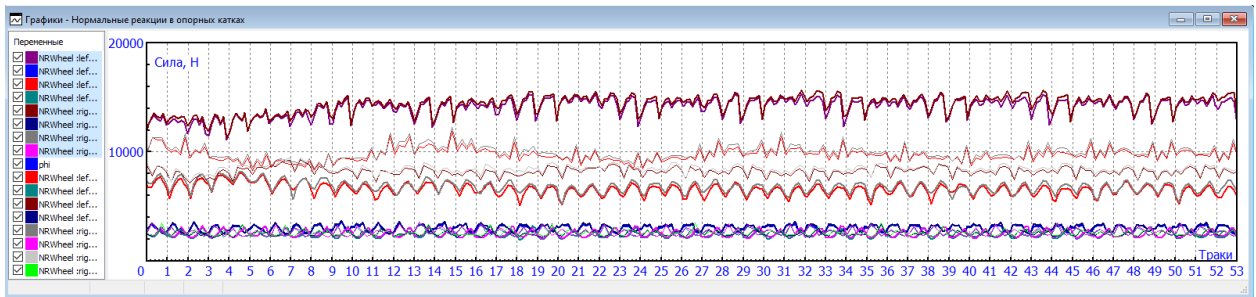


Рис. 33. Графики нормальных реакций в опорных катках с приложением крюковой нагрузки

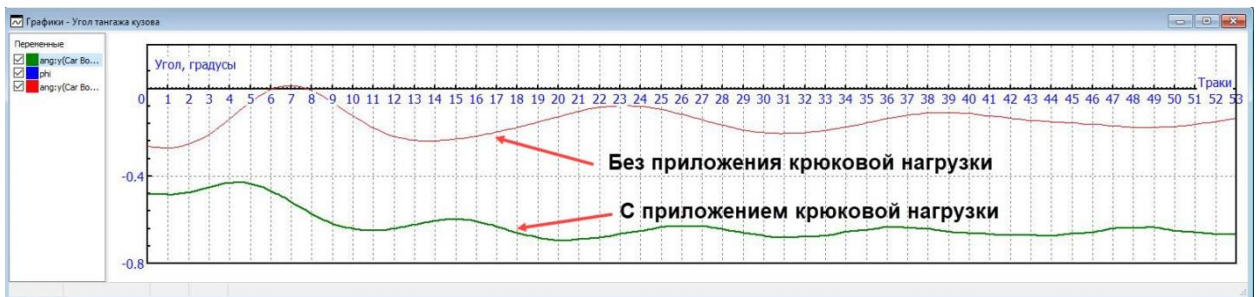


Рис. 34. Угол поворота кузова относительно поперечной оси с приложением крюковой нагрузки

Проанализируем графики сил, действующие в гусеничном обводе с приложенной крюковой нагрузкой (рис. 35). Как видно из графика, растягивающая сила непрерывно возрастает на интервале позиций 2-14, когда трак перемещается от переднего опорного катка к заднему. На дуге зацепления на интервале позиций 17-18,5 растягивающее усилие резко уменьшается. В контакте зацепления звена с ведущим колесом на интервале 18,5-24,5 сила падает более плавно и выходит на участок верхней ветви цепи без заметного изменения силы.



Рис. 35. Анализ графика динамических сил в гусеничном обводе с приложением крюковой нагрузки

Проанализируем графики относительного угла поворота звеньев. На рис. 34 отчетливо видно, что с приложением крюковой нагрузки графики углов закручивания мало отличаются по форме от графиков без приложения нагрузки.

Проанализируем графики нормальных сил для левого движителя попарно с графиками без приложения нагрузки. Из рис. 36 видно, что в первом опорном катке сила увеличилась. Из рис. 37 и рис. 38 следует вывод, что нагрузка на второй и третий опорный каток практически не изменилась. Для последнего четвертого катка нормальная сила немного уменьшилась (рис. 39).

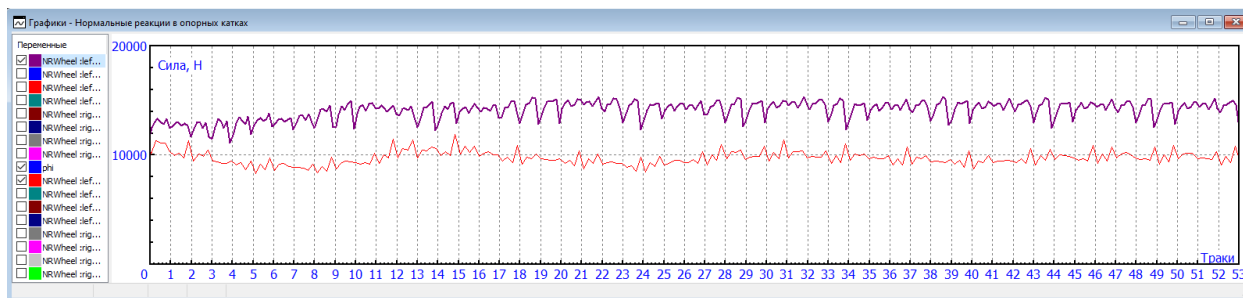


Рис. 36. Сравнение нормальной реакции в первом опорном катке: красный график – без приложения крюковой нагрузки, фиолетовый график – с приложением крюковой нагрузки

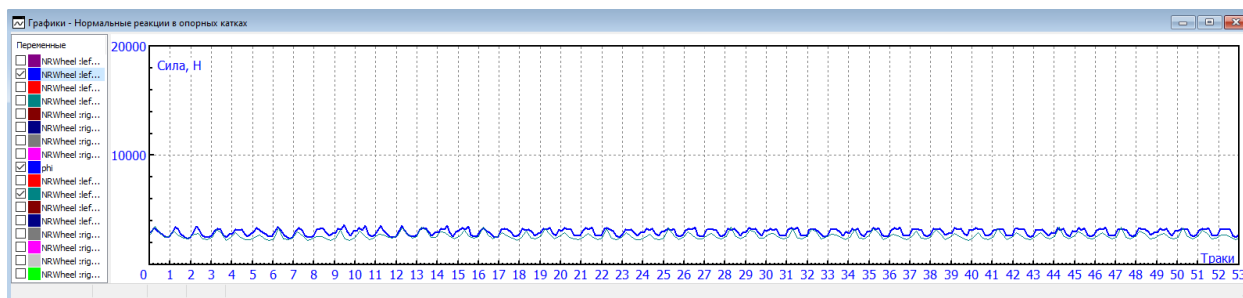


Рис. 37. Сравнение нормальной реакции во втором опорном катке: зеленый график – без приложения крюковой нагрузки, синий график – с приложением крюковой нагрузки

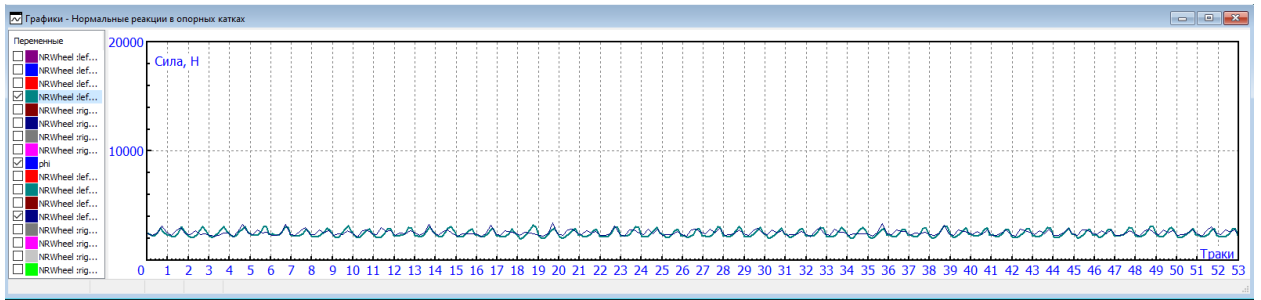


Рис. 38. Сравнение нормальной реакции в третьем опорном катке: синий график – без приложения крюковой нагрузки, зеленый график – с приложением крюковой нагрузки

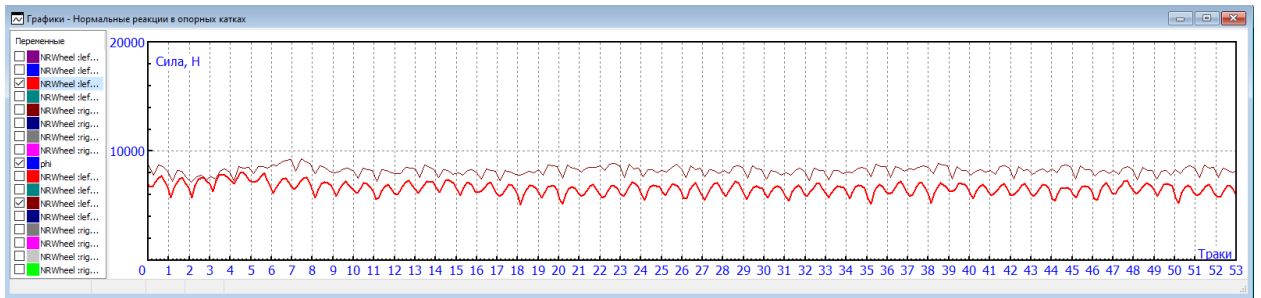


Рис. 39. Сравнение нормальной реакции в четвертом опорном катке: коричневый график – без приложения крюковой нагрузки, красный график – с приложением крюковой нагрузки