



Лабораторные работы



# Исследование усилий, возникающих в элементах гусеничного движителя при движении в транспортном режиме по дуге

Лабораторная работа №2

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.umlabor.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.

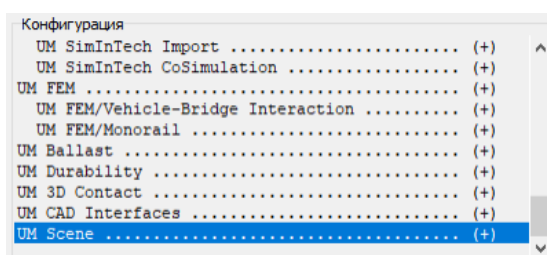


Рис. 1. Модуль UM Scene в конфигурации УМ

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.

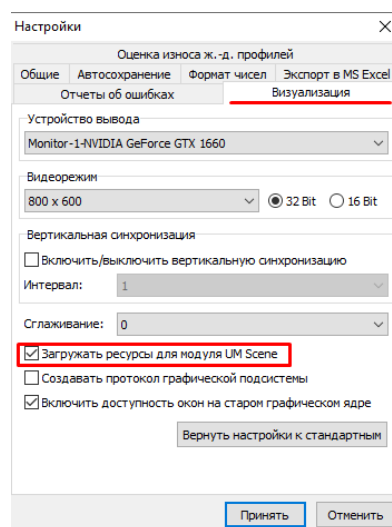


Рис. 2. Настройка визуализации

**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 ДУГЕ .....</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 движении в транспортном режиме по дуге 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" состоит из двух частей: программы описания моделей **UM Input** и программы моделирования **UM Simulation**. В программе ввода создается 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 по дуге.

В лабораторной работе будем использовать модель сельскохозяйственного трактора общего назначения ДТ-75. Каталог с моделью трактора в УМ называется *dt75\_2* (рис. 3).

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

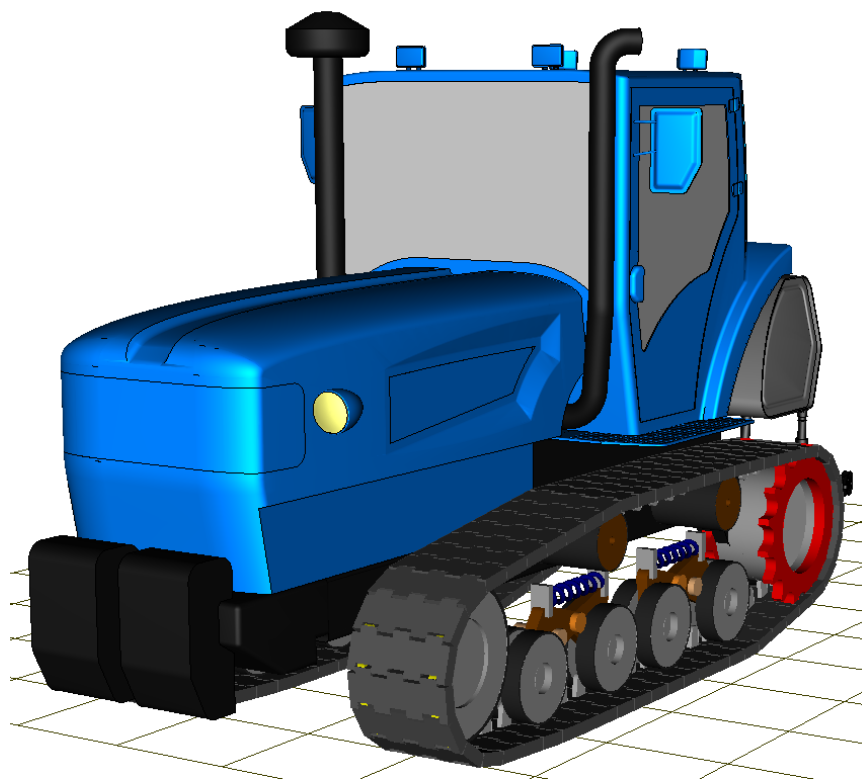


Рис. 3. Общий вид модели гусеничного трактора ДТ-75 в **UM Input**

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\\_2](#)
- ПК УМ 9, готовую модель можно скачать по адресу

[http://www.universalmechanism.com/download/models/dt75\\_2.zip](http://www.universalmechanism.com/download/models/dt75_2.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 дуге

Рассмотрим два случая, когда ГМ движется в транспортном режиме по дуге 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\_2*. 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.

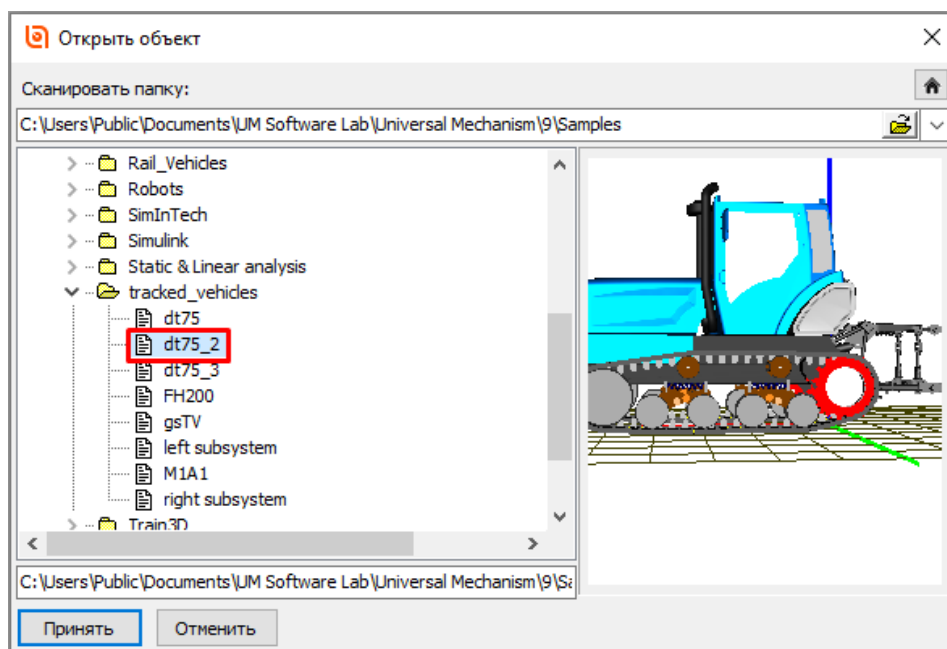


Рис. 4. Открытие модели в программе моделирования **UM Simulation**

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\_2** (рис. 5).

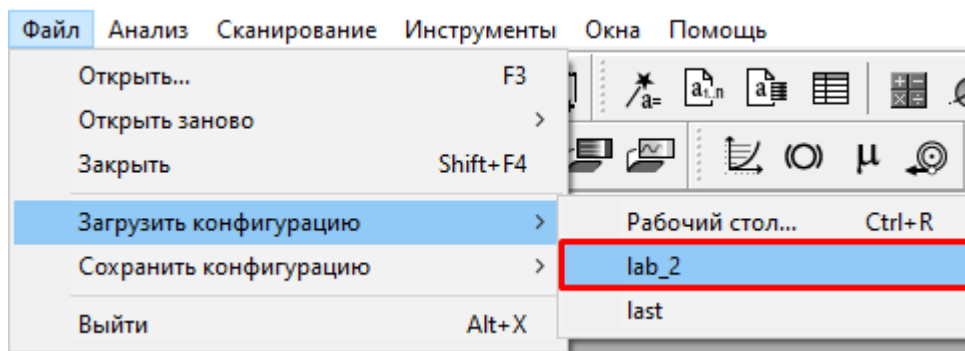


Рис. 5. Загрузка подготовленной конфигурации

На экране появятся четыре графических и два анимационных окна. В верхнем анимационном окне показаны вектора растягивающих усилий между звеньями гусеничной цепи, рис. 6.

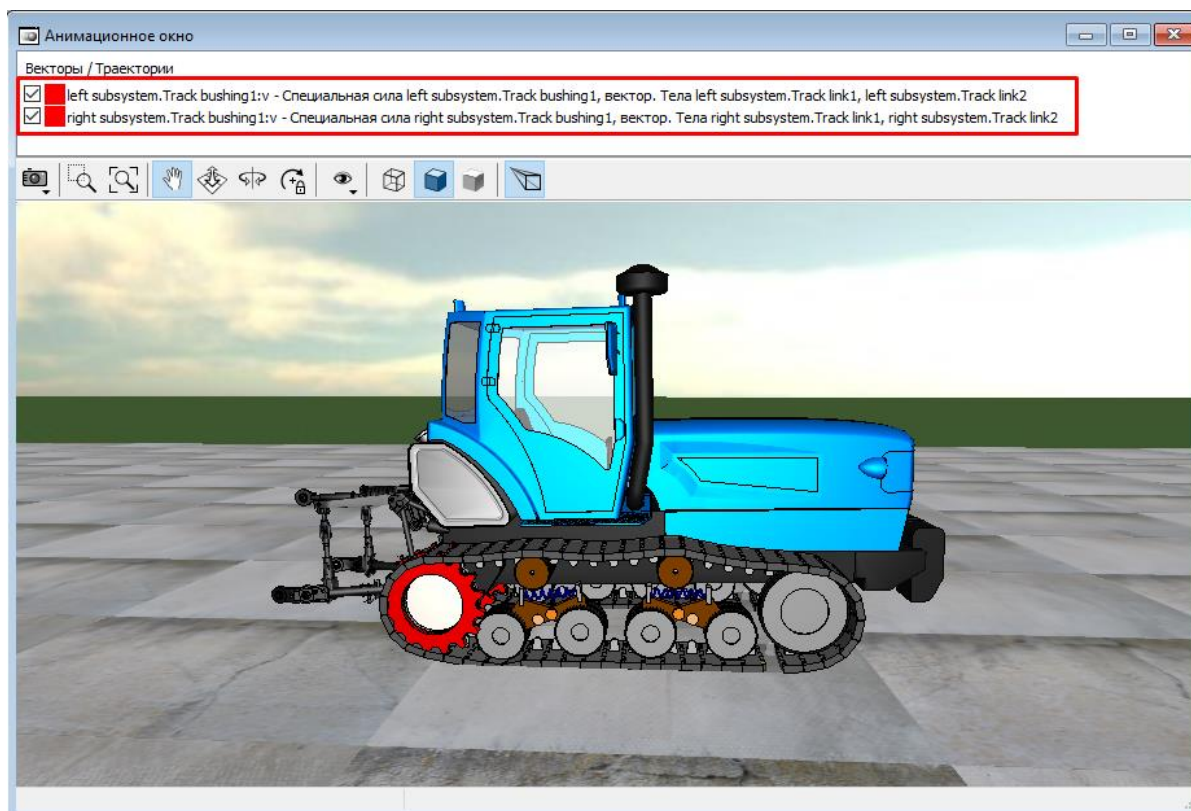


Рис. 6. Первое анимационное окно

В нижнем анимационном окне расположен список векторов нормальных сил, возникающих в опорных катках (красного цвета) и вектор траектории движения кузова трактора (желтого цвета), рис. 7.

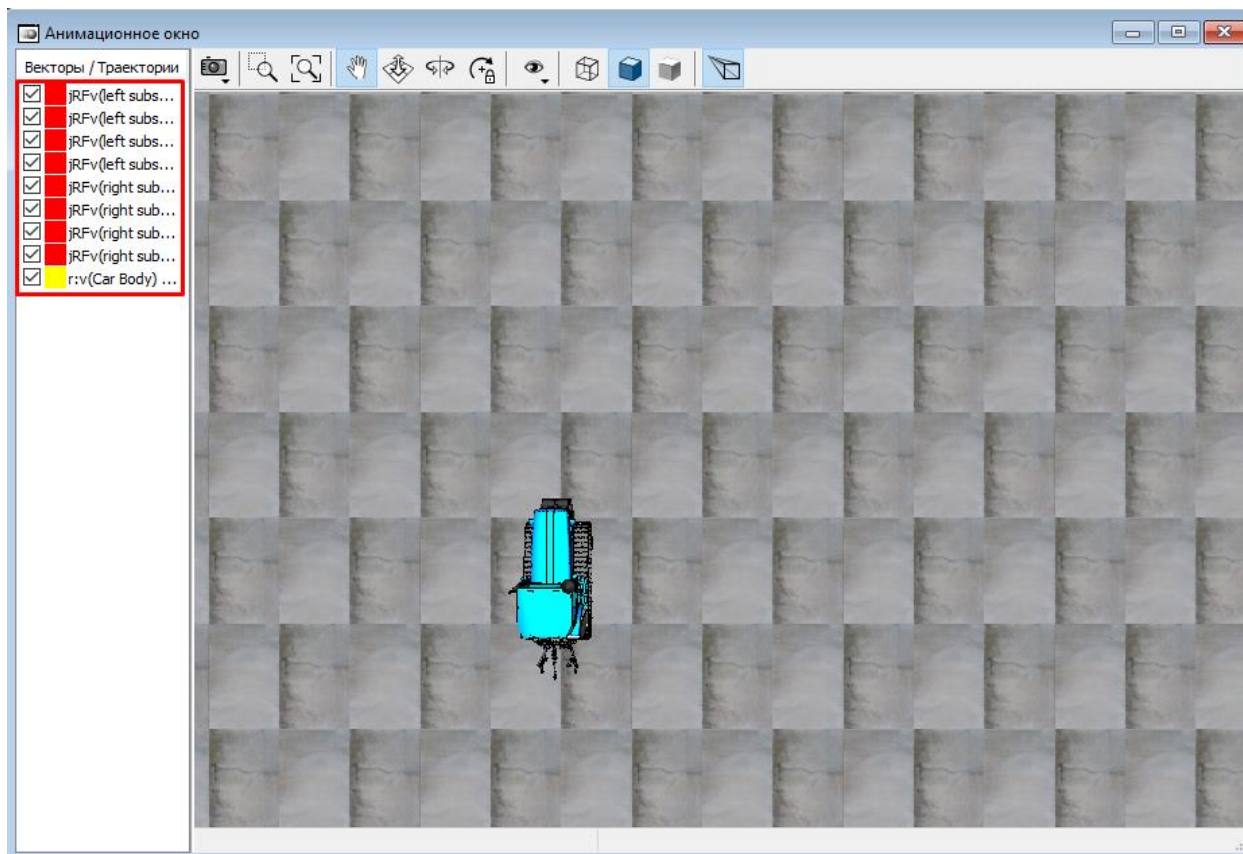


Рис. 7. Второе анимационное окно

В первом и втором окне для построения графиков выводятся силы в шарнире между некоторыми двумя смежными траками для левого и правого движителей, а в третьем и четвертом окне выводятся нормальные реакции в опорных катках для левого и правого движителей.

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.

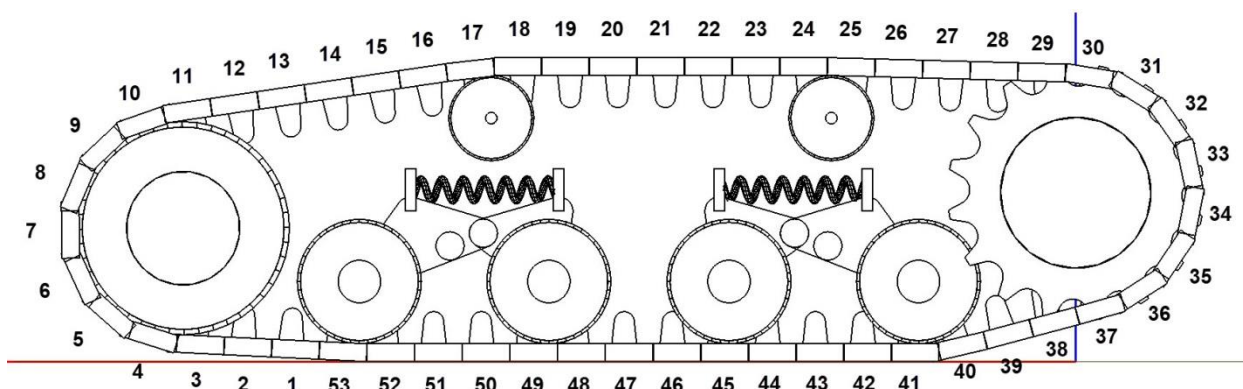



Рис. 8. Положение траков на гусеничном обводе

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

Перейдем к исследованию усилий в элементах гусеничного движителя. В модели **dt75\_2** скорость трактора задаётся через постоянную угловую скорость звёздочки. Движение по кривой реализовано разностью угловых скоростей правого и левого ведущих колес. Угловая скорость ведущего колеса левого движителя **w\_l** равняется **3,641 рад/с**, а угловая скорость ведущего колеса правого движителя **w\_r** равняется **2,349 рад/с**. Соответственно, трактор будет двигаться по дуге левым бортом вперед, а правый борт будет двигаться накатом.

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 **0,789 м/с**, см. рис. 9.

**Замечание.** Продольная скорость кузова задается только лишь для того, чтобы задать начальную скорость кузову во избежание больших переходных процессов в начале моделирования из-за того, что у ведущих колес начальная угловая скорость отлична от нуля. Движение трактора осуществляется за счет задания угловых скоростей звездочек.

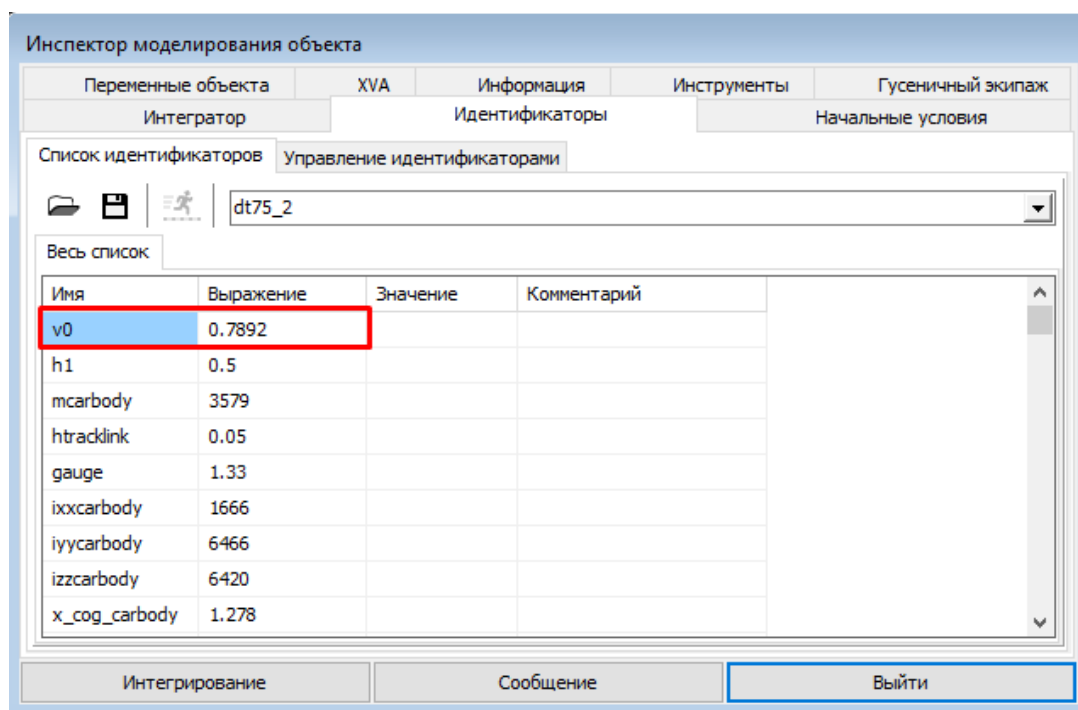


Рис. 9. Параметризация продольной скорости трактора

3. В выпадающем списке подсистем выберите **left subsystem** и найдите идентификатор **w\_l**, параметризующий угловую скорость звёздочки левого движителя, рис. 10. Убедитесь, что значение идентификатора **w\_l** равно **3,641 рад/с**.

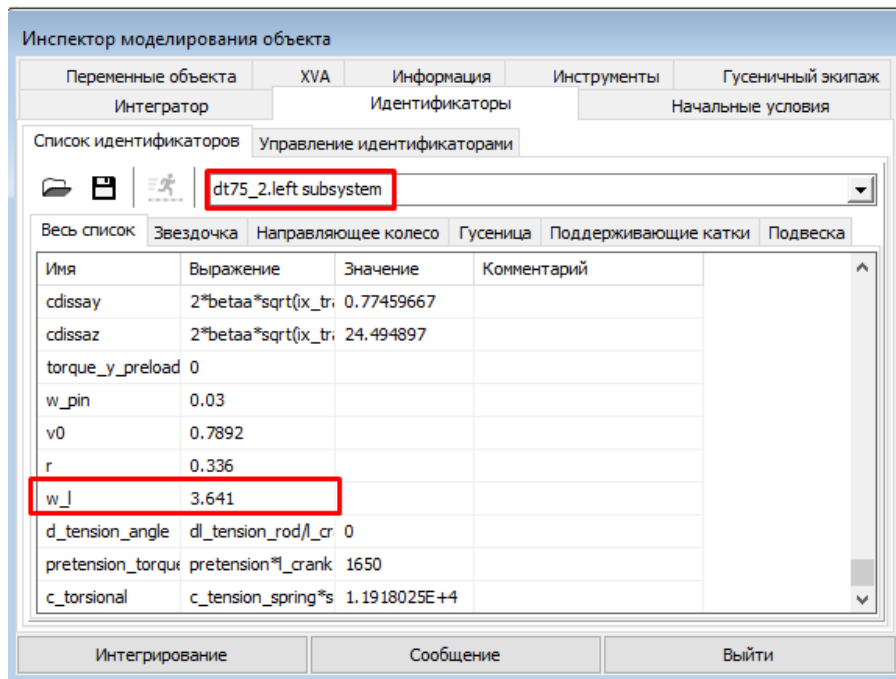


Рис. 10. Параметризация угловой скорости левого ведущего колеса трактора

4. В выпадающем списке подсистем выберите **right subsystem** и найдите идентификатор **w\_r**, параметризующий угловую скорость звёздочки правого движителя, рис. 11. Убедитесь, что значение идентификатора **w\_r** равно **2,349 рад/с**.

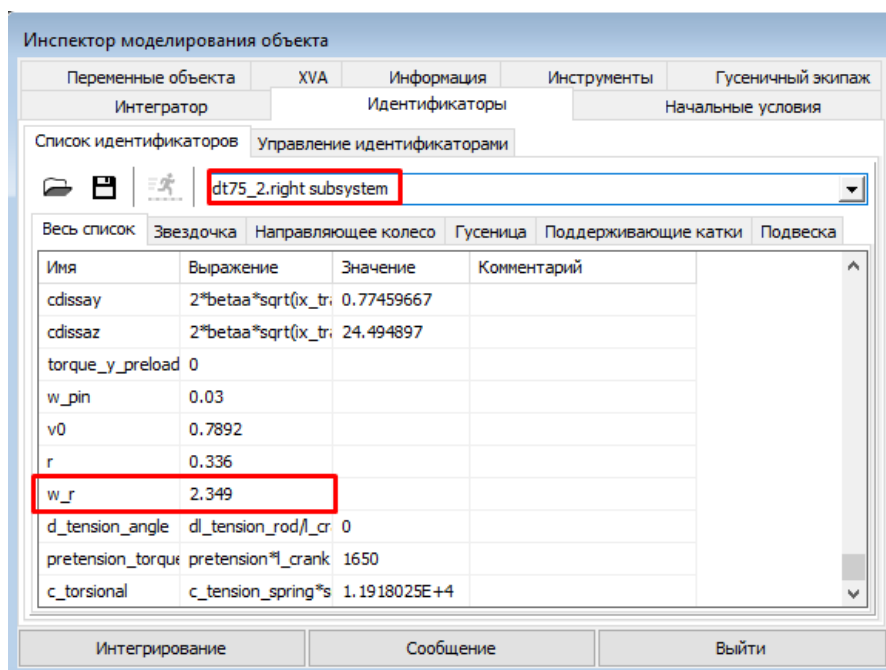


Рис. 11. Параметризация угловой скорости правого ведущего колеса трактора

В окне инспектора моделирования объекта перейдите на вкладку **Гусеничный экипаж | Тесты | Настройки**. Обратите внимание, что в поле **Режим продольного движения** задан режим **Выбег**, рис. 12. Это означает, что начальная продольная скорость кузова трактора задается через стандартный идентификатор **v0**. Со значением начальной скорости **v0** должна быть синхронизирована угловая скорость на ведущих колесах. Таким образом, вращение ведущего колеса задано кинематически и реализует бесконечную мощность.

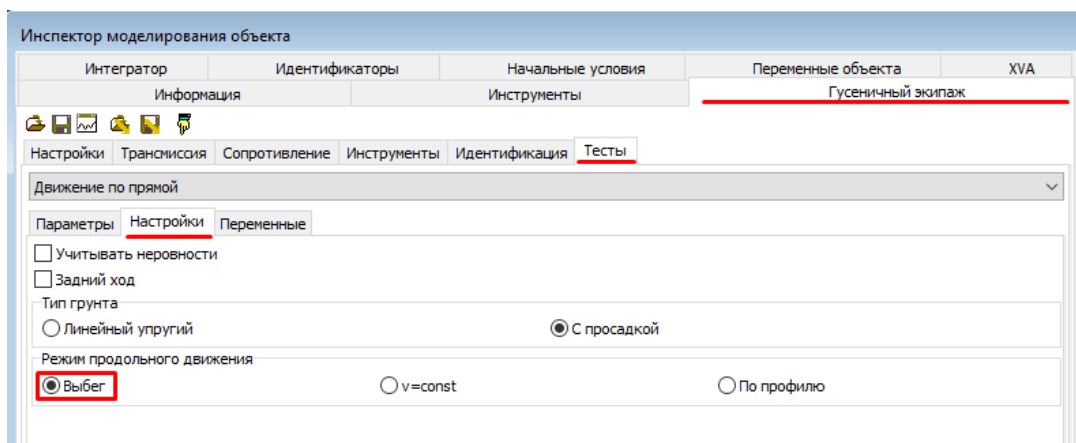


Рис. 12. Режим задания продольного движения

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. 13).

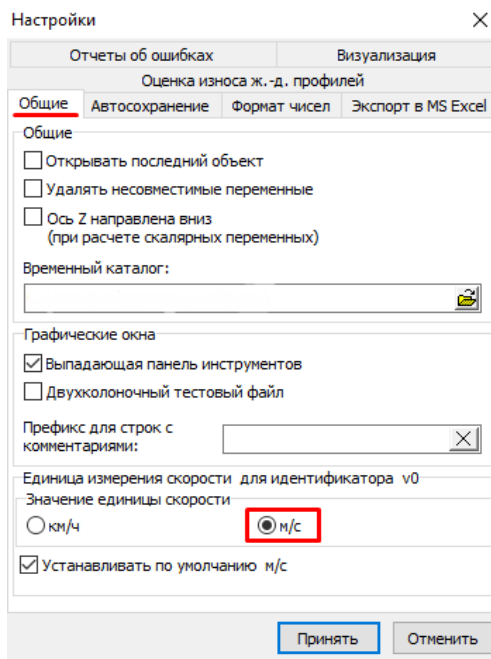


Рис. 13. Окно настроек

Теперь перейдем к процессу моделирования. В окне **Инспектора моделирования объекта** нажмите кнопку **Интегрирование**, см. рис. 11. После этого начнётся процесс моделирования. В анимационных окнах отобразятся векторы сил и траектория движения кузова, рис. 14, рис. 15. Тест настроен так, что за все время моделирования каждый гусеничный движитель сделает минимум по два полных оборота. При первом обороте гусеничных движителей в начале моделирования будут присутствовать переходные процессы, которые искажают картину динамических характеристик. Это будет ярко выражено в анимационных окнах при начале моделирования – будут наблюдаться колебания гусениц. Это связано с асинхронностью скоростей ведущих колес и продольной скоростью кузова. В связи с этим графики в графических окна будут отображаться на втором обороте для каждого гусеничного движителя.

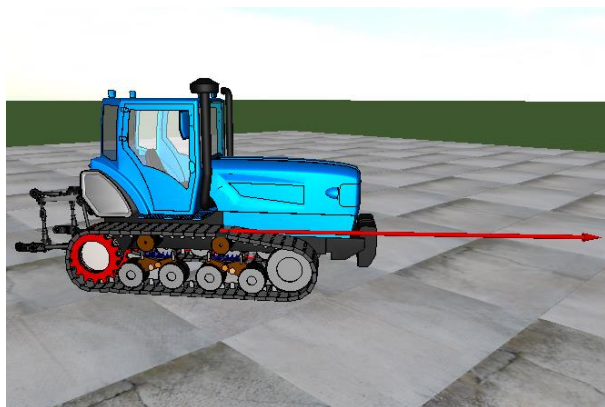


Рис. 14. Динамические нагрузки в шарнире между смежными звеньями при  $t=6,11$  с

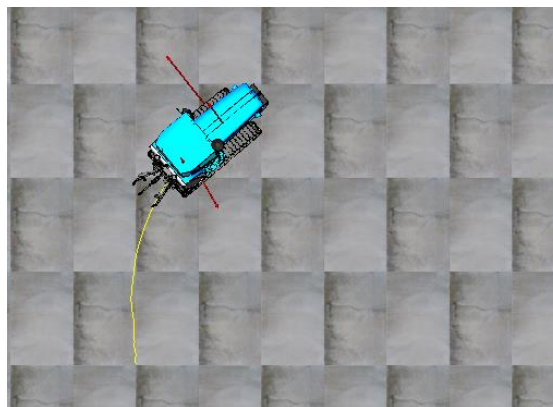


Рис. 15. Нормальные силы в опорных катках траектория движения кузова при  $t=6,11$  с

- После окончания процесса моделирования в появившемся окне **Информация** нажмите **ОК**, рис. 16. Программа перейдет в режим паузы процесса моделирования.

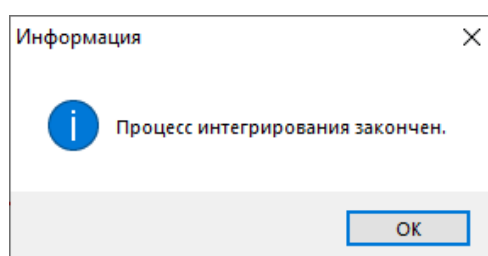


Рис. 16. Окно информации о завершении процесса интегрирования

Результаты моделирования представлены на рис. 17-.

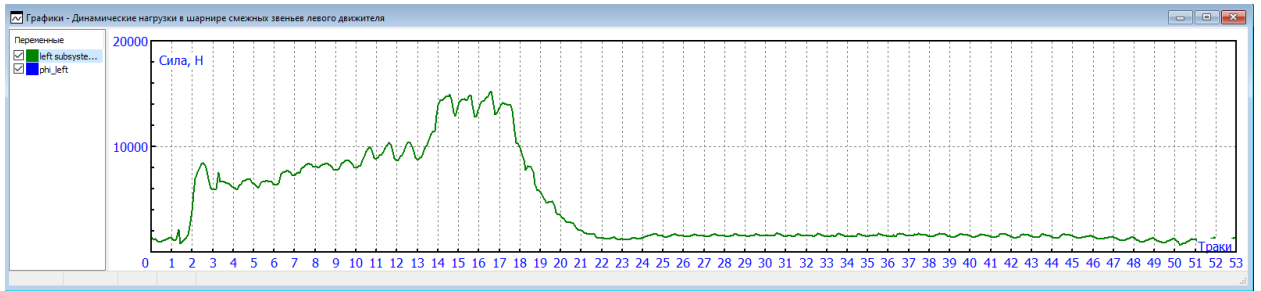


Рис. 17. Графики динамических нагрузок в шарнире между смежными звеньями гусеничной цепи левого движителя

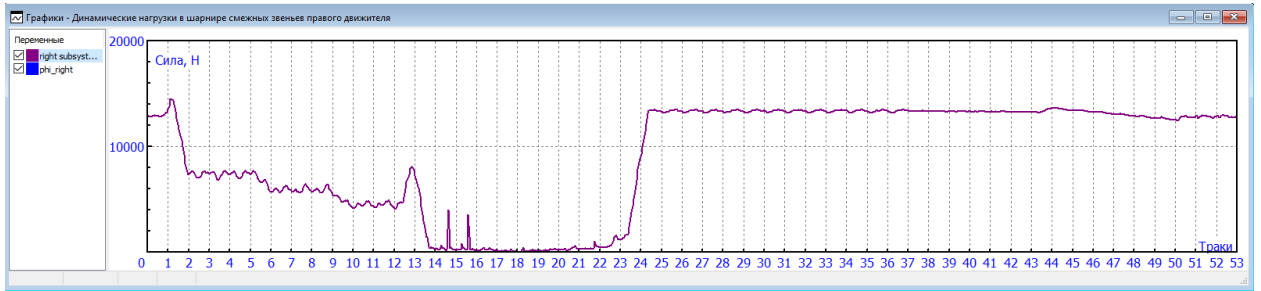


Рис. 18. Графики динамических нагрузок в шарнире между смежными звеньями гусеничной цепи правого движителя

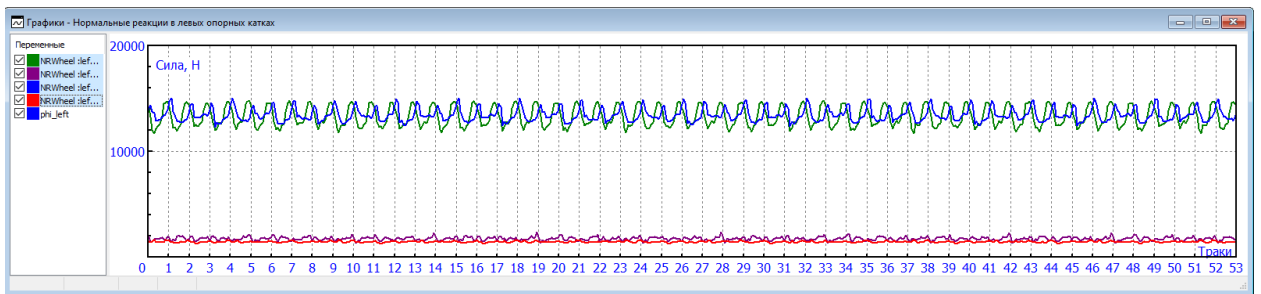


Рис. 19. Графики нормальных сил в левых опорных катках

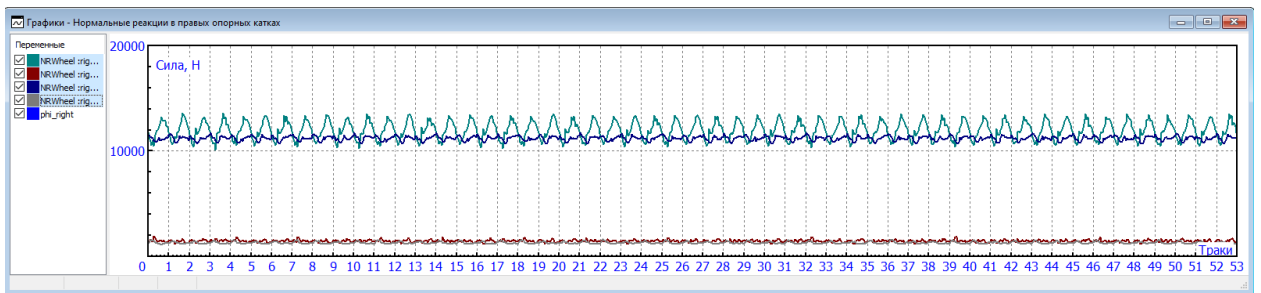


Рис. 20. Графики нормальных сил в правых опорных катках

Проанализируем графики сил, действующих в гусеничном обводе левого движителя. Графики представлены зависимостью параметров от положения трака на гусеничном обводе (рис. 21). Позиция 0 на оси абсцисс соответствует положению трака на гусеничном обводе в начальный момент времени. На участке между позициями 1,5 и 14 трак находится на опорной ветви и проходит под опорными катками. На этом участке растягивающая

сила непрерывно возрастает. С 14-ой по 17,6 позицию трак находится на ведущем участке цепи (между опорным катком и ведущим колесом). В зоне контакта с ведущим колесом (позиции 17,6-24,5) сила в шарнире падает и выходит на участок верхней ветви цепи без заметного изменения ее величины.



Рис. 21. Анализ графика динамических сил в левом гусеничном обводе

Проанализируем графики сил, действующие в гусеничном обводе правого движителя (рис. 22). С 1 по 13,8 позицию трак проходит по ветви опорной цепи. При проходе под первым и последним опорными колесами в шарнире наблюдаются небольшие скачки сил (позиции 1,3 и 12,8), причем на протяжении всей ветви сила в шарнире медленно падает от катка к катку. При выходе из-под первого и четвертого катков наблюдается резкое падение растягивающей силы (положения 1,3-2 и 12,8-13,8). При прохождении трака в зоне контакта с ведущим колесом динамическая сила близка к нулю. С 23 по 24,2 позицию в зоне выхода из зацепления с ведущим колесом наблюдается резкое возрастание силы шарнире и при выходе на верхнюю ветвь цепи сила выходит на постоянное значение с небольшими колебаниями. На участке 37-43,2 между последним опорным катком и направляющим колесом цепь натягивается сильнее и значение силы выходит на постоянное значение. С 43,2 по 51 позиции в зоне контакта с направляющим колесом наблюдается незначительное падение силы и появление небольших колебаний цепи.



Рис. 22. Анализ графика динамических сил в правом гусеничном обводе

Проанализируем графики нормальных сил, возникающих в опорных катках (рис. 19). Самые большие нагрузки возникают в 1-ых и 4-ых катках левого и правого движителей, считая от носа кузова к звездочке, а самые маленькие – во 2-ых и 3-их. Причем в левом движителе нагрузки на опорные катки больше, чем в правом. В процессе движения кузов трактора совершает небольшие колебательные движения, что приводит к незначительному перераспределению нагрузки на опорные катки.

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

Добавим нагрузку на крюке и рассмотрим случай, когда трактор ДТ-75 едет по дуге с крюковой нагрузкой **13,8 кН**. 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 трех секунд до своего максимального значения после двух секунд от начала моделирования.

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.

В графическом окне *"Динамические нагрузки в шарнире смежных звеньев левого движителя"* нажатием на первой переменной правой кнопкой мыши вызовите контекстное меню и выберите **Скопировать как статические** (рис. 23). После этого появится копия рассчитанной переменной. Выполните данную процедуру для всех переменных в оставшихся графических окнах, **не включая** переменные **phi\_left** и **phi\_right**.

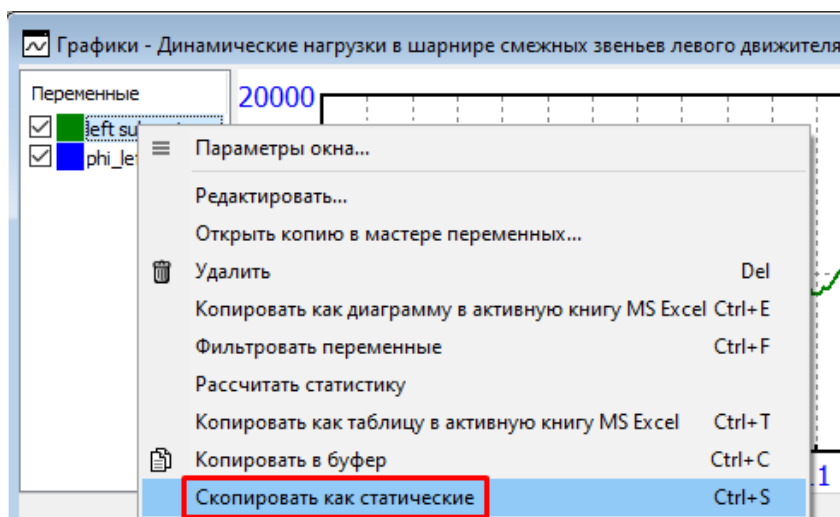


Рис. 23. Вызов контекстного меню и копирование результатов

1. Перейдем к настройкам теста. В окне **режима паузы процесса моделирования** нажмите кнопку **Прервать**, рис. 24.

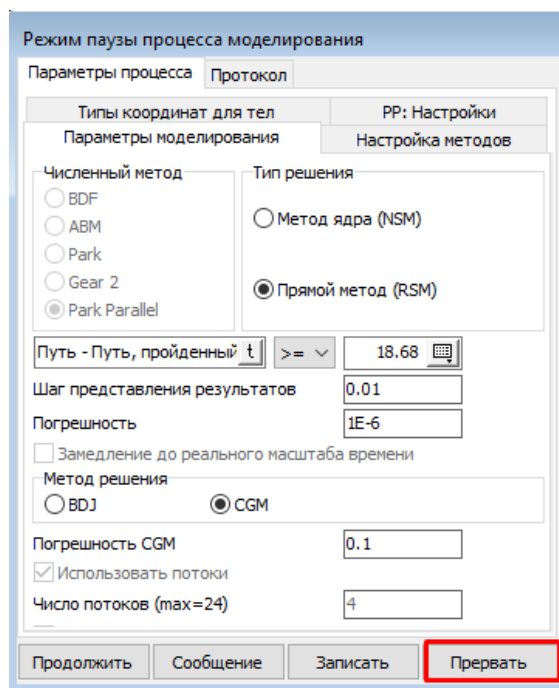


Рис. 24. Окно режима паузы процесса моделирования

- Теперь необходимо приложить крюковую нагрузку. В окне **инспектора моделирования объекта** перейдите на вкладку **Идентификаторы** в подсистему **dt75\_2**. В описании силы крюковой нагрузки введен флажок **factor**. При значении флажка **factor=0** сила равна нулю, при значении флажка **factor=1** сила становится активной. Установите параметру **factor** значение **1** (рис. 25). С помощью идентификаторов **t1** и **t2** задается начальное и конечное значение времени, в течение которого крюковая нагрузка, параметризованная как **force**, будет нарастать от нуля до своего максимального значения. То есть, после **2** секунд модельного времени крюковая нагрузка начнет нарастать и за **3** секунды примет постоянное значение **13800 Н**.

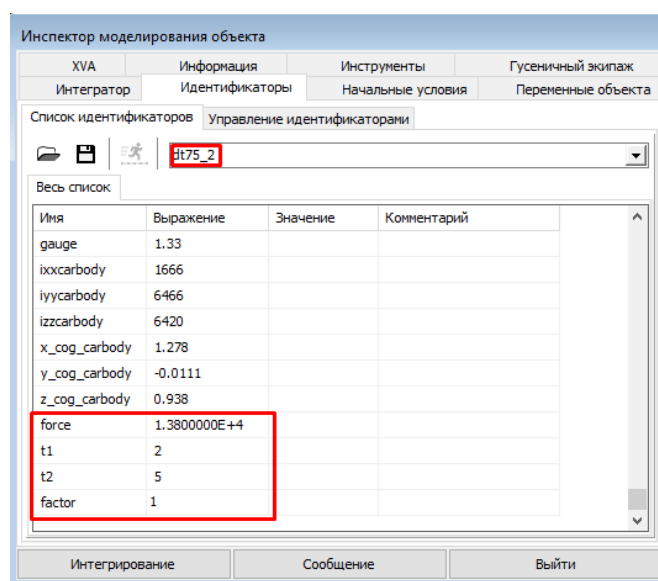



Рис. 25. Список идентификаторов

3. 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**. В поле **Исследуемая величина** выберите **Сила**. В поле **Компонента** выберите модуль силы (**|V|**). В поле **Действует на...** выберите **тело2:Car Body** (рис. 26).
4. При помощи кнопки **Отобразить переменную в новом окне**  (рис. 26) поместите переменную **Fm(Force)** в новое графическое окно. Разместите графическое окно так, как вам удобно.

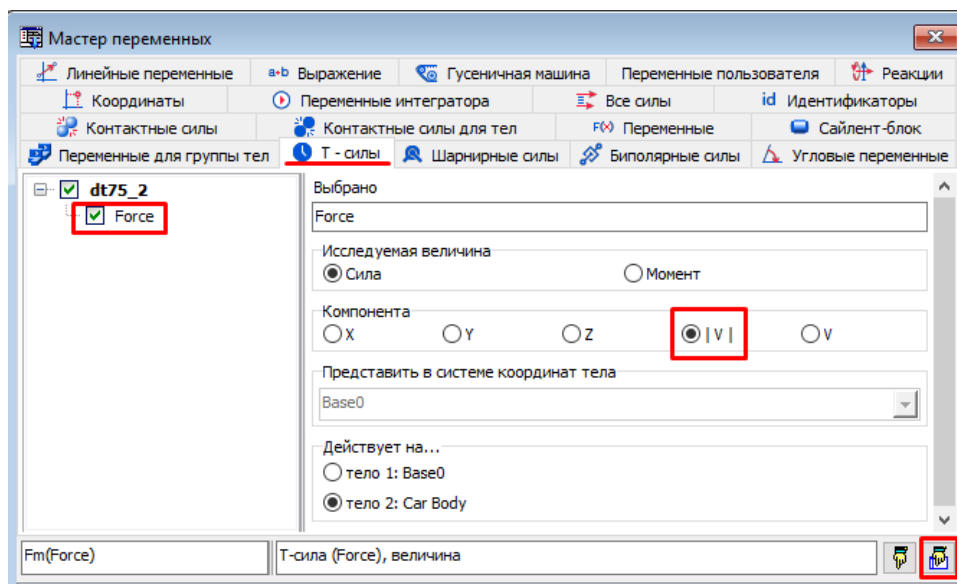



Рис. 26. Окно мастера переменных: добавление силы

5. 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)** (рис. 27).

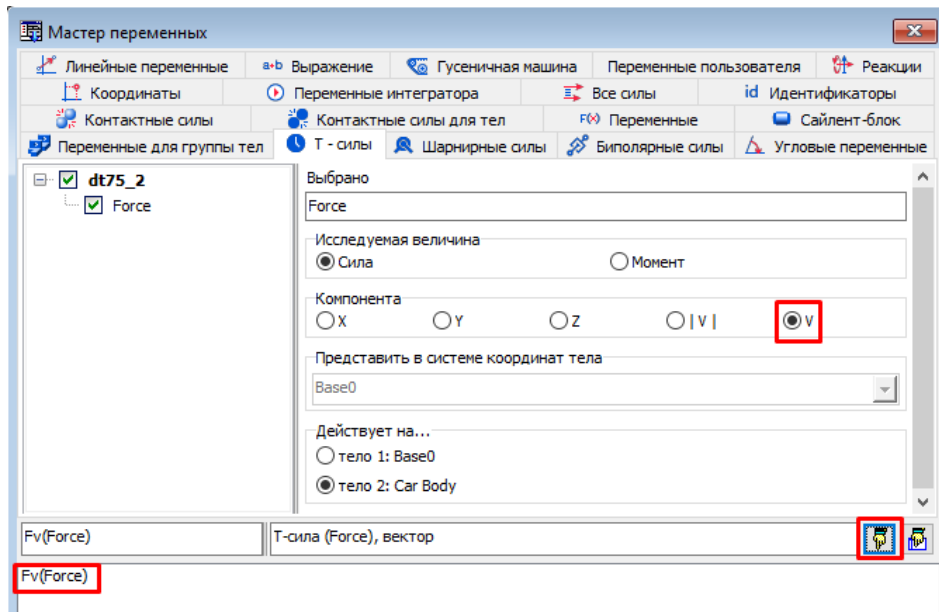


Рис. 27. Окно мастера переменных: добавление вектора силы

6. 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)**, см. рис. 28. При желании можно поменять цвет вектора. Для этого вызовите **окно настроек вектора** двойным щелчком по самому вектору, см. рис. 29.

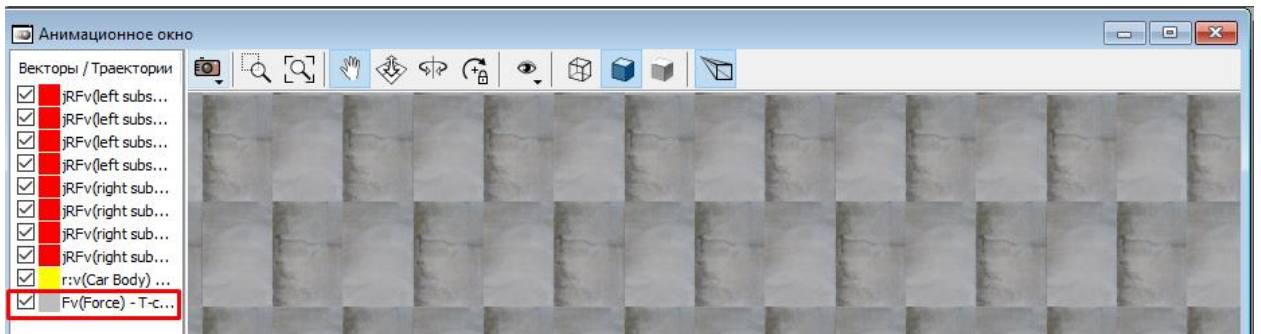


Рис. 28. Список векторов в анимационном окне

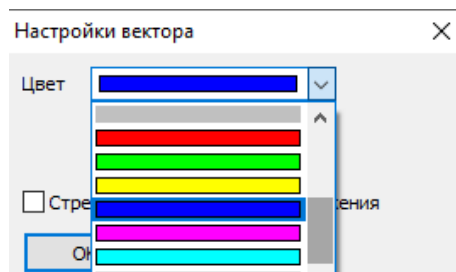


Рис. 29. Окно настроек вектора

7. Перейдите на вкладку **Интегратор | Параметры моделирования**. Измените условие окончания расчёта, установив значение пути равное **16,15 м** (рис. 30). Это означает,

что после прохождения трактором с момента начала моделирования расстояния в 16,15 м процесс интегрирования закончится.

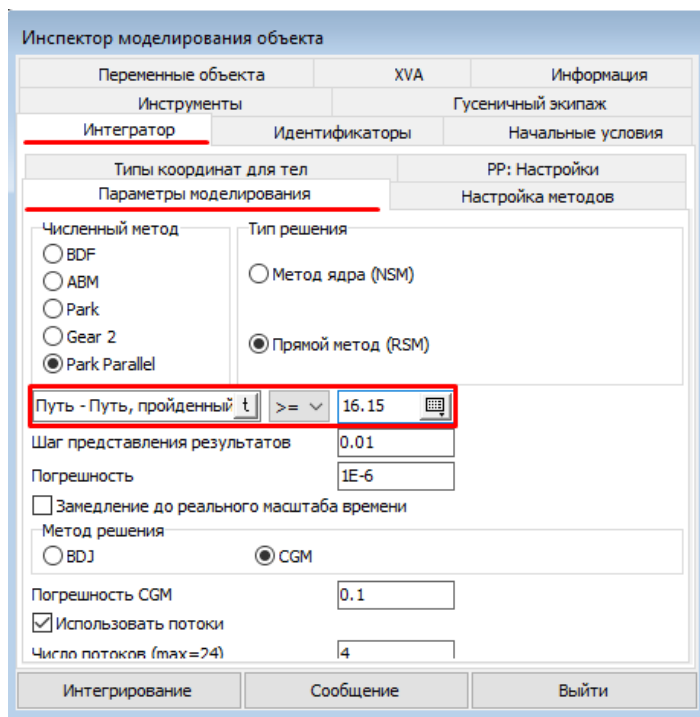


Рис. 30. Настройка параметров моделирования

- 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.

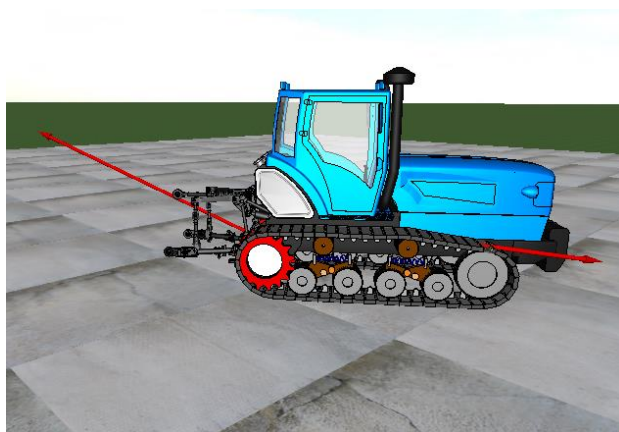


Рис. 31. Динамические нагрузки в шарнире между смежными звеньями при  $t=7,2$  с

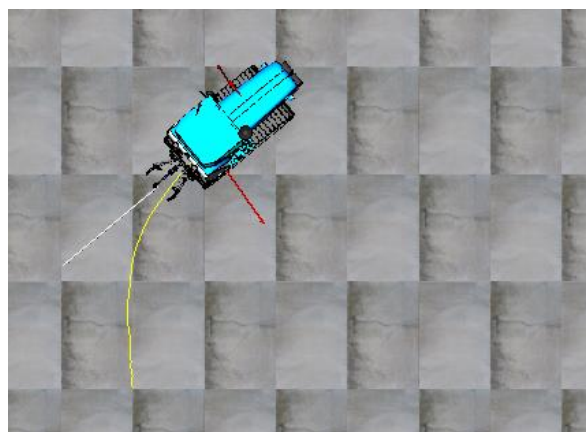


Рис. 32. Вектор силы и траектория движения кузова при  $t=7,2$  с

Результаты моделирования представлены на рис. 33-.

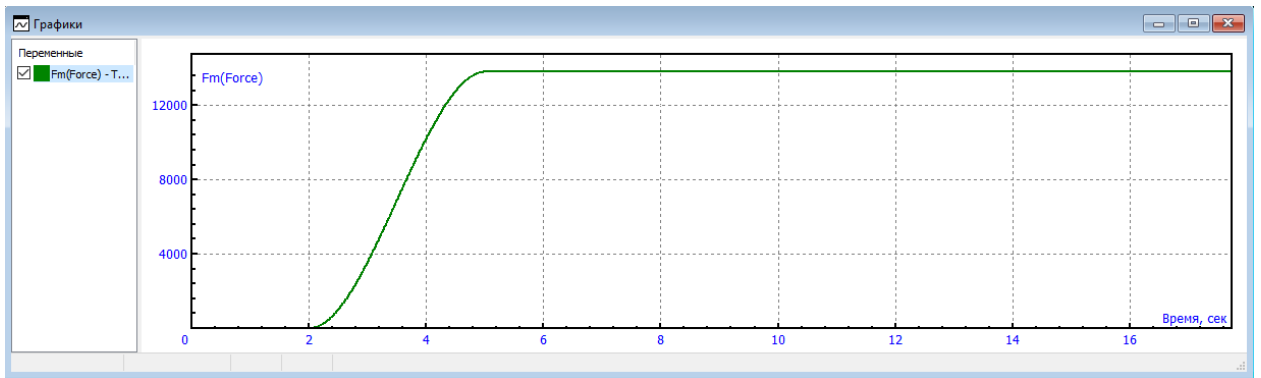


Рис. 33. Изменение крюковой силы в процессе моделирования объекта

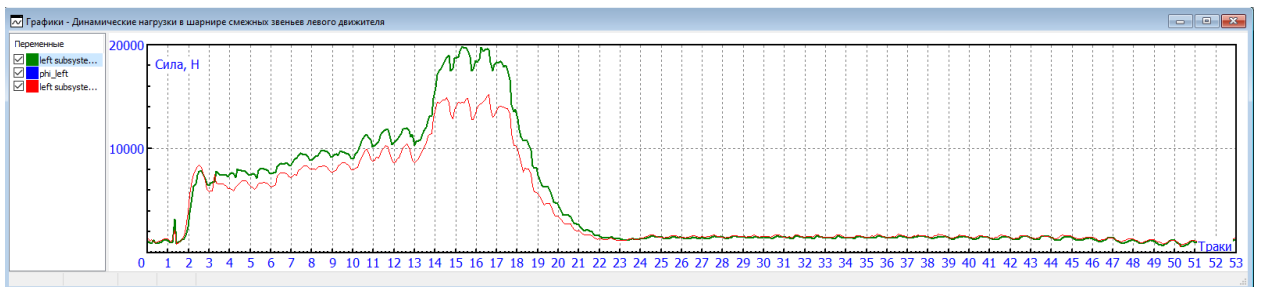


Рис. 34. Графики растягивающих усилий между звеньями гусеничной цепи в левом движителе с приложением крюковой нагрузки

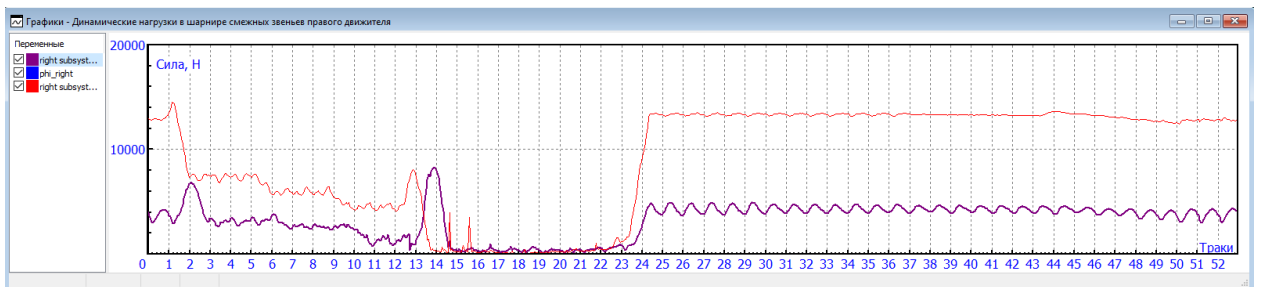


Рис. 35. Графики растягивающих усилий между звеньями гусеничной цепи в правом движителе с приложением крюковой нагрузки

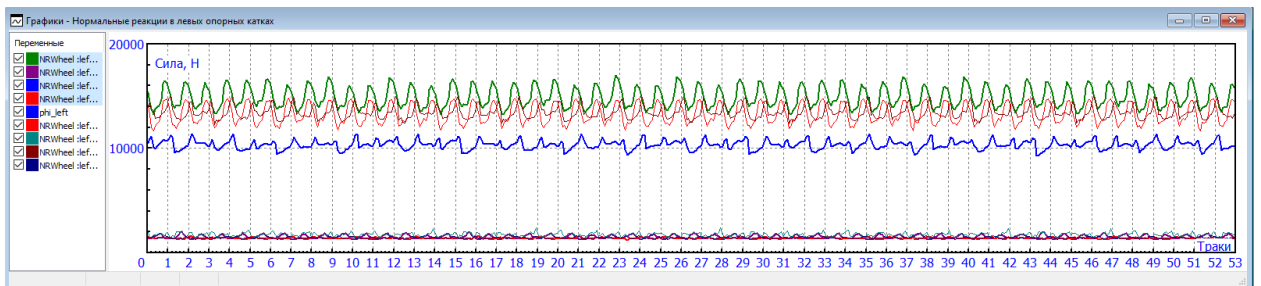


Рис. 36. Графики нормальных реакций в левых опорных катках с приложением крюковой нагрузки

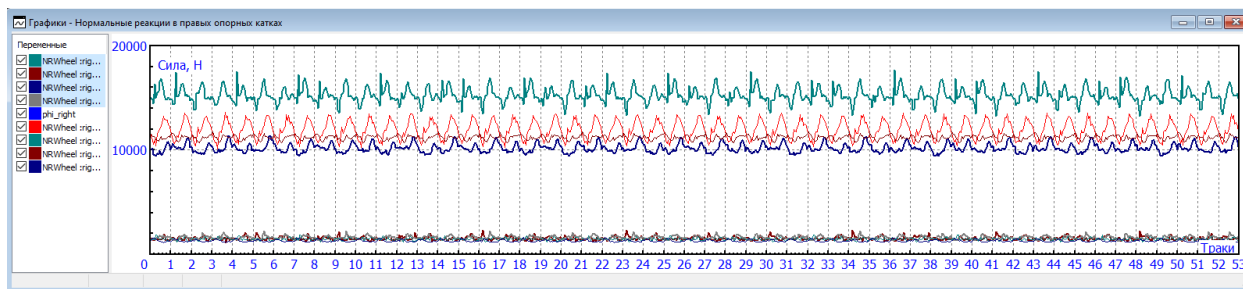


Рис. 37. Графики нормальных реакций в правых опорных катках с приложением крюковой нагрузки

Проанализируем графики сил, действующие в гусеничном обводе левого движителя с приложенной крюковой нагрузкой (рис. 38). Как видно из графика, растягивающая сила немного увеличилась на участке опорной цепи (позиции 1,5-14) и на ведущем участке (14-17,6 позиции) резко возросла. После прохождения ведущего участка сила падает более плавно, выходит на участок верхней ветви цепи и мало отличается от графика нагрузки без приложения силы.



Рис. 38. Анализ графика динамических сил в левом гусеничном обводе с приложением крюковой нагрузки

Проанализируем графики сил, действующие в гусеничном обводе правого движителя с приложенной крюковой нагрузкой (рис. 39). На позициях 2 и 13,8 шарнир между первым и вторым трактом проходит под первым и последним опорным катком, считая от носа кузова, что выражено на графике пиками нагрузки. Растягивающая сила на опорной ветви цепи постепенно падает, причем с приложением нагрузки сила в шарнире меньше, чем сила в шарнире без приложения крюковой нагрузки. В зоне контакта с ведущим колесом сила незначительна по величине. На позициях 23,5-24,2 трак выходит с зацепления с ведущим колесом и выходит на верхнюю ветвь цепи. Сила относительно постоянна до приближения к опорной ветви цепи, причем значение нагрузки в шарнире меньше, чем в шарнире без приложения крюковой силы.



Рис. 39. Анализ графика динамических сил в правом гусеничном обводе в приложении крюковой нагрузки

Самостоятельно проанализируйте графики сил нормальных реакций в опорных катках левого и правого движителя, попарно сравнивая графики для каждого колеса с приложением крюковой нагрузки и без нее. Для удобства при помощи галочек в списке переменных графических окон оставляйте видимыми только те графики, которые требуется сравнить (рис. 40).

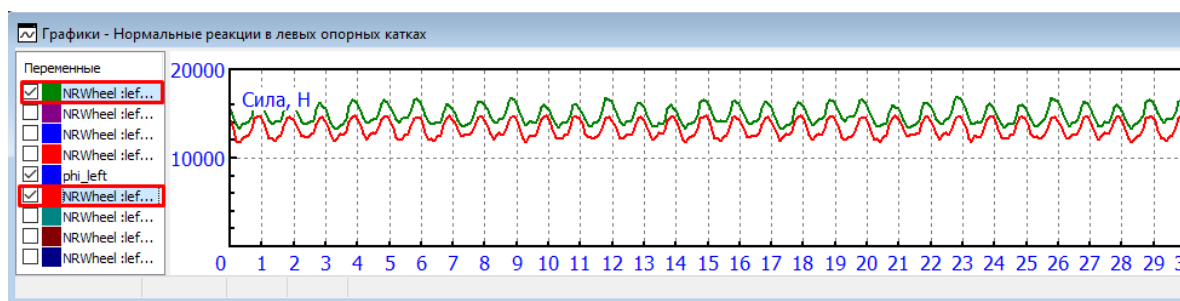


Рис. 40. Пример сравнения двух графиков