

**Направление подготовки: 140400 Электроэнергетика и электротехника**

**Профиль подготовки: Электрический транспорт**

**Квалификация (степень) выпускника: магистр**

**Форма обучения: очная**

**Дисциплина:**

**"Электрооборудование и системы управления  
электроподвижным составом"**

**Комаров В.Г.      Лабораторная работа 1      2026 г.**

## **Тема: Имитационное моделирование статических и динамических тягово-тормозных и энергетических параметров электроподвижного состава**

### **1. Концепция имитационного моделирования**

Основная задача моделирования состоит в том, чтобы дать разработчику технологию создания таких моделей которые достаточно полно и точно фиксируют свойства объектов оригиналов, поддаются исследованию и допускают возможность переноса результатов исследований на оригиналы. Моделирование представляет собой метод исследования, который является формой отображения действительности и заключается в воспроизведении свойств реальных объектов при помощи виртуальных объектов.

Все расчеты в компьютерной модели выполняются в так называемом системном времени, которое соответствует реальному времени функционирования объекта исследования или системы. Воспроизведение на компьютере развернутого во времени процесса функционирования системы с учетом ее взаимодействия с внешней средой называется **имитационным моделированием**. Имитационное моделирование наиболее мощный и универсальный метод исследования и оценки эффективности систем, поведение которых зависит, как от детерминированных, так и случайных факторов. Модели являются хорошим средством для обучения и подготовки специалистов, а также средством прогнозирования поведения объектов и систем. Моделирование позволяет проводить контролируемые эксперименты в ситуациях, когда проведение экспериментов на реальных объектах является нецелесообразным, опасным, невозможным или достаточно дорогостоящим.

Физическое моделирование связано с большими материальными затратами, поскольку требуется изготовление макетов и их трудоемкое исследование. Поэтому на начальных этапах разработки и проектирования подвижного состава и транспортных систем, а также их устройств и агрегатов используется компьютерное имитационное моделирование. Кроме того, часто физическое моделирование просто невозможно из-за чрезвычайной сложности

устройства. В этом случае прибегают к математическому моделированию с использованием компьютерных программ.

Современная разработка электроподвижного состава проводится на основе компьютерных моделей движения транспортных средств. В курсе моделирования систем электрической тяги мы уже с вами рассматривали основные физические процессы, происходящие при движении транспортного средства, в виде блок-схемы модели, приведённой на рис 1.

Вербально (на основе естественного языка) обобщённая модель транспортного средства может быть описана следующим образом.

Движение транспортного средства (MD — Moving Device) осуществляется под воздействием силы  $F$ , создаваемой энергосиловым модулем (EFU — Energy Force Unit) за счёт энергии  $E_s$ , получаемой от энергоисточника (ES — Energy Source) и  $E_a$  от буферного накопителя энергии (EA — Energy Accumulator), сопротивления движению (Moving Resistance)  $W$  и гравитационного притяжения (Gravity Pull)  $G$ . При этом ТС характеризуется массой  $m$ , определяющей инерционные и гравитационные свойства ТС и действием, характеризующимся силой  $F$  по выполнению заданной транспортной работы или достижения поставленной цели.

Исходя из этого описания можно составить следующую блок-схему, отражающую структуру описанных физических процессов.

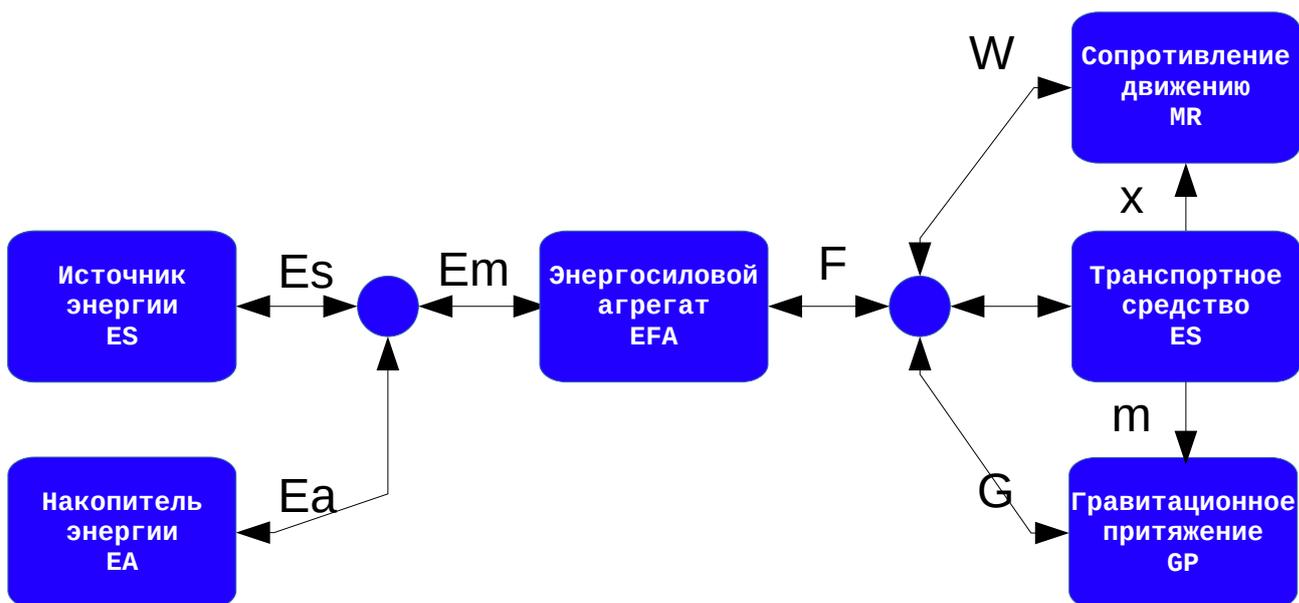


Рис. 1. Блок-схема обобщённой системной модели физических процессов при движении транспортного средства

### ***Гипотезы, принятые для модели***

- Транспортное средство (ТС) будем считать материальной точкой массой  $m$ , положение которой совпадает с его центром масс .

- Движение происходит в поле силы тяжести с постоянным ускорением свободного падения  $g$  и описывается уравнениями классической механики Ньютона.
- Движение транспортного средства происходит вдоль оси пути  $x$ .
- В качестве параметров движения будем использовать координату ( $x$ ), направленную вдоль пути и скорость  $v(x)$  центра масс ТС.
- Подъёмы и спуски дороги вместо координаты ( $y$ ) выражаем в относительных единицах превышения  $H(x)$  к залеганию  $B(x)$  дороги в виде уклонов

$$i(x) = \frac{H(x)}{B(x)},$$

т. е. текущего тангенса угла наклона дороги к горизонтали

$$i(x) = \tan(\alpha),$$

соответственно угол наклона дороги к горизонту

$$\alpha = \arctan(i(x)) = \arctan\left(\frac{H(x)}{B(x)}\right).$$

- Кривизну дороги определяем радиусом  $R(x)$  в плоскости дороги.

### **Математическая постановка задачи «Движение транспортного средства»**

По оси  $x$  на транспортное средство действуют сила  $F$  тяги или торможения, развиваемые энергосиловым модулем транспортного средства, сила основного сопротивления движению  $W_0$  и проекция силы тяжести  $G$  на ось  $x$ , называемая скатывающей силой  $W_i$ . Выражение для скатывающей силы

$$W_i = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$$

Согласно законам Ньютона имеем уравнения движения по оси  $x$ :

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F - m \cdot g \cdot \sin(\alpha) - W, \quad V(x) = \frac{dx}{dt}$$

при следующих начальных условиях  $x(\theta) = x_0$ ,  $\alpha(\theta) = \alpha_0$ ,  $v(\theta) = v_0$ .

Разделим обе части первого уравнения на массу  $m$ , получим обобщённое уравнение движения, независимое от массы транспортного средства:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = f - g \cdot \sin(\alpha) - w, \quad V(x) = \frac{dx}{dt}$$

Необходимо найти зависимости  $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $v(x)$  при воздействии управляемой силы  $F$ , создаваемой энергосиловым агрегатом ЕФА.

Как видим задача расчётов и моделирования сводится к интегрированию обыкновенного дифференциального уравнений (ОДУ) второго порядка при воздействии управляемой силы  $F$ . Таким образом для решения обобщённого уравнения движения транспортного средства необходимо знать силу  $F$ , которая определяется способами

управления транспортным средством исходя из поставленных целей движения, т. е. системы управления. Поэтому для имитационного моделирования в исходную блок-схему движения транспортного средства необходимо добавить блок системы управления CS (Control System), воздействующий сигналами управления на электросиловой агрегат в соответствии с заданными параметрами управления (рис. 2).

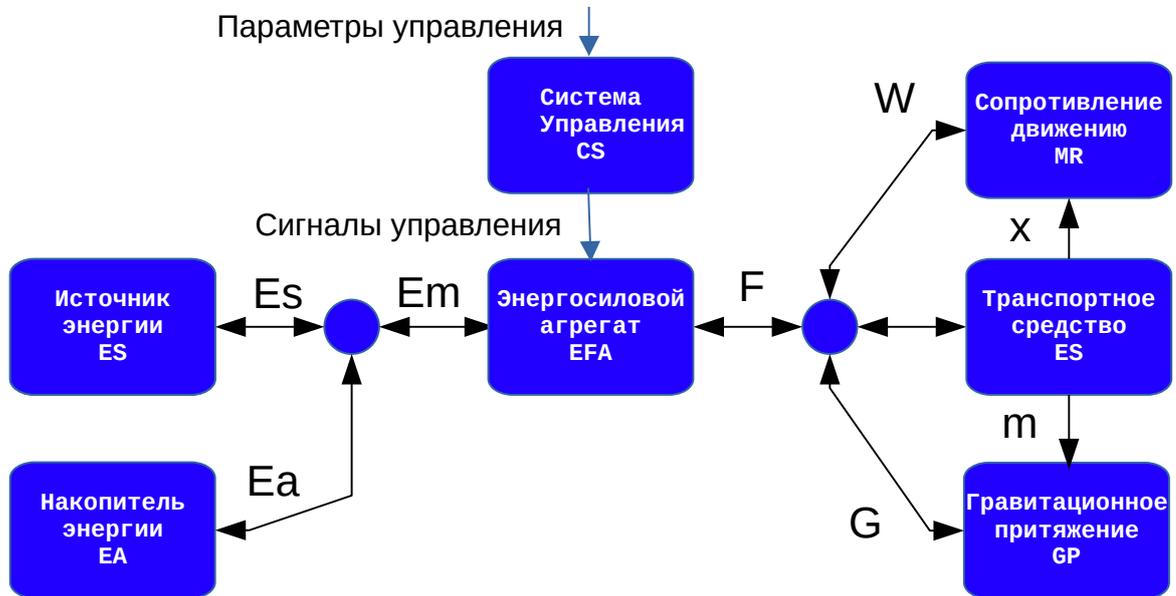


Рис. 2.

Параметры управления состоят из заданных параметров режимов движения и реальных значений параметров движения или физических процессов окружающей среды и транспортного средства, полученные с помощью датчиков. Заданные параметры определяет водитель, машинист, оператор транспортного средства или автоматическая система управления движением на основе реальных значений параметров движения, полученных от соответствующих датчиков.

## 2. Имитационное моделирование движения электроподвижного состава в программной среде Xcos

### Создание модели в программной среде Xcos

Для создания модели откроем рабочее окно визуальной среды Xcos и сохраним его под именем */MOVE1.xcos* с помощью команды меню рабочего окна *Файл>Сохранить как* (Рис. 3).

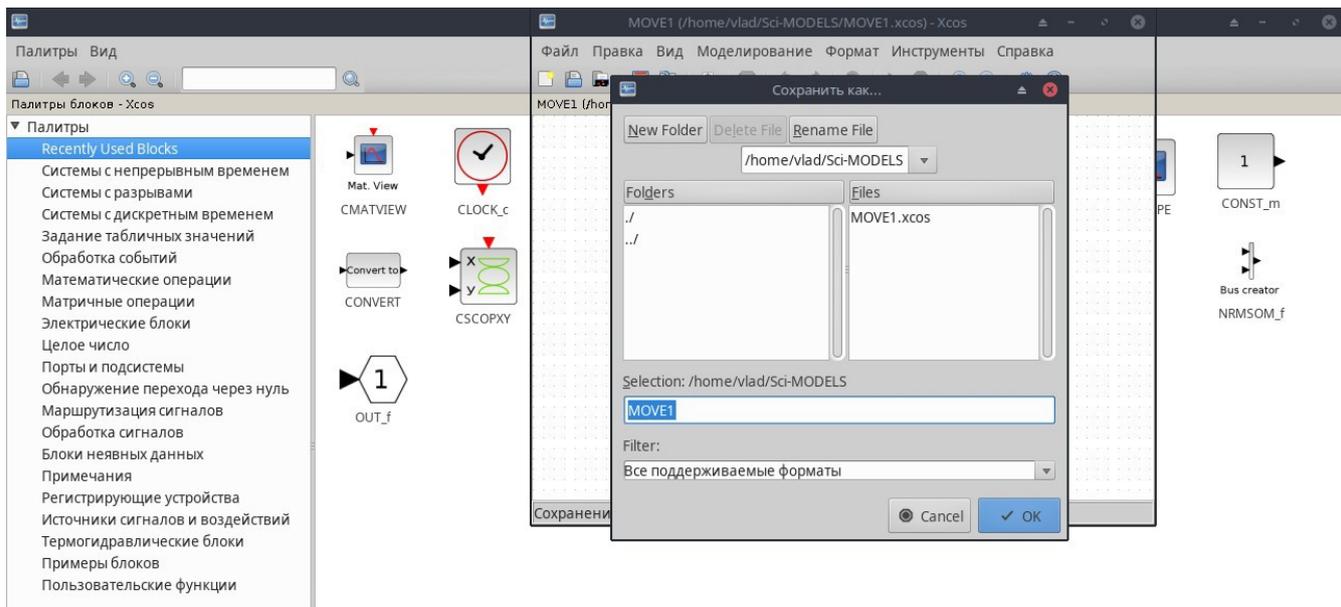


Рис.3.

Откроем окно палитры блоков, которое автоматически запустилось при вызове среды Xcos и его значок (иконка) появится в строке запущенных приложений ОС (Рис. 4).

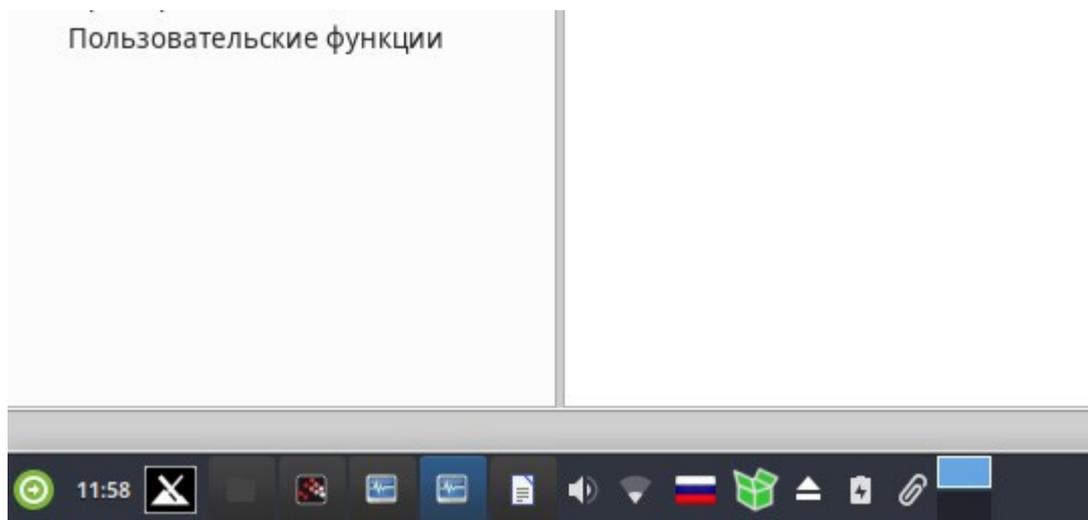


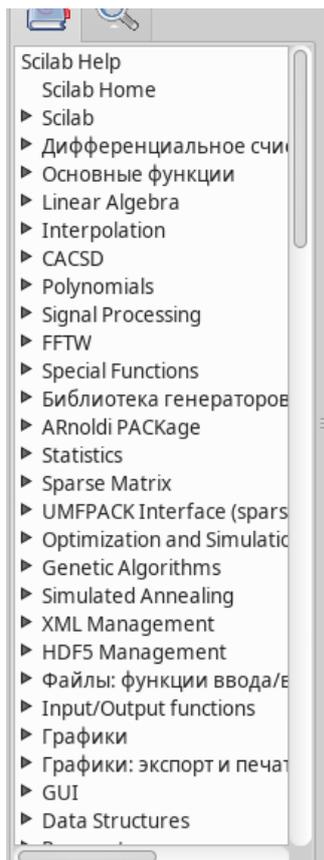
Рис. 4.

Выберем из списка палитры блоков раздел «Источники сигналов и воздействий» и

выберем двойным щелчком левой кнопки мыши (ЛКМ) из графической части окна блоки Time\_f и Clock\_c.

Блок Time\_f является генератором функционального времени, уникальный регулярный выход которого есть непрерывная линейно нарастающая последовательность значений времени.

Посмотреть все характеристики этого блока можно щёлкнув на нём правой кнопкой мыши (ПКМ) и выбрав из выпадающего меню Block Help (Рис. 5).



## Palette

- Sources palette

## Description

This block is a time generator.

The unique regular output is the current time.

## Default properties

- **always active:** yes
- **direct-feedthrough:** no
- **zero-crossing:** no
- **mode:** no
- **regular outputs:**
  - port 1 : size [1,1] / type 1
- **number/sizes of activation inputs:** 0
- **number/sizes of activation outputs:** 0
- **continuous-time state:** no
- **discrete-time state:** no
- **object discrete-time state:** no
- **name of computational function:** *timblk*

## Interfacing function

- SCI/modules/scicos\_blocks/macros/Sources/TIME\_f.sci

Рис. 5.

Рассмотрим простой пример работы блока Time\_f . Для этого добавим в рабочее окно модели простой осциллоскоп CSCOPE и ограничитель длительности моделирования (Simulation) ENDBLK из раздела «Регистрирующие устройства» и палитры блоков. Соединим блоки функциональными (чёрные выходы и входы блоков) и управляющими связями (красные выходы и входы блоков).

Соединительные линии проводятся от выхода к входу (или наоборот) при нажатой ЛКМ.

Разрешённые соединения подсвечиваются зелёным. Для удаления соединительной линии выделите её и нажмите Delete. Должны получить схему, приведённую на рис. 6.

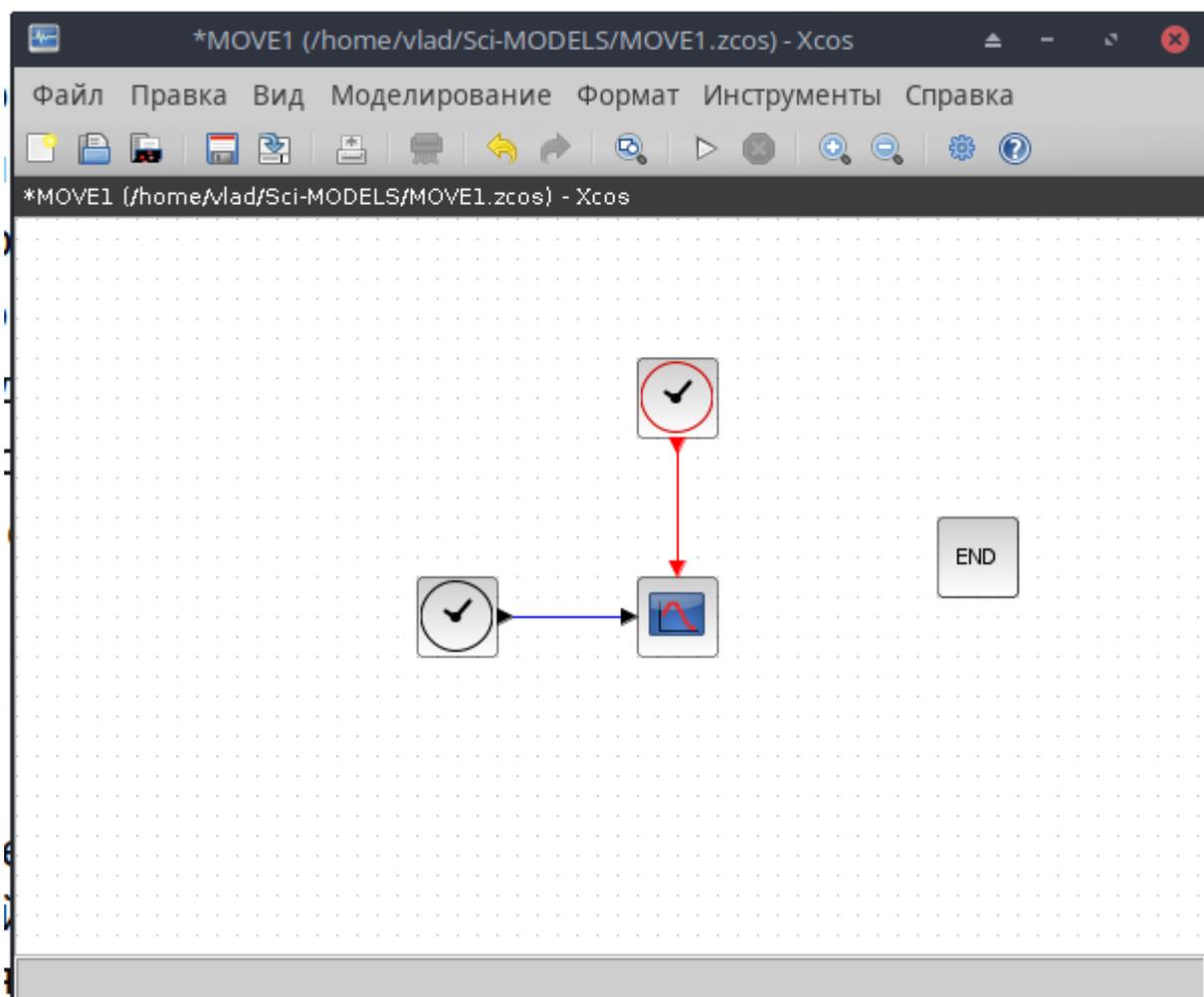


Рис. 6.

Блок CSCOPE (Single Display Scope) является простым осциллоскопом, регистрирующим входные данные в моменты прихода управляющих синхроимпульсов в течение всего периода моделирования (симуляции). Вывод производится по интервалам кадрирования (**Refresh period**).

Окно настроек осциллоскопа (Рис. 7) можно вызвать двойным щелчком ЛКМ по изображению блока.

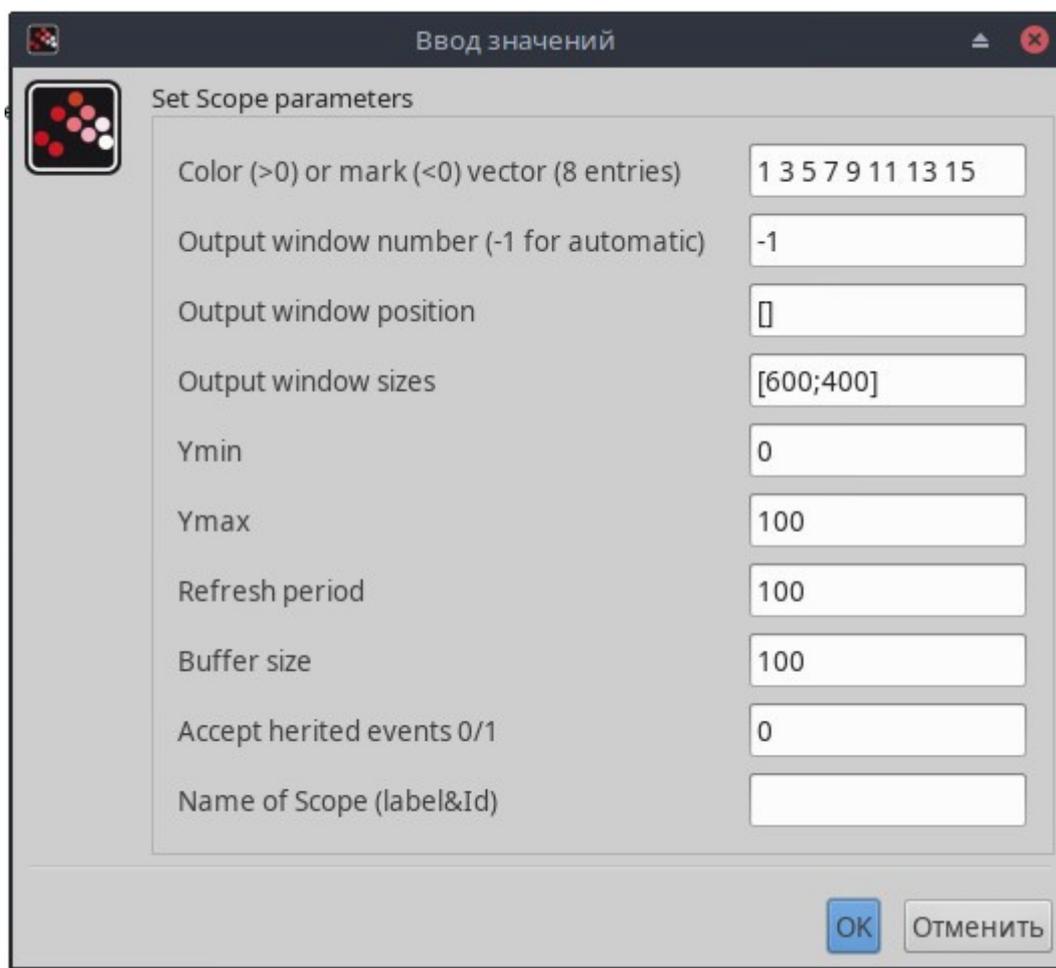


Рис. 7.

Блок CSCOPE имеет следующие параметры:

- **Color**

a vector of integers. The  $i$ -th element is the color number (  $\geq 0$  ) or marker type  $\geq (< 0)$  used to draw the

evolution of the  $i$ -th input port signal. See **plot2d** for color (dash type) definitions.

Properties : Type 'vec' of size 8

- **Output window number**

The number of graphic window used for the display. It is often good to use high values to avoid

conflict with palettes and Super Block windows. If default value is used (**1**) , Scicos define the output

window number.

Properties : Type 'vec' of size 1

- **Output window position**

a 2 vector specifying the coordinates of the upper left corner of the graphic window. Answer [] for

default window position.

Properties : Type 'vec' of size 1

- **Output window sizes**

a 2 vector specifying the coordinates of the upper left corner of the graphic window. Answer [] for

default window position.

Properties : Type 'vec' of size -1

- **Ymin**

Minimum values of the input; used to set up the Y-axis of the plot in the graphics window.

Properties : Type 'vec' of size 1

- **Ymax**

Maximum values of the input; used to set up the Y-axis of the plot in the graphics window.

Properties : Type 'vec' of size 1

- **Refresh period**

Maximum value on the X-axis (time). The plot is redrawn when time reaches a multiple of this value.

Properties : Type 'vec' of size 1

- **Buffer size**

To improve efficiency it is possible to buffer the input data. The drawing is only done after each **Buffer size** call to the block.

Properties : Type 'vec' of size 1

- **Accept inherited events 0/1**

if **0CSCOPE\_f** draws a new point only when an event occurs on its event input port. If **1CSCOPE\_f**

draws a new point when an event occurs on its event input port and when it's regular input changes

due to an event on another upstream block (inherited events).

Properties : Type 'vec' of size 1

- **Name of Scope**

Name/label of the block.

Properties : Type 'str' of size 1

Устанавливаем параметры указанные на рис. 7.

Блок ENDBLK (END block) является ограничителем длительности симуляции.

That block can be used to set the final time of the simulation. When that block is truly parametrized

then the simulator will jump to the 'final integration time' defined in the Setup item of the simulate Menu

from the time defined by the parameter 'Final simulation time' of the dialog box. That parameter can be a

numerical value or a symbolic variable defined in the scicos context.

Note that the 'Final simulation time' item (on diagram settings) always end the simulation at the

specified time. This block should be configured to end the simulation before this setting.

Длительность процесса симуляции можно установить если двойным щелчком ЛКМ по изображению блока вызвать диалоговое окно установки параметров блока (Рис. 8).

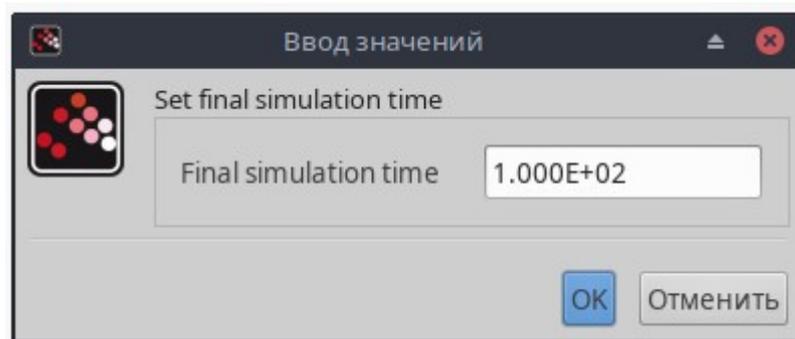


Рис. 8.

### Final simulation time

Set the final time of the simulation.

When simulator reaches that value then the current time will jump to the final integration time.

Properties : Type 'vec' of size 1.

После установки всех необходимых параметров блоков необходимо сохранить текущую диаграмму, выбрав *Файл→Сохранить* в главном меню окна графического редактора. Используйте «горячие» клавиши *Ctrl + S* для экономии времени. Всегда сохраняйте диаграммы только в своей папке! Загрузить сохранённую диаграмму можно через *Файл → Открыть* или *Файл →Недавние файлы*. После этого можно запустить процесс моделирования (симуляции). Для запуска моделирования выберите *Моделирование → Выполнить* в главном меню редактора или просто

нажмите на соответствующую кнопку в панели инструментов. Остановить процесс моделирования до истечения установленного времени моделирования можно если выбрать *Моделирование → Остановить* или же воспользоваться соответствующей кнопкой «*Остановить*» в панели инструментов.

Результат моделирования приведён на рис. 9.

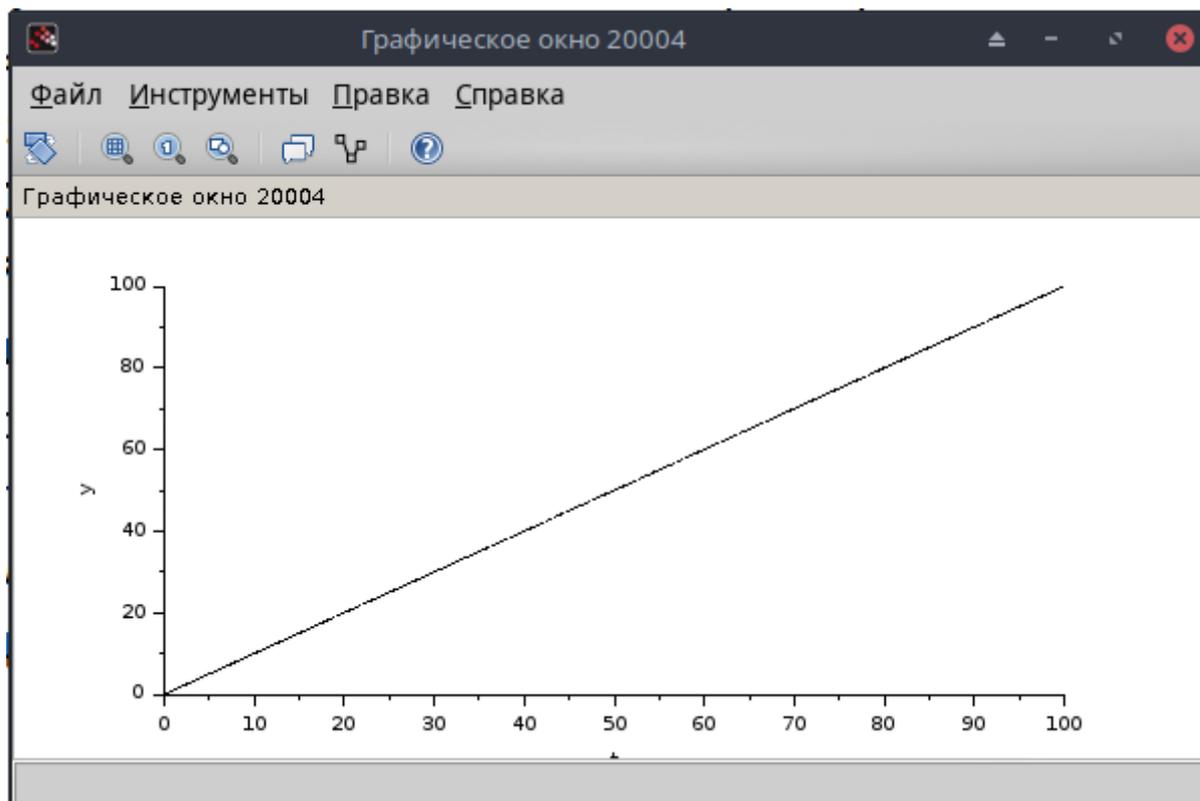


Рис. 9.

Блок Clock\_c является генератором активирующих часов (активирующего времени или синхроимпульсов). Уникальный выход этого блока генерирует регулярную последовательность событий, которые планируются с помощью параметра **Период (Period)** в секундах. Начало отсчёта генерации событий может быть установлено в секундах через параметр **Инициализация времени (Initialisation Time)**. Окно настроек приведено на рис. 10.

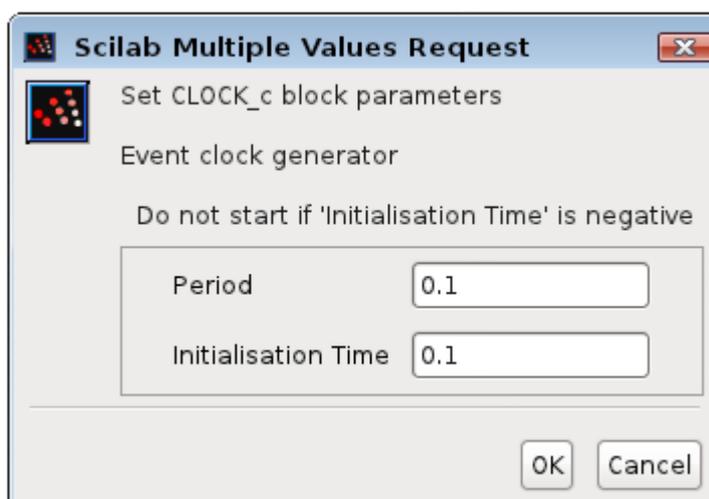


Рис. 10.

- **Период (Period)**

Scalar. Скаляр. Период это время, разделяющее два события выхода, как инверсия частоты тикания часов.

Свойства: Тип 'ves' размером 1.

- **Время инициализации (Initialisation Time)**

Скаляр. Дата (время) старта (Starting date).

Если **Время инициализации** отрицательная величина, то часы никогда не стартуют.

Свойства: Тип 'ves' размером 1.

Посмотреть все характеристики этого блока можно щёлкнув на нём правой кнопкой мыши

(ПКМ) и выбрав из выпадающего меню Block Help.

Простой пример вывода событий (синхроимпульсов) с помощью блока CLOCK\_c приведён на рис. 11.

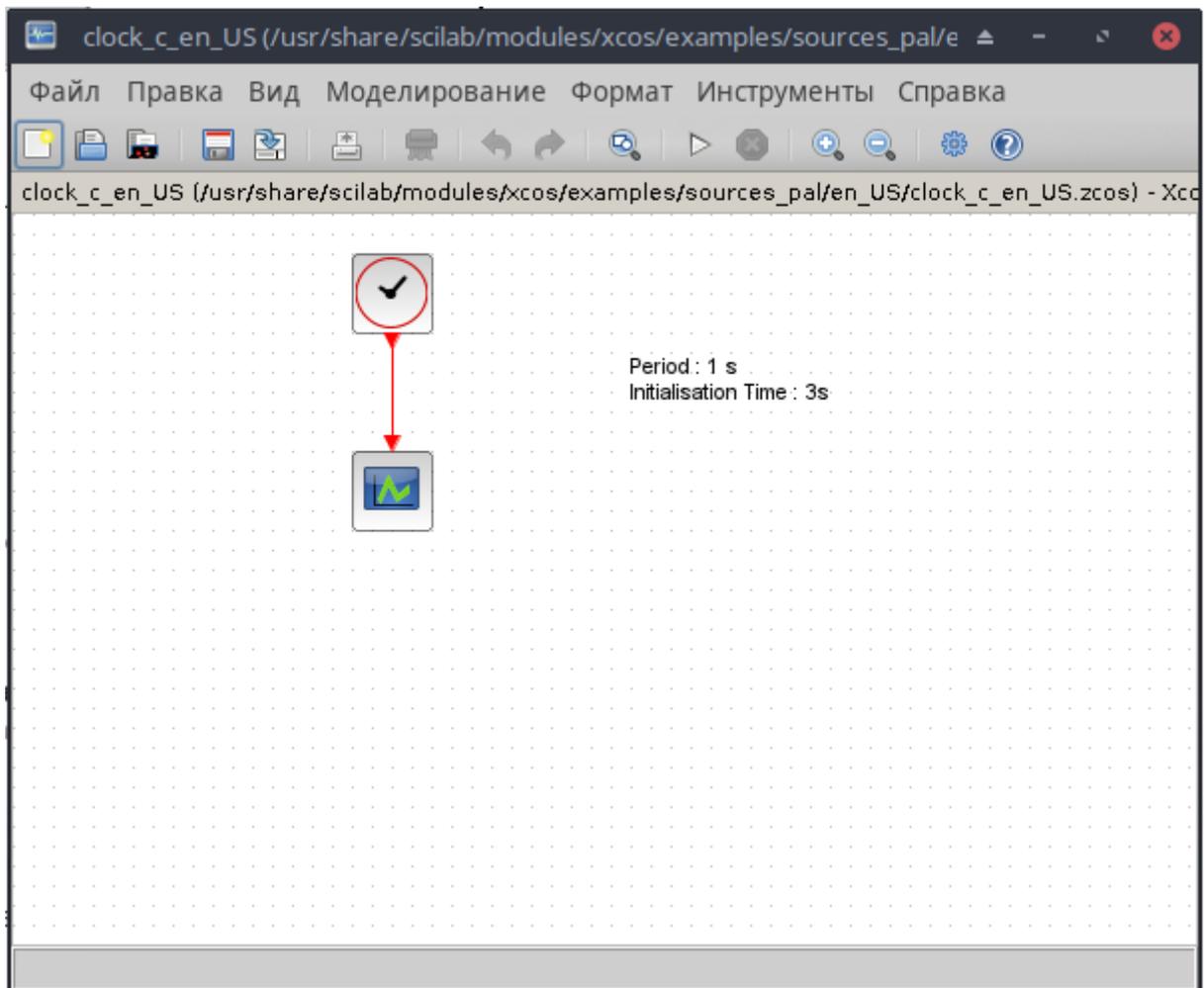


Рис. 11.

Результат моделирования представлен на рис. 12.

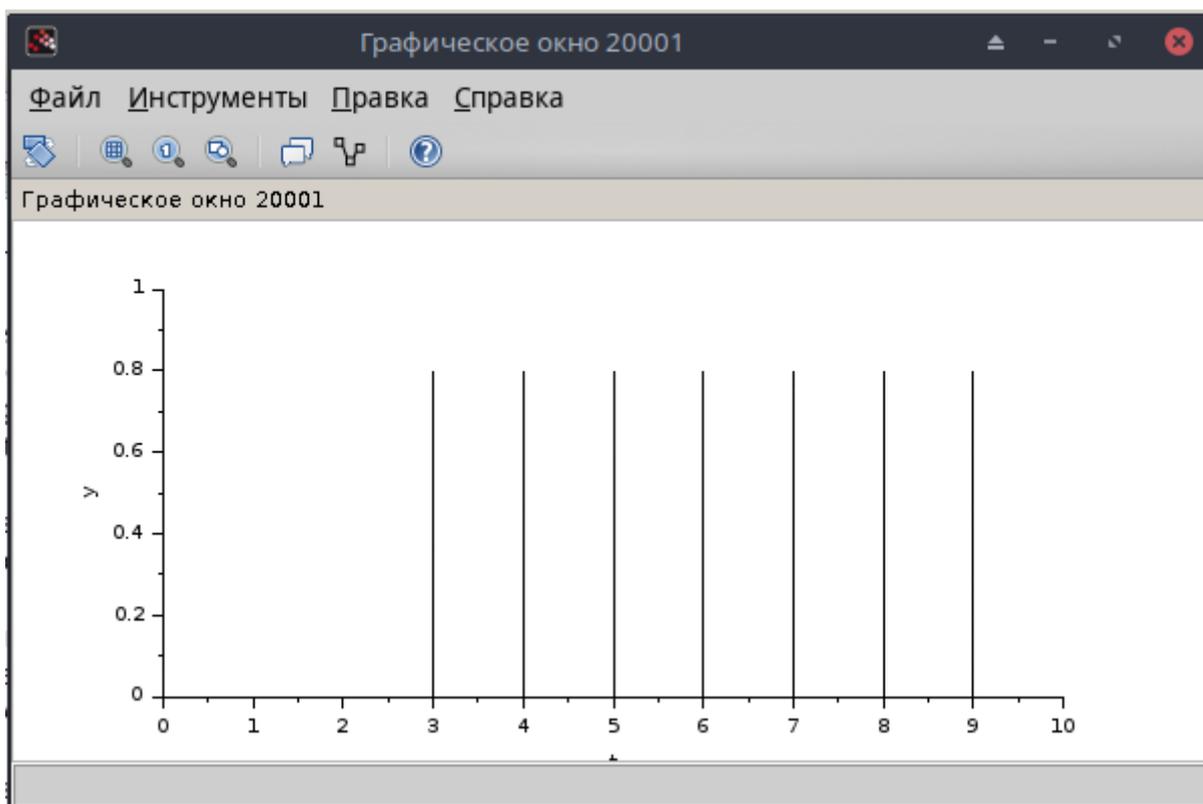


Рис. 12.

На предыдущих занятиях мы с вами определили, что движение транспортного средства (MD — Moving Device) осуществляется под воздействием силы  $F$ , создаваемой энергосиловым модулем (EFU — Energy Force Unit) за счёт энергии  $E_s$ , получаемой от энергоисточника (ES — Energy Source) и  $E_a$  от буферного накопителя энергии (EA — Energy Accumulator), сопротивления движению (Moving Resistance)  $W$  и гравитационного притяжения (Gravity Pull)  $G$ . Собственно управляемое движение транспортного средства (ТС) обеспечивается энергосиловым модулем EFU, формирующим требуемую силу  $F$  в зависимости от условий и целей движения. Задачей при разработке транспортного средства, как раз и является определение параметров этого модуля для достижения требуемых параметров движения. На первом этапе будем рассматривать EFU, как формирователь силы тяги или торможения для обеспечения требуемого движения ТС. В стандартной библиотеке Xcos для этих целей можно использовать блок Signal Builder из раздела «Источники сигналов и воздействий». Рассмотрим этот блок подробнее.

### Описание блока

Блок Signal Builder является суперблоком, содержащим два выходных порта. Один выходной порт событий (красный) для входных портов событий других блоков. Эти события дают возможность генерировать синхросигнал, как дискретные точки в моменты изменения функционального сигнала. Генерируемые события автоматически перезапускают цифровой решатель и позволяют избежать цифровые проблемы. Генерируемые события также становятся доступными для любого использования пользователями. Другой выходной порт формирует функциональный сигнал, изменяющийся в моменты формирования события. Напоминаем также, что возможно использовать высокоуровневые методы интерполяции функционального сигнала. События при этом могут генерироваться только как начало и конец функционального сигнала.

Задание параметров блока возможно через диалоговое окно, вызываемое двойным щелчком ЛКМ на изображении блока (Рис. 13).

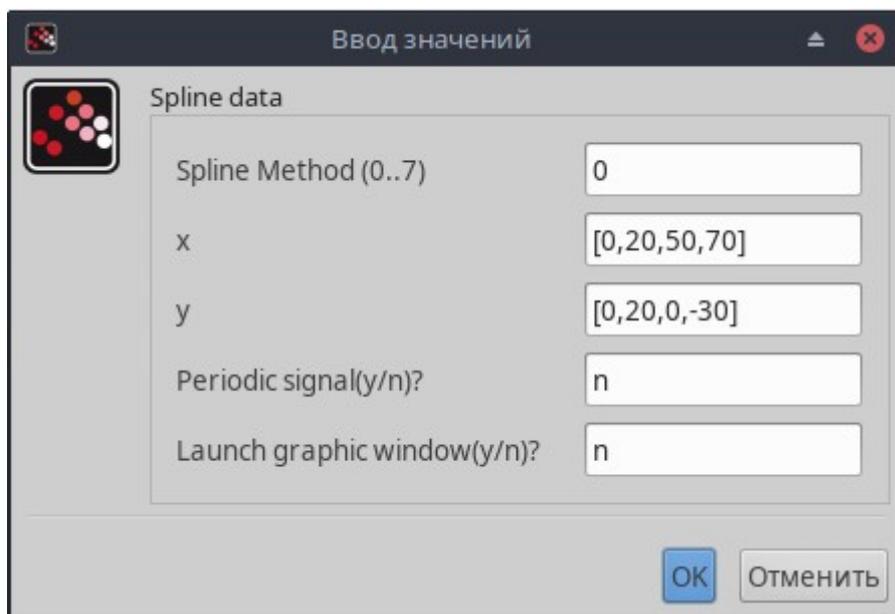


Рис. 13.

Будем использовать этот блок как задатчик режимов движения ТС. Блок-схема использования этого блока показана на рис. 14, а результат работы с указанными настройками показан на рис. 15 и 16.

Рис. 15 показывает сигнал на функциональном выходе, а рис. 16 — на управляющем (событийном).

Функциональный выход будем использовать, как сигнал задания тока или силы тяги  $F$  для EFU.

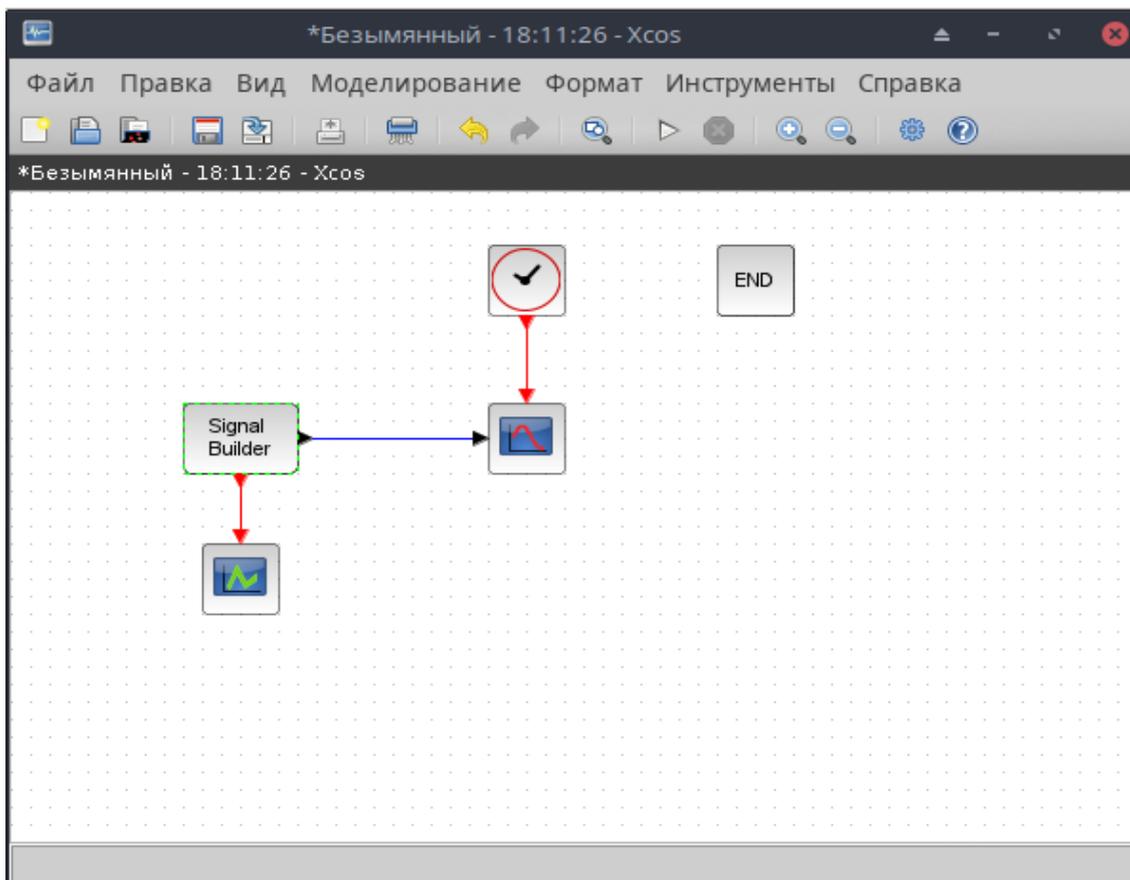


Рис. 14.

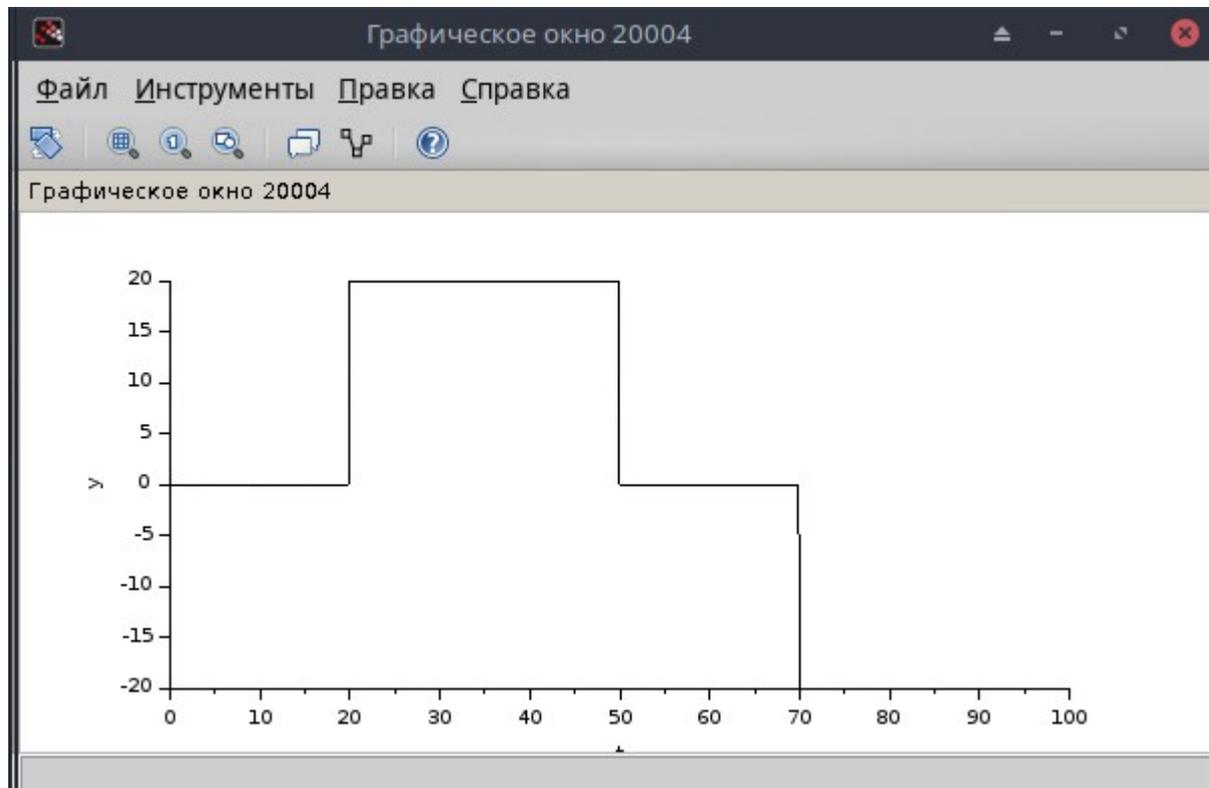


Рис. 15.

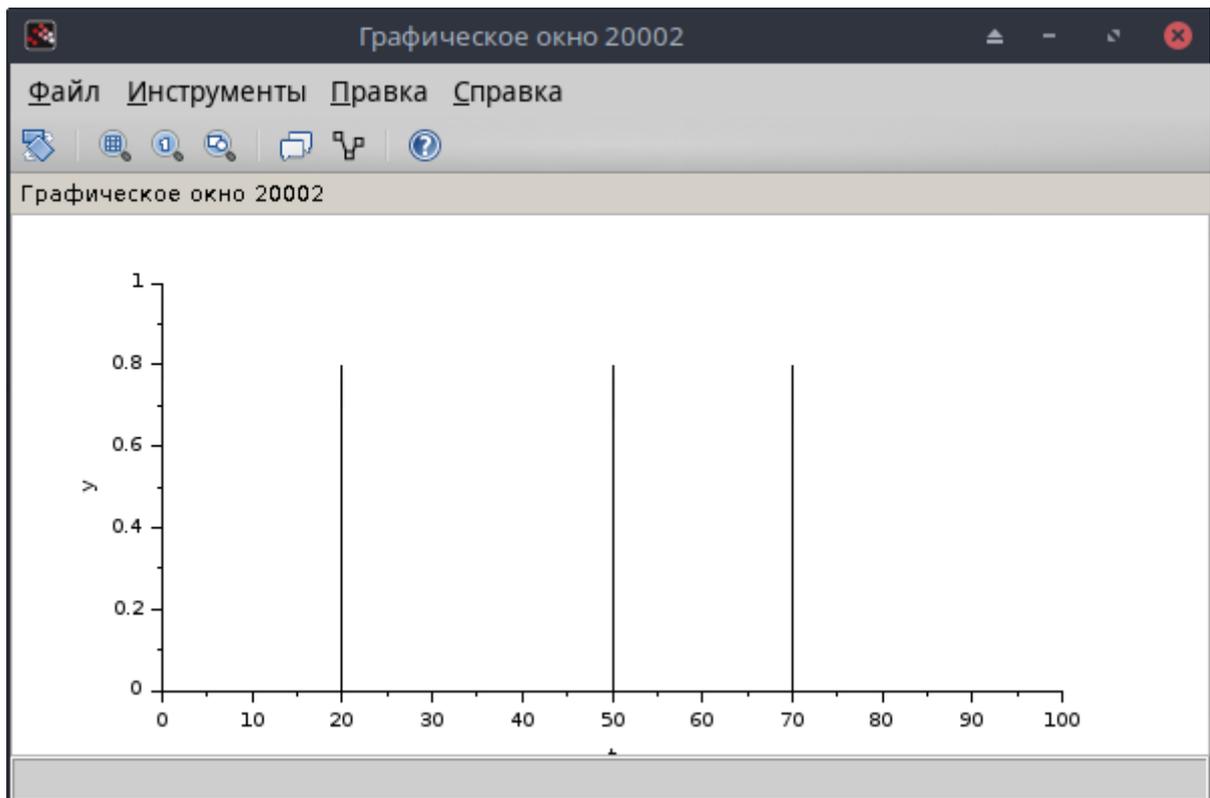


Рис. 16.

Итак наш блок Signal Builder формирует во времени в соответствии с обобщённым уравнением движения необходимую удельную силу тяги (знак +) или торможения (знак-)  $f$  [Н/кг] для осуществления управляемого движения нашего транспортного средства. Для определения скорости движения ТС  $V$  [м/с] и его координаты пути  $x$  [м] необходимо решить дифференциальное уравнение обобщённого движения относительно этих величин.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = f - g \cdot \sin(\alpha) - w ,$$

т. е. для получения скорости проинтегрировать правую часть один раз

$$V(t) = \int (f - g \cdot \sin(\alpha) - w) \cdot dt,$$

а для получения координаты пути ещё второй раз

$$x(t) = \int (V(t)) \cdot dt.$$

Для начала не будем учитывать уклоны и сопротивление движению. Тогда блок-схема модели может быть представлена в виде, приведённом на рис. 17.

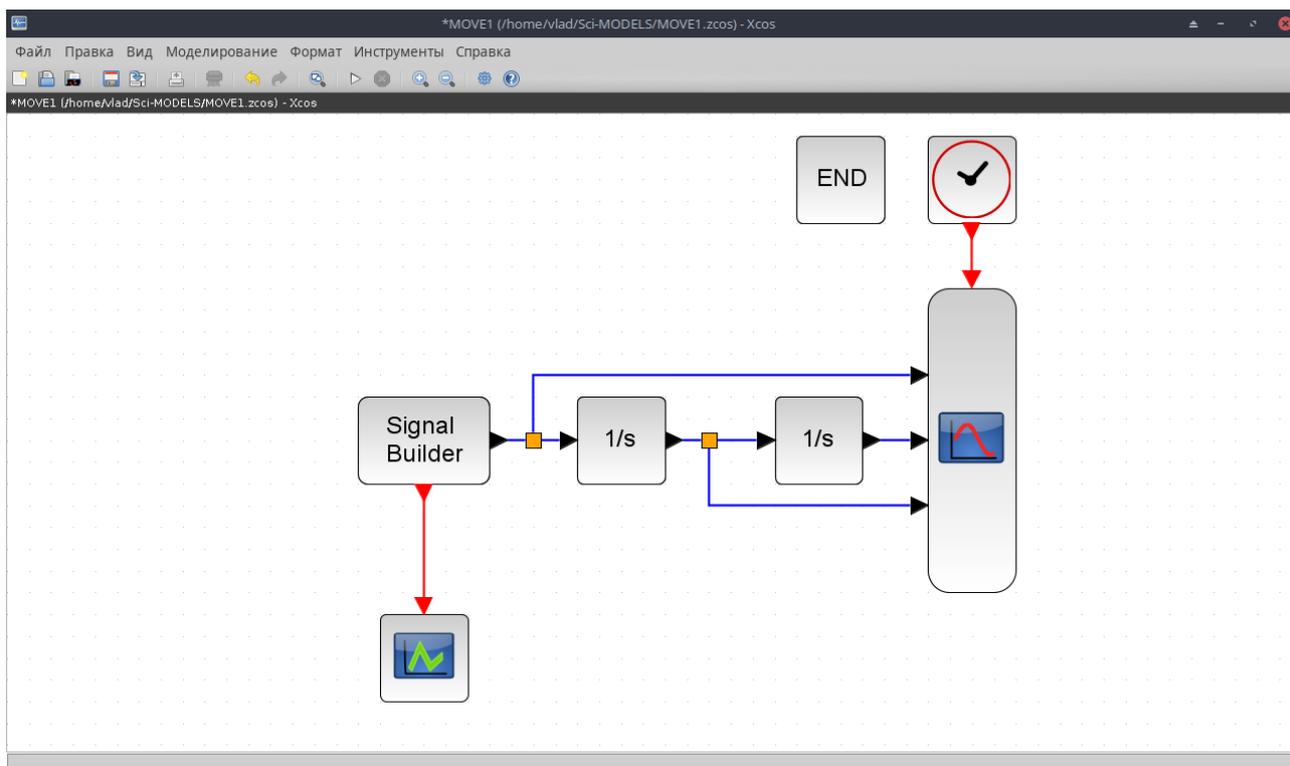


Рис. 17.

Для визуализации переменных будем использовать блок  CMSCOPE — осциллограф со многими входами. Блок CMSCOPE имеет два и более входов и отображает сигналы в отдельных системах координат в едином графическом окне.

**Пределы по оси у** задаются в параметрах блока переменными  $Y_{min}$  vector и  $Y_{max}$  vector. Первый элемент вектора относится к первому графику, второй — ко второму. **Интервал обновления осциллографа** (размер отображаемого промежутка оси времени  $t$ ) задаётся в параметрах блока переменной Refresh period (интервал обновления). Для блока CSCOPE это скаляр, для CMSCOPE — вектор, первый элемент которого относится к первому графику, второй — ко второму и т. д. Блок CMSCOPE, аналогично CSCOPE, отображает векторный вход в виде множества сигналов в одной системе координат. Однако, в отличие от CSCOPE, для него требуется явно указать размерности каждого из входов. **Размерности входов** задаются в параметрах блока переменной Input port sizes (размерности входных портов) — вектор, первый элемент которого относится к первому графику, второй — ко второму и т. д. Переменная Input port sizes имеет ещё одно важное значение: её размерность определяет количество входов осциллографа. Изменение размерности Input port sizes влечёт за собой соответствующее изменение размерности переменных  $Y_{min}$  vector,  $Y_{max}$  vector и Refresh period. **Цвет графиков** функций задаётся в параметрах блока переменной Drawing colors — вектор, элементы которого соответствуют номеру цвета в стандартной палитре. Первый элемент определяет цвет первой кривой, второй — цвет второй кривой и т.д. Если указать значение цвета со знаком минус, то вместо кривых на графике будут отображаться метки.

Параметры блока:

- **Input port sizes** — размерности входных портов. Вектор, число элементов которого равняется числу входов осциллографа, а значения элементов задают размерности каждого из входов.

- **Drawing colors** — цвет графиков. Вектор, элементы которого соответствуют номеру цвета в стандартной палитре. Если указать значение цвета со знаком минус, то вместо кривых на графике будут отображаться метки.
- **Ymin vector** и **Ymax vector** — минимальное и максимальное значение по оси  $y$  для каждого входа в отдельности
- **Refresh period** — интервал обновления осциллографа (размер отображаемого промежутка оси времени  $t$ ) для каждого входа в отдельности.

Для интегрирования сигналов будем использовать блок INTEGRAL\_f  из раздела библиотеки блоков «Системы с непрерывным временем». Этот блок является интегратором сигнала. Выход есть интеграл по времени от входной величины, которая является скаляром типа `vec` размером 1.

Устанавливаем параметры используемых блоков в соответствии с рис. 18 ... 22.

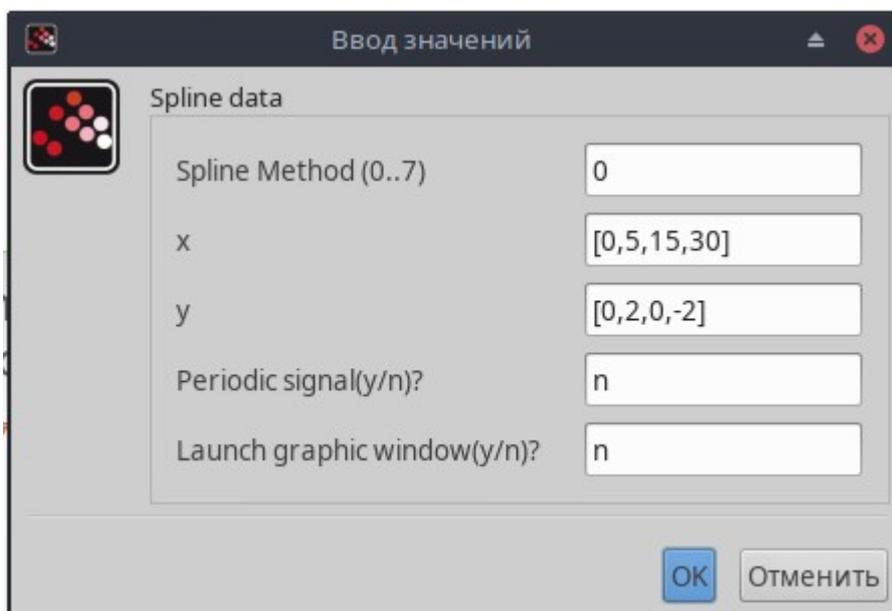


Рис. 18. Панель задания параметров (Dialog box) блока Signal Builder

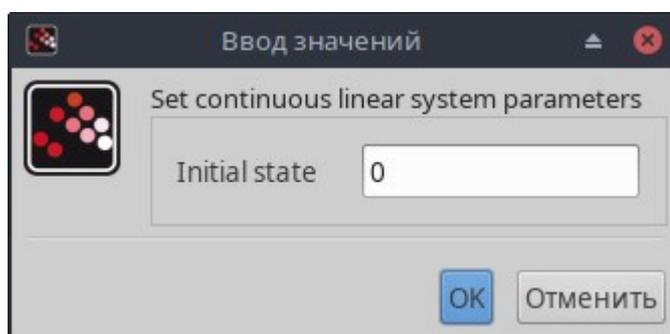


Рис. 19. Панель задания параметров (Dialog box) блока INTEGRAL\_f

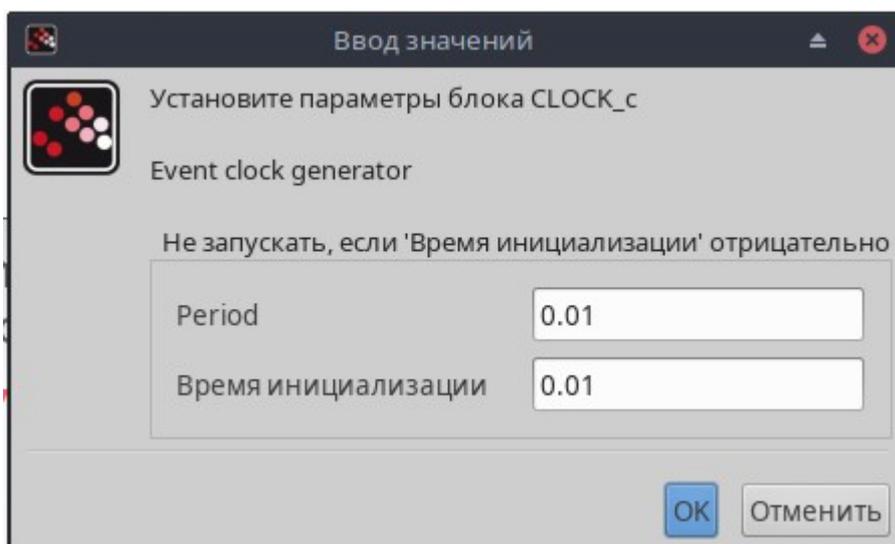


Рис. 20. Панель задания параметров (Dialog box) блока CLOCK\_c

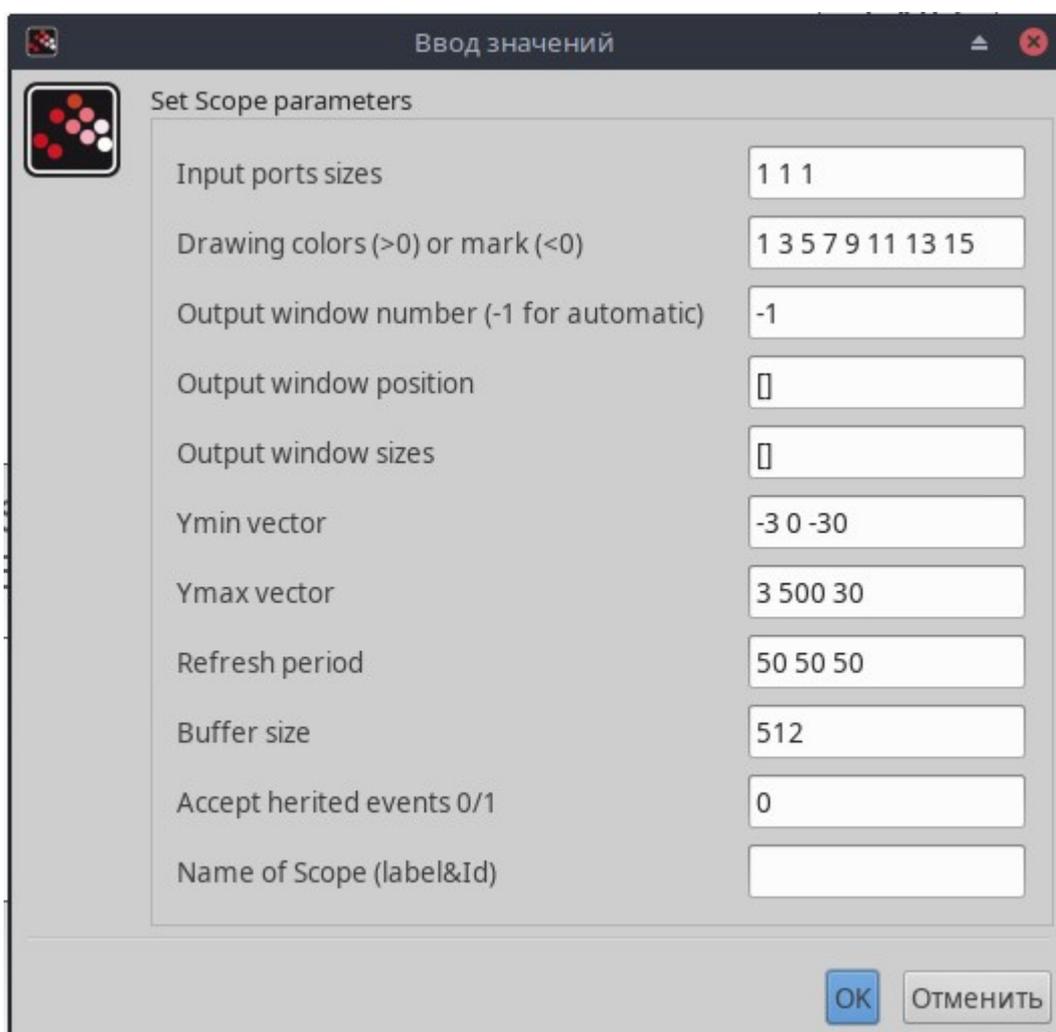


Рис. 21. Панель задания параметров (Dialog box) блока CMSCOPE

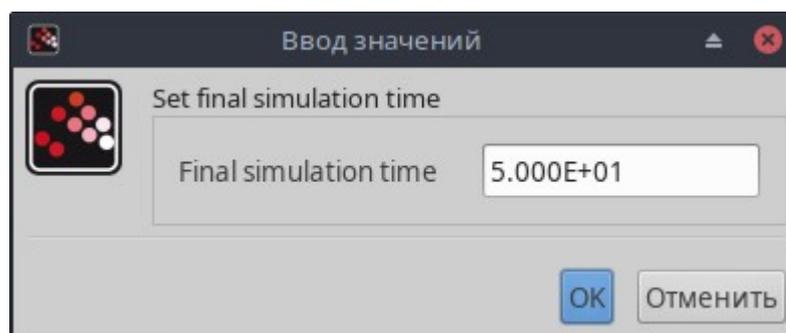


Рис. 22. Панель задания параметров (Dialog box) блока END

Запускаем моделирование и получаем результат, приведенный на рис. 23.

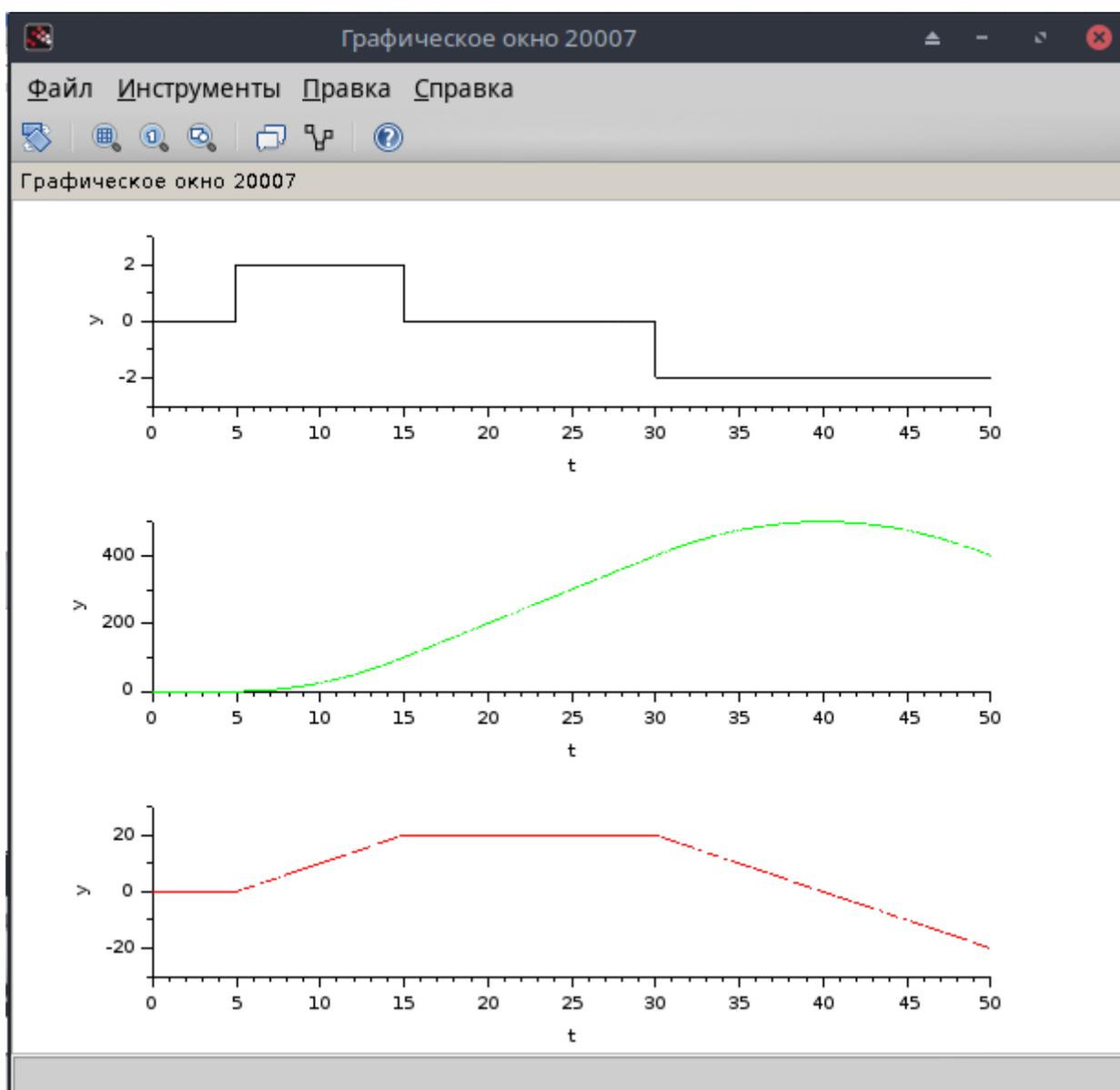


Рис. 23.

Проведём анализ полученных результатов. Через 5 секунд от начала интервала моделирования блок Signal Builder в соответствии с заложенными нами параметрами выдаёт

удельную силу тяги 2 Н на один кг полной массы ТС и удерживает её в течении 10 с до 15-й секунды от начала интервала моделирования. За это время ТС разгоняется от нулевой скорости до скорости приблизительно равной 20 м/с (72 км/час). При этом ТС проходит путь по координате  $x$  примерно 125 м. Далее на интервале от 15 до 30 с блок Signal Builder выключает силу тяги и ТС свободно движется по инерции на выбеге. На 30-й секунде блок Signal Builder включает торможение с удельной силой

$f = -2$  Н/кг. При этом скорость ТС соответственно начинает уменьшаться и в момент времени приблизительно 38 с становится равной нулю. Но поскольку к ТС продолжает прикладываться сила  $f$  с отрицательным знаком, то транспортное средство начинает разгоняться в обратном направлении. Скорость принимает отрицательные значения, а координата  $x$  начинает уменьшаться.

Чтобы этого не происходило введём в нашу модель блок управления стояночным тормозом, который при снижении скорости в режиме торможения до 0 м/с выключает динамическую тормозную силу и выдаёт сигнал на включение стояночного тормоза. Для этого

используем блок  SWITCH2\_m из раздела «Маршрутизация сигналов» библиотеки стандартных модулей (палитры).

### Описание блока

The Switch block passes through the first (top) input or the third (bottom) input based on the value of the second (middle) input. The first and third inputs are called data inputs. The second input is called the control input. You select the conditions under which the first input is passed with the Criteria for passing first input parameter. You can make the block check whether the control input is greater than or equal to the threshold value, purely greater than the threshold value, or nonzero. If the control input meets the condition set in the Criteria for passing first input parameter, then the first input is passed. Otherwise, the third input is passed.

### Типы данных

a scalar. Give the datatype of the inputs/output.

- **1:** matrix of real numbers,
- **2:** matrix of complex numbers,
- **3:** matrix of int32 numbers,
- **4:** matrix of int16 numbers,
- **5:** matrix of int8 numbers,
- **6:** matrix of uint32 numbers,
- **7:** matrix of uint16 numbers,
- **8:** matrix of uint8 numbers.

Properties : Type 'vec' of size 1

- **Pass first input if:  $u2 \geq a$**

Select the conditions under which the first input is passed. You can make the block check whether the control input is greater than or equal to the threshold value, purely greater than the threshold value, or nonzero. If the control input meets the condition set in this parameter, then the first input is passed. Otherwise, the third input is passed.

Properties : Type 'vec' of size 1.

- **Threshold a**

Assign the switch threshold that determines which input is passed to the output.

Properties : Type 'vec' of size 1.

- **Use zero crossing: yes**

Select to enable zero crossing detection.

Properties : Type 'vec' of size 1.

Вводим параметры блока в панель установки параметров в соответствии с рис. 24.

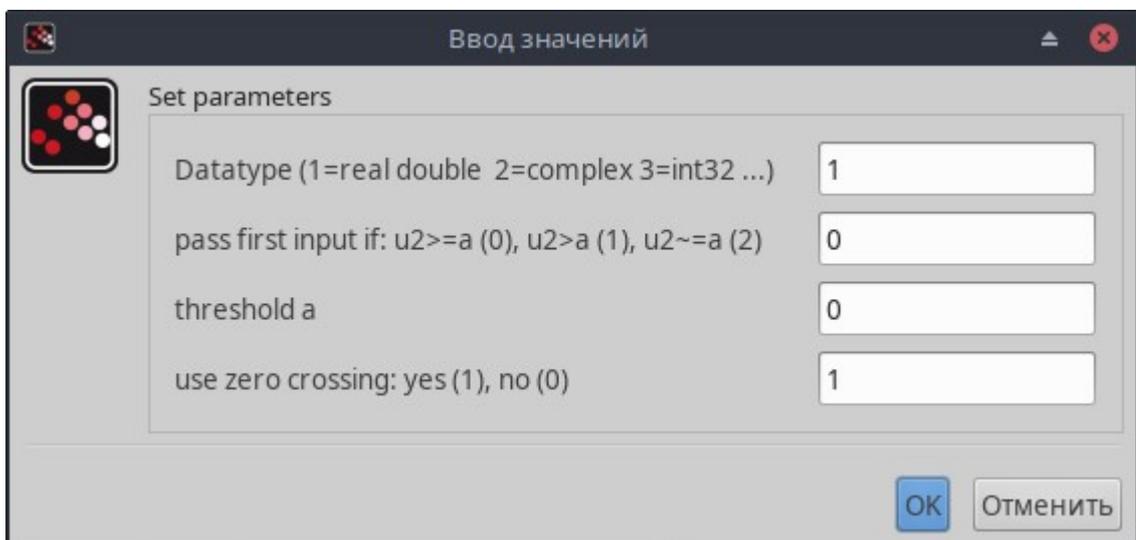


Рис. 24.

Модернизированная блок-схема приведена на рис. 25.

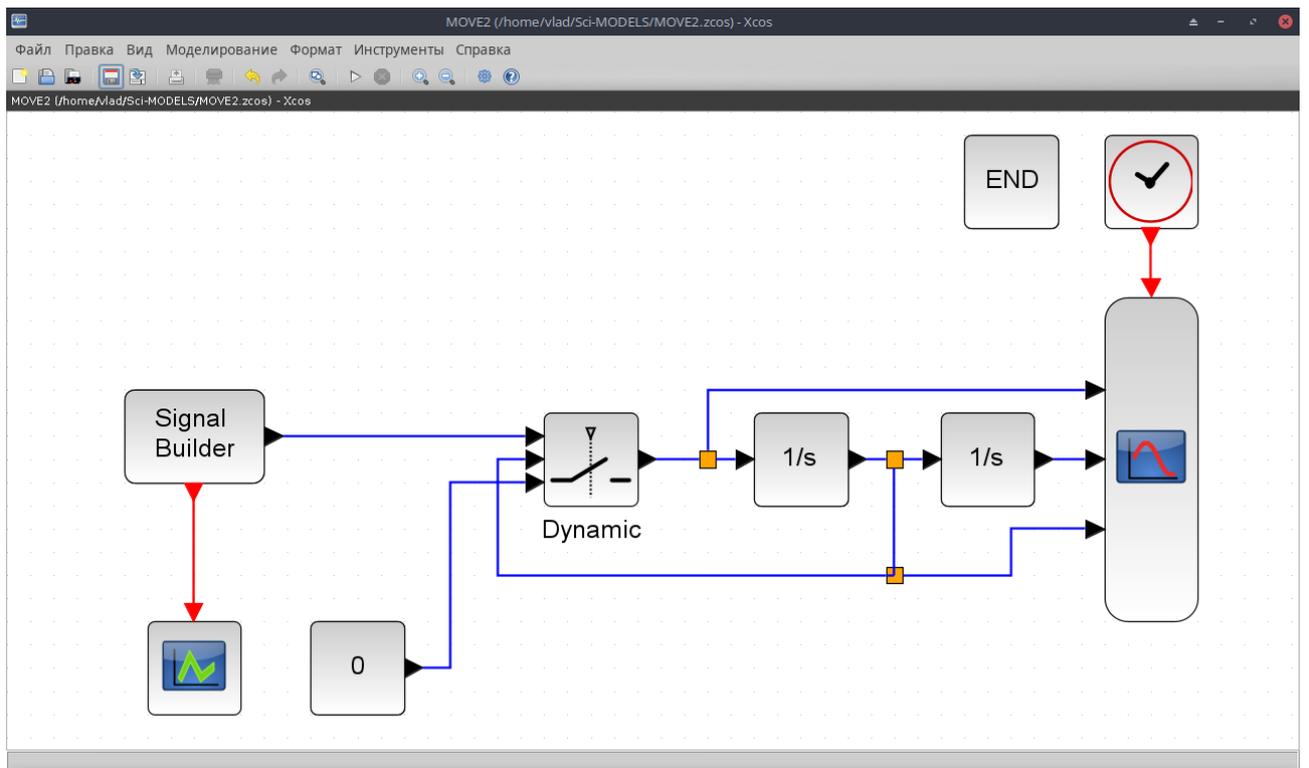


Рис. 25.

Результаты моделирования приведены на рис. 26.

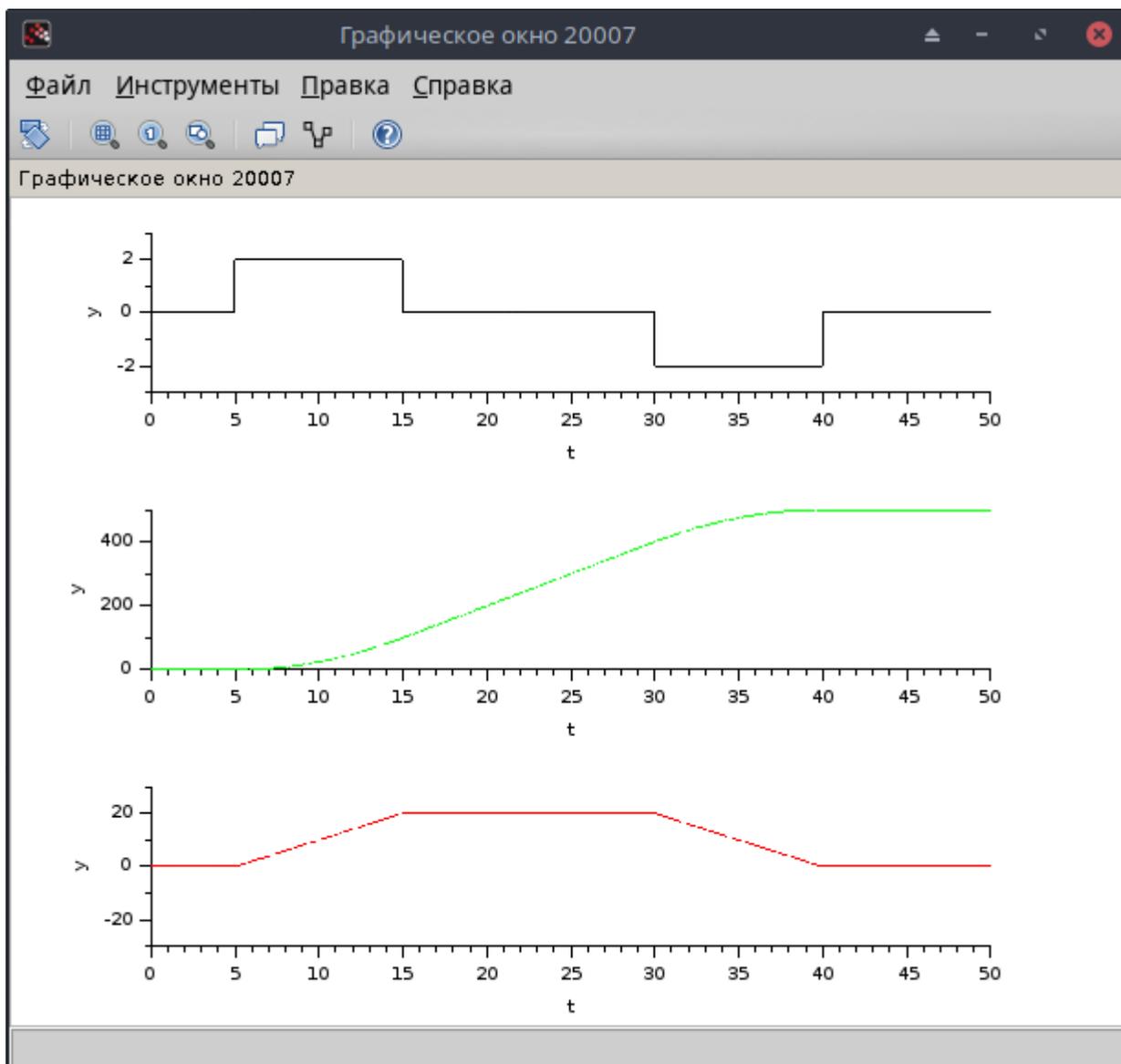


Рис. 26.

Теперь учтём скатывающую силу на уклонах согласно формуле

$$w_i = \frac{W_i}{m} = g \cdot \sin(\alpha) = g \cdot \sin(\arctan(i)) \quad .$$

Для этого используем из библиотеки (палитры) следующие дополнительные блоки:

1) CONST\_m из раздела «Источники сигналов и воздействий» для ввода величины уклона  $i$  и ускорения свободного падения  $g$  ;

2) SUMMATION для суммирования величин удельных сил тяги-торможения и скатывающей

силы, 3) PRODUCT для умножения синуса угла уклона на величину ускорения свободного падения и 4) Trig function TrigFun из раздела «Математические операции» для вычисления арктангенса уклона и синуса от арктангенса.

Блок-схема модели для этого случая примет вид, представленный на рис. 27.

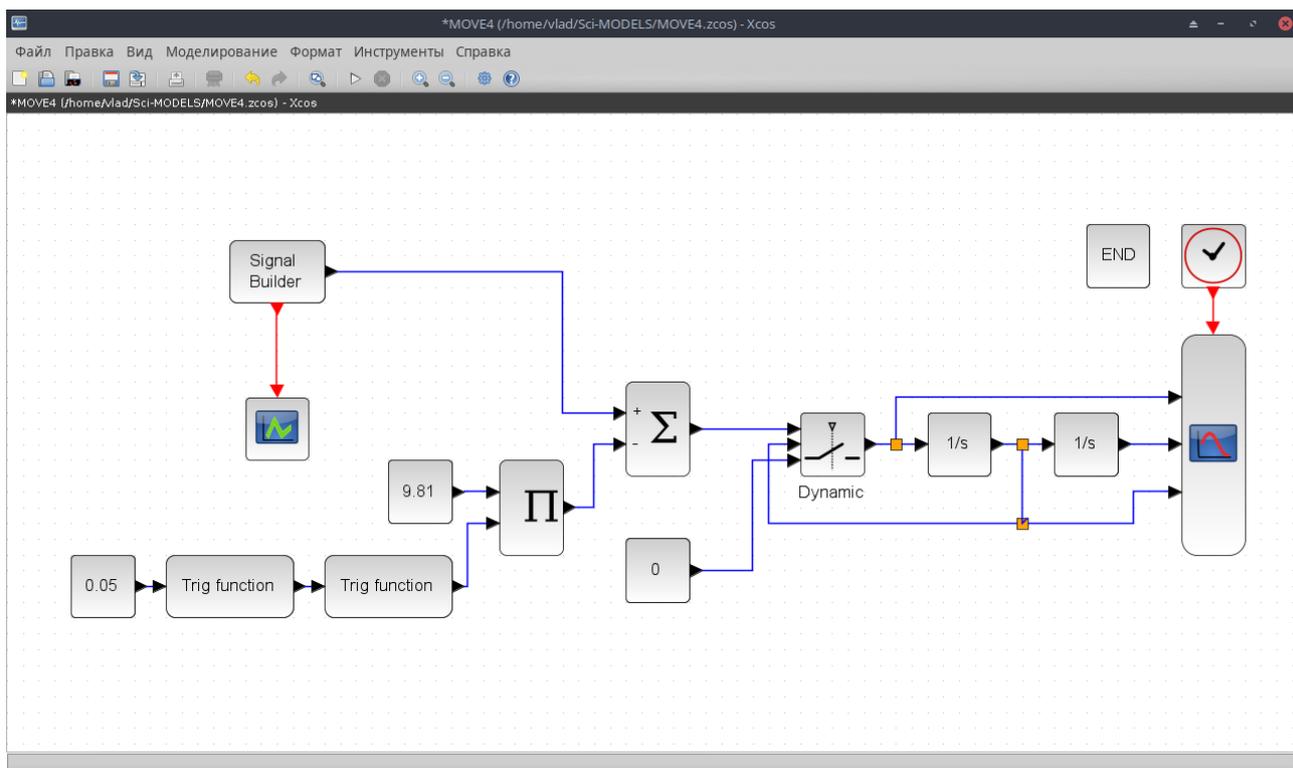


Рис. 27.

Вводим параметры блока Signal Builder в панель установки его параметров в соответствии с рис. 28.

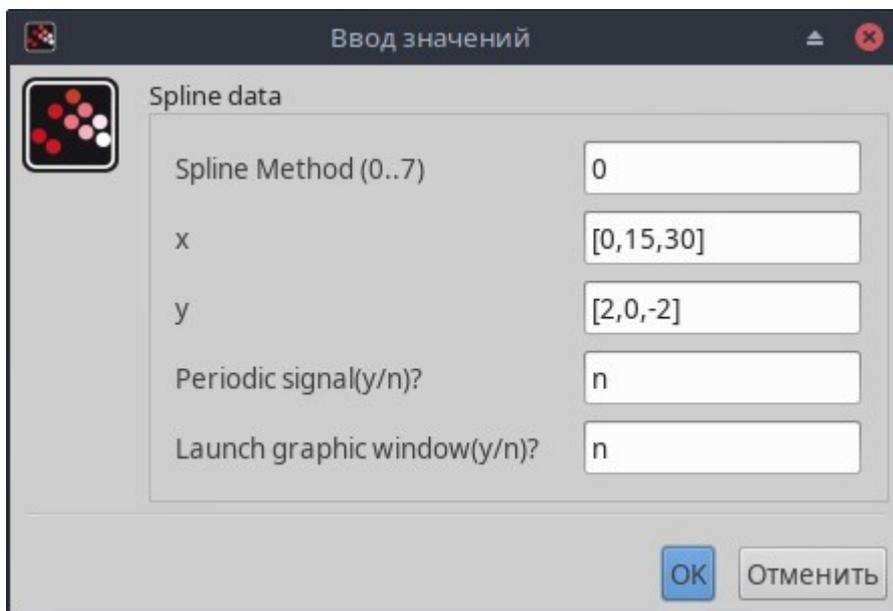


Рис. 28. Параметры, установленные в блоке Signal Builder для подъёма

Результаты моделирования при уклоне  $i=0.05$  (подъёме) приведены на рис. 29, а при уклоне  $i=-0.05$  (спуске) на рис. 31.

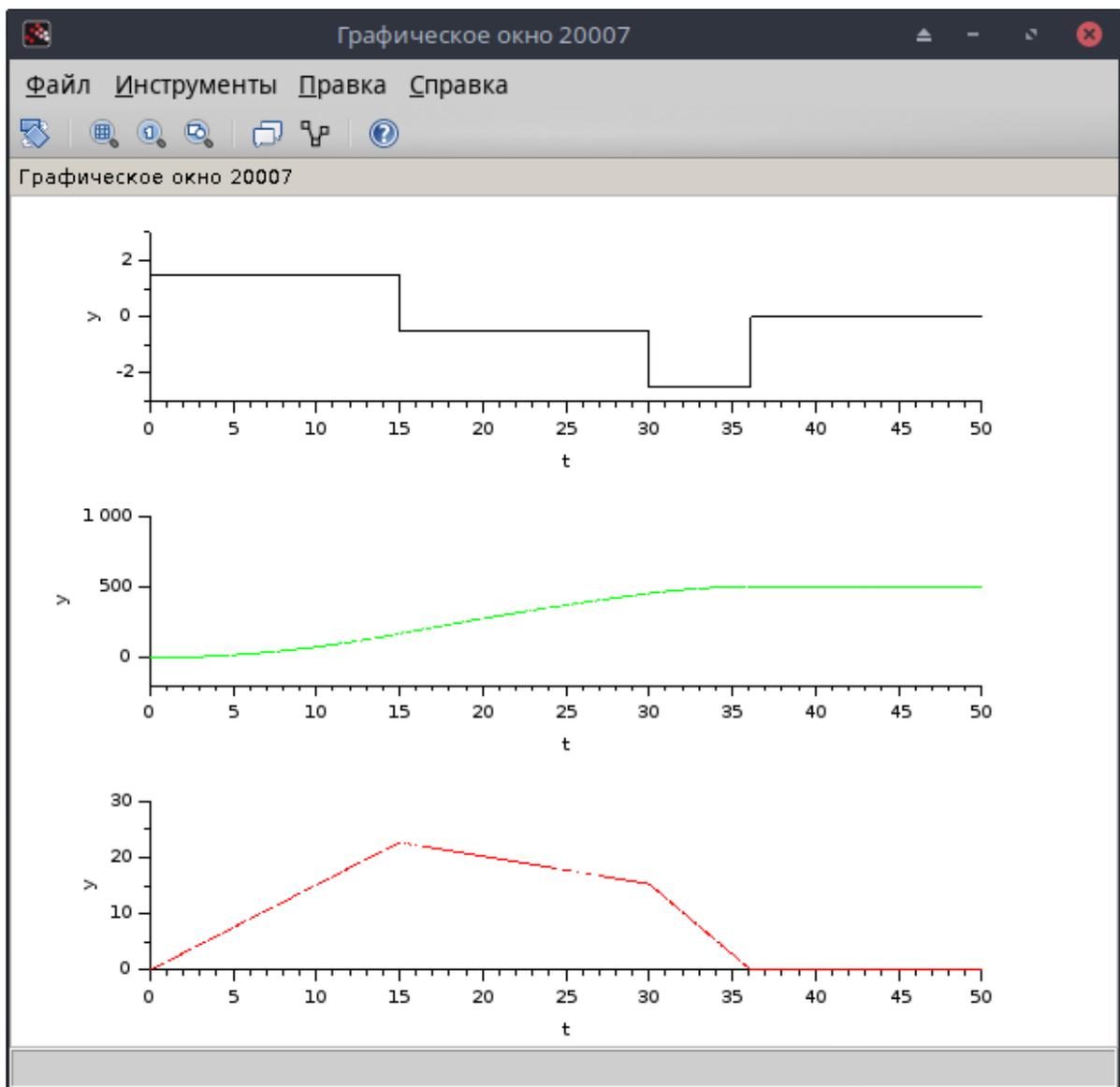


Рис. 29. Результаты моделирования на подъёме  $i=0,05$

The dialog box "Ввод значений" (Enter values) is used for configuring spline data. The parameters are as follows:

| Parameter                   | Value     |
|-----------------------------|-----------|
| Spline Method (0..7)        | 0         |
| x                           | [0,15,30] |
| y                           | [1,0,-2]  |
| Periodic signal(y/n)?       | n         |
| Launch graphic window(y/n)? | n         |

Buttons: OK, Отменить

Рис. 30. Параметры, установленные в блоке Signal Builder для спуска

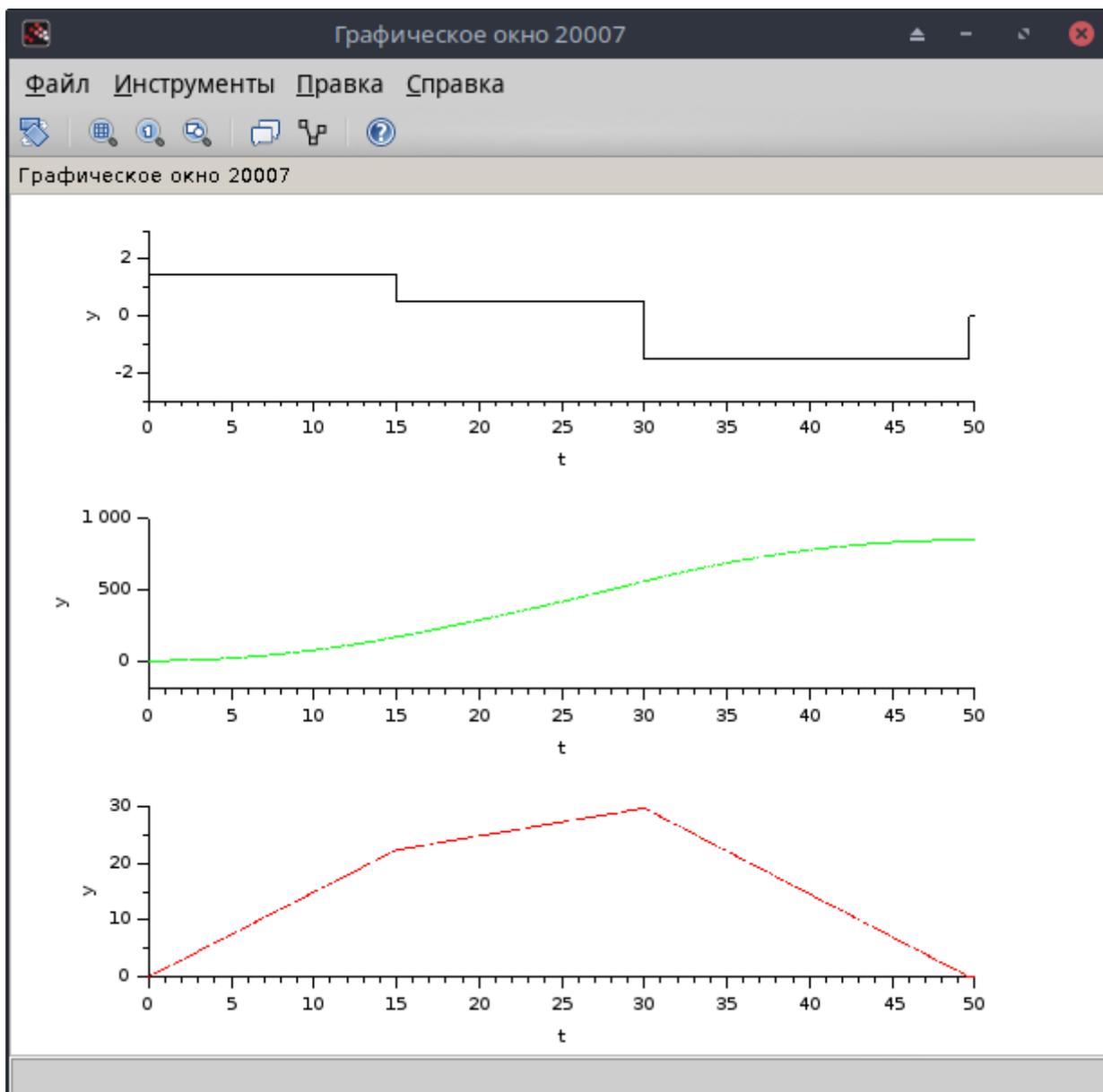


Рис. 31. Результаты моделирования на спуске  $i=-0,05$

Теперь построим с помощью Xcos полную блок-схему модели движения транспортного средства с учётом всех ранее рассмотренных нами факторов. Для этого во-первых дополним нашу предыдущую блок-схему элементами, учитывающими сопротивление движению.

Будем использовать обобщённую расчётную формулу сопротивления движению вида

$$w_0 = w_0(0) + k_1 \cdot V + k_2 \cdot V^2 \quad .$$

Значения коэффициентов упрощённой формулы основного удельного сопротивления движению для различных типов транспортных средств приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты упрощённой обобщённой формулы основного удельного сопротивления движению

| Вид ТС                         | $w_0(\theta) [ \frac{H}{кг} ]$ | $k_1 [ \frac{H \cdot c}{м \cdot кг} ]$ | $k_2 [ \frac{H \cdot c^2}{кг \cdot м^2} ]$ | Примечание   |
|--------------------------------|--------------------------------|--|--|--|
| Электромобиль, экомобиль       | 0,12                           | 8,8e-4                                 | 4,2e-4                                     | На автомобильных дорогах первой и второй категории |
| Электробус, экобус, троллейбус | 0,118                          | 2,3e-4                                 | 4,8e-4                                     | На автомобильных дорогах первой категории          |
| Трамвай                        | 4,4e-2                         | 0                                      | 3,56e-4                                    |  |
| Поезда метро                   | 1,08e-2                        | 0                                      | 7,7e-4                                     | При максимальной загрузке                          |
|                                |                                |  | 1,2e-3                                     | Порожний состав                                    |
| Наземные электропоезда         | 5,9e-3                         | 3,6e-4                                 | 2,94e-4                                    | На бесстыковом пути                                |
|                                | 1,12e-2                        | 4,32e-4                                | 3,46e-4                                    | На звеньевом пути                                  |
| МАГЛЕВ ЭЛТРО                   | 1,5e-4                         | 5,2e-5                                 | 3,5e-4                                     |  |

Добавим в исходную блок-схему модели блоки реализующие уравнение основного сопротивления движению для электромобиля с параметрами указанными в таблице. Во-вторых учтём влияние инерционности вращающихся масс ТС.

### Учёт инерционности вращающихся масс тягового привода

При движении колёсных транспортных средств накопление кинетической энергии происходит не только в поступательном движении массы транспортного средства, но и в его вращающихся частях, связанных с движением. Это так называемая маховая масса, определяемая моментом инерции тела во вращательном движении, по аналогии с массой в поступательном движении. Момент инерции  $J$  материальной точки массой  $m$  вращающейся вокруг оси  $z$  на расстоянии  $r$  от неё определяется выражением

$$J = m \cdot r^2 .$$

Поскольку момент инерции аддитивная величина, то для системы связанных материальных точек, каковыми являются материальные тела, справедливо выражение

$$J = \sum_i m_i \cdot r_i^2 .$$

При неравномерном движении возникают динамические моменты вращающихся частей

$$M_{\partial} = J \cdot \varepsilon ,$$

где  $J$  — момент инерции вращающейся части трансмиссии, кг·м<sup>2</sup>;

$$\varepsilon = \frac{d\Theta}{dt^2} = \frac{a \cdot \mu}{R_{\kappa}} - \text{угловое ускорение вращающейся части трансмиссии, рад/с}^2;$$

$a$  — линейное ускорение транспортного средства, м/с<sup>2</sup>;

$\mu$  — передаточное отношение трансмиссии;

$R_{\kappa}$  — радиус ведущего колеса, м.

Динамические моменты, возникающие во вращающихся частях трансмиссии, могут быть приведены к силе, действующей на колесе в соответствии с формулой

$$F_{\partial} = \frac{J \cdot \varepsilon \cdot \mu}{R_{\kappa}} .$$

Суммарная динамическая сила, приведённая к ведущему колесу, будет равна

$$F = \left( m \cdot a + \sum_i \frac{J \cdot a \cdot \mu^2}{R_{\kappa}^2} \right) = m \cdot a \cdot \left( 1 + \frac{\sum J \cdot \mu^2}{m \cdot R_{\kappa}^2} \right) = m \cdot a \cdot (1 + \gamma) ,$$

где  $\gamma = \frac{\sum J \cdot \mu^2}{m \cdot R_{\kappa}^2}$  - коэффициент инерции вращающихся масс.

Полная удельная динамическая сила будет определяться соответственно выражением

$$f = \frac{F}{m} = a \cdot \left( 1 + \frac{\sum J \cdot \mu^2}{m \cdot R_{\kappa}^2} \right) = a \cdot (1 + \gamma) .$$

Приближённые значения коэффициента инерции вращающихся масс для различных типов подвижного состава приведены в Табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты инерции вращающихся масс

| Вид подвижного состава         |           | Коэффициент инерции вращающихся масс |
|--------------------------------|-----------|--------------------------------------|
| Электромобиль, экомобиль       |           | 0,12...0,16                          |
| Электробус, экобус, троллейбус |           | 0,10...0,15                          |
| Вагоны трамвая                 | моторные  | 0,10...0,14                          |
|                                | прицепные | 0,04...0,06                          |
| Вагоны метро                   | моторные  | 0,09...0,13                          |
|                                | прицепные | 0,04...0,05                          |
| Наземные электропоезда         | моторные  | 0,08...0,12                          |
|                                | прицепные | 0,04...0,06                          |

Добавим в исходную блок-схему модели блок коэффициента инерции вращающихся масс, для примера электромобиля, с коэффициентом  $\gamma=0,14$  в соответствии с таблицей 2.

Также для упрощения чтения блок-схемы модели присвоим блокам осмысленные имена: например, для блока Signal Builder – Задатчик режимов движения, блоку AFFICH\_m – Скорость сообщения [км.ч] и т. д. Для того, что бы добавить имена, можно воспользоваться блоком TEXT\_f (раздел библиотеки «Примечания»). Для этого выберите блок TEXT\_f в окне «Палитры блоков» и переместите его при помощи мыши в рабочее поле программы. Для ввода текстовых надписей в этом блоке необходимо дважды щелкнуть по нему ЛКМ, в результате чего указатель примет вид мигающей черточки. Далее необходимо при помощи клавиатуры стереть название блока «текст» и ввести свое, после чего щелкнуть ЛКМ в свободной области блок-схемы. Аналогично обозначим имена и единицы измерения сигналов на линиях связи, поменяв цвет шрифта на синий. Результат преобразования блок-схемы модели показан на рис. 32.

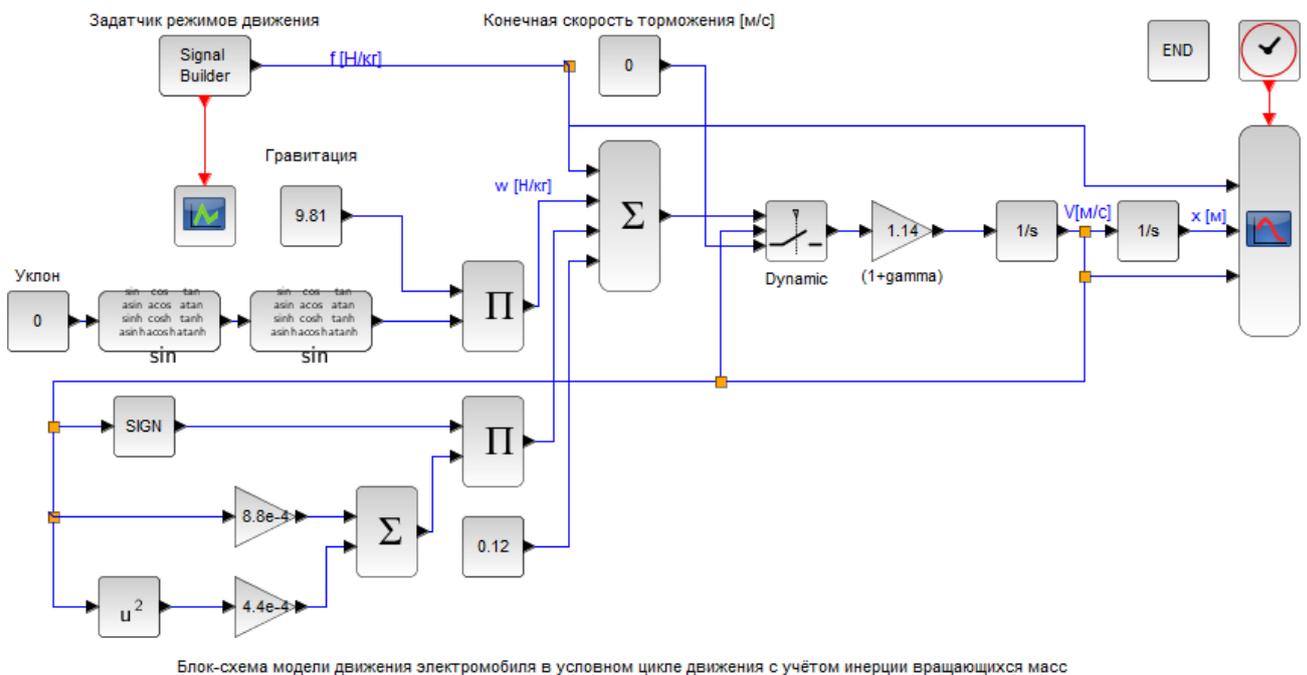


Рис. 32.

Запустив процесс моделирования получаем графики движения Рис. 33, на которых видно, что за счёт действия основного сопротивления движению транспортное средство теперь на выбеге постепенно замедляется.

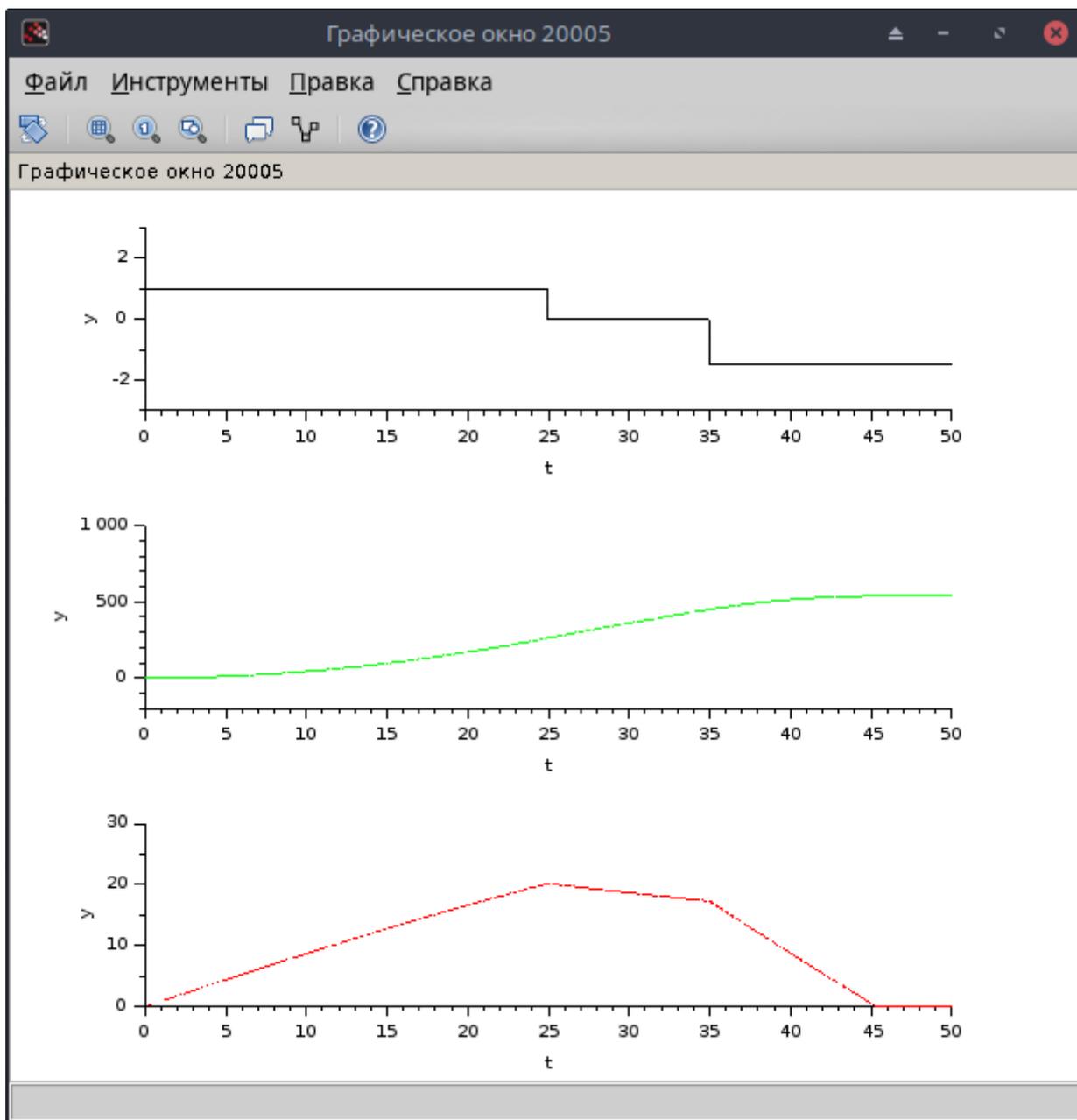


Рис. 33.

## Ограничения тяговой и тормозной сил

Введём в нашу модель движения транспортного средства ограничения по максимальной мощности в тяговом и тормозном режимах. Для этого используем блок CONST\_m из раздела библиотеки (палитры блоков) «Источники сигналов и воздействий» для задания максимальной удельной мощности  $p_{tm}=P_{tm}/m$  тягового режима и  $p_{bm}=P_{bm}/m$  тормозного режима, где  $P_{tm}$ ,  $P_{bm}$  - максимально допустимая мощность соответственно тягового или тормозного режима по условиям токосъёма, ограничений контактной сети или энергоисточника или тяговой машины, Вт;  $m$  — полная масса транспортного средства, кг. Удельную силу получаем, как результат деления удельной мощности на скорость движения согласно формуле  $f=p/v$ , где  $v$  — скорость движения ТС, м/с. Для деления используем блок PRODUCT из раздела «Математические операции» библиотеки. Для формирования единого вектора из двух последовательней сравниваемых значений используем блок мультиплексора MUX (рис. 34) из раздела библиотеки «Маршрутизация сигналов».



Рис. 34.

Количество входных портов (каналов) можно установить с помощью диалогового блока параметров блока (рис. 33). Количество входных портов указывается целым числом от 1 до 8.

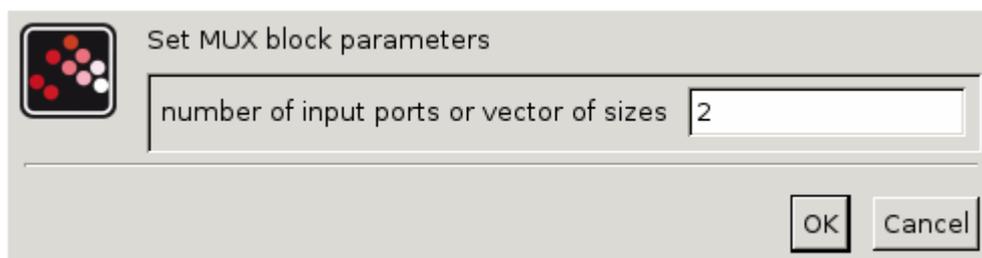


Рис. 35.

Для ограничения тяговой силы (положительные значения  $f$ ) используем функцию MIN\_f (рис. 36) из раздела «Математические операции» библиотеки блоков. Этот блок находит минимальные значения из элементов входного вектора.

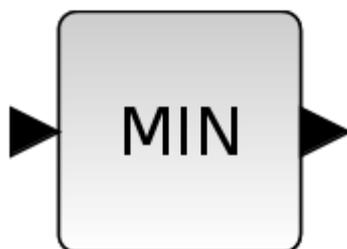


Рис. 36.

Для ограничения тормозной силы (отрицательные значения  $f$ ) используем функцию MAX\_f (рис. 37) из раздела «Математические операции» библиотеки блоков. Этот блок находит максимальные значения из элементов входного вектора.

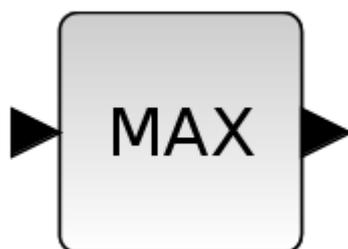


Рис. 37.

Для выбора тяговой или тормозной силы по знаку (+ или -) сигнала задания, выдаваемому датчиком режимов движения (блок Signal Builder), используется уже знакомый нам блок SWITCH2\_m (Dynamic) (рис. 38) из раздела библиотеки «Маршрутизация сигналов».

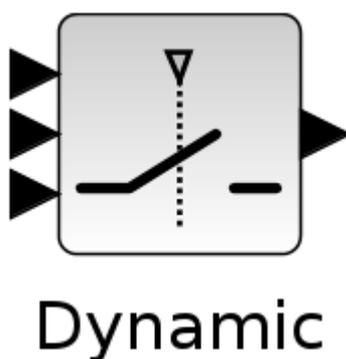


Рис. 38.

39. Установки параметров этого блока в диалоговом окне для нашей модели показаны на рис.

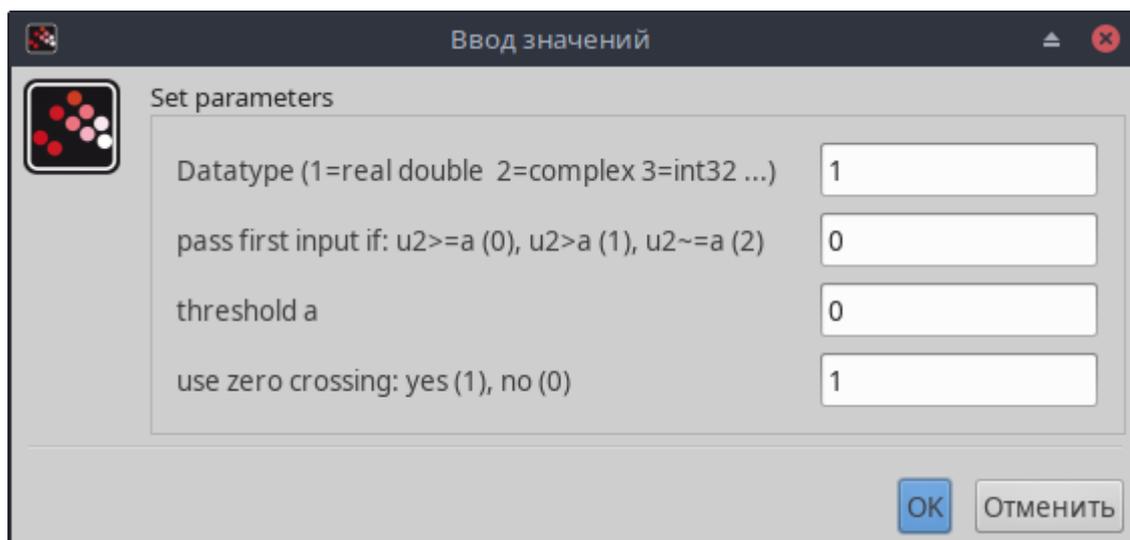
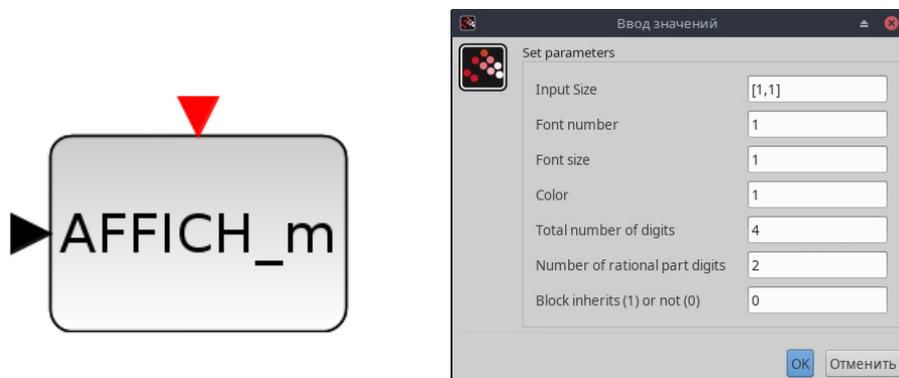


Рис. 39.

Аналогичным образом в блок-схему модели могут быть внесены и другие ограничения сил тяги и торможения, например, по сцеплению колёс с дорогой или рельсами.

Теперь автоматизируем расчёт скорости сообщения, чтобы не рассчитывать её вручную. Давайте переложим этот труд на компьютер с помощью имеющейся компьютерной модели. Для этого используем следующие блоки стандартной библиотеки:

**Блок AFFICH\_m** из раздела «Регистрирующие устройства»

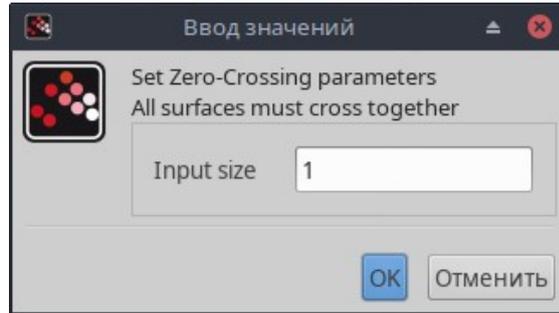
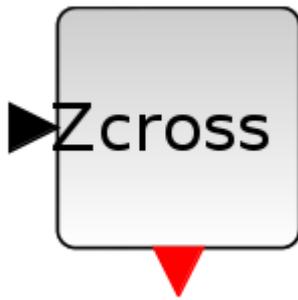


Этот блок выводит на экран числовые значения одной или нескольких моделируемых величин, подаваемых на измерительный вход блока и фиксируемых управляющим сигналом (красный вход) в моменты выбранных событий, например, достижения некоторой величиной нулевого значения или перехода сигнала через нулевое значение. Блок AFFICH\_m при моделировании играет роль цифрового мультиметра при реальных измерениях величин, виртуально фигурирующих в блок-схеме. В нашей модели данный блок будет показывать численное значение скорости сообщения транспортного средства в заданном цикле движения, которое можно вычислить только после выполнения полного цикла. Поэтому для вычисления дополнительно используется сигнал события, отражающий наступление определённого условия. В данном случае это полная остановка ТС, т. е. событие, наступающее при торможении, когда скорость падает до нуля. Для блока можно настроить следующие параметры:

- Input Size – размерность матрицы входных значений;
- Font number – номер шрифта;
- Font size – размер шрифта;
- Color – цвет шрифта;
- Number of rational part digits – количество знаков после запятой;
- Block inherits (1) or not (0) – использование управляющей (событийной) связи с блоком.

Блок AFFICH\_m может использоваться для вывода как скалярных, так и векторных величин. Если отображаемая величина является вектором, то размер блока зачастую необходимо увеличить – растянуть при помощи мыши. Для этого следует выделить блок, подвести курсор мыши к одному из его углов, нажать ЛКМ и, не отпуская ее, растянуть изображение блока до нужных размеров.

**Блок ZCROSS\_f** из раздела «Обнаружение перехода через нуль»



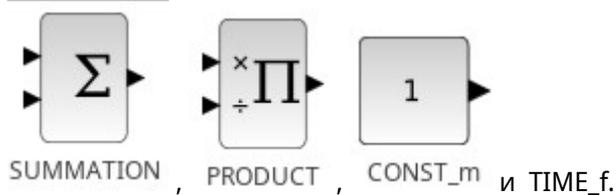
Генерирует на событийном выходе (красный сигнал) управляющий сигнал, когда в процессе моделирования все сигналы на функциональном входе проходят через нуль или сравниваются с нулём.

**Тип входных переменных**

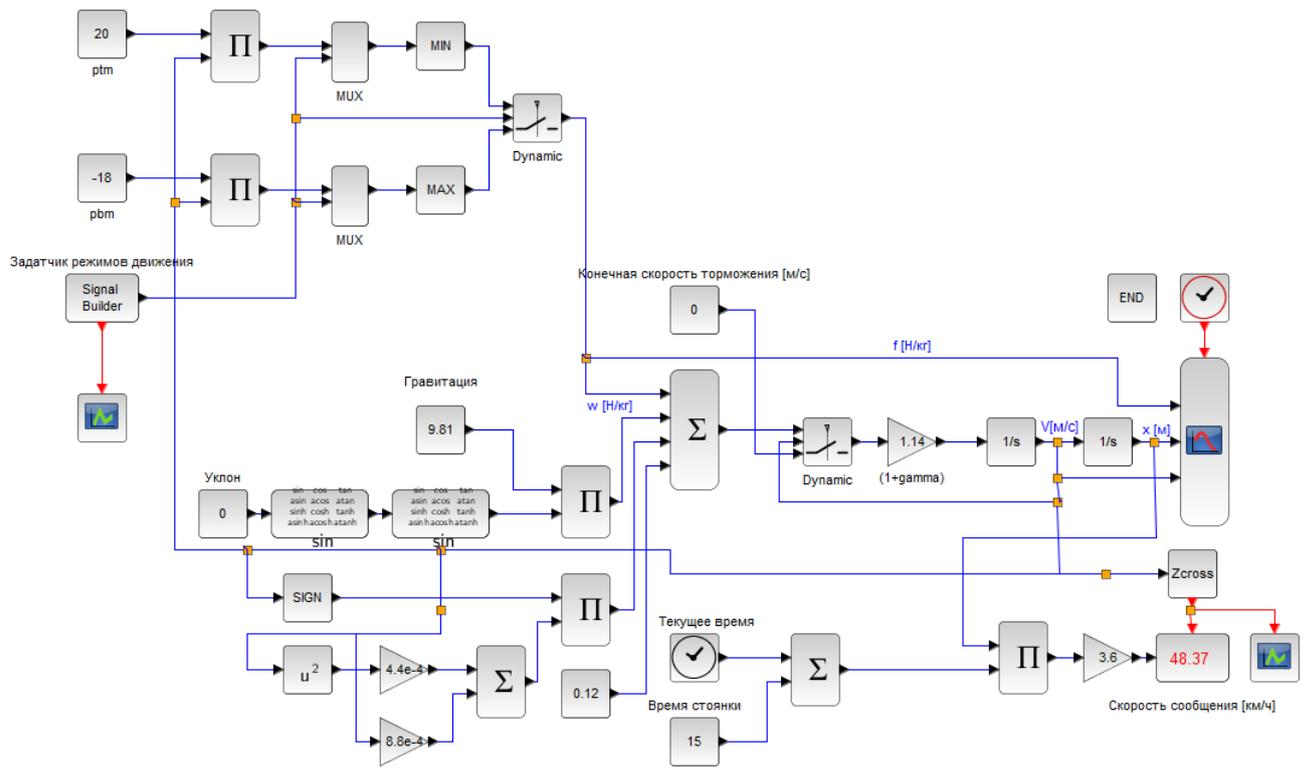
положительное целое.

- Свойства : Тип 'vec' при указании 1

Кроме того используем уже известные блоки :



Результирующая блок-схема имитационной модели движения электромобиля, построенной исходя из анализа теории электромеханического движения, приведена на рис. 40. Установки параметров блока осциллографа CMSCOPE для этой модели показаны на рис. 41.



Блок-схема модели движения электромобиля в условном цикле движения с учётом инерции вращающихся масс и ограничений по мощности и расчётом скорости сообщения

Рис. 40.

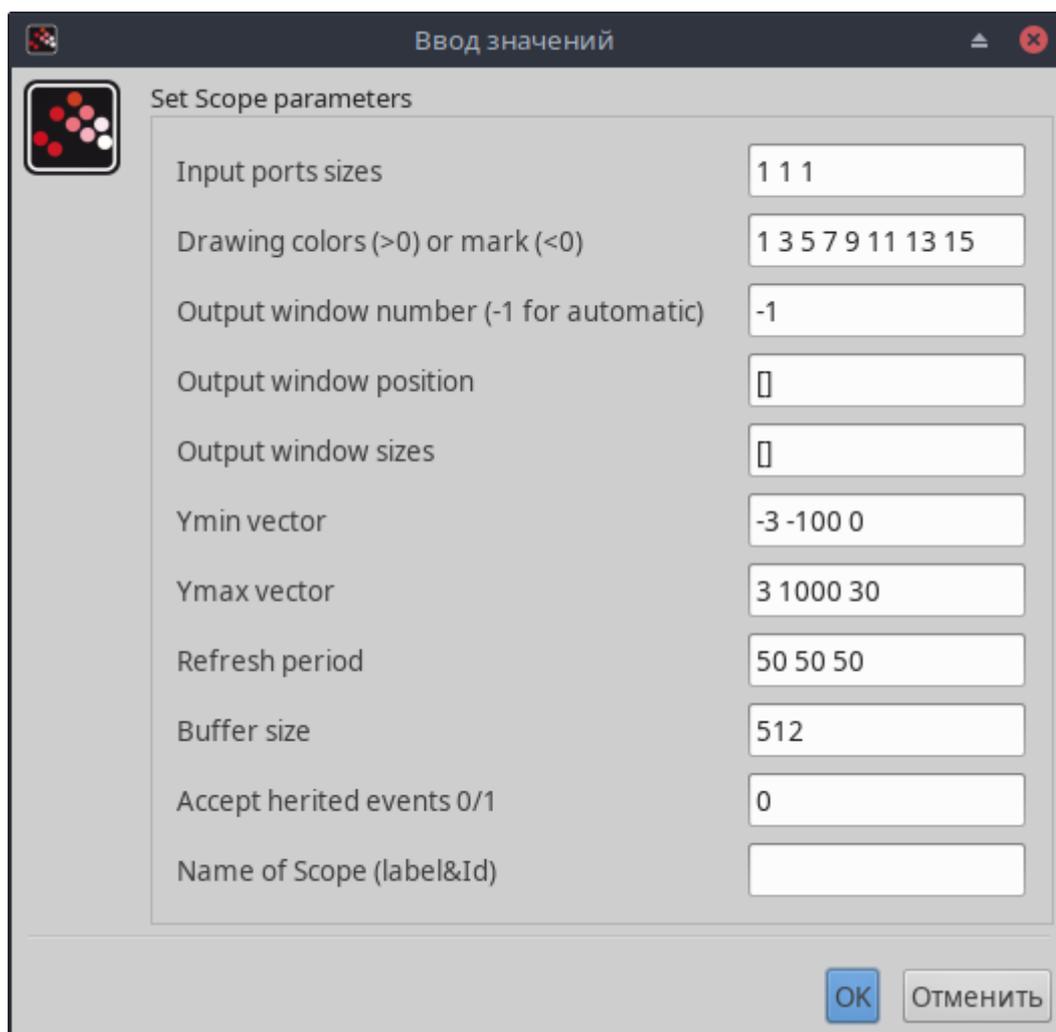


Рис. 41.

Расчёт скорости сообщения происходит следующим образом: Блок RAMP генерирует равномерно текущее время, которое в блоке SUMMATION суммируется со временем стоянки 15 секунд, выдаваемым блоком CONST\_m. Блок PRODUCT вычисляет величину скорости сообщения путём деления текущего значения пути  $x$  на величину текущего суммарного времени цикла, который выводится на дисплей блоком AFFICH\_m в момент времени, определяемым блоком ZCROSS\_f, т. е. когда ТС полностью затормозится (когда скорость  $V$  станет равной нулю).

Результаты имитационного моделирования движения электромобиля с установленными параметрами приведены на рис. 42.

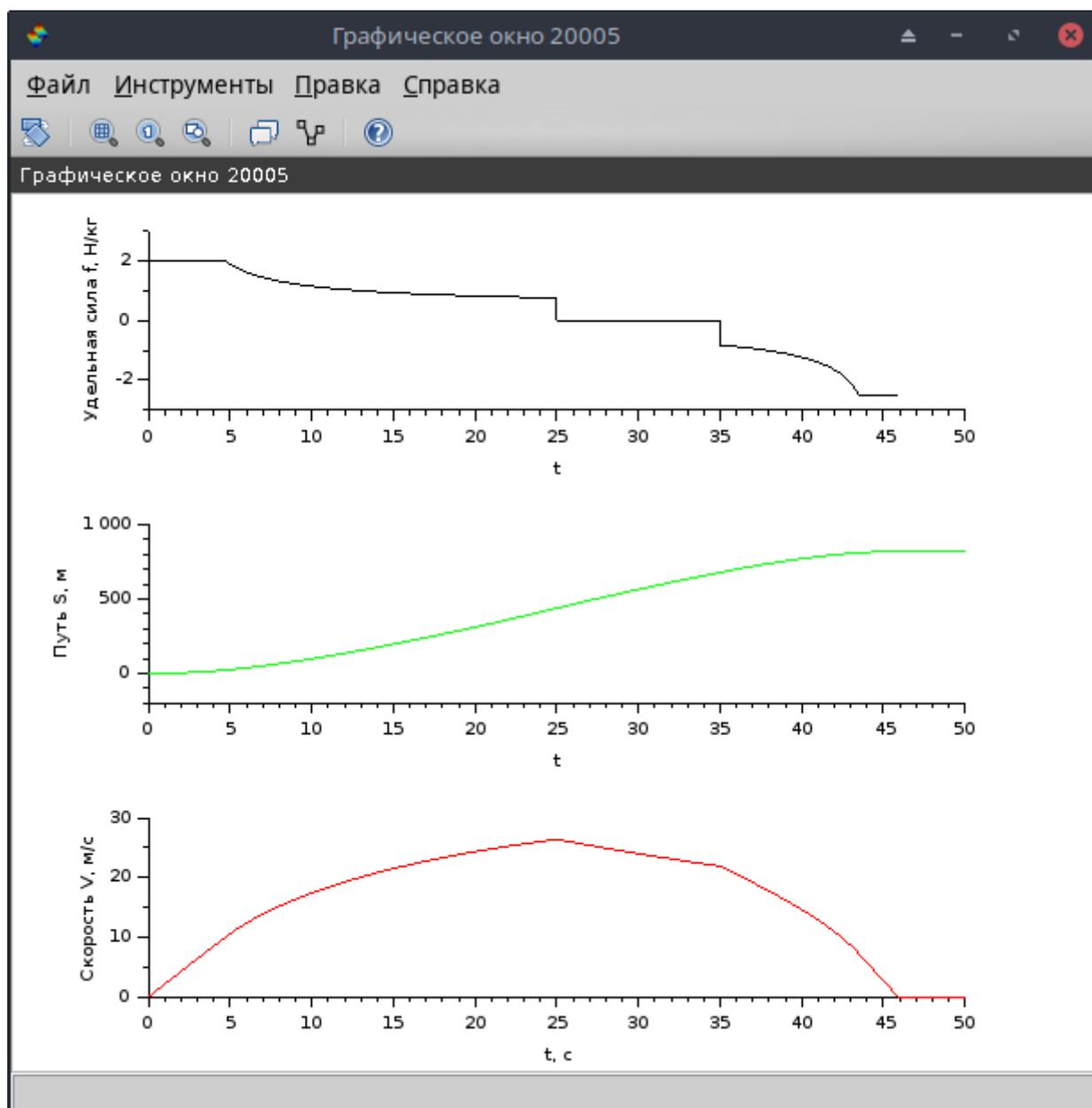


Рис. 42.

Результаты моделирования на рис. 42 оформлены с помощью обозначений моделируемых величин, поясняющих надписей и названий отдельных графиков. Для этого необходимо открыть графическое окно результатов моделирования и выбрать из его главного меню раздел Правка. Из выпавшего списка выбрать «Свойства графического окна ...».

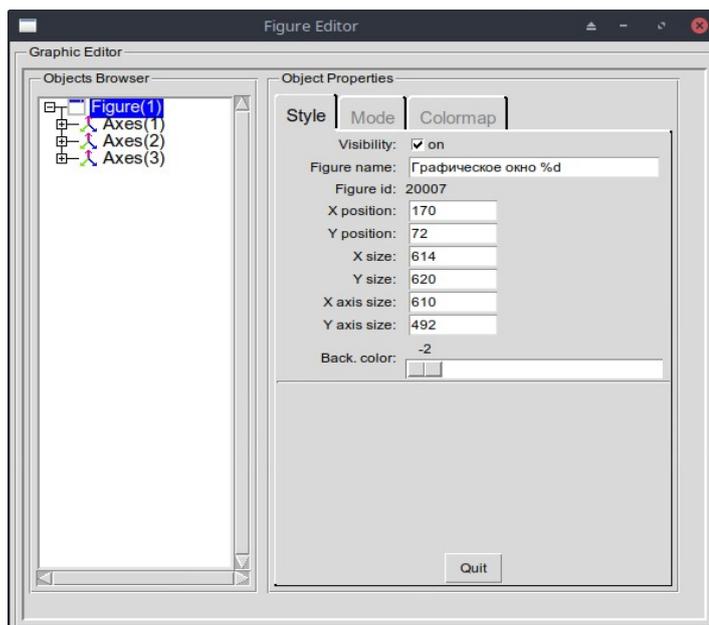


Рис. 43.

В окне браузера объектов (Objects Browser) (см. рис. 43) выбрать первый график «Axes (1)» и в свойствах объекта «Object Properties» выбрать ось x и в панели «Label Options» в строке «Text» ввести название оси «Время t [с]» и нажать «Enter». В панели «Axis Options» включить сетку и установить её цвет в строке «Grid color» (см. рис. 44). Можно также изменить масштаб оси с линейного на логарфмический, изменить шаг значений оси «Ticks...», включить обратное отображение «Reverse» и многое другое. Но мы оставим остальные параметры без изменения. Аналогичным образом внесём имя второй оси и осей на других графиках.

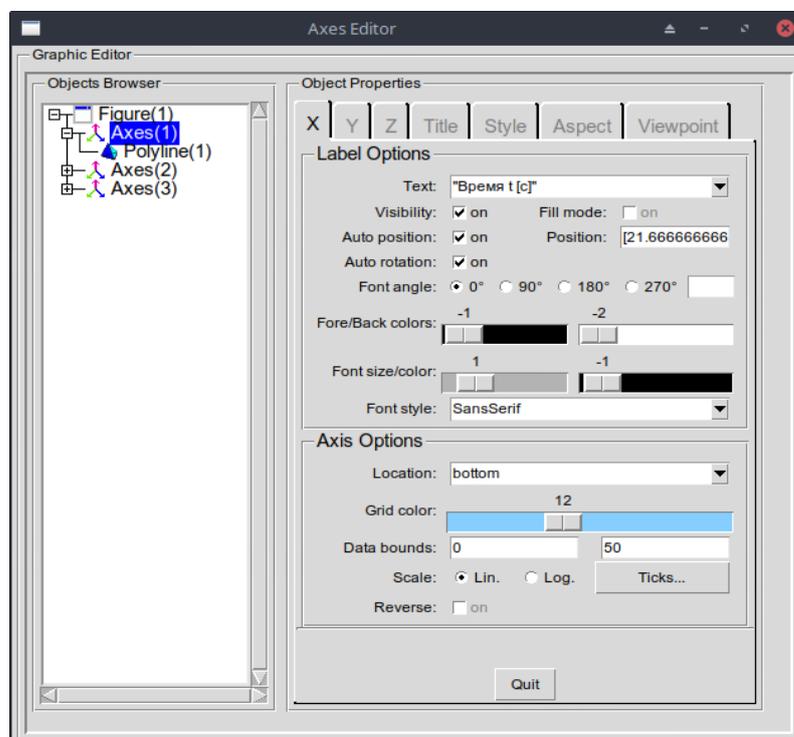


Рис. 44.

При выполнении анализа результатов моделирования часто возникает необходимость указать точное значение моделируемой величины на графике в заданное время или в заданной

координате. Сделать это не составляет большого труда если использовать в главном меню графического окна команду «Переключить режим ярлыка данных». Щёлкните ЛКМ по ярлыку этой команды. Теперь щелчок ЛКМ на любом из графиков создаёт ярлык данных в точке, где Вы щёлкнули ЛКМ. Результат таких действий показан на Рис. 45.

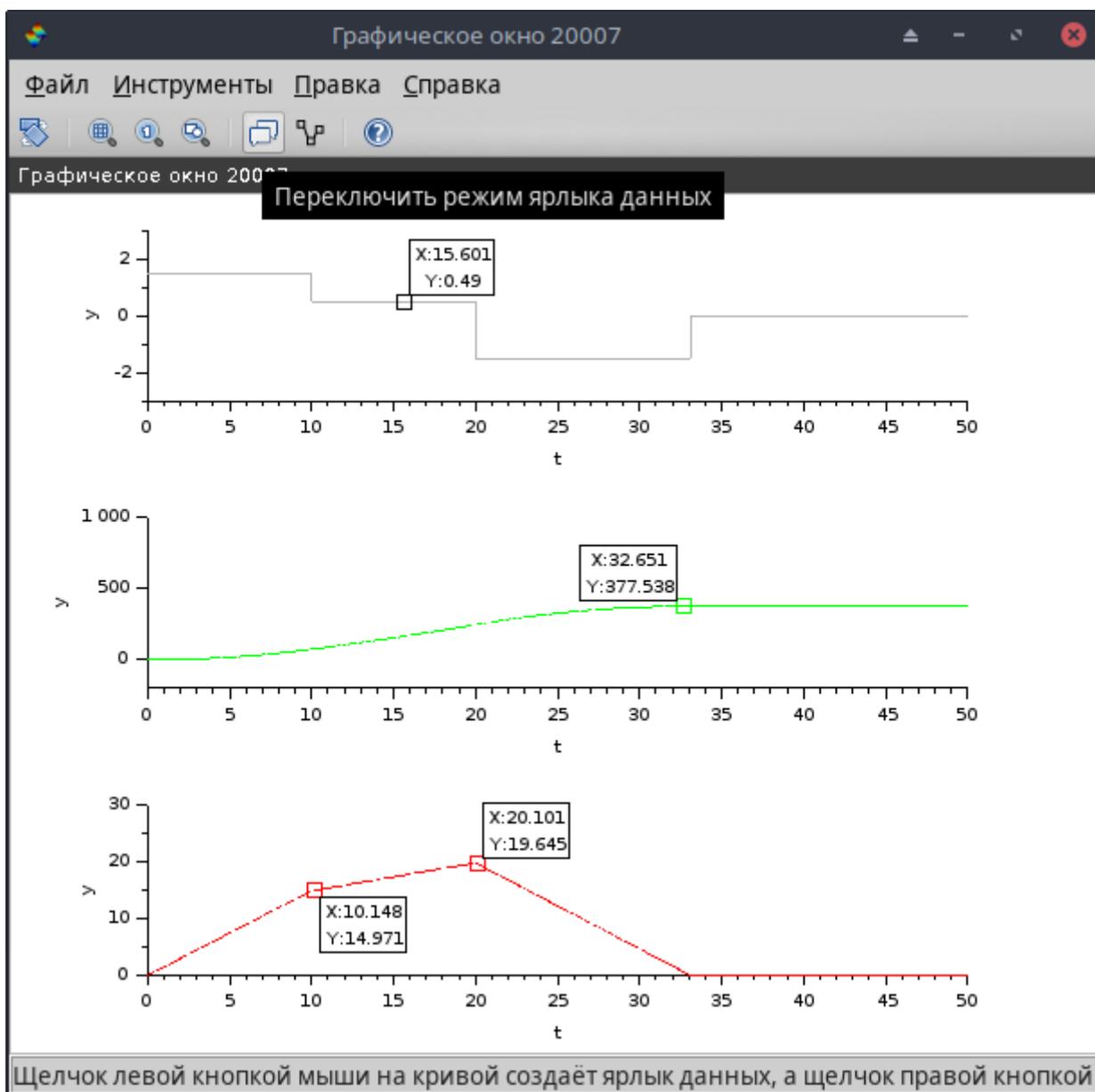


Рис. 45.

Щелчок ПКМ на кривой позволяет удалять созданные ярлыки, а также редактировать график в соответствии с выпадающим меню.