

Евгений Лосев



**ИМИТАЦИОННОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА
НА УЧАСТКАХ
АВТОНОМНОЙ ТЯГИ**

Евгений Лосев

**Имитационное моделирование
движения поезда
на участках автономной тяги**

«Издательские решения»

Лосев Е.

Имитационное моделирование движения поезда на участках автономной тяги / Е. Лосев — «Издательские решения»,

ISBN 978-5-00-569166-8

Рассмотрено имитационное моделирование движения поезда на участках автономной тяги средствами пакета визуального моделирования Xcos. Моделирование выполнено применительно к основным задачам тяги поездов и тяговых расчётов. Книга может быть полезна студентам учебных заведений железнодорожного транспорта и инженерно-техническим работникам, специализирующимся на тяговых расчётах и испытаниях тепловозов.

ISBN 978-5-00-569166-8

© Лосев Е.
© Издательские решения

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. СИЛА ТЯГИ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ	7
1.1. Сила тяги и тяговые характеристики тепловозов	8
1.2. Сила тяги и тяговые характеристики газотурбовозов	11
1.3. Сила тяги и тяговые характеристики паровозов	12
1.4. Построение имитационных моделей тепловозов и паровозов	14
Конец ознакомительного фрагмента.	20

Имитационное моделирование движения поезда на участках автономной тяги

Евгений Лосев

© Евгений Лосев, 2023

ISBN 978-5-0056-9166-8

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

ВВЕДЕНИЕ

Сложные технические процессы математически описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений, которые в общем случае не решаются в аналитическом виде, а использование численных методов решения нередко сопряжено со значительными вычислительными трудностями. Визуальное имитационное моделирование таких процессов позволяет наглядно представить их в виде структурной схемы, состоящей из различных блоков – своего рода «кирпичиков», из которых строится «здание», т. е. моделируемая система. К таким сложным техническим процессам относится и процесс движения поезда, моделированию которого на участках автономной тяги посвящена эта книга.

В книге описаны математические модели, созданные средствами пакета Xcos, входящего в свободно распространяемую программу SciLab и являющегося бесплатным аналогом таких коммерческих пакетов как Simulink и VisSim. Несмотря на это, Xcos не уступает им по своим возможностям, во всяком случае, в рамках решаемых нами здесь задач. Скачать SciLab можно на сайте <https://www.scilab.org/>. Пакет поставляется в версиях для операционных систем Windows, Linux и MacOS.

Структура книги построена следующим образом. В каждой главе рассмотрена группа однотипных задач, решаемых тяговыми расчётами – прикладной частью инженерной дисциплины «Тяга поездов» [1]. В начале главы даётся теоретическое описание задачи; затем приведено построение имитационной модели средствами Xcos; далее представлены результаты моделирования.

Предполагается, что читатель знаком с основами моделирования в среде Xcos или ей аналогичных.

ГЛАВА 1. СИЛА ТЯГИ АВТОНОМНЫХ ЛОКОМОТИВОВ

Сила тяги есть сила реакции рельса F_K , приложенная к колесу в точке его касания рельса и равная по величине и направлению силе, приложенной к центру движущей оси и направленной в сторону направления движения.

Сила тяги F_K , называемая касательной и приложенная к ободу движущих колёс, определяется из условия, что её работа за оборот колеса равна:

для тепловоза – работе газа во всех цилиндрах дизеля за вычетом работы сил сопротивления в самом дизеле (главным образом трения), энергии, затраченной на вспомогательные нужды (компрессор, холодильник, аккумуляторная батарея, вентиляторы и пр.) и работы сил сопротивления в передаточном механизме;

для газотурбовоза – работе газа на лопатках турбины за вычетом работы, затрачиваемой на компрессор, вспомогательные нужды и на преодоление сил сопротивления в передаточном механизме;

для паровоза – работе пара в паровой машине за вычетом работы сил в дышловом механизме.

Сила тяги любого локомотива ограничена сцеплением колеса с рельсом. Это значит, что сила тяги не может превышать силу сцепления, иначе возникнет боксование. Математически это выражается так:

$$F_K \leq 1000\psi_K P_{\text{сц}}, \text{ кгс (1)}$$

где $P_{\text{сц}}$ – сцепной вес, тс – сумма нагрузок от всех движущих осей на рельсы; ψ_K – коэффициент сцепления.

1.1. Сила тяги и тяговые характеристики тепловозов

Расчётный коэффициент сцепления для тепловозов определяется по эмпирической формуле вида

$$\psi_k = a + b / (c + v), \quad (2)$$

где

a , b и c – коэффициенты, зависящие от серии тепловоза;

v – скорость движения, км/ч.

Подставив (2) в (1), определяем силу тяги по сцеплению.

Кроме ограничения по сцеплению сила тяги тепловоза также ограничивается мощностью дизеля и электрической передачи.

Сила тяги по дизелю определяется выражением

$$F_k = 0,094 d_{ц}^2 l m p_i n_{\delta} \eta_M \beta_{всп} \eta_{пер} / v \tau, \quad \text{кгс} \quad (3)$$

где

$d_{ц}$ – диаметр цилиндров, см;

l – ход поршней, м;

m – число цилиндров дизеля;

p_i – среднее индикаторное давление, кгс/см²;

n_{δ} – частота вращения коленвала, об/мин;

η_M – механический к. п. д. дизеля, учитывающий потери только в самом дизеле;

$\beta_{всп}$ – коэффициент, учитывающий расход мощности на вспомогательные нагрузки;

$\eta_{пер}$ – к.п.д. электрической передачи;

τ – тактность дизеля: 2 – двухтактный; 4 – четырёхтактный.

Сила тяги по передаче определяется как

$$F_k = 367 I_{Г} U_{Г} \eta_{д} \eta_{z} / v, \quad \text{кгс} \quad (4)$$

где

$I_{Г}$ – ток главного генератора, А;

$U_{Г}$ – напряжение главного генератора, В;

$\eta_{д}$ – к.п.д. тягового электродвигателя;

η_{z} – к.п.д. зубчатой передачи.

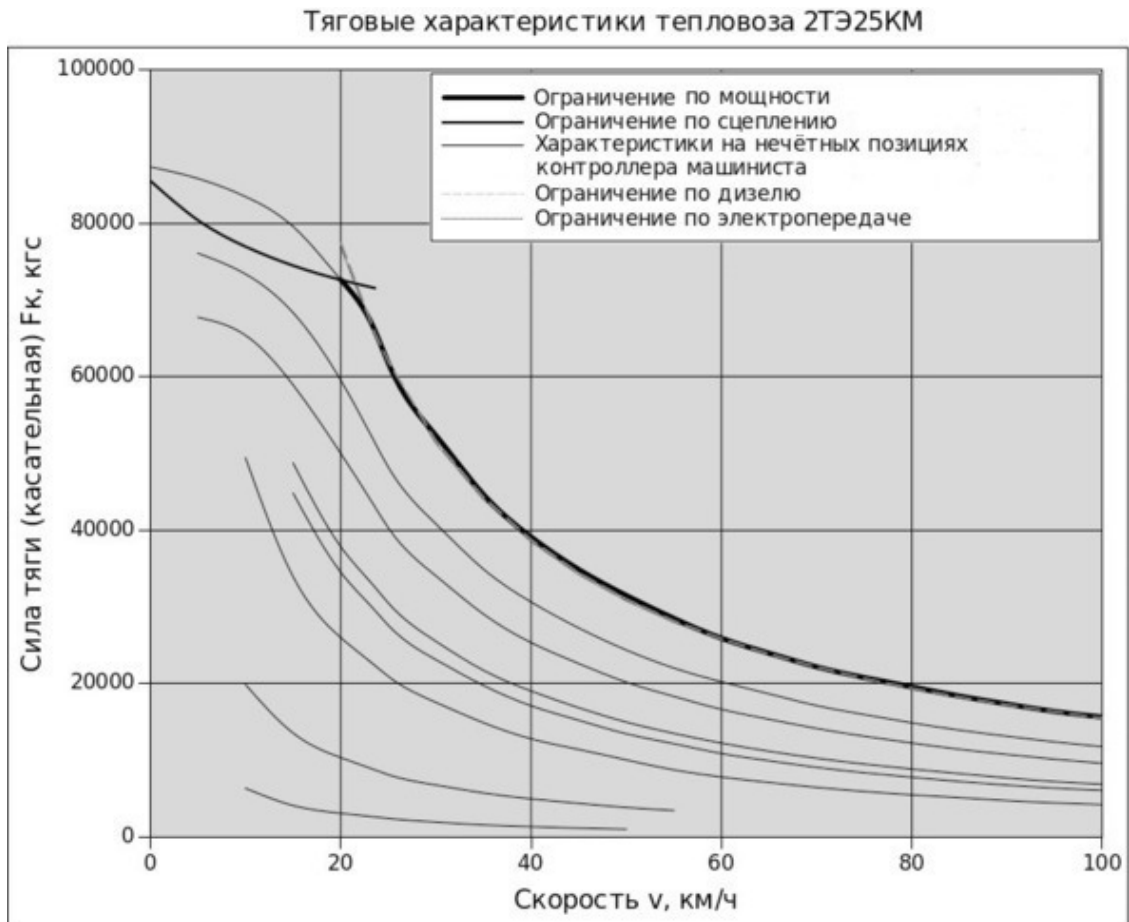


Рис. 1.1.1

Сила тяги по электрической передаче ограничивается величиной тока, вызывающего перегрев обмоток главного генератора или тяговых электродвигателей выше допустимого.

Тяговые характеристики тепловозов различных серий приводятся в Правилах тяговых расчётов для поездной работы (ПТР) [2] или в технической документации завода-изготовителя.

Паспортные тяговые характеристики тепловозов 2ТЭ25КМ, 2ТЭ116У и ТЭП70 показаны на рис. 1.1.1 – 1.1.3.

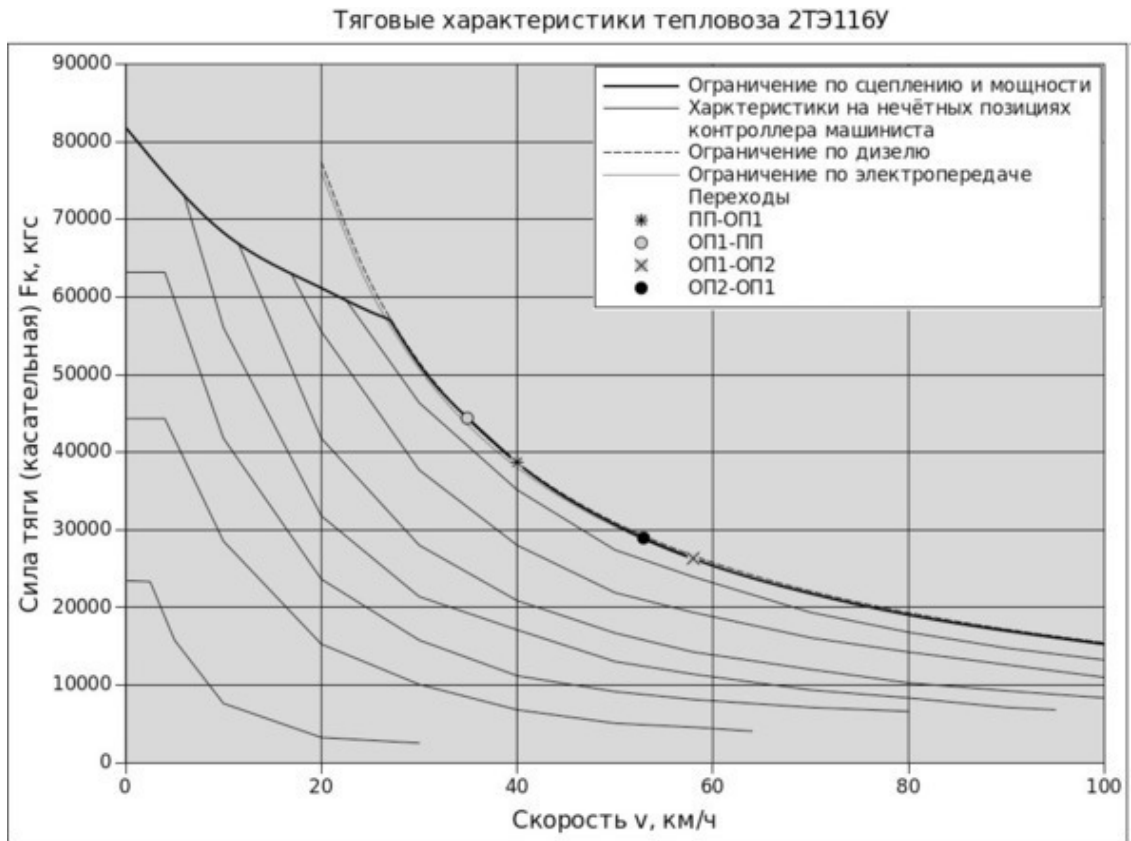


Рис. 1.1.2

1.2. Сила тяги и тяговые характеристики газотурбовозов

Сила тяги газотурбовозов с электрической передачей постоянного, постоянно-переменного и переменного тока с частотным регулированием имеет те же ограничения, что и рассмотренные в предыдущем параграфе. Тяговые характеристики газотурбовозов с такими «эластичными» передачами также схожи с тепловозными.

При механической передаче или жёсткой передаче переменного тока (при свободной тяговой турбине) тяговая характеристика как бы копирует моментную характеристику тяговой турбины. Простейшая одно- или двухступенчатая газовая турбина имеет практически линейную моментную характеристику, а следовательно, газотурбовоз с такой турбиной имеет также линейную тяговую характеристику, причём обычно ограничение по сцеплению лежит значительно выше силы тяги при частоте вращения турбины и, соответственно, скорости движения $v = 0$.

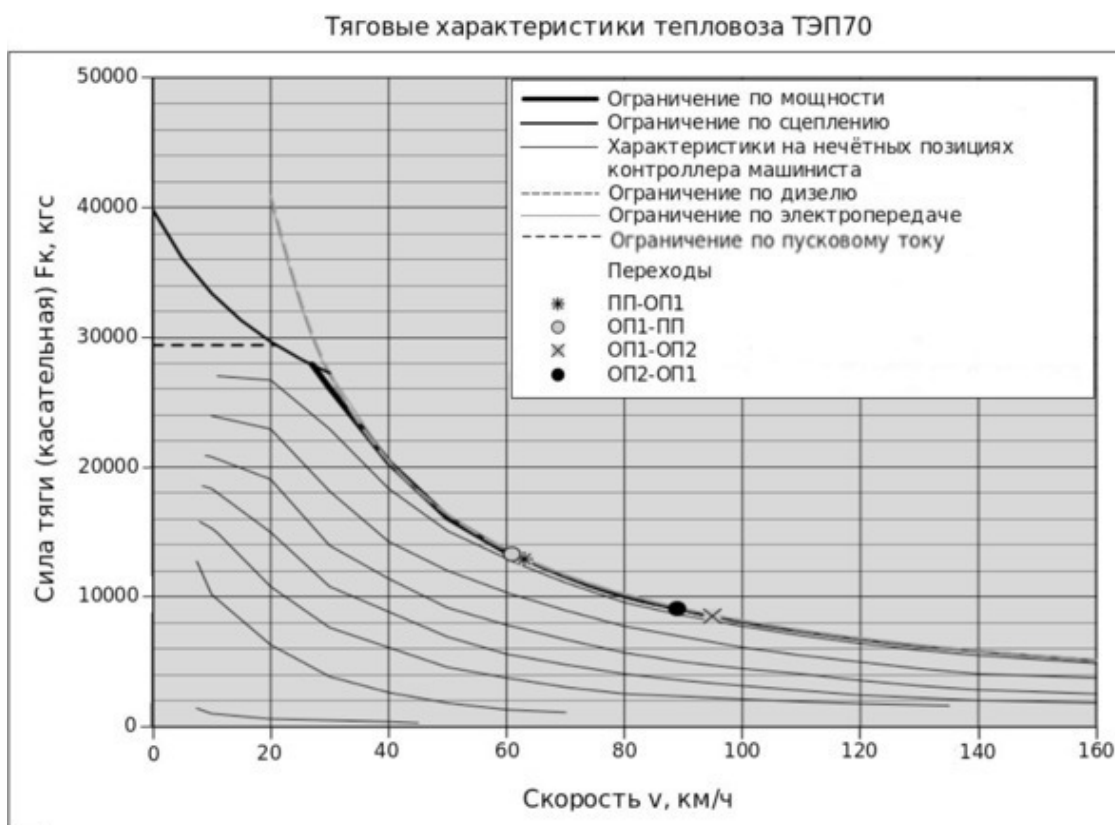


Рис. 1.1.3

Приближение тяговой характеристики к гиперболической осуществляется либо введением одной или нескольких ступеней скорости, либо за счёт улучшения характеристики турбины применением различных программ регулирования, в частности, поворотом лопаток. При нерегулируемых проточных частях близкую к гиперболической характеристику можно получить за счёт форсирования турбокомпрессорной части на нерасчётных режимах, увеличивая скорость вращения вала турбокомпрессора при изменении скорости тяговой турбины [3].

1.3. Сила тяги и тяговые характеристики паровозов

В последнее время интерес к казалось бы навсегда ушедшим в историю паровозам вновь возрос в связи с организацией ретро-туров для любителей паровой тяги. Кроме того, по распоряжению РЖД, в России поддерживается небольшой парк горячих паровозов в нескольких локомотивных депо (в специально выделенных для этих целей цехах). Аналогичное положение существует и на Украине.

Расчётный коэффициент сцепления для паровозов согласно ПТР определяется по формуле

$$\psi_k = 30 / (100 + v). \quad (5)$$

Кроме ограничения по сцеплению, у паровозов сила тяги ограничивается паропроизводительностью котла (ограничение силы тяги по котлу) и машиной.

Сила тяги по котлу имеет следующую зависимость:

$$F_k = 270 z_M H / (U/N_k) / v, \text{ кгс} \quad (6)$$

где

z_M – форсировка котла, отнесённая к пару, поступающему в машину, кг/м²/ч;

H – испаряющая поверхность нагрева котла, м²;

U/N_k – расход пара машиной, кг/лсч.

Сила тяги по машине определяется выражением

$$F_k = M \xi \eta_M, \text{ кгс} \quad (7)$$

где

$M = (d_c^2 - (d_{ш}^2 - d_{кш}^2) / 2) l m p_k / (2D)$ – модуль силы тяги;

d_c – диаметр цилиндров, см;

$d_{ш}, d_{кш}$ – диаметр штоков и контрштоков, см;

l – ход поршней, см;

m – число цилиндров;

p_k – котловое давление, кгс/см²;

D – диаметр движущих колёс, см;

$\xi = p_i / p_k$ – коэффициент индикаторного давления;

p_i – индикаторное давление, кгс/см²;

η_M – механический к. п. д. машины.

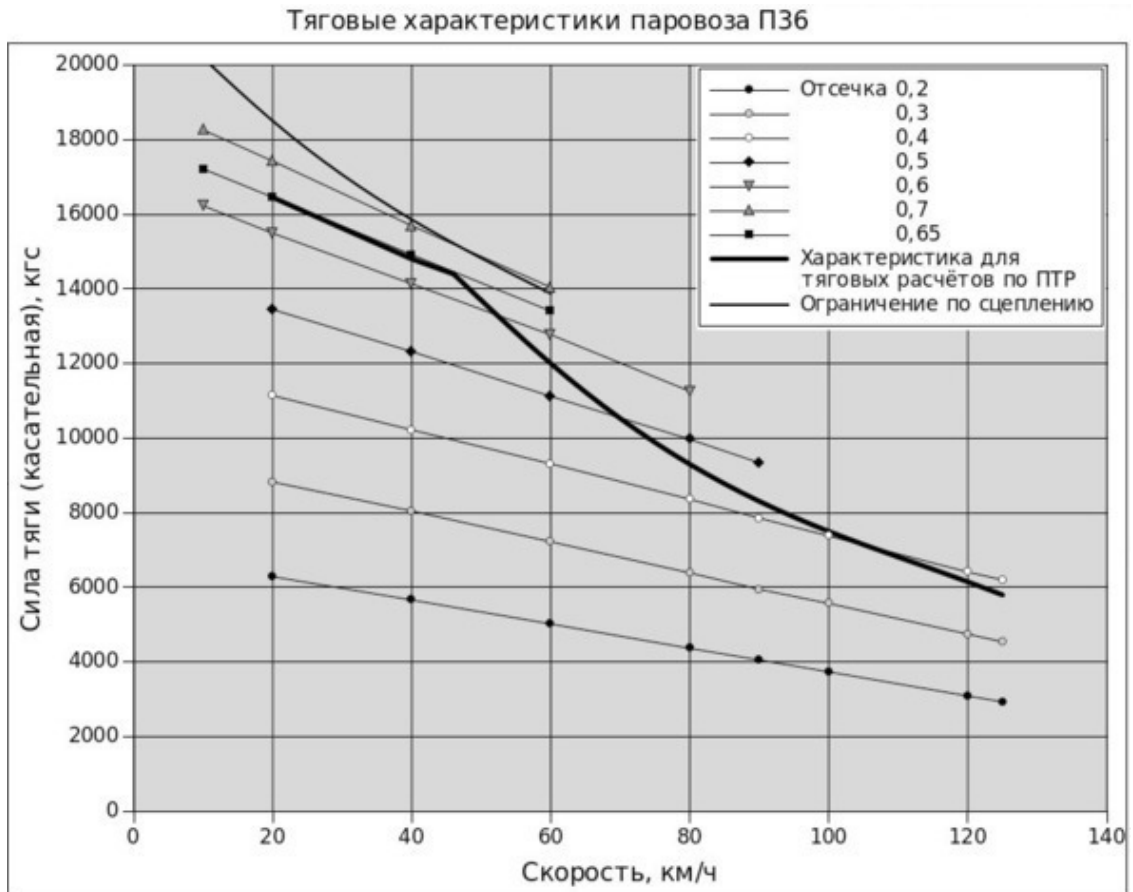


Рис. 1.3.1

Коэффициент индикаторного давления для паровозов, работающих на перегретом паре равен [4]:

$$\xi(\varepsilon) = (1,3\varepsilon - \varepsilon^{1,3}) / 0,3.$$

Добавляя зависимость от скорости, это выражение можно преобразовать к следующему виду:

$$\xi(v, \varepsilon) = \{1,3 [\varepsilon + a(\varepsilon)v] - \varepsilon^{1,3+b(\varepsilon)v}\} / [0,3 + c(\varepsilon)v], \quad (8)$$

где ε – величина отсечки (доля хода поршня, в течение которой происходит поступление пара в паровую машину);
 $a(\varepsilon)$, $b(\varepsilon)$, $c(\varepsilon)$ – коэффициенты, зависящие от серии паровоза и отсечки.

Тяговые характеристики различных серий паровозов приводятся в ПТР. Паспортные тяговые характеристики паровоза ПЗ6 показаны на рис. 1.3.1.

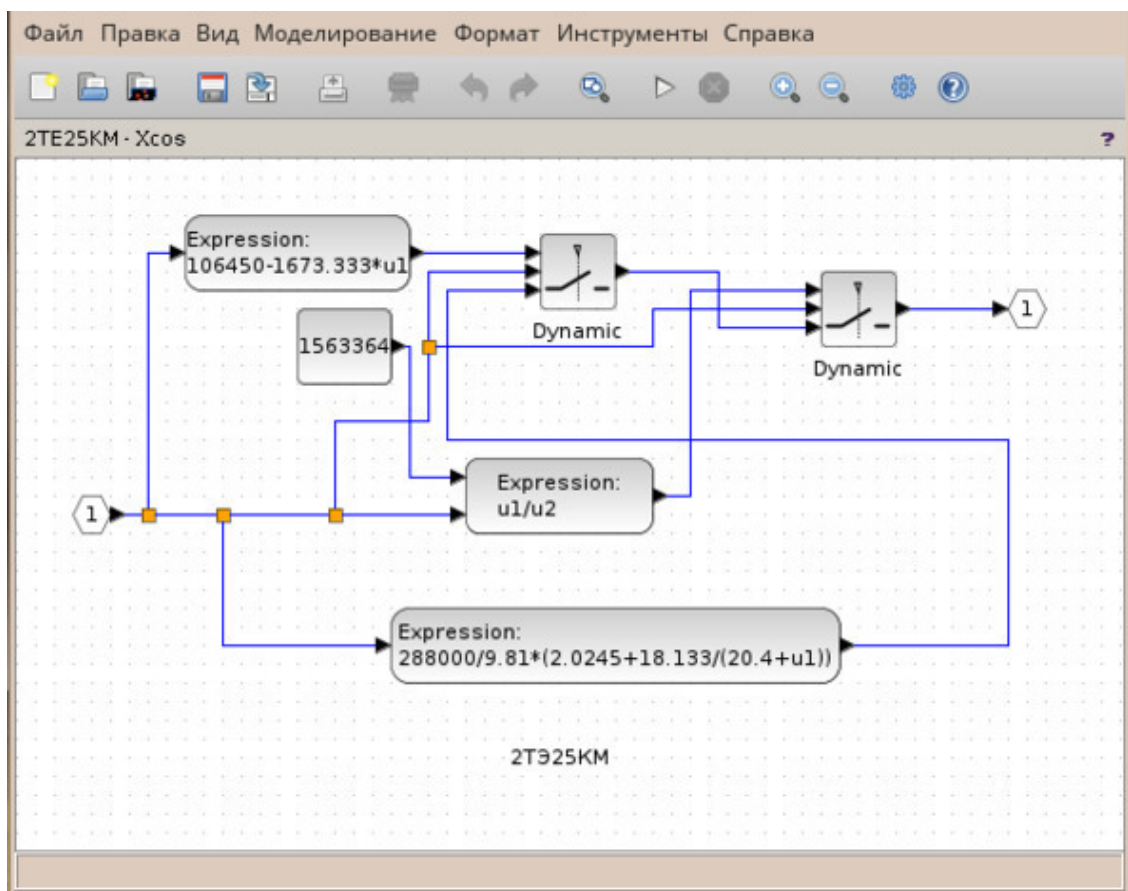
1.4. Построение имитационных моделей тепловозов и паровозов

Грузовые тепловозы 2ТЭ25КМ, 2ТЭ116У и пассажирский ТЭП70 оборудованы четырёхтактным шестнадцатцилиндровым дизелем 16ЧН26/26 номинальной мощностью 3600/4000¹ л.с. (2650/2940 кВт). Ход поршня равен диаметру цилиндра и составляет 26 см. Среднее индикаторное давление 16,4/18,2 кгс/см², частота вращения коленвала при номинальной мощности 1000 об/мин.

Имитационные модели должны формировать тяговую характеристику локомотивов со всеми имеющимися ограничениями. На вход подаётся скорость, при этом на выходе получается сила тяги.

Для создания модели нам понадобятся следующие блоки из палитры стандартных блоков: *IN_F*, *Expression*, *CONST_m*, *SWITCH2_m*, *OUT_F*.

Модель тепловоза 2ТЭ25КМ, построенная в программе Xcos, представлена на рис. 1.4.1. Через входной порт (*IN_F*) 1 подаётся скорость движения тепловоза v . Далее полученный сигнал разветвляется на три ветви, идущие к блокам *Expression* (математическое выражение, записанное на языке SciLab): 1) блок, описывающий характеристику в зоне $[v_{\text{пор}} \dots v_{\text{НОМ}}]$, где $v_{\text{пор}}$ – скорость порога, $v_{\text{НОМ}}$ – скорость выхода на номинальную мощность; 2) блок, описывающий ограничение по сцеплению; 3) блок, описывающий характеристику после выхода на номинальную (полную) мощность.



¹ Данные в числителе относятся к 2ТЭ25КМ и 2ТЭ116У, в знаменателе – к ТЭП70.

Рис. 1.4.1

Чтобы ввести требуемое выражение и другие параметры в блок *Expression* надо либо дважды щёлкнуть по блоку левой кнопкой мыши, либо один раз правой кнопкой и в раскрывшемся меню выбрать пункт *Параметры блока*. Участок характеристики от скорости порога до скорости выхода на полную мощность аппроксимируем выражением $F_k = 1064050 - 1673,333v$. После ввода параметров и самого выражения окно *Ввод значений* выглядит так, как показано на рис 1.4.2.

Сила тяги тепловоза по сцеплению, выраженная в кгс, при сцепной массе 288 т описывается формулой, которая высвечивается во втором блоке *Expression* после её введения в этот блок (рис. 1.4.1). Остальные параметры те же, что и в первом блоке.

Сила тяги тепловоза по мощности дизеля определяется по формуле (2), которая после ввода соответствующих значений принимает вид $F_k=1563364/v$. Третий блок *Expression* имеет два входа, что надо указать при вводе параметров. На первый вход подаётся константа 1563364 из блока *CONST_m*, на второй – скорость. В *SciLab expression* вводится $u1/u2$ (рис. 1.4.3).

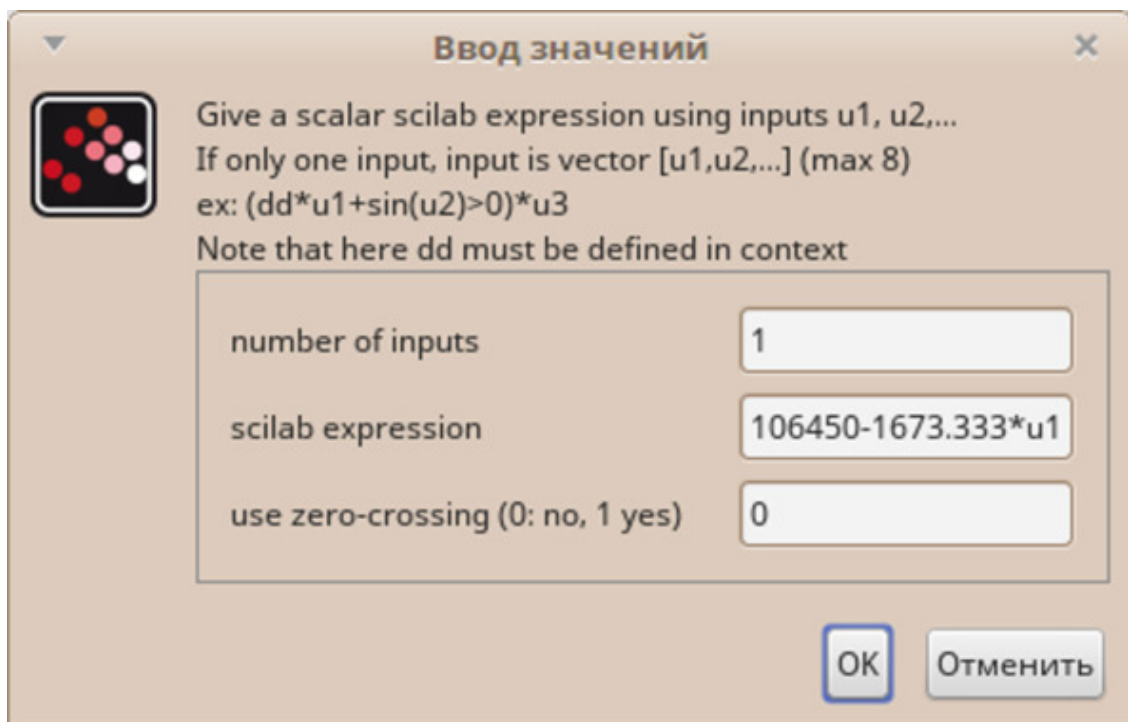


Рис. 1.4.2

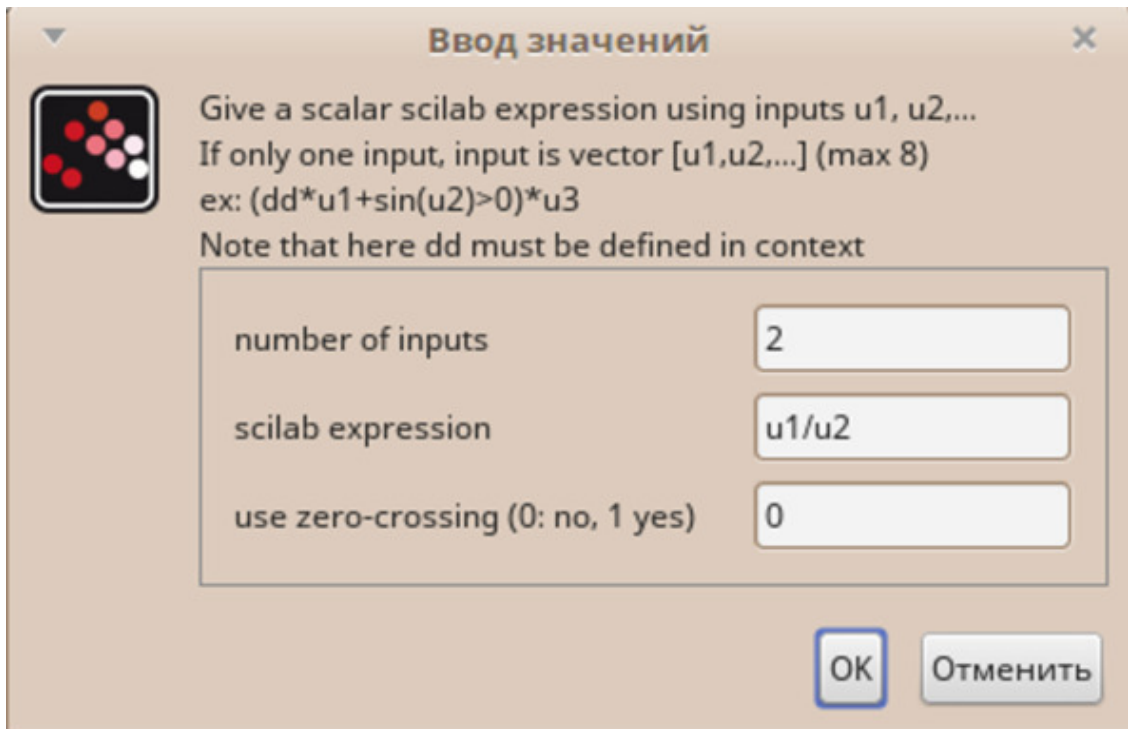


Рис. 1.4.3

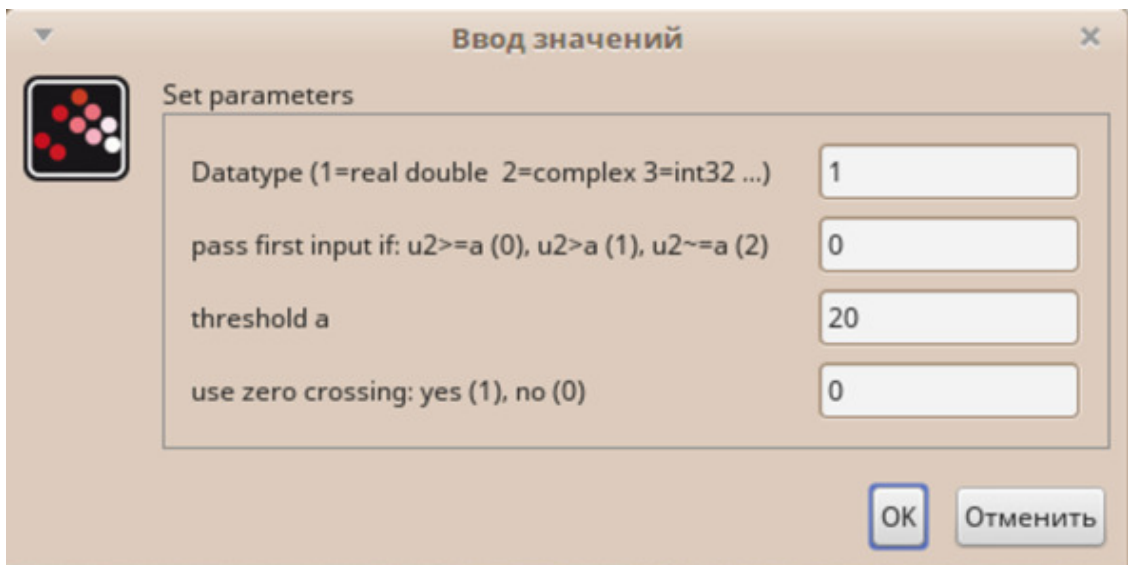


Рис. 1.4.4

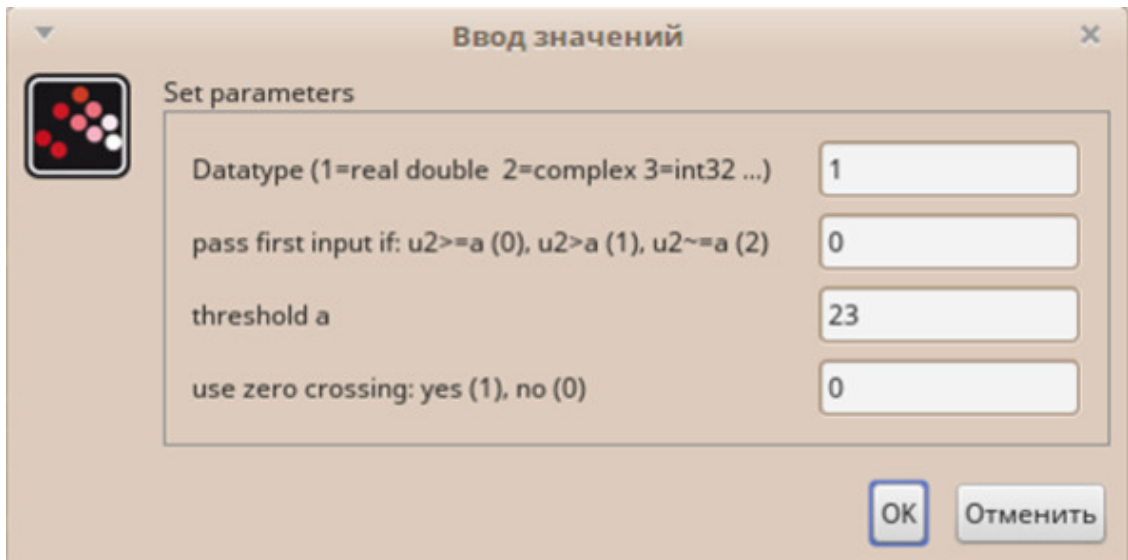


Рис. 1.4.5

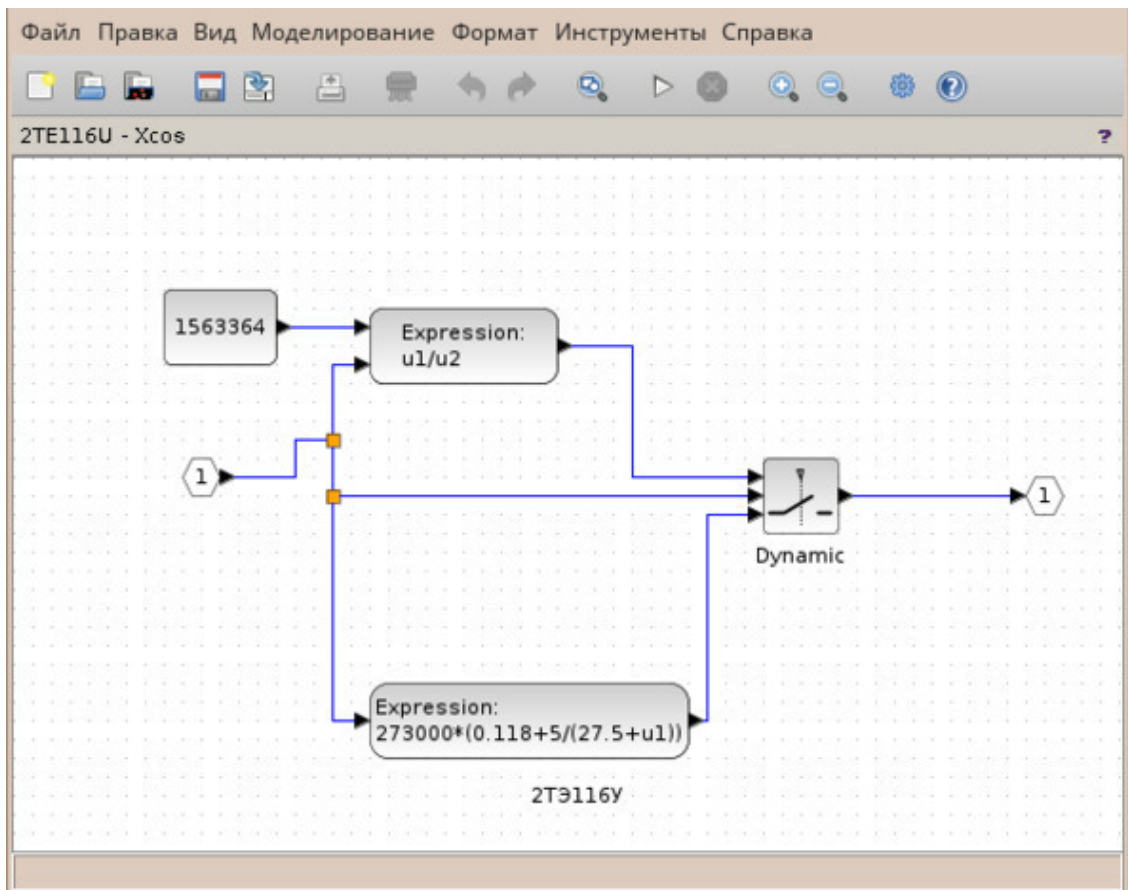
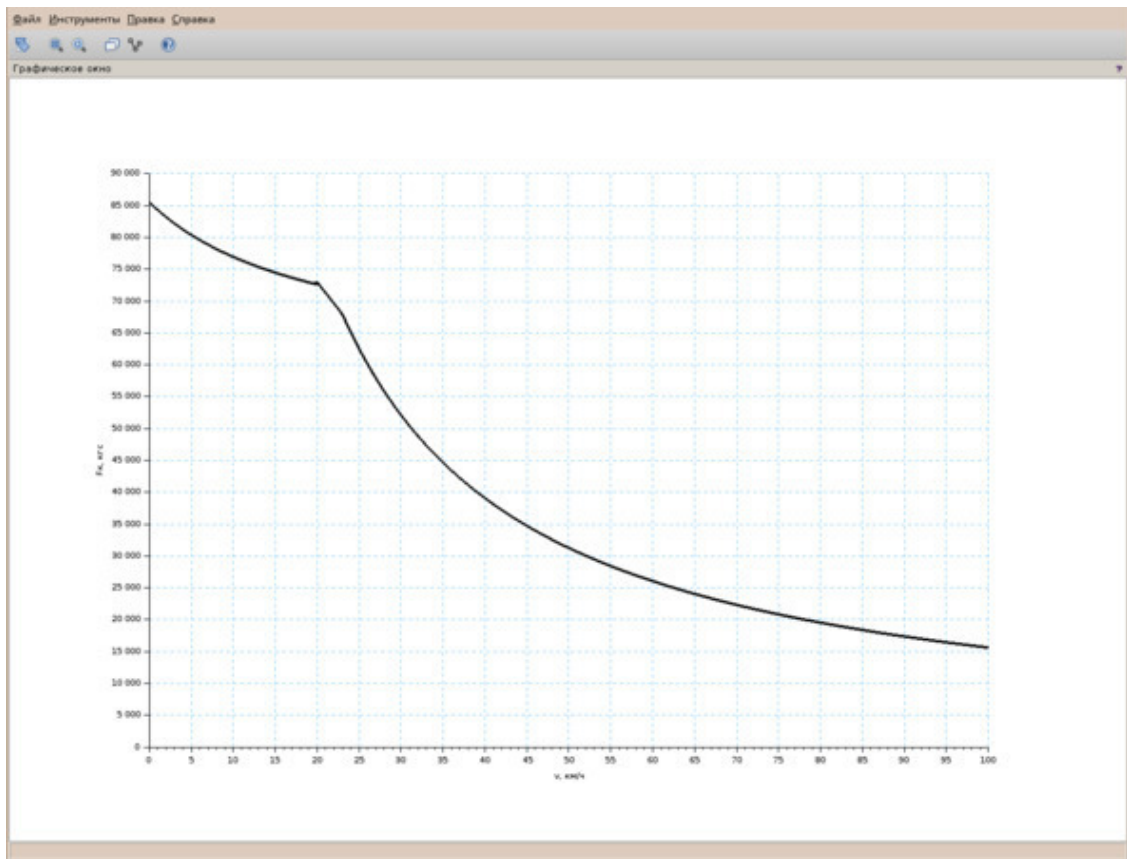


Рис. 1.4.6

Посредством блоков переключения *Dynamic SWITCH2_m* осуществляется выбор одной из характеристик, описанных в блоках *Expression*. В модели тепловоза 2ТЭ25КМ их два. На входы 1 и 3 подаётся сигнал от блоков *Expression* как показано на рис. 1.4.1. На вход 2 подаётся скорость v . Окно *Ввод значений* после ввода необходимых параметров выглядит для первого блока как показано на рис. 1.4.4., для второго – рис. 1.4.5.



1.4.8

Также аналогичным образом построены и модели тепловозов 2ТЭ116У и ТЭП70. Отличия заключаются в следующем. У тепловоза 2ТЭ116У отсутствует линейный участок тяговой характеристики, поэтому в модели имеются только два блока *Expression* и один блок переключения. В блоке *Expression* для ограничения по сцеплению – своя формула (рис. 1.4.6), отличная от 2ТЭ25КМ (рис. 1.4.1). Скорость переключения равна 27 км/ч. Вид тяговой характеристики и, соответственно, структура модели тепловоза ТЭП70 в зоне скоростей [21...160] км/ч сходна с 2ТЭ25КМ и отличается только числовыми значениями (рис. 1.4.7): константа равна 817943, линейный участок тяговой характеристики аппроксимирован выражением $F_k = 43490 - 577,9v$, ограничение по сцеплению вычисляется по формуле в нижнем блоке *Expression*. В зоне [0...21] км/ч сила тяги ограничена величиной пускового тока и составляет 29400 кгс. В соответствии с этим скорости переключения верхнего свитча – 21, нижнего левого – 27 и нижнего правого – 40 км/ч.

Созданные модели тепловозов будут использоваться в общей модели интегрирования дифференциального уравнения движения поезда. Поэтому их удобно оформить в виде отдельных суперблоков, которые потом можно вставлять в общие модели.

Результаты моделирования тепловозов 2ТЭ25КМ, 2ТЭ116У и ТЭП70 представлены на рис. 1.4.8 – 1.4.10. Как видно, полученные в результате моделирования тяговые характеристики тепловозов рассматриваемых серий практически совпадают с паспортными характеристиками (рис. 1.1.1 – 1.1.3).

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.