

Направление подготовки: 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Наименование образовательной программы: Электрический транспорт

Уровень образования: бакалавриат

Форма обучения: очная

Дисциплина:

"Моделирование устройств электрической тяги"

Комаров В.Г. Лабораторная работа №2 10.09.2026 г.

Программная реализация системной компьютерной модели электрического транспортного средства

На этом занятии мы будем создавать обобщённую компьютерную модель движения ТС в виде функции, связывающей переменную координаты пути x со временем t в зависимости от сил тяги и торможения $F(t)$ или $F(x)$, сопротивления движению $W(x)$ и уклона пути $i(x)$

$$x(t) = f(F(t), W(x), i(x)) \quad .$$

Ясно, что силы, входящие в функцию $x(t)$ сами являются функциями, отражающими сложные процессы, связанные с движением транспортного средства. Поэтому их можно рассматривать, как модули или подсистемы модели транспортного средства. Рассмотрим их по порядку.

1. Модуль основного сопротивления движению w

Основное сопротивление движению соответствует движению на горизонтальном прямолинейном участке пути для земных транспортных средств или на тихой свободной воде при прямолинейном движении для электросудов.

Для предварительных расчётов можно считать, что удельное сопротивление движению w зависит от скорости движения V в соответствии с формулой

$$w = w_0 + k_1 \cdot V + k_2 \cdot V^2 \text{ Н/кг},$$

где значения коэффициентов зависят от вида транспортного средства и приведены в табл. 1.

Следует учесть, что для электросудов приведённая формула справедлива до скоростей, определяемых критерием подобия волнообразования Фруда

$$V \leq 0.15 \cdot \sqrt{g \cdot L} \quad \text{м/с},$$

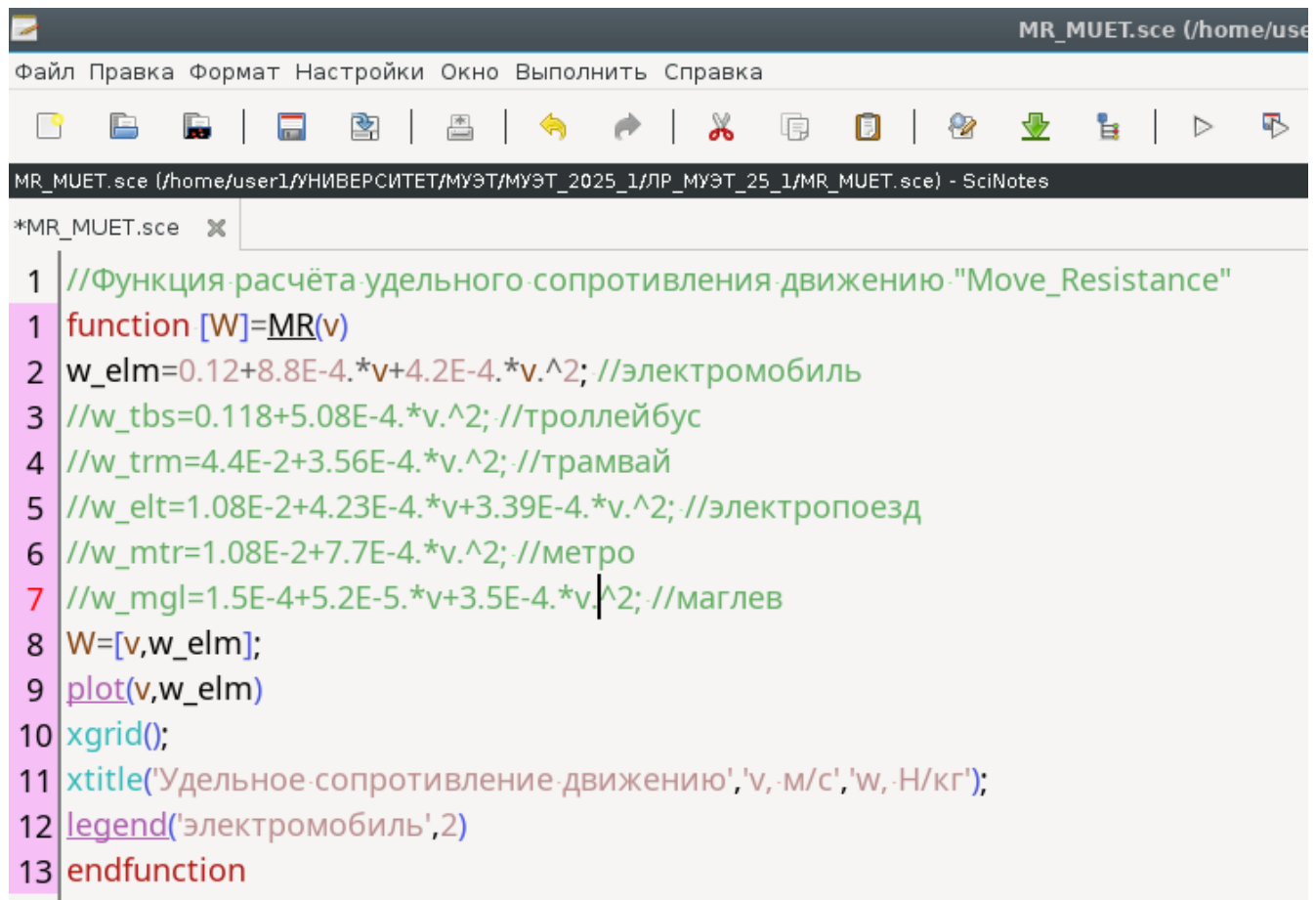
где g — ускорение свободного падения, м/с^2 ,

L - длина корпуса судна, м.

Таблица 1.

Вид транспортного средства	W_0 , Н/кг	K_1 , Н·с/кг·м	K_2 , Н·с ² /кг·м ²	Примечание
Электромобили, экомобили	0,12	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	На автомобильных дорогах первой и второй категории качества
Электробусы, экобусы, троллейбусы	0,118	0	$5,08 \cdot 10^{-4}$	
Трамваи	$4,4 \cdot 10^{-2}$	0	$3,56 \cdot 10^{-4}$	
Электропоезда	$1,08 \cdot 10^{-2}$	$4,23 \cdot 10^{-4}$	$3,39 \cdot 10^{-4}$	
Поезда метро	$1,08 \cdot 10^{-2}$	0	$7,7 \cdot 10^{-4}$	При максимальном заполнении
	$1,08 \cdot 10^{-2}$	0	$1,2 \cdot 10^{-3}$	Порожний состав
МАГЛЕВ (HSST)	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	
Электросуда	0	0	$7,25 \cdot 10^{-3}$	При $V \leq 0.15 \cdot \sqrt{g \cdot L}$ м/с

Сценарий (скрипт) функции будем создавать в редакторе SciNotes, создавая программу, соответствующую шаблону обобщённого вычисления удельного сопротивления движению транспортных средств (рис. 1).



```

MR_MUET.sce (/home/user1/УНИВЕРСИТЕТ/МУЭТ/МУЭТ_2025_1/ЛР_МУЭТ_25_1/MR_MUET.sce) - SciNotes
*MR_MUET.sce
1 //Функция расчёта удельного сопротивления движению "Move_Resistance"
1 function [W]=MR(v)
2 w_elm=0.12+8.8E-4.*v+4.2E-4.*v.^2; //электромобиль
3 //w_tbs=0.118+5.08E-4.*v.^2; //троллейбус
4 //w_trm=4.4E-2+3.56E-4.*v.^2; //трамвай
5 //w_elt=1.08E-2+4.23E-4.*v+3.39E-4.*v.^2; //электropоезд
6 //w_mtr=1.08E-2+7.7E-4.*v.^2; //метро
7 //w_mgl=1.5E-4+5.2E-5.*v+3.5E-4.*v.^2; //маглев
8 W=[v,w_elm];
9 plot(v,w_elm)
10 xgrid();
11 xtitle('Удельное сопротивление движению','v, м/с','w, Н/кг');
12 legend('электромобиль',2)
13 endfunction
  
```

Рис. 1.

Вначале запишем название функции и введём все наши выражения для вычислений. После этого введём в текст команды языка SciLang по оформлению графиков. Рассмотрим основные возможности SciLang по оформлению графиков.

Изображение сетки на графике

Для изображения сетки следует воспользоваться функцией *xgrid(color)*, *color* определяет *id* цвета линии сетки.

Заголовки на графике

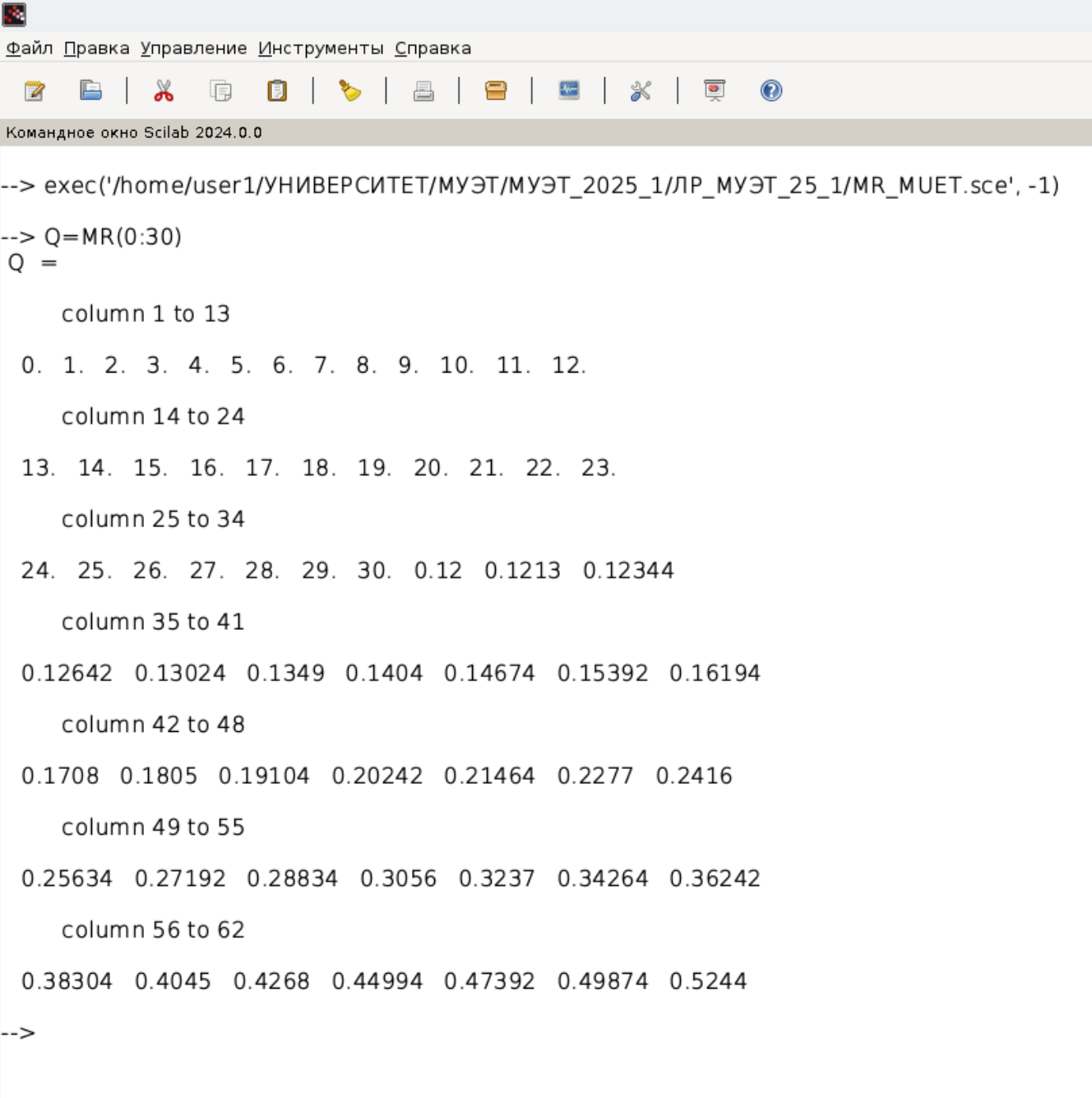
Для вывода заголовков на графике служит функция *xtitle(title, xstr, ystr)*, Здесь *title* – название графика, *xstr* – название оси *X*, *ystr* – название оси *Y*.

Нанесение легенд на график

Для нанесения легенд на график служит функция *legend(leg1,leg2,...,legn[,pos][,boxed])*, где *leg1* – имя первой легенды, *leg2* – имя второй легенды, ..., *legn* – имя *n*-й легенды; *pos* – месторасположение легенды: 1 – в верхнем правом углу (по умолчанию), 2 – в верхнем левом углу, 3

– в нижнем левом углу, 4 – в нижнем правом углу, 5 - определяется пользователем после изображения графика; *boxed* – логическая переменная (по умолчанию %t), которая определяет рисовать или нет рамку вокруг легенды.

Теперь сохраним созданную программу в файле с именем MR_MUET.sce. После запуска этой программы в командном окне Scilab, получаем вывод массива выходных данных и наш график.



```
--> exec('/home/user1/УНИВЕРСИТЕТ/МУЭТ/МУЭТ_2025_1/ЛР_МУЭТ_25_1/MR_MUET.sce', -1)
--> Q=MR(0:30)
Q =

    column 1 to 13
0.  1.  2.  3.  4.  5.  6.  7.  8.  9. 10. 11. 12.
    column 14 to 24
13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23.
    column 25 to 34
24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 0.12 0.1213 0.12344
    column 35 to 41
0.12642 0.13024 0.1349 0.1404 0.14674 0.15392 0.16194
    column 42 to 48
0.1708 0.1805 0.19104 0.20242 0.21464 0.2277 0.2416
    column 49 to 55
0.25634 0.27192 0.28834 0.3056 0.3237 0.34264 0.36242
    column 56 to 62
0.38304 0.4045 0.4268 0.44994 0.47392 0.49874 0.5244
-->
```

Рис. 2.

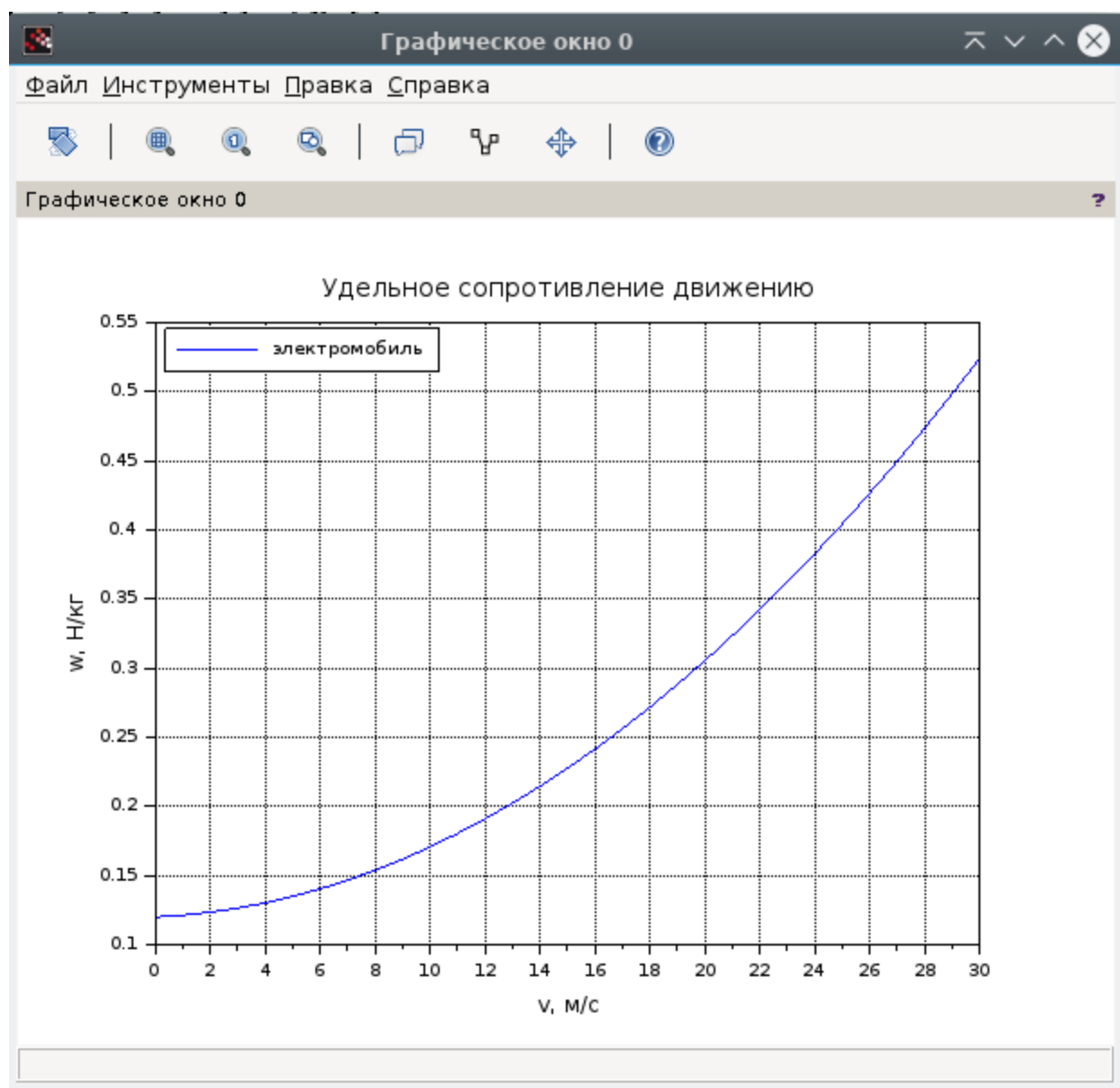
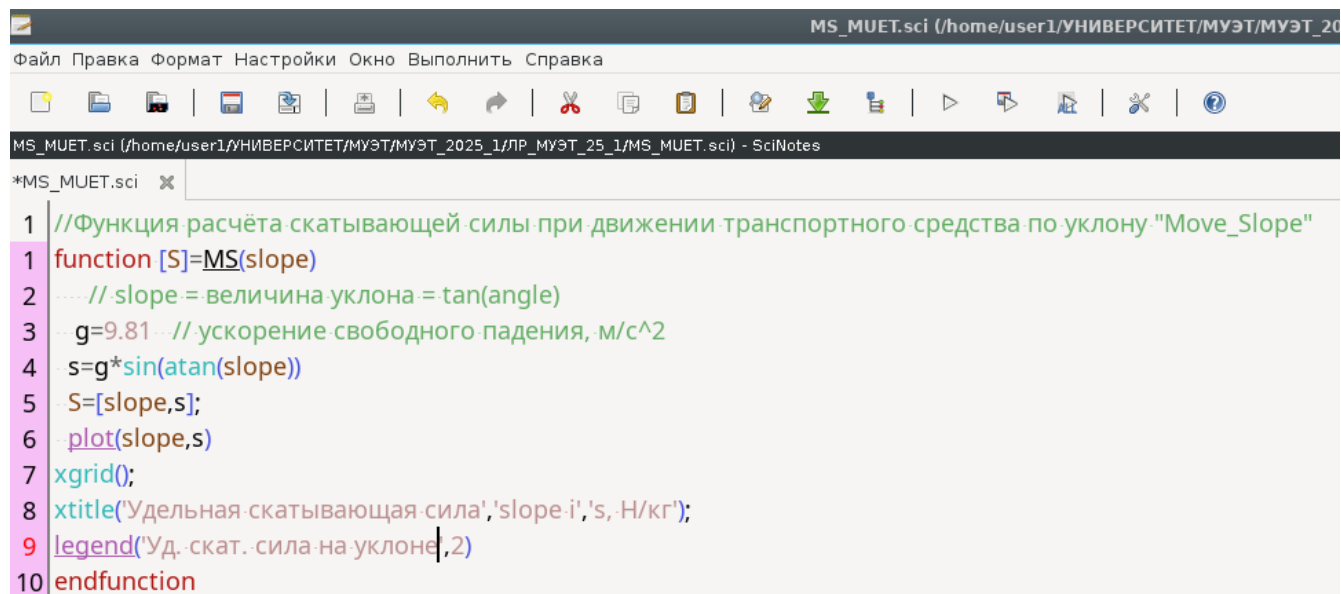


Рис. 3.

Любой график можно экспортировать в графический файл для этого в окне графика выбрать команду *Файл – Экспортировать...* и в появившемся окне выбрать папку, имя и тип экспортируемого файла.

Сохранив текст программы функции мы в любой момент можем вызвать её для любого транспортного средства из основного окна Scilab с помощью команды «Файл/Выполнить/Имя_файла» и получить результаты расчёта в виде оформленного графика.

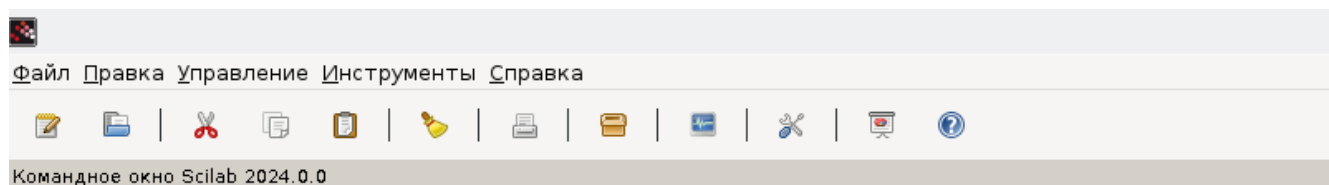
2. Модуль скатывающей силы на уклонах s



The image shows a screenshot of a SciNotes application window. The title bar reads "MS_MUET.sci (/home/user1/УНИВЕРСИТЕТ/МУЭТ/МУЭТ_20...". The menu bar includes "Файл", "Правка", "Формат", "Настройки", "Окно", "Выполнить", and "Справка". The toolbar contains various icons for file operations and execution. The main text area displays a MATLAB script with the following code:

```
1 //Функция расчёта скатывающей силы при движении транспортного средства по уклону "Move_Slope"
1 function [S]=MS(slope)
2 ....// slope = величина уклона = tan(angle)
3 ...g=9.81...// ускорение свободного падения, м/с^2
4 ...s=g*sin(atan(slope))
5 ...S=[slope,s];
6 ...plot(slope,s)
7 xgrid();
8 xtitle('Удельная скатывающая сила','slope-i','s,-Н/кг');
9 legend('Уд. скат. сила на уклоне',2)
10 endfunction
```

Рис. 4.



Файл Правка Управление Инструменты Справка

Командное окно Scilab 2024.0.0

```
--> exec('/home/user1/УНИВЕРСИТЕТ/МУЭТ/МУЭТ_2025_1/ЛР_МУЭТ_25_1/MS_MUET.sci', -1)

--> S=MS(-.5:.05:.5)
S =

    column 1 to 11
-0.5 -0.45 -0.4 -0.35 -0.3 -0.25 -0.2 -0.15 -0.1 -0.05  0.
    column 12 to 21
0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5
    column 22 to 26
-4.3871654 -4.0256775 -3.6433425 -3.2407377 -2.8188828
    column 27 to 32
-2.3792745 -1.9238993 -1.4552198 -0.9761315 -0.489888  0.
    column 33 to 38
0.489888 0.9761315 1.4552198 1.9238993 2.3792745 2.8188828
    column 39 to 42
3.2407377 3.6433425 4.0256775 4.3871654

-->
```

Рис. 5.

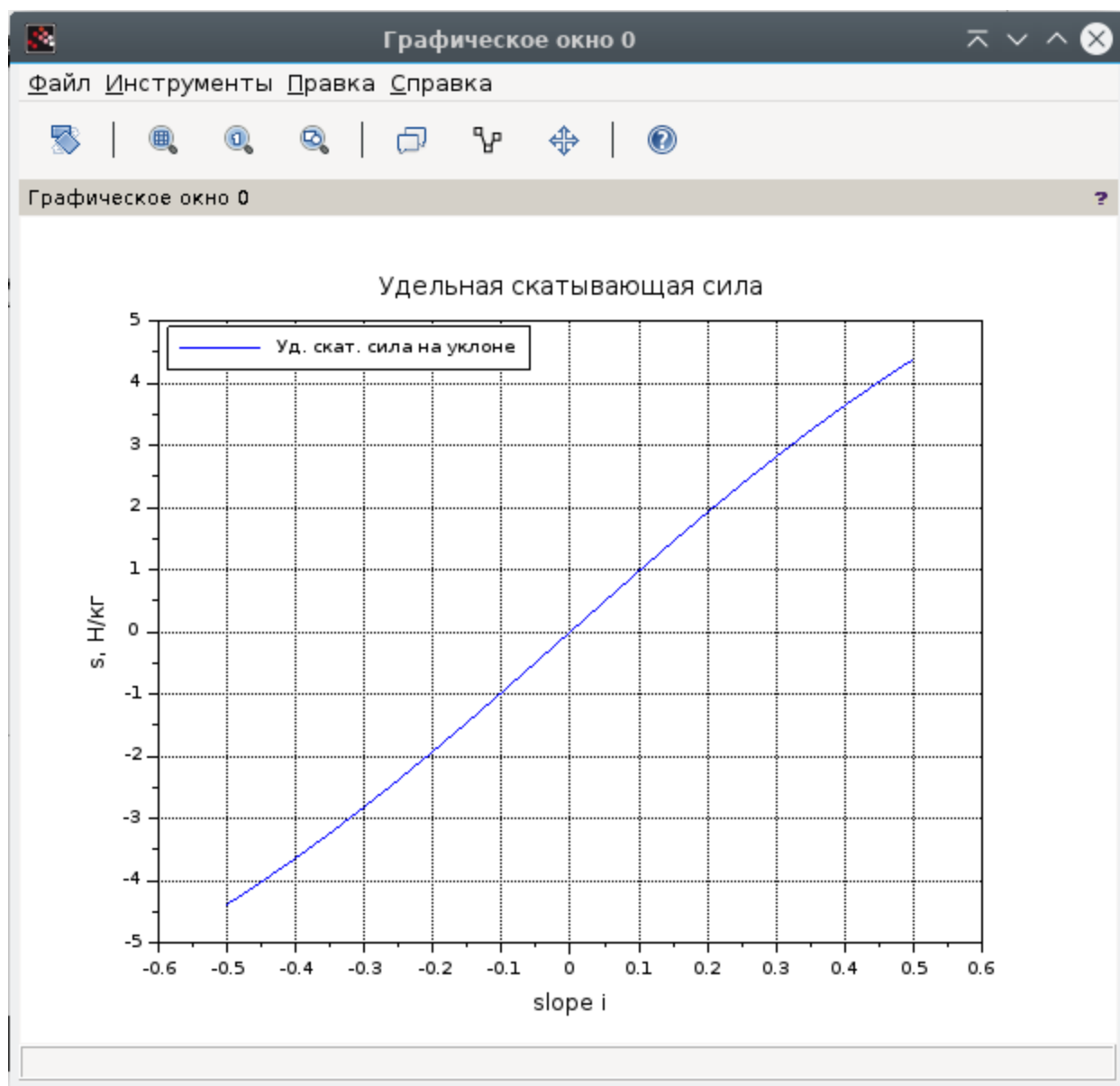


Рис. 6.

3. Модуль удельных тягово-тормозных характеристик f

Зависимость значений силы F тяги и торможения от скорости движения $V=dx/dt$ называется тягово-тормозными характеристиками транспортного средства.

Выходной параметр силы F тяги и торможения энергосилового агрегата транспортного средства ограничен предельными значениями конструктивных возможностей системы и внешними условиями движения. Ограничения обычно вызваны пределами прочности узлов и агрегатов транспортного средства, пределами их допустимого нагрева вследствие потерь энергии, предельной мощностью энергоисточников и контактной сети, пределами сцепления колеса с дорогой или рельсом и т. п. Предельно возможные силы тяги и торможения по конструктивным ограничениям и внешним условиям движения, выраженные в зависимости от скорости движения V , называются предельными тягово-

тормозными характеристиками. Заданные в техническом задании параметры подвижного состава не могут превышать значений, определяемых предельными тягово-тормозными характеристиками. Это и необходимо определить на первом этапе технического проектирования, как с помощью расчётов, так и имитационных испытаний (моделирования) подвижного состава в условиях движения и режимов, оговоренных техническим заданием.

Максимально требуемое тяговое усилие для земных транспортных средств определяется максимальным преодолеваемым подъёмом

$$f_m = g \cdot \sin(\operatorname{artanh}(i_m)) \text{ Н/кг},$$

а для водных транспортных средств максимальным преодолеваемым течением

$$f_m = w(v_m) \text{ Н/кг},$$

где w — полное удельное сопротивление движению воды при максимальной скорости течения v_m в м/с.

Максимально допустимое ускорение или замедление при наличии стоящих пассажиров в транспортном средстве не должно превышать по абсолютной величине $1,5 \text{ м/с}^2$, а если все пассажиры сидящие, то $2,5 \text{ м/с}^2$.

Разгон до номинальной скорости движения транспортного средства целесообразно осуществлять с постоянным ускорением. Однако при этом следует учитывать ограничения по мощности тягового энергоисточника или контактной сети

$$f \leq \frac{P_m}{m \cdot v},$$

где P_m — максимальная мощность тягового энергоисточника или тяговой сети, Вт,

m — масса транспортного средства, кг,

v — скорость движения, м/с.

Требуемую удельную максимальную мощность $p_m = P_m/m$ обычно определяют из следующих условий:

1. движение с заданной скоростью V_0 на максимальном подъёме i_m для земных транспортных средств $p_m = (w(V_0) + \sin(\operatorname{atan}(i_m))) \cdot V_0$;
2. движение с заданной скоростью V_0 при максимальной скорости течения V_m для водных транспортных средств $p_m = w(V_0 + V_m) \cdot (V_0 + V_m)$;
3. движение с заданной скоростью V_p на руководящем подъёме i_p для земных транспортных средств $p_m = (w(V_p) + \sin(\operatorname{atan}(i_p))) \cdot V_p$;
4. движение с заданной расчётной скоростью V_{pz} при расчётной скорости течения V_{pT} для водных транспортных средств $p_m = w(V_{pz} + V_{pT}) \cdot (V_{pz} + V_{pT})$;
5. установившееся движение с максимальной скоростью на горизонтальном прямолинейном участке пути или свободной тихой воде $p_m = w(V_m) \cdot V_m$;

- б. движение с заданным ускорением в заданном диапазоне скоростей $p_m = (a + w(V_{am})) \cdot V_{am}$, где V_{am} — максимальная скорость в заданном диапазоне.

Также необходимо учитывать ограничения по сцеплению колёс с рельсами или дорогой

$$f \leq g \cdot \Psi,$$

где Ψ — коэффициент сцепления, зависящий от вида транспортного средства и погодных условий в соответствии с табл. 2.

Нормативный расчётный коэффициент сцепления может быть вычислен в соответствии с коэффициентами табл. 2 по формуле

$$\Psi = \Psi_0 + \frac{8}{100 + k \cdot v}$$

Таблица 2.

Вид транспортного средства	Ψ_0	K, с/м	Диапазон реально возможных значений Ψ_0
Электромобили, экомобили	0,35	90	0,12...0,85
Электробусы, экобусы, троллейбусы	0,35	110	0,15...0,85
Трамваи	0,15	80	0,12...0,20
Электропоезда	0,21	75	0,20...0,22
Поезда метро	0,22	70	0,21...0,23
МАГЛЕВ (HSST)	Реализуемые силы не зависят от механического сцепления		
Электросуда	Реализуемые силы не зависят от механического сцепления		

Создадим функцию предельных удельных тягово-тормозных характеристик (ПУТТХ) «Traction_Break_Force» TBF.sce.

Пример функции расчёта ПУТТХ для трамвайного вагона на языке SciLang.

```
TBF_trm_MUET.sce (/home/user1/УНИВЕРСИТЕТ/МУЭТ/МУЭТ_2025_1/ЛР_МУЭТ_25_1/TBF_trm_MUET.sce) - SciNotes

Файл Правка Формат Настройки Окно Выполнить Справка

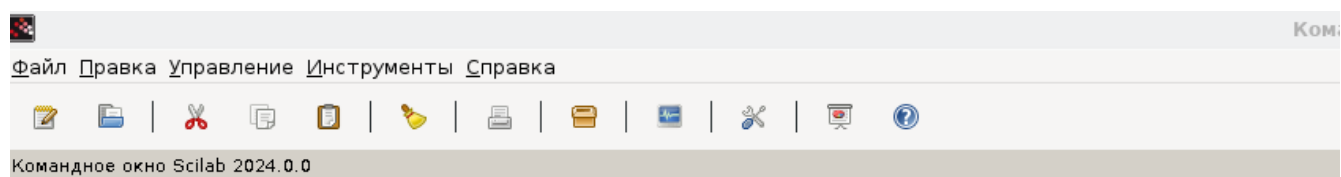
TBF_trm_MUET.sce (/home/user1/УНИВЕРСИТЕТ/МУЭТ/МУЭТ_2025_1/ЛР_МУЭТ_25_1/TBF_trm_MUET.sce) - SciNotes

TBF_trm_MUET.sce x

1 //Функция расчёта предельных удельных тягово-тормозных сил "Traction_Break_Force"
1 function [F]=TBF(v)
2 g=9.81;
3 Pm_trm=452E3; ..... //Макс.тяговая мощность, Вт
4 Pmb_trm=-560E3; ..... //Макс.тяговая мощность, Вт
5 m_trm=51E3; ..... //Полная масса, кг
6 //v=0:25; .....
7 im=0.12; ..... //Макс. (руководящий) подъём
8 psi_0=0.15 ..... //Базовое знач. коэф. сцепления
9 k=80 ..... //коэф. формулы сцепления
10 w0=4.4E-2 ..... //уд.сопр.движю при V=0
11 am=1.5 ..... //макс.доп.ускорение. м/с^2
12 fm_trm=g*sin(atan(im)) //максимальное тяговое усилие
13 fa_trm=am+w0 ..... //ограничение по макс.ускорению
14 fc_trm=g.*(psi_0+8./(100+k.*v)) ..... //Ограничение по сцеплению
15 fp_trm=Pm_trm./(m_trm.*v) //Ограничение по тяговой мощности
16 amb=-1.5 ..... //макс.доп.замедление. м/с^2
17 fab_trm=amb+w0 ..... //ограничение по макс.замедлению
18 fcb_trm=-g.*(psi_0+8./(100+k.*v)) ..... //Ограничение по сцеплению
19 fpb_trm=Pmb_trm./(m_trm.*v) //Ограничения по тормозной мощности
20 f_trm=min(fa_trm,fp_trm,fc_trm)
21 fb_trm=max(fab_trm,fpb_trm,fcb_trm)
22 F=[v,f_trm]
23 plot(v,f_trm,'b-',v,fb_trm,'r-')
24 xgrid();
25 xtitle('Предельные удельные тягово-тормозные силы','v, м/с','f, Н/кг');
26 endfunction
```

Рис. 7.

Запустив эту программу на выполнение получаем вывод массива выходных данных и график расчётных предельных тягово-тормозных характеристик, представленный на рис. 8 и 9.



Командное окно Scilab 2024.0.0

```
--> exec('/home/user1/УНИВЕРСИТЕТ/МУЭТ/МУЭТ_2025_1/ЛР_МУЭТ_25_1/TBF_trm_MUET.sce', -1)

--> F=TBF(0:25)
F =

    column 1 to 13
0.  1.  2.  3.  4.  5.  6.  7.  8.  9. 10. 11. 12.
    column 14 to 24
13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23.
    column 25 to 32
24. 25. 1.544 1.544 1.544 1.544 1.544 1.544
    column 33 to 37
1.4771242 1.2661064 1.1078431 0.9847495 0.8862745
    column 38 to 42
0.8057041 0.7385621 0.6817496 0.6330532 0.5908497
    column 43 to 47
0.5539216 0.5213379 0.4923747 0.4664603 0.4431373
    column 48 to 52
0.4220355 0.402852 0.3853367 0.369281 0.3545098

-->
```

Рис. 8.

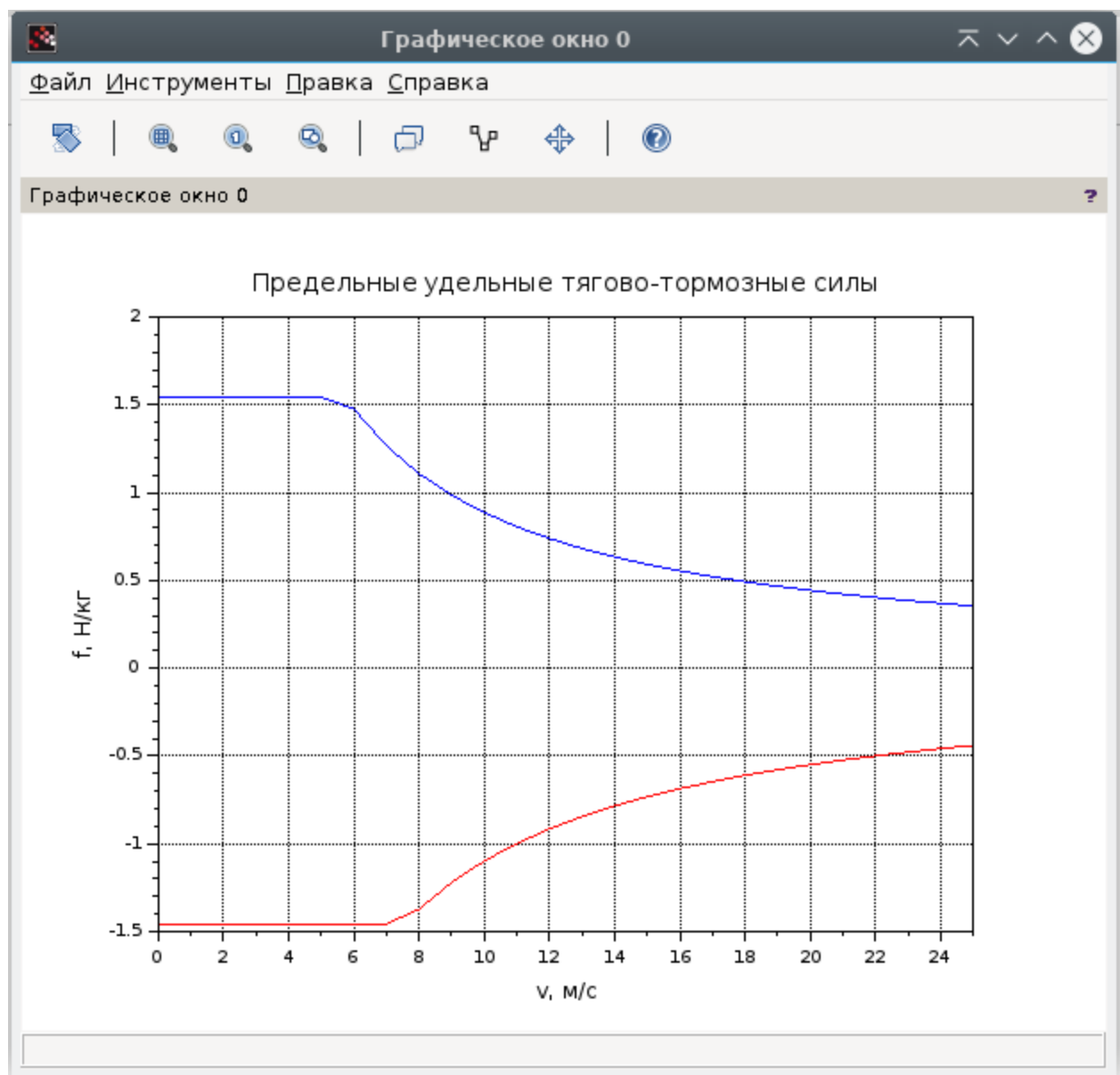


Рис. 9.