

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.

Лекция 5

07.04.2026 г.

Тема: Электросиловые агрегаты транспортных средств (Продолжение).

7. Моделирование тяговых и тормозных сил электросиловых агрегатов.

Выражение для электромагнитной силы (тяговой «+» или тормозной «-») можно записать в виде

$$F_{эм} = A_a \cdot \nabla (\Lambda_G \cdot A_0) \quad .$$

Если рассматривать только тангенциальное перемещение якоря по оси z , то это уравнение может быть преобразовано к виду

$$F_{эмz} = A_a \frac{\partial (\Lambda_G \cdot A_0)}{\partial z} \quad ,$$

и, подставляя выражения для A_0 и Λ_G , получаем

$$F_{эмz} = A_a \frac{\partial (\frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot A_0}{y})}{\partial z} = w_a \cdot i_a \frac{\partial (\frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot w_a \cdot i_0}{y})}{\partial z} \quad ,$$

где $A_0 = \sum A_f + \sum A_c + \sum A_a = w_f \cdot i_f + w_a \cdot i_c + w_a \cdot i_a = w_a \cdot (\frac{w_f}{w_a} \cdot i_f + i_c + i_a) = w_a \cdot (i_f' + i_c + i_a) = w_a \cdot i_0$ -

полная нс машины, А;

i_f' — ток возбуждения, приведённый к якорю, А;

$\sum A_f = w_f \cdot i_f$ - сумма нс индуктора, А;

$\sum A_c = w_a \cdot i_c = H_c \cdot h$ - эквивалентная нс постоянных магнитов, А;

$\sum A_a = w_a \cdot i_a$ - сумма нс обмоток якоря, А.

Эдс, наводимая в обмотке якоря будет определяться выражением

$$e_a = -w_a [\nabla \Phi, V] = -w_a \frac{\partial \Phi}{\partial z} \cdot V_z = -w_a \frac{\partial (\frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot A_0}{y})}{\partial z} \cdot V_z = -w_a \cdot V_z \frac{\partial (\frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot w_a \cdot i_0}{y})}{\partial z} \quad .$$

Возможны разные варианты конструкции машины с точки зрения величин S_G , w_a и i_0 . Эти величины могут быть постоянными в процессе перемещения по оси z (независимыми от z),

либо зависимыми от величины z . Если сумма намагничивающих сил машины постоянная величина $\sum A_{ai} = \sum w_{ai} \cdot i_{ai} = const$, то полный ток i_0 машины тоже можно считать постоянной величиной, что характерно для установившегося или квазистационарного режима работы и уравнения можно переписать в виде

$$F_{эмз} = i_0 \frac{\partial \left(\frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot w_{ai}}{y} \right)}{\partial z} \cdot \sum w_{ai} \cdot i_{ai}$$

$$e_{ai} = -w_{ai} \cdot i_0 \cdot V_z \frac{\partial \left(\frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot w_{ai}}{y} \right)}{\partial z}$$



Распределенная обмотка



Сосредоточенная обмотка

Если обмотка якоря сосредоточенная, т. е. не распределена по полюсному делению ($w_{ai}(z) = const$), то уравнения можно переписать в виде

$$F_{эмз} = i_0 \frac{\partial L_{mi}}{\partial z} \cdot \sum i_{ai}$$

$$e_a = -V_z \cdot i_0 \frac{\partial L_{mi}}{\partial z}$$

где $L_{mi} = \frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot w_{ai}^2}{y}$ - главная индуктивность электрической машины для i -той фазы, Гн.

Если обмотка якоря сосредоточенная ($w_{ai} = const$) и зазор равномерный по длине полюсных делений ($y = const$), то изменение L_{mi} зависит только от изменения площади полюсов, перекрывающихся в процессе относительного движения индуктора и якоря. При отсутствии относительного движения якоря и индуктора $V_z = \frac{\partial z}{\partial t} = 0$ и постоянстве полного тока $i_0 = const$ эдс якоря $e_a = 0$. Электромагнитная сила не зависит от скорости относительного перемещения и определяется полным током фаз якоря i_a и полным током i_0 , а также геометрией и относительным расположением электромагнитных контуров машины, определяемых главной индуктивностью (взаимоиндуктивностью) машины $L_{mi} = L_o \cdot \chi_i(z)$.

Наиболее характерными зависимостями $L_m(z)$ являются линейная и гармоническая (синусоидальная).

Линейная монополярная зависимость $L_m(z)$ (рис. 1) в пределах полюсного деления описывается выражением

$$L_m = L_0 \cdot \left(1 - \frac{2z}{Z}\right) \cdot \text{sgn}\left(1 - \frac{2z}{Z}\right)$$

И СООТВЕТСТВЕННО

$$\frac{\partial L_m}{\partial z} = -\frac{2}{Z} L_0 n p u z \leq \frac{Z}{2}$$

и $\frac{\partial L_m}{\partial z} = \frac{2}{Z} L_0 n p u z > \frac{Z}{2}$.

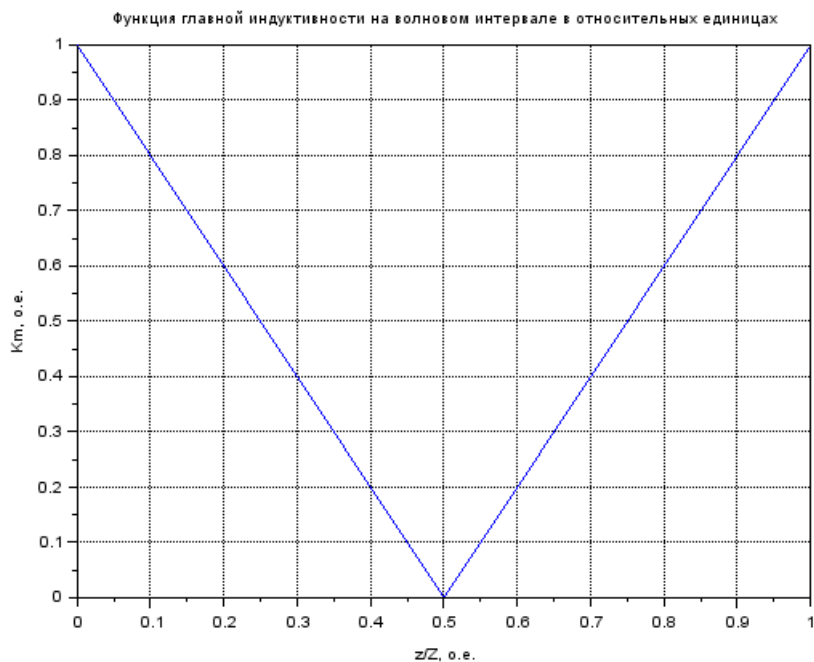


Рис. 1.

Линейная биполярная зависимость $L_m(z)$ (рис. 2) в пределах полюсного деления описывается выражением

$$L_m = L_0 \cdot \left[\left(2 - \frac{4z}{Z} \right) \cdot \operatorname{sgn} \left(1 - \frac{2z}{Z} \right) - 1 \right]$$

И СООТВЕТСТВЕННО

$$\frac{\partial L_m}{\partial z} = -\frac{4}{Z} L_0 n p u z \leq \frac{Z}{2}$$

и $\frac{\partial L_m}{\partial z} = \frac{4}{Z} L_0 n p u z > \frac{Z}{2}$.

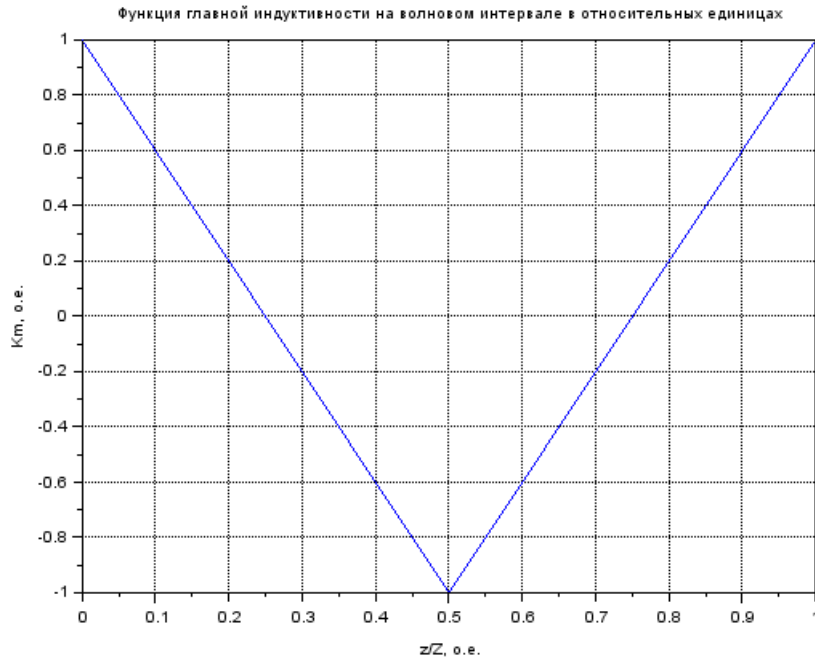


Рис. 2.

Линейная биполярная зависимость $L_m(z)$ в трёхфазной системе при 120-градусном управлении (рис. 3) в пределах полюсного деления описывается выражением

$$L_m = L_0 \cdot \max\left(-1, \left(1 - \frac{6z}{Z}\right)\right) \text{ при } 0 < z \leq \frac{Z}{2}$$

и

$$L_m = L_0 \cdot \min\left(1, \left(-4 + \frac{6z}{Z}\right)\right) \text{ при } \frac{Z}{2} < z \leq Z$$

и соответственно

$$\frac{\partial L_m}{\partial z} = -\frac{6}{Z} L_0 \text{ при } 0 < z \leq \frac{Z}{2}$$

$$\frac{\partial L_m}{\partial z} = 0 \text{ при } \frac{Z}{3} < z \leq \frac{Z}{2}$$

$$\frac{\partial L_m}{\partial z} = \frac{6}{Z} L_0 \text{ при } \frac{Z}{2} < z \leq \frac{5Z}{6}$$

$$\text{и } \frac{\partial L_m}{\partial z} = 0 \text{ при } \frac{5Z}{6} < z \leq Z$$

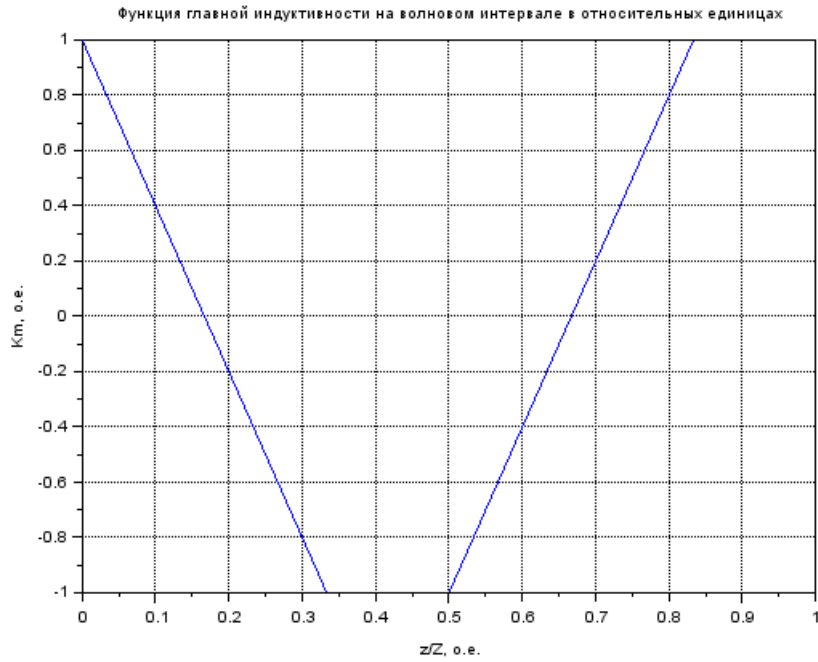


Рис 3.

Гармоническая зависимость $L_m(z)$ (рис. 4) в пределах полюсного деления описывается выражением

$$L_m = L_0 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{Z}\right)$$

и соответственно

$$\frac{\partial L_m}{\partial z} = -\frac{2 \pi}{Z} L_0 \cdot \sin\left(\frac{2 \pi \cdot z}{Z}\right) ,$$

где $z = \int V_z \cdot dt$ — текущее положение электромагнитных контуров, м;
 $Z = V_z \cdot T$ — длина магнитной волны (пространственного цикла), м;
 T — период электромагнитного цикла, с;
 $V_z = Z / T$ — пространственная скорость электромагнитного движения, м/с.

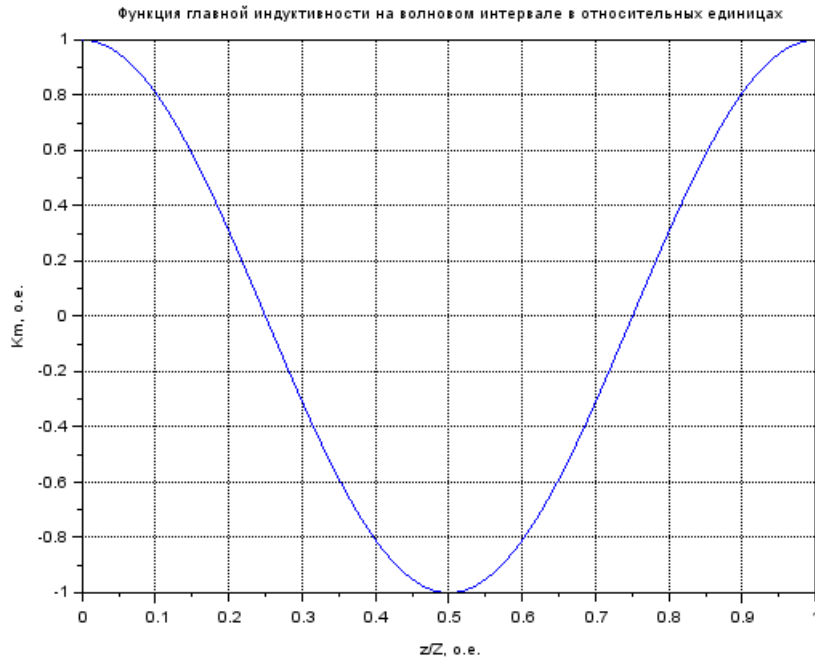


Рис. 4.

На рис. 5 приведены расчетные кривые индукции B_δ , НС возбуждения F_f и НС якоря F синхронного двигателя СД 102—8 мощностью 75 кВт с двухслойной дробной обмоткой якоря ($q=5/2$), уложенной в открытые пазы ($z_1=60$), для номинального режима при положении ротора $\nu = 0$.

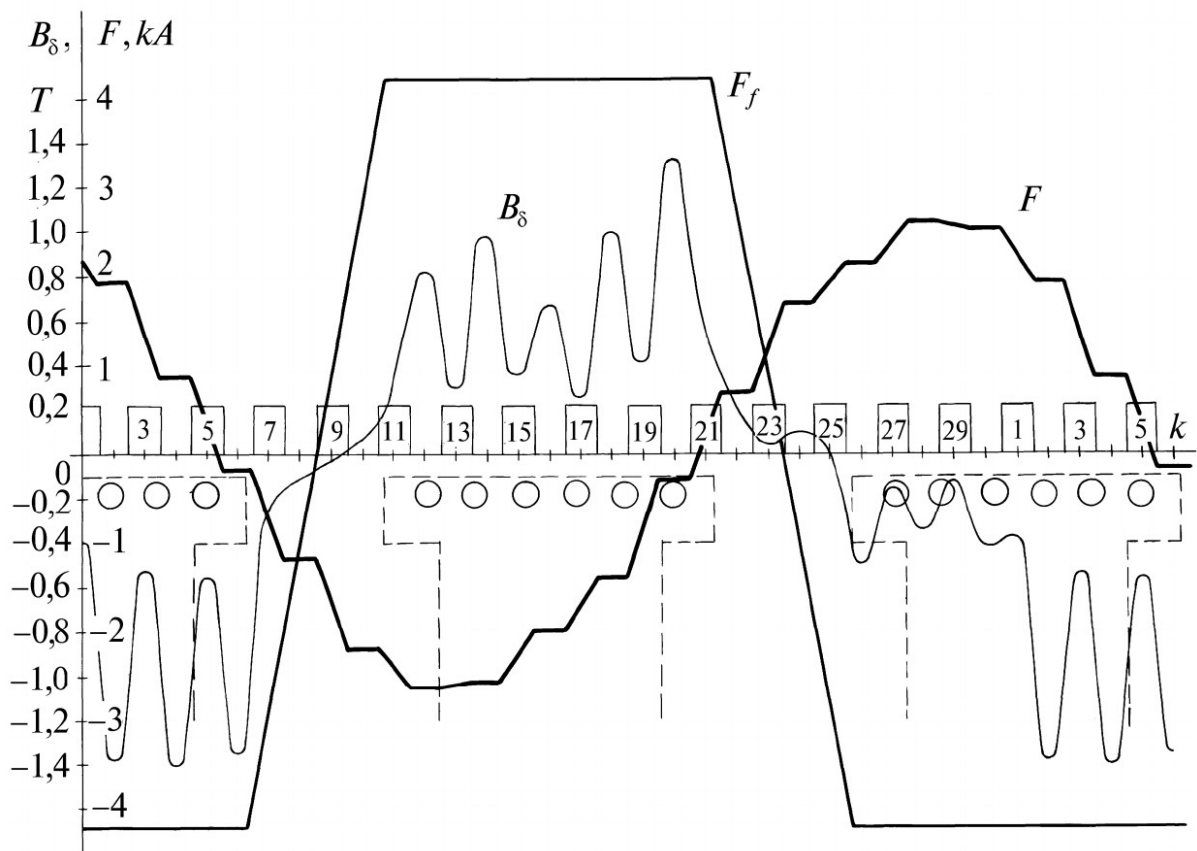


Рис. 5.

Динамическое уравнение баланса сил

$$F_{\text{эмз}} - W = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} ,$$

где $F_{\text{эмз}}$ - электромагнитная движущая сила, Н;
 W - сила сопротивления движению, Н.

Разделив обе части уравнения на массу m , получаем

$$f_{\text{эмз}} - w = \frac{d^2 z}{dt^2} ,$$

где $f_{\text{эмз}} = \frac{F_{\text{эмз}}}{m}$ - удельная электромагнитная движущая сила, Н/кг;
 $w = \frac{W}{m}$ - удельная сила сопротивления движению, Н/кг.

Обобщая проведённый анализ можно сделать такие выводы. Базовыми входными величинами, определяющими электромагнитные процессы в электрической машине являются полный ток индуктора i_f , полный ток якоря i_a и скорость движения V_0 магнитной волны поля относительно якоря, т. е. фазовая скорость поля или, так называемая синхронная скорость электрической машины. Базовыми конструктивными параметрами электрической машины (т. е. внутренними параметрами) являются главная полная индуктивность магнитных полюсов L_0 и функция взаимной индуктивности фаз от относительного перемещения якоря и индуктора $L_m(z/Z)$.

Базовая связь всех этих величин проявляется в рабочем зазоре машины и определяется обобщёнными уравнениями электромагнитного движения :

$$L_0 = \frac{\mu_0 \cdot S_0 \cdot w_{a0}^2}{y_0} ,$$

$$L_m = \frac{\mu_0 \cdot S \cdot w_a^2}{y} = K_M \cdot L_0 ,$$

где $K_M = \frac{L_m}{L_0}$ - функция взаимной индуктивности фаз машины с главным потоком

взаимной индукции. Эта величина зависит от относительного положения якоря и индуктора и определяется конструкцией электрической машины. С помощью конструктивных зависимостей $S(z/Z)$, $y(z/Z)$ и $w_a(z/Z)$ может быть реализована практически любая зависимость $K_M(z/Z)$. На практике чаще всего используется либо линейная, либо гармоническая (синусоидальная или косинусоидальная) зависимость взаимной индуктивности от относительного перемещения якоря и индуктора.

Если обмотка якоря сосредоточенная, т. е. не распределена по полюсному делению ($w_a(z/Z) = \text{const}$), то уравнения для электромагнитной силы и эдс можно записать в виде

$$F_{\text{эмз}} = i_a \cdot i_0 \frac{\partial L_m}{\partial z} = i_a \cdot i_0 \cdot L_0 \cdot \frac{\partial K_M}{\partial z} = i_a \cdot \Psi_0 \cdot \frac{\partial K_M}{\partial z} ,$$

$$e_a = -V_z \cdot i_0 \frac{\partial L_m}{\partial z} = V_z \cdot i_0 \cdot L_0 \frac{\partial K_M}{\partial z} = V_z \cdot \Psi_0 \frac{\partial K_M}{\partial z} .$$

Периодичность электромагнитных процессов определяется длиной волнового деления Z в рабочем зазоре машины и связанного с ней периодом времени T через скорость движения V_z уравнениями

$Z = V_z \cdot T$ — длина магнитной волны (пространственного цикла), м;

T — период электромагнитного цикла, с;

$V_z = Z / T$ - пространственная скорость электромагнитного движения, м/с.

$z = \int V_z \cdot dt$ — текущее положение электромагнитных контуров, м;

$\frac{z}{Z} + n$ - периодическая функция движения квантованного длины волны.

Для перехода к рассмотрению процессов в электрических цепях якоря электрической машины необходимо воспользоваться вторым законом Кирхгофа, в соответствии с которым можно записать следующее уравнение электрической цепи якоря

$$u_a - e_a = i_a \cdot R + L_s \frac{di_a}{dt} ,$$

где u_a - напряжение внешнего источника питания, приложенное к обмотке якоря, В;

R - активное сопротивление обмотки фазы якоря, Ом;

L_s - индуктивность рассеяния обмотки фазы якоря, Гн.

Динамическое уравнение баланса сил

$$F_{\text{эмз}} - W = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} ,$$

где $F_{\text{эмз}}$ - электромагнитная движущая сила, Н;

W - сила сопротивления движению, Н.

Разделив обе части уравнения на массу m , получаем

$$f_{\text{эмз}} - w = \frac{d^2 z}{dt^2} ,$$

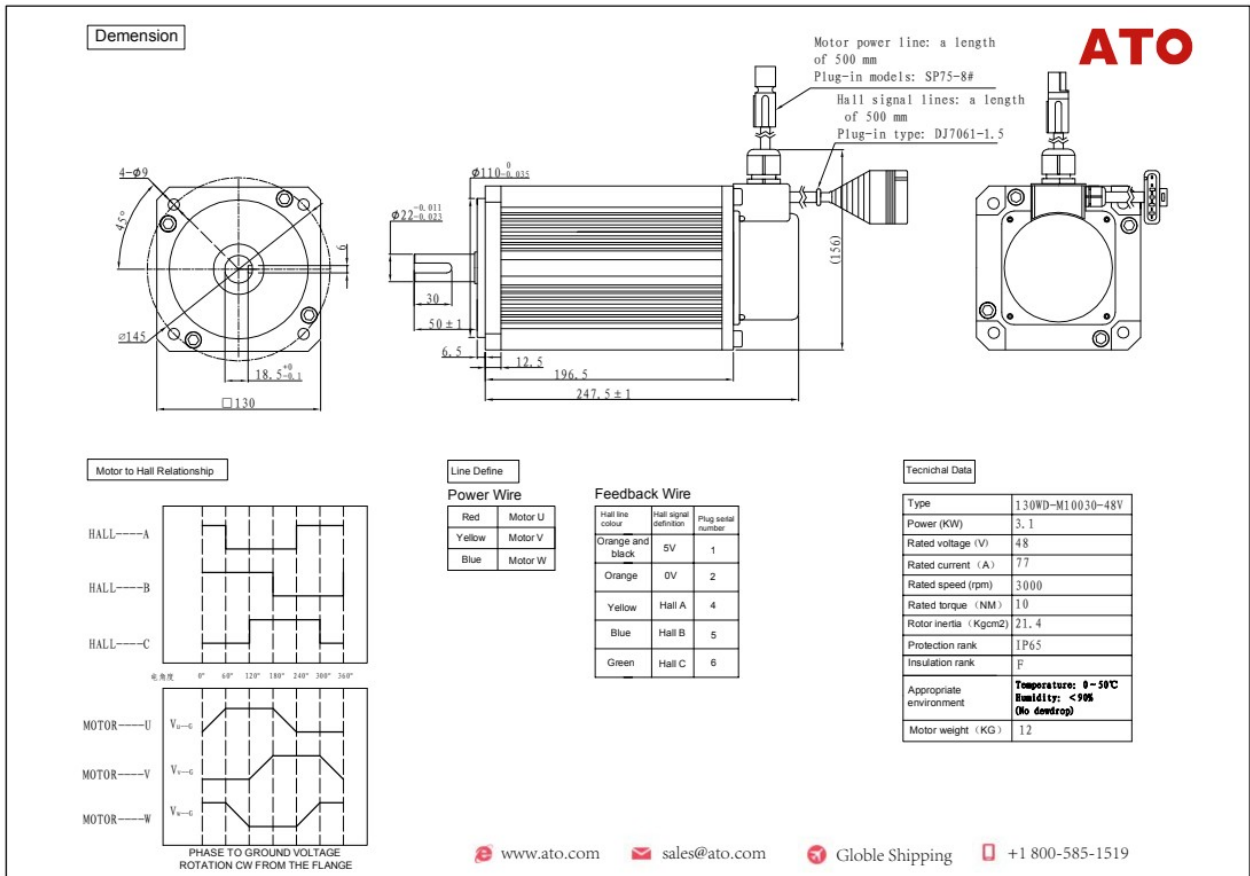
где $f_{\text{эмз}} = \frac{F_{\text{эмз}}}{m}$ - удельная электромагнитная движущая сила, Н/кг;

$w = \frac{W}{m}$ - удельная сила сопротивления движению, Н/кг.

В соответствии с выведенной математической моделью на основе обобщённой компьютерной модели построим модель используемой электрической машины. На начальном этапе будем рассматривать процессы на основе полной взаимной индуктивности (главной индуктивности) без учёта собственных индуктивностей цепей.

Пример 1.

В качестве первого примера тяговой электрической машины рассмотрим бесщёточный электродвигатель (BLDC) АТО-130WDM10030-48V с постоянными магнитами для возбуждения.



Для моделирования такой тяговой электрической машины должны быть определены следующие исходные данные.

Исходные данные

- Диаметр якоря D , м;
- Номинальная частота вращения ротора n , об/мин;
- Номинальный момент M , Н*м;
- Номинальный ток якоря I_a , Гц;
- Тип магнитной системы (монополярная или биполярная) и закон изменения потокосцепления фаз (линейный или гармонический);
- Номинальное напряжение источника питания U_s , В
- Количество пар полюсов p .

Расчёт

Определим с помощью нижеприведённой программы на языке SciLang необходимые для модели параметры этой электрической машины.

```
disp('Волга *EFU_1_VOLGA_calc.sce*')
//Программа расчёта параметров модели электросилового тягового агрегата EFU_1
disp('Параметры модели электросилового тягового агрегата EFU_1')
disp('ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:')
disp('Диаметр ротора, м')
```

```

D=0.1
disp('Номинальная частота вращения ротора, об/мин')
n=3e3
disp('Номинальный момент, Н*м')
M=10
disp('Номинальный ток якоря, А')
Ia=77
disp('Номинальное напряжение источника питания, В')
Us=48
disp('Количество пар полюсов')
p=2

disp('РАСЧЁТ:')
disp('Волновое деление, м')
Z=%pi*D/p
disp('Номинальная линейная скорость ротора, м/с')
V=%pi*D*n/60
disp('Номинальная электромагнитная сила, Н')
F=2*M/D
disp('Номинальное главное потокосцепление, Вб')
Psi0=F*Z/(4*Ia)
disp('Номинальная ЭДС якоря, В')
Ea=V*Psi0*4/Z
disp('Активное сопротивление обмотки якоря, Ом')
Ra=(Us-Ea)/Ia
disp('Мощность на валу, Вт')
P=F*V

```

После выполнения программы получаем следующие результаты расчёта:

"Волга *EFU_1_VOLGA_calc.sce"

"Параметры модели электросилового тягового агрегата EFU_1"

"ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:"

"Диаметр ротора, м"

D =

0.1

"Номинальная частота вращения ротора, об/мин"

n =

3000.

"Номинальный момент, Н*м"

M =

10.

"Номинальный ток якоря, А"

Ia =

77.

"Номинальное напряжение источника питания, В"

Us =

48.

"Количество пар полюсов"

$p =$

2.

"РАСЧЁТ:"

"Волновое деление, м"

$Z =$

0.1570796

"Номинальная линейная скорость ротора, м/с"

$V =$

15.707963

"Номинальная электромагнитная сила, Н"

$F =$

200.

"Номинальное главное потокосцепление, Вб"

$\Psi_{i0} =$

0.1019998

"Номинальная ЭДС якоря, В"

$E_a =$

40.799905

"Активное сопротивление обмотки якоря, Ом"

$R_a =$

0.0935077

"Мощность на валу, Вт"

$P =$

3141.5927

Пример 2.

В качестве второго примера тягового электросилового агрегата рассмотрим линейную тяговую машину левитационного агрегата. Для моделирования такой тяговой электрической машины должны быть определены следующие исходные данные.

Исходные данные

- Максимальная индукция в рабочем воздушном зазоре агрегата B_m , обычно в диапазоне от 0,6 до 1,0 Тл;
- Номинальная величина рабочих зазоров y_0 и их количество n ;
- Номинальное значение создаваемой агрегатом электромагнитной силы F , Н;
- Номинальная скорость движения V , м/с;
- Номинальная частота электромагнитного процесса (тока якоря) ν , Гц;
- Тип магнитной системы (монополярная или биполярная) и закон изменения потокосцепления фаз (линейный или гармонический);
- Номинальное напряжение источника питания агрегата U_s , В.

Расчёт

Расчёт производится в следующей последовательности:

1. Длина электромагнитной волны (два полюсных деления) $Z = \frac{V}{\nu}$, м;
2. Коэффициент градиента относительного потокосцепления фаз якоря с главным магнитным потоком $k_z = \frac{\partial \lambda}{\partial z}$, где $\lambda = \frac{L_m}{L_0}$, $k_z = \frac{4}{Z}$ - для биполярной магнитной системы с линейным изменением потокосцепления фаз, $k_z = \frac{2\pi}{Z}$ - для биполярной магнитной системы с гармоническим изменением потокосцепления фаз;
3. Активная длина якоря $l_a = (0,3...1,0)Z$, м;
4. Полная площадь магнитного сечения $S_0 = \frac{Z \cdot l_a}{2}$, м²;
5. Требуемая полная н.с. для создания заданной индукции B_m в рабочем воздушном зазоре $A_0 = \frac{B_m \cdot n \cdot y_0}{\mu_0}$, А;
6. Полная главная магнитная проводимость магнитной системы агрегата $\Lambda_0 = \frac{\mu_0 \cdot S_0}{n \cdot y_0}$, Гн;
7. Номинальное амплитудное значение э.д.с. фаз якорной обмотки $E_{am} = k_e \cdot U_s$, где k_e — коэффициент падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки;
8. Коэффициент электромеханического преобразования $k_{em} = A_0 \cdot \Lambda_0 \cdot k_z$, $\frac{В \cdot с}{м}$
9. Требуемое количество витков фаз якорной обмотки $w_a = \frac{E_{am}}{k_{em} \cdot V}$;
10. Главная (полная) индуктивность (взаимоиндуктивность) машины $L_0 = w_a^2 \cdot \Lambda_0 = \frac{w_a^2 \cdot \mu_0 \cdot S_0}{n \cdot y_0}$, Гн;

11. Номинальный суммарный активный ток фаз якоря $I_{am} = \frac{F}{k_{em} \cdot w_a}$, А.

Ниже приведён текст программы на языке Scilang расчёта тягового левитационного агрегата с помощью ИСП Scilab.

```

1 //Программа - расчёта - тягового - левитационного - агрегата
2 //
3 //Выполнил - студент - группы - _____ - Ф.И.О. _____ Дата _____
4
5 //Исходные - данные
6 Bm=0.7 //Тл
7 y0=1.0E-2 // -м
8 n=2
9 F=1.0E3 // -Н
10 V=20.0 // -м/с
11 v=100.0 // -Гц
12 Us=550 // -В
13 mj0=4*pi/1.0E7 //
14
15 //Расчёт
16 Z=V/v // -м
17 kz=4/Z // -1/м
18 la=0.3*Z // -м
19 S0=Z*la/2 // -м^2
20 A0=Bm*n*y0/mj0 // -А
21 lambda0=mj0*S0/(n*y0) // -Гн
22 Eam=0.95*Us // -В
23 kem=A0*lambda0*kz // -В*с/м
24 wa=Eam/(kem*V) //
25 Iam=F/(kem*wa) // -А
26 L0=lambda0*wa^2 // -Гн
27

```

Пример 1. Моделирование вращающейся тяговой электрической машины

Построим модель бесщёточного электродвигателя (BLDC) АТО-130WDM10030-48V с постоянными магнитами для возбуждения.

Вначале построим обобщённую компьютерную модель с линейной биполярной зависимостью взаимной индуктивности. В случае биполярной магнитной системы уравнение взаимной индуктивности на интервале полюсного деления будет иметь вид

$$L_m = L_0 \cdot \left(1 - \frac{4z}{Z}\right) \cdot \text{sgn}\left(1 - \frac{2z}{Z}\right)$$

и соответственно

$$\frac{\partial L_m}{\partial z} = -\frac{4}{Z} L_0 \text{ при } z \leq \frac{Z}{2}$$

и $\frac{\partial L_m}{\partial z} = \frac{4}{Z} L_0 \text{ при } z > \frac{Z}{2}$.

где

$$L_0 = \frac{\mu_0 \cdot S_0 \cdot w_{a0}^2}{y_0} .$$

Блок-схема модели представлена на рис. 6.

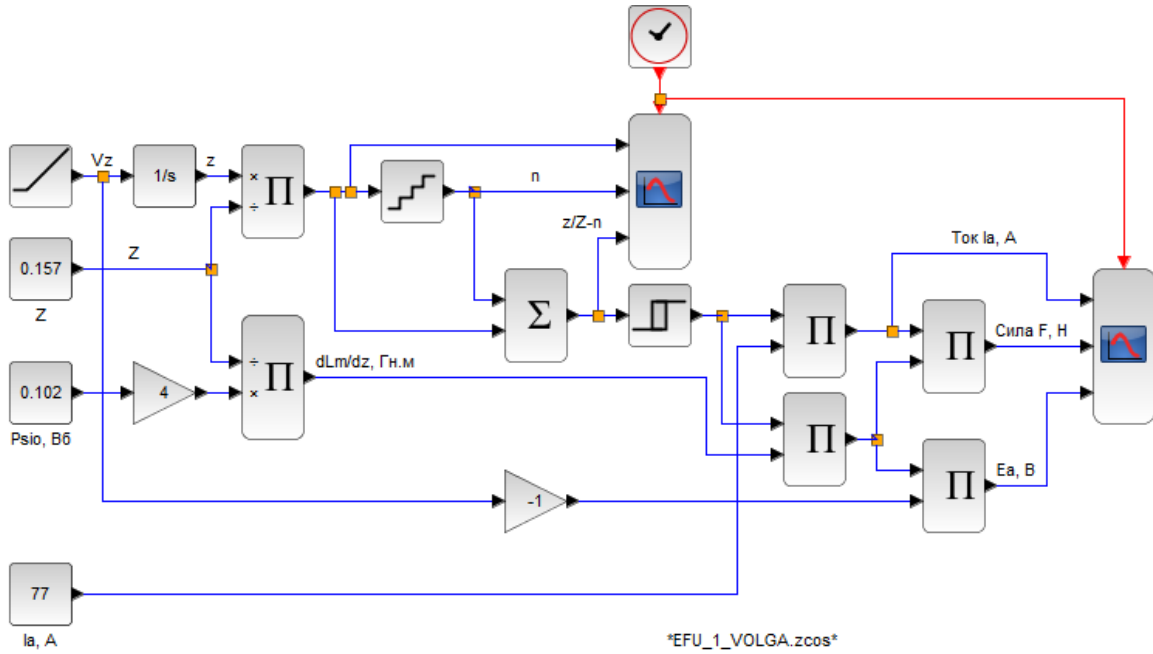


Рис. 6.

Запускаем процесс моделирования в двигательном режиме и получаем результат, приведённый на рис. 7 и 8.

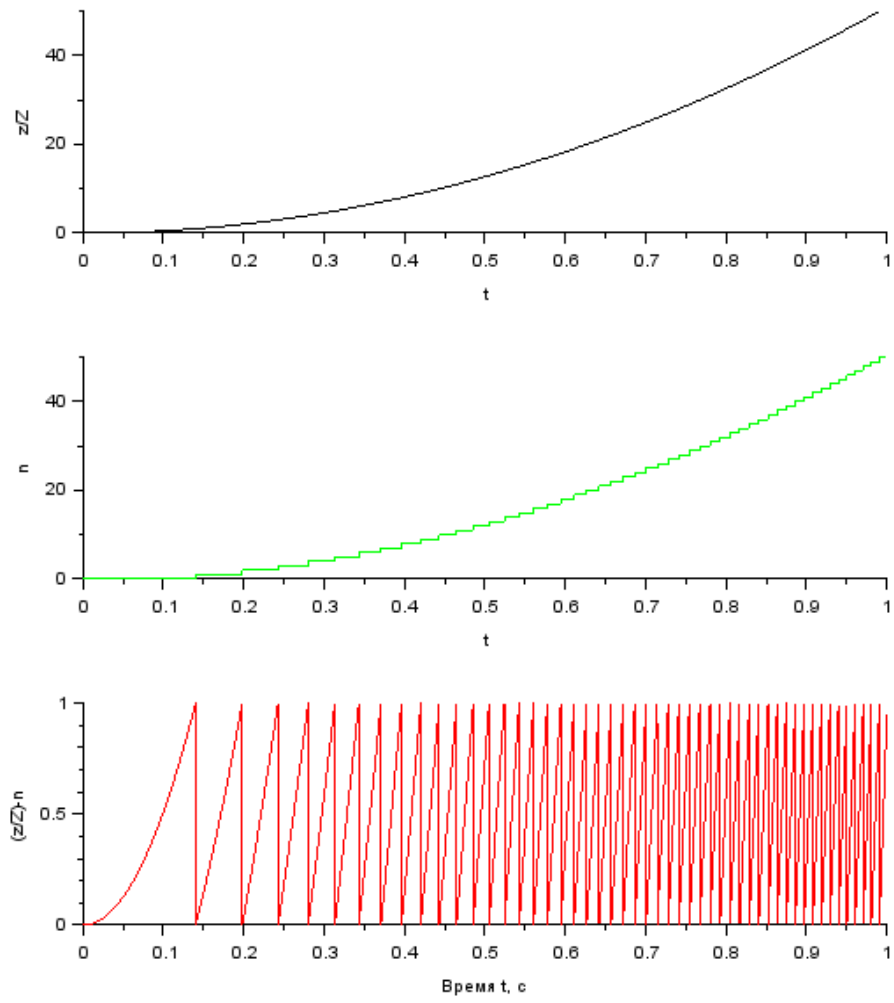


Рис. 7.

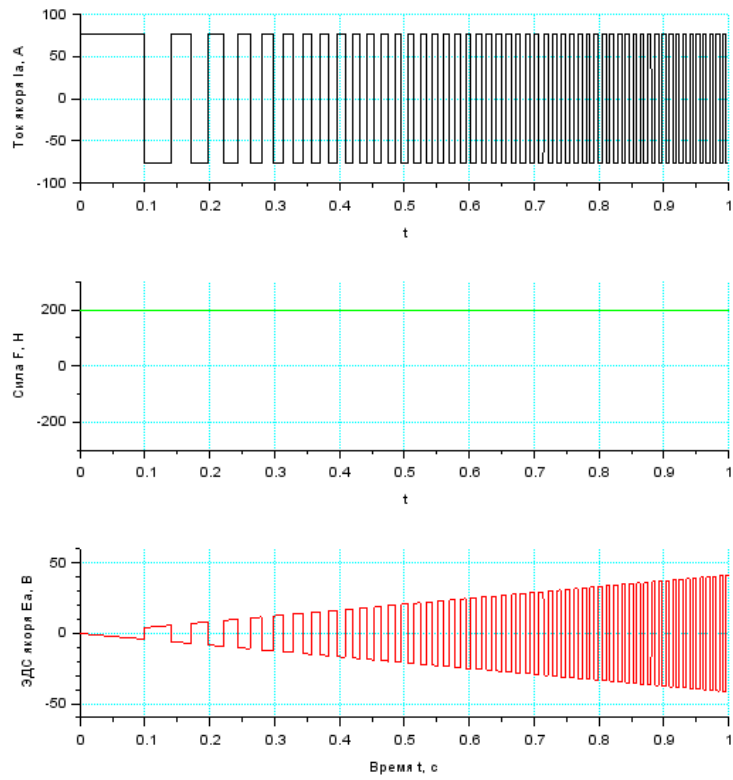


Рис. 8.

Запустим теперь модель в генераторном режиме. Для этого поменяем знак тока на отрицательный, начальную скорость зададим равной номинальной, а конечную равной нулю. Результат моделирования представлен на рис. 9 и 10.

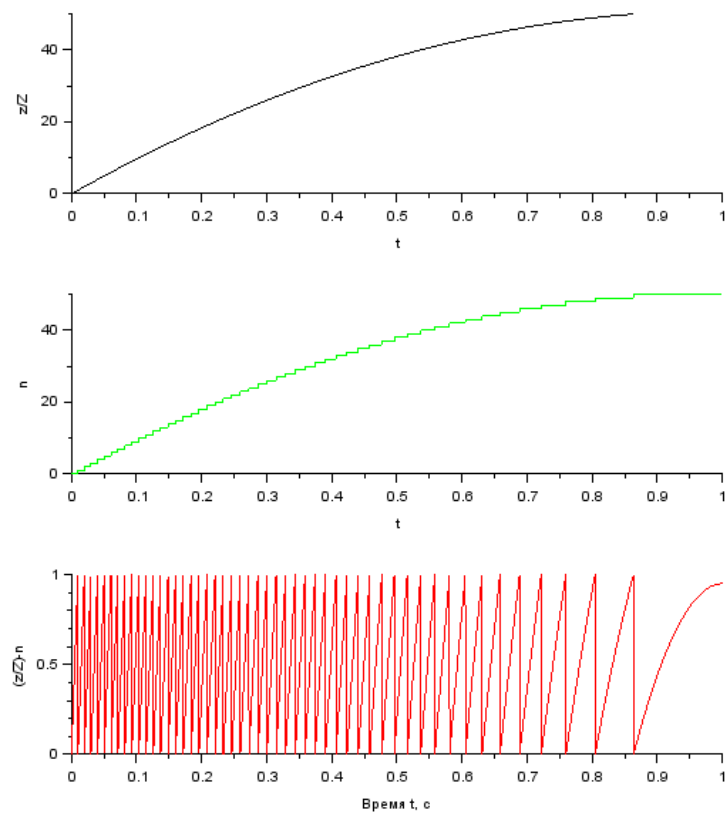


Рис. 9.

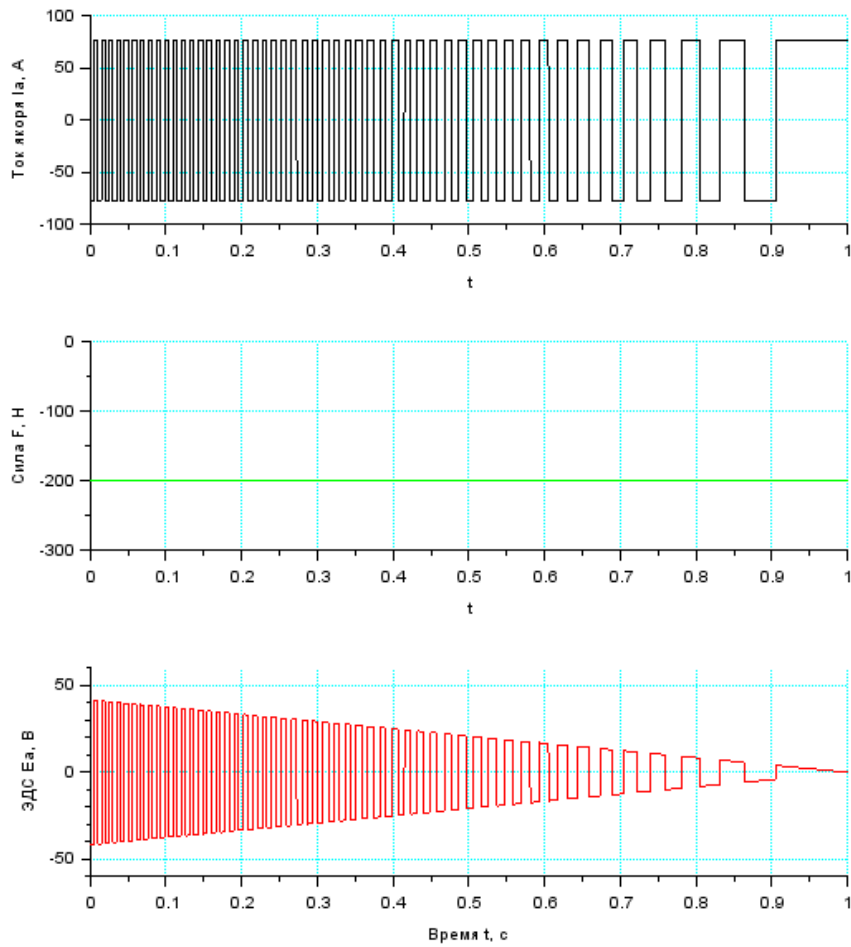


Рис. 10.

Рассмотрим теперь обобщённую компьютерную модель машины с гармонической зависимостью взаимной индуктивности. В случае биполярной магнитной системы уравнение взаимной индуктивности на интервале полюсного деления будет иметь вид

$$L_m = L_0 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{Z}\right) ,$$

и, соответственно,

$$\frac{dL_m}{dz} = -L_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{Z} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{Z}\right) ,$$

где

$$L_0 = \frac{\mu_0 \cdot S_0 \cdot w_{a0}^2}{y_0} .$$

Блок-схема модели представлена на рис. 11. Параметры всех блоков такие же, как и для модели с линейной зависимостью взаимоиндуктивности (см. рис. 6), за исключением

коэффициента $\frac{2 \cdot \pi}{Z}$ и функции $\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{Z}\right)$.

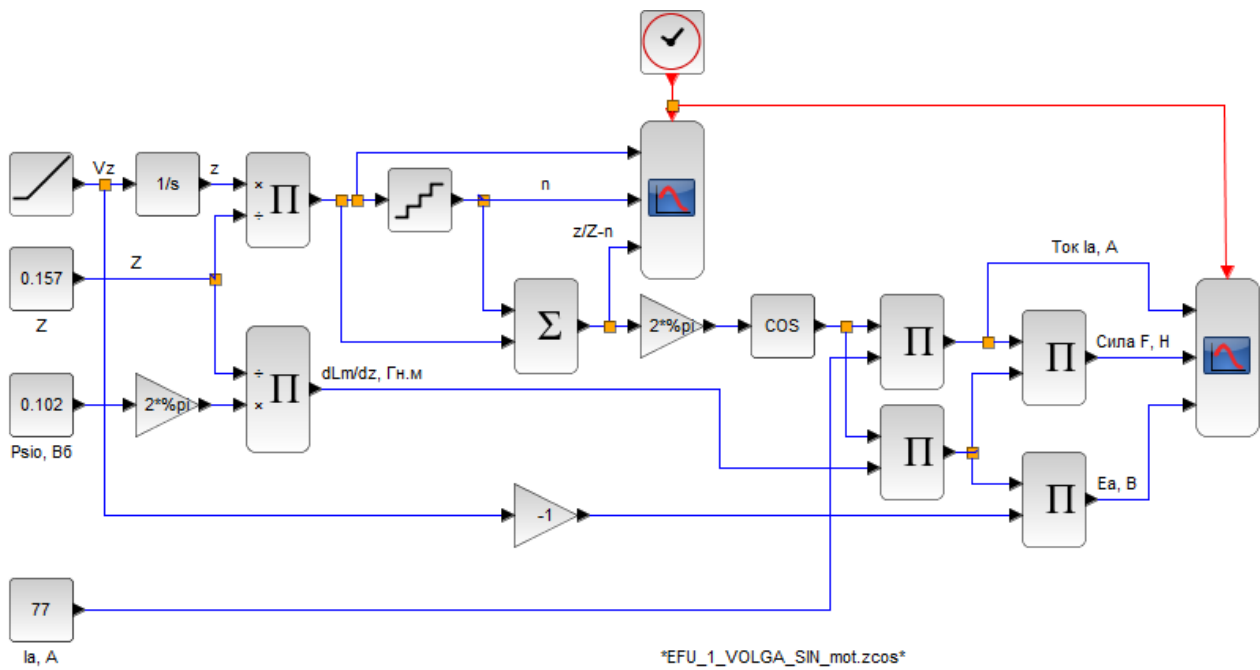


Рис. 11.

После запуска моделирования получаем результат, представленный на Рис. 12.

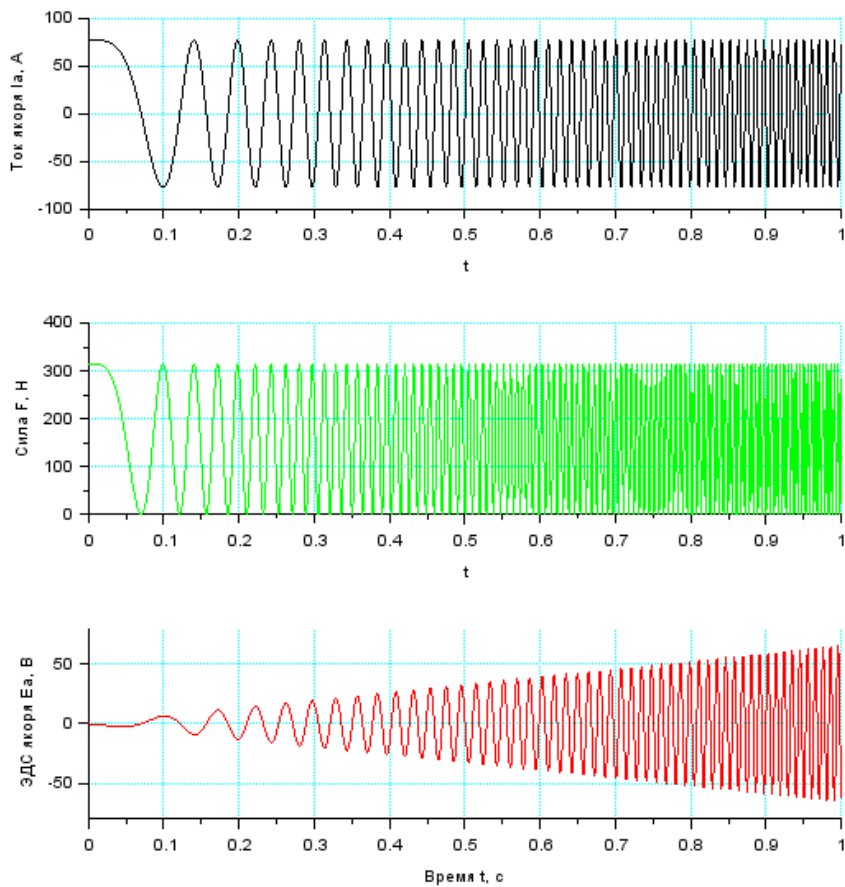


Рис. 12.

Из осциллограммы видно, что электромагнитная сила пульсирует с двойной частотой тока якоря. Для постоянства электромагнитной силы необходимо ввести вторую фазу в якорь со

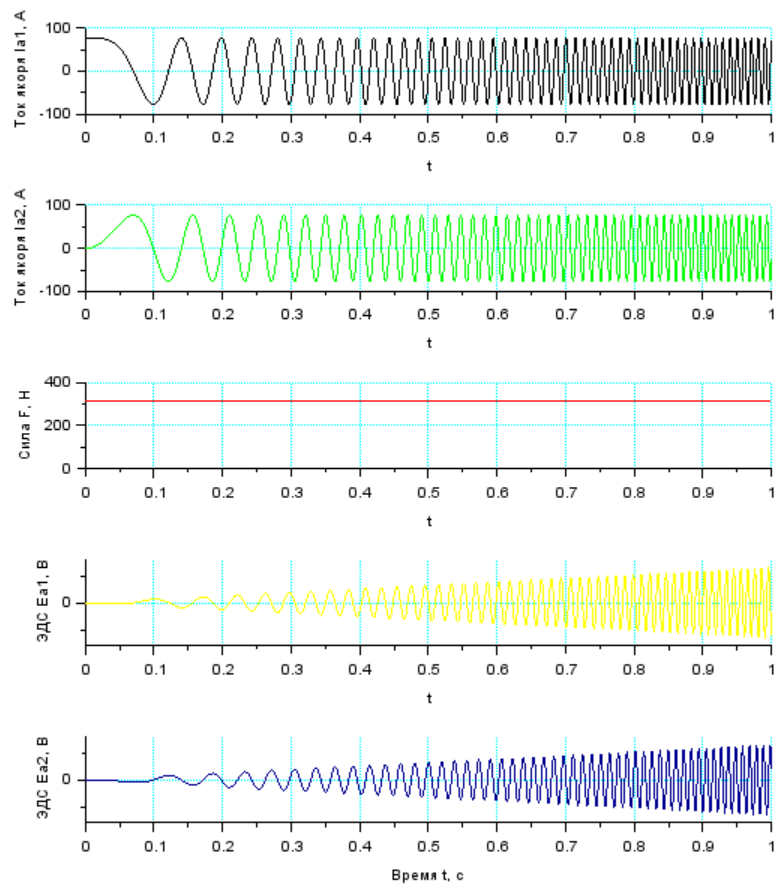


Рис. 14.

Как и следовало ожидать электромагнитная сила стала постоянной.

Теперь проверим работу в генераторном режиме. Для этого поменяем знак тока якоря с плюса на минус и зададим начальную скорость равной номинальной, а конечную нулю. Результат моделирования приведён на рис. 15.

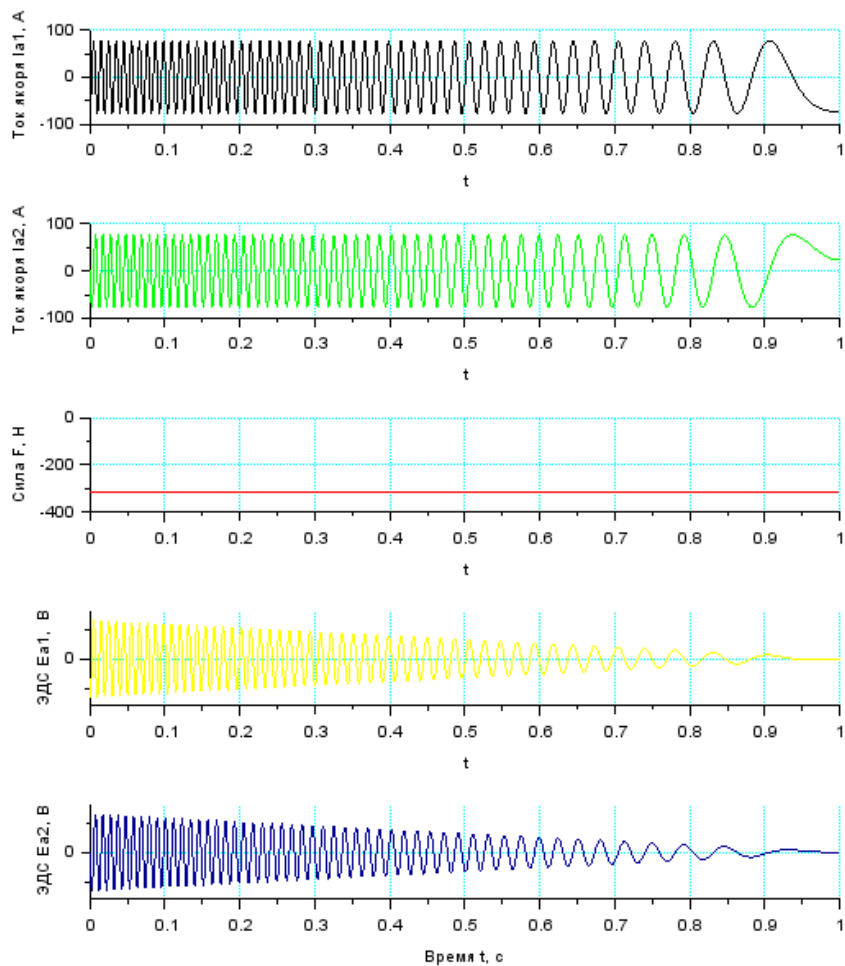


Рис. 15.

Пример 2. Моделирование линейной тяговой электрической машины

Теперь рассмотрим моделирование линейной тяговой машины магнитолевитационного силового агрегата. Блок-схема модели представлена на рис. 16. На начальном этапе задаём постоянную скорость $V_z = 1$ м/с с помощью блока CONST_m. Параметры остальных блоков показаны на Рис. 17...22.

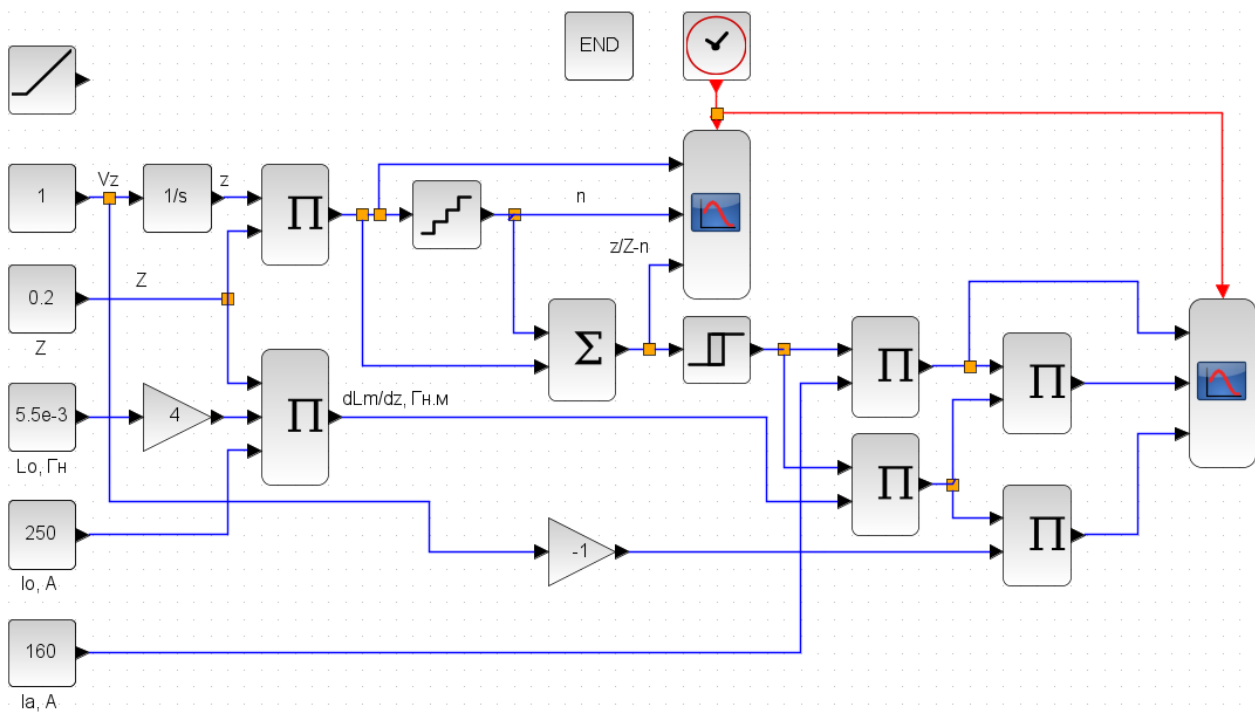


Рис. 16.

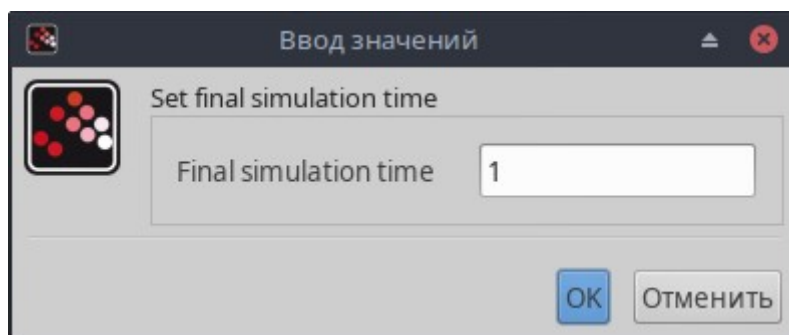


Рис. 17. Параметры блока END.

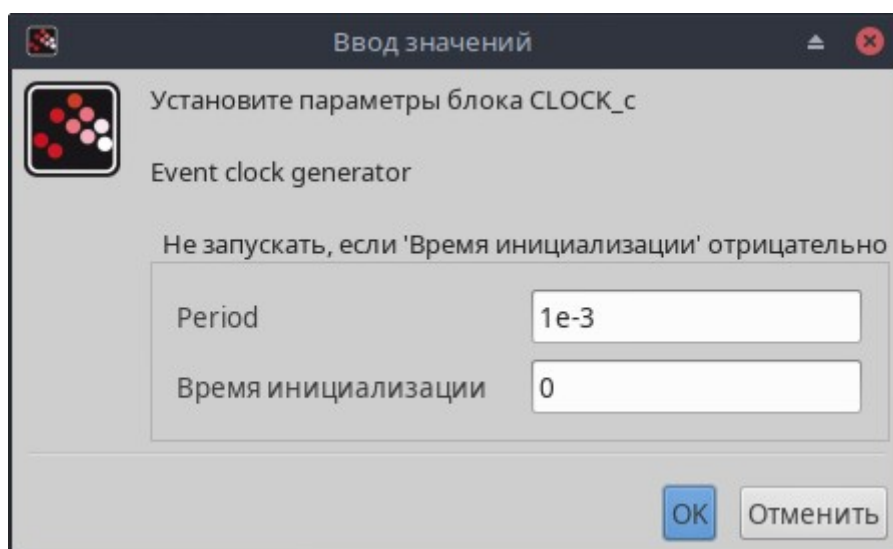


Рис. 18. Параметры блока CLOCK_c.

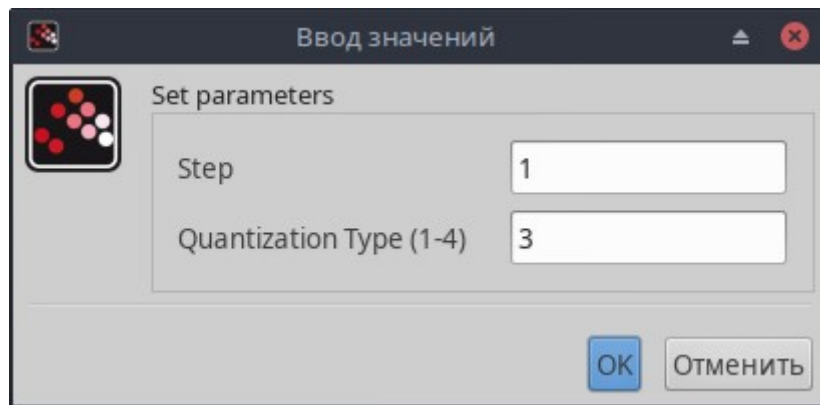


Рис. 19. Параметры блока QUANT_f.

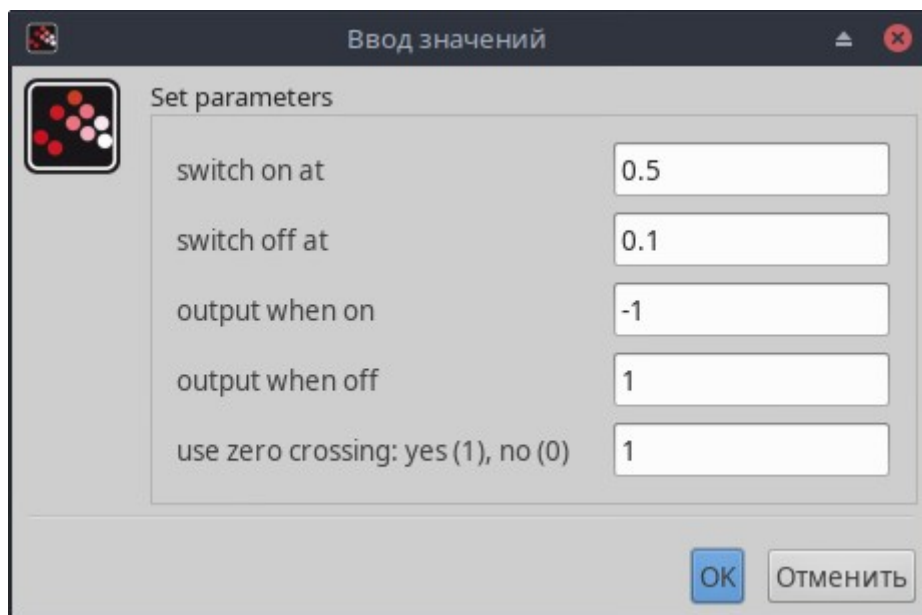


Рис. 20. Параметры блока HYSTERESIS.

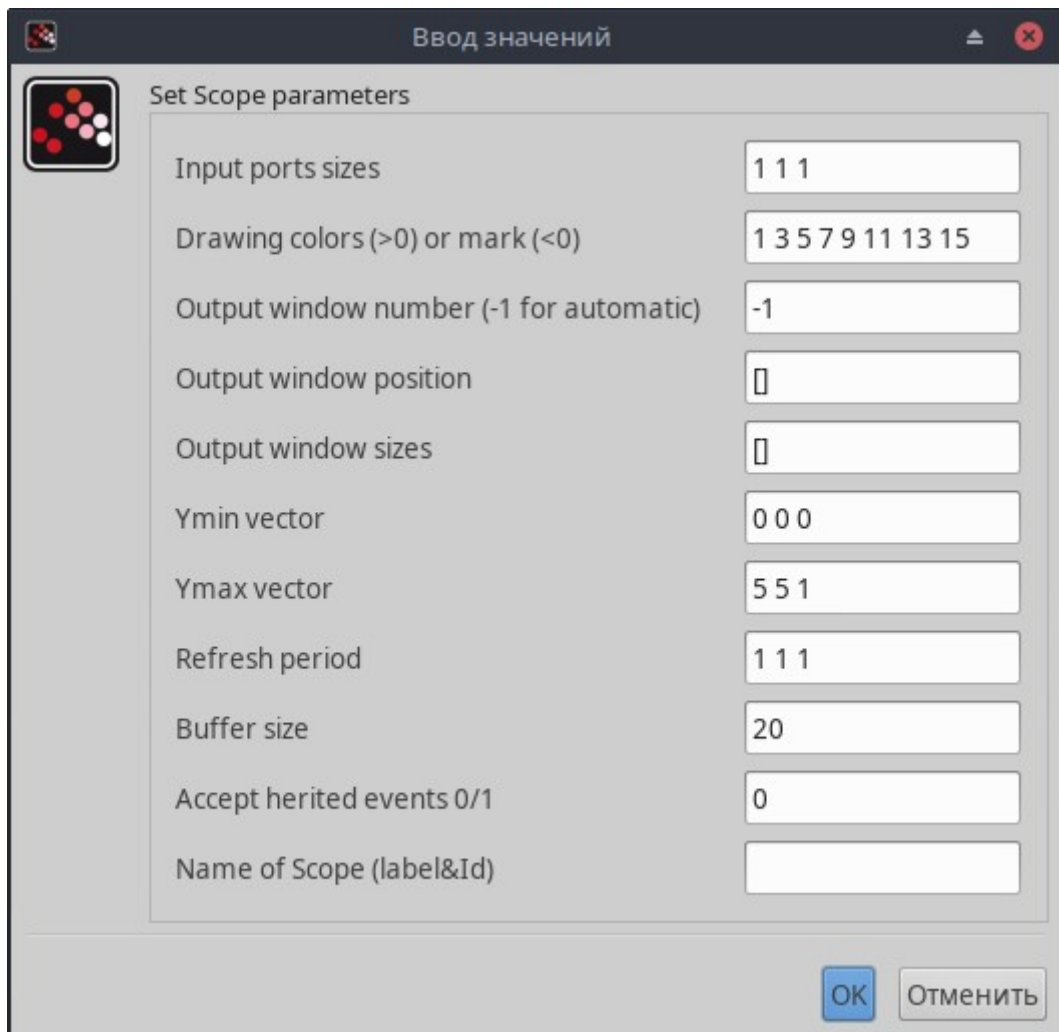


Рис. 21. Параметры первого осциллографа.

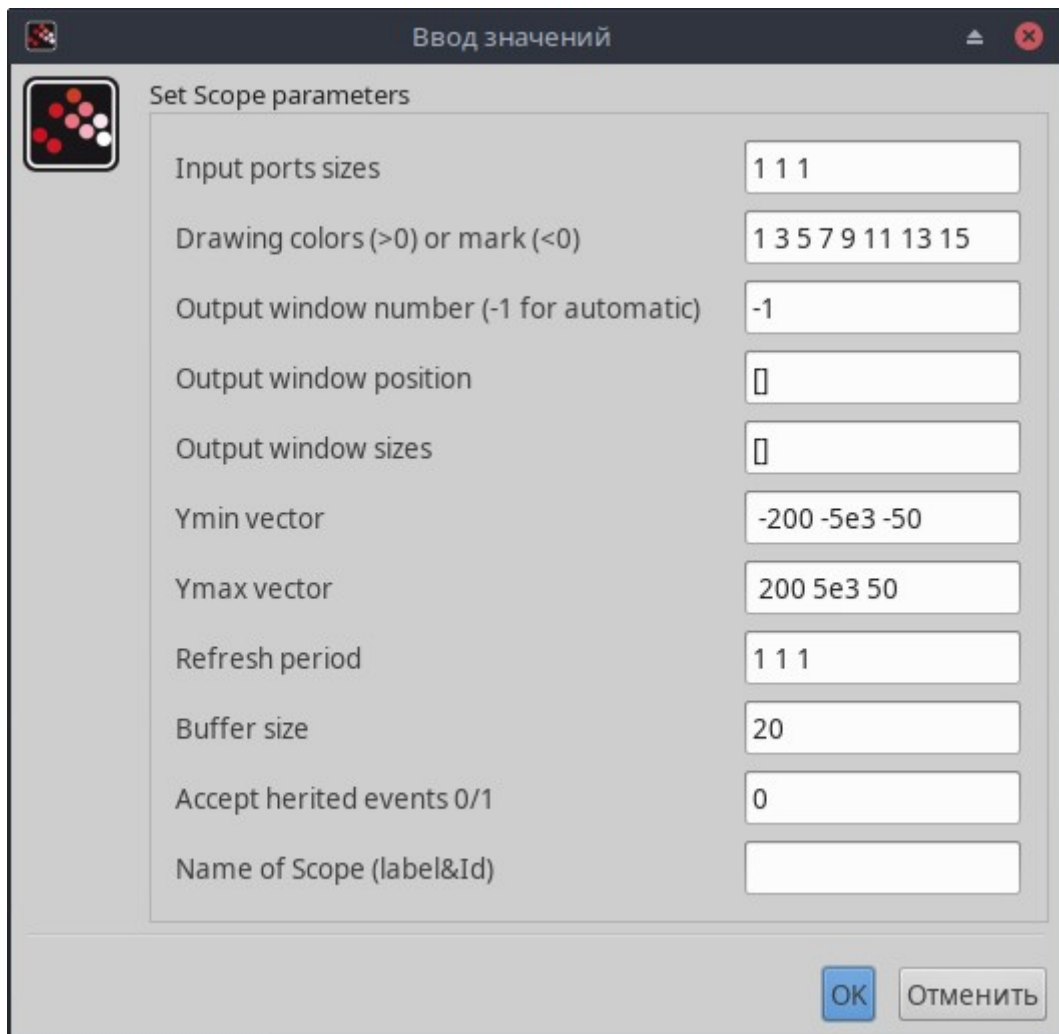


Рис. 22. Параметры второго осциллографа.

Запускаем моделирование и получаем.

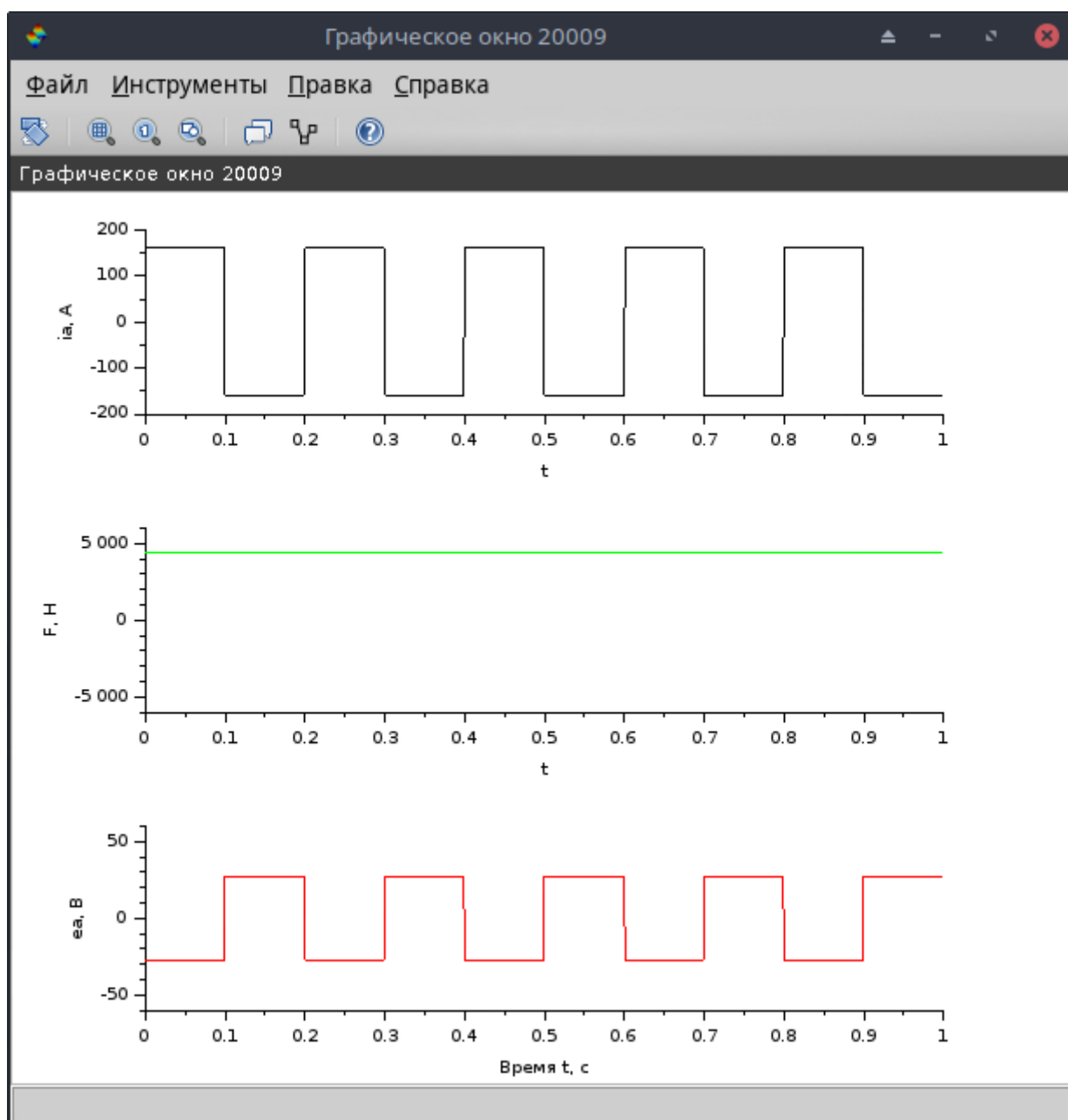


Рис. 23.

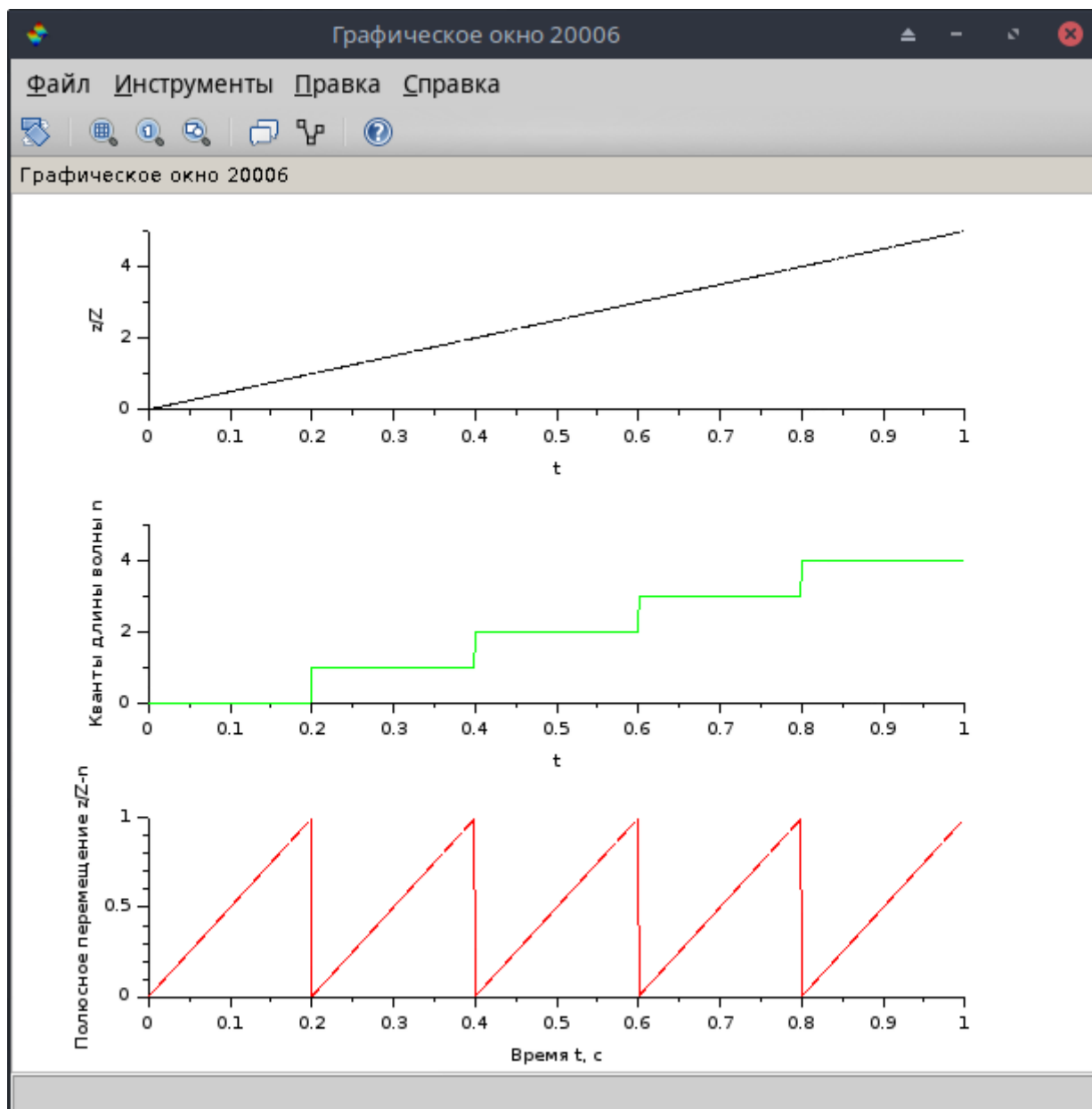


Рис. 24.

Вместо постоянной скорости задаём нарастающую скорость с помощью блока RAMP с параметрами, указанными на рис. 25.

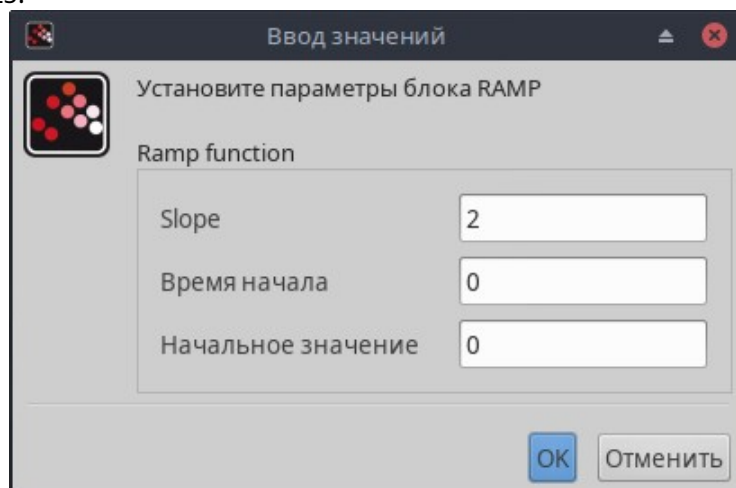


Рис. 25.

В полученной блок-схеме (Рис. 26) получаем результат моделирования (Рис. 27 и 28).

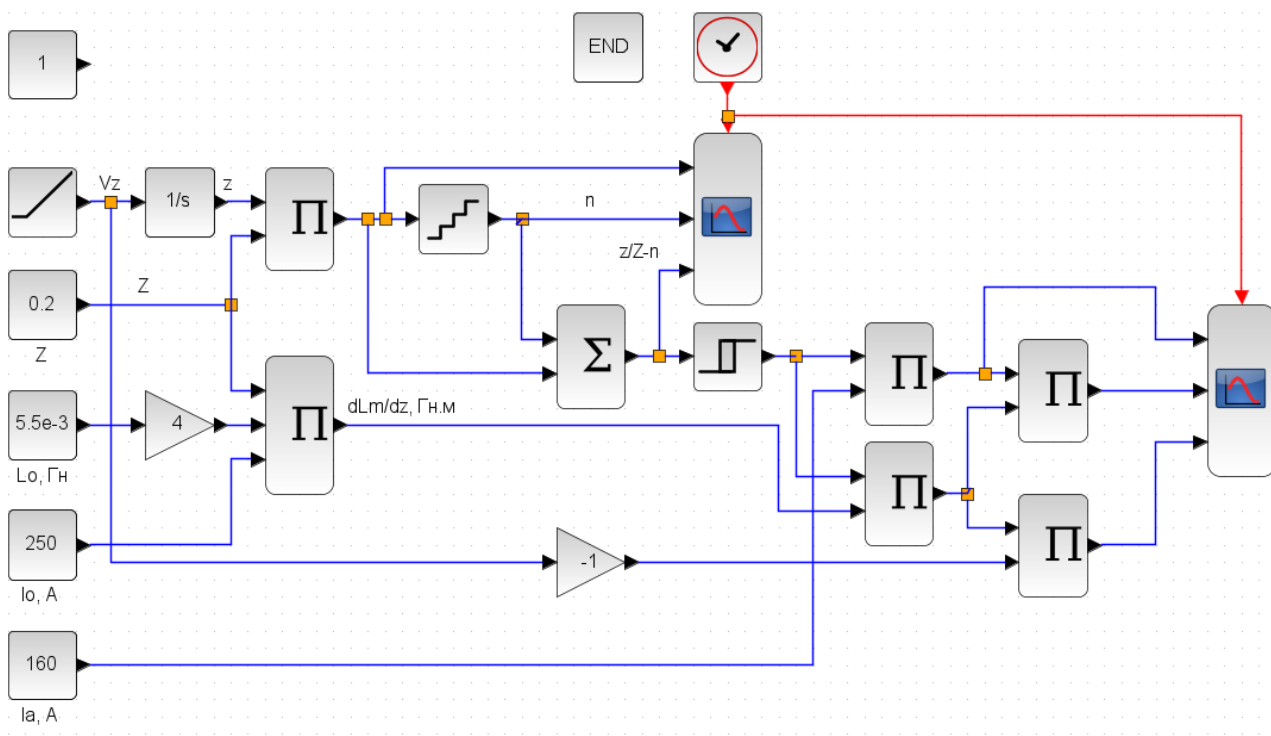


Рис. 26.

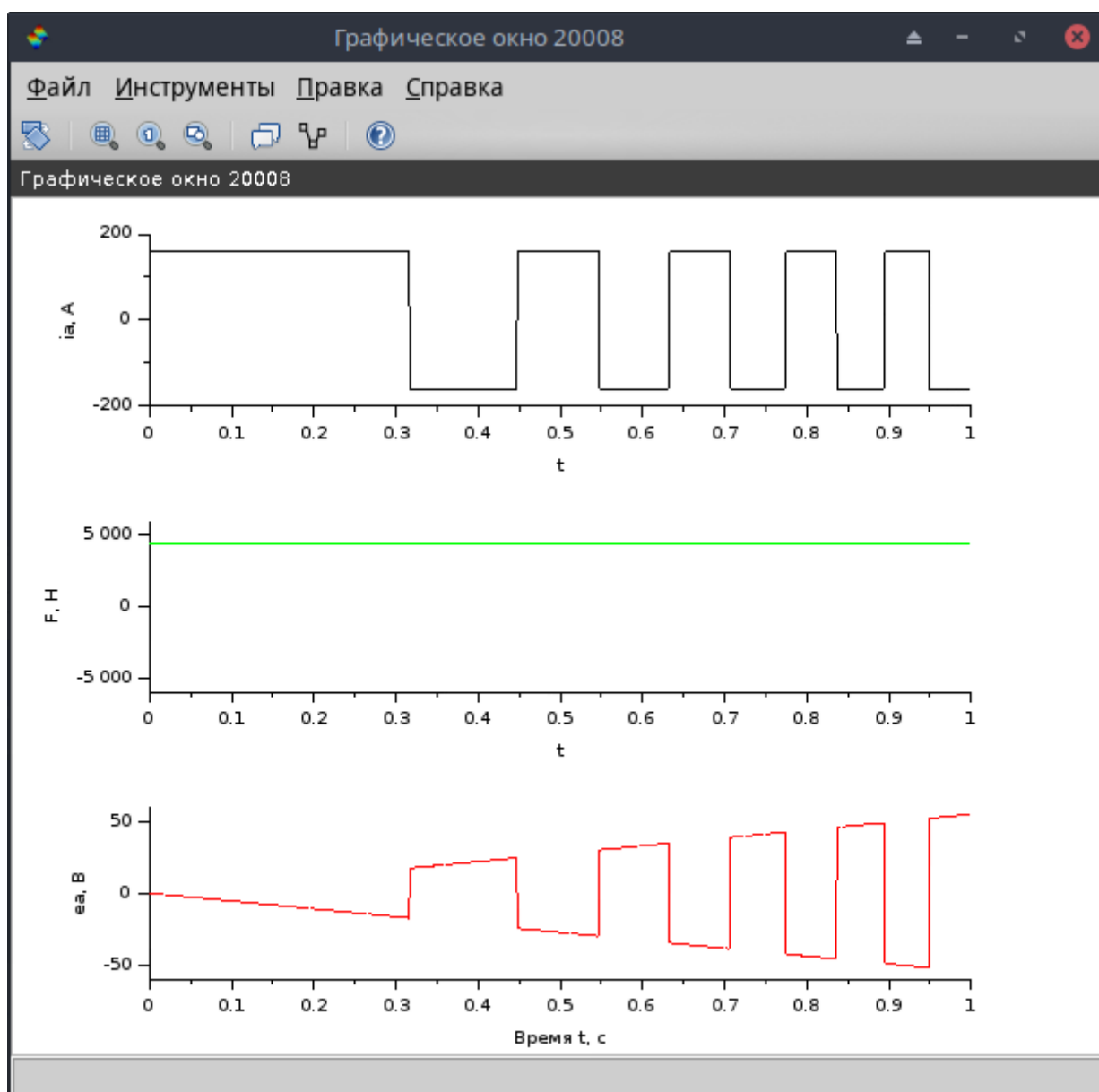


Рис. 27.

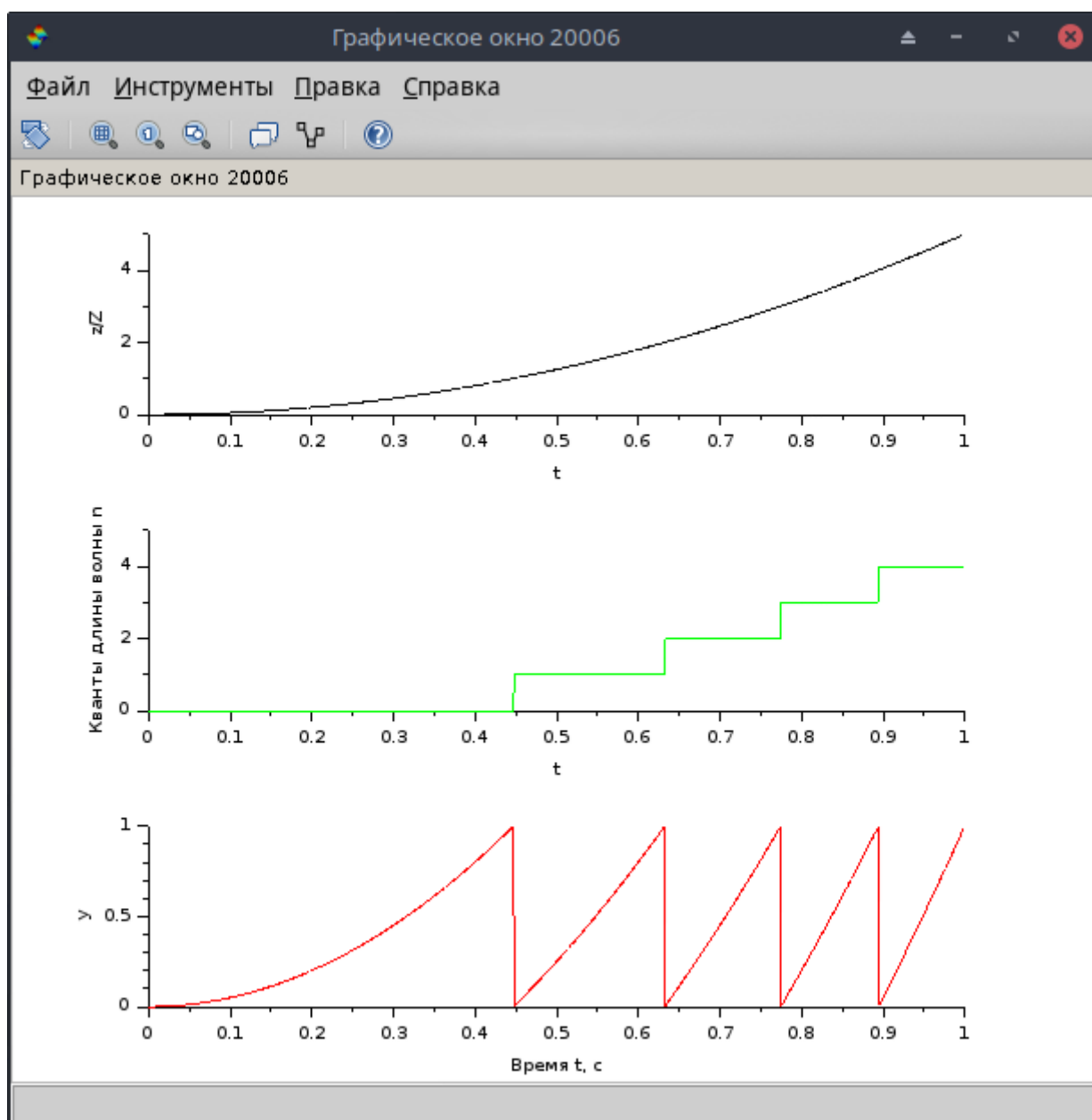


Рис. 28.

Для задания тока якоря используем задатчик режимов в виде блока Signal Builder и устанавливаем полученную модель тяговой машины в созданную нами ранее имитационную модель движения транспортного средства. Полученная блок-схема модели представлена на Рис. 29.

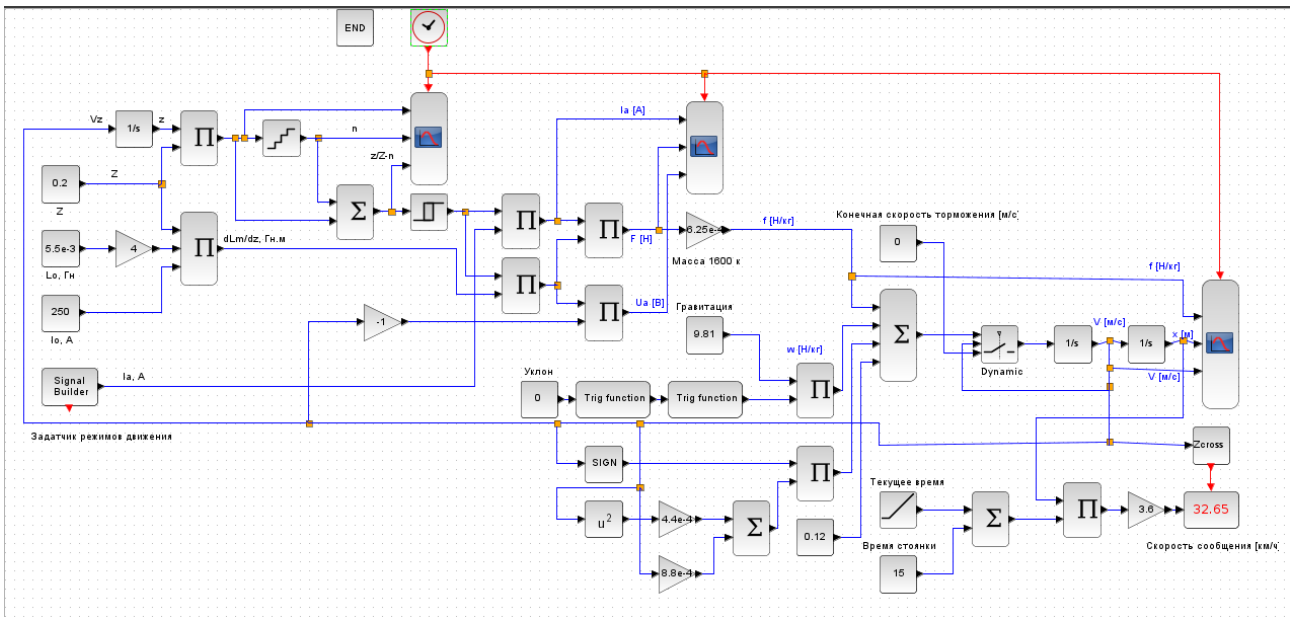


Рис. 29.

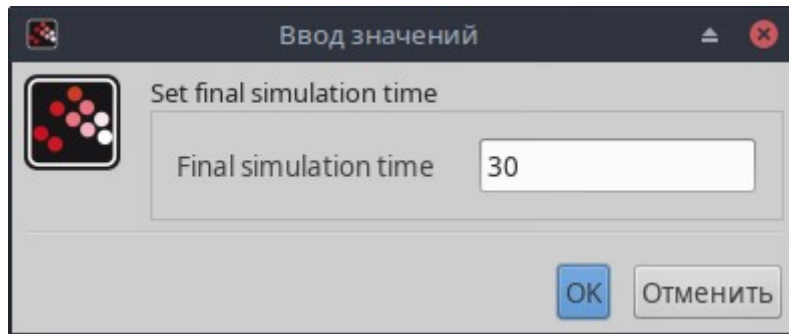


Рис. 30. Параметры блока END

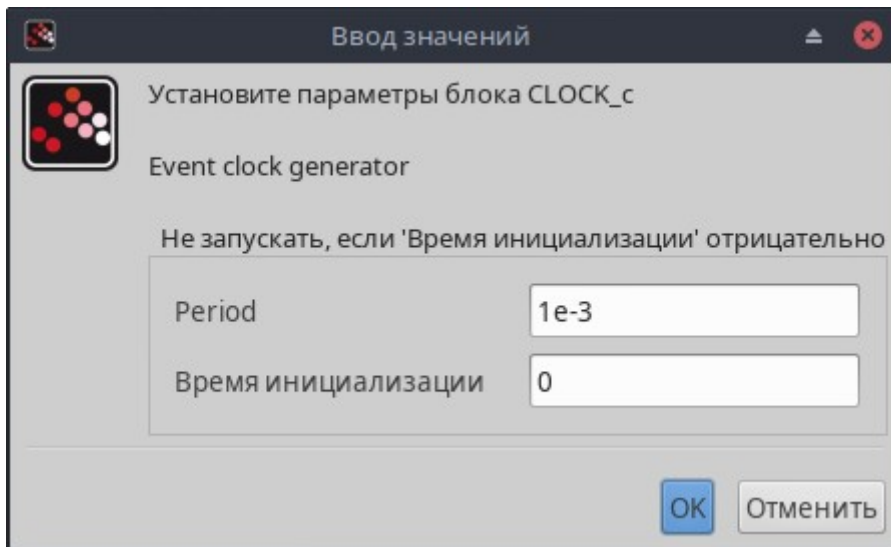


Рис. 31. Параметры блок CLOCK_c

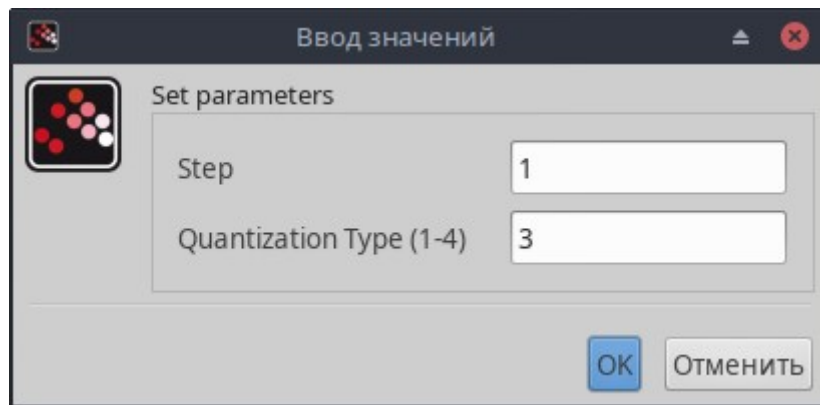


Рис. 32. Параметры блока QUANT_f.

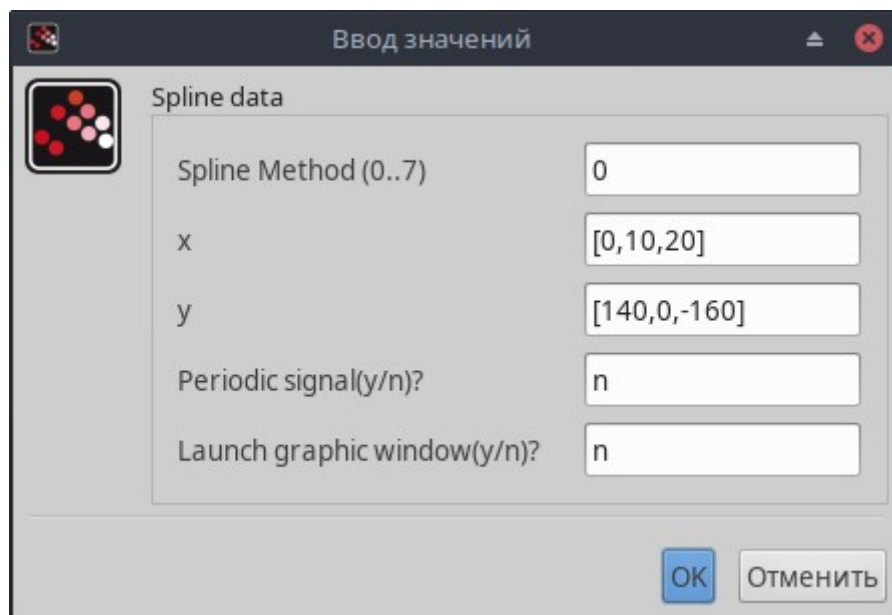


Рис.33. Параметры блока Signal Builder.

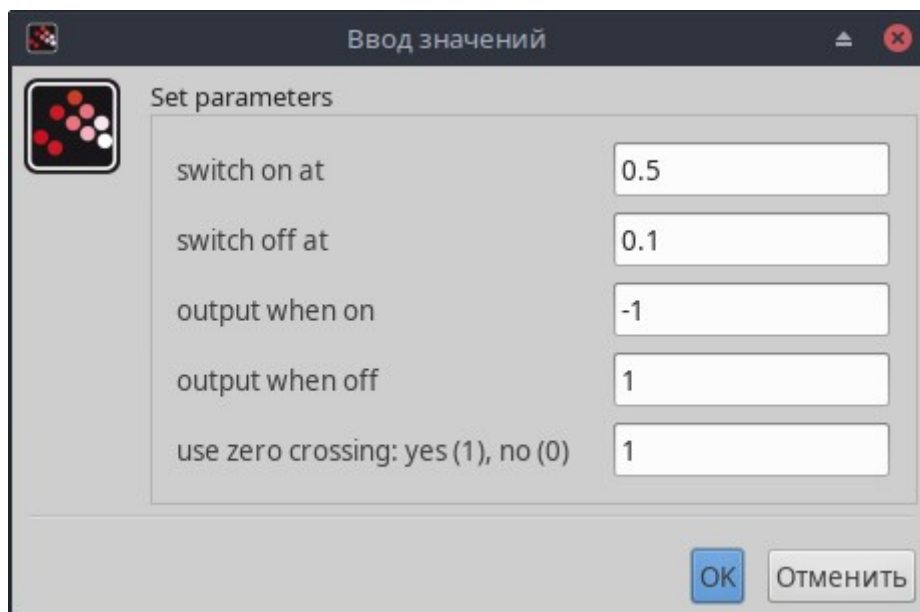


Рис. 34. Параметры блока HYSTERESIS.

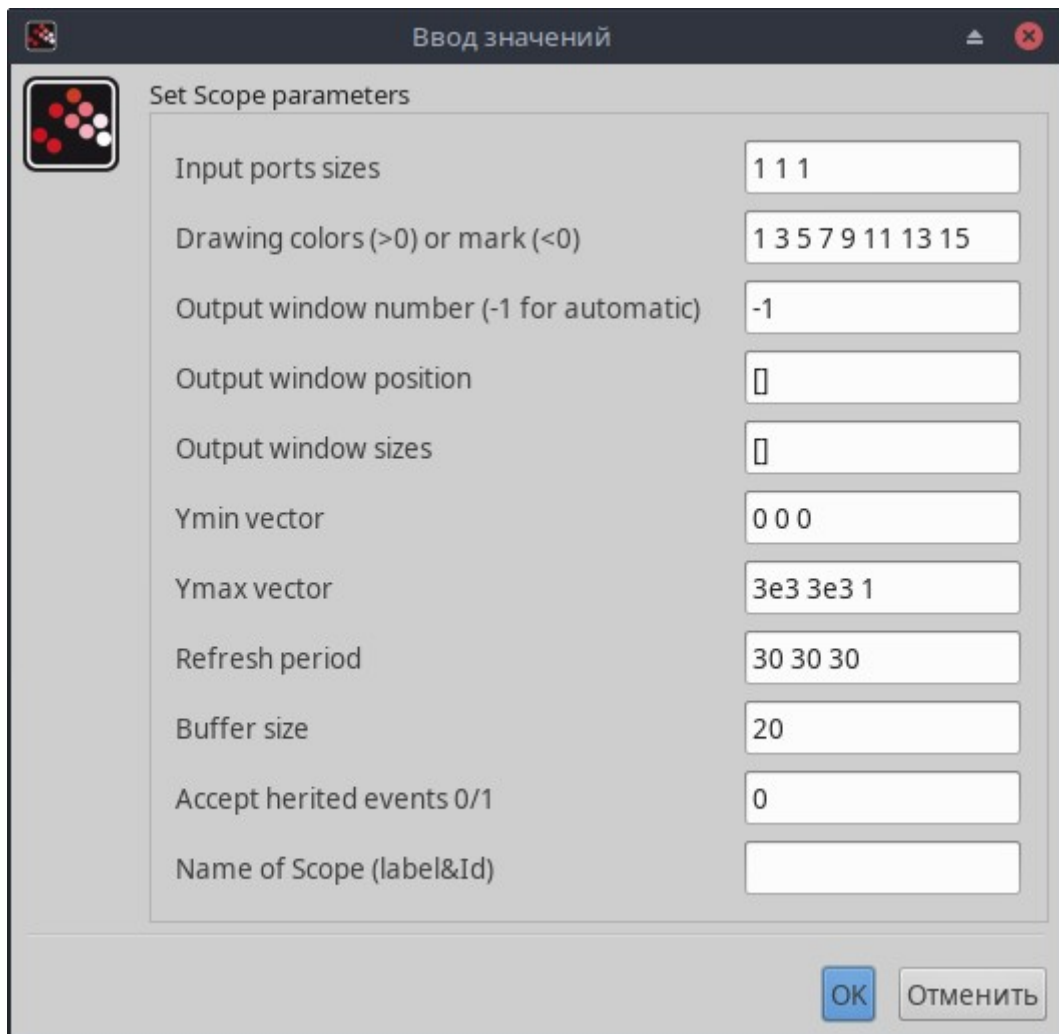


Рис. 35. Параметры первого осциллографа.

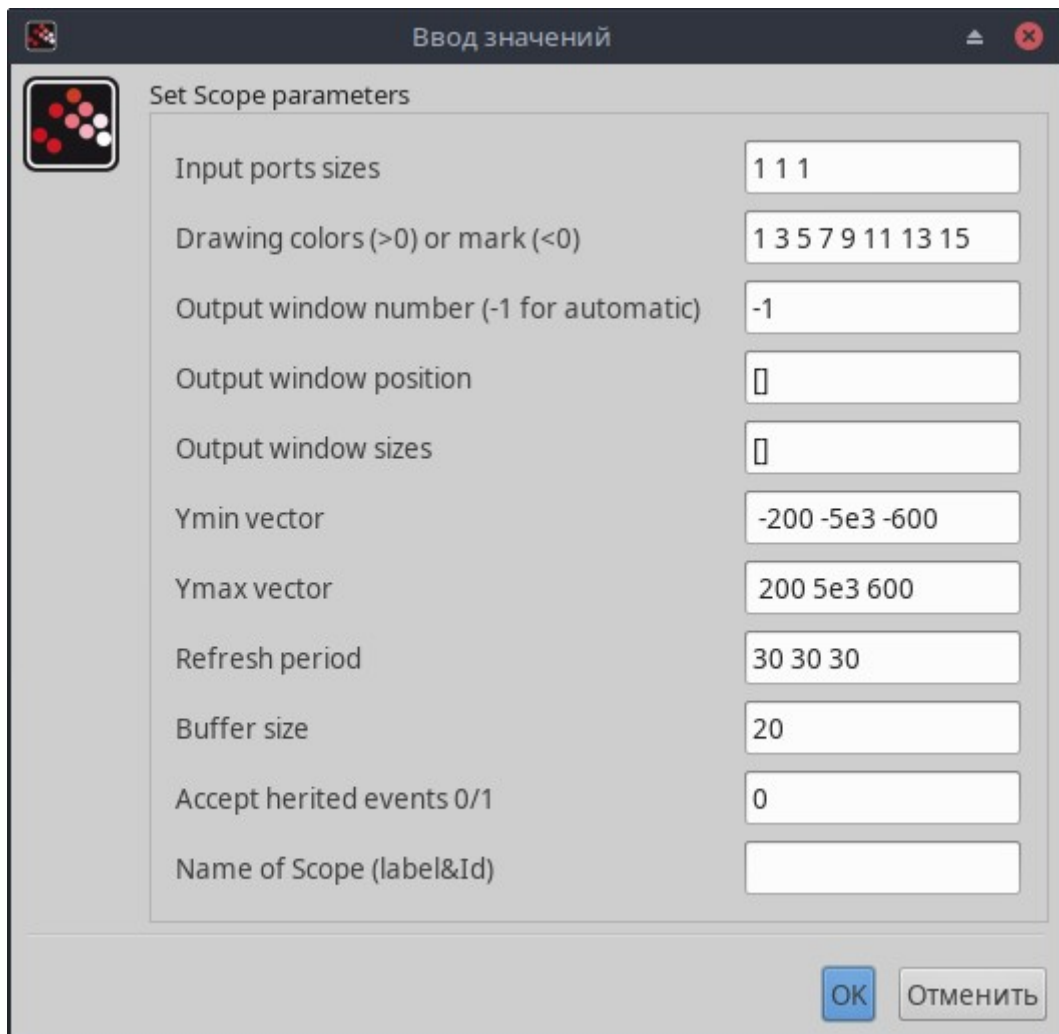


Рис. 36. Параметры второго осциллографа.

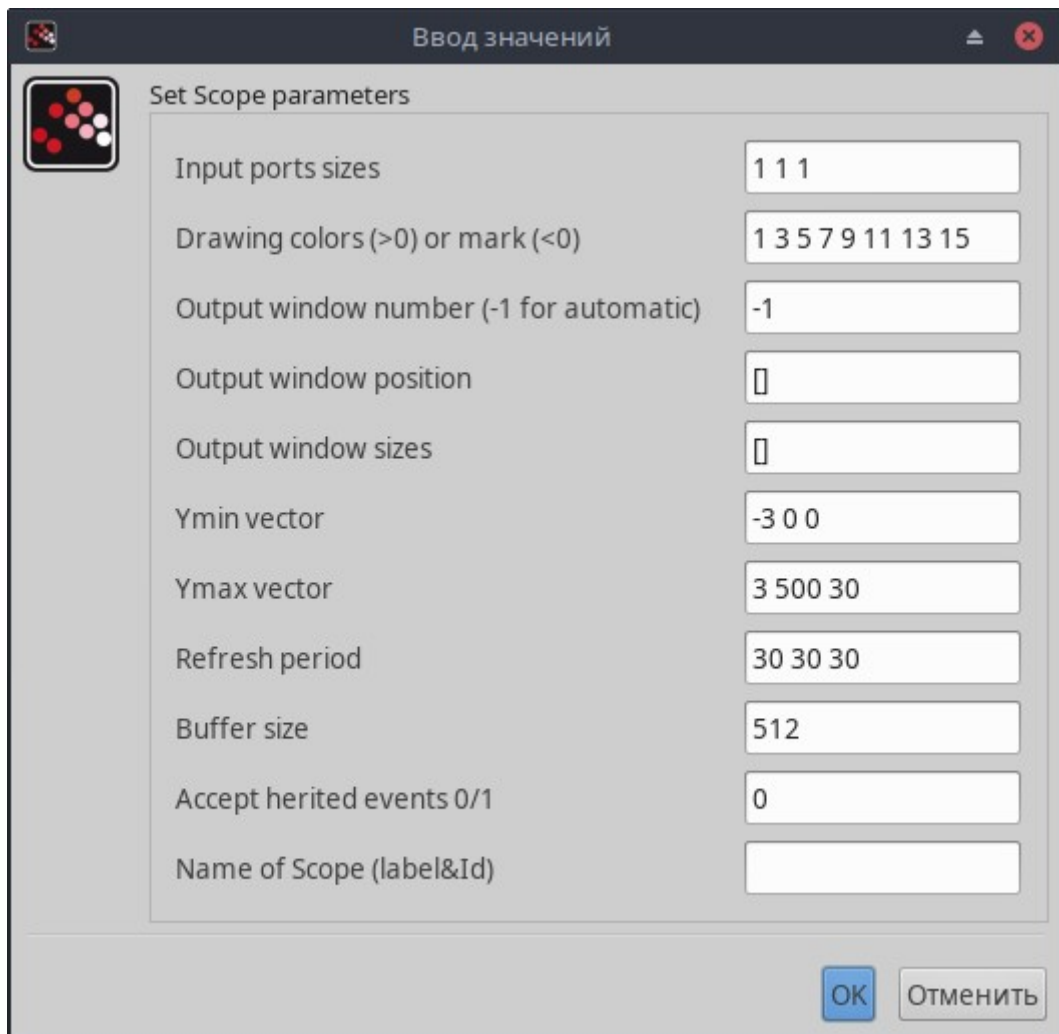


Рис. 37. Параметры третьего осциллографа.

После окончания моделирования получаем следующие результаты Рис. 38...40.

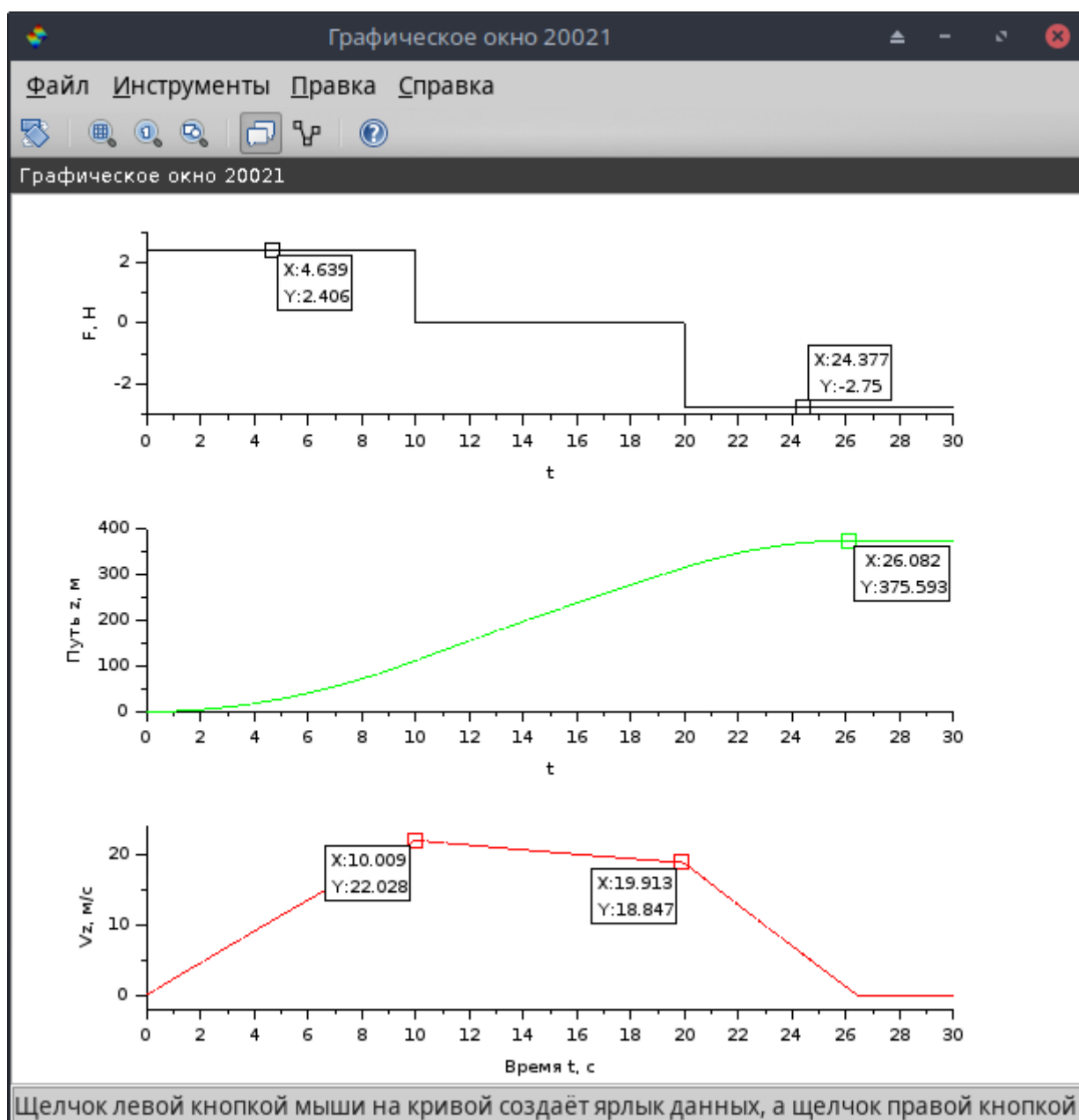


Рис. 38.

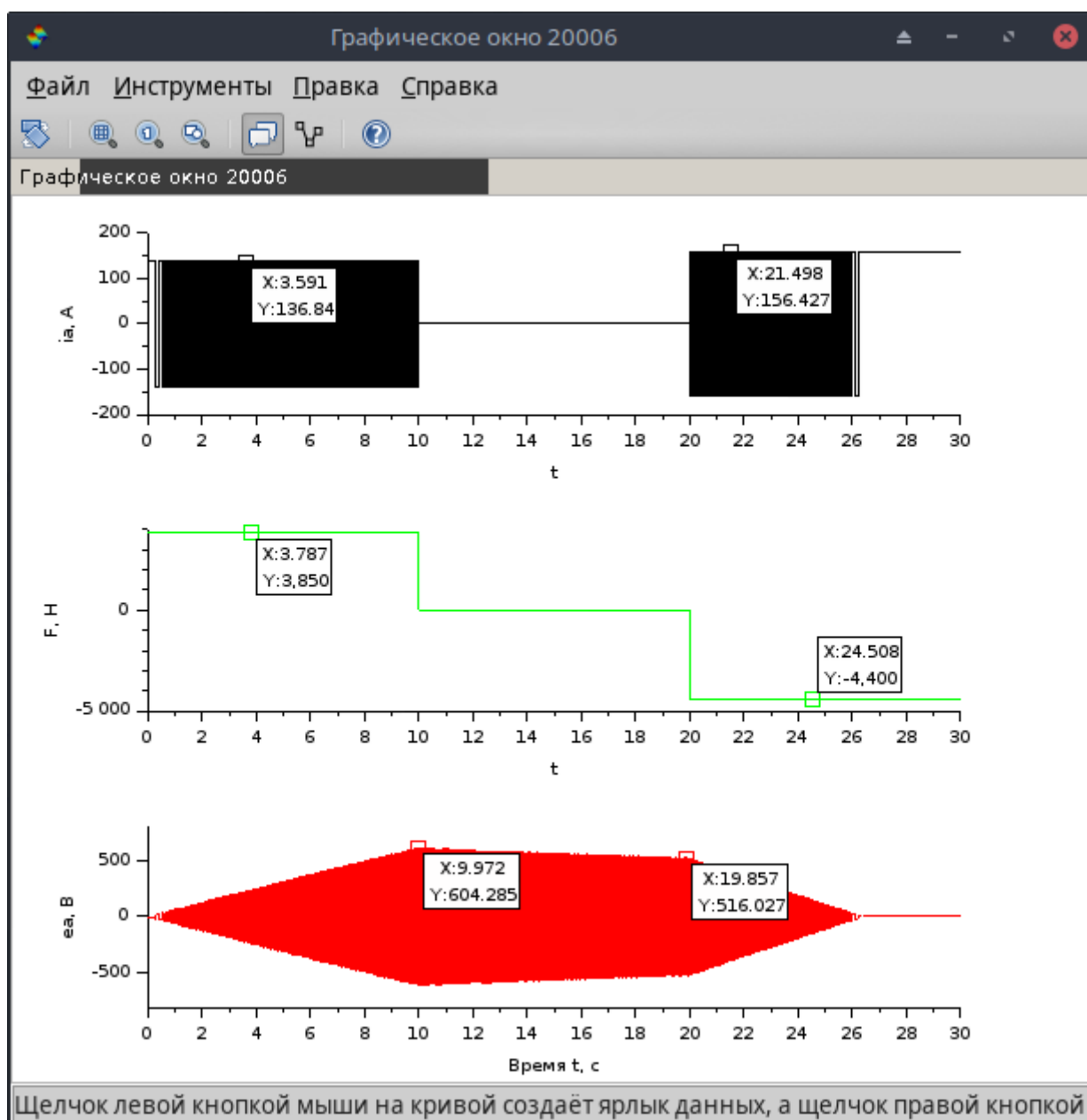


Рис. 39.

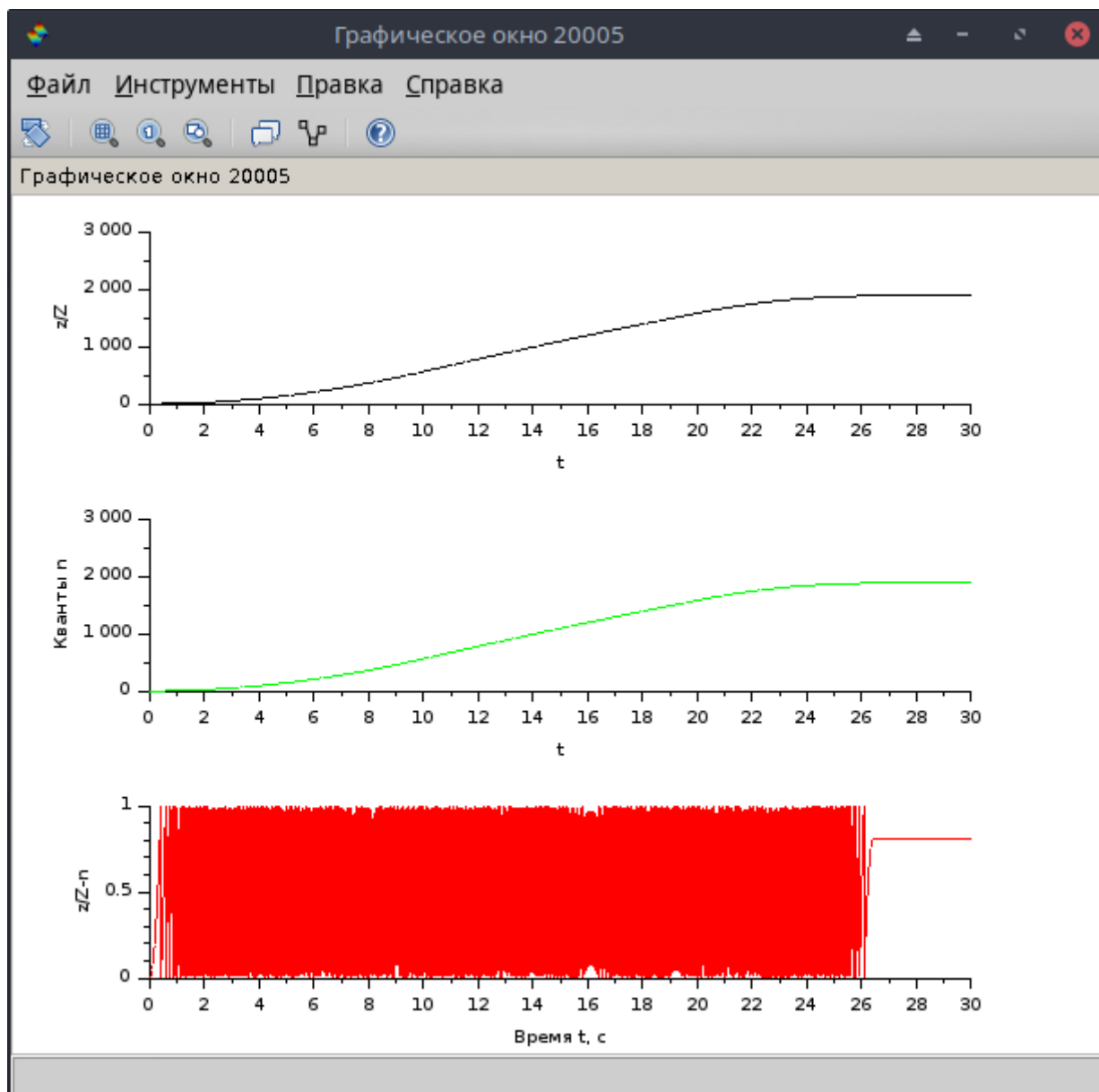


Рис. 40.

Рассмотрим теперь обобщённую компьютерную модель машины с гармонической зависимостью взаимной индуктивности. В случае биполярной магнитной системы уравнение взаимной индуктивности на интервале полюсного деления будет иметь вид

$$L_m = L_0 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{Z}\right) ,$$

и, соответственно,

$$\frac{dL_m}{dz} = -L_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{Z} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{Z}\right) ,$$

где

$$L_0 = \frac{\mu_0 \cdot S_0 \cdot w_{a0}^2}{y_0} .$$

Блок-схема модели представлена на рис. 41. На начальном этапе задаём постоянную скорость $V_z = 1$ м/с с помощью блока CONST_m. Параметры всех блоков такие же, как и для модели с линейной зависимостью взаимоиндуктивности Рис. 26, за исключением коэффициента $\frac{2 \cdot \pi}{Z}$ и функции $\cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot z}{Z}\right)$.

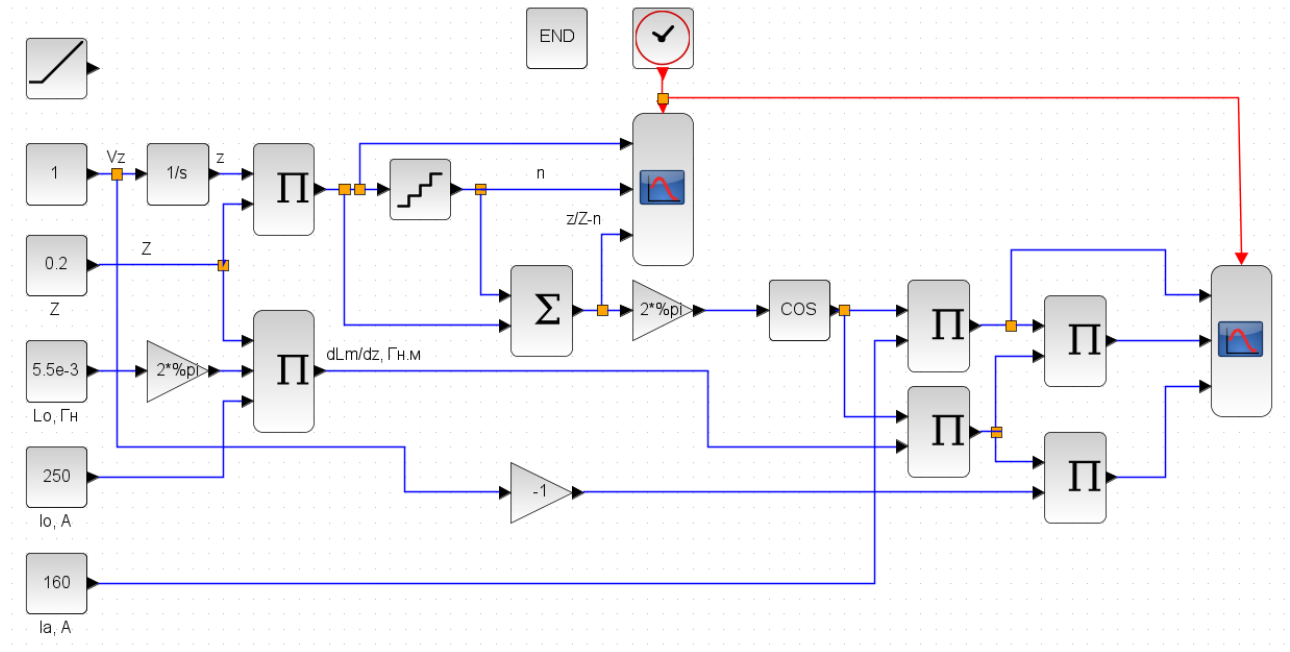


Рис. 41.

После запуска моделирования получаем результат, представленный на Рис. 42.

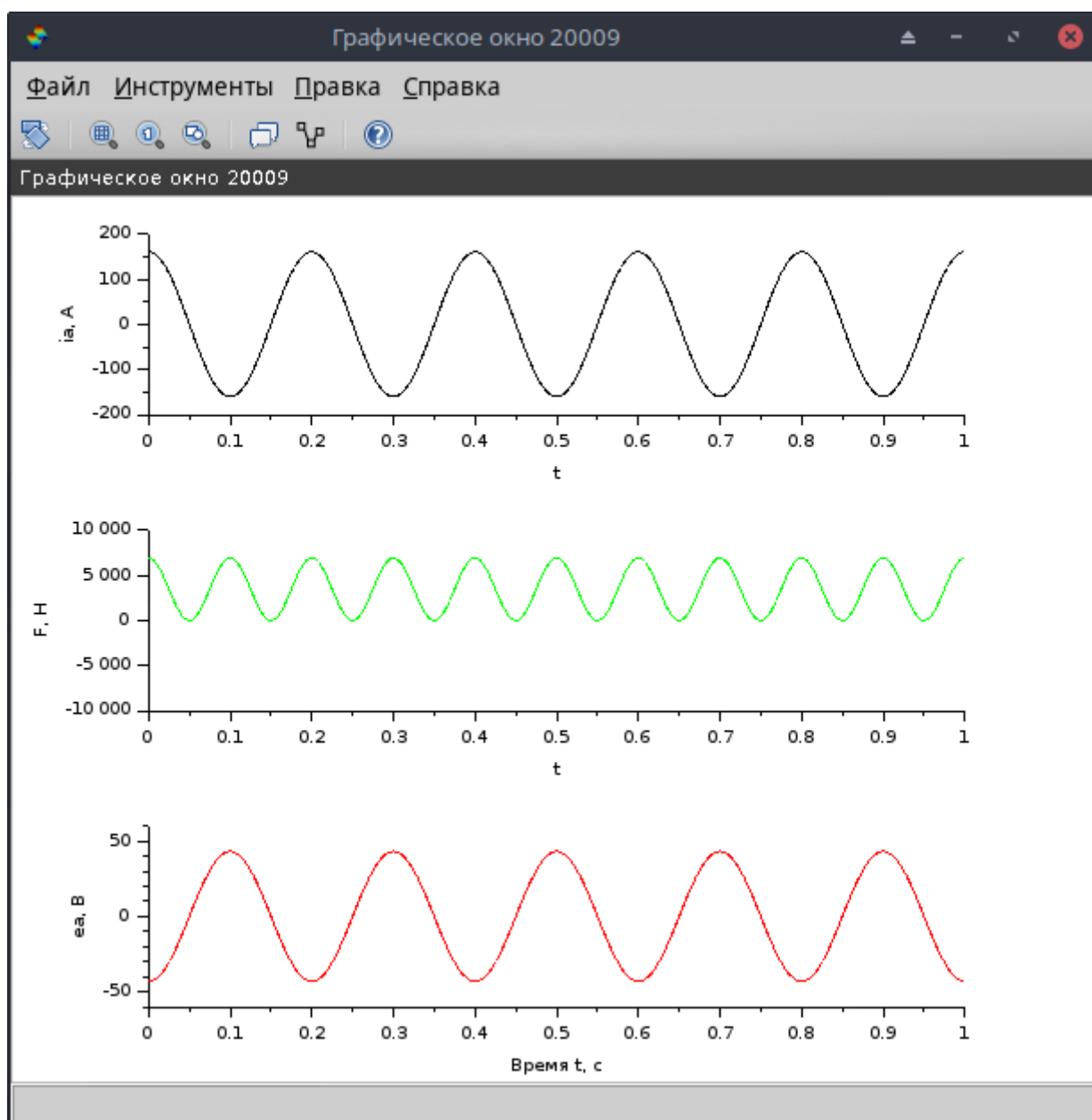


Рис. 42.

Из осциллограммы видно, что электромагнитная сила пульсирует с двойной частотой тока якоря. Для постоянства электромагнитной силы необходимо ввести вторую фазу в якорь со сдвигом на четверть периода, т. е. синусоидальную функцию. Добавим в блок схему модели вторую фазу якоря и получим блок-схему Рис. 43.

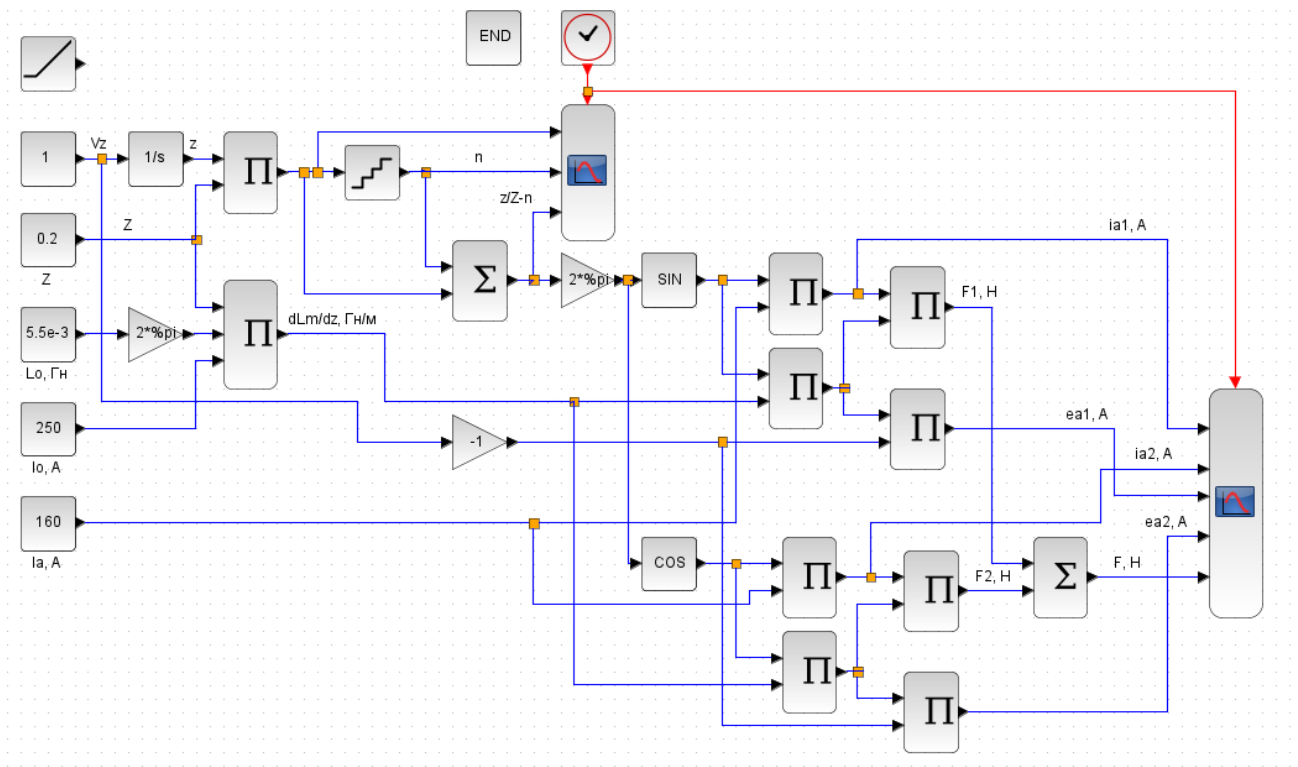


Рис. 43.

Запускаем полученную модель и получаем результат, приведённый на Рис. 44.

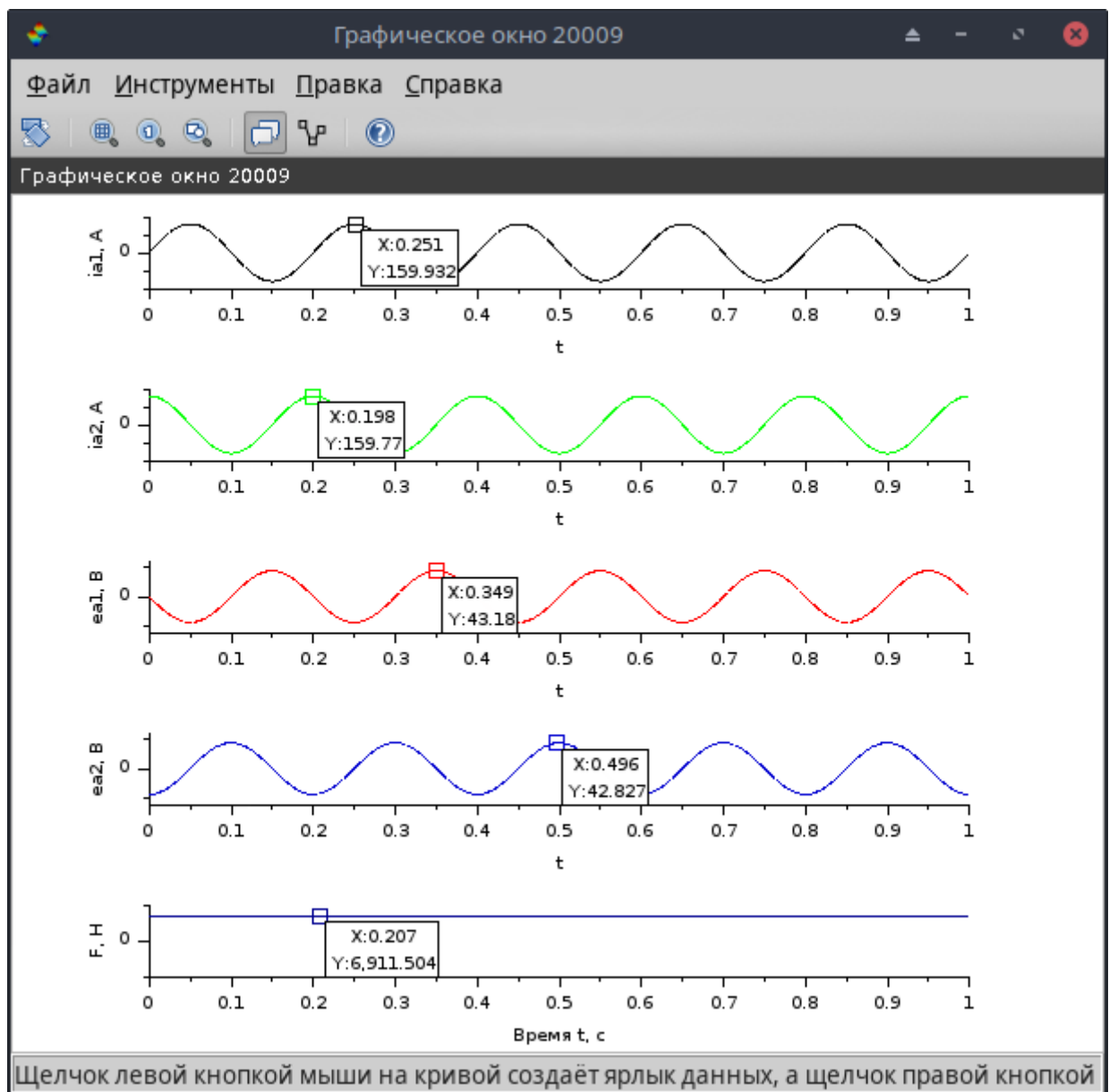


Рис. 44.

Как и следовало ожидать электромагнитная сила стала постоянной. Теперь подключаем полученную модель электрической машины к имитационной модели движения транспортного средства. Можно сказать, что устанавливаем тяговую электрическую машину на транспортное средство. Получаем блок-схему модели, представленную на Рис. 45.

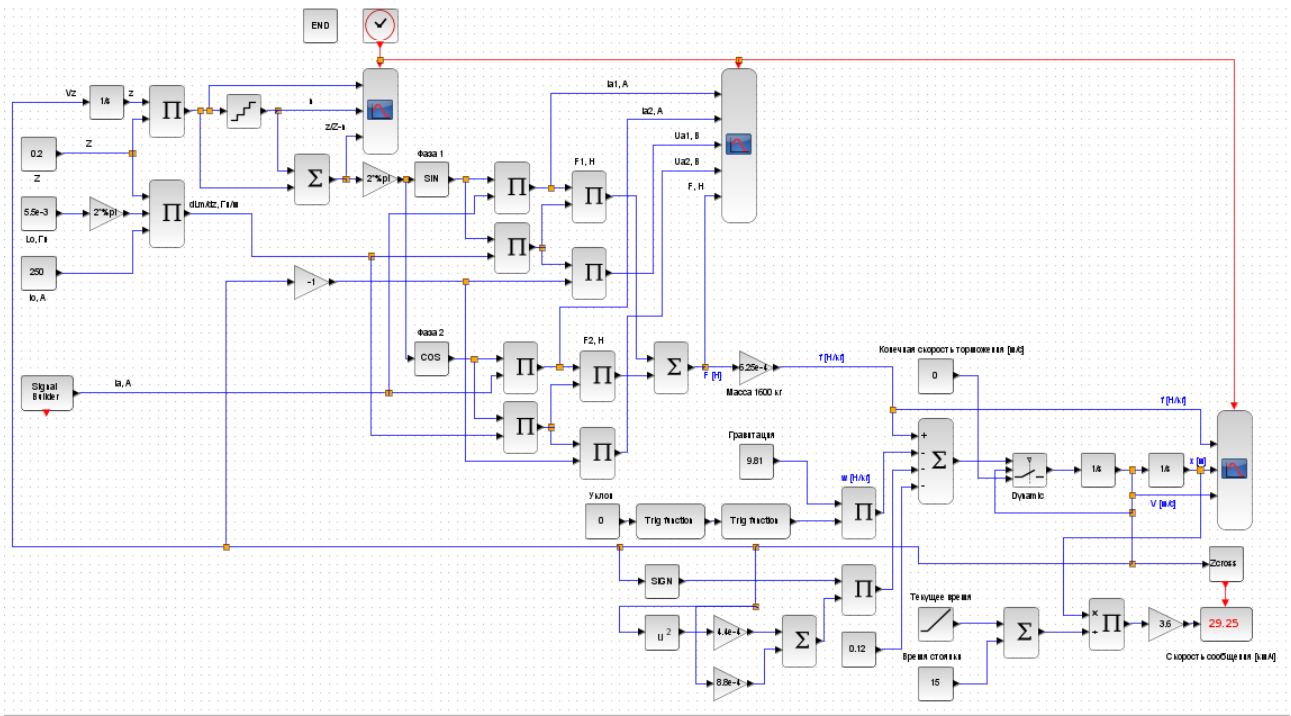


Рис. 45.

Далее устанавливаем необходимые параметры блоков, согласно приведённым ниже рисункам

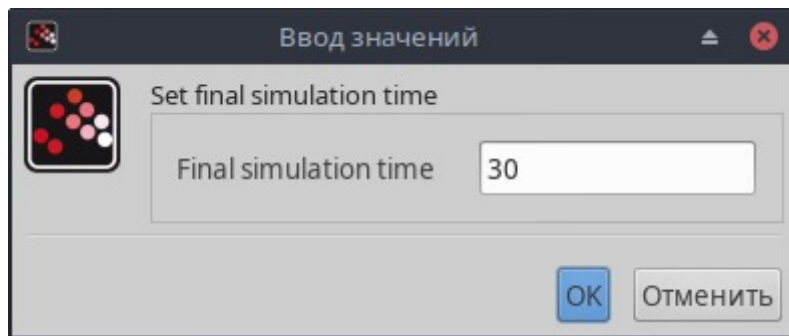


Рис. 46. Параметры блока END

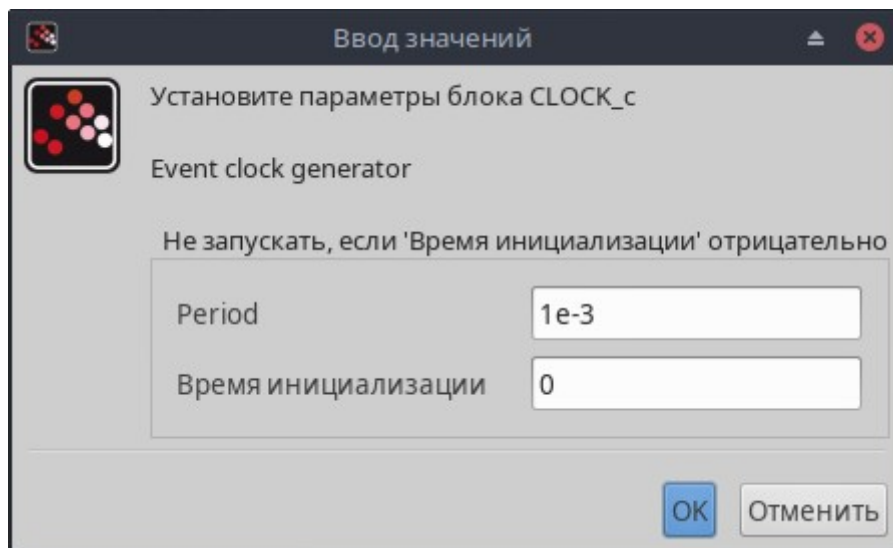


Рис. 47. Параметры блок CLOCK_c

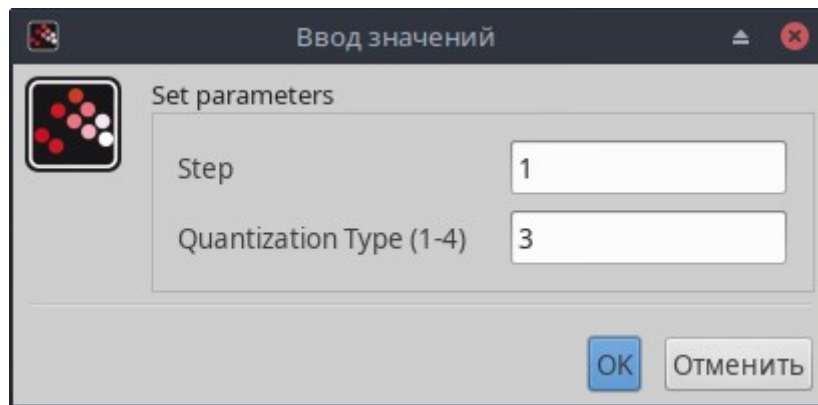


Рис. 48. Параметры блока QUANT_f.

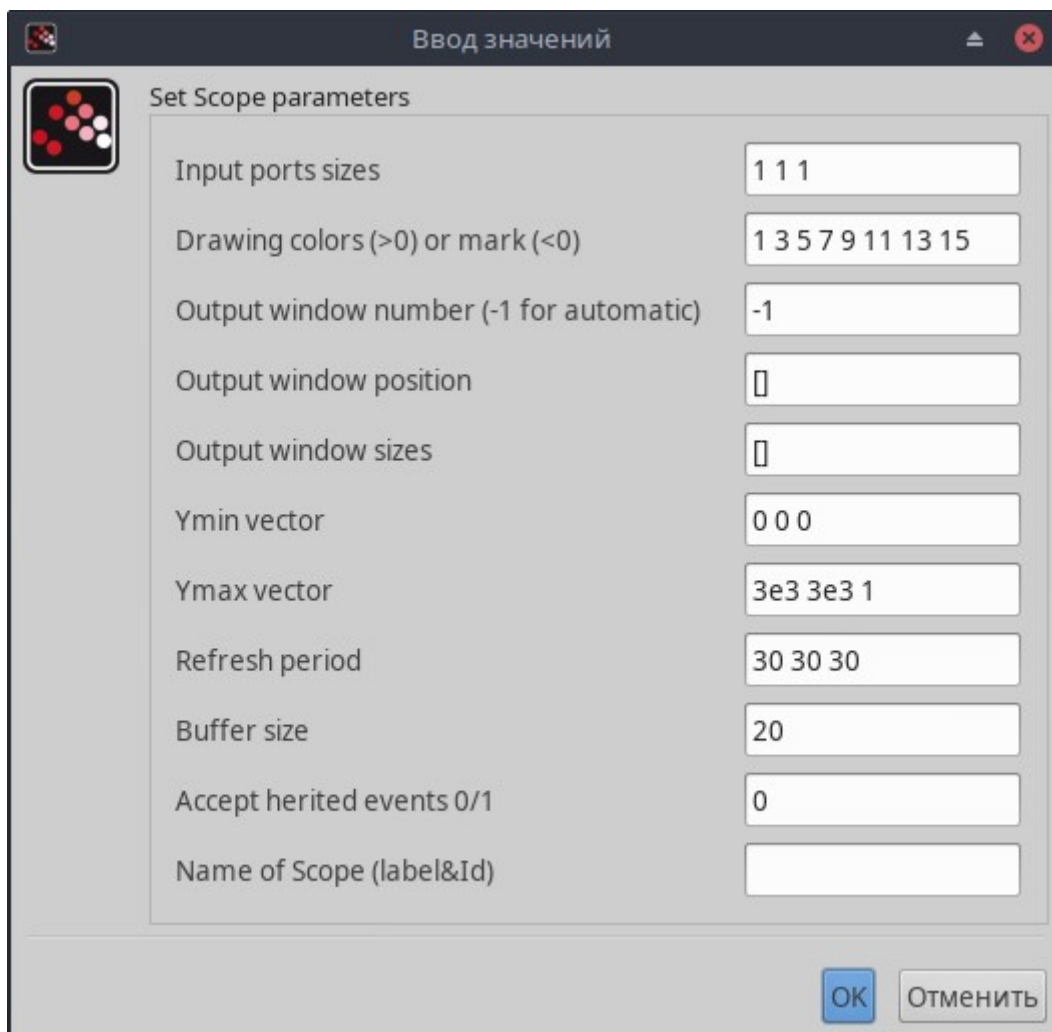


Рис. 49. Параметры первого осциллографа

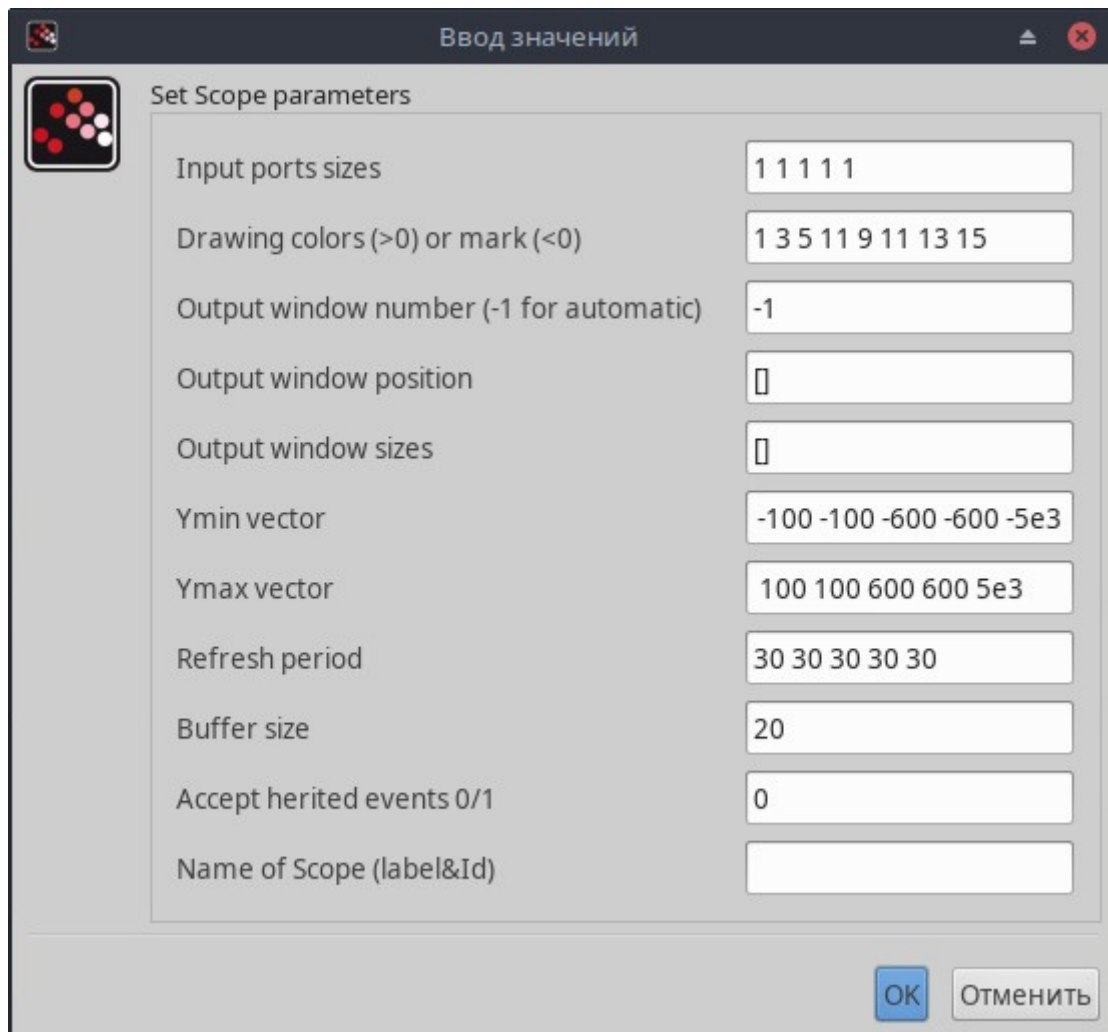


Рис. 50. Параметры второго осциллографа

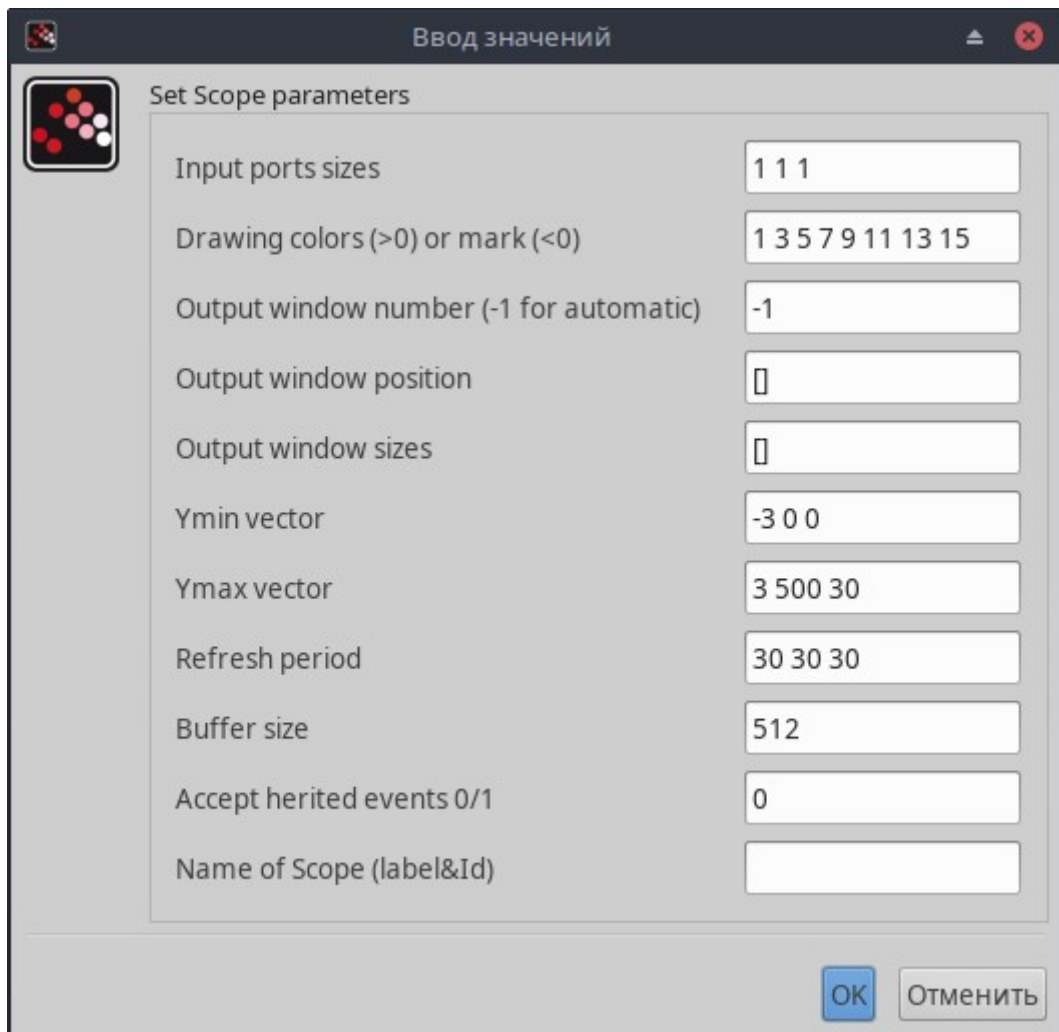


Рис. 51. Параметры третьего осциллографа.

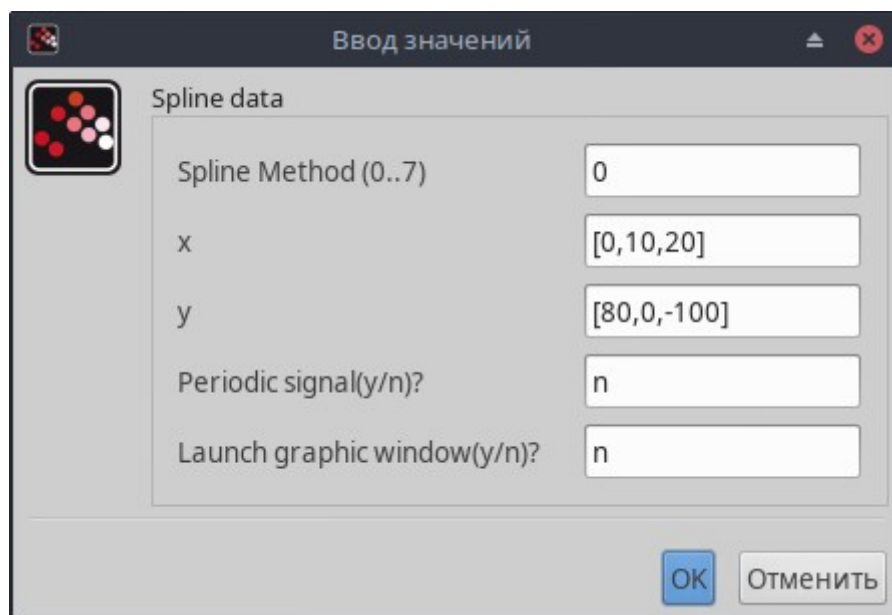


Рис. 52. Параметры блока Signal Builder

Получаем следующие результаты моделирования Рис. 53...55.

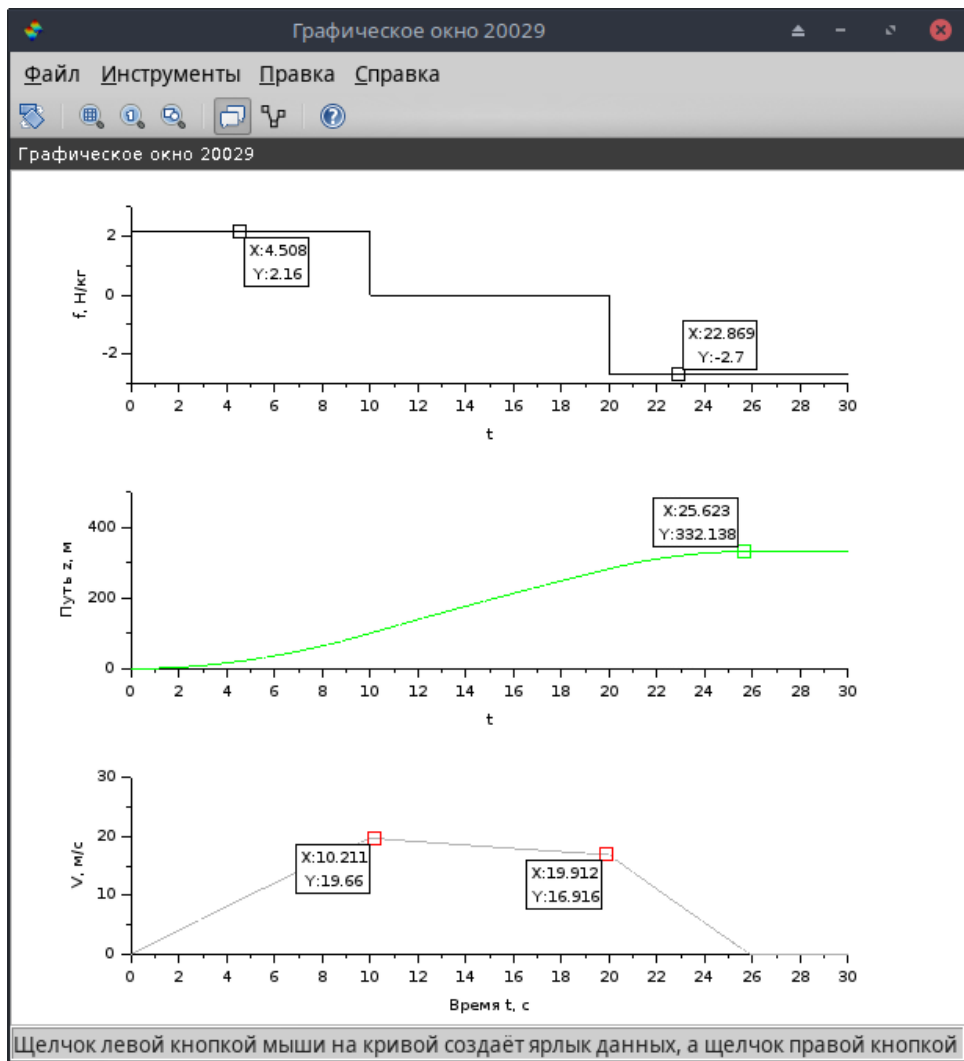


Рис. 53.

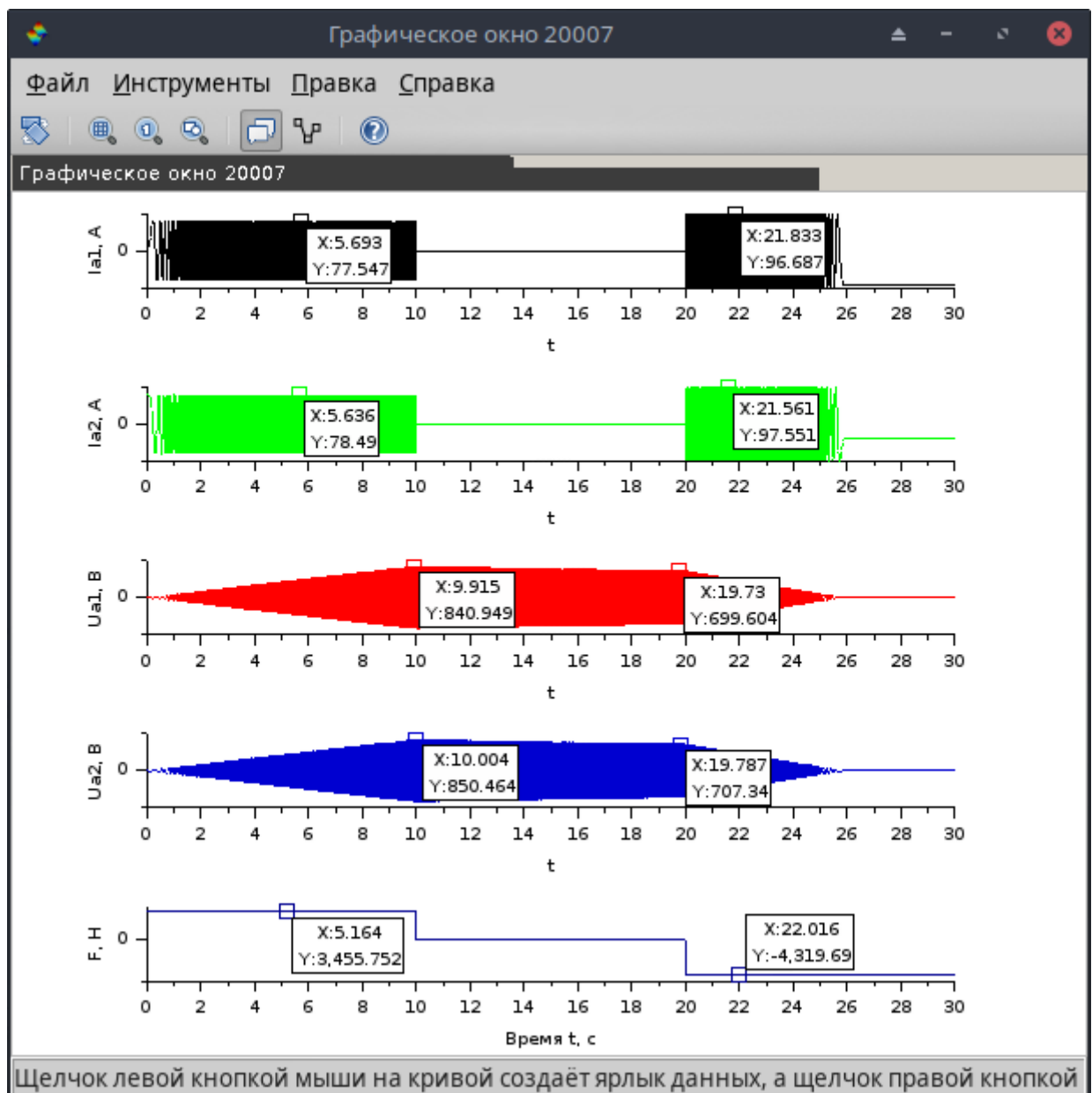


Рис. 54.

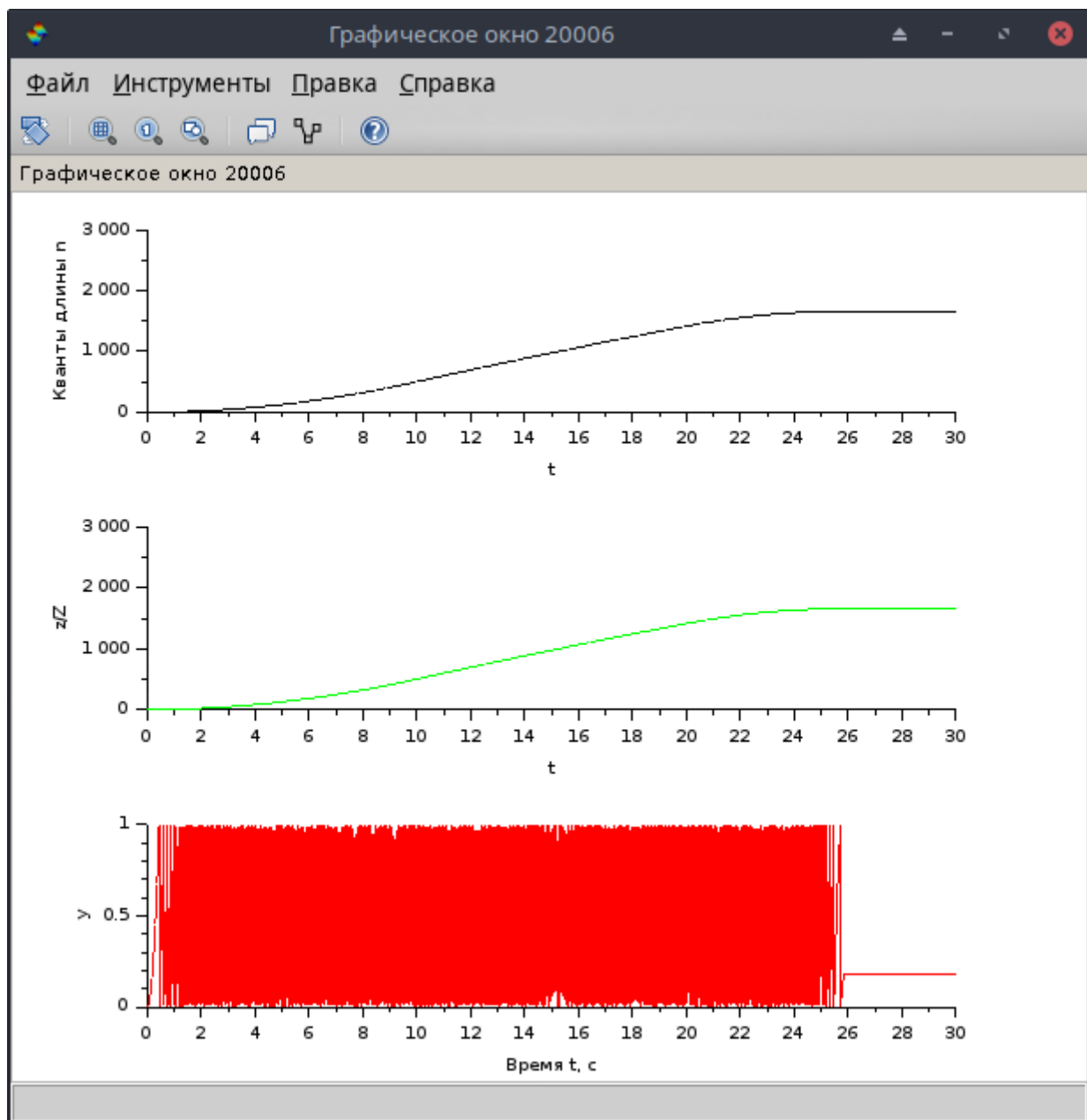


Рис. 55.

8. Моделирование электромагнитных процессов в многофазных тяговых электрических машинах

Для уменьшения пульсаций электромагнитной силы в электросиловых агрегатах используют многофазные обмотки якоря. Они сдвинуты относительно друг друга вдоль длины рабочего воздушного зазора на величину кратную волновому делению (двум полюсным делениям) Z , делённую на количество фаз m .

Любая многофазная магнитная система электрической машины может быть отображена схемой замещения, представленной на рис. 56.

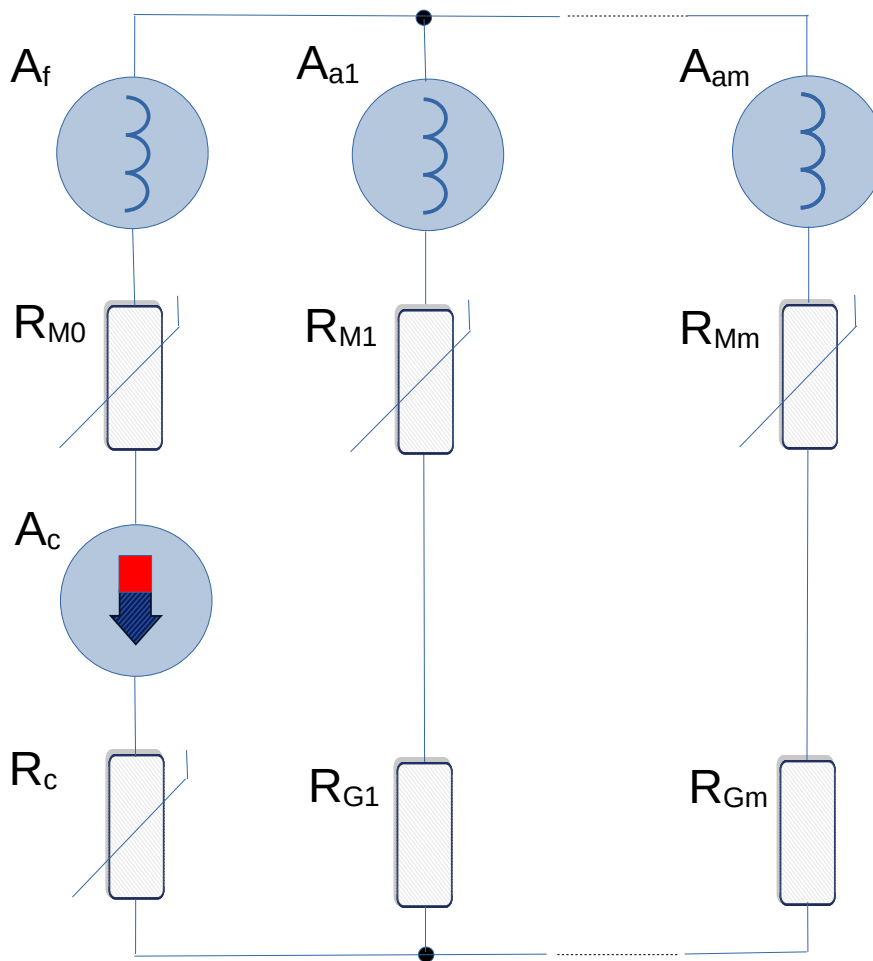


Рис. 56. Схема замещения магнитной цепи многофазной машины.

На схемах обозначено:

m — количество фаз машины;

A_f — намагничивающая сила (н.с.) обмотки возбуждения, А;

A_a — намагничивающая сила (н.с.) обмоток якоря, А;

A_c — н.с. постоянного магнита возбуждения, А;

$$A_c = H_c \cdot l_c,$$

где H_c — коэрцитивная сила постоянного магнита А/м,

l_c — длина (толщина) постоянного магнита, м;

R_c — магнитное сопротивление постоянного магнита, $R_c = \frac{1}{\Lambda_c}$, где Λ_c — магнитная

проводимость постоянного магнита

$$\Lambda_c = \frac{S_c \cdot \mu_0 \cdot \mu_c}{l_c}$$

R_M — магнитное сопротивление стального участка магнитопровода, $R_M = \frac{1}{\Lambda_M}$, где Λ_M

— магнитная проводимость стального участка магнитопровода

$$\Lambda_M = \frac{1}{\sum \left(\frac{l_k}{S_k \cdot \mu_0 \cdot \mu_k} \right)}$$

R_G — магнитное сопротивление воздушных зазоров, $R_G = \frac{1}{\Lambda_G} = \frac{l_G}{S_G \cdot \mu_0}$,

где L_G — магнитная проводимость рабочего воздушного зазора,

l_G - длина воздушных зазоров, м;

S_G - эквивалентная площадь воздушных зазоров, поперечная магнитному потоку, м².

Для моделирования многофазных электрических машин могут быть использованы выше рассмотренные модели, дополненные требуемым количеством якорных обмоток, сдвинутых в пространстве и времени на величину фазового сдвига. Примерами таких моделей являются двухфазные модели с гармонической зависимостью взаимоиנדуктивности рис. 13 и 43.