

**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.**

# **Методические указания к курсовому проекту**

## **по дисциплине ЭО и СУ ЭПС**

**Часть 2**



**Москва — 2026**

## 6. Электромагнитные процессы в тяговых электросиловых агрегатах

Для уменьшения пульсаций электромагнитной силы в электросиловых агрегатах обычно 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. 39.

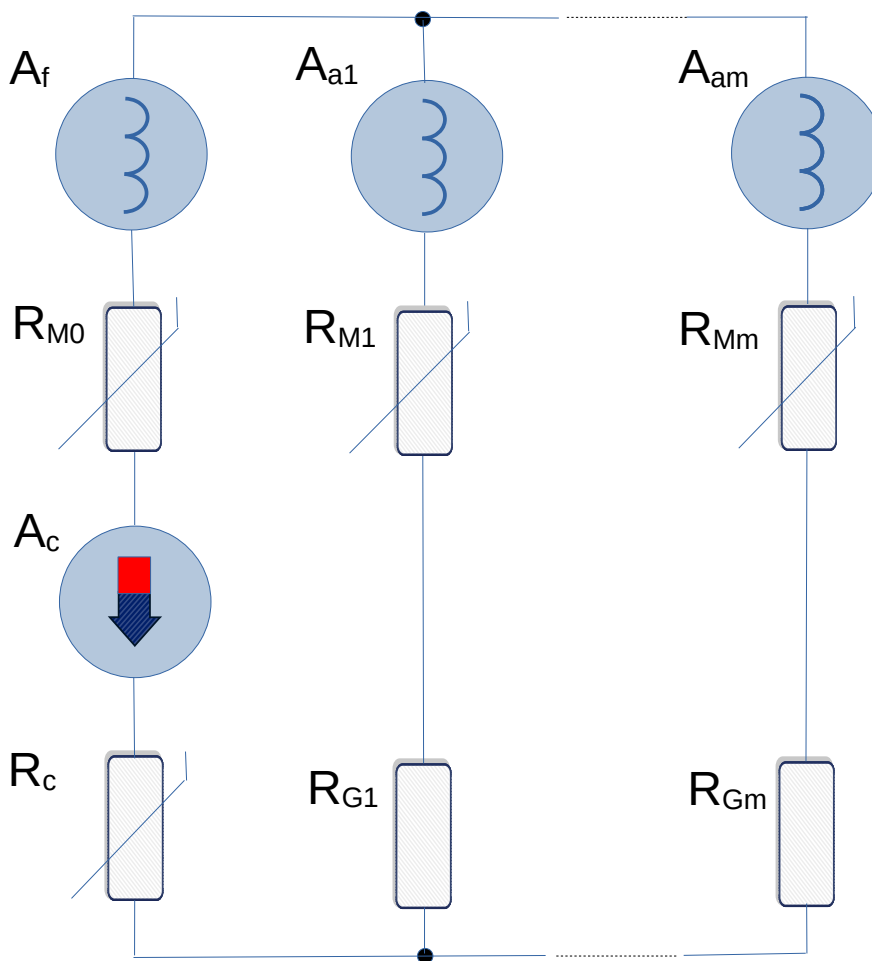


Рис. 39. Схема замещения магнитной цепи многофазной машины.

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  $\Lambda_c$  — 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  $\Lambda_M$  — 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  $\Lambda_G$  — магнитная проводимость рабочего воздушного зазора,

$l_G$  - длина воздушных зазоров, м;

$S_G$  - эквивалентная площадь воздушных зазоров, поперечная магнитному потоку, м<sup>2</sup>.

Для моделирования многофазных электрических машин могут быть использованы модели аналогичные однофазным, но дополненные требуемым количеством якорных обмоток, сдвинутых в пространстве и времени на величину фазового сдвига. Примерами таких моделей являются двухфазные модели с гармонической зависимостью взаимоиндуктивности.

## 6.1. Расчёт основных параметров тяговой электрической машины

### Линейная тяговая машина

Для расчёта и моделирования линейной тяговой электрической машины должны быть заданы следующие исходные данные.

#### Исходные данные

- Номинальная индукция в рабочем воздушном зазоре агрегата  $B_m$ , обычно в диапазоне от 0,7 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)  $\nu$ , Гц;
- Тип магнитной системы (монополярная или биполярная) и закон изменения потокосцепления фаз (линейный или гармонический);
- Количество пар полюсов  $p$ ;
- Номинальное напряжение источника питания агрегата  $U_s$ , В.

#### Расчёт

Расчёт производится в следующей последовательности:

1. Волновое деление (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  $\lambda = \frac{L_m}{L_0}$ ,  $k_z = \frac{2}{Z}$  - для монополярной магнитной системы с линейным изменением потокосцепления фаз,  $k_z = \frac{4}{Z}$  - 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 (по оси x)  $l_a = (0,3 \dots 1,0) Z$ , м;
4. Полная площадь магнитного сечения  $S_0 = \frac{Z \cdot l_a}{2}$ , м<sup>2</sup>;
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 (предварительно можно принять  $k_e = 0,95$ );
8. Коэффициент электромеханического преобразования  $k_{em} = A_0 \cdot \Lambda_0 \cdot k_z$ ,  $\frac{B \cdot c}{M}$
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, приведённый к якорю, полный ток (ток намагничивания) машины  $I_0 = \frac{A_0}{w_a}$ , А;
12. Номинальный суммарный активный ток фаз якоря  $I_{am} = \frac{F}{k_{em} \cdot w_a}$ , А;
13. Полная длина якоря машины по направлению движения (вращения) якоря  $l_z = p \cdot Z$ , м;
14. Диаметр якоря вращающейся машины  $D_a = \frac{l_z}{\pi} = \frac{p \cdot Z}{\pi}$ , м.

Ниже приведён текст программы на языке Scilang расчёта линейной тяговой электрической машины с помощью ИСП Scilab.

// Программа расчёта линейной тяговой электрической машины

```

// Тяговая линейная машина левитационного модуля ЭЛТРО

// Исходные данные

// Номинальная индукция в рабочем зазоре, Тл
Bm=0.7
// Номинальное значение рабочего зазора, м
y0=5E-3
// Количество рабочих зазоров в главном магнитном контуре
n=2
// Номинальная сила тяги одной машины, Н
F=72
// Номинальная линейная скорость тяговой машины (якорь относительно индуктора), м/с
V=8.0
// Номинальная частота электромагнитного цикла, Гц
v=50.0
// Номинальное напряжение источника питания, В
Us=36.0
// Магнитная проницаемость воздуха
mju0=4*pi*1.0E-7

// Расчёт

disp('Результаты расчёта тяговой линейной машины')
disp('Волновое деление Z, м')
Z=V/v
disp(Z)
disp('Коэффициент волновой формы главной взаимоиндуктивности kz, 1/м')
kz=2/Z
disp(kz)
disp('Поперечная длина якоря (по оси x) la, м')
la=0.3*Z
disp(la)
disp('Площадь главного рабочего магнитного сечения S0, м^2,')
S0=Z*la/2
disp(S0)
disp('Требуемая главная намагничивающая сила A0, А')
A0=Bm*n*y0/mju0
disp(A0)
disp('Главная магнитная проводимость машины lambda0, Гн')
lambda0=mju0*S0/(n*y0)
disp(lambda0)
disp('Амплитудное значение ЭДС обмотки фазы якоря Eam, В')
Eam=0.95*Us
disp(Eam)
disp('Коэффициент электромеханического преобразования машины kem, В*с/м')
kem=A0*lambda0*kz
disp(kem)
disp('Потребное количество витков обмотки фазы якоря wa')
wa=Eam/(kem*V)
disp(wa)
disp('Потребное амплитудное значения суммарного тока фаз якоря lam, А')
lam=F/(kem*wa)
disp(lam)
disp('Потребное значение полного тока намагничивания, приведённого к якорю I0, А')
I0=A0/wa
disp(I0)
disp('Главная индуктивность (взаимоиндуктивность) машины L0, Гн')
L0=lambda0*wa^2
disp(L0)

```

После запуска программы получаем:

"Результаты расчёта тяговой линейной машины"

"Волновое деление  $Z$ , м"

0.16

"Коэффициент волнового преобразования машины  $kz$ , 1/м"

12.5

"Поперечная длина якоря (по оси  $x$ )  $l_a$ , м"

0.048

"Площадь главного рабочего магнитного сечения  $S_0$ , м<sup>2</sup>,"

0.00384

"Требуемая главная намагничивающая сила  $A_0$ , А"

5570.4230

"Главная магнитная проводимость машины  $\lambda_{00}$ , Гн"

0.0000005

"Амплитудное значение ЭДС обмотки фазы якоря  $E_{am}$ , В"

34.200000

"Коэффициент электромеханического преобразования машины  $k_{em}$ , В\*с/м"

0.0336000

"Потребное количество витков обмотки фазы якоря  $w_a$ "

127.23214

"Потребное амплитудное значения суммарного тока фаз якоря  $I_{am}$ , А"

16.842105

"Потребное значение полного тока (намагничивания), приведённого к якорю  $I_0$ , А"

43.781570

"Главная индуктивность (взаимоиндуктивность) машины  $L_0$ , Гн"

0.0078115

## **Вращающаяся тяговая машина**

Для расчёта и моделирования вращающейся тяговой электрической машины должны быть заданы следующие исходные данные.

### **Исходные данные**

- Номинальная индукция в рабочем воздушном зазоре агрегата  $B_m$ , обычно в диапазоне от 0,7 до 1,0 Тл;

- Диаметр якоря  $D_a$ , м;
- Номинальная величина рабочих зазоров  $y_0$  и их количество  $k_g$ ;
- Номинальное значение создаваемого агрегатом электромагнитного момента  $M$ , Н·м;
- Номинальная частота вращения вала  $n$ , 1/с;
- Тип магнитной системы (монополярная или биполярная) и закон изменения потокосцепления фаз (линейный или гармонический);
- Количество пар полюсов  $p$ ;
- Номинальное напряжение источника питания агрегата  $U_s$ , В.

## Расчёт

Расчёт производится в следующей последовательности:

1. Волновое деление (два полюсных деления)  $Z = \frac{\pi \cdot D_a}{p}$ , м;
2. Коэффициент градиента относительного потокосцепления фаз якоря с главным магнитным потоком  $k_z = \frac{\partial \lambda}{\partial Z}$ , где  $\lambda = \frac{L_m}{L_0}$ ,  $k_z = \frac{2}{Z}$  - для монополярной магнитной системы с линейным изменением потокосцепления фаз,  $k_z = \frac{4}{Z}$  - 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 (по оси  $x$ )  $l_a$ , м;
4. Полная площадь магнитного сечения  $S_0 = \frac{Z \cdot l_a}{2}$ , м<sup>2</sup>;
5. Требуемая полная н.с. для создания заданной индукции  $B_m$  в рабочем воздушном зазоре  $A_0 = \frac{B_m \cdot k_g \cdot y_0}{\mu_0}$ , А;
6. Полная главная магнитная проводимость магнитной системы агрегата  $\Lambda_0 = \frac{\mu_0 \cdot S_0}{k_g \cdot y_0}$ , 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 (предварительно можно принять  $k_e = 0,95$ );
8. Коэффициент электромеханического преобразования  $k_{em} = A_0 \cdot \Lambda_0 \cdot k_z$ ,  $\frac{В \cdot с}{М}$
9. Требуемое суммарное количество витков фаз последовательно соединённых полюсов якорной обмотки  $w_a = \frac{E_{am}}{k_{em} \cdot \pi \cdot D_a \cdot n}$ ;

10. Главная (полная) индуктивность (взаимоиндуктивность) машины  $L_0 = w_a^2 \cdot \Lambda_0 = \frac{w_a^2 \cdot \mu_0 \cdot S_0}{k_g \cdot y_0}$  ,

Гн;

11. Номинальный, приведённый к якору, полный ток (ток намагничивания) машины  $I_0 = \frac{A_0}{w_a}$  ,

А;

12. Номинальный суммарный активный ток фаз якоря  $I_{am} = \frac{2 \cdot M}{k_{em} \cdot w_a \cdot D_a}$  , А;

Ниже приведён текст программы на языке Scilang расчёта тяговой электрической машины с помощью ИСП Scilab.

```
// Программа расчёта вращающейся тяговой электрической машины  
@TFM_ROUTE_calc.sce"
```

```
// _____  
// Тяговая вращающаяся машина (аналог ДК211А)
```

```
// Исходные данные
```

```
// Номинальная индукция в рабочем зазоре, Тл
```

```
Bm=0.75
```

```
// Диаметр якоря Da, м
```

```
Da=0.306
```

```
// Активная длина якоря la, м
```

```
la=0.370
```

```
// Номинальное значение рабочего зазора, м
```

```
y0=5E-3
```

```
// Количество рабочих зазоров в главном магнитном контуре
```

```
kg=2
```

```
// Номинальное значение электромагнитного момента, Н·м
```

```
M=840
```

```
// Номинальная частота вращения вала машины n, 1/с
```

```
n=30.0
```

```
// Количество пар полюсов
```

```
p=2
```

```
// Номинальное напряжение источника питания, В
```

```
Us=550.0
```

```
// Магнитная проницаемость воздуха
```

```
mju0=4*%pi*1.0E-7
```

```
// Расчёт
```

```
disp('Результаты расчёта тяговой линейной машины')
```

```
disp('Волновое деление Z, м')
```

```
Z=%pi*Da/p
```

```
disp(Z)
```

```
disp('Номинальная частота электромагнитного цикла, Гц')
```

```
v=p*n
```

```
disp(v)
```

```
disp('Коэффициент волнового преобразования машины kz, 1/м')
```

```
kz=4/Z
```

```
disp(kz)
```

```
disp('Площадь главного рабочего магнитного сечения S0, м^2,')
```

```
S0=Z*la/2
```

```
disp(S0)
```

```
disp('Требуемая главная намагничивающая сила A0, А')
```

```

A0=Bm*kg*y0/mju0
disp(A0)
disp('Главная магнитная проводимость машины lambda0, Гн')
lambda0=mju0*S0/(kg*y0)
disp(lambda0)
disp('Амплитудное значение ЭДС обмотки фазы якоря Eam, В')
Eam=0.95*Us
disp(Eam)
disp('Коэффициент электромеханического преобразования машины kem, В*с/м')
kem=A0*lambda0*kz
disp(kem)
disp('Потребное количество витков обмотки фазы якоря wa')
wa=Eam/(kem*%pi*Da*n)
disp(wa)
disp('Потребное амплитудное значения суммарного тока фаз якоря lam, А')
lam=2*M/(kem*wa*Da)
disp(lam)
disp('Потребное значение полного тока намагничивания, приведённого к якорю I0, А')
I0=A0/wa
disp(I0)
disp('Главная индуктивность (взаимоиндуктивность) машины L0, Гн')
L0=lambda0*wa^2
disp(L0)

```

После запуска программы получаем:

```

"Результаты расчёта тяговой линейной машины"
"Волновое деление Z, м"
0.4712389
"Номинальная частота электромагнитного цикла, Гц"
60.
"Коэффициент волнового преобразования машины kz, 1/м"
8.4882636
"Поперечная длина якоря (по оси x) la, м"
0.3
"Площадь главного рабочего магнитного сечения S0, м^2,"
0.0706858
"Требуемая главная намагничивающая сила A0, А"
7161.9724
"Главная магнитная проводимость машины lambda0, Гн"
0.0000089
"Амплитудное значение ЭДС обмотки фазы якоря Eam, В"
522.5

```

"Коэффициент электромеханического преобразования машины кет, В\*с/м"

0.5400000

"Потребное количество витков обмотки фазы якоря  $w_a$ "

34.221588

"Потребное амплитудное значения суммарного тока фаз якоря  $I_{am}$ , А"

303.03592

"Потребное значение полного тока намагничивания, приведённого к якорю  $I_0$ , А"

209.28230

"Главная индуктивность (взаимоиндуктивность) машины  $L_0$ , Гн"

0.0104026

## 6.2. Моделирование электромагнитных процессов в электросиловых агрегатах на основе полной взаимной индуктивности (главной индуктивности) без учёта собственных индуктивностей цепей

Вследствие значительной величины рабочего воздушного зазора при магнитной левитации обычно магнитное сопротивление воздушных зазоров существенно больше магнитного сопротивления стальных участков магнитопровода. Поэтому магнитное сопротивление стальных участков с достаточной степенью точности (погрешность обычно не более 10 %) на начальном этапе моделирования можно не учитывать.

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

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

Если рассматривать только горизонтальное перемещение мовера 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  $\Lambda_G$ , получаем

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

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

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 фазы якоря будет определяться выражением

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

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 полный ток  $i_0$  машины считать постоянной величиной, что характерно для установившегося или квазистационарного режима работы, то уравнения можно переписать в виде

$$F_{эмз} = w_a \cdot i_a \cdot i_0 \frac{\partial (\frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot w_a}{y})}{\partial z}$$

$$e_a = -w_a \cdot i_0 \cdot V_z \frac{\partial (\frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot w_a}{y})}{\partial z}$$

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

$$F_{эмз} = i_a \cdot i_0 \frac{\partial L_m}{\partial z}$$

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

где  $L_m = \frac{\mu_0 \cdot S_G \cdot w_a^2}{y}$  - главная индуктивность электрической машины, Гн.

Если обмотка якоря сосредоточенная ( $w_a = const$ ) и зазор равномерный по длине полюсных делений ( $y = const$ ), то изменение  $L_m$  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  $i_0 = const$  эдс якоря  $e_a = 0$ .

Электромагнитная сила не зависит от скорости относительного перемещения и определяется током якоря  $i_a$  и полным током  $i_0$ , а также геометрией и относительным расположением электромагнитных контуров машины, определяемых главной индуктивностью (взаимоиндуктивностью) машины  $L_m = L_0 \cdot \chi(z)$ .

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

Линейная монополярная зависимость  $L_m(z)$  (рис. 40) в пределах волнового деления описывается выражением

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

и соответственно

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

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

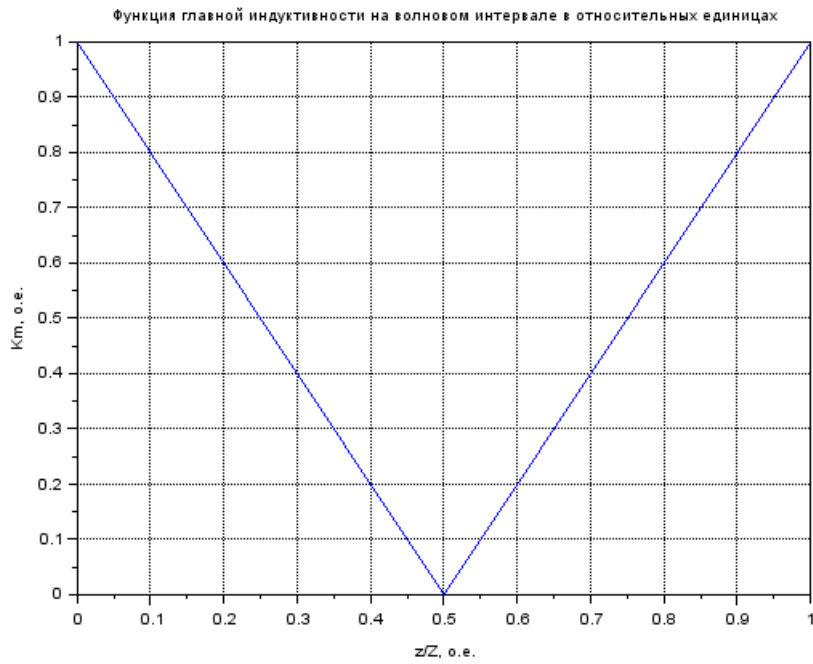


Рис. 40.

Линейная биполярная зависимость  $L_m(z)$  (рис. 41) в пределах волнового 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

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

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

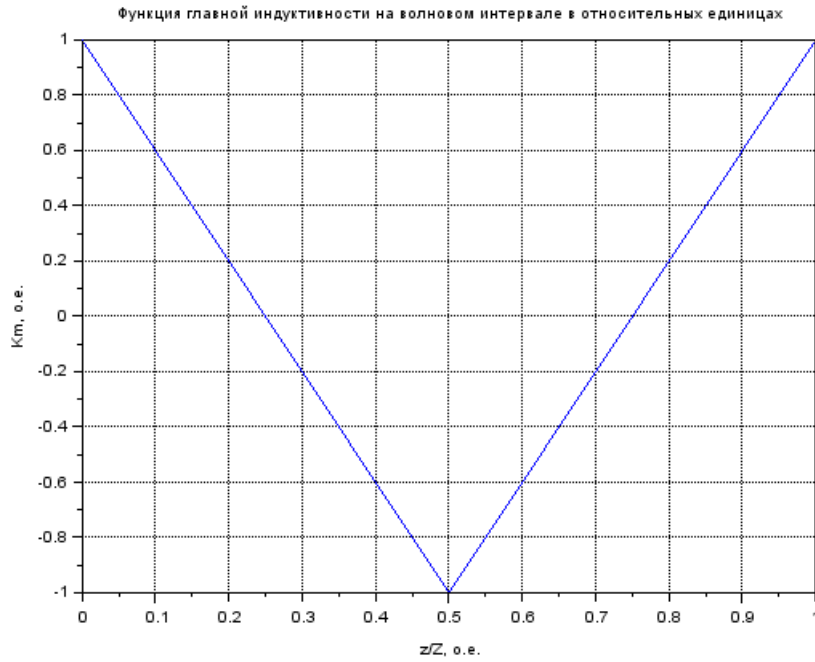


Рис. 41.

Линейная биполярная зависимость  $L_m(z)$  в трёхфазной системе при 120-градусном управлении (рис. 42) 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

$$\frac{\partial L_m}{\partial z} = -\frac{6}{Z} L_0 \text{ при } 0 < z \leq \frac{Z}{3}$$

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

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

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

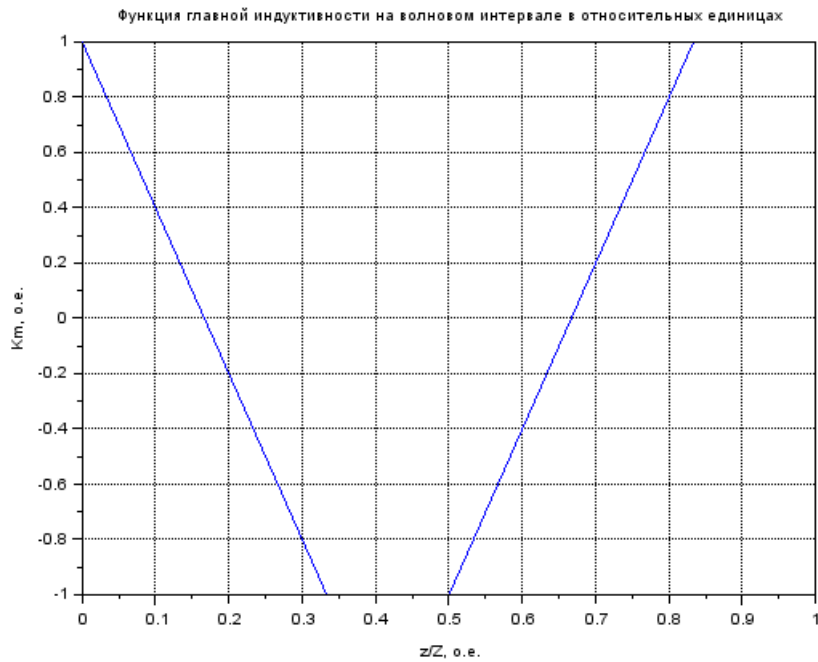


Рис 42.

Гармоническая зависимость  $L_m(z)$  (рис. 43) 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.

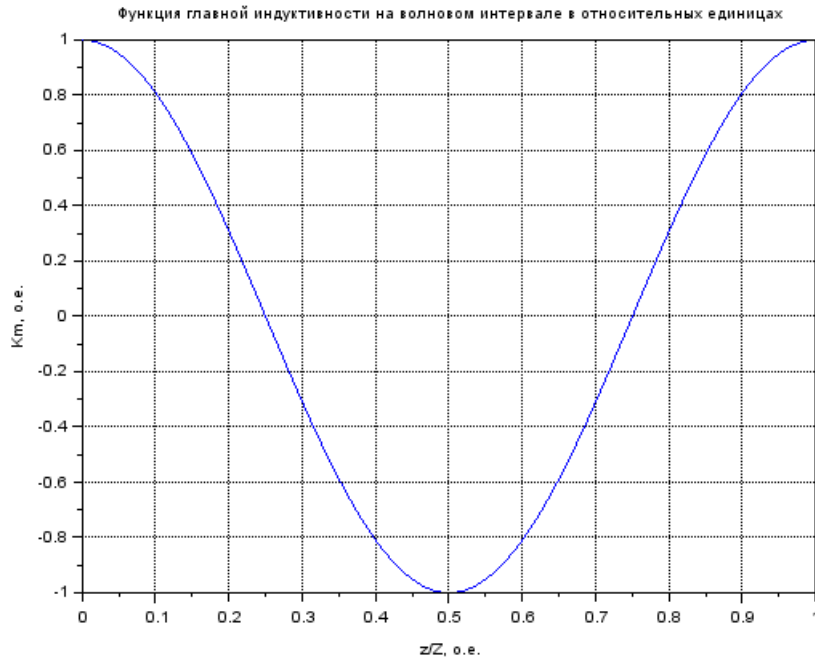


Рис. 43.

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  $V_o$  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  $L_o$  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 :

$$L_o = \frac{\mu_0 \cdot S_o \cdot w_{a0}^2}{y_o} ,$$

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

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 ( $w_a(z/Z) = const$ ), то уравнения для электромагнитной силы и эдс можно записать в виде

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

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

Периодичность электромагнитных процессов определяется длиной магнитной волны  $Z$  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 длиной 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

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

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

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

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

$W$  - сила сопротивления движению, Н.

Разделив обе части уравнения на массу  $m$ , получаем

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

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

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

В соответствии с выведенной математической моделью построим обобщённую компьютерную модель тяговой электрической машины.

Вначале построим обобщённую компьютерную модель машины 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, построенная на основе приведённых выше уравнений, представлена на рис. 44. На начальном этапе задаём постоянную скорость  $V_z = 1$  м/с с помощью блока CONST\_m. Параметры остальных блоков показаны на Рис. 45...50.

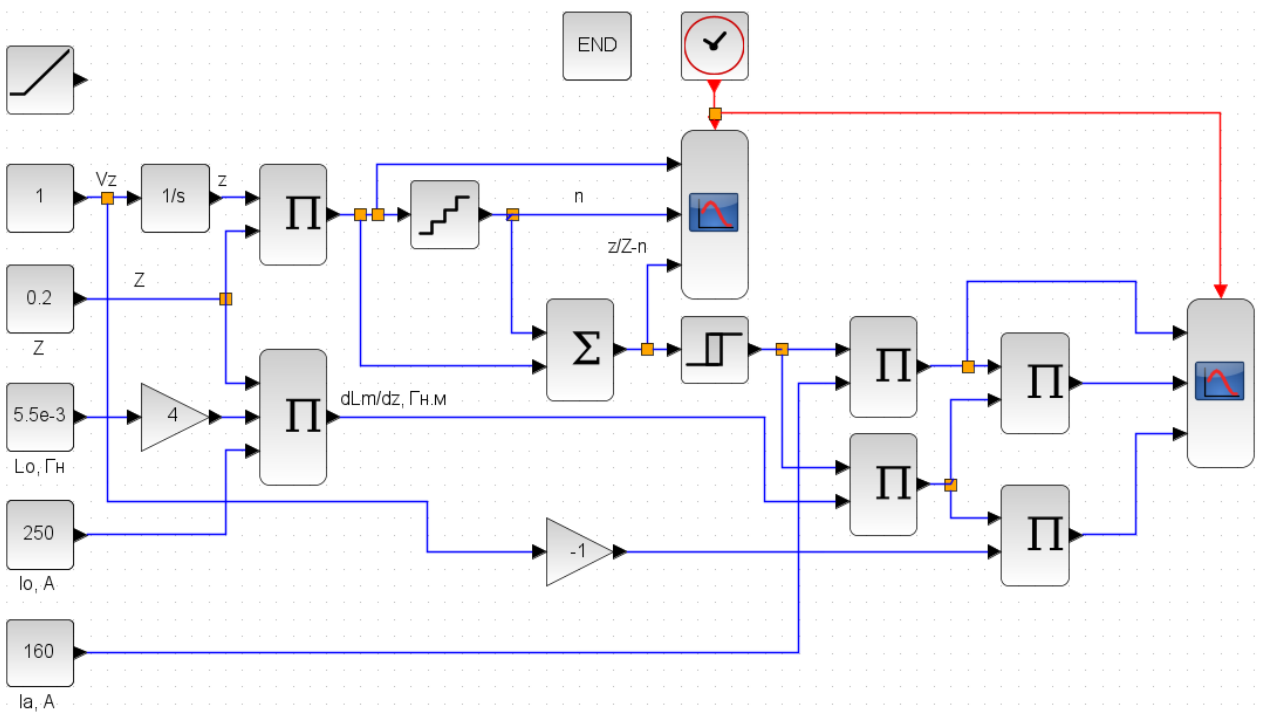


Рис. 44.

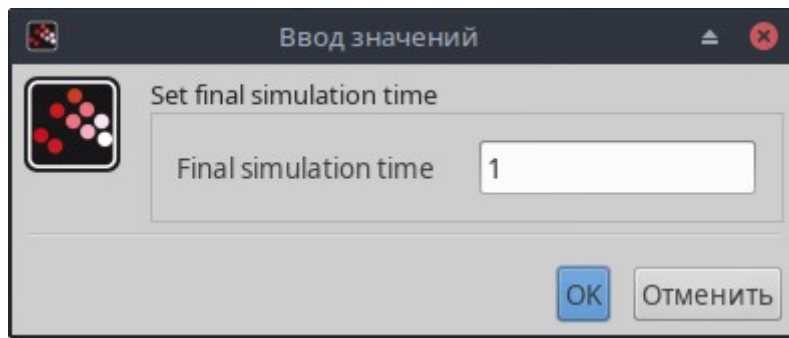


Рис. 45. Параметры блока END.

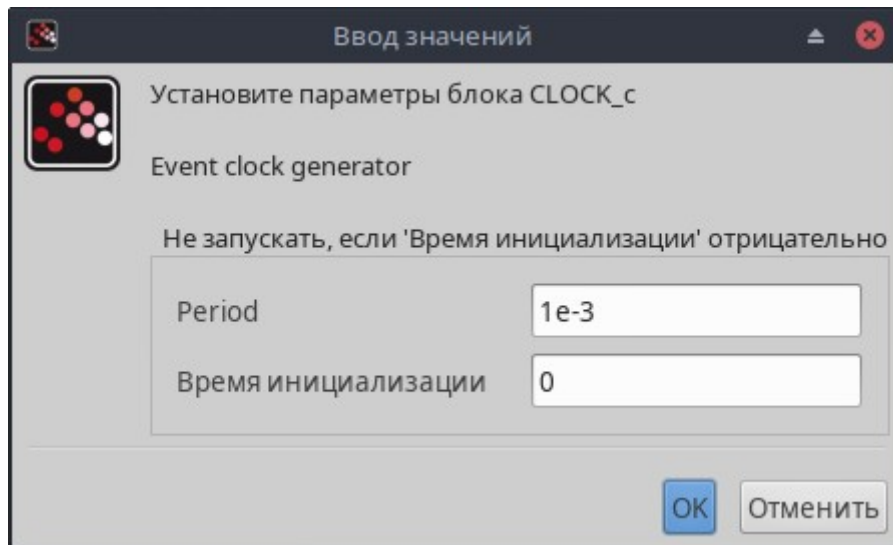


Рис. 46. Параметры блока CLOCK\_c.

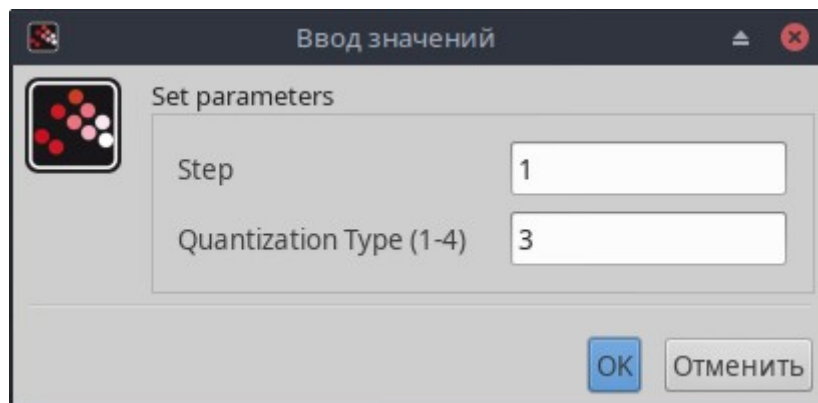


Рис. 47. Параметры блока QUANT\_f.

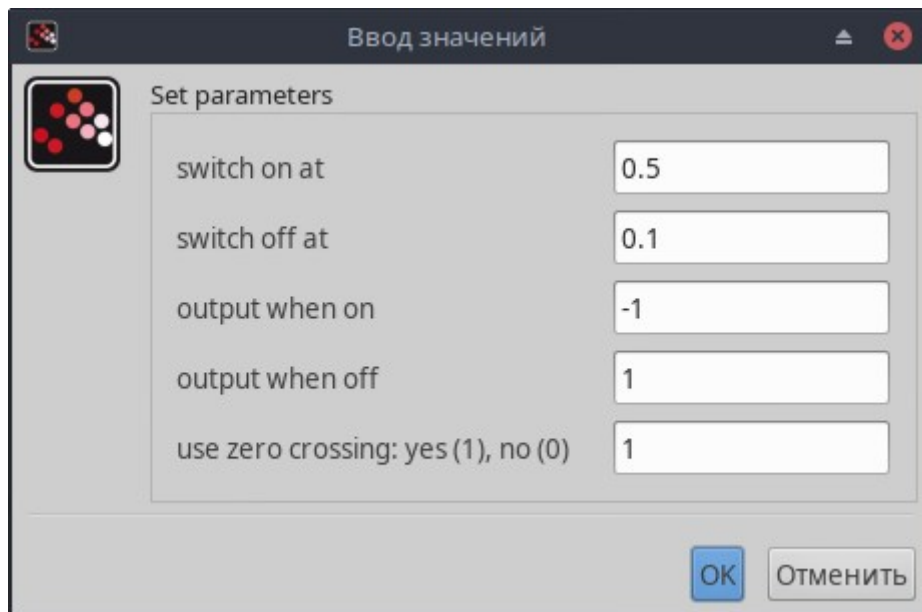


Рис. 48. Параметры блока HYSTERESIS.

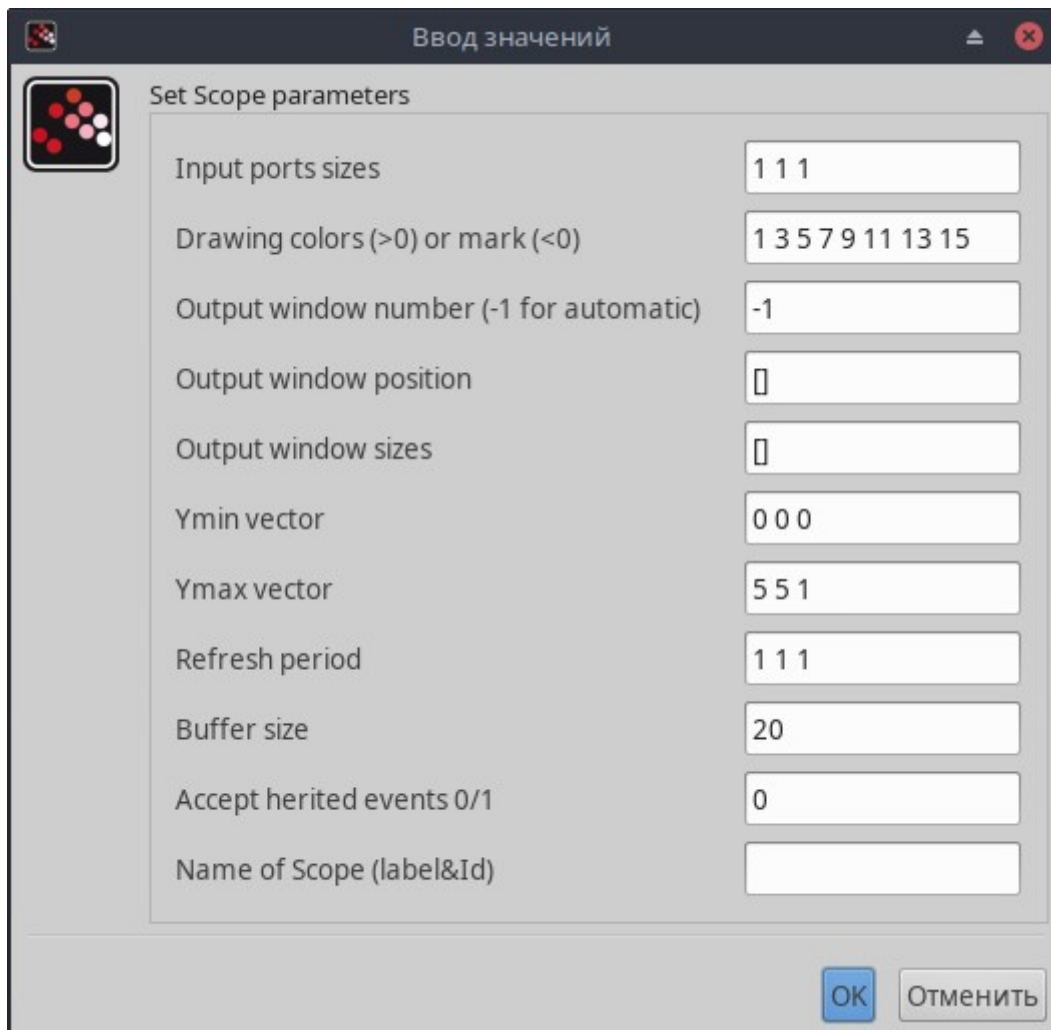


Рис. 49. Параметры первого осциллографа.

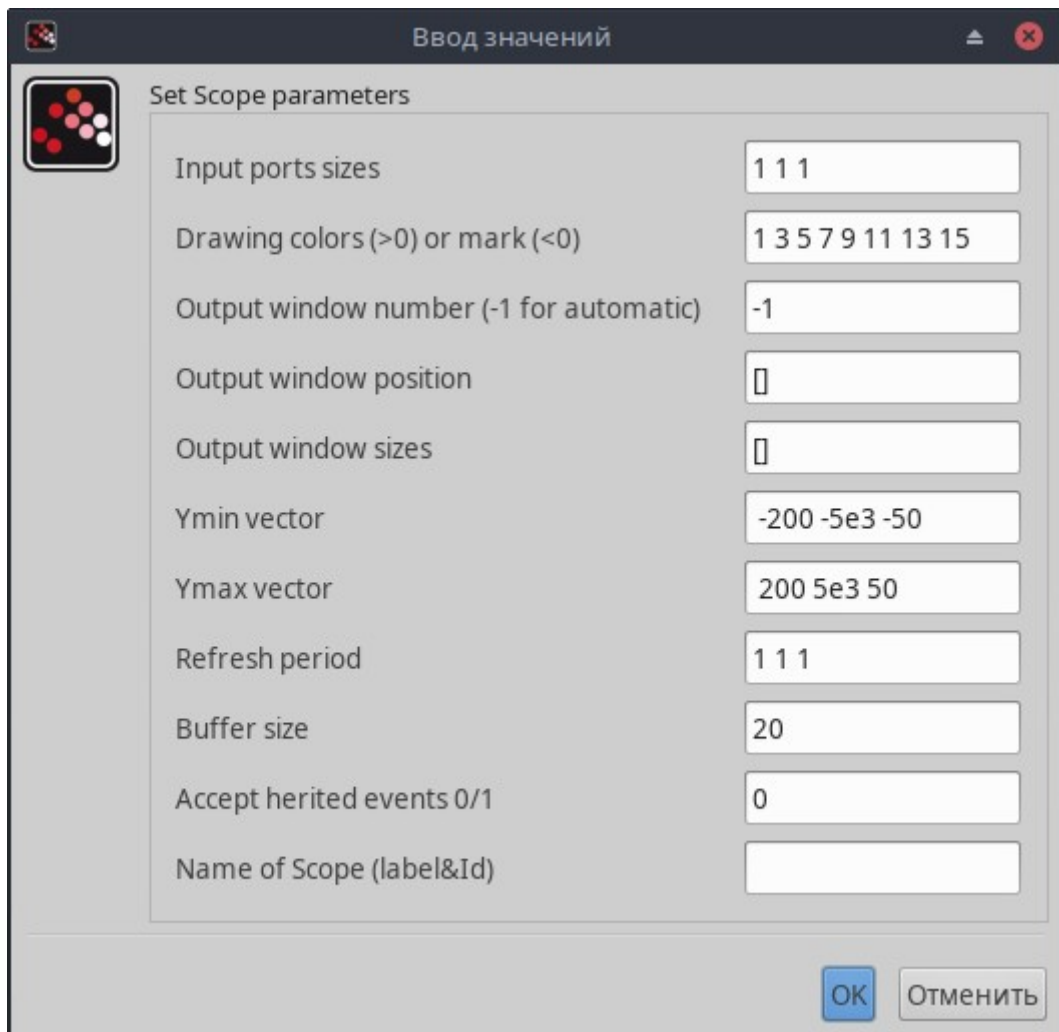


Рис. 50. Параметры второго осциллографа.

Запускаем моделирование и получаем.

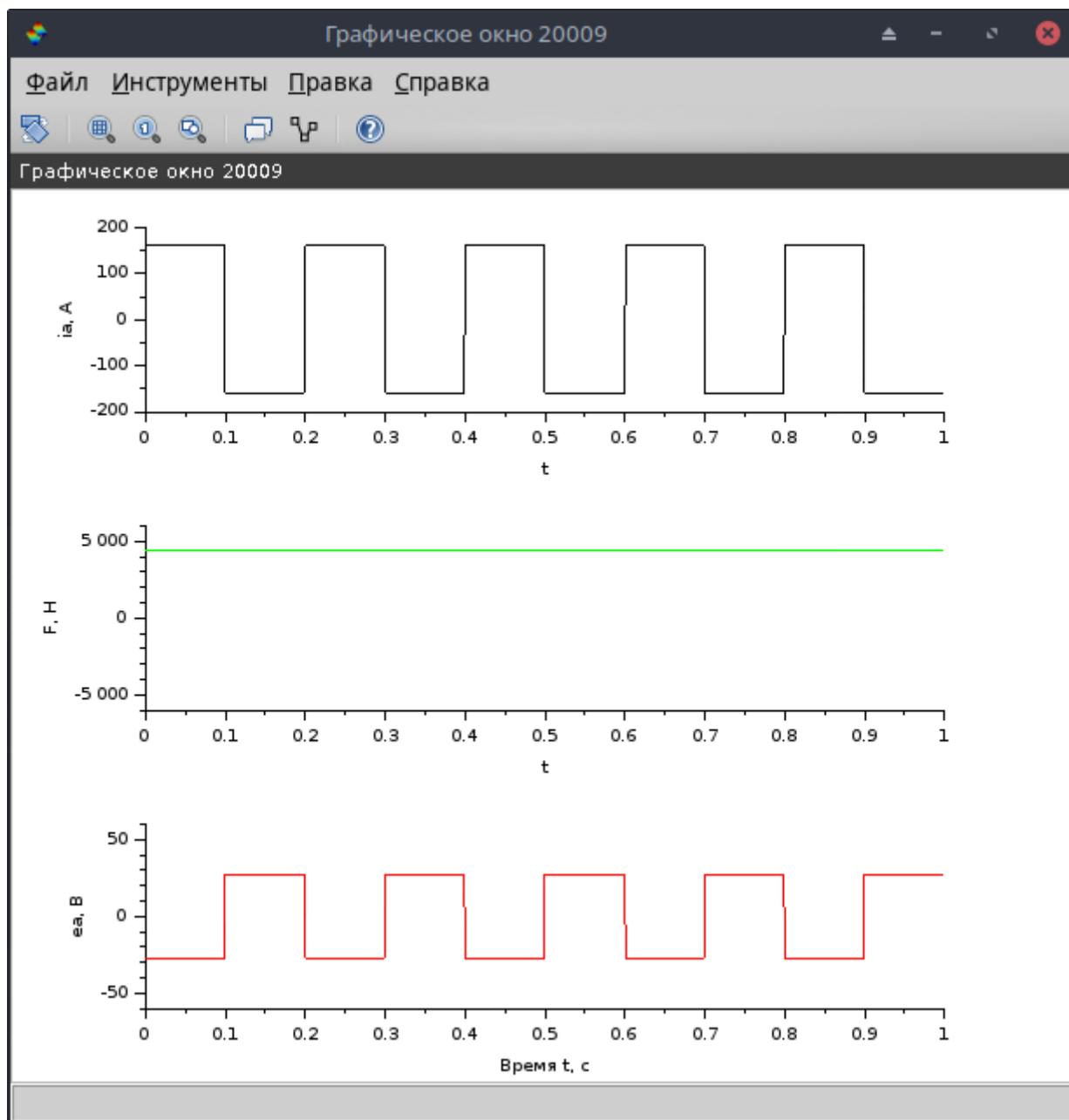


Рис. 51.

### 6.3. Имитационные стендовые испытания тяговой электрической машины

Стендовые испытания проводятся путём стыковки испытуемой машины с нагрузочной машиной заведомо большей мощности и момента, которая должна иметь достаточно жёсткую механическую характеристику  $V(F)$  или  $n(M)$ , т. е. минимальную зависимость скорости от реализуемой силы или момента.

Блок-схема модели тяговой электрической машины, включённой в состав такого стенда соединённой с нагрузочной машиной, имеющей идеально жёсткую нагрузочную характеристику приведена на рис. 52.

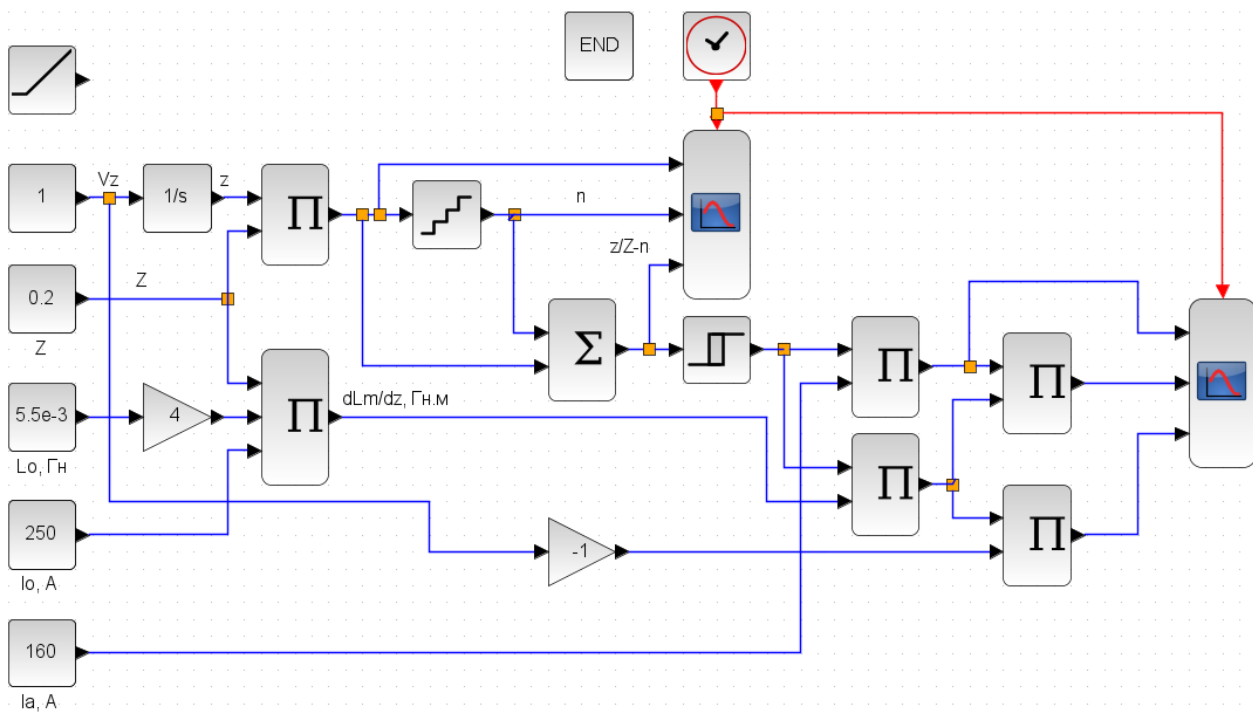


Рис. 52.

Необходимо провести осциллографирование тока и эдс якоря, сил тяги или торможения при следующих условиях и режимах:

- постоянной минимальной скорости в режиме тяги;
- постоянной минимальной скорости в режиме торможения;
- разгон до номинальной и максимальной скорости;
- торможение с номинальной и максимальной скорости.

#### 6.4. Имитационные ходовые испытания тяговой электрической машины в составе транспортного средства

Блок-схема модели тяговой электрической машины, включённой в состав имитационной модели движения транспортного средства вместо модели статических тягово-тормозных характеристик тягового привода для транспортного модуля (полная масса 1600 кг) магнитолевитационной транспортной системы «ЭЛТРО» приведена на рис. 53.

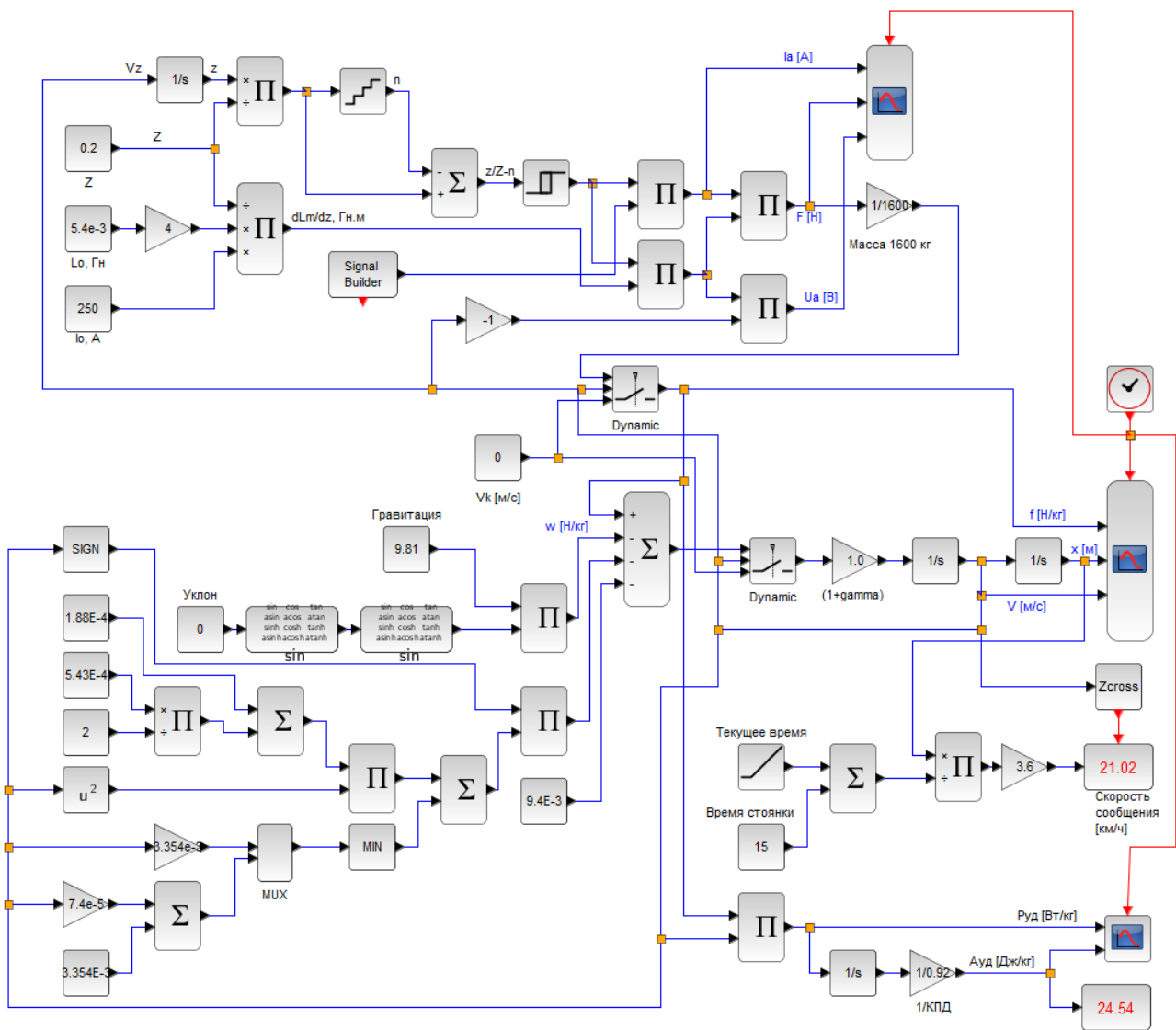


Рис. 53.

Пример результатов моделирования приведен на рис. 54...56.

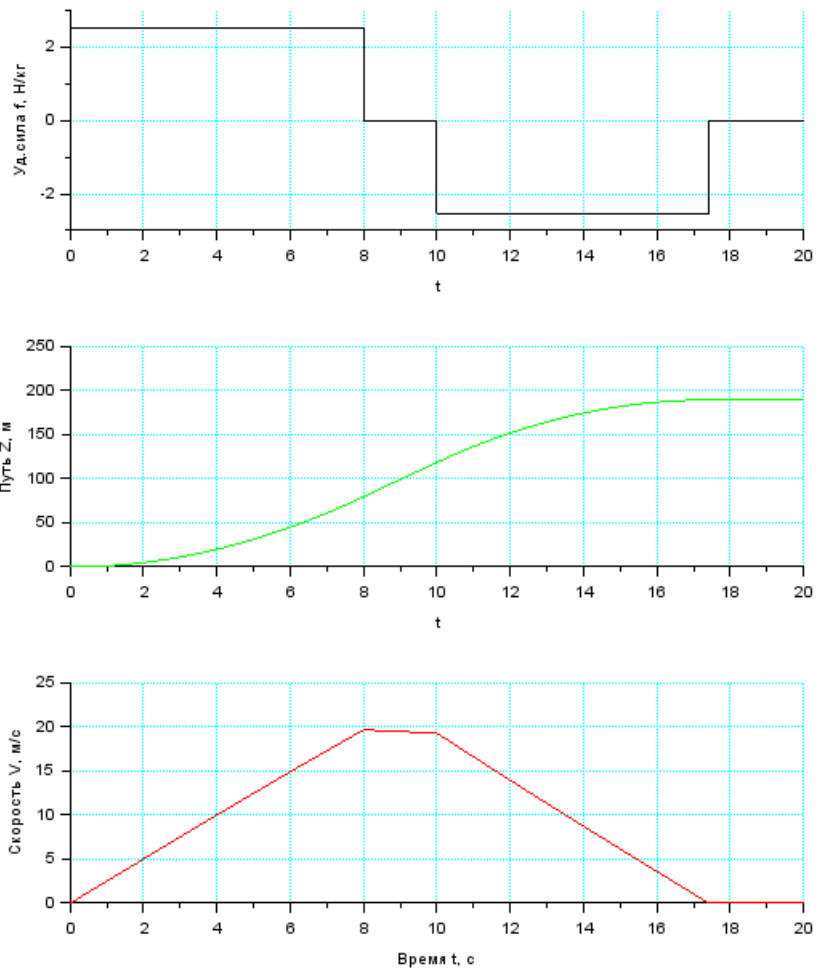


Рис. 54.

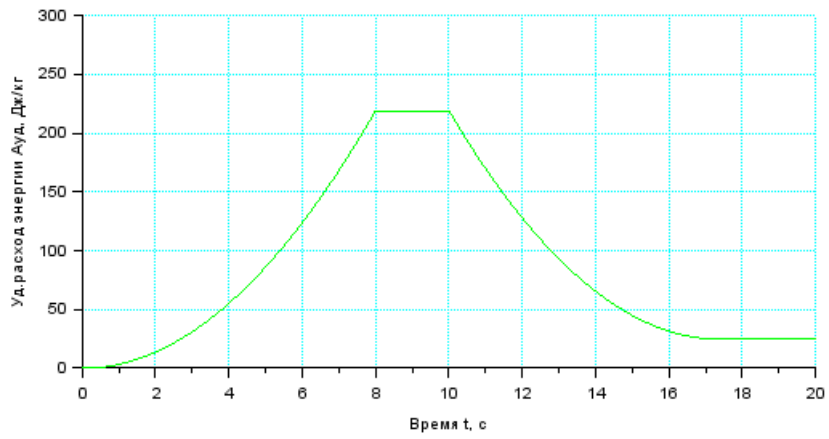
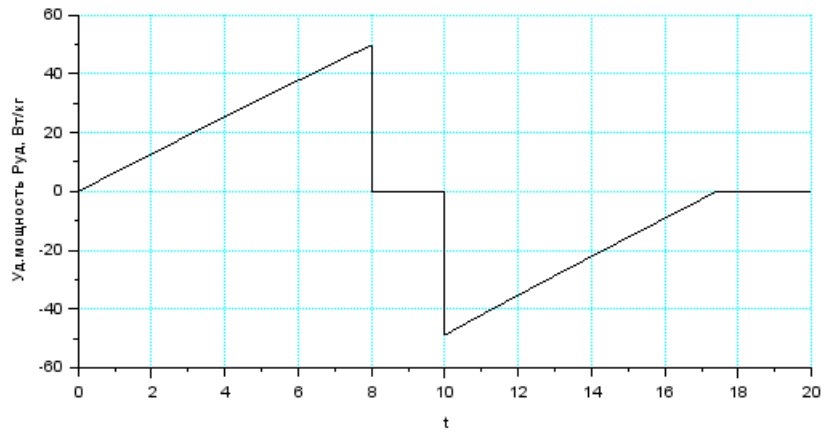


Рис. 55.

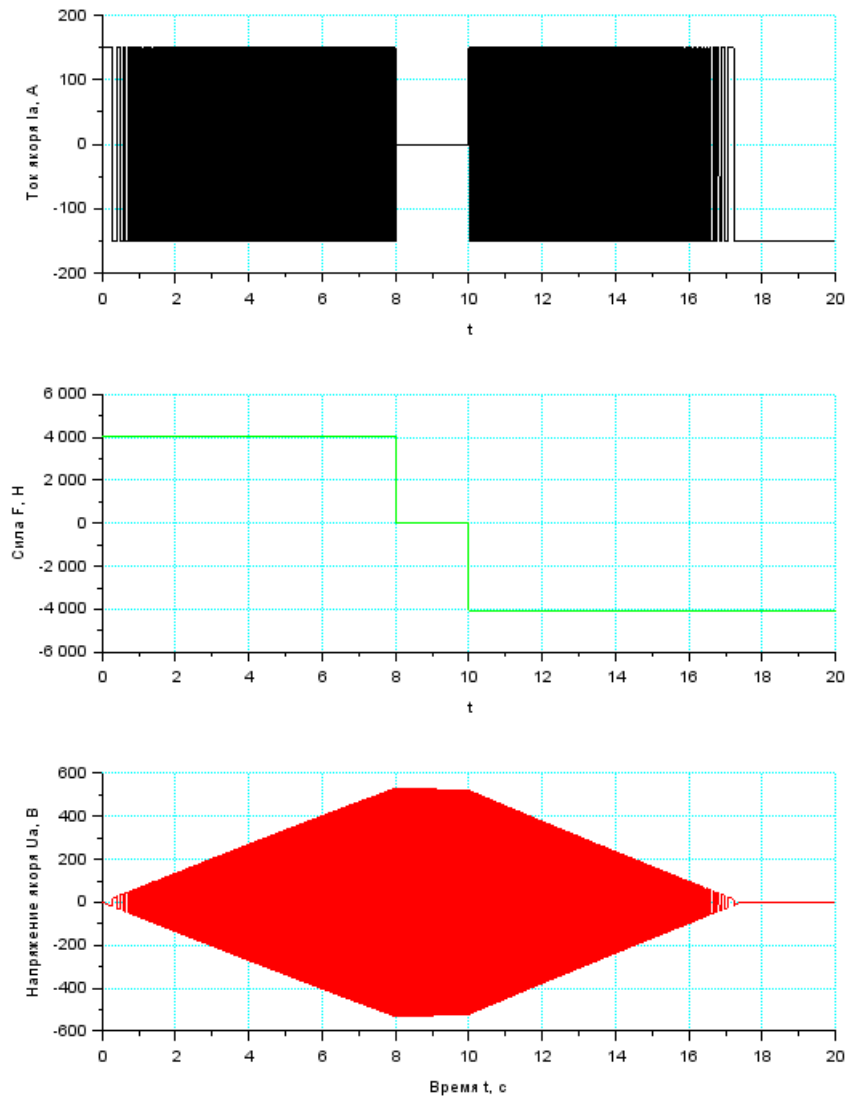


Рис. 56.

## 6.5. Результаты имитационных ходовых испытаний тяговой электрической машины

Результаты испытаний должны быть сведены в таблицу.

Пример таблицы результатов испытаний.

Контролируемые параметры	По результатам испытаний	По техническому заданию	Оценка результатов
Максимальная скорость установившегося движения на площадке при полной нагрузке $V_m$ , м/с	32	32	+
Максимально преодолеваемый подъём $i_m, \%$	15	15	+
Руководящий подъём: Величина $i_r, \%$			

длина $L_r$ , м	12	12	+
Установившаяся скорость $V_i$ , м/с	1024	1024	+
	22	20	+
Длительность $t_{ov}$ разгона, с до скорости, 20 м/с	8	10	+
Тормозной путь $S_b$ на горизонтальном прямом участке пути при номинальной нагрузке при служебном электрическом торможении, м со скорости, 20 м/с	112	Не более 125	+
Цикл движения	Разгон до 20 м/с за 8.5 с, движение со скоростью 20 м/с, торможение до остановки на пути 112 м, стоянка 12 с, длина перегона 1024 м.	Разгон до 20 м/с за 10 с, движение со скоростью 20 м/с, торможение до остановки на пути 125 м, стоянка 12 с, длина перегона 1024 м.	+
Скорость сообщения в цикле движения, км/ч	48.85	45	+
Удельный расход энергии в цикле движения, Вт*ч/т*км	193.49/3.6 =53.75	60	+

По результатам испытаний должны быть сделаны обоснованные выводы.