

Направление подготовки: 140400 Электроэнергетика и электротехника

Профиль подготовки: Электрический транспорт

Квалификация (степень) выпускника: магистр

Форма обучения: очная

Дисциплина:

"Электрооборудование и системы управления электроподвижным составом"

Комаров В.Г. Лабораторная работа №2 09.04.2025 г.

Тема: Имитационные испытания электросиловых агрегатов электроподвижного состава

1. Общие теоретические сведения по моделированию тяговых и тормозных сил электросиловых агрегатов

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

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

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

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

и, подставляя выражения для A_0 и Λ_G , получаем

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

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

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

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

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

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

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 $V_z = \frac{\partial z}{dt} = 0$ 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 $L_{mi} = L_0 \cdot \chi_i(z)$.

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

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

и соответственно

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

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

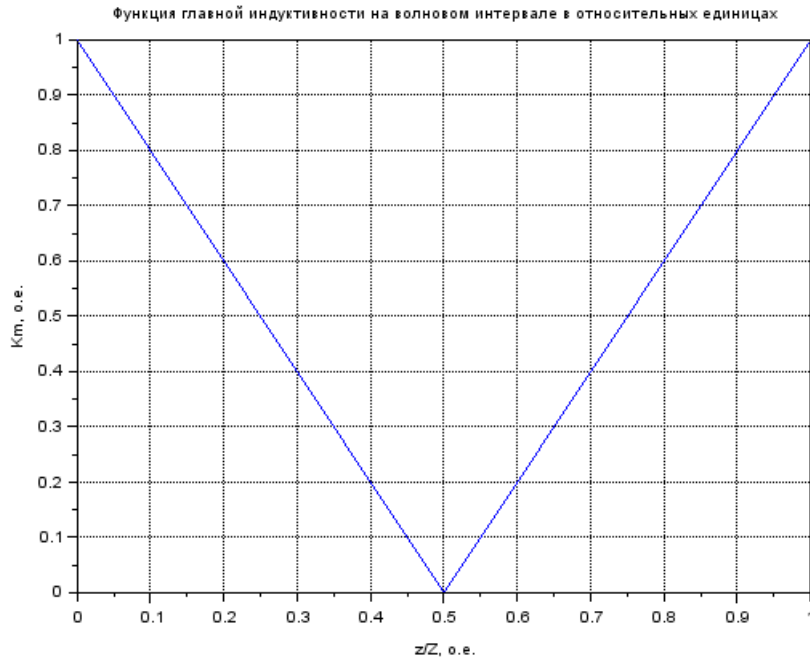


Рис. 1.

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

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

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

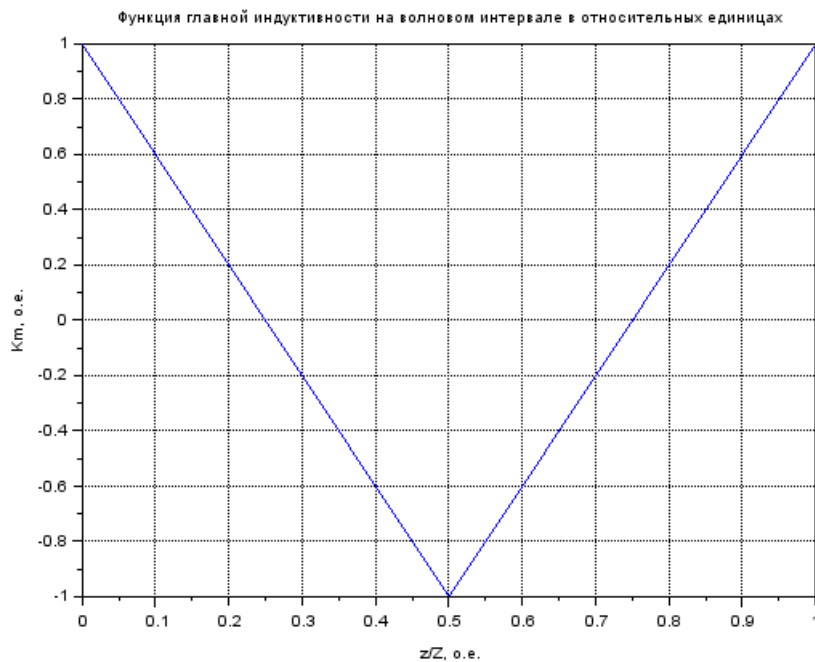


Рис. 2.

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

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

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

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

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

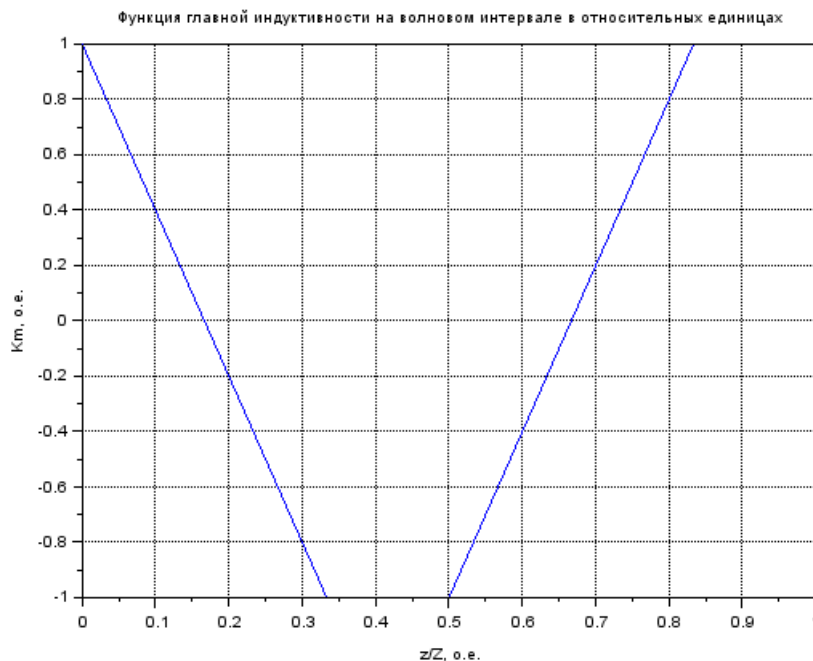


Рис 3.

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.

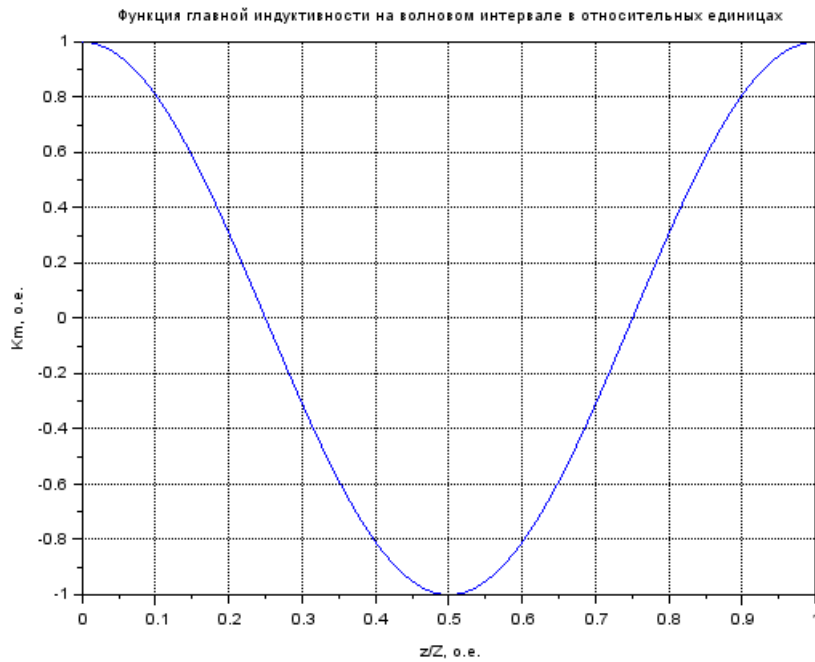


Рис. 4.

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 :

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

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

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

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

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

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 длиной волны.

Для перехода к рассмотрению процессов в электрических цепях якоря электрической машины необходимо воспользоваться вторым законом Кирхгоффа, 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.

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 взаимоиндуктивности (главной индуктивности) без учёта собственных индуктивностей цепей.

2. 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.

Пример блок-схемы модели тяговой электрической машины, включённой в состав такого стенда соединённой с нагрузочной машиной, имеющей идеально жёсткую нагрузочную характеристику приведена на рис. 5.

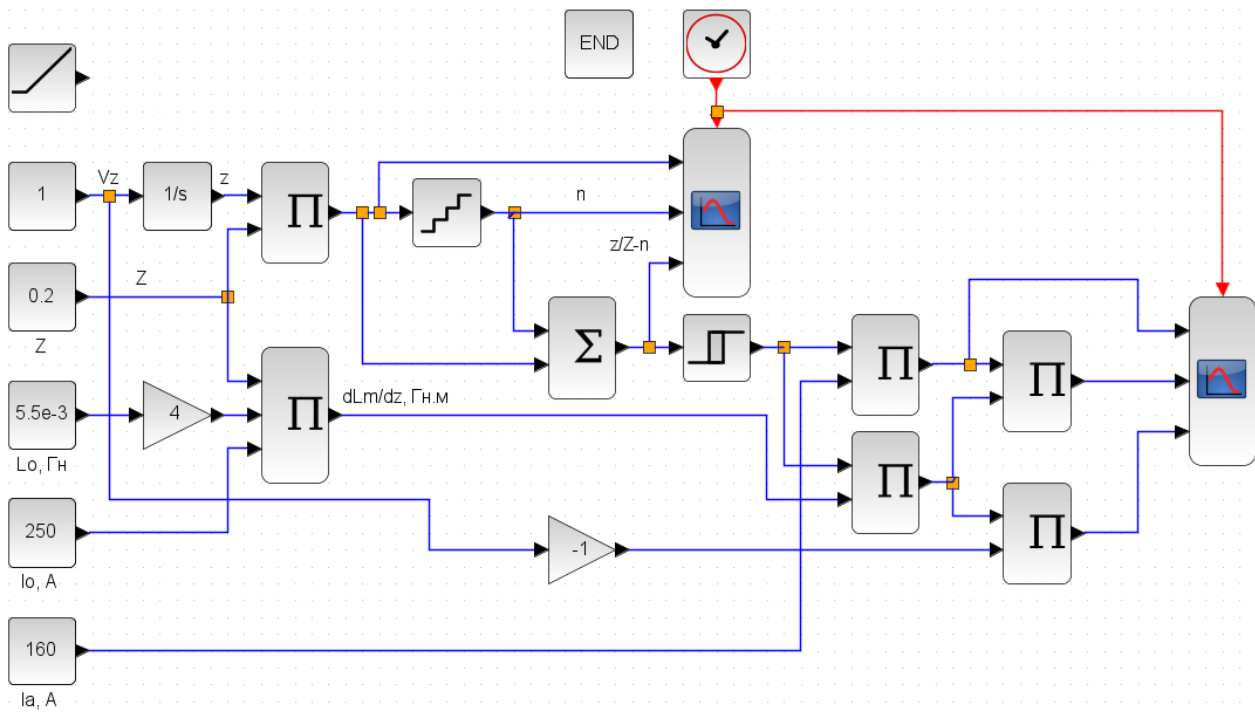


Рис. 5.

Пример 1.

Моделирование вращающейся тяговой электрической машины

Построим эквивалентную однофазную модель бесщёточного трёхфазного электродвигателя (BLDC) ATO-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

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

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

где

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

Блок-схема модели представлена на рис. 6.

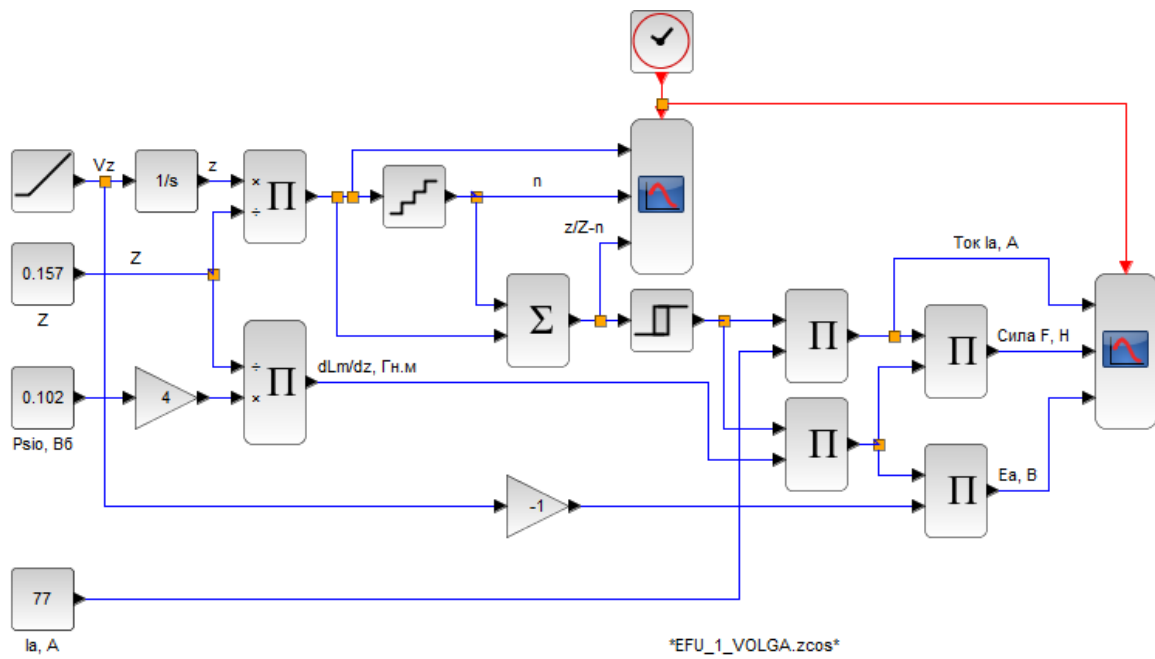


Рис. 6.

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

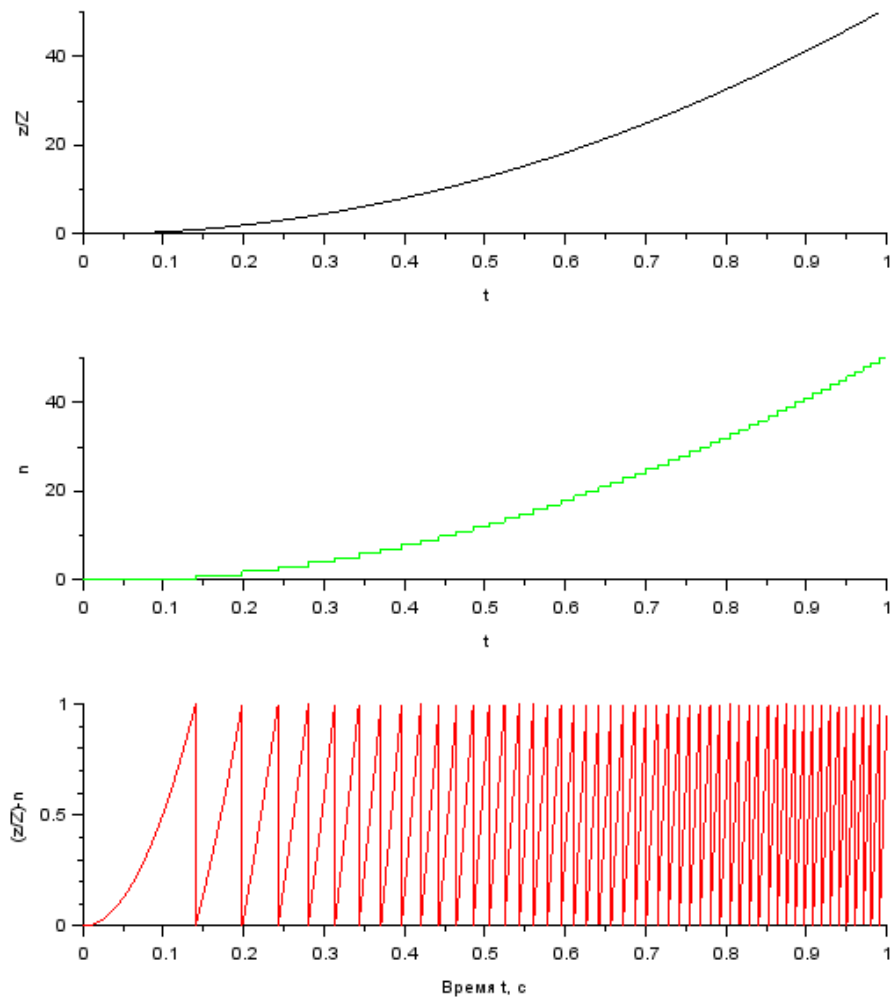


Рис. 7.

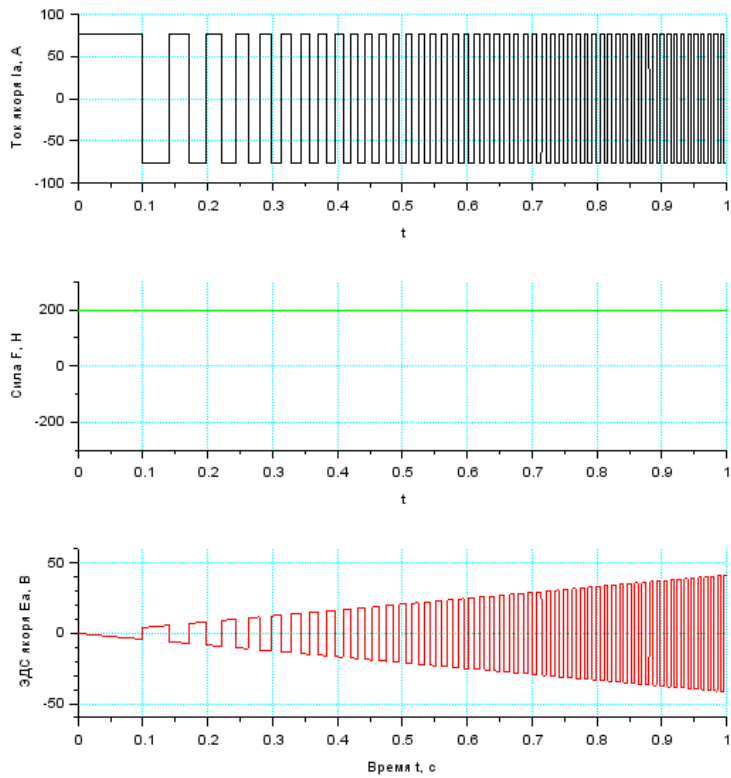


Рис. 8.

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.

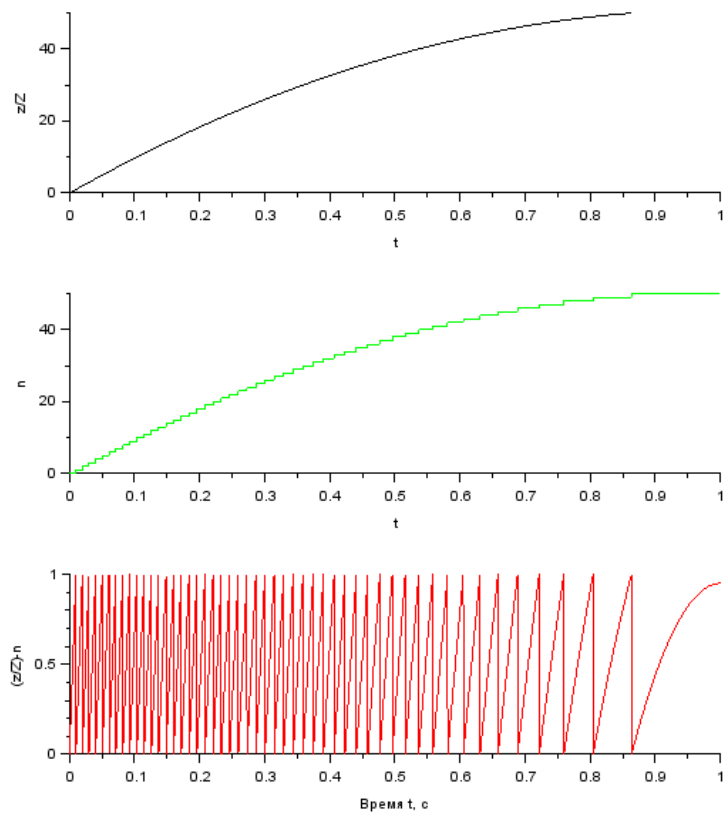


Рис. 9.

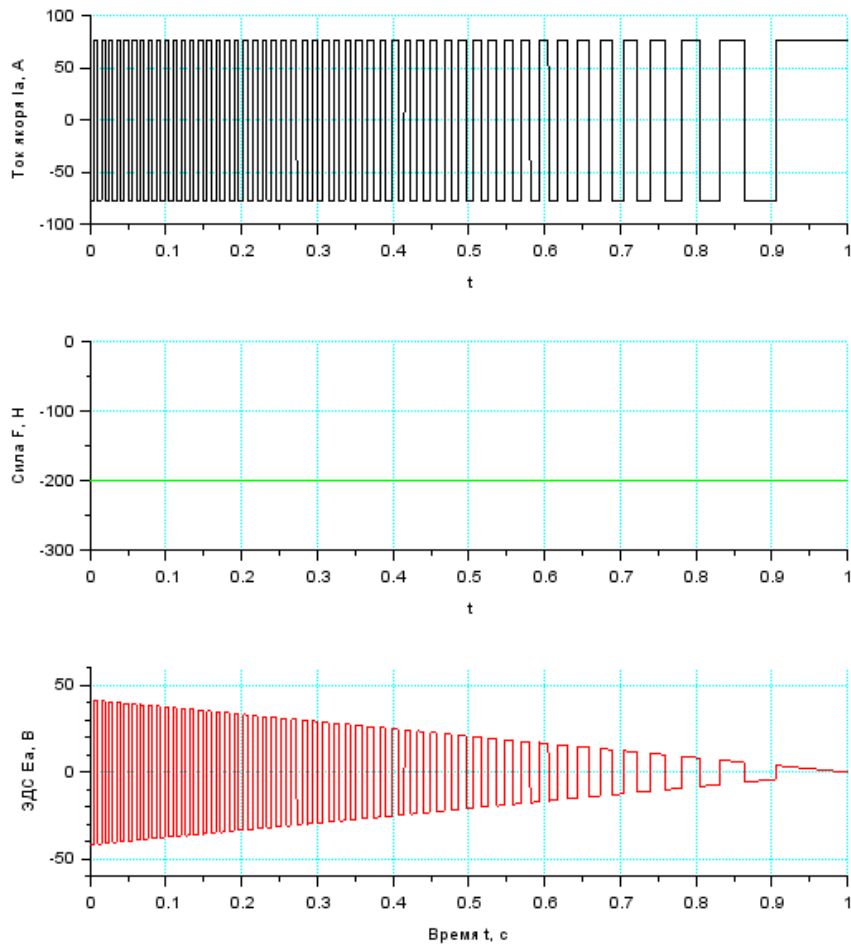


Рис. 10.

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

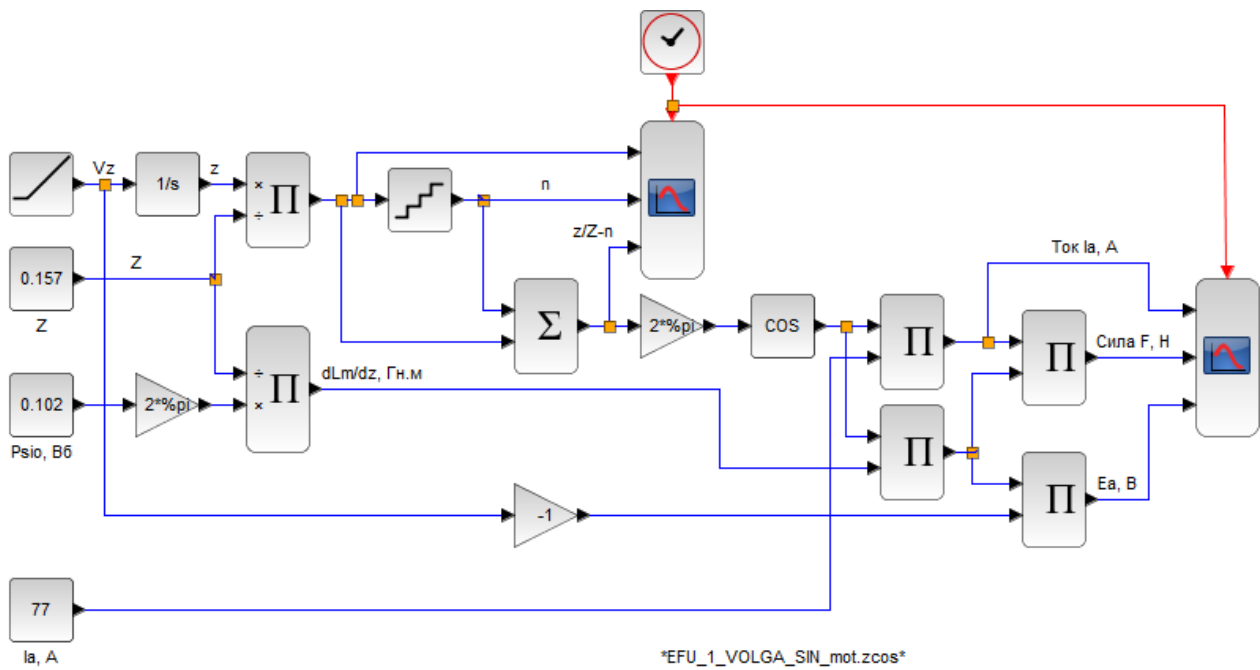


Рис. 11.

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

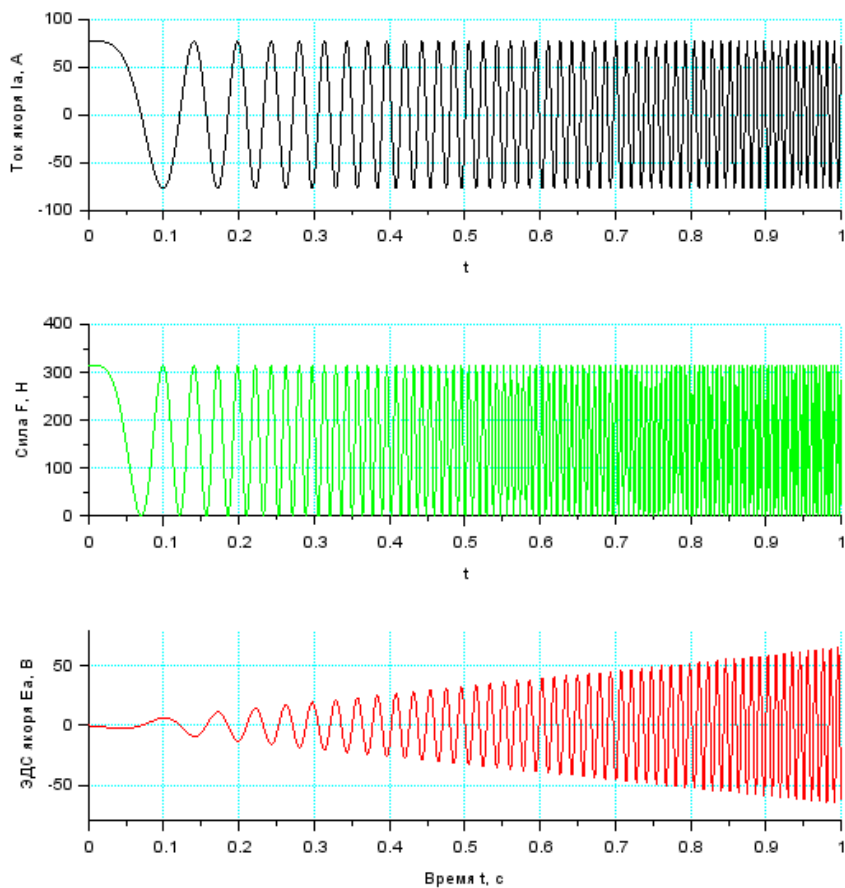
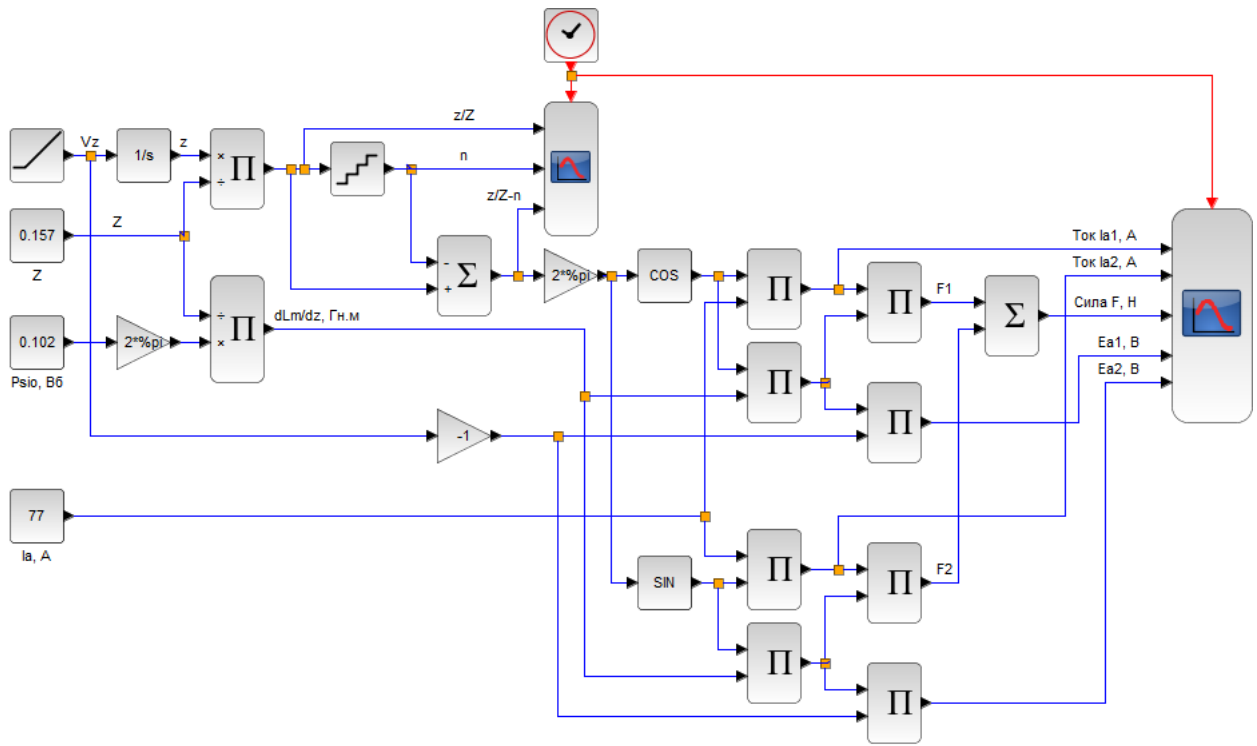


Рис. 12.

Из осциллограммы видно, что электромагнитная сила пульсирует с двойной частотой тока якоря. Для постоянства электромагнитной силы необходимо ввести вторую фазу в якорь со сдвигом на четверть периода, т. е. синусоидальную функцию. Добавим в блок схему модели вторую фазу якоря и получим блок-схему Рис. 13.



EFU_1_VOLGA_2xSIN_mot.zcos

Рис. 13.

Запускаем полученную модель и получаем результат, приведённый на Рис. 14.

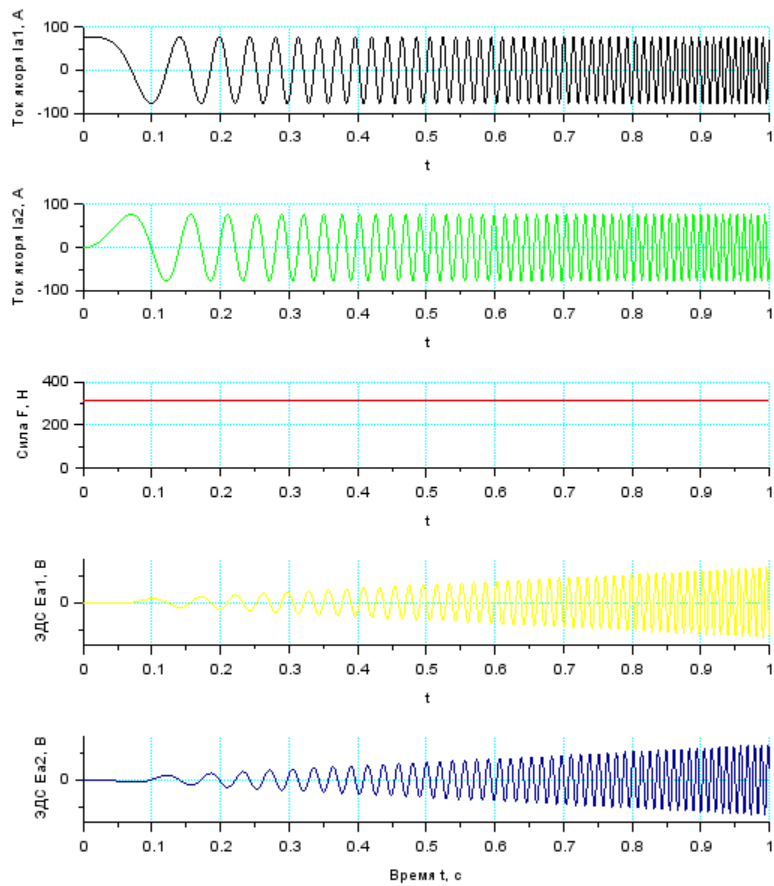


Рис. 14.

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.

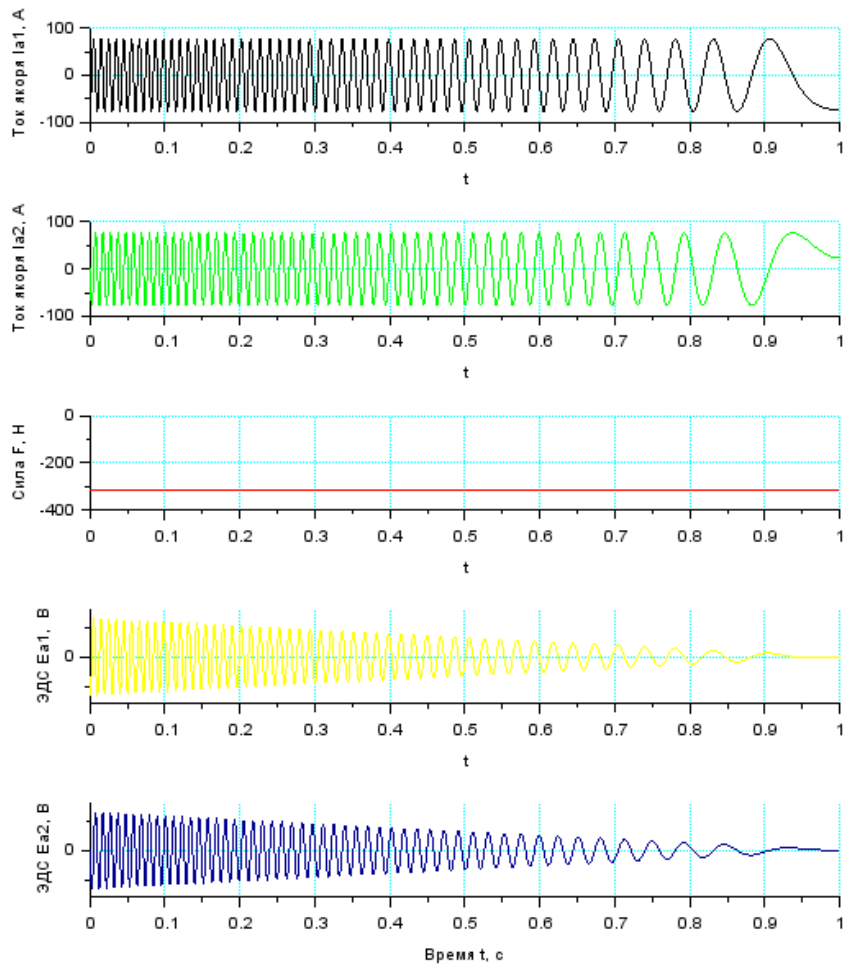


Рис. 15.

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.

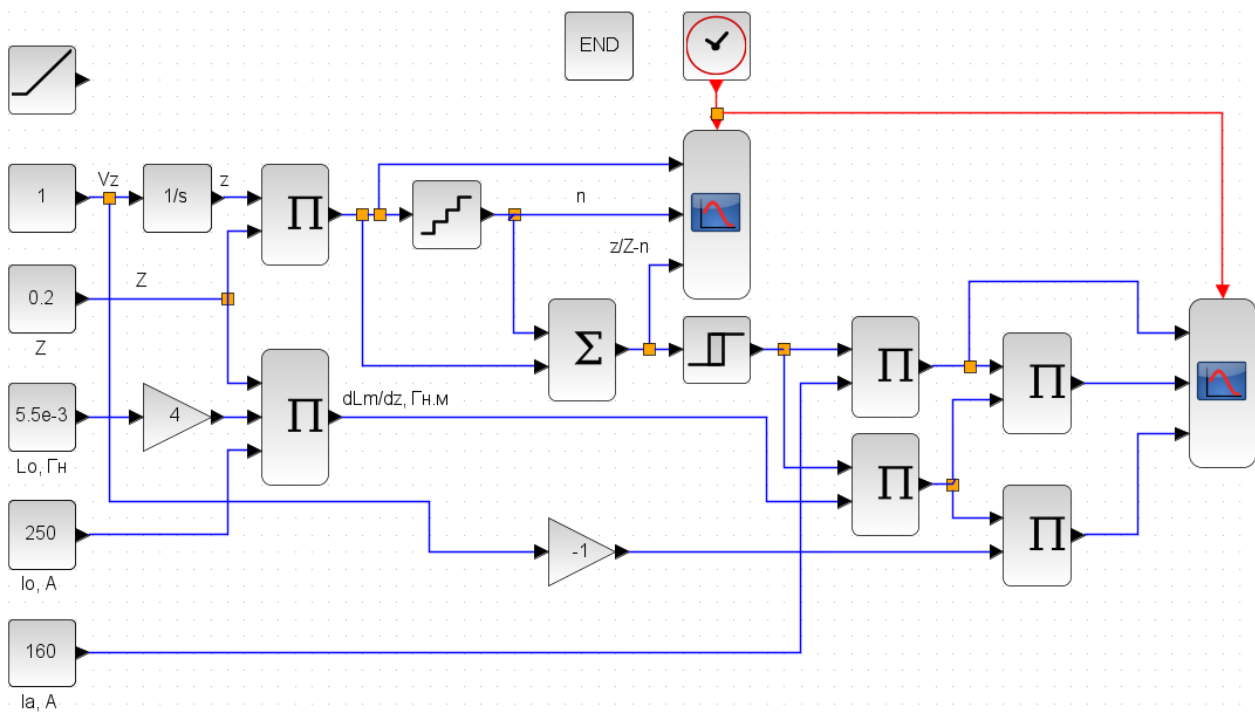


Рис. 16.

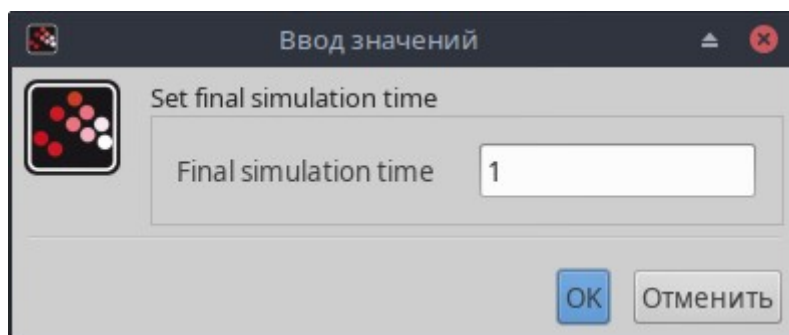


Рис. 17. Параметры блока END.

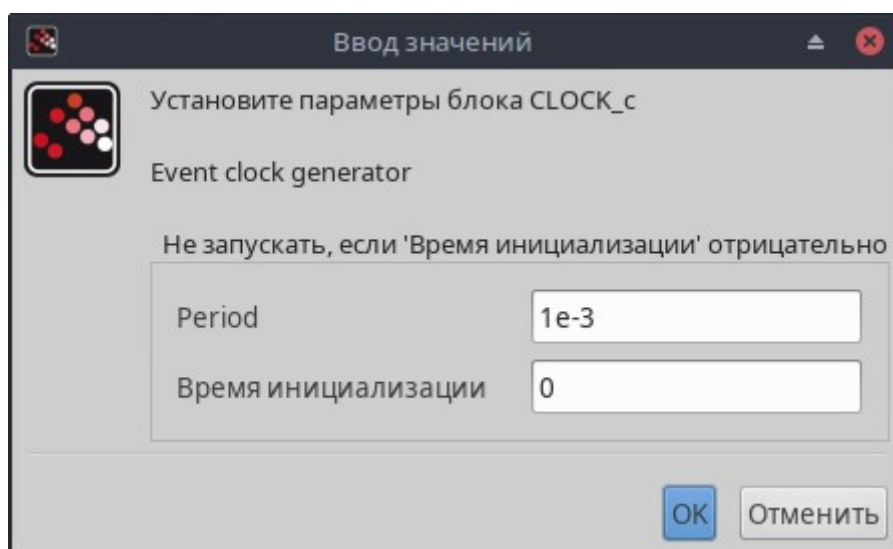


Рис. 18. Параметры блока CLOCK_c.

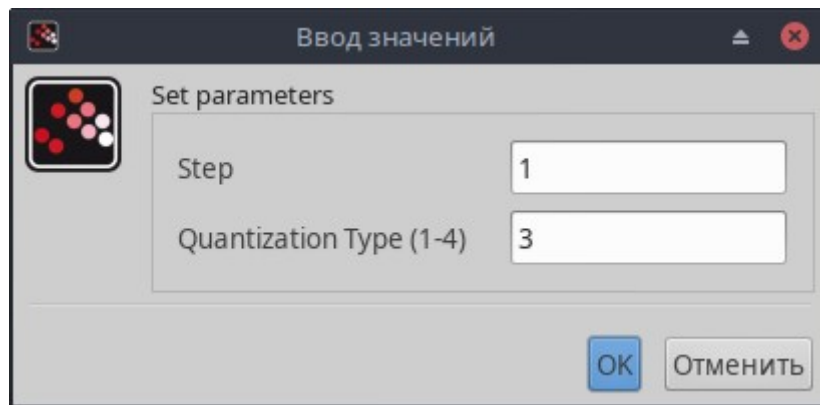


Рис. 19. Параметры блока QUANT_f.

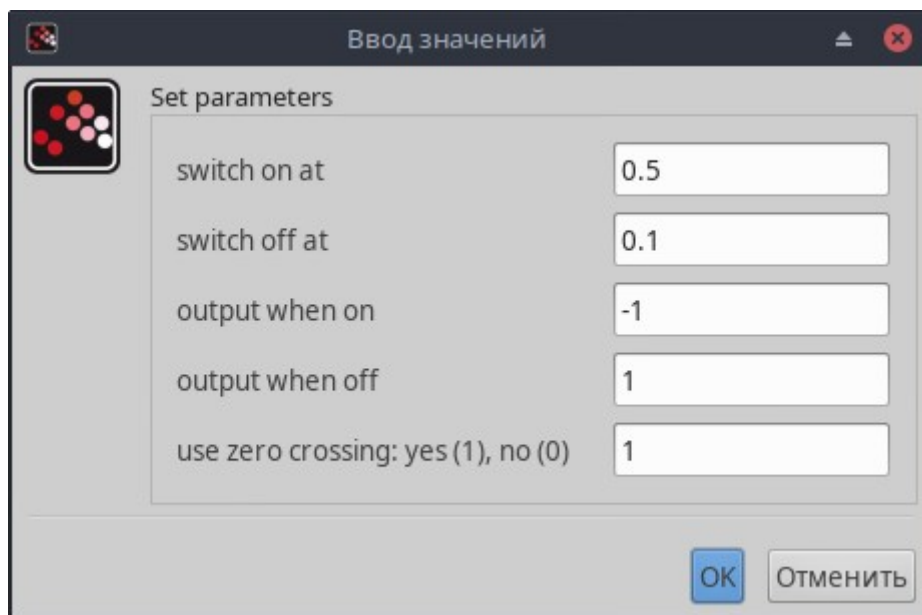


Рис. 20. Параметры блока HYSTERESIS.

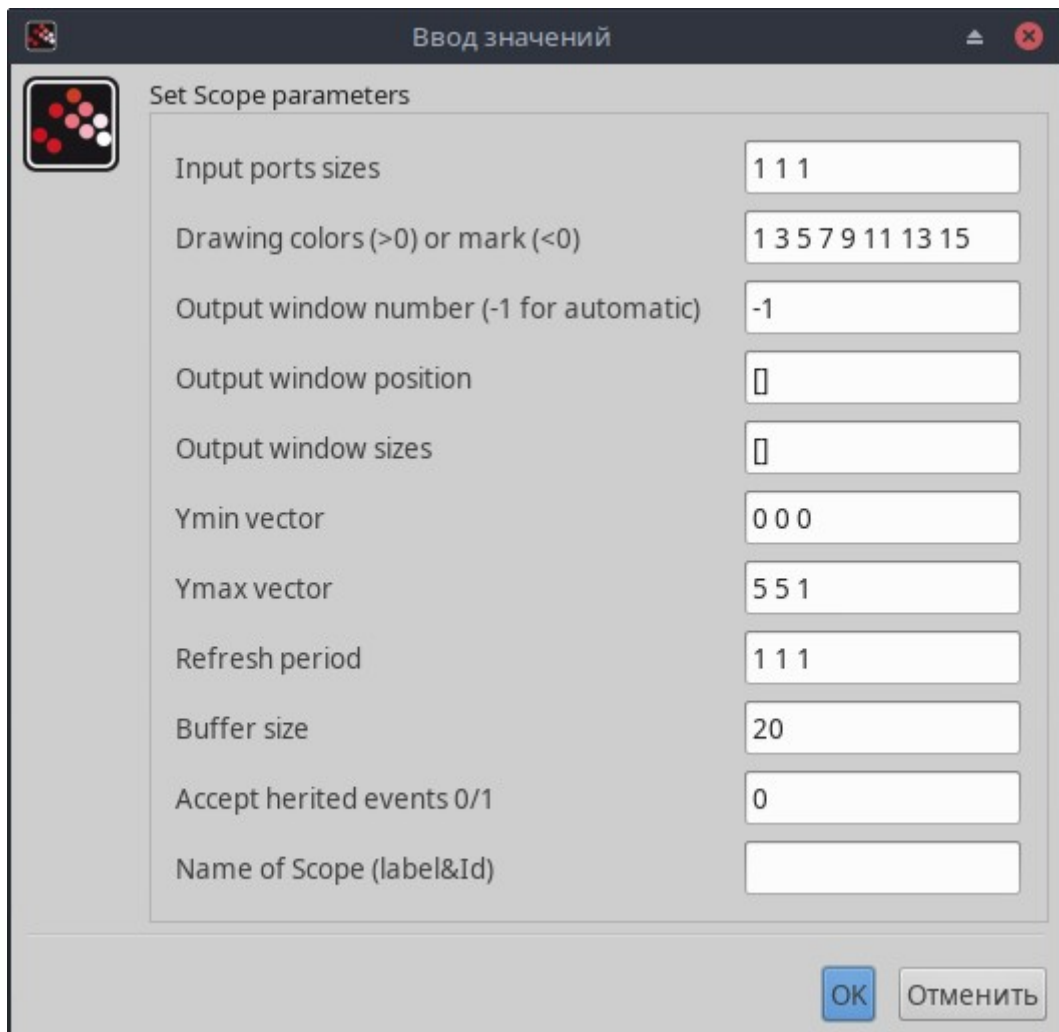


Рис. 21. Параметры первого осциллографа.

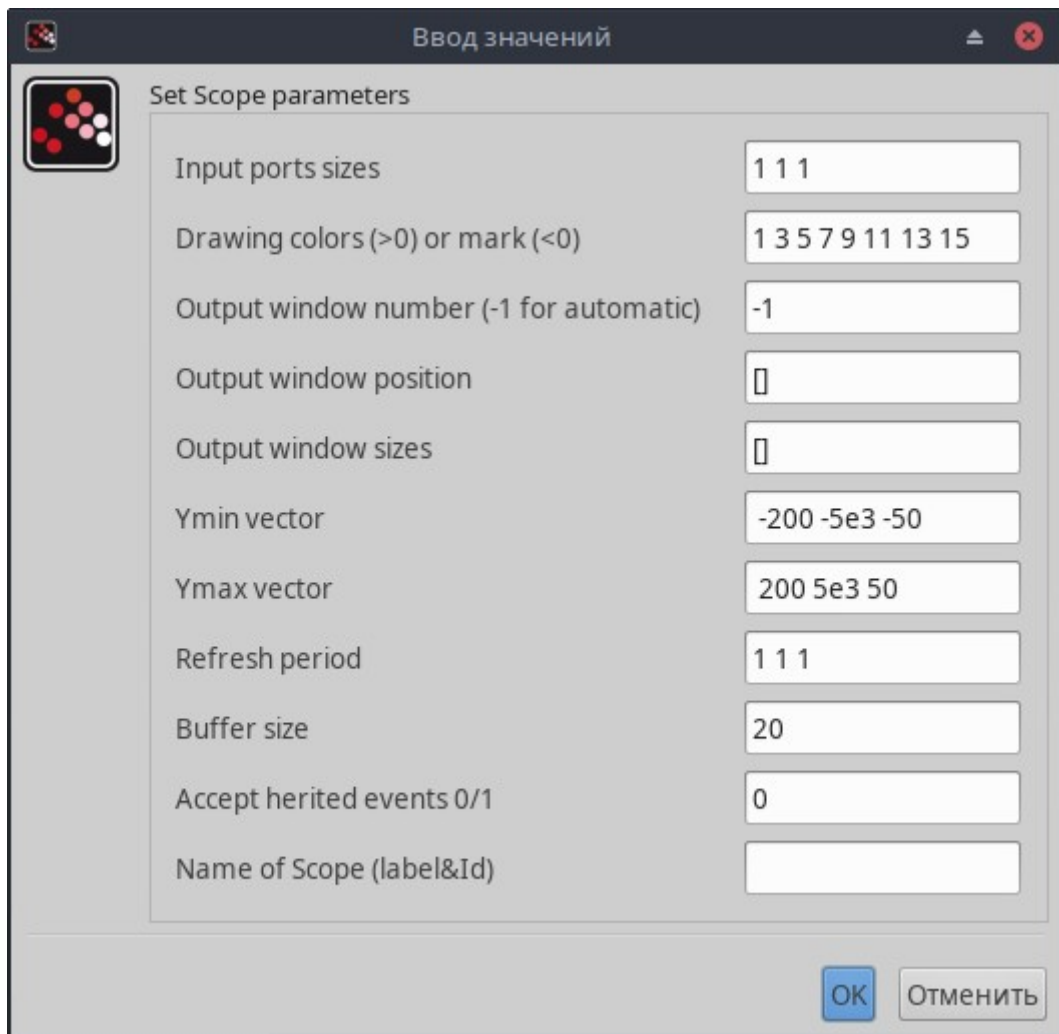


Рис. 22. Параметры второго осциллографа.

Запускаем моделирование и получаем.

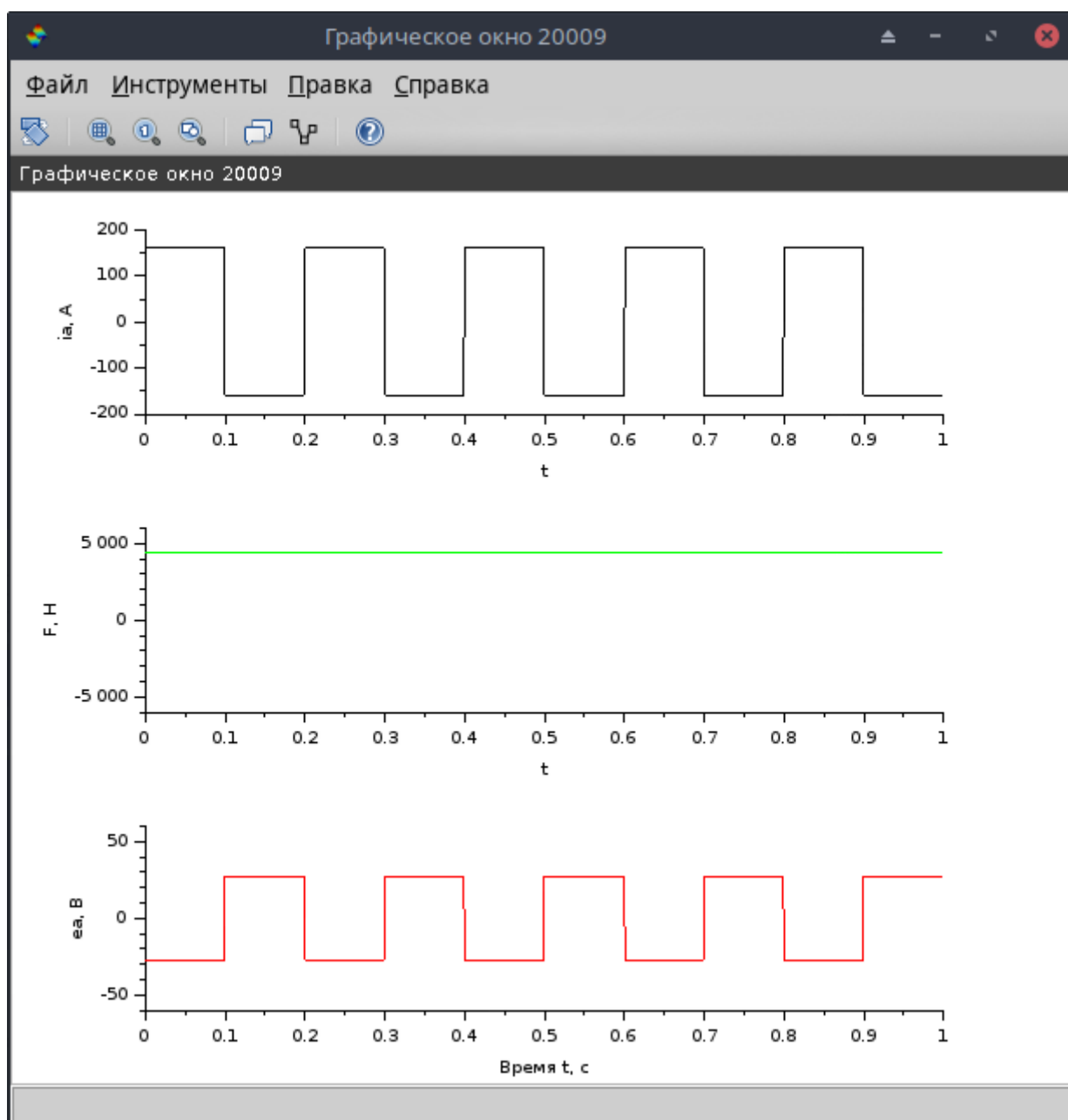


Рис. 23.

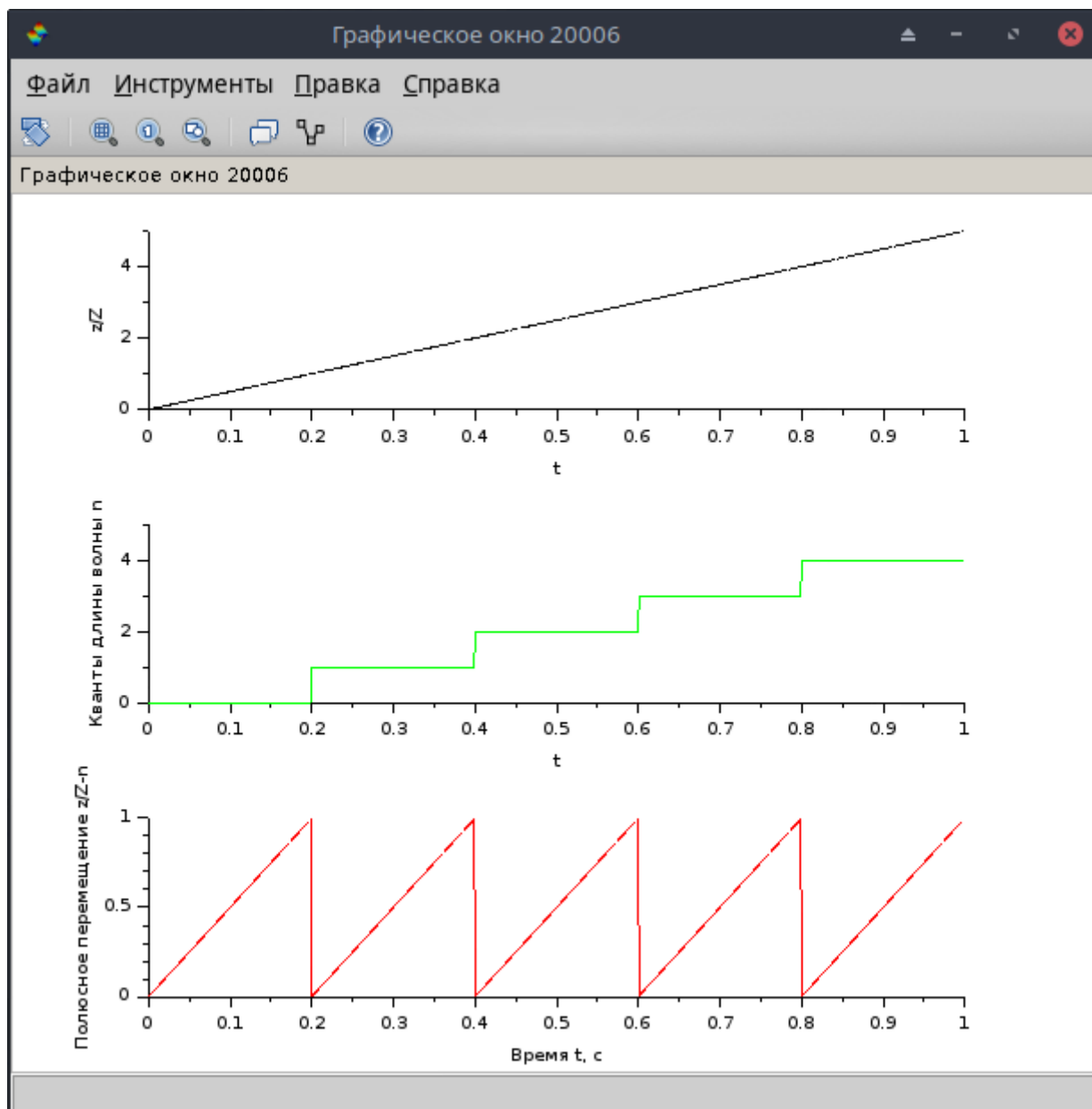


Рис. 24.

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

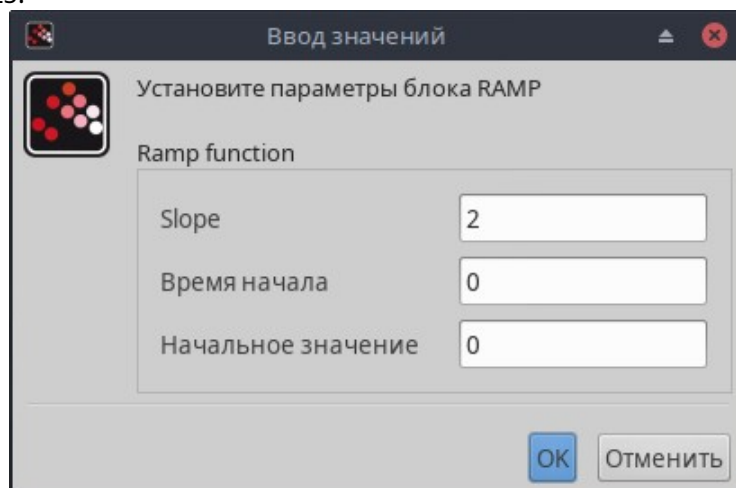


Рис. 25.

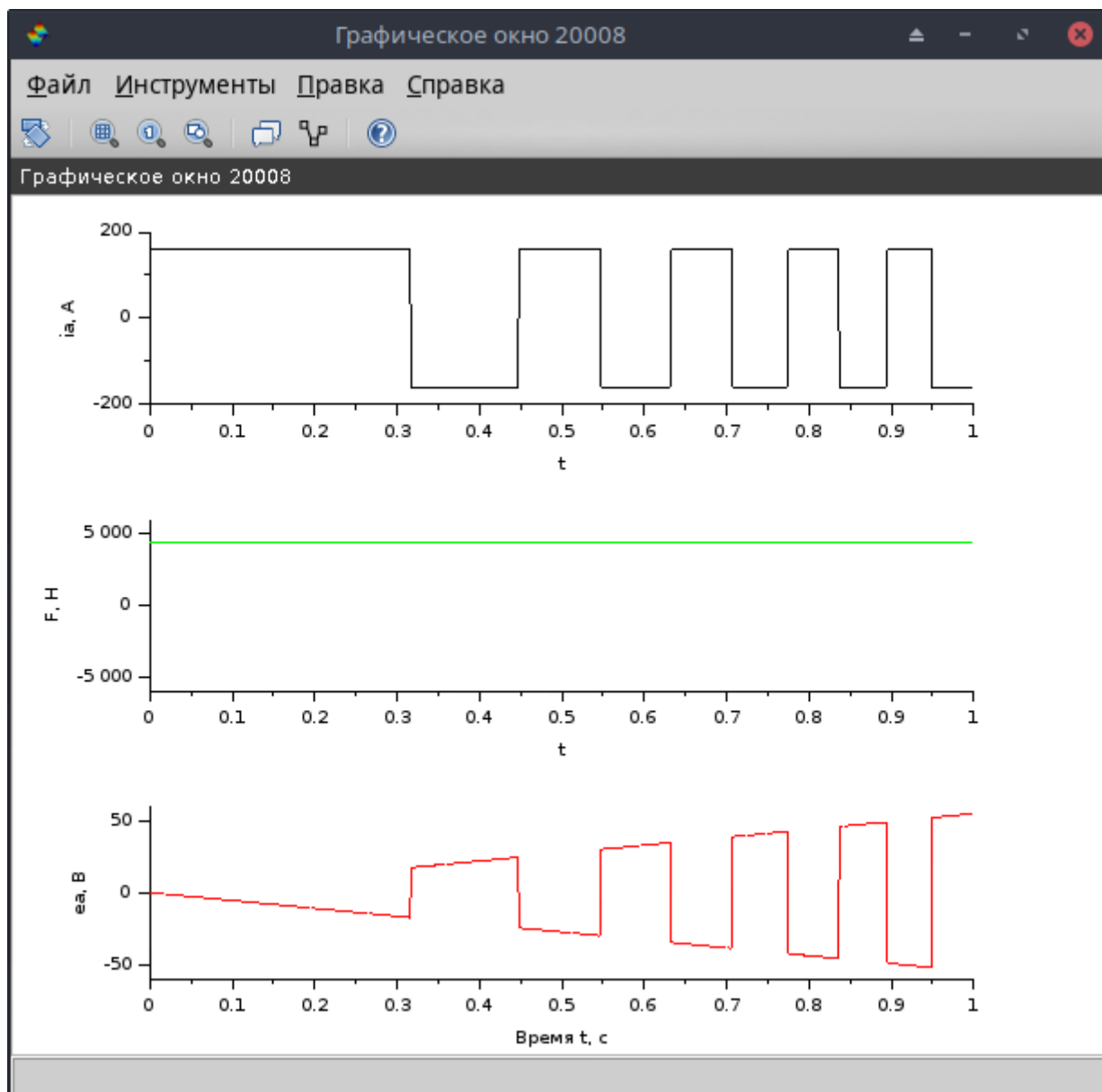


Рис. 27.

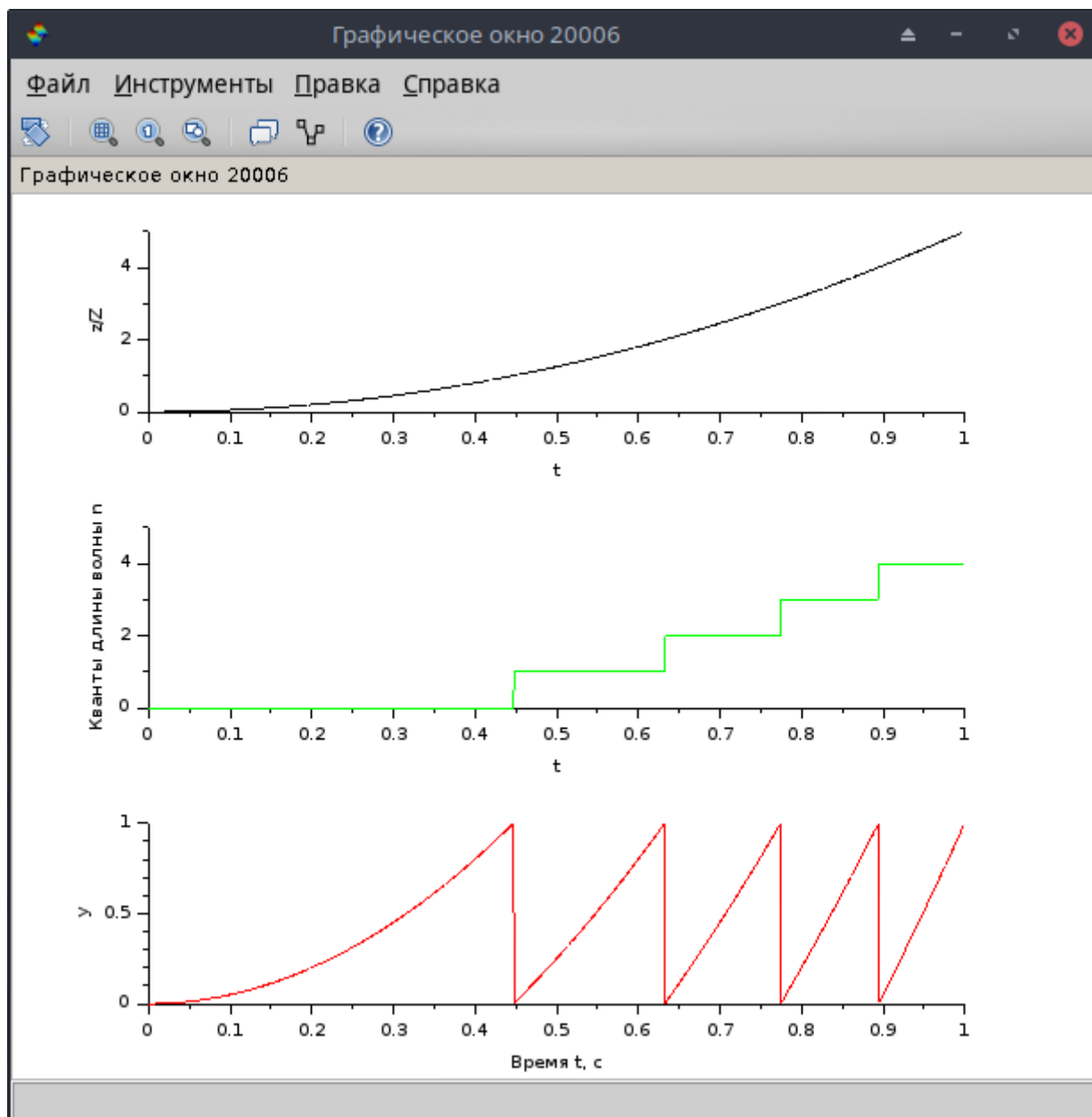


Рис. 28.

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

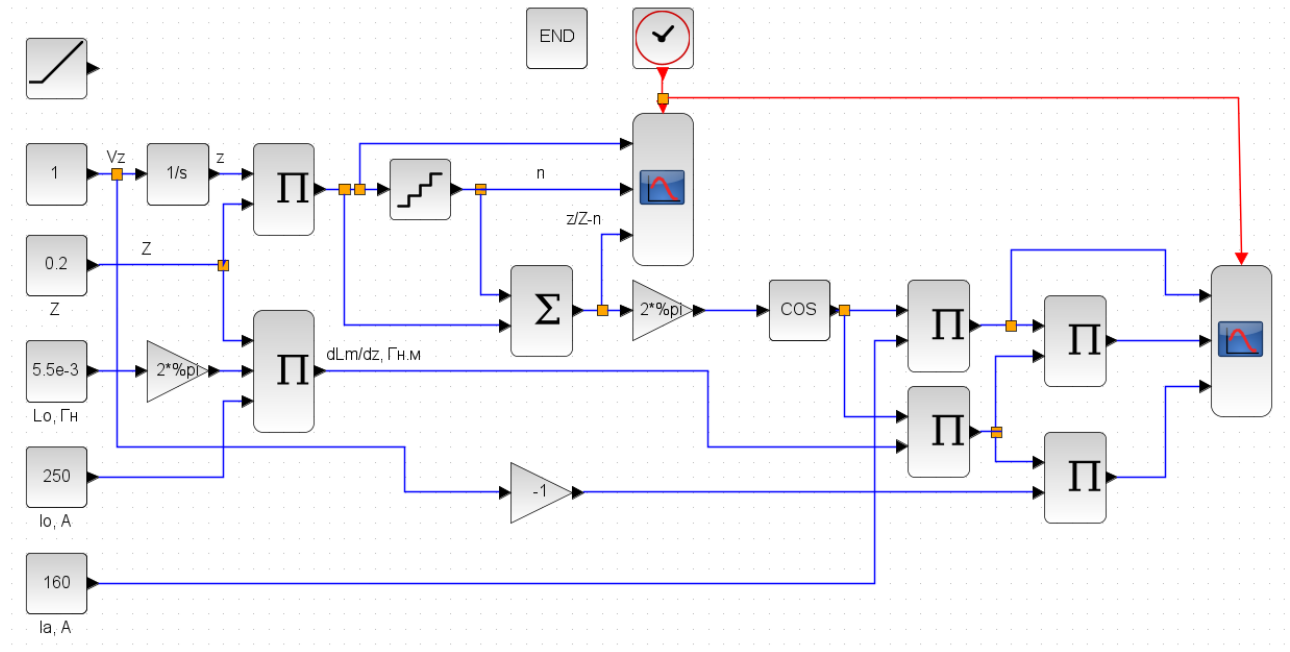


Рис. 41.

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

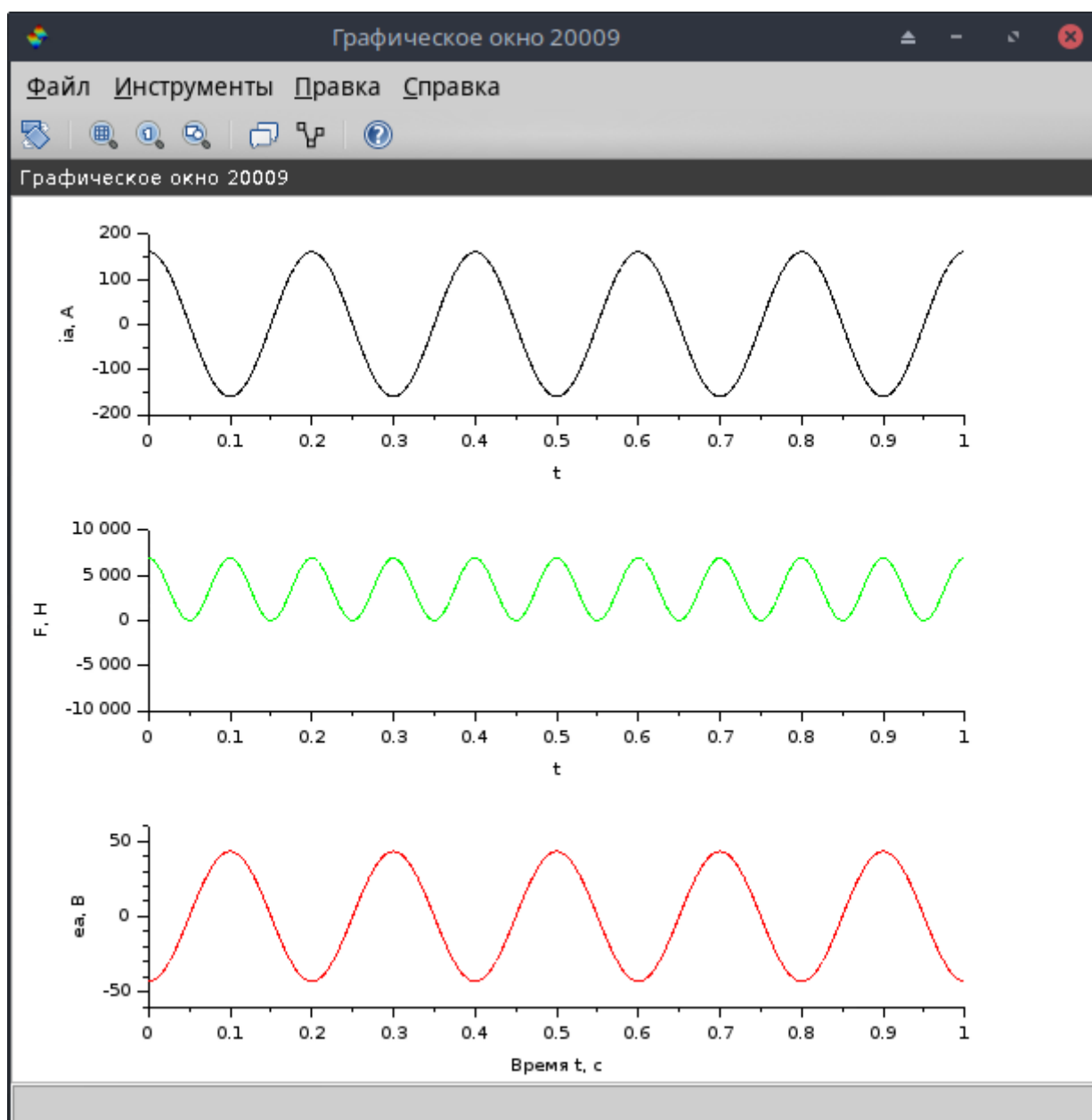


Рис. 42.

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.

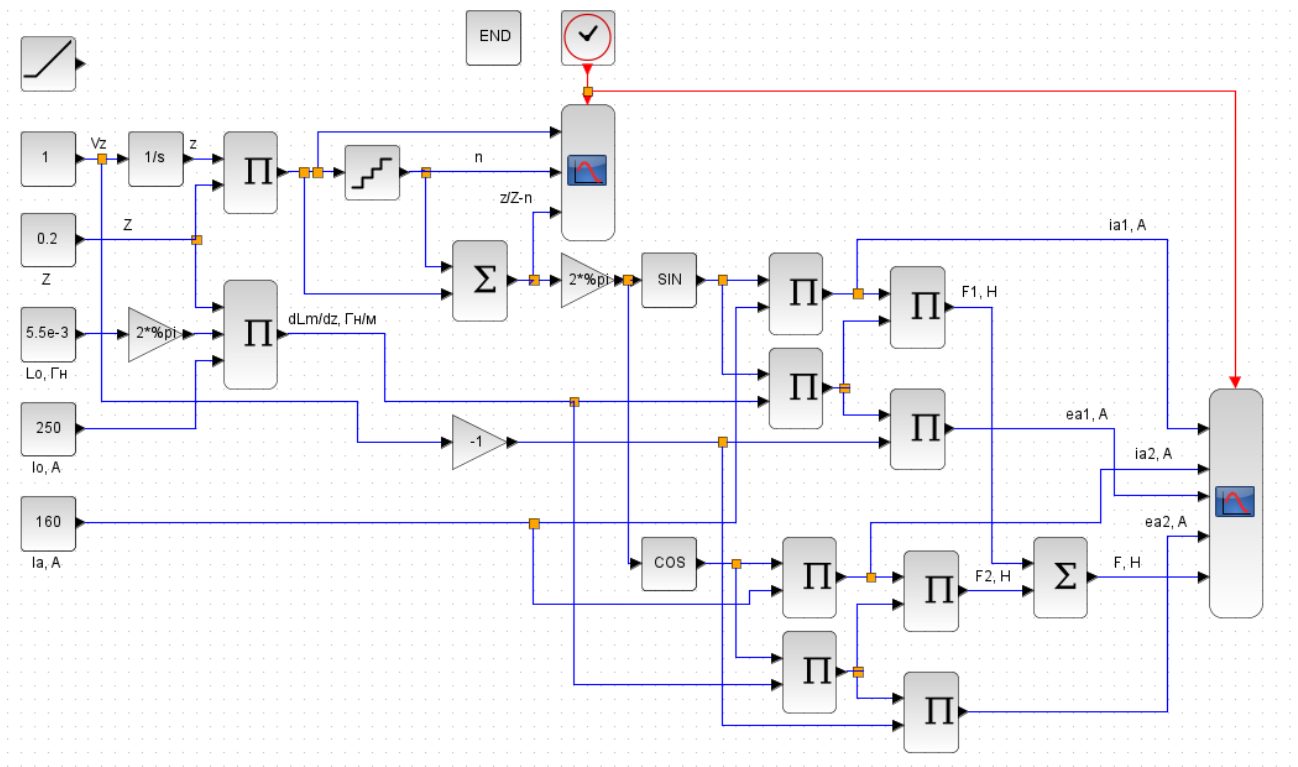


Рис. 43.

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

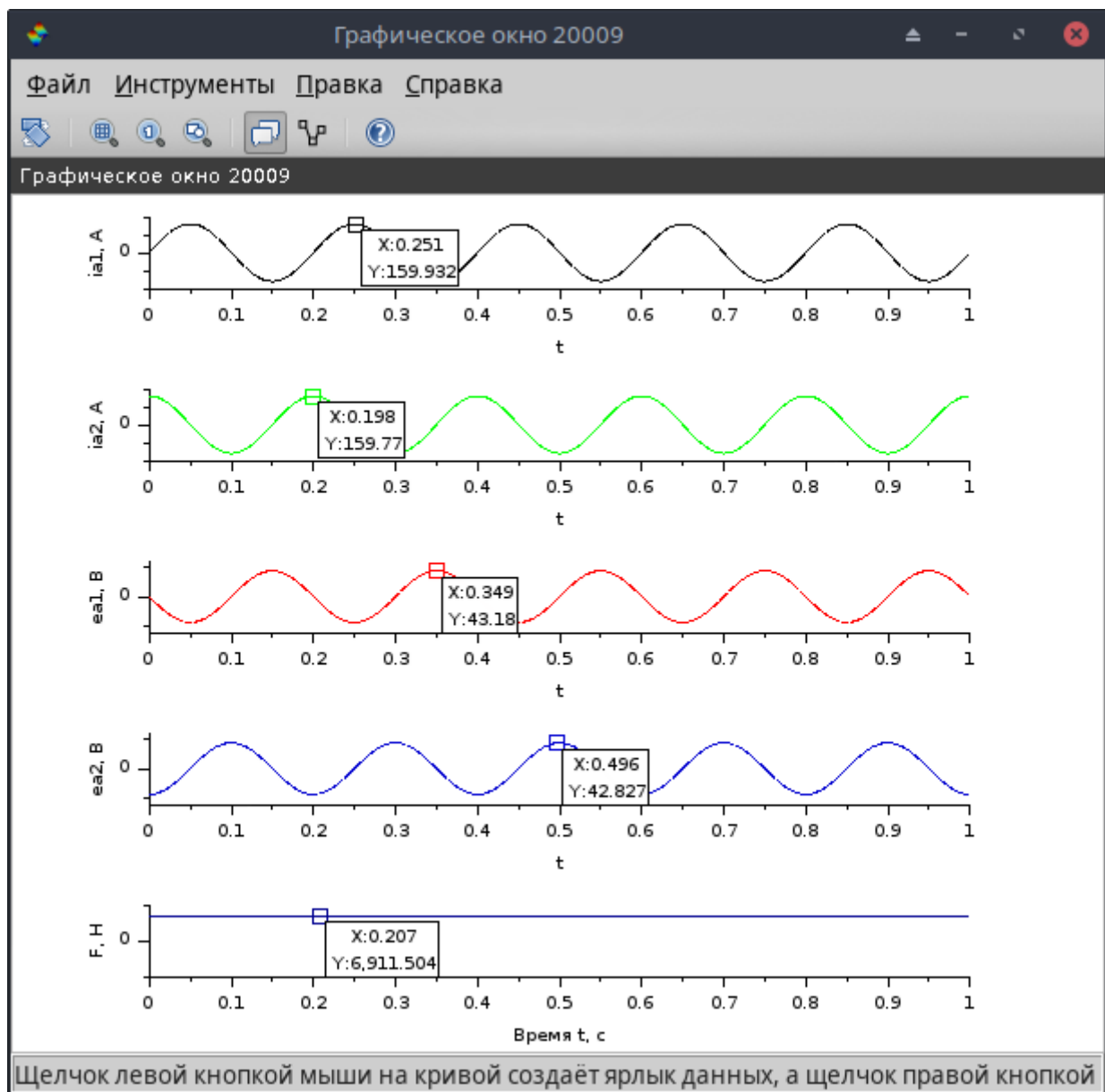


Рис. 44.

Как и следовало ожидать электромагнитная сила стала постоянной. Теперь проведём имитационные ходовые испытания транспортного средства с моделью тяговой машины.

3. 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. 45.

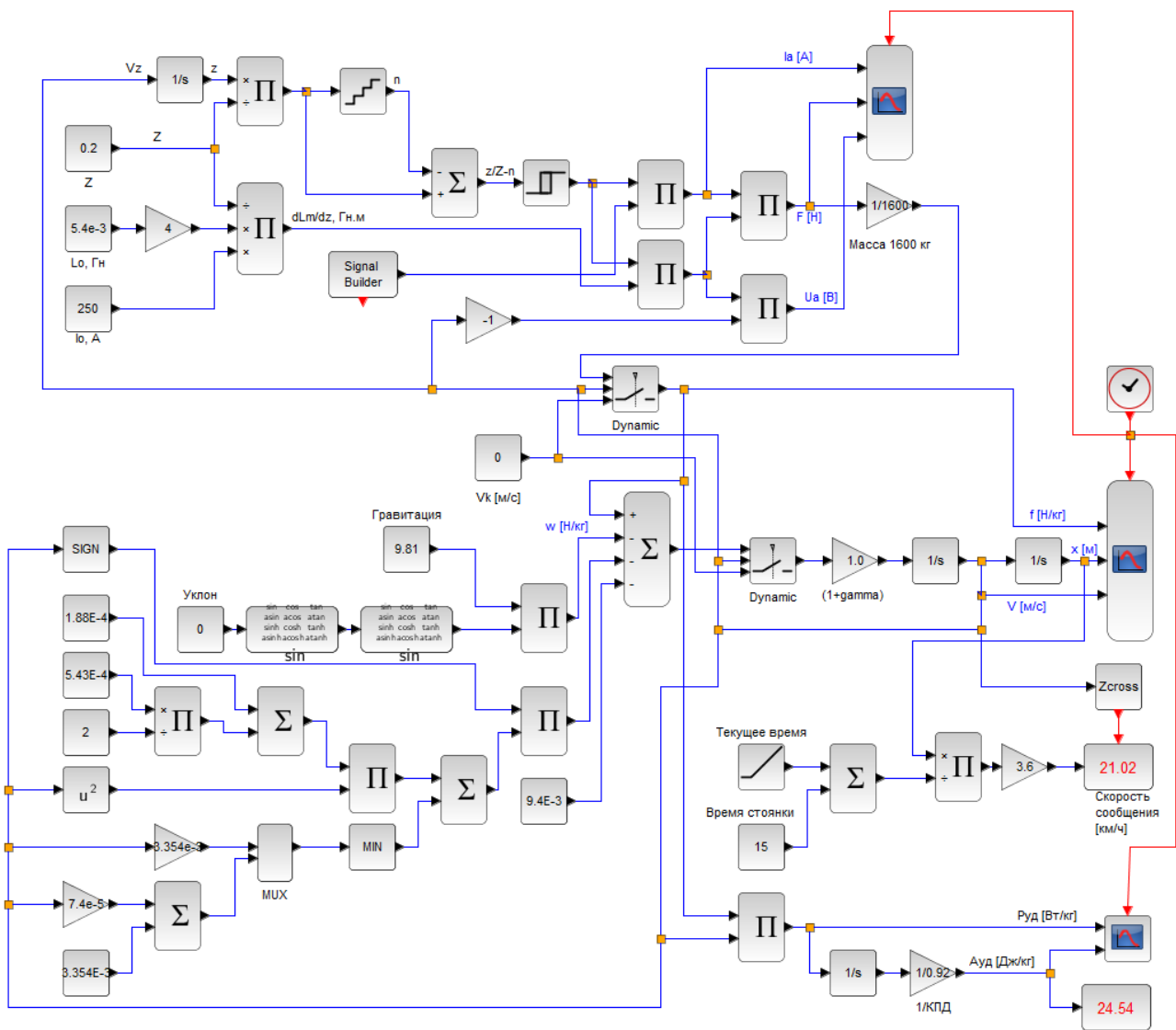


Рис. 45.

Пример результатов моделирования приведен на рис. 46...48.

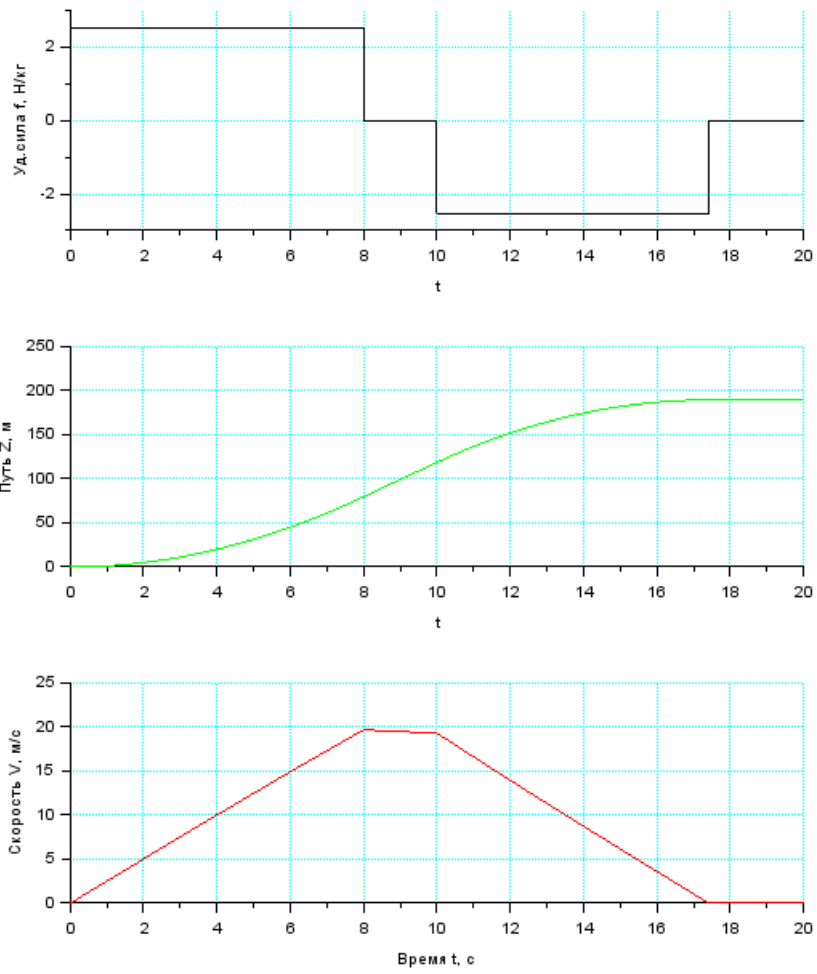


Рис. 46.

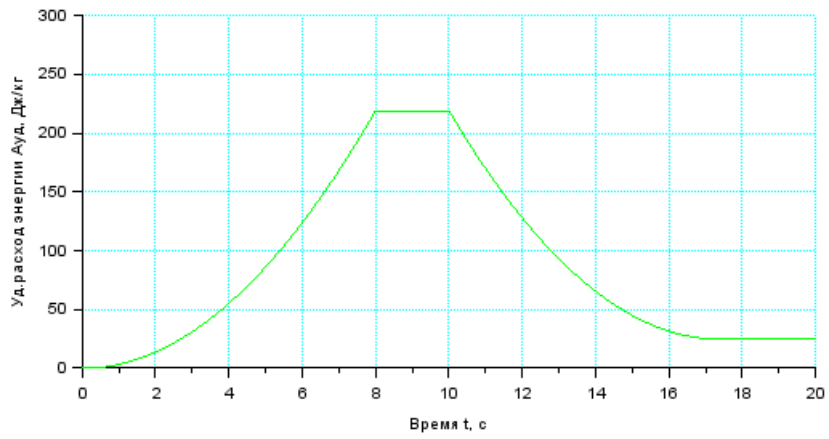
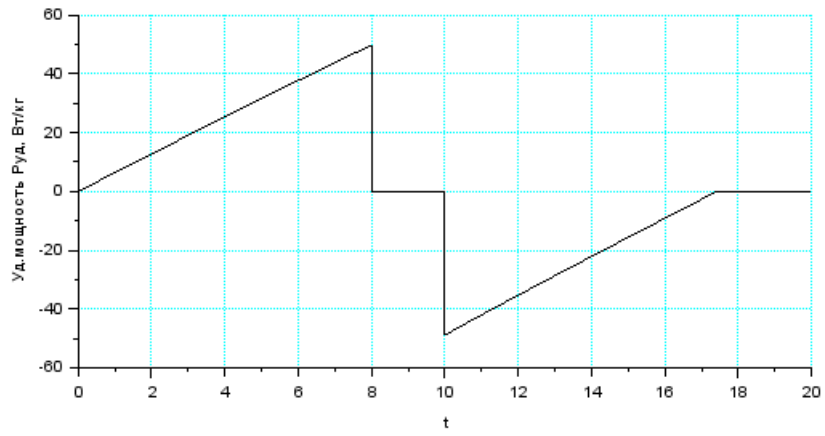


Рис. 47.

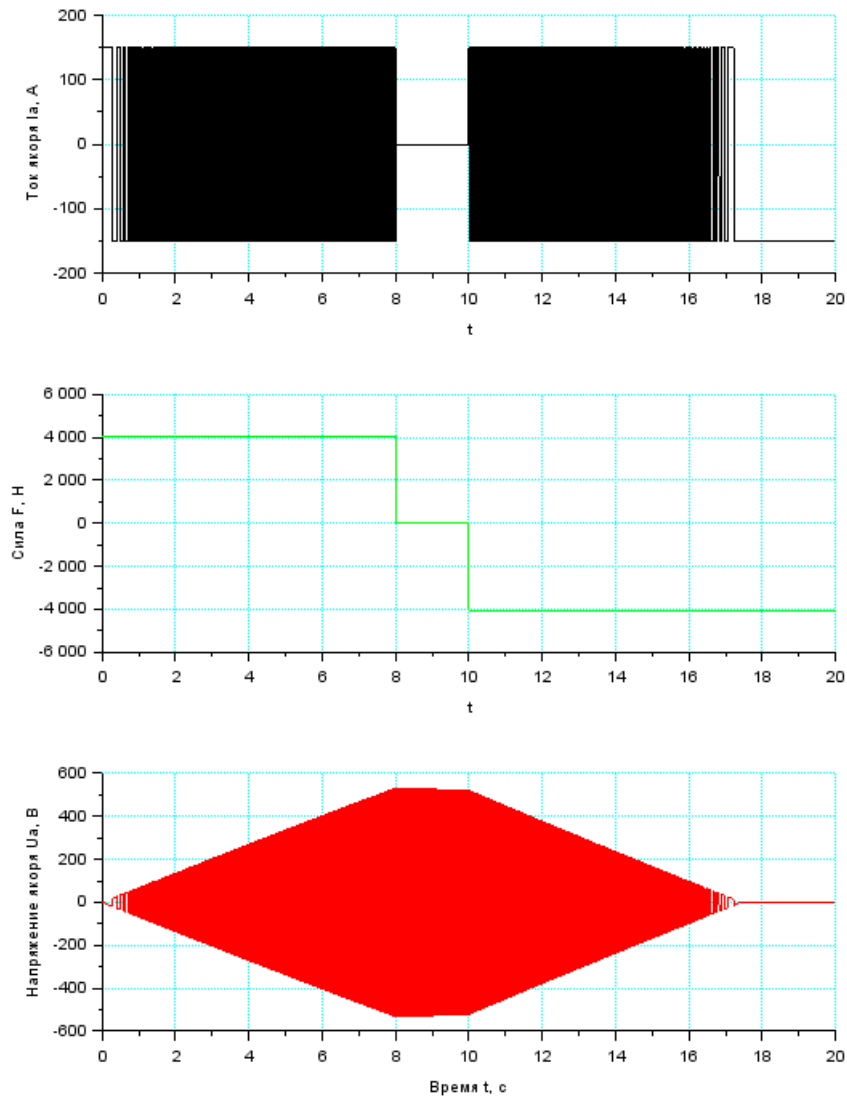


Рис. 48.

Задание

Необходимо провести осциллографирование тока и эдс якоря, сил тяги или торможения в стендовых и ходовых имитационных испытаниях при следующих условиях и режимах:

а) в стендовых испытаниях:

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

б) в ходовых испытаниях:

- максимальной скорости установившегося движения на площадке при полной загрузке;
- максимально преодолеваемый подъём;

- руководящий подъём с установившейся скоростью;
- условный цикл движения в соответствии с требованиями задания на курсовой проект.

Результаты испытаний должны быть сведены в таблицу.

Пример таблицы результатов испытаний.

Результаты имитационных ходовых испытаний тяговой электрической машины

Контролируемые параметры	По результатам испытаний	По техническому заданию	Оценка результатов
Максимальная скорость установившегося движения на площадке при полной загрузке V_m , м/с	32	32	+
Максимально преодолеваемый подъём i_m , %	15	15	+
Руководящий подъём: Величина i_r , % длина L_r , м Установившаяся скорость V_i , м/с	12 1024 22	12 1024 20	+ + +
Длительность t_{ov} разгона, с до скорости, 20 м/с	8	10	+
Тормозной путь S_b на горизонтальном прямом участке пути при номинальной загрузке 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.