

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСИС»

Кафедра электроэнергетики и электротехники

Р.Е. Мажирина

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ (ЧАСТЬ 1)

Практикум
для направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
всех форм обучения

Новотроицк, 2024 г.

УДК 681.5

ББК 31.291

М12

Рецензенты:

*зам. директора по инновациям и развитию Новотроицкого филиала
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», к.т.н., доцент*

А.Н. Шаповалов

*доцент кафедры «Электропривод, мехатроника и электромеханика»
ФГАОУ ВО «Южно-уральский государственный университет (НИУ)»,
к.т.н., доцент*

К.В. Лицин

Мажирин, Р. Е. Компьютерное моделирование электроприводов (часть 1): практикум для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех формы обучения. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСИС», 2024. – 50 с.

В практикуме рассмотрены примеры решения задач по компьютерному моделированию электроприводов. Примеры даны с использованием моделирования в программе SimInTech.

Методические указания составлены в соответствии с требованиями образовательного стандарта НИТУ «МИСИС» по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСИС»

© ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС»,
Новотроицкий филиал, 2024

Содержание

Введение.....	4
1 Моделирование механической части электропривода	5
2 Моделирование электрических машин.....	28
Список использованных источников	49

Введение

Дисциплина «Компьютерное моделирование электроприводов» включена в дисциплины по выбору подготовки бакалавров на третьем курсе очной и заочной форм обучения по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника по профилю «Электропривод и автоматика».

Пособие включает в себя два раздела. В первой части рассмотрены примеры построения кинематических схем приводов, а во второй части рассмотрены примеры моделирования электрических двигателей.

SimInTech – программная платформа для разработки математических моделей, алгоритмов управления, мнемосхем и видеокадров, обладающая возможностью автоматической генерации кода для программируемых контроллеров. SimInTech относится к отечественным программным продуктам (реестровая запись №2379 от 15.12.2016).

Пособие содержит большое количество иллюстраций, позволяющих научиться работать в программе SimInTech. Необходимо отметить, что на рисунках стрелки, надписи и прочие графические элементы красным цветом, выполнены в графическом редакторе Visio.

Справочная информация по работе с программой доступна на сайте <https://help.simintech.ru/>.

1 Моделирование механической части электропривода

Задача 1

Определите режим работы электропривода по схеме, представленной на рисунке 1 и графику выходной координаты – скорости, представленному на рисунке 2.

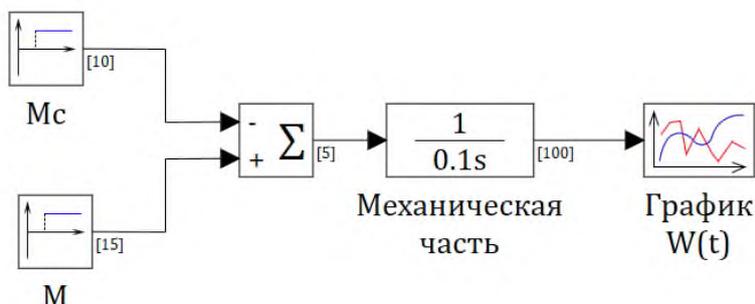


Рисунок 1 – Схема исследования основного уравнения движения электропривода

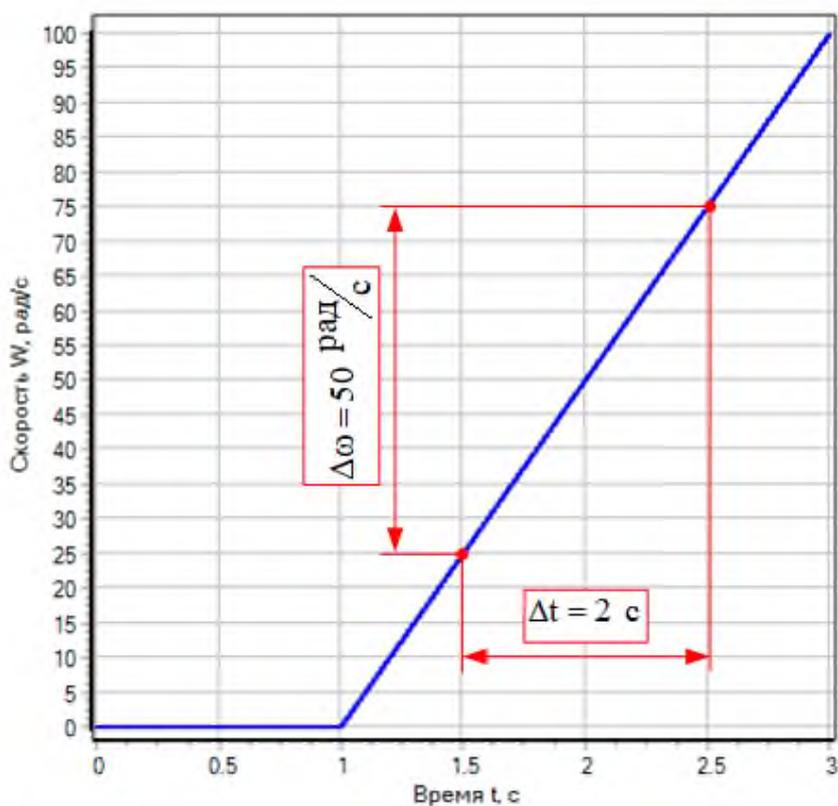


Рисунок 2 – Зависимость $\omega=f(t)$

Решение:

Схема, изображенная на рисунке 1 графически отображает основное уравнение движения в операторной форме:

$$M - M_c = J \cdot p \cdot \omega, \quad (1)$$

где M – момент, развиваемый двигателем;
 M_c – момент статической нагрузки;
 ω – угловая скорость вращения.

По графику, представленному на рисунке 2 видно, что скорость электропривода увеличивается с постоянным ускорением. В момент времени $t=1$ с скорость ω равна нулю, что соответствует началу разгона с ускорением

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{50}{2,5} = 1,5 \text{ с}^{-2}.$$

Задача 2

Составьте модель двухмассовой системы и проведите исследование влияния жесткости на динамику системы.

Данные для исследования: $J_1=1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2=5 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Жесткость упругой системы c меняется в пределах от 1 до 100 Н·м.

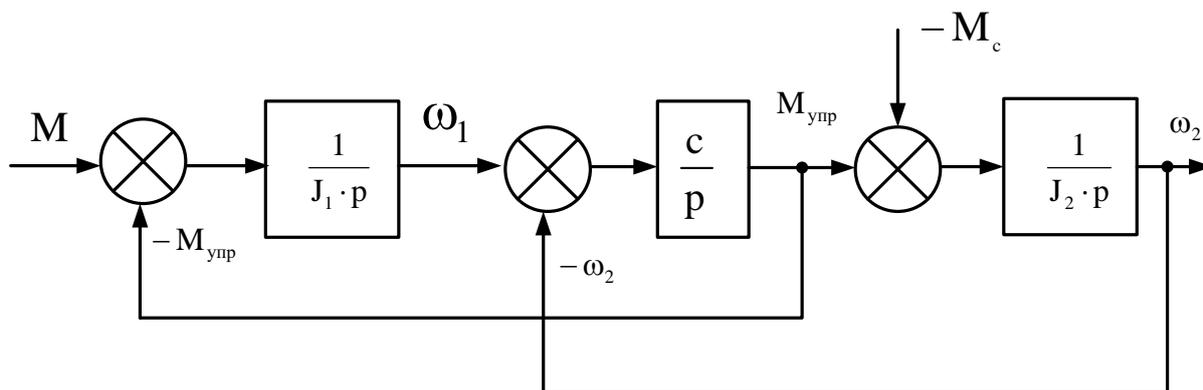


Рисунок 3 – Структурная схема двухмассовой системы с упругим элементом

Решение:

Двухмассовая система, представленная на рисунке описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} M - M_{\text{упр}} = J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} \\ -M_{\text{упр}} - M_c = J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} \\ M_{\text{упр}} = c \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = c \cdot \int (\omega_1 - \omega_2) \cdot dt \end{cases} \quad (2)$$

Выполним преобразование по Лапласу для последнего уравнения

$$L\{M_{\text{упр}}\} = \frac{c(\omega_1 - \omega_2)}{p} \quad (3)$$

Схема эксперимента, смоделированная в программе SimInTech, представлена на рисунке.

На вход системы подается задающий сигнал $M=10$ Н·м. Возмущающий сигнал принят равным также $M_c=10$ Н·м. Равенство моментов $M=M_c$ обеспечивает возможность исследования системы в статическом режиме. Статический момент подается с задержкой времени $t=25$ с, что позволит исследовать систему как на холостом ходу, так и под нагрузкой.

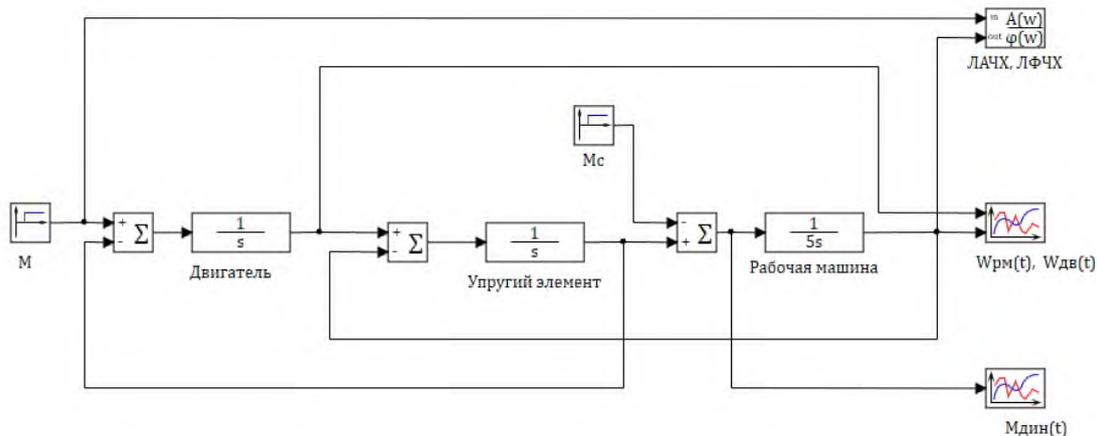


Рисунок 4 – Схема моделирования к задаче 2 при $c=1$ Н·м

Графики переходных процессов $W_{\text{дв}}=f(t)$ и $W_{\text{рм}}=f(t)$ при крайних значения жесткости c представлены на рисунках 5 и 6. При анализе будем считать, что $W_{\text{дв}}$ – скорость вращения вала двигателя, а $W_{\text{рм}}$ – скорость вращения вала рабочей машины.

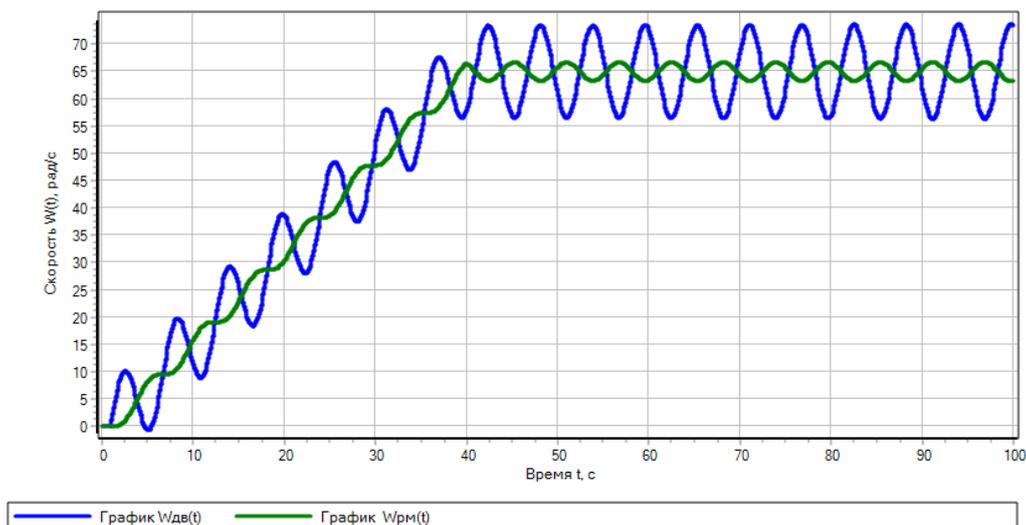


Рисунок 5 – Графики скорости $W_{\text{дв}}=f(t)$ и $W_{\text{рм}}=f(t)$ при $c=1$ Н·м

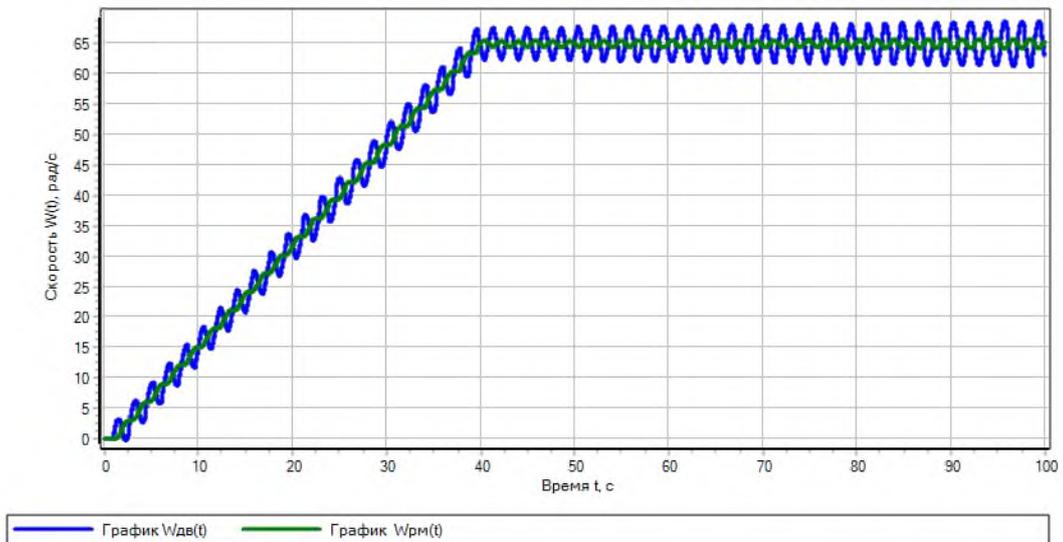


Рисунок 6 – Графики скорости $W_{дв}=f(t)$ и $W_{рм}=f(t)$ при $c=10$ Н·м

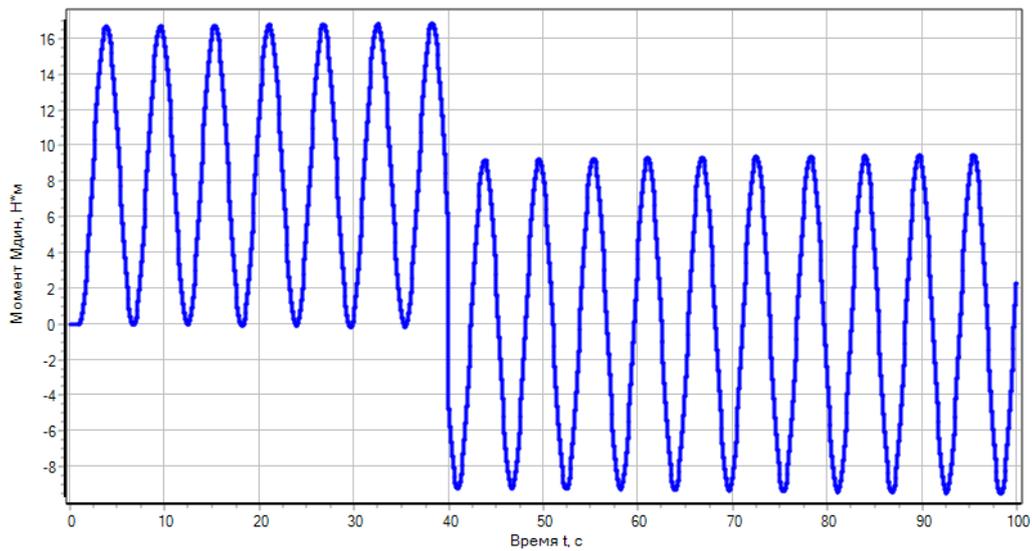


Рисунок 7 – График $M_{дин}=f(t)$ при $c=1$ Н·м

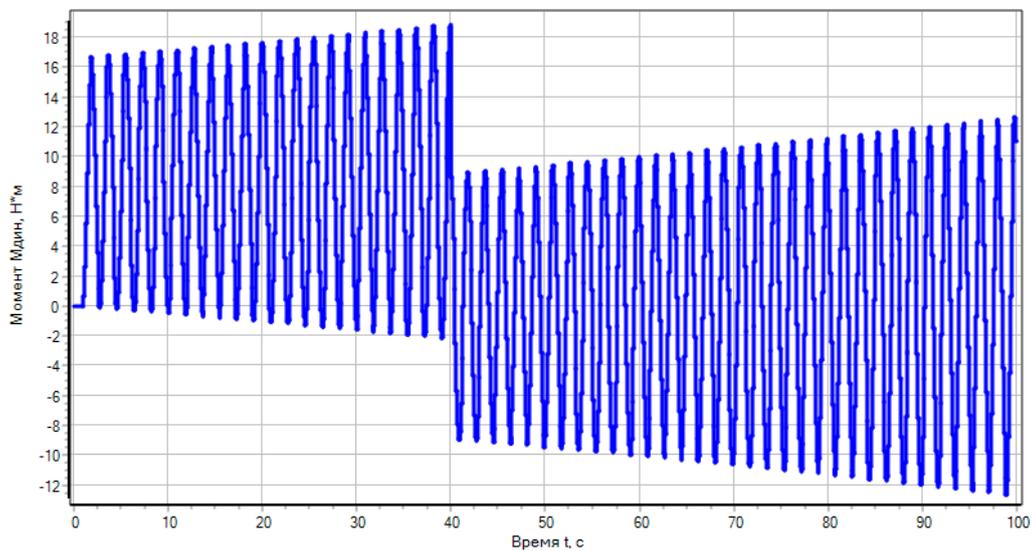


Рисунок 8 – График $M_{дин}=f(t)$ при $c=10$ Н·м

Анализ графиков $W_{дв}=f(t)$ и $W_{рм}=f(t)$ позволяет сделать следующие выводы:

- переходной процесс в обоих случаях носит колебательный характер;
- амплитуда и частота колебаний скорости вращения рабочей машины больше чем скорости вращения вала двигателя;
- амплитуда колебаний скорости зависит от жесткости системы, и в первом случае при $c=100$ Н·м гораздо больше, чем во втором случае при $c=10000$ Н·м;
- время переходного процесса на обоих графиках составляет примерно 25 с. т.е. соответствует времени приложения статического момента.

Анализ графиков $M_{дин}=f(t)$ позволяет сделать следующие выводы:

- переходной процесс в обоих случаях носит колебательный характер;
- амплитуда значения динамического момента не зависит от жесткости системы;
- частота колебательного процесса пропорциональна значению жесткости системы; чем выше жесткость системы, тем больше частота колебания динамического момента;
- в момент пуска момент динамический имеет положительное значение, поэтому в период времени $t=0 \div 25$ с скорость вала двигателя и рабочей машины возрастает;
- время переходного процесса на обоих графиках составляет примерно 25 с. т.е. соответствует времени приложения статического момента.

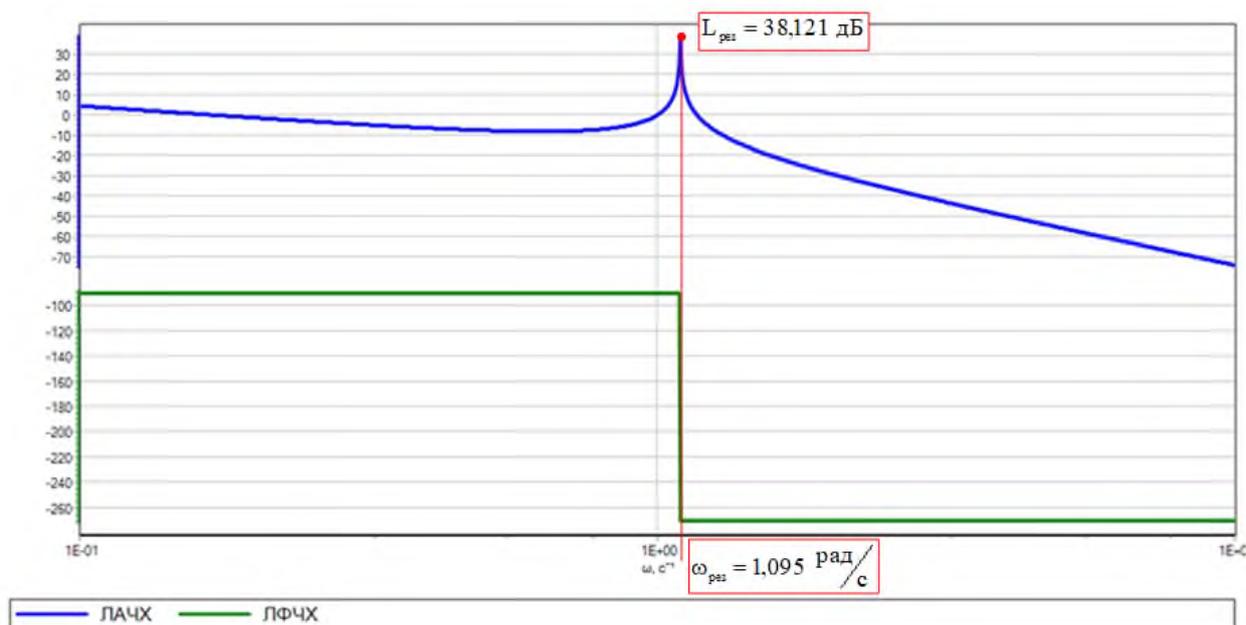


Рисунок 9 – Логарифмические частотные характеристики двухмассовой системы при $c=1$ Н·м

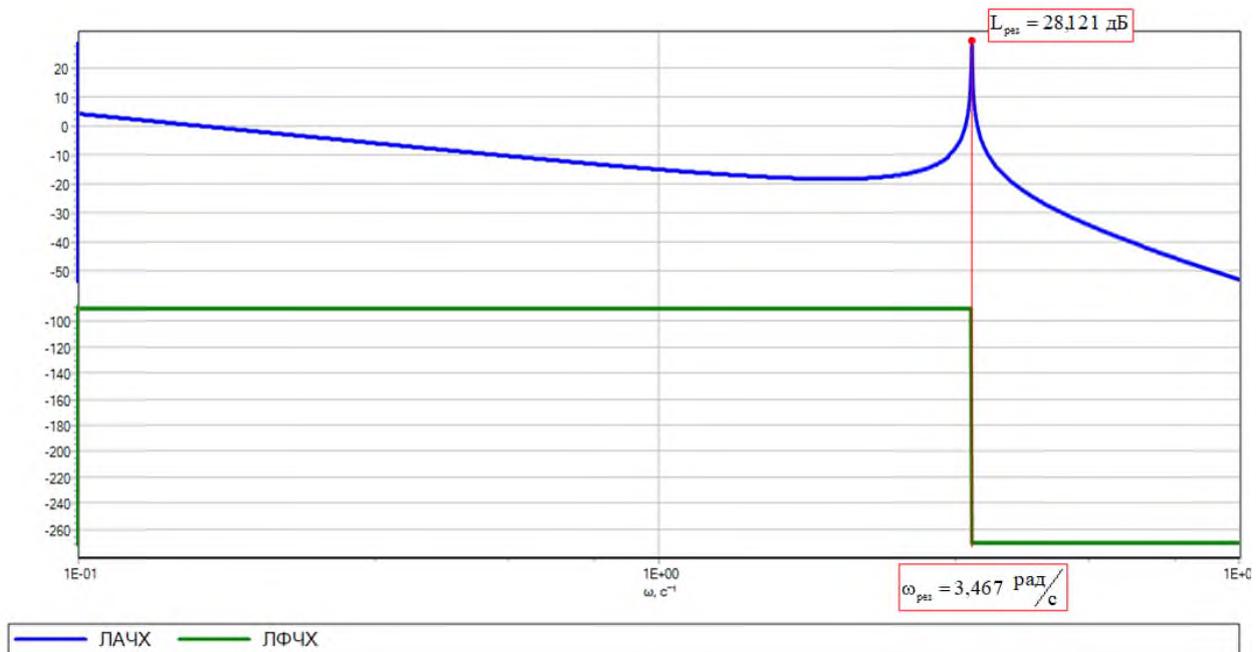


Рисунок 10 – Логарифмические частотные характеристики двухмассовой системы при $c=10$ Н·м

Резонансная частота двухмассовой системы определяется по формуле:

$$\Omega = \sqrt{\frac{c \cdot (J_1 + J_2)}{J_1 \cdot J_2}} = \sqrt{\frac{c \cdot (1 + 5)}{1 \cdot 5}}. \quad (4)$$

При жесткости $c=1$ Н·м значение резонансной частоты системы составит:

$$\Omega_1 = \sqrt{\frac{1 \cdot (1 + 5)}{1 \cdot 5}} = 1,095 \text{ рад/с},$$

а при жесткости $c=10$ Н·м:

$$\Omega_2 = \sqrt{\frac{10 \cdot (1 + 5)}{1 \cdot 5}} = 3,464 \text{ рад/с}.$$

Подводя результаты исследования, отметим, что расчетные параметры полностью соответствуют параметрам графиков, а наличие упругого элемента в механической части электропривода негативно сказывается на динамике и устойчивости системы.

Задача 3

Исследуйте работу одноступенчатого цилиндрического редуктора с передаточным числом $i=3,73$ и коэффициентом полезного действия $\eta=0,85$.

Данные для исследования: угловая скорость вращения вала двигателя 727 об/мин; момент на валу 100 Н·м.

Недостающие данные выбрать самостоятельно.

Решение:

Конечное время расчета в задаче принято 10 с.

Схема исследования с использованием блоков библиотеки «Механика» представлена на рисунке 11. На схеме зеленым цветом показаны блоки библиотеки «Механики», а черным цветом блоки библиотеки «Источники». Так называемая «Механика вращательная связь» (или «Механика поступательная связь») осуществляет соединение между механическими блоками. По ним передается скорость (линейная или угловая), моменты (силы). Этот тип связи является двунаправленным. При этом, угловая скорость передается в одном направлении по механической линии связи, а моменты сил - в другом (встречном) направлении, что показано красными стрелками на рисунке 11.

Блоки задания скорости и момента соединены с кинематической схемой «Математической связью», которая направленно передает данные от выхода блока к входам других блоков.

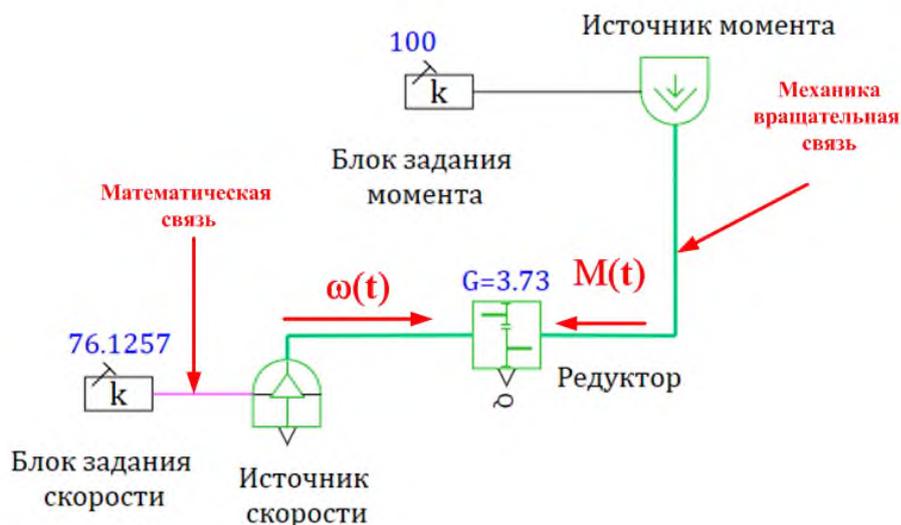


Рисунок 11 – Схема исследования одноступенчатого редуктора

Одноступенчатый редуктор реализован блоком «Простой редуктор» со следующими свойствами, представленными на рисунке 12.

Название	Имя	Форм...	Значение
Тип модели	mod_type		Явная
Модель трения	FrType		Постоянный КПД
Направление вращения	Dir		В одну сторону
Цвет	cl		168948
Коэффициент трения подшипников порт B, Н·м·с/рад	Bb	0	0
Коэффициент трения подшипников порт F, Н·м·с/рад	Bf	0	0
Порог мощности, Вт	Qth	0.1	0.1
КПД	kpd	0.85	0.85
Передаточное число Nf/Nb	G	3.73	3.73

Рисунок 12 – Окно «Свойства» блока «Редуктор»

В блоке «Редуктор» изменено имя объекта (Name) в закладке «Общие» mech_. Это сделано для более компактного обращения к данным при построении графиков в «Менеджере данных».

Графические зависимости исследуемого редуктора можно вывести через «Менеджер данных», доступ к которому можно получить с закладки «Расчет» в меню главного окна согласно рисунка 13.

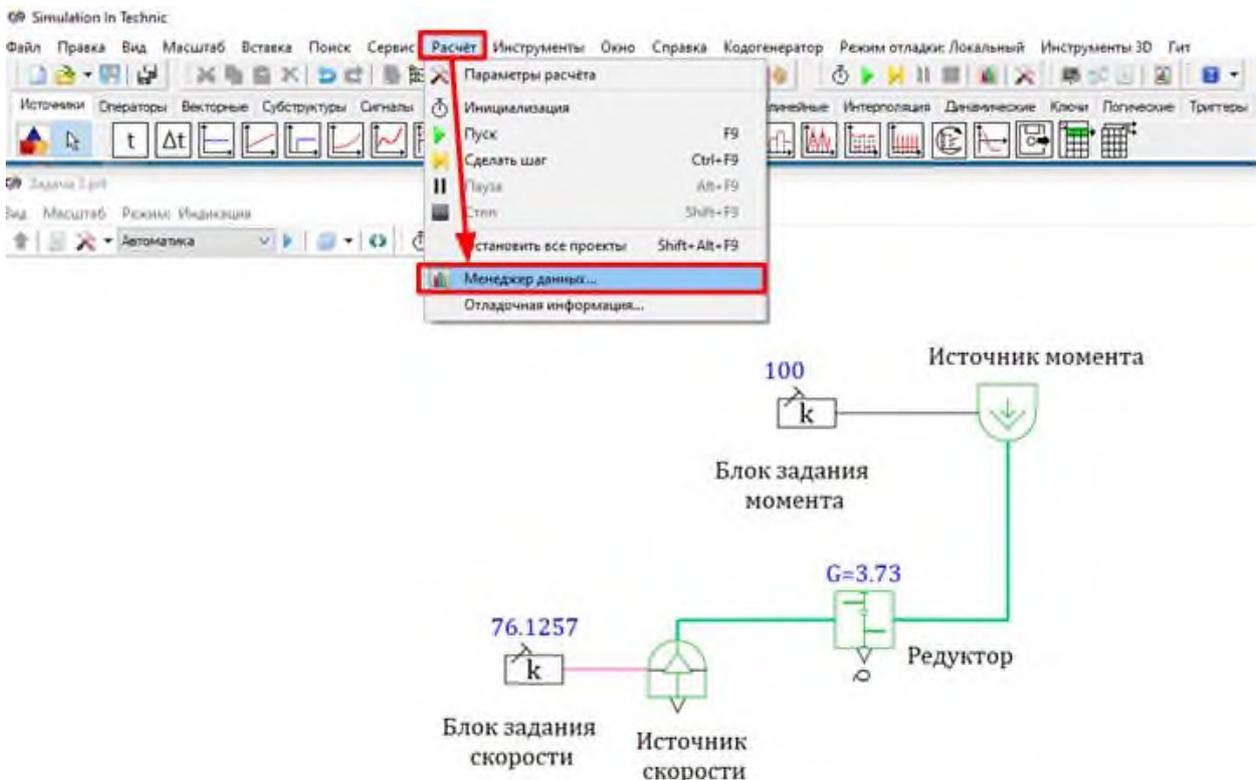


Рисунок 13 – Порядок доступа к «Менеджеру данных» с главного окна SimInTech

В «**Менеджер данных**» графики можно непосредственно создав категорию с помощью кнопки «**Добавить категорию**», а далее нажав на правую кнопку мышки на категорию выбрать «**Добавить**» и далее «**График**» как показано на рисунке 14.

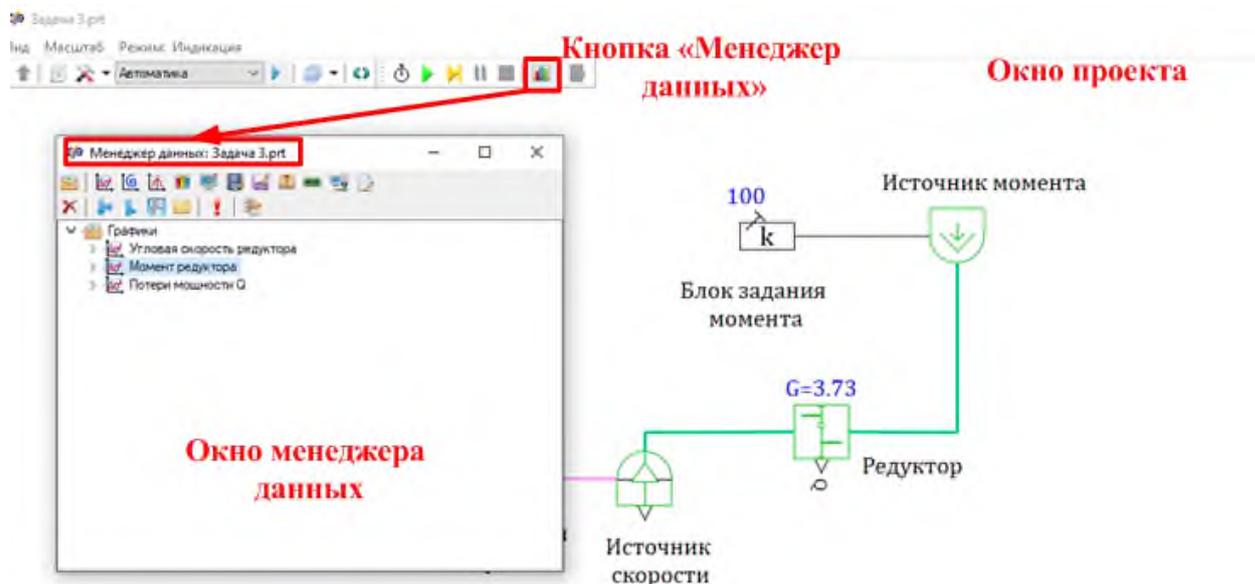


Рисунок 14 – Порядок доступа к «**Менеджеру данных**» окна проекта

Другим альтернативным вариантом добавления графиков в «**Менеджер данных**» является создание графиков из закладки «**Параметры**» как показано на рисунке 15.

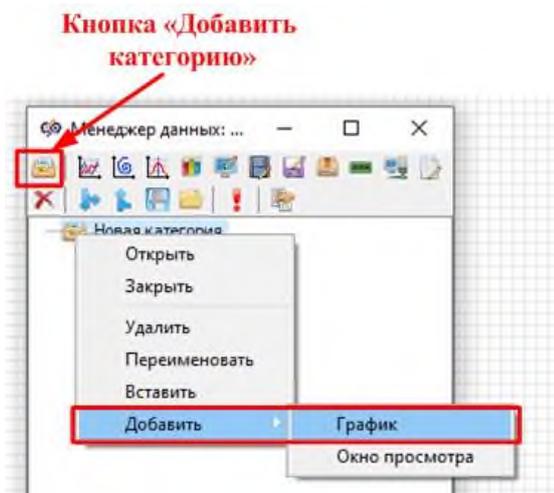


Рисунок 15 – Добавление графика в «**Менеджере данных**»

В «**Менеджере данных**» перечень графических зависимостей отображается в виде, представленном на рисунке 16. Названия окон, графиков и их свойства отредактированы в программе SimInTech.

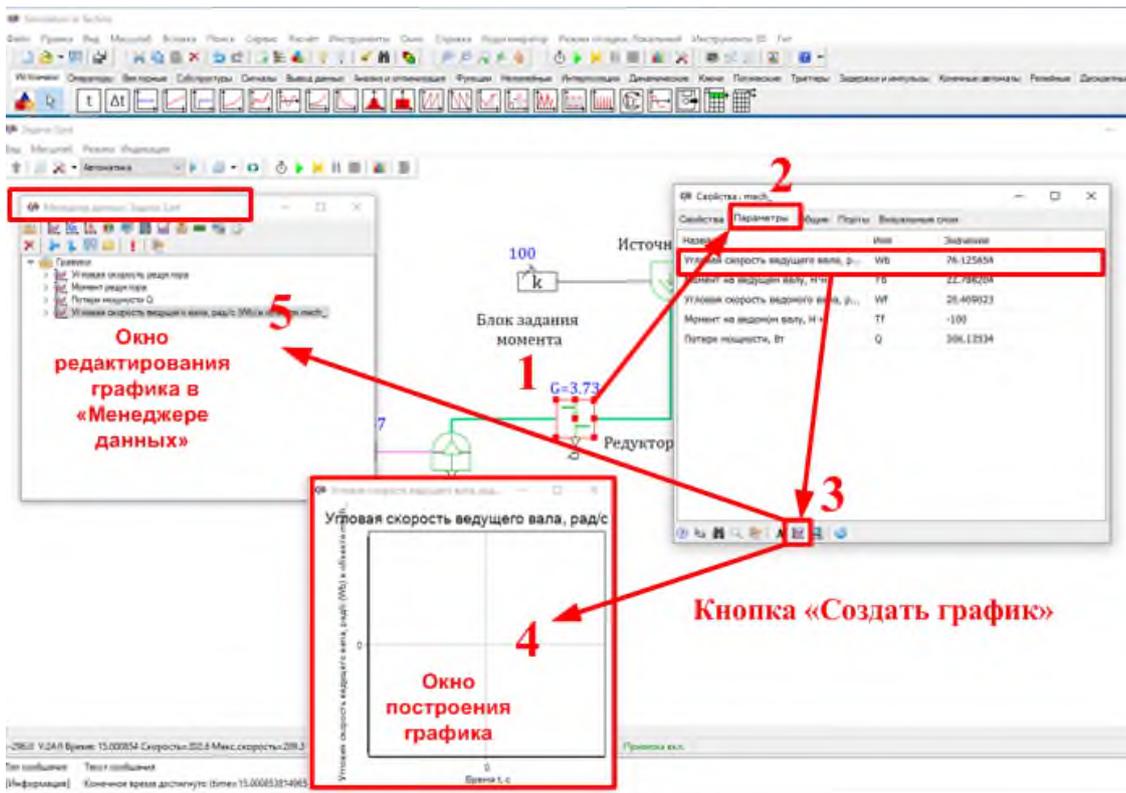


Рисунок 16 – Порядок добавления графиков в «Менеджер данных»

- 1) Выбрать блок на схеме, нажав правой кнопкой мыши.
- 2) В закладке «**Параметры**» выбрать величину, для которой необходимо построить график.
- 3) Нажать кнопку «**Создать график**» в нижней части окна.
- 4) Откроется «**Окно построения графика**». При повторном нажатии кнопки «Пуск» в окне отобразится график.
- 5) Одновременно в окне «**Менеджера данных**» а папке «**Графики**» появится наименование выбранного графика.

Графики и окна просмотра могут отображать значения свойств и параметров объектов.

В данном проекте добавлены графики угловой скорости, момента и потерь мощности одноступенчатого редуктора.

Графики можно просматривать по отдельности или нажав кнопку «Показать всё» в панели «Менеджера данных» открыть все сразу. Графики к задаче представлены на рисунках 17-19.

Скорость ведущего вала $W_b=76,125$ рад/с, а скорость ведомого вала $W_f=20,409$ рад/с. Соотношение скоростей соответствует заданному передаточному числу 3,73:

$$u = \frac{W_b}{W_f} = \frac{76,125}{20,409} = 3,7299 \cong 3,73.$$

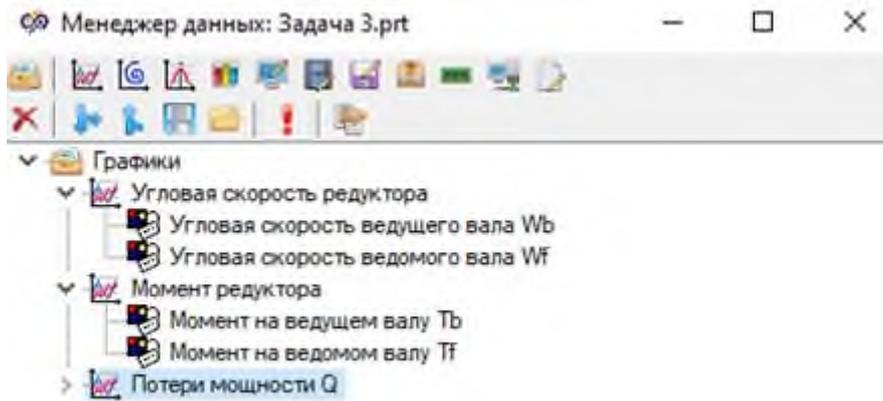


Рисунок 17 – Перечень отображаемых графиков в окне «Менеджер данных» к задаче 3

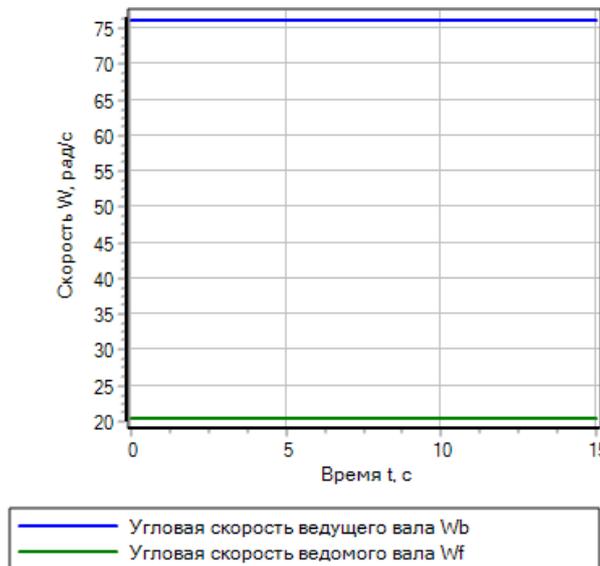


Рисунок 18 – График угловой скорости редуктора

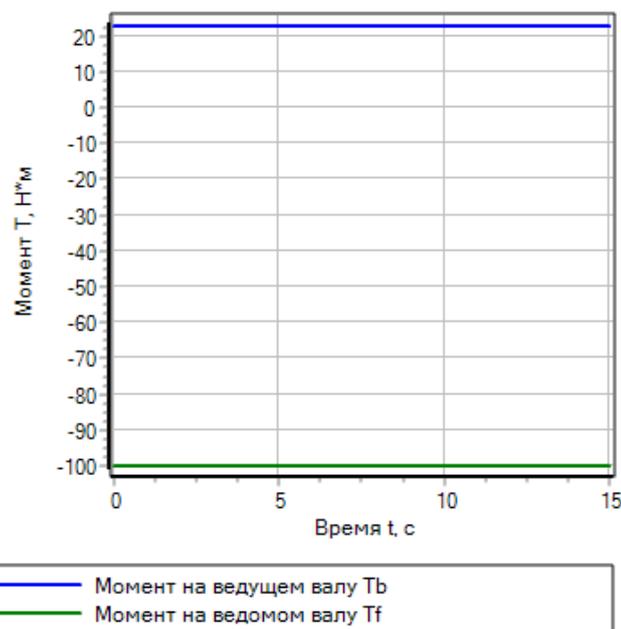


Рисунок 19 – График моментов редуктора

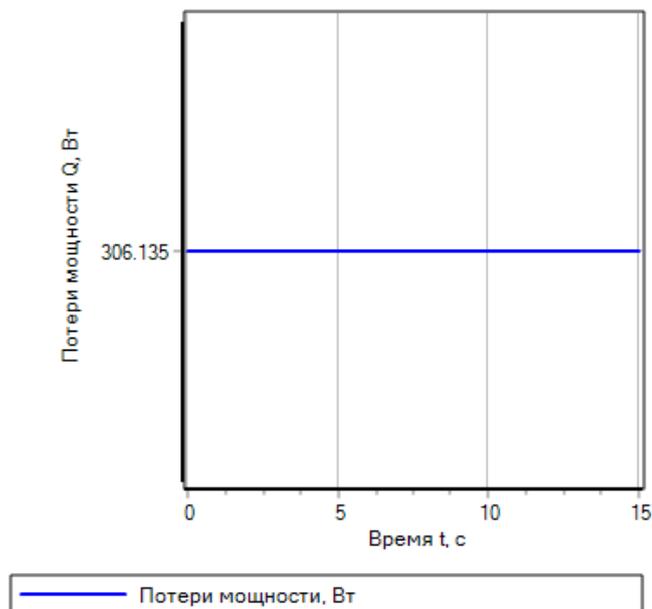


Рисунок 20 – График определения потерь мощности в редукторе

Графическая зависимость момента определяется в соответствии с «Блок-ком задания момента», где задан момент 100 Н·м.

$$T_b = \frac{T_f}{u} \cdot \eta = \frac{100}{3,73} \cdot 0,85 = 22,79 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таким образом, на ведомом валу момент будет больше в 3,73 раза с учетом КПД редуктора.

Потери мощности в редукторе расчетным путем определяются по формуле с учетом обозначений в программе:

$$Q = T_f \cdot W_f - T_b \cdot W_b = 100 \cdot 20,409 - 22,788 \cdot 76,1256 = 306,149 \text{ Вт}.$$

Как видно из анализа, расчеты и результаты моделирования полностью совпадают.

Задача 4

Проведите исследование подъемника с червячным редуктором. На выходном валу редуктора находится барабан на концах абсолютно жесткой веревки 1000 и 2000 кг.

Данные для исследования: Напряжение источника постоянного тока 220 В. Индуктивность в цепи постоянного тока $L=5 \cdot 10^{-5}$ Гн. Коэффициент усиления электромеханического преобразователя $k_{эмп} = 2 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

Параметры червячной передачи: тип модели неявный с постоянным КПД $\eta=0,74$; передаточной число 8; движение червяка и шестерни осуществляется в одну сторону.

Радиус барабана 0,15 м; момент инерции 0,8 кг·м².

$$B = 0,001 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$$

Коэффициенты трения подшипников

Инерция вращательного движения в системе 3 кг·м².

Недостающие данные принять самостоятельно.

Графические зависимости представить в «Менеджере данных».

Решение:

Схема исследования представлена на рисунке 21.

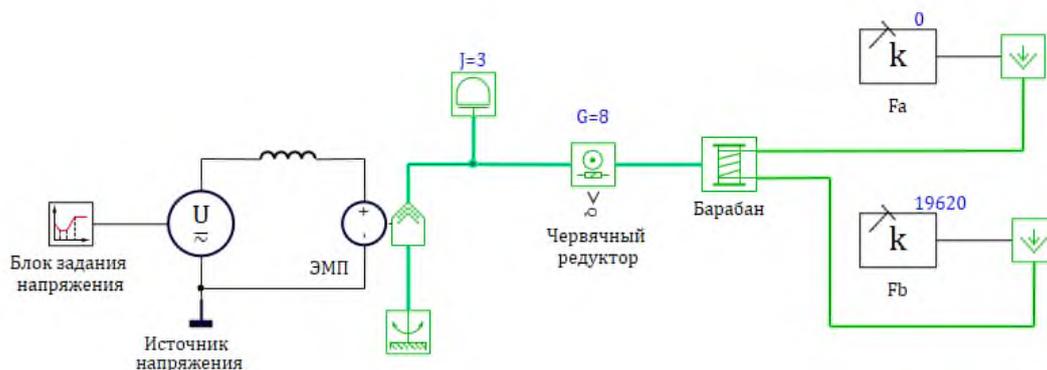


Рисунок 21 – Схема исследования к задаче 4

Напряжение на двигателе задано кусочно-линейной функцией в «Блоке задания напряжения» со свойствами в виде массивов данных:

время t в секундах [0, 2, 10, 12, 15];

значение функции u - напряжение U в вольтах [0, 220, 220, 0, 0].

График напряжения построен как зависимость Y от X , поскольку в «Блоке задания напряжения» нет закладки с параметрами и представлен на рисунке 22. На графике можно выделить этапы увеличения (уменьшения) напряжения с постоянным темпом и участок неизменного напряжения.

В «Блоке ЭМП» реализован электромеханический преобразователь вращательного движения, описываемый следующими уравнениями:

$$\begin{cases} M(t) = k \cdot I(t) \\ U(t) = k \cdot \omega(t) \end{cases} \quad (5)$$

где k – коэффициент усиления, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; для двигателя постоянного тока независимого возбуждения $k=k\phi=2$;

$M(t)$ – зависимость момента от времени, Н·м;

$I(t)$ – зависимость тока от времени, А;

$U(t)$ – зависимость напряжения от времени, В;

$\omega(t)$ – зависимость угловой скорости от времени, рад/с.

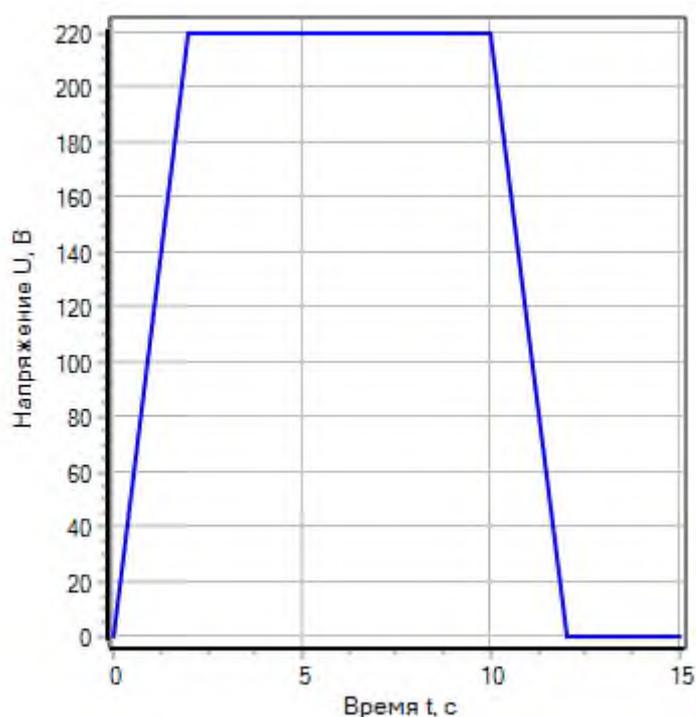


Рисунок 22 – Заданная кусочно-линейная функция в «Блоке задания напряжения»

Графики параметров «Блока ЭМП» представлены на рисунке 23.

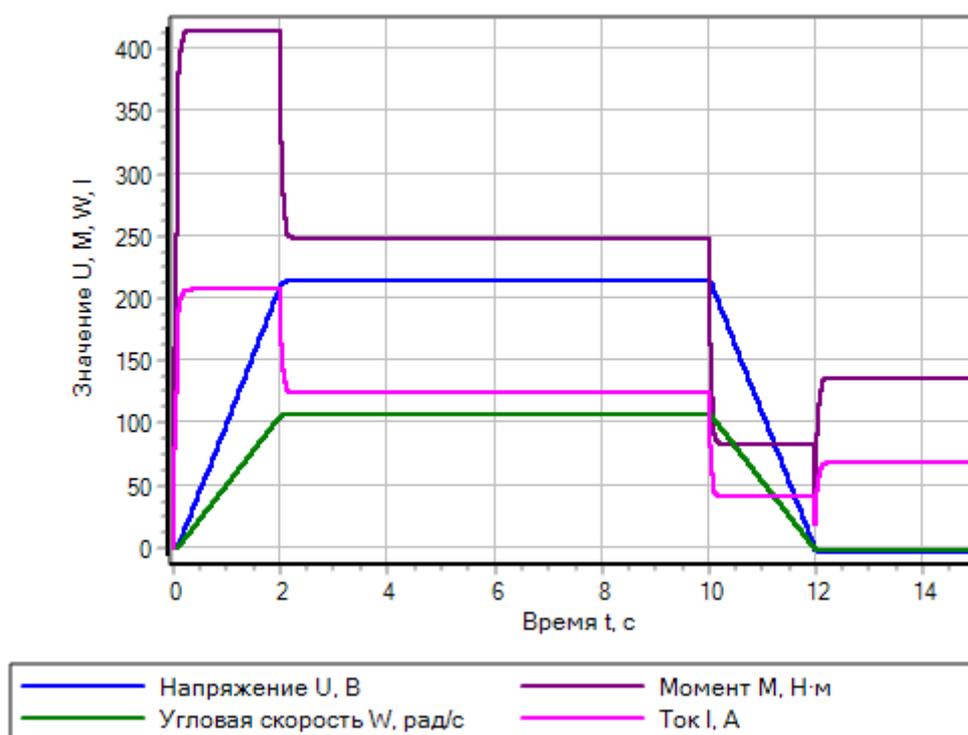


Рисунок 23 – Параметры «Блока ЭМП»

Графические зависимости соответствуют системе уравнений (5), а именно

зависимость момента от скорости $M(t)$ пропорциональна току $I(t)$, а зависимость напряжения $U(t)$ пропорциональна скорости $\omega(t)$. На этапе времени от 0 до 2 с пусковой режим, от 2 до 8 с – статический режим, и на этапе времени от 10 до 12 с тормозной режим.

Параметры редуктора: угловые скорости и моменты на червяке и шестерни и представлены на рисунках 24, 25.

Соотношение скоростей червяка и шестерни в статическом режиме соответствуют передаточному числу:

$$u = \frac{\omega_{\text{ч}}}{\omega_{\text{ш}}} = \frac{106,89}{13,361} = 8.$$

Характер переходного процесса экспоненциальный, что видно при значительном увеличении графиков, представленном на рисунке 23.

Аналогичный аperiodический характер можно наблюдать и при исследовании временных зависимостей моментов, представленных на рисунке 25.

Внешние силы на барабане, представленные на рисунке 26 определяются как

$$F_i = m_i \cdot g, \tag{6}$$

где m_i – масса груза на плече, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

$$F_a = m_a \cdot g = 1000 \cdot 9,81 = 9810 \text{ Н},$$

$$F_b = m_b \cdot g = 2000 \cdot 9,81 = 19620 \text{ Н}.$$

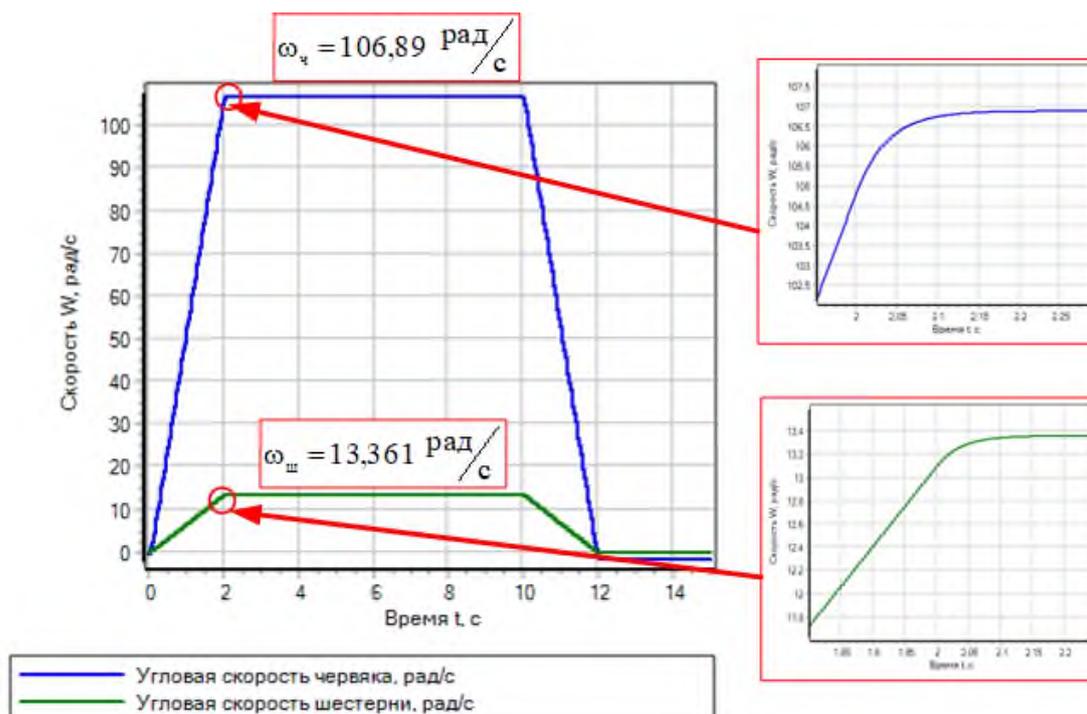


Рисунок 24 – Угловая скорость на валах червячного редуктора

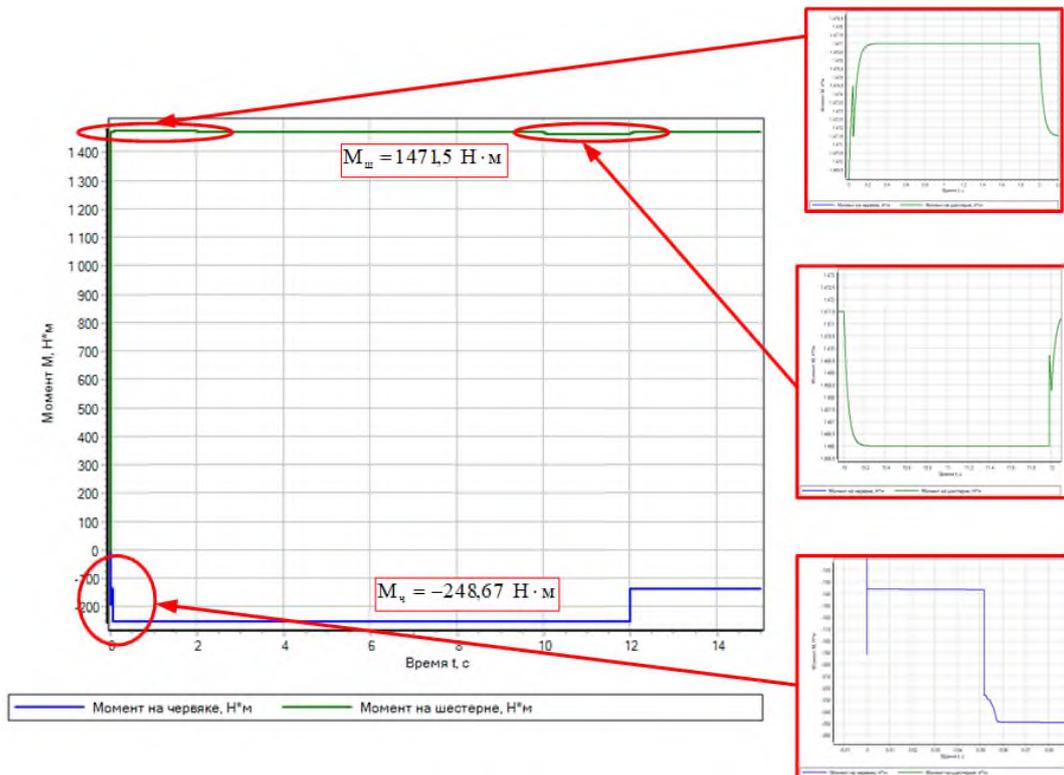


Рисунок 25 – Момент на валах червячного редуктора

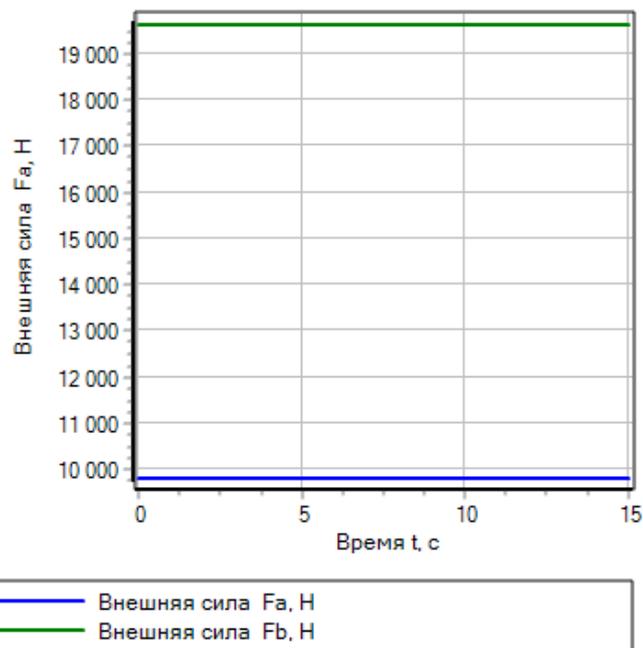


Рисунок 26 – Внешняя сила на веревках барабана

Кроме внешних сил, к параметрам блока «**Барабан**» относят угловую скорость и момент на валу барабана, а также скорость перемещения веревок представленные на рисунках 27 и 28.

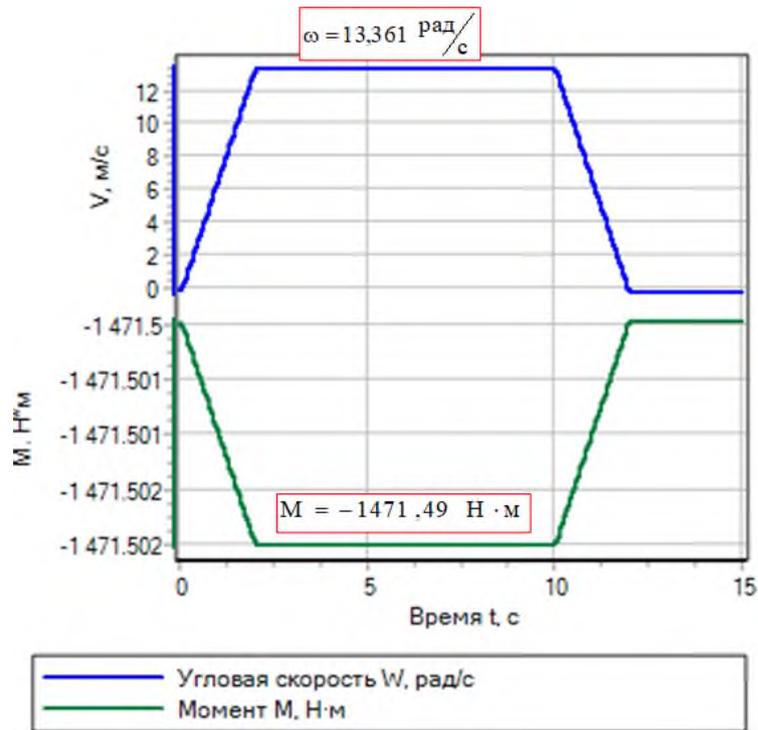


Рисунок 27 – Графики скорости и момента на барабане

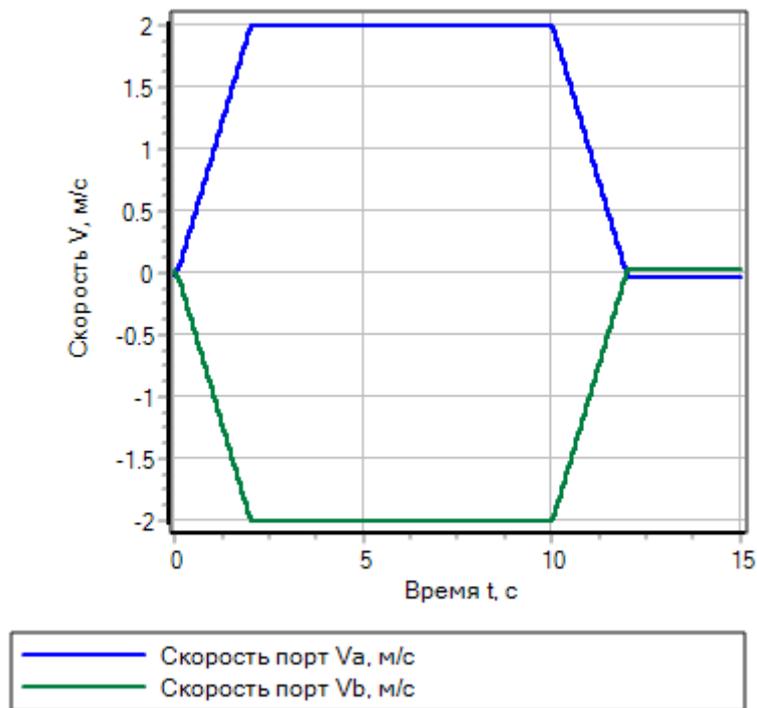


Рисунок 28 – Графики скорости перемещения грузов

Правильность моделирования можно проверить по значениям скорости. В установившемся режиме значение скорости согласно рисунка 23 $\omega_{\text{дв}} = 106,89$ рад/с. На выходном валу шестерни скорость согласно рисунка 24

составит $\omega_{ш} = 13,361 \text{ рад/с}$. Скорость вращения барабана согласно рисунка 26 также равна $\omega_6 = 13,361 \text{ рад/с}$.

Линейная скорость перемещения веревки определится как

$$V = \frac{\omega_6 \cdot D}{2} = \frac{13,361 \cdot 0,3}{2} = 2,004 \text{ м/с},$$

что соответствует числовым значениям, представленным на рисунке 27.

Задача 5

Проведите исследование механизма, состоящего из цепной передачи и ходового винта. На выходном валу находится тело, поступательно перемещающееся массой 875 кг. Система оснащена датчиком поступательного движения.

Данные для исследования:

Напряжение источника постоянного тока 220 В. Индуктивность в цепи постоянного тока $L = 1 \cdot 10^{-5}$ Гн. Коэффициент усиления электромеханического преобразователя $k_{эм} = 1,85 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

Напряжение на двигателе задано кусочно-линейной функцией в виде массивов данных:

время t , с [0, 1, 5, 6, 10, 12, 14, 16, 18];

напряжение U , В [0, 200, 200, 0, 0, -150, -150, 0, 0].

Параметры цепной передачи: радиус звездочки А $R_a = 0,15$ м, радиус звездочки В $R_b = 0,3$ м. Слабина цепи $S = 0,008$ м.

$$B = 1 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{с/м}.$$

Коэффициент демпфирования цепи

$$K = 1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}.$$

Коэффициент жесткости цепи

Максимальная сила натяжения $F_{\max} = 1 \cdot 10^8$ Н.

Коэффициенты трения подшипников звездочки А и В

$$B_a = B_b = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}.$$

Параметры ходового винта:

- тип модели неявная;
- движение винта и гайки одного знака;
- шаг винта $L_s = 0,08$ м;
- коэффициент трения винта $B_s = 0,0001 \text{ Н} \cdot \text{с/м}$;

- коэффициент трения гайки $B_n = 0,0001 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с} / \text{рад}$;
- КПД передачи энергии винт-гайка $E_{sn}=0,8$;
- КПД передачи энергии гайка-винт $E_{ns}=0,7$.

Инерция тел вращательного движения в системе $J_1=1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ и $J_2=2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Недостающие данные принять самостоятельно.

Графические зависимости представить в «**Менеджере данных**».

Решение:

Схема исследования представлена на рисунке 29.

График напряжения на двигателе построен как зависимость Y от X , представлен на рисунке 30. На графике можно выделить этапы увеличения (уменьшения) напряжения с постоянным темпом и участки неизменного напряжения.

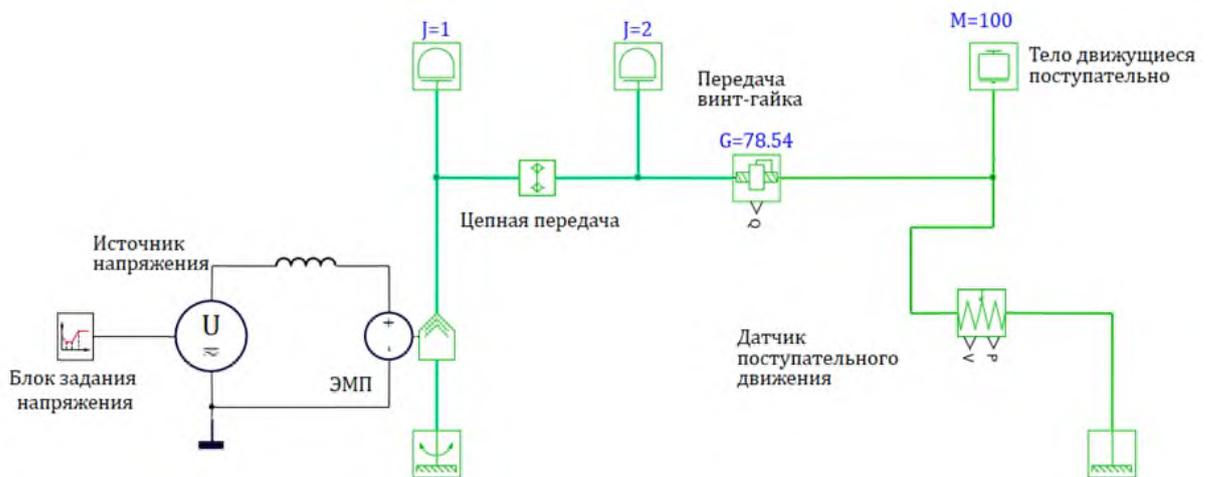


Рисунок 29 – Схема исследования к задаче 5

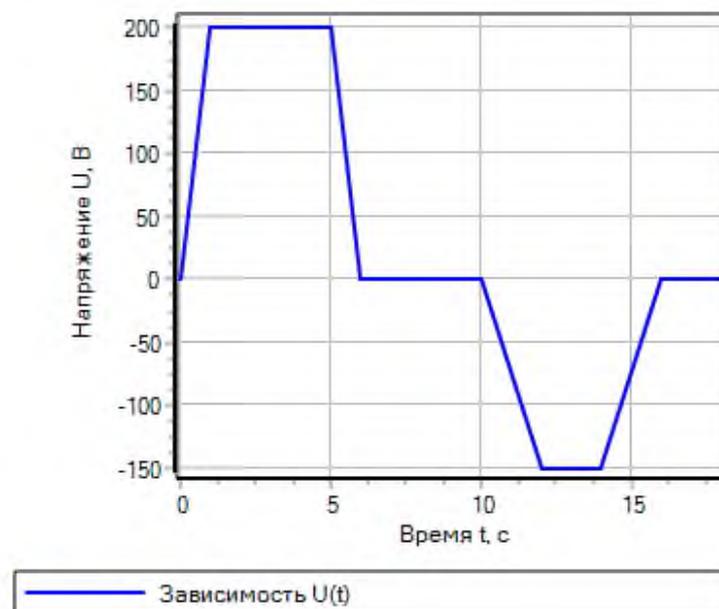


Рисунок 30 – Заданная кусочно-линейная функция в «**Блоке задания напряжения**»

В «Блоке ЭМП» реализован электромеханический преобразователь вращательного движения описывается системой уравнений (5).

Графические зависимости соответствуют системе уравнений (5), а именно зависимость напряжения $U(t)$ пропорциональна скорости $\omega(t)$, а зависимость момента от скорости $M(t)$ пропорциональна току $I(t)$.

На этапе времени от 0 до 1 с пусковой режим, от 1 с до 5 с – статический режим с положительным направлением вращения, и на этапе времени от 5 с до 6 с тормозной режим. Далее пауза в работе привода с 6 до 10 с. Затем идет разгон привода в другую сторону с 10 с до 12 с, работа в статическом режиме с 12 с до 14 с и торможение до 16 с.

Графики параметров электромеханического преобразователя представлены на рисунках 31 и 32.

В процессе нарастания напряжения выделены два участка: до 1 с напряжение нарастает линейно и это определяется «Блоком задания напряжения», а далее напряжение на электромеханическом преобразователе нарастает по экспоненциальному закону. Аналогичную картину мы наблюдаем и на графике нарастания скорости.

Соотношение между напряжением и скоростью определится как

$$k \cdot \phi = \frac{U}{\omega} = \frac{196,37}{106,14} = 1,85 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

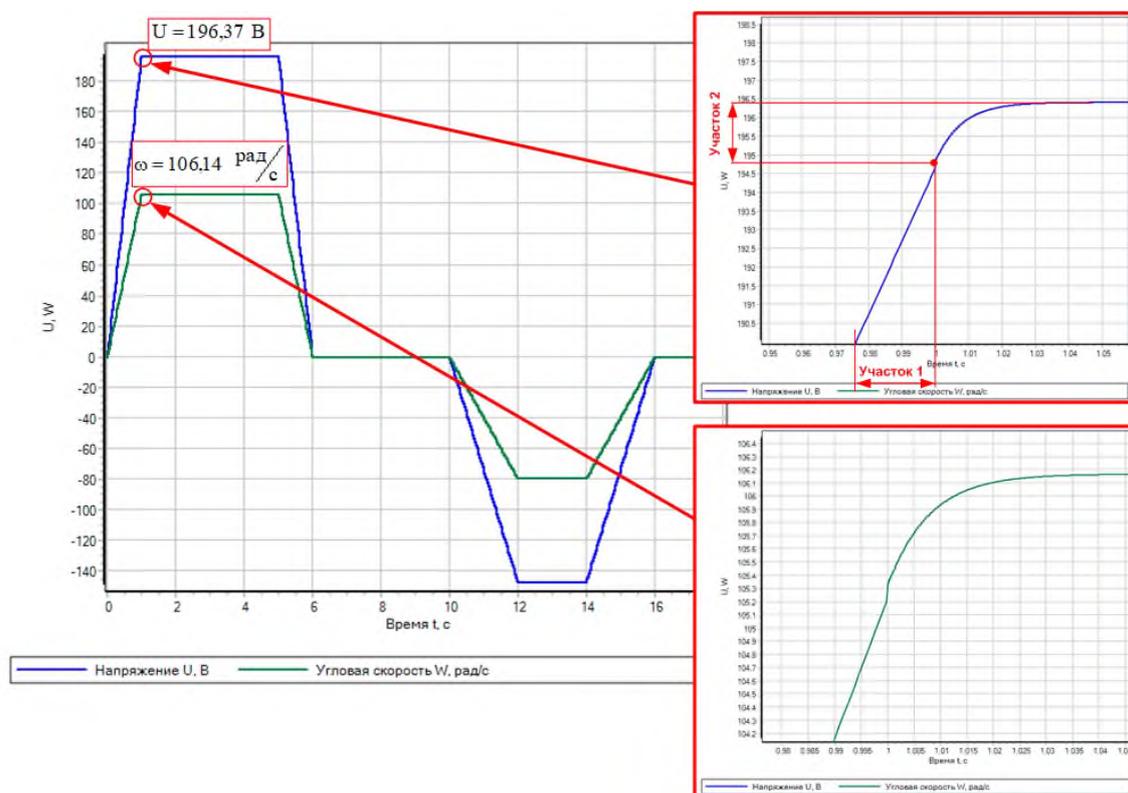


Рисунок 31 – Зависимости напряжения и скорости от времени «Блока ЭМП»

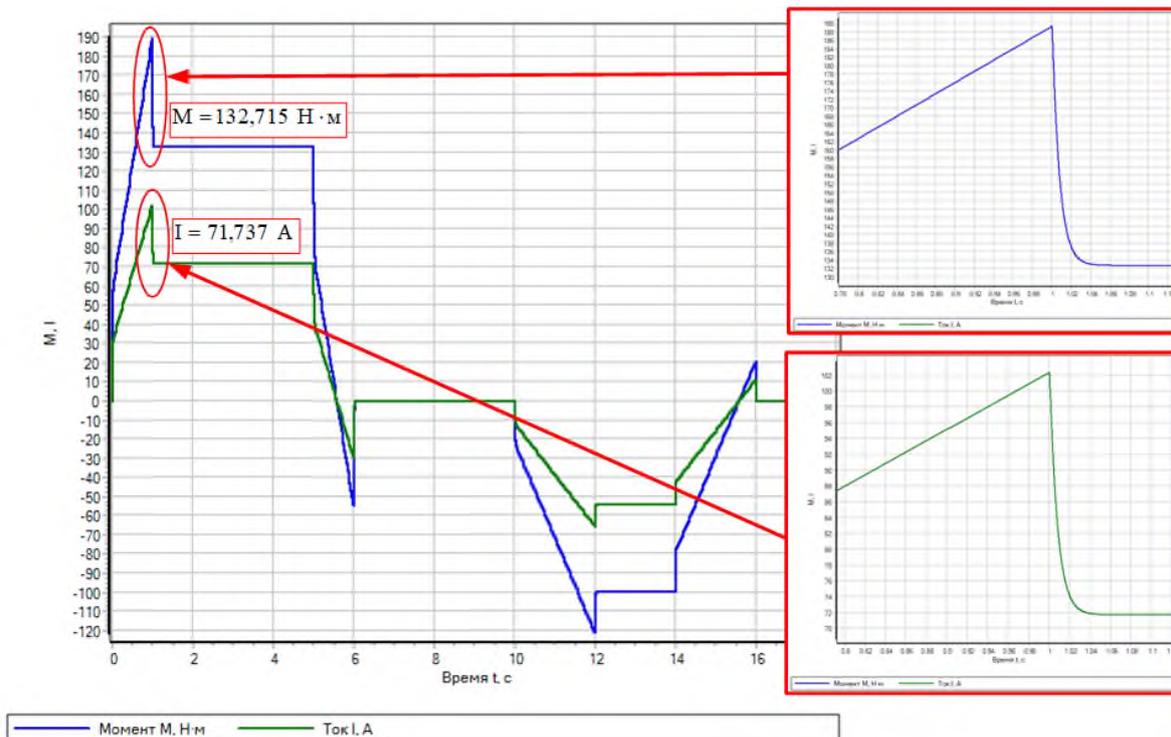


Рисунок 32 – Зависимости тока и момента от времени «Блока ЭМП»

Процессы нарастания момента и тока пропорциональные и их также можно разделить на два участка: с линейным нарастанием и экспоненциальным нарастанием момента и тока.

Соотношение между моментом и током определится как

$$k \cdot \phi = \frac{M}{I} = \frac{132,715}{71,737} = 1,85 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}}.$$

Параметры цепной передачи: угловые скорости и моменты звездочки А и звездочки В представлены на рисунках 32, 33. Соотношение скоростей звездочек А и В в статическом режиме соответствуют передаточному числу:

$$u = \frac{\omega_a}{\omega_b} = \frac{106,169}{53,084} = 2.$$

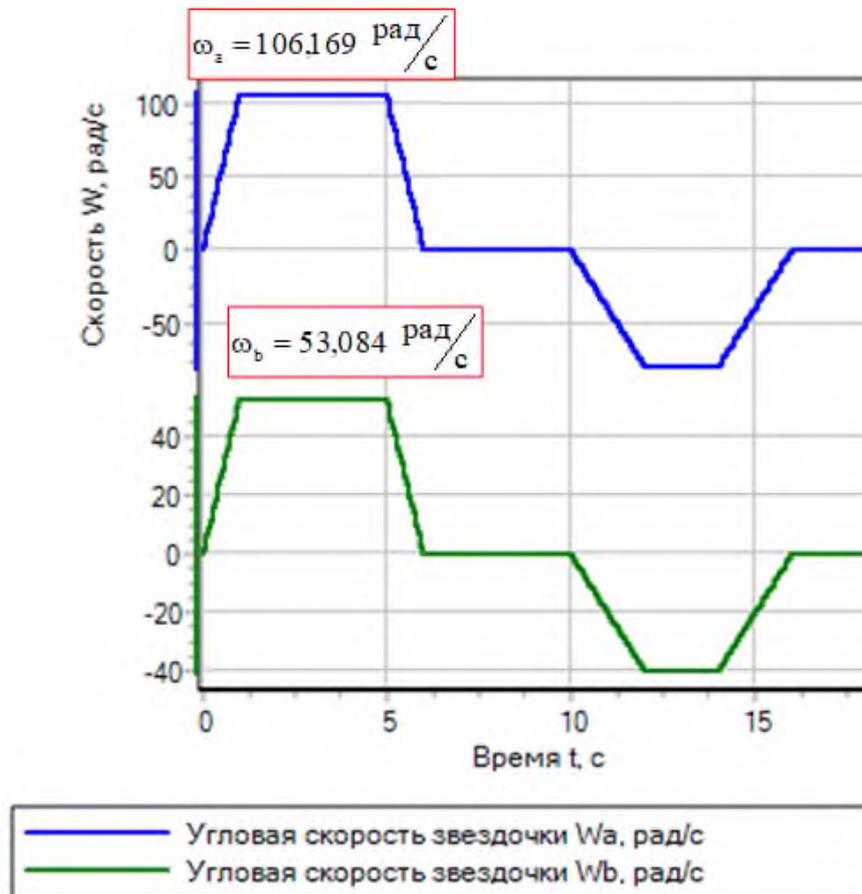


Рисунок 33 – Угловые скорости звездочек А и В

Задача 6

Составьте модель исследования статических нагрузок, величины которого меняется равномерным образом в заданном диапазоне. Момент статической нагрузки изменяется в диапазоне $-0,25 \div 2,5$ о.е. скорость рабочих машин изменяется в диапазоне $-100 \div 100$ о.е. Построить график статической мощности и выделить участки, на которых электропривод работает с нагрузкой выше номинальной.

Решение:

Схема моделирования статических нагрузок представлена на рисунке 34.

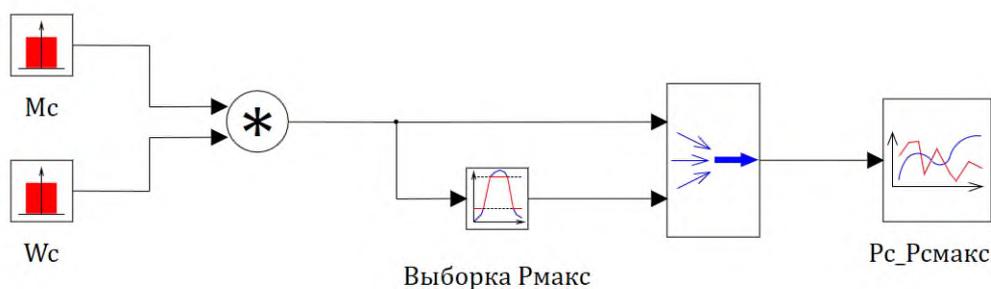


Рисунок 34 – Схема моделирования к задаче 6

Моделирование статических нагрузок и скорости рабочих машин выполнено на основе блока, который генерирует псевдослучайную последовательность в диапазоне от минимального до максимального значения.

Свойства блока «**Равномерный шум**» для момента статического M_c имеют значения, представленные на рисунке

Название	Имя	Формула	Значение
Минимальное значение	xmin		[0.25]
Максимальное значение	xmax		[2.5]
Период квантования	qt		[1]

Рисунок 35 – Свойства блока «**Равномерный шум**»

Для выделения значений статической мощности с нагрузкой выше номинального значения используется блок «**Ограничитель**» с минимальным значением входа 100 и максимальным значением 250.

Графики статической мощности представлены на рисунке 35.

Анализируя графики можно сделать вывод, что результаты моделирования достигнуты.



Рисунок 36 – Графики статической мощности

2 Моделирование электрических машин

Задача 7

Составить модель двигателя постоянного тока ДП-21, если двигатель имеет следующие параметры: $P_{\text{ном}}=5,5$ кВт; $U_{\text{ном}}=220$ В; $I_{\text{яном}}=31$ А; $R_{\text{ясум}}=0,531$ Ом; $n_{\text{ном}}=1460$ об/мин; число активных проводников якоря $N=690$; $I_{\text{вном}}=1,24$ А; $R_{\text{ов}}=128$ Ом; число активных проводников параллельной обмотки $N_{\text{пар}}=1650$; число параллельных ветвей якоря $2a=2$; число пар полюсов $2p=4$; магнитный поток $\Phi=5,8$ мВб; $J=0,125$ кг·м².

Напряжение обмотки возбуждения задано кусочно-линейной функцией в виде массивов данных:

время t , с [0, 1, 15];

напряжение U , В [0, 220, 220].

Напряжение якоря задано кусочно-линейной функцией в виде массивов данных:

время t , с [0, 5, 5,3, 15];

напряжение U , В [0, 0, 220, 220].

Графические зависимости представить в «Менеджере данных».

Решение:

Схема моделирования двигателя постоянного тока из библиотеки ЭЦ-Динамика представлена на рисунке 37.

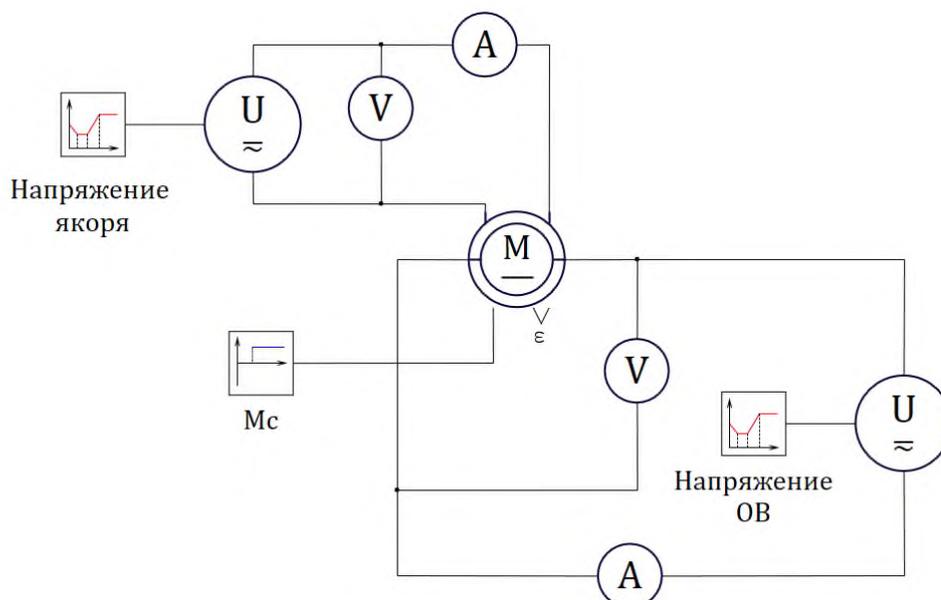


Рисунок 37 – Модель двигателя постоянного тока к задаче 7

Ввод данных в блок «**Двигатель постоянного тока**» требует определения параметров двигателя.

Номинальная угловая скорость в системе СИ:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \frac{n_{\text{НОМ}}}{9,55} = \frac{1460}{9,55} = 152,88 \text{ рад/с.}$$

Индуктивность якорной цепи по формуле:

$$L_{\text{я}} = \frac{0,45 \cdot U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{яНОМ}} \cdot \omega_{\text{НОМ}} \cdot p}, \quad (7)$$

$$L_{\text{я}} = \frac{0,45 \cdot 220}{31 \cdot 152,2 \cdot 2} = 0,0105 \text{ Гн.}$$

Индуктивность цепи возбуждения при работе на линейной части кривой намагничивания:

$$L_{\text{в}} = 2 \cdot p_{\text{п}} \cdot W_{\text{в}} \cdot \frac{\Phi_{\text{НОМ}}}{I_{\text{вНОМ}}}, \quad (8)$$

$$L_{\text{в}} = 2 \cdot 2 \cdot 1650 \cdot \frac{5,8 \cdot 10^{-3}}{1,24} = 30,87 \text{ Гн.}$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{\omega_{\text{НОМ}}} = \frac{5,5 \cdot 10^3}{152,88} = 35,98 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Коэффициент связи обмоток определяется по формуле:

$$k_{\text{яв}} = \frac{M_{\text{НОМ}}}{I_{\text{яНОМ}} \cdot I_{\text{вНОМ}}} = \frac{35,98}{31 \cdot 1,24} = 0,936.$$

Свойства блока «**Двигатель постоянного тока**» представлены на рисунке 38. График напряжения обмоток возбуждения и якоря двигателя, построенные как зависимости Y от X, представлены на рисунке 39.

Свойства : DCM1

Название	Имя	Формула	Значение
Номинальные			
Тип	TYPE		ДП-21
Номинальная мощность, Вт	Pnom		5500
Номинальное напряжение обмотки якоря, В	Unoma		220
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	Unomf		220
Номинальная частота вращения, об/мин	Nnom		1460
Момент инерции, кгм ²	J		0.125
Доля механических потерь, %	Plos		13
Схема замещения			
Параметры обмотки якоря [Lя, Rя], [Гн, Ом]	Za		[0.0104 , 0.531]
Параметры обмотки возбуждения [Lв, Rв], [Гн, Ом]	Zf		[30.87 , 128]
Коэффициент связи обмоток	Kaf		0.936
Начальные условия			
Дополнительные параметры			

Рисунок 38 – Свойства блока «Двигатель постоянного тока» к задаче 7

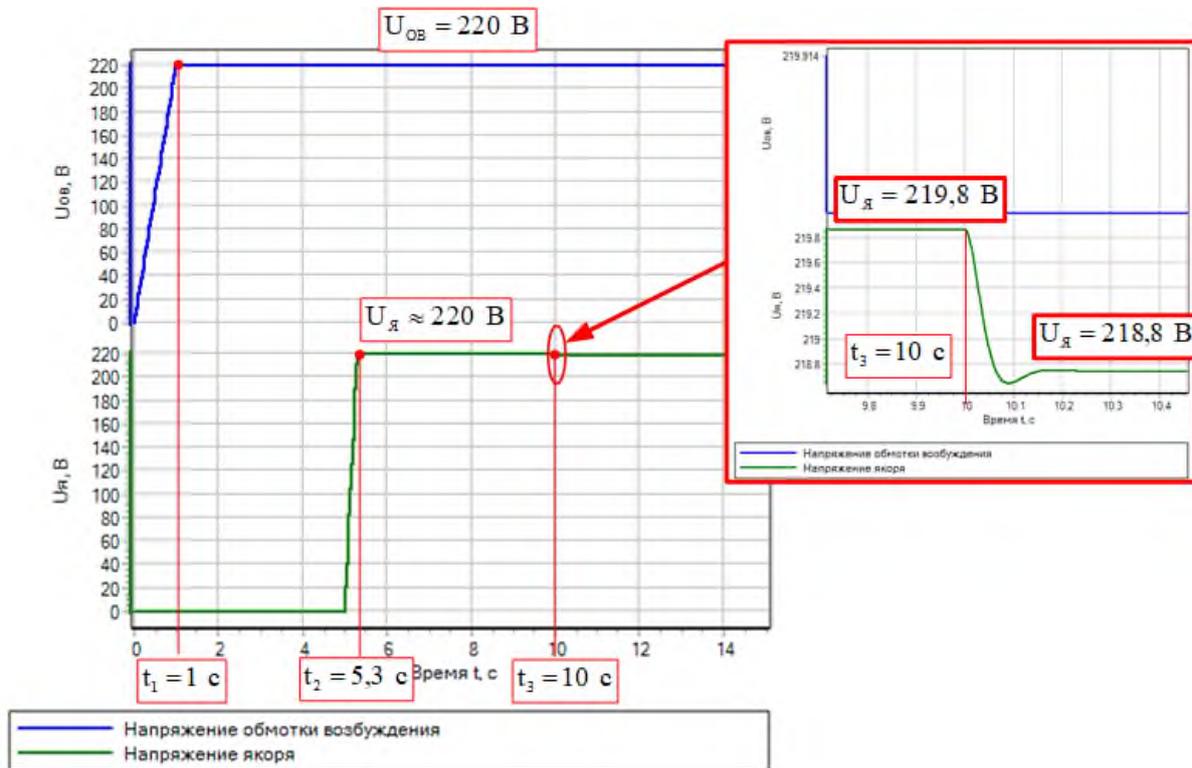


Рисунок 39 – График напряжения обмоток возбуждения и якоря двигателя

На графике виден порядок подачи напряжения на двигатель постоянного тока. Первоначально подается напряжение на обмотку возбуждения, а потом через 5 с подается напряжение на якорь. Время нарастания напряжения на якоре $t_2=5,3$ с. Время нарастания напряжения в обмотке возбуждения $t_1=1$ с и в якорной обмотке 0,3 с заданы в блоках «Напряжение якоря» и «Напряжение ОВ». В момент времени $t_3=10$ с подается статический момент, равный номинальному моменту $M_{ном}=35,98$ Н·м и напряжение на якоре уменьшается до значений $U_{я}=218,8$ В.

Графики токов обмоток возбуждения и якоря двигателя, снятые с амперметров, представлены на рисунке 40.

В момент времени $t_1=1$ с напряжение на обмотке возбуждения уже достигло установившегося значения $U_{об}=220$ В (рисунок 39), а ток в обмотке возбуждения не достиг установившегося значения $I_{об}=2,746$ А (рисунок 40). Это объясняется наличием значительной индуктивности в обмотке возбуждения двигателя.

В момент времени 5 с после подачи напряжения на якорную обмотку начинается нарастать ток якоря. Время нарастания напряжения 5,3 с, а время нарастания тока якорной обмотки не намного больше этого времени, примерно 5,4 с, что определяется малой индуктивностью в якорной цепи.

В момент времени 10 с подается статический момент и ток якоря меняет свое значение от $I_{xx}=2,746$ А до $I_c=25,041$ А, соответствующего номинальной нагрузке двигателя.

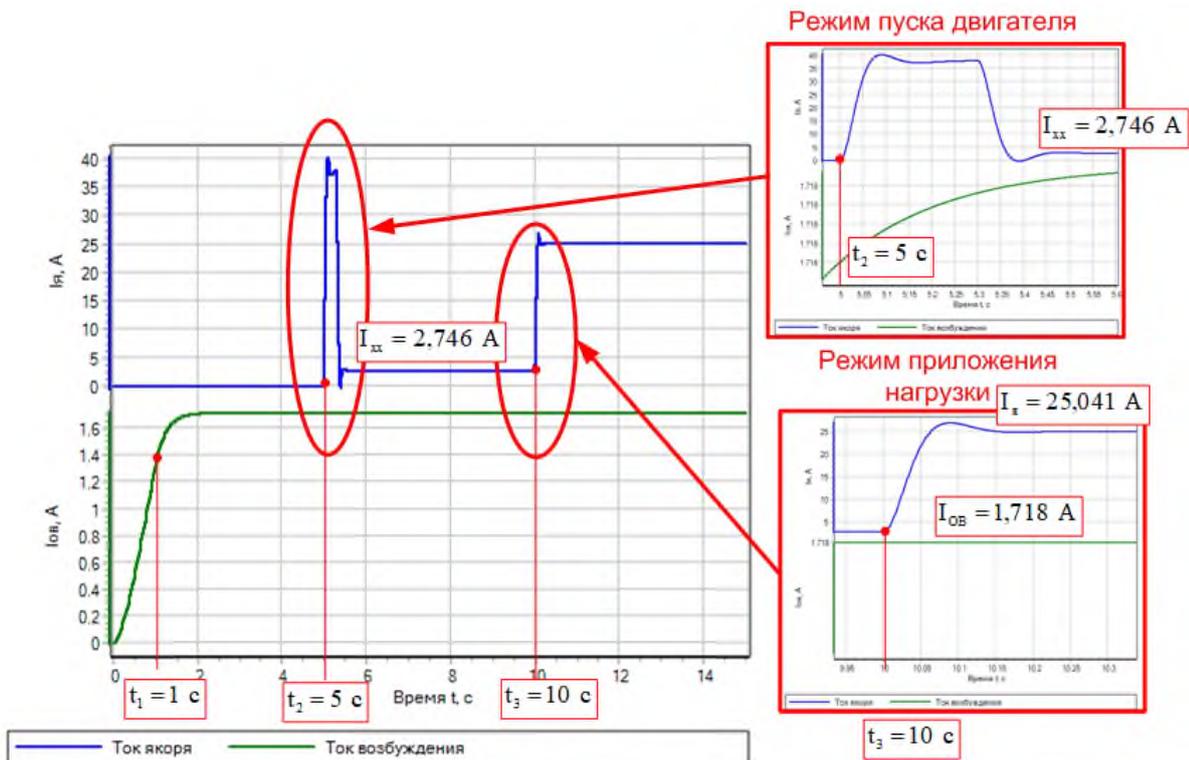


Рисунок 40 – Графики токов обмоток возбуждения и якоря двигателя

График скорости представлен на рисунке 41.

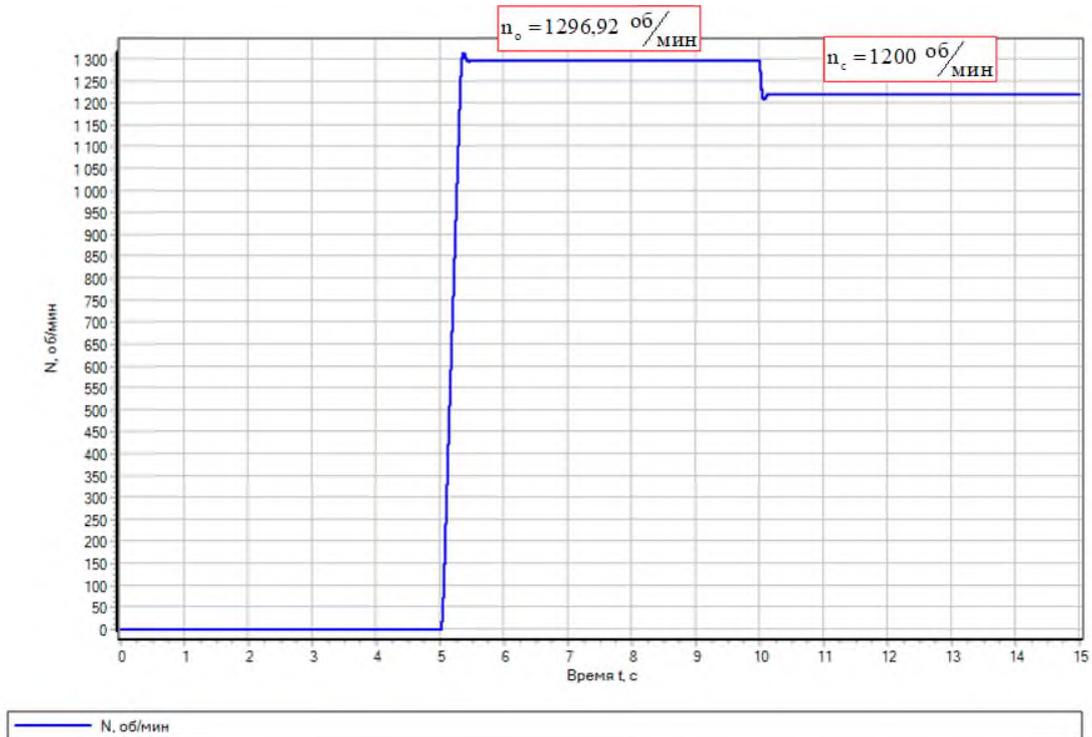


Рисунок 41 – График скорости

Коэффициент, связывающий ЭДС двигателя и скорость:

$$k \cdot \phi = \frac{U_{\text{яном}} - I_{\text{яном}} \cdot R_{\text{я}}}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (9)$$

$$k \cdot \phi = \frac{220 - 31 \cdot 0,531}{152,88} = 1,33 \text{ В} \cdot \text{с}.$$

Скорость холостого хода в рад/с расчетная:

$$\omega_o = \frac{U_{\text{яном}}}{k \cdot \phi} = \frac{220}{1,33} = 165,41 \text{ рад/с}.$$

Скорость холостого хода в об/мин:

$$n_o = \omega_o \cdot 9,55 = 165,41 \cdot 9,55 = 1579,66 \text{ об/мин}.$$

Мы видим расхождения с результатами моделирования на рисунке 41.

Если мы посчитаем статическую скорость при номинальной нагрузке с учетом результатов моделирования:

$$n_c = n_o - \frac{M_{\text{ном}} \cdot R_{\text{я}}}{(k \cdot \phi)^2}, \quad (10)$$

$$n_c = 1296,92 - \frac{35,98 \cdot 0,531}{(1,33)^2} = 1286,12 \text{ об/мин},$$

то увидим, что разница в расчетах и результатах моделирования меньше.

Задача 8

Составить модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения с учетом обмотки возбуждения.

Двигатель имеет следующие параметры: $P_{\text{ном}}=135$ кВт; $U_{\text{яном}}=220$ В; $I_{\text{яном}}=670$ А; $R_{\text{ясум}}=0,00745$ Ом; $U_{\text{вном}}=220$ В; $I_{\text{вном}}=6,3$ А; $R_{\text{в}}=24,4$ Ом; $n_{\text{ном}}=470$ об/мин; число активных проводников якоря $N_{\text{я}}=480$; $2a=2$; $2p=8$; число витков полюса параллельной обмотки $W_{\text{в}}=1100$ вит.; магнитный поток $\Phi=11,3$ мВб; $J_{\text{дв}}=32,5$ кг·м².

Решение:

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения имеет два канала управления – канал управления по цепи якоря и канал управления по цепи обмотки возбуждения.

Структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения с учетом обмотки возбуждения представлена на рисунке 42.

Для построения структурной схемы необходимо произвести расчет нижеприведенных параметров двигателя.

Коэффициент, связывающий ЭДС двигателя и скорость:

$$k \cdot \Phi = \frac{U_{\text{яном}} - I_{\text{яном}} R_{\text{я}}}{\omega_{\text{ном}}} \quad (11)$$

Индуктивность якорной цепи:

$$L_{\text{я}} = \frac{0,45 \cdot U_{\text{ном}}}{I_{\text{яном}} \cdot \omega_{\text{ном}} \cdot p} \quad (12)$$

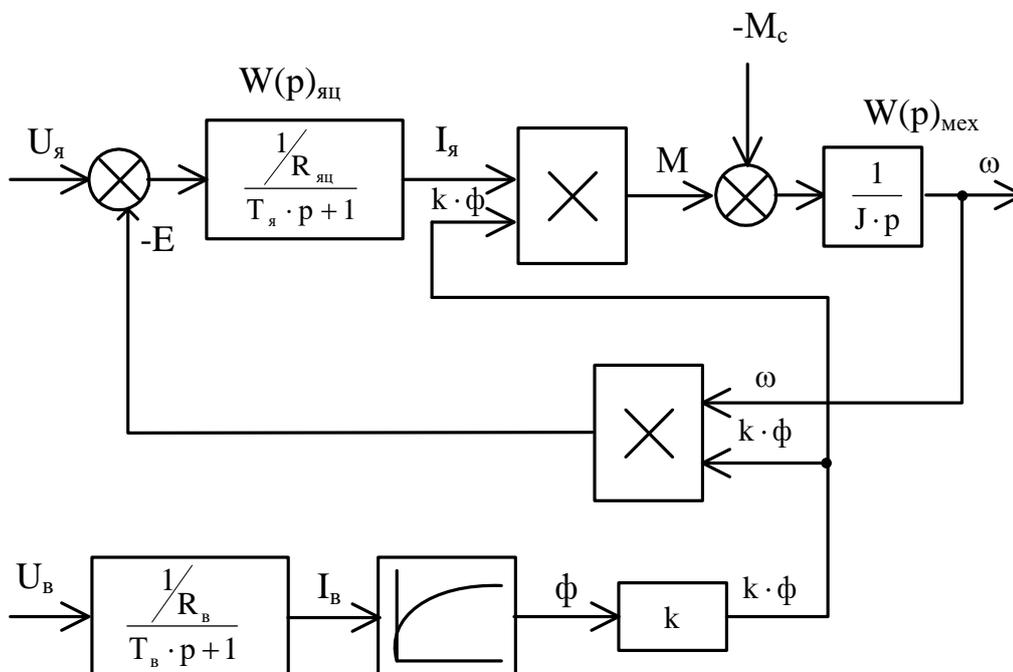


Рисунок 42 – Структурная схема ДПТ НВ с учетом обмотки возбуждения

Электромагнитная постоянная времени якоря:

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \quad (13)$$

Индуктивность цепи возбуждения при работе на линейной части кривой намагничивания:

$$L_{\text{в}} = 2 \cdot p_{\text{п}} \cdot W_{\text{в}} \cdot \frac{\Phi_{\text{ном}}}{I_{\text{вном}}} \quad (14)$$

Электромагнитная постоянная времени обмотки возбуждения:

$$T_{\text{в}} = \frac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} \quad (15)$$

Электрохимическая постоянная времени определяется по формуле:

$$T_m = \frac{J \cdot R_{я}}{(\kappa\phi)^2} \quad (16)$$

Механическая постоянная определится:

$$k_m = \frac{P_{п} \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (17)$$

Расчет параметров выполнен в скрипте. Окно редактирования доступно по нажатию кнопки «Скрипт» на панели редактирования схемы. Текст программы выполнен цветным, что видно на рисунке 43. Так комментарии выполнены зеленым цветом, имена переменных – черным, а числовые значения – синим цветом.



Рисунок 43 – Окно «Скрипта» с текстом программы и результатами выполнения

Программа для расчета параметров к задаче выглядит следующим образом:

```

//Параметры двигателя постоянного тока
// Номинальное напряжения якоря, обмотки возбуждения, В
U=220;
// Номинальная мощность, кВт
P=135*10^3;

```

```

// Номинальная скорость вращения, об/мин
N=470;
w=N/9.55;
// Номинальный ток якоря, А
Ij=670;
// Сопротивления якорной цепи, Ом
Rj=0.00745;
// Сопротивления обмотки возбуждения, Ом
Rv=24.4;
// Момент инерции, кг*м^2
J=32.5;
// Число активных проводников якоря
N=480;
// Число параллельных ветвей якоря
a=4;
// Число витков полюса параллельной обмотки
Wv=1100;
// Магнитный поток полюса, Вб
f=113*10^(-3);
// Номинальный ток возбуждения, А
Iv=6.3;
// Индуктивность якорной цепи, Гн
Lj=0.45*U/(w*Ij*a);
// Коэффициент, связывающий скорость и ЭДС, В*с
kf=(U-Ij*Rj)/w;
// Электромагнитная постоянная привода, с
Tj=Lj/Rj;
// Электромеханическая постоянная времени, с
Tm=J*Rj/(kf^2);
// Индуктивность обмотки возбуждения, Гн
Lv=2*a*Wv*f/Iv;
// Электромагнитная постоянная обмотки возбуждения, с
Tv=Lv/Rv;
// Механическая постоянная
Km=2*N/2/pi/a;
// Статический момент на валу номинальный, Н*м
M=P/w;
// Отношение fnom/Ivnom
fnom_Ivnom=f/Iv;

```

Рассчитанные данные отражены в окне скрипта и заносятся в свойства блоков модели, представленной на рисунке 44.

Буквенные обозначения в блоках соответствуют схеме на рисунке 42 и программе. Так для якорной цепи обозначения коэффициента усиления и постоянной времени в свойствах блока представлены на рисунке 45.

Временные диаграммы напряжений обмотки возбуждения и якоря представленные на рисунке 46 демонстрируют, как необходимо правильно запускать двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Первоначально в момент времени $t_1=1$ с напряжение подается на обмотку возбуждения, а напряжение на якорь подают в момент времени $t_2=35$ с.

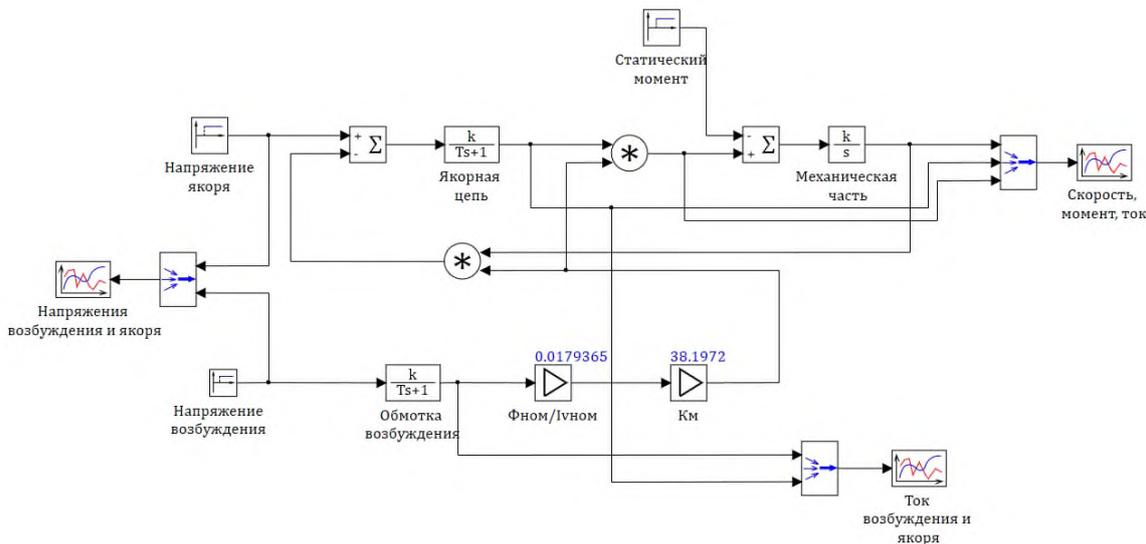


Рисунок 44 – Схема модели двигателя постоянного тока

Свойства : Aperiodika6

Свойства	Параметры	Общие	Порты	Визуальные слои
Название	Имя	Формула	Значение	
Начальные условия	x0		[0]	
Коэффициенты усиления	k	1/Rj	[134.22819]	
Постоянные времени	T	Tj	[0.10075106]	

Рисунок 45 – Свойства блока «Якорная цепь»

Временные диаграммы токов обмотки возбуждения и якоря представлены на рисунке 47. Ток в обмотке возбуждения нарастает по экспоненциальному закону. Ток в якорной цепи изменяется по колебательному закону, так как

Отношение постоянных времени электропривода равно:

$$m = \frac{T_m}{T_j} = \frac{0,0126}{0,1} = 0,126.$$

При $m < 4$ электропривод представляет собой колебательное звено с коэффициентом затухания:

$$\xi = \frac{T_m}{2 \cdot \sqrt{T_j \cdot T_m}} = \frac{0,0126}{2 \cdot \sqrt{0,1 \cdot 0,0126}} = 0,177.$$

Наличие колебаний в системе наглядно демонстрируют временные зависимости на рисунке 47.

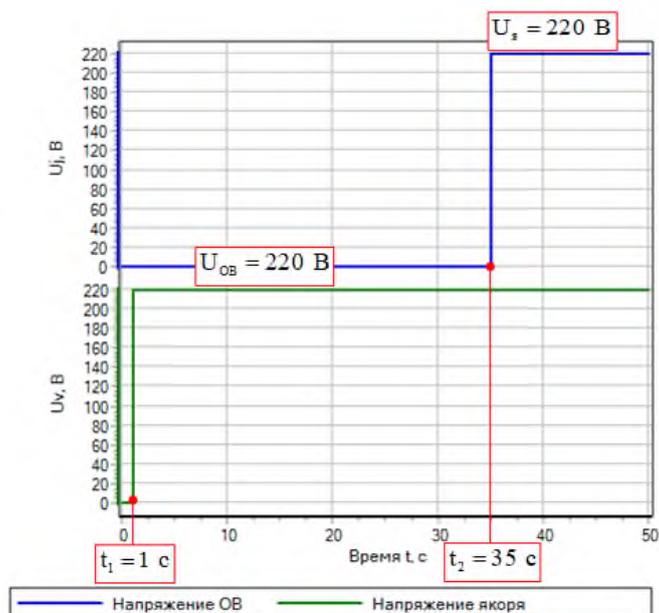


Рисунок 46 – Временные диаграммы напряжений обмотки возбуждения и якоря

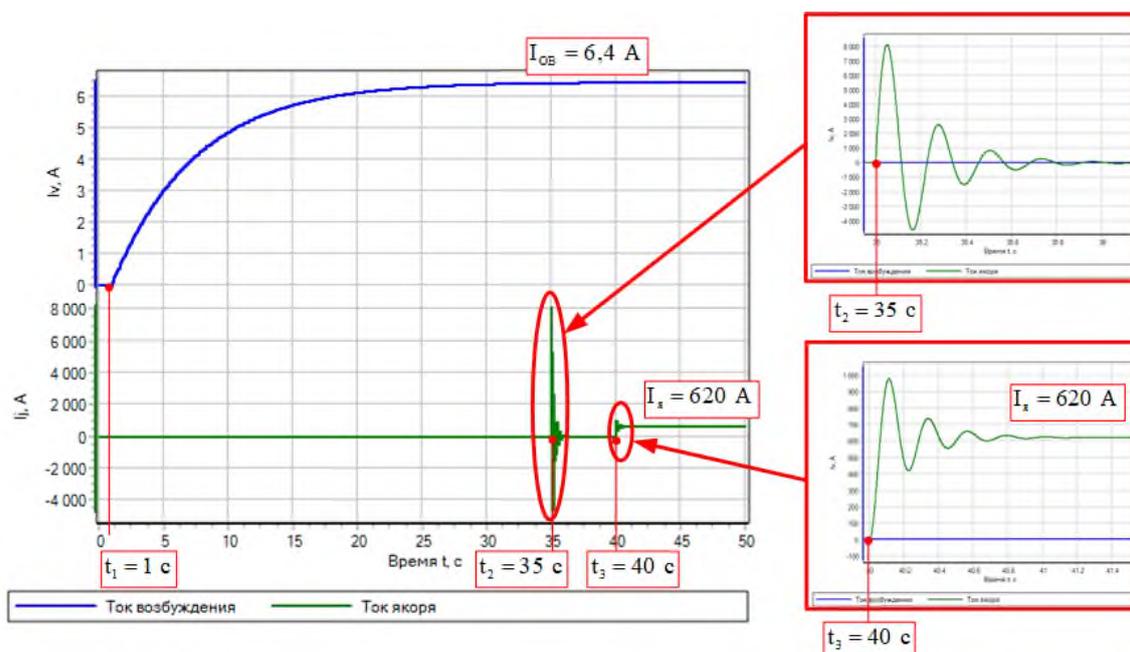


Рисунок 47 – Временные диаграммы токов обмотки возбуждения и якоря

Временные диаграммы ω , I_j , M представлены на рисунке 48.

Правильность моделирования проверим по значению статической скорости по формуле:

$$\omega_c = \omega_o - \frac{M_{\text{ном}} \cdot R_{\text{я}}}{(k \cdot \Phi)^2}, \quad (18)$$

$$\omega_c = 50,05 - \frac{2742,73 \cdot 0,00745}{(4,36)^2} = 48,98 \text{ рад/с}.$$

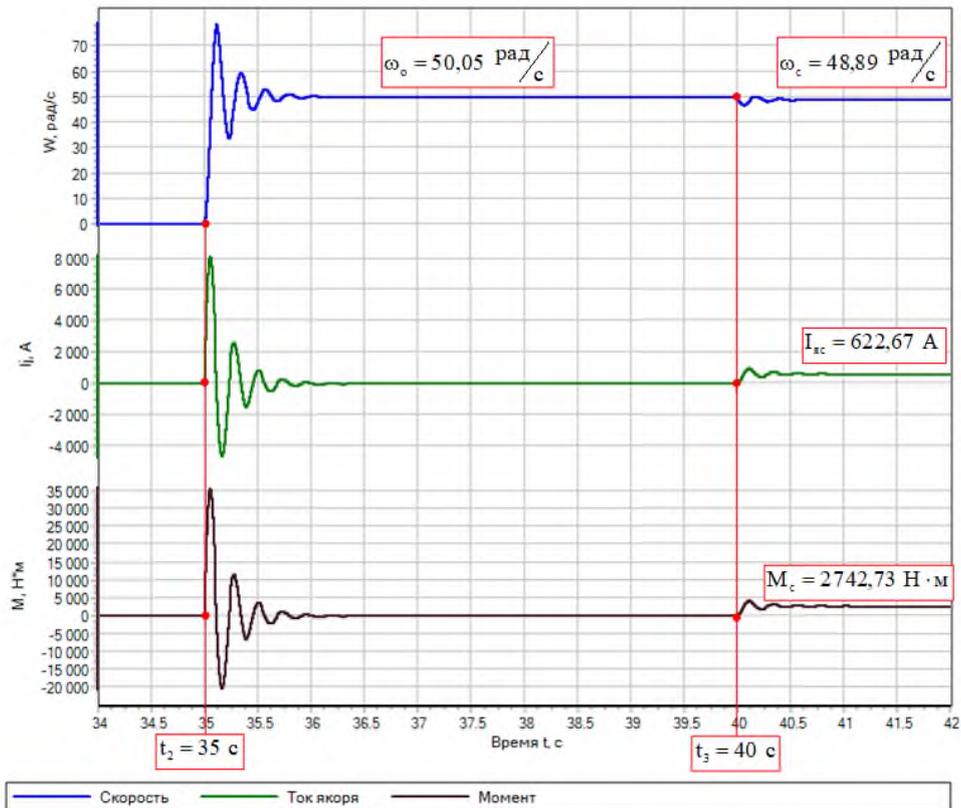


Рисунок 48 – Временные диаграммы ω , I_j , M

Значения расчетов и результаты моделирования имеют небольшие расхождения.

Задача 9

Составить модель для исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Параметры двигателя: $P_{\text{ном}}=5,3$ кВт; $U_{\text{ном}}=380$ В; $n_{\text{ном}}=875$ об/мин; $I_{1\text{ном}}=14$ А; $\cos\varphi_{\text{ном}}=0,81$; $I_{1\text{хх}}=9,6$ А; $r_1=1,61$ Ом; $x_1=1,14$ Ом; $r_2=2,19$ Ом; $x_2=1,12$ Ом; $J=0,26$ кг·м².

Произвести моделирование энергетических показателей двигателя при номинальной нагрузке.

Решение:

Схема моделирования представлена на рисунке 49.

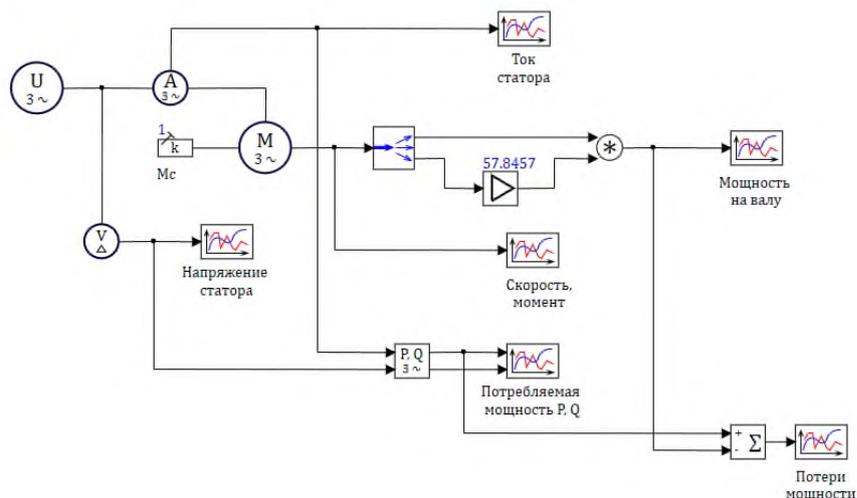


Рисунок 49 – Схема модели асинхронного двигателя

Программа для расчета параметров к задаче выглядит следующим образом:

```
// Ввод исходных данных
//Номинальная мощность, кВт
Pnom=5.3
//Номинальная скорость, об/мин
N=875
// Номинальное напряжение линейное, В
U1=380
// Номинальное напряжение фазное, В
U=U1/sqrt(3)
// Номинальная частоты сети, Гц
f=50
//Активное сопротивление статора, Ом
r1=1.61
//Индуктивное сопротивление статора, Ом
x1=1.14
//Активное сопротивление ротора, Ом
r2=2.19
//Индуктивное сопротивление ротора, Ом
x2=1.12
//Приведенный момент инерции в кг*м^2
J=0.26
// Определение числа пар полюсов
p=round(3000/N)
// Расчет скорости холостого хода
wo=2*pi*f/p
// Расчет номинальной скорости
Wn=N/9.55
//Номинальный момент двигателя
Mnom=Pnom*10e3/Wn
```

Буквенные обозначения в блоках соответствуют программе. Так для асинхронного двигателя свойства блока представлены на рисунке 50.

Свойства: ас_ИМ1

Свойства | Параметры | Общие | Порты | Визуальные слои

Название	Имя	Формула	Значение
Номинальные			
Момент инерции, кг*м2	J	J	0.26
Номинальная частота вращения, об/мин	Nnom	N	875
Номинальная мощность, кВт	Pnom	Pnom	5.3
Номинальное напряжение, В	Unom	U1	380
Номинальная частота питающей сети, Гц	fnom	f	50
Число пар полюсов	p	p	3
Схема замещения			
Сопротивление намагничивания [Xm], Ом	Zm	220/9.6	[22.916667]
Сопротивления статора [X1s, R1s], Ом	Zst	[x1, r1]	[1.14, 1.61]
Сопротивление ротора [X1r, R1r], Ом	Zr0	[x2, r2]	[1.12, 2.19]
Начальные условия			
Начальная угловая скорость [ω0], [1/с]	Init_M		[0]
Дополнительные			

Рисунок 50 – Свойства блока «Асинхронный двигатель»

Результаты исследования представлены на рисунках 51-54.

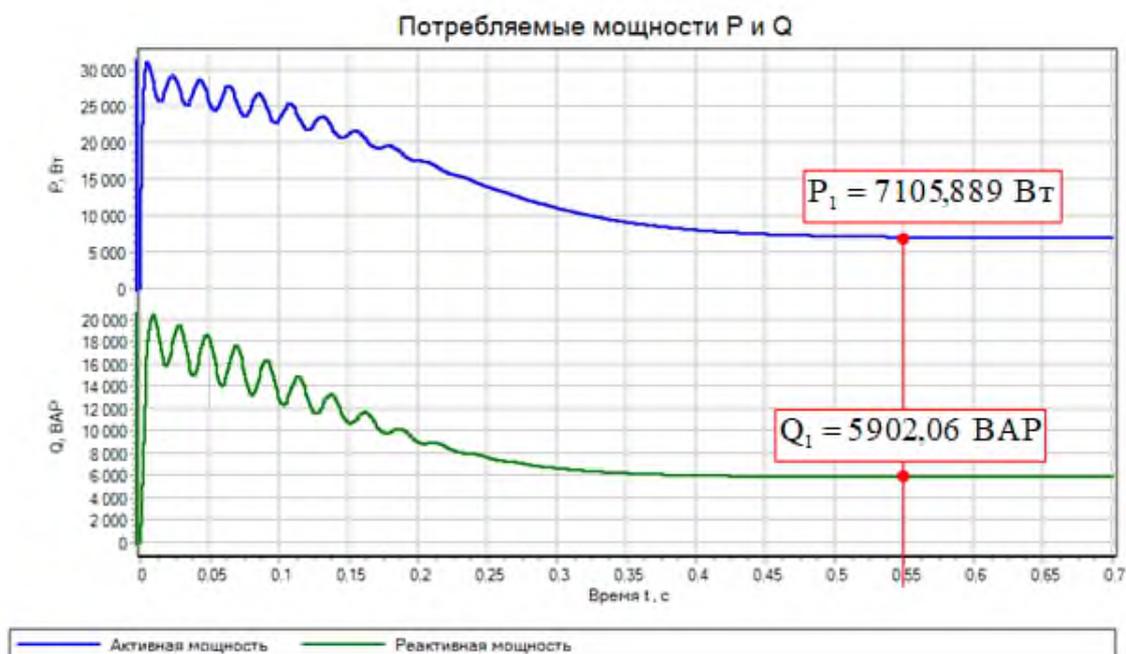


Рисунок 51 – График потребляемой мощности из сети

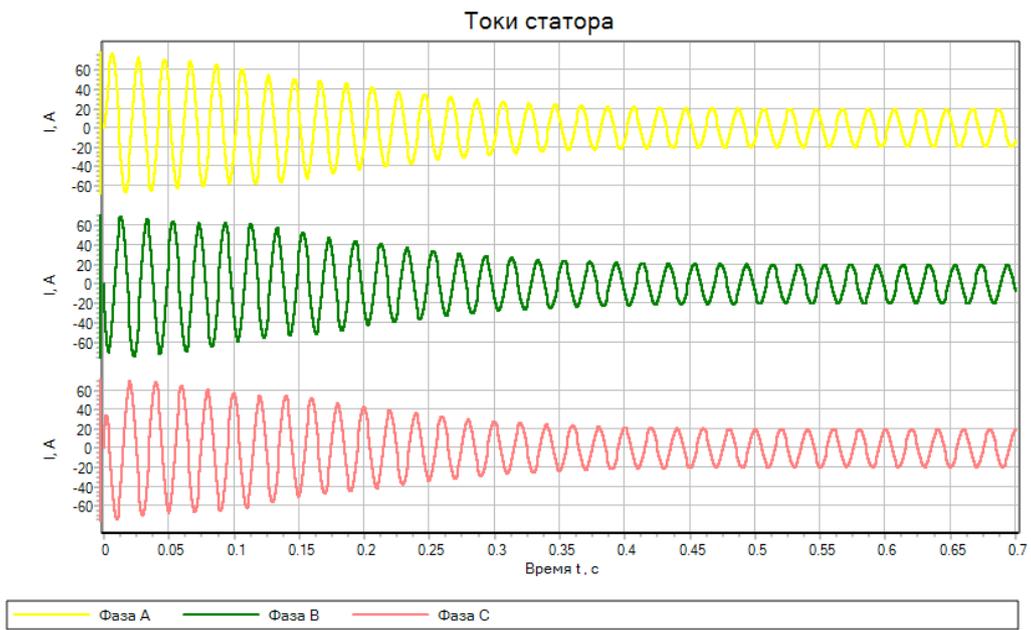


Рисунок 52 – Графики токов статора

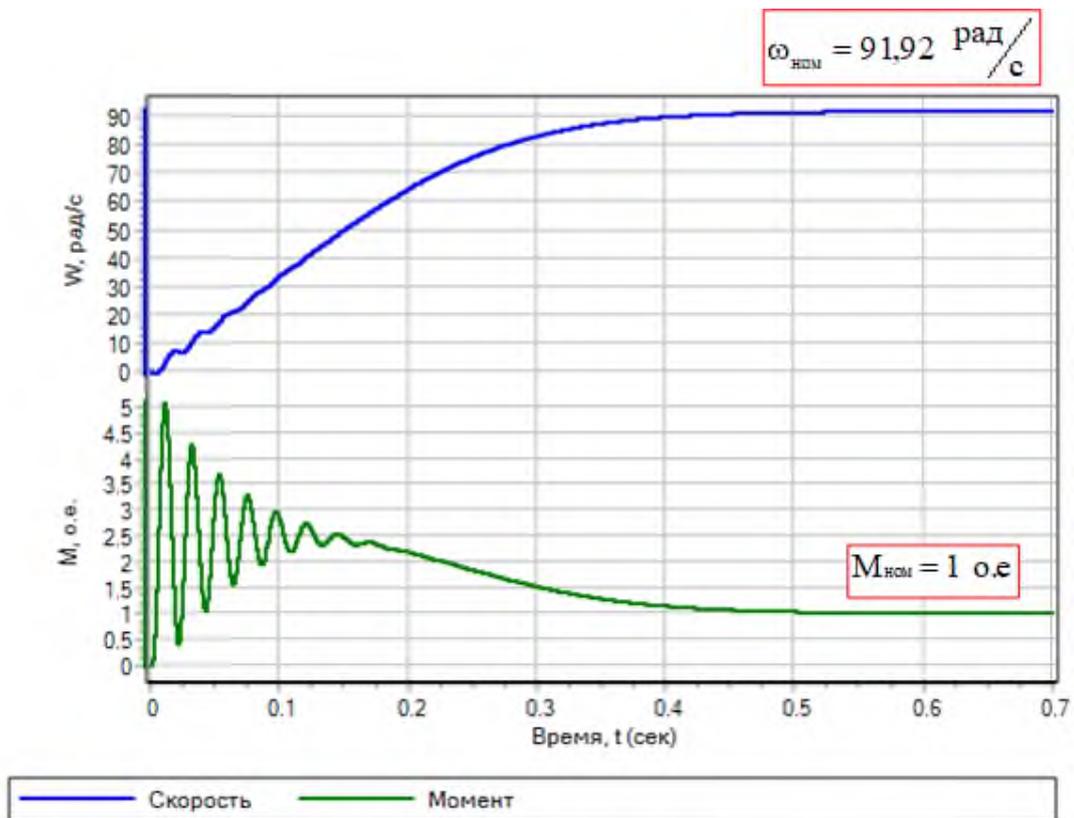


Рисунок 53 – График скорости и момента

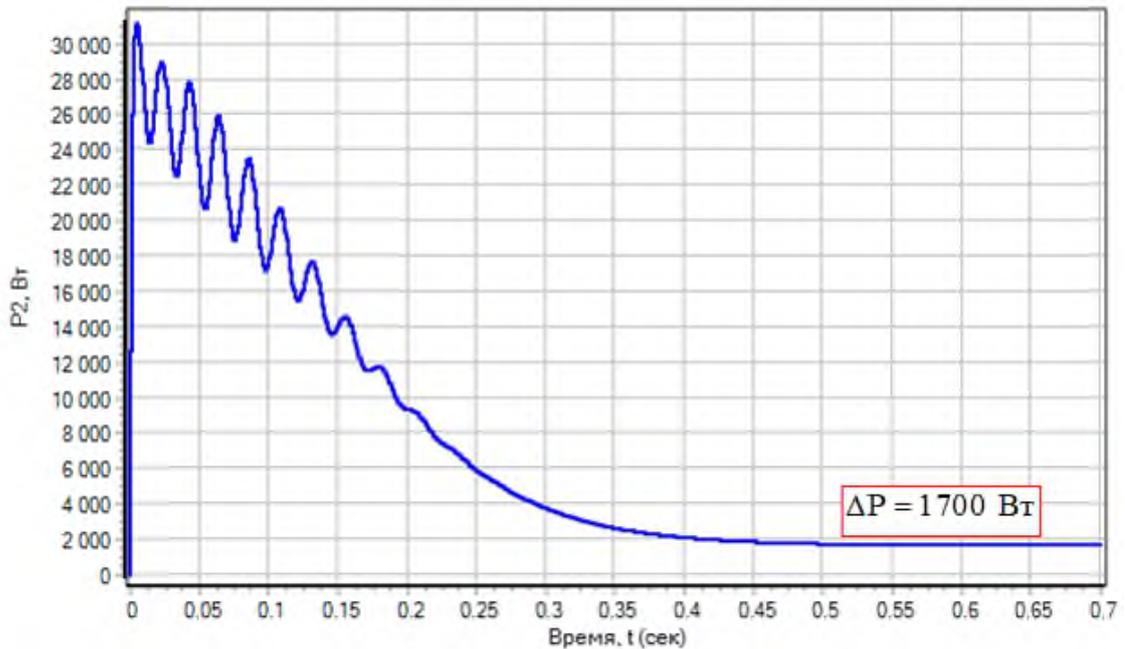


Рисунок 54 – График потерь мощности

Анализируя график потребляемой мощности (рисунок 51), можно определить коэффициент мощности как

$$\cos \varphi_{\text{ном}} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}, \quad (19)$$

$$\cos \varphi_{\text{ном}} = \frac{7105,889}{\sqrt{7105,889^2 + 5902,06^2}} = 0,769,$$

что соответствует паспортным данным $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,81$.

На графике (рисунок 53) видно что значение скорости соответствует номинальной

$$\omega_{\text{ном}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{ном}}}{60} = \frac{n_{\text{ном}}}{9,55} = \frac{875}{9,55} = 91,623 \text{ рад/с.}$$

Сравнение расчетных потерь мощности на валу с данными, представленными на рисунке 54 как

$$\Delta P = 3 \cdot U_{1\phi} \cdot I_{1\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} - P_{2\text{ном}}, \quad (20)$$

$$\Delta P = 3 \cdot 220 \cdot 14 \cdot 0,81 - 5300 = 2184,4 \text{ Вт,}$$

что говорит об адекватности моделирования.

Задача 10

Составить модель для исследования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором без учета насыщения.

Параметры двигателя: $P_{\text{ном}}=4$ кВт; $U_{\text{ном}}=400$ В; $n_{\text{ном}}=1430$ об/мин; $\cos\varphi_{\text{ном}}=0,87$; $r_1=1,405$ Ом; $L_1=0,005839$ Гн; $r_2'=1,395$ Ом; $L_2=0,005839$ Гн; $L_m=0,1722$ Гн; $J=0,0131$ кг·м².

Произвести моделирование показателей двигателя, работающего совместно с механической частью.

Решение:

При составлении схемы моделирования необходимо учесть, что выходной сигнал электромагнитного момента двигателя (**Mem**) следует подавать на модель механической части электропривода, построенной из элементов раздела «**Механика**». Модель механической части должна преобразовывать сигнал электромагнитного момента в значение угловой скорости ротора (**Wr**), подаваемое на соответствующий вход модели двигателя. Схема модели представлена на рисунке 55.

Метод интегрирования использован **РК45(классический)**.

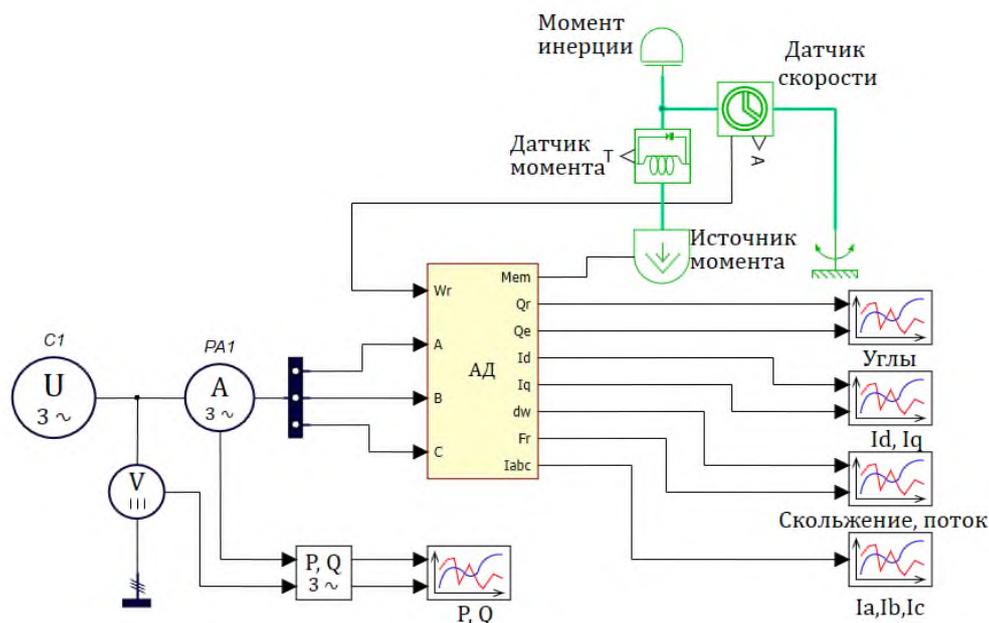


Рисунок 55 – Схема исследования асинхронного двигателя

Данные для свойств асинхронного двигателя представлены в виде скрипта:

// Ввод исходных данных

//Номинальная мощность, кВт

Pnom=4

//Номинальная скорость, об/мин

Nnom=1430

```

// Номинальное напряжение линейное, В
U1=400
// Номинальное напряжение фазное, В
U=U1/sqrt(3)
// Номинальная частоты сети, Гц
f=50
//Активное сопротивление статора, Ом
R1=1.405
//Индуктивность статора, Гн
L1=0.005839
//Активное сопротивление ротора, Ом
R2=1.395
//Индуктивность ротора, Гн
L2=0.005839
//Индуктивность контура намагничивания, Гн
Lo=0.1722
//Момент инерции в кг*м^2
J=0.0131
// Определение числа пар полюсов
p=2

```

Свойства блока «Асинхронный двигатель» представлены на рисунке 56.

Название	Имя	Формула	Значение
Индуктивность рассеяния статора [Гн]	dLs	L1	0.005839
Индуктивность рассеяния ротора [Гн]	dLr	L2	0.005839
Индуктивность намагничивания [Гн]	Lm	Lo	0.1722
Сопротивление статора [Ом]	Rs	R1	1.405
Сопротивление ротора [Ом]	Rr	R2	1.395
Число пар полюсов двигателя	Zp	p	2

Рисунок 56 – Свойства блока «Асинхронный двигатель»

Асинхронный двигатель получает питание от источника переменного напряжения, на выходе которого подключены амперметр, вольтметр и измеритель активной и реактивной мощности. Графики мощности, потребляемой из сети представлены на рисунке 57.

Коэффициент мощности в режиме холостого хода можно определить как

$$\cos \varphi_{xx} = \frac{P_{1xx}}{\sqrt{P_{1xx}^2 + Q_{1xx}^2}}, \quad (21)$$

$$\cos \varphi_{xx} = \frac{850,09}{\sqrt{850,09^2 + 1431,7^2}} = 0,51,$$

что соответствует паспортным данным $\cos \varphi_{xx}=0,46$ для двигателя 4A100M4УЗ при $P_2/P_{2ном}=0,25$ [1].

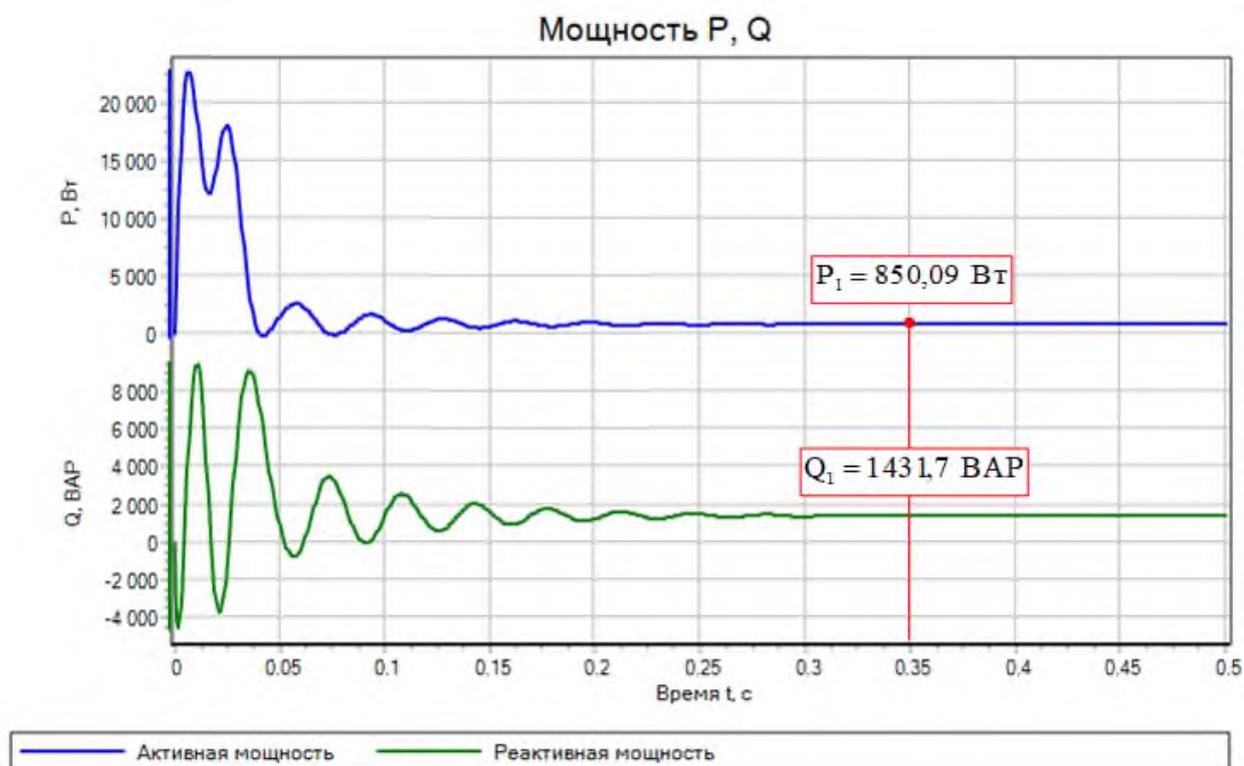


Рисунок 57 – Графики активной и реактивной мощности

Сигналы с датчика скорости (скорость и угол поворота) представлены на рисунке 58.

Время переходного процесса определено из таблицы просмотра данных, представленной на рисунке 59. Это время определено, исходя из вхождения значения скорости в зону $\pm 2\%$.

Значение установившейся скорости на рисунке 58 $\omega_0 = 157,07 \text{ рад/с}$ соответствует паспортным данным скорости холостого хода $\omega_0 = \frac{1500}{9,55} = 157,068 \text{ рад/с}$.

Графики скольжения, представленный на рисунке 60, показывает, что двигатель после разгона работает на холостом ходу при $s=0$.

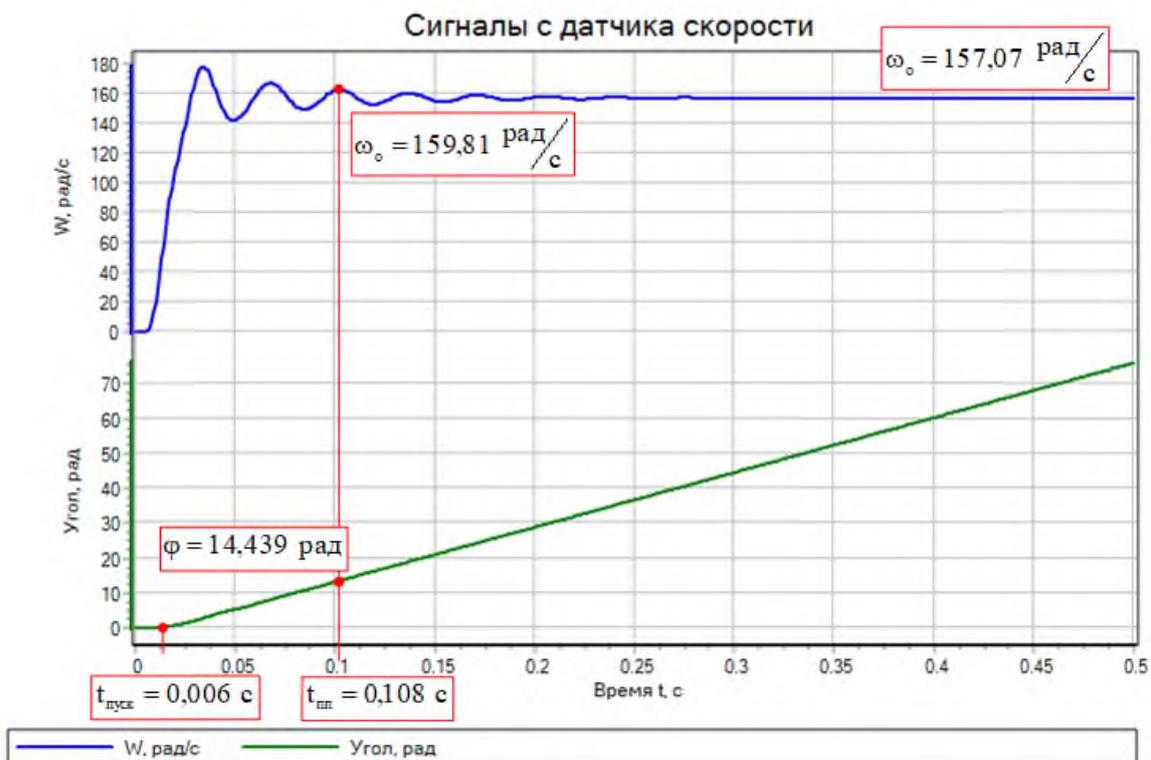


Рисунок 58 – Скорость и угол поворота ротора

Табличный просмотр данных

Тип выборки данных: Сырые данные

№	W, рад/с: X	W, рад/с: Y	Угол, рад: X	Угол, рад: Y
93	0.093	156.125657310585	0.093	12.0256876910229
94	0.094	157.294080139676	0.094	12.1823992326803
95	0.095	158.424806411072	0.095	12.3402632670613
96	0.096	159.483499278949	0.096	12.4992247818391
97	0.097	160.438071776051	0.097	12.6591954699431
98	0.098	161.25971360437	0.098	12.8200564895938
99	0.099	161.923929524855	0.099	12.9816622619733
100	0.1	162.411518913357	0.1	13.1438452842233
101	0.101	162.709415278219	0.101	13.3064218587708
102	0.102	162.811305287468	0.102	13.4691985581704
103	0.103	162.717959491561	0.103	13.6319791695901
104	0.104	162.437229670946	0.104	13.7945718059225
105	0.105	161.983697024676	0.105	13.95679583971
106	0.106	161.377986685521	0.106	14.1184883159486
107	0.107	160.645792726668	0.107	14.2795095300288
108	0.108	159.815680244613	0.108	14.4397475130652
109	0.109	158.922745078231	0.109	14.5991212411707
110	0.11	157.997216700983	0.11	14.7575824690007
111	0.111	157.073086620995	0.111	14.9151161724443
112	0.112	156.181834937833	0.112	15.0717396632867
113	0.113	155.352313580677	0.113	15.227500504545
114	0.114	154.609828173869	0.114	15.3824734055495
115	0.115	153.975443137566	0.115	15.536756309128
116	0.116	153.465517935339	0.116	15.690465899417
117	0.117	153.091467386504	0.117	15.8437327590568

Рисунок 59 – Просмотр данных с датчика скорости



Рисунок 60 – Графики скольжения и потока ротора

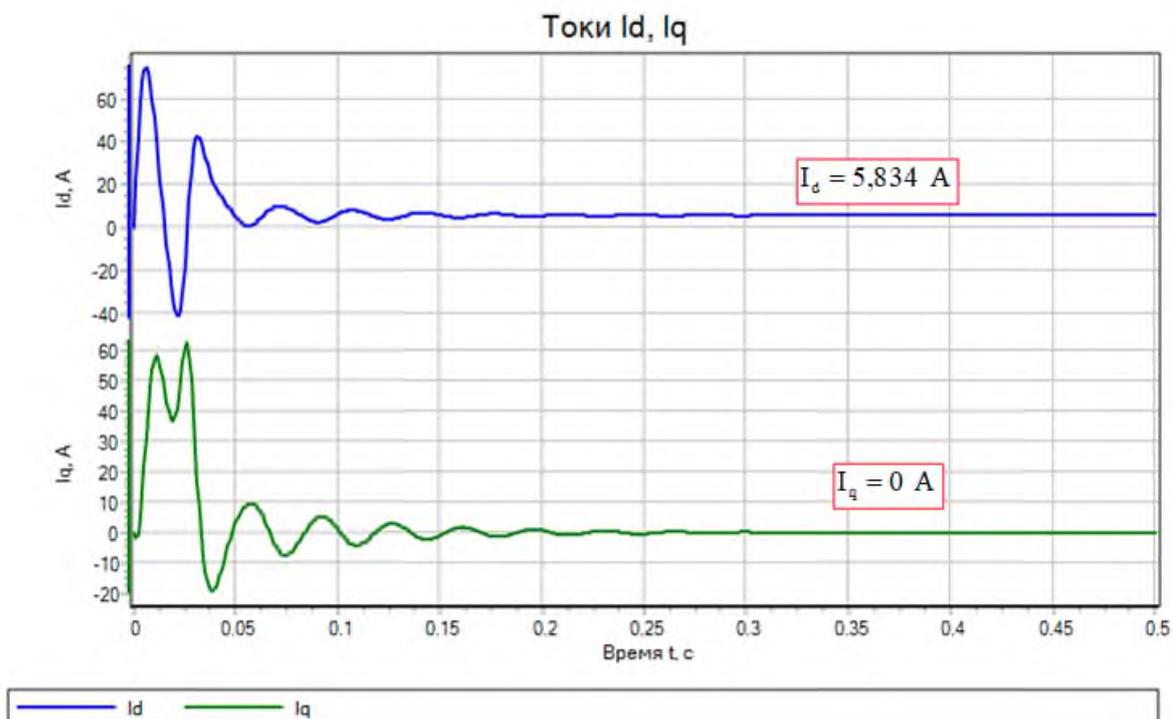


Рисунок 61 – Графики тока статора, ориентированные по осям d q

На рисунке 61 приложены графики тока во вращающейся системе координат. Значение тока $I_d=5,834 \text{ А}$ характеризует значение тока холостого хода. Преобразователи координат в данном примере встроены в модель асинхронного двигателя и недоступны для просмотра.

Математическое описание представлено подробно в [4].

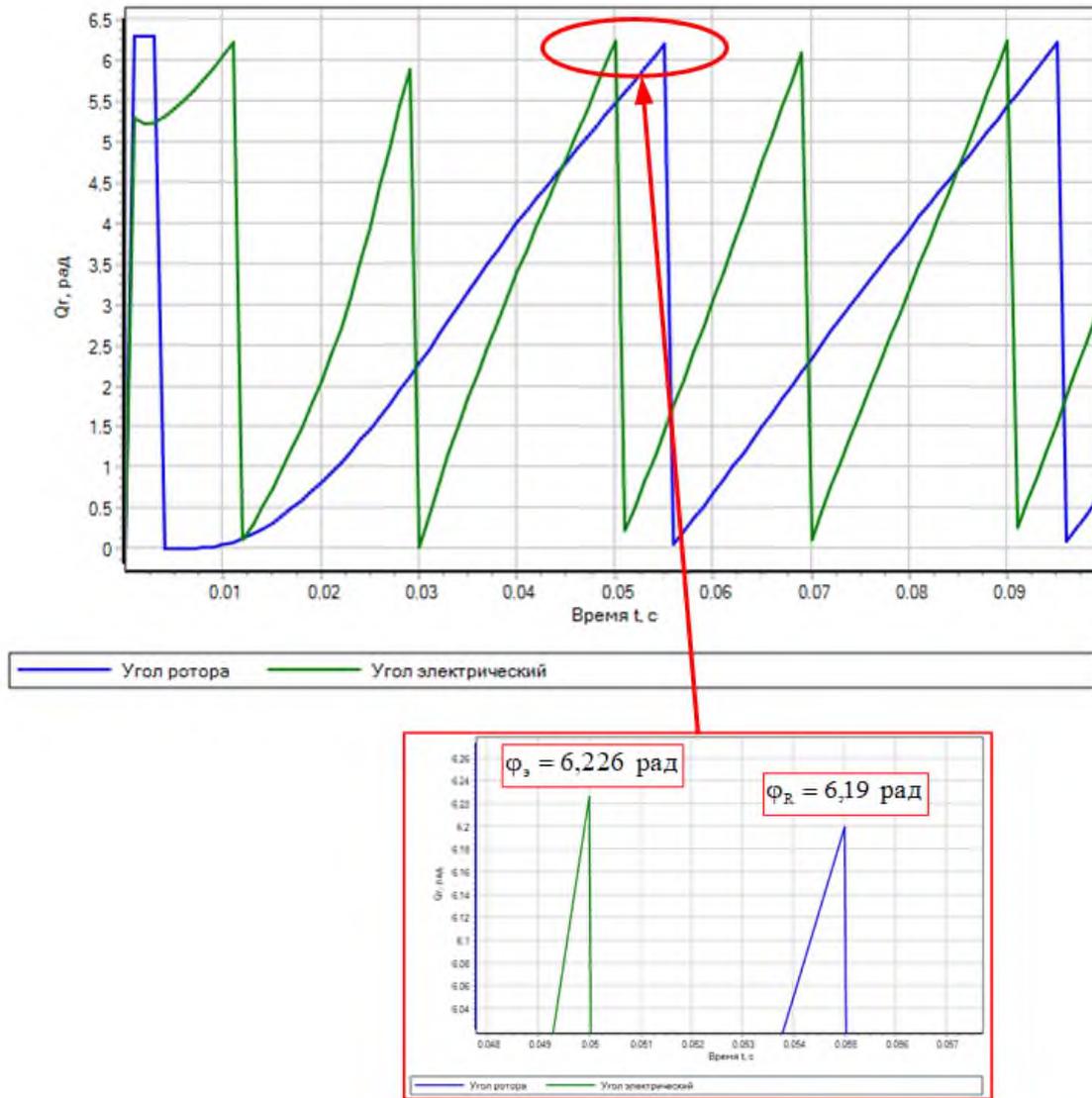


Рисунок 62 – Графики электрического угла поля и углового положения ротора

Графики углов поля и положения ротора наглядно показывают, что ротор отстает от поля статора по времени. По числовым значениям они несколько ниже чем 2π , что определяется режимом работы – неидеальным холостым ходом.

Список использованных источников

1. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник /А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – Москва : Энергоатомиздат, 1982.– 504 с.
2. Гайдук, А. Р. Применение программного пакета SimInTech для изучения теории автоматического управления : учебное пособие / А. Р. Гайдук, Т. А. Пьявченко ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Южный федеральный университет, 2021. – 133 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=691095>. – ISBN 978-5-9275-3862-1.
3. Карташов, Б. А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов, О. С. Козлов, Е.А. Шабает, А. М. Щекатуров. Москва : ДМК пресс, 2017. – 424 с. – ISBN 978-5-97060-482-3.
4. Калачёв, Ю. Н. SimInTech: Моделирование в электропроводе /Ю. Н. Калачёв. Москва : ДМК Пресс, 2019. – 98 с. – ISBN 978-5-97060-766-4.
5. Симаков, Г. М. Моделирование электромеханических процессов : учебное пособие / Г. М. Симаков, Ю. П. Филлюшов. – Новосибирск : Золотой колос, 2014. – 131 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=278196>.
6. Чернышев, А. Ю. Электропривод переменного тока : учебное пособие / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. – 2-е изд. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2015. – 210 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=442089>.

МАЖИРИНА РАИСА ЕВГЕНЬЕВНА

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
(ЧАСТЬ 1)**

Практикум

для студентов направления подготовки

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника,

всех форм обучения

Подписано в печать 22.05.2024 г.		
Формат 60x90 Рег. № 276	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,125

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС» Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: nf@misis.ru

Контактный тел. 8 (3537) 679729.