

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Судовое электрооборудование»

Л.А. Краснодубец

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ

Методические указания
к расчётно-графической работе
«Моделирование электромеханической системы»
для студентов специальности
26.05.07 – Эксплуатация судового
электрооборудования и средств автоматики

Севастополь
СевГУ
2021

УДК 621.313
ББК 31.291я73
К782

Р е ц е н з е н т :

А.В. Скатков – профессор кафедры «Информационные и компьютерные технологии», д-р техн. наук, профессор

Краснодубец Л.А.

К782 Моделирование судового электрооборудования и средств автоматики: методические указания к выполнению расчётно-графической работы «Моделирование электромеханической системы» для студентов специальности 26.05.07 – Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики / Л.А. Краснодубец ; Севастопольский государственный университет, Морской институт, кафедра «Судовое электрооборудование». – Севастополь: СевГУ, 2021. – 28 с. – Текст : электронный.

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 — Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, выполняющих расчётно-графическую работу по дисциплине «Моделирование судового электрооборудования и средств автоматики».

УДК 621.313
ББК 31.291я73

Рассмотрено и рекомендовано кафедрой «Судовое электрооборудование» Морского института ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», протокол № 7 от 23 марта 2021 г.

В авторской редакции

Изд. № 134/2021. Объем 1,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© Краснодубец Л.А., 2021
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2021

РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА

«Моделирование электромеханической системы»

1. ЦЕЛЬ РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

Цель работы – приобретение практических навыков построения динамических характеристик судового электрооборудования различными методами компьютерного моделирования в среде MATLAB & Simulink на примере электромеханической системы (ЭМС) в соответствии с требованиями, установленными федеральным государственным образовательным стандартом для формирования у выпускника профессиональных компетенций, способствующих решению профессиональных задач, а также с учётом требований кодекса ПДНВ – 78/95 с манильскими поправками в части раздела А-III/6.

2. СОДЕРЖАНИЕ ЗАДАНИЯ

2.1. В соответствии с вариантом задания, приведённом в таблице А1 приложения А, выбрать исполнительный электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением серии П и привести его справочные данные в разделе пояснительной записки «Задание и исходные данные».

2.2. Рассчитать, используя данные п. 2.1, параметры математических моделей ЭМС, приведенных в разделе 4.

2.3. Выполнить анализ динамических режимов ЭМС путём построения её переходных характеристик, применяя различные методы и используя соответствующие модели и программные средства для определения показателей качества исследуемых процессов.

2.4. Сделать выводы о сравнительной эффективности применения тех или иных методов моделирования для анализа динамических режимов электрических машин постоянного тока.

2.5. Оформить пояснительную записку.

Варианты задания приведены в Приложении А.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАСЧЁТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЫ

3.1. Расчёт параметров математических моделей ЭМС

3.1.1. На основе справочных данных электродвигателя и формул, приведенных в разделе 4, рассчитать электрические и механические параметры ЭМС

3.1.2. Рассчитать коэффициенты моделей ЭМС по результатам п. 3.1.1.

3.2. Анализ динамических режимов ЭМС

3.2.1. Методом аналогового моделирования средствами пакета Simulink построить график переходной характеристики для ЭМС при помощи модели в форме дифференциальных уравнений п. 4.2. Рассчитать показатели качества.

3.2.2. Построить переходную характеристику ЭМС в среде визуального моделирования Simulink по структурной схеме, построенной в п. 4.4. Определить показатели качества.

3.2.3. Настроить программу цифрового моделирования Digital_Sim_DCM, использующей модель ЭМС в форме конечно-разностных уравнений для построения переходной характеристики и определить с её помощью показатели качества.

3.2.4. При помощи средств пакета SimPowerSystems построить S-модель процесса прямого пуска в ход ЭМС без нагрузки с последующим её набросом.

3.2.5. При помощи виртуальной модели, построенной в п. 3.2.4 исследовать переходные процессы в ЭМС при прямом пуске в ход без нагрузки и с нагрузкой, а также процесс наброски нагрузки в номинальном режиме функционирования. При этом значения параметров виртуальной модели ЭМС сопротивление и индуктивность якорной цепи – R и L , а также момент инерции – J_d , должны соответствовать варианту задания. Определить показатели качества переходных процессов.

3.2.6. Сравнить результаты моделирования в п. 3.2.2 – 3.2.5. Сделать выводы.

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭМС И ВИДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1. Математическая модель ЭМС в форме дифференциальных уравнений для электрической и механической частей

Примером судового электрооборудования является электродвигатель постоянного тока с независимым возбуждением, который на функциональном уровне представляет собой ЭМС, математическое описание которой представлено в форме двух дифференциальных уравнений

$$L \frac{di(t)}{dt} = -i(t)R - C_e \cdot \omega(t) + u(t). \quad (4.1)$$

$$J_d \frac{d\omega(t)}{dt} = C_m \cdot i(t) - M_c \quad (4.2)$$

с начальными условиями

$$t = 0; \quad i(0) = 0; \quad \omega(0) = 0 \quad \text{при} \quad u(0) = 1; \quad M_c = 0,1. \quad (4.3)$$

Уравнения (4.1) и (4.2) являются уравнениями электрической и механической частей соответственно, где приняты следующие обозначения:

$u(t)$ – напряжение на якоре, В; $i(t)$ – ток якоря, А;

R – сопротивление якорной цепи, Ом;

$\omega(t)$ – скорость вращения вала, рад/с;

M_c – момент нагрузки, Нм;

C_e – коэффициент пропорциональности для ЭДС двигателя

C_m – коэффициент пропорциональности для тока двигателя

J_d – момент инерции ротора, кгм²;

p – число пар полюсов

L – индуктивность якорной цепи двигателя, Гн.

Параметры модели рассчитываются по следующим соотношениям на

$J_d = GD^2 / 4$ [кгм²], где GD^2 – маховый момент [кГм²];

$\Omega_{ном} = \frac{\pi N_{ном}}{30} = \frac{N_{ном}}{9,55}$ – номинальное значение угловой скорости [рад/с],

где $N_{ном}$ – номинальное значение угловой скорости вращения вала [об/мин];

$L = 0,6 \frac{U_{ном}}{\Omega_{ном} \cdot I_{ном} \cdot p}$ [Гн], где p – число пар полюсов на статоре;

$C_e = \frac{U_{ном} - RI_{ном}}{\Omega_{ном}}$ – электромагнитная постоянная [Вс/рад];

$C_m = \frac{M_{ном}}{I_{ном}}$ – электромеханическая постоянная [Нм/А],

$M_{ном} = 1000 \frac{P_{ном}}{\Omega_{ном}}$ – номинальный момент $\frac{[кВт]}{[с^{-1}]}$;

$P_{ном}$ – номинальная мощность ЭМС [кВт].

4.2. Математическая модель ЭМС в форме дифференциальных уравнений пространства состояний строится путём приведения дифференциальных уравнений (4.1) и (4.2) к нормальной форме Коши, что приводит к следующему результату:

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i(t) - \frac{C_e}{L}\omega(t) + \frac{1}{L}u_a(t), \quad (4.4)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{C_m}{J_d}i(t) + 0\omega(t) - \frac{1}{J_d}M_c(t) \quad (4.5)$$

с начальными условиями $t = 0$; $i(t) = 0$; $\omega(t) = 0$.

При этом функции $u_a(t)$ и $M_c(t)$, характеризующие воздействия на ЭМС, должны быть заданы. Например, управляющее воздействие $u_a(t) = U_{ном}$, а возмущающее воздействие (момент сопротивления на валу электродвигателя) $M_c(t) = 100$ Нм.

Следует отметить, что в уравнении (4.5) производная от угловой скорости $\frac{d\omega(t)}{dt}$ имеется, а сама переменная $\omega(t)$ отсутствует. Поэтому в правой части этого уравнения записана отсутствующая переменная, умноженная на ноль.

Это сделано для удобства построения матрицы A (матрицы коэффициентов модели ЭМС) при записи уравнений (4.4) и (4.5) в векторно-матричной форме.

Полученные два уравнения первого порядка (4.4) и (4.5) представленные в нормальной форме Коши, образуют систему, состоящую из двух линейных дифференциальных уравнений, которые описывают два процесса $i(t)$ и $\omega(t)$, возникающих в ЭМС после подачи на её входы воздействий $u_a(t)$ и $M_c(t)$. При этом начало этих процессов будет определено заданными начальными условиями (4.5), а какое будет их завершение – реакция ЭМС на воздействия $u_a(t)$ и $M_c(t)$ покажет моделирование дифференциальных уравнений (4.4) и (4.5). Решение этой задачи можно выполнить методом аналогового моделирования или методом численного моделирования.

Применение метода аналогового моделирования предусматривает использование среды визуального моделирования Simulink. При этом для дифференциальных уравнений строится структурная схема моделирования (S-модель), содержащая в своём составе счётно-решающие блоки (сумматоры, интеграторы и др.), а также блоки генерации и регистрации сигналов, входящие в состав библиотеки Simulink.

Метод численного моделирования сводится к применению процедур численного интегрирования дифференциальных уравнений. Процедуры численного интегрирования, применяемые в системе MATLAB, называются решателями. Существует несколько видов решателей, которые различаются алгоритмами численного решения дифференциальных уравнений.

Численное интегрирование обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) называют решением задачи Коши. Любая система нелинейных ОДУ может быть представлена как система дифференциальных уравнений 1-го порядка в нормальной форме Коши:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t), t = t_0; x = x_0.$$

$x = [x_1, x_2]^T$ – вектор состояния;

t – время;

f – нелинейная вектор-функция от переменных x, t называется правой частью ОДУ.

Рассмотрим систему из двух дифференциальных уравнений (4.4) и (4.5) соответственно электрической и механической части электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением, которые являются обыкновенными дифференциальными уравнениями, записанными в нормальной форме Коши с начальными условиями (4.5), и представим её в обобщённой форме

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + b_{11}u_a(t), \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + b_{22}M_c(t), \end{aligned}$$

где $a_{11} = -\frac{R}{L}; a_{12} = -\frac{C_e}{L}; a_{21} = \frac{C_m}{J}; a_{22} = 0; b_{11} = \frac{1}{L}; b_{22} = -\frac{1}{J}.$

Полученную математическую модель в виде системы ОДУ можно представить в векторно-матричной форме

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t),$$

$$t = 0; \quad x(0) = x_0,$$

где $x(t)$ – вектор состояния размерности (2×1) ;

A – квадратная матрица (2×2) ;

B – матрица входов (2×2) ;

x_0 – вектор начальных условий (2×1) ;

$u(t)$ – вектор входных воздействий (2×1) .

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix}; x_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}; u(t) = \begin{bmatrix} u_a(t) \\ M_c(t) \end{bmatrix}.$$

Для решения задачи Коши для системы (5), (6) в среде MATLAB существуют несколько специальных функций, среди которых наибольшее распространение получили функции-решатели ode23 и ode45, предназначенные для численного интегрирования систем ОДУ. Они применимы как для решения простых дифференциальных уравнений, так и для моделирования сложных динамических систем.

Синтаксис оформления вызова программы-решателя

$[t, X] = \text{ode23}(\text{'<имя функции>'}, t_0, tf, x_0)$

$[t, X] = \text{ode23}(\text{'<имя функции>'}, t_0, tf, x_0, \text{tol}, \text{trace})$

$[t, X] = \text{ode45}(\text{'<имя функции>'}, t_0, tf, x_0)$

$[t, X] = \text{ode45}(\text{'<имя функции>'}, t_0, tf, x_0, \text{tol}, \text{trace})$

Описание функций численного интегрирования

Функции $[t, X] = \text{ode23}(\text{'<имя функции>'}, t_0, tf, x_0, \text{tol}, \text{trace})$ и

$[t, X] = \text{ode45}(\text{'<имя функции>'}, t_0, tf, x_0, \text{tol}, \text{trace})$ интегрируют системы ОДУ, используя формулы Рунге - Кутты соответственно 2-го и 3-го или 4-го и 5-го порядка.

Эти функции имеют следующие параметры:

Входные параметры функций численного интегрирования

'<имя функции>' – строковая переменная, являющаяся именем m-файла, в котором вычисляются правые части системы ОДУ;

t_0 – начальное значение времени моделирования; tf – конечное значение времени моделирования;

x_0 – вектор начальных условий;

tol – задаваемая точность; по умолчанию для ode23 $tol = 1.e-3$, для ode45 $tol = 1.e-6$);

$trace$ – флаг, регулирующий вывод промежуточных результатов; по умолчанию равен нулю, что подавляет вывод промежуточных результатов.

Функции ode23 и ode45 реализуют методы Рунге - Кутты с автоматическим выбором шага. Такие алгоритмы используют тем большее количество шагов, чем быстрее изменяется функция.

Выходные параметры функций численного интегрирования:

t – текущее время; X – двумерный массив, где каждый столбец соответствует одной переменной.

Для численного интегрирования системы (4.4), (4.5) с соответствующими начальными условиями необходимо выполнить следующие шаги.

Первый шаг – это создание m-файла для вычисления правых частей системы ОДУ с присвоением ему уникального имени.

Второй шаг – это создание главной программы так же в виде m-файла с уникальным именем, в которой вводятся исходные данные, задаются начальные условия, задаётся интервал времени: начальное t_0 и конечное t_f время интегрирования, вызов функции-решателя, а также функции вывода графика переменной, представляющей выход моделируемой электромеханической системы.

В приложении В приведены тексты (скрипты) программы вычисления правых частей `right_DCM` и управляющей программы `Numerical_Sim_DCM`.

На рисунке 4.1 показан пример графика, иллюстрирующего переходные процессы в электромеханической системе на базе ДПТ НВ серии П22, математическая модель которой задана системой (4.4), (4.5).

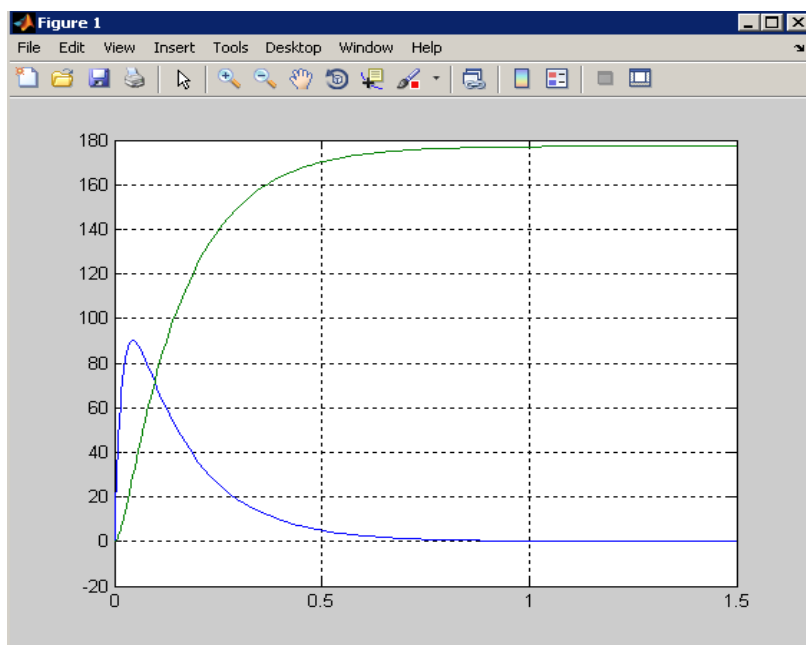


Рисунок 4.1. Графики переходных процессов для угловой скорости и тока якоря ДПТ НВ серии П22

Примечание. Оба файла Numerical_Sim_DCM.m и right_DCM.m должны располагаться в одной папке. Процесс моделирования начинается запуском программы, содержащейся в файле Numerical_Sim_DCM.m.

4.3. Модель ЭМС в форме конечно-разностных уравнений

В электроприводах для придания им заданных динамических свойств широко используются цифровые регуляторы, выполненные на базе микроконтроллеров. При описании таких систем, называемых цифровыми, используются конечно-разностные уравнения.

Пусть для непрерывной функции $x(t)$ вводится путём дискретизации дискретное время $t_k = kT$, где $k = 0, 1, 2, \dots$ и T – период дискретизации, который определяет временной интервал между соседними дискретными тактами (шагами) времени $\dots t_{k-1} \ t_k \ t_{k+1} \dots$, в которых осуществляются выборки значений (ординат) функции $x(t)$ при помощи устройства выборки и хранения. В таком случае прямая разность первого порядка определяется по выражению

$$\Delta x[kT] = \frac{x[(k+1)T] - x[kT]}{T},$$

которое переходит в производную $\frac{dx}{dt}$ при $T \rightarrow 0$. То есть справедливо приближённое равенство

$$\frac{dx(t_k)}{dt} \approx \frac{x[(k+1)T] - x[kT]}{T}. \quad (4.6)$$

Выражение $x[(k+1)T]$ определяет значение функции $x(t)$ в момент времени t_{k+1} , которое, например, будет вычислено микроконтроллером на следующем дискретном шаге по текущим значениям переменных, определённых в момент времени t_k .

Таким образом, для цифрового моделирования требуется построение дискретной модели ЭМС, которая в рассматриваемом случае может быть получена путём преобразования непрерывной модели ЭМС, представленной дифференциальными уравнениями (4.1) и (4.2), к конечно-разностным уравнениям. Решение этой задачи можно выполнить несколькими способами. Например, можно ввести дискретное время $t_k = kT$ и, воспользовавшись равенством (4.6), переписать уравнения (4.1) и (4.2) в виде:

$$L \frac{i[(k+1)T] - i[kT]}{T} = -i[kT]R - C_e \omega[kT] + u[kT], \quad (4.7)$$

$$J_d \frac{\omega[(k+1)T] - \omega[kT]}{T} = C_m \cdot i[kT] - M_c, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (4.8)$$

Далее полученные конечно-разностные уравнения (4.7) и (4.8) преобразуем следующим образом:

$$i[(k+1)T] = (1 - \frac{TR}{L})i[kT] - \frac{TC_e}{L}\omega[kT] + \frac{T}{L}u[kT], \quad (4.9)$$

$$\omega[(k+1)T] = \frac{TC_m}{J_d}i[kT] + \omega[kT] - \frac{T}{J_d}M_c, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (4.10)$$

с начальными условиями

$$k = 0; \quad i[0] = 0; \quad \omega[0] = 0 \quad \text{при} \quad u[0] = U_{ном} \quad \text{и} \quad M_c = 0,5. \quad (4.11)$$

При этом следует иметь в виду, что напряжение на входе якорной цепи электродвигателя $u[kT] = U_{ном} = const$ и момент нагрузки $M_c = 1 = const$ являются постоянными для всех $k = 0, 1, 2, \dots, N$, где N – номер такта, соответствующий моменту времени $t_N = NT$, при котором завершается процесс моделирования.

4.4. Математическая модель ЭМС в форме структурной схемы строится путём применения к уравнениям (4.1) – (4.2) преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях. В таком случае система уравнений (4.1) – (4.2), связывающих переменные как функции времени, преобразуется к системе алгебраических уравнений, связывающих изображения по Лапласу для соответствующих переменных:

$$LsI(s) + RI(s) + C_e\Omega(s) = U_a(s), \quad (4.12)$$

$$J_d s\Omega(s) + M_c(s) = C_m I(s), \quad (4.13)$$

$$C_m I(s) = M(t), \quad (4.14)$$

$$C_e\Omega(s) = E(t). \quad (4.15)$$

Изображение тока якоря может быть найдено из (4.12) следующим образом:

$$I(s) = \frac{U_a(s) - E(s)}{Ls + R} = \frac{U_a(s) - E(s)}{T_a s + 1} R^{-1}$$

Изображение по Лапласу скорости вращения вала электродвигателя $\Omega(s)$ может быть выражено из уравнения (4.13) и представлено в виде:

$$\Omega(s) = \frac{M(s) - M_c(s)}{J_d s}$$

где $T_a = \frac{L}{R}$ – постоянная времени цепи якоря [с].

По уравнениям (4.12) – (4.15) строится структурная схема, изображенная на рисунке 4.2, которая рассматривается в качестве одной из форм математической модели ЭМС как объекта управления. Эту структурную схему удобно использовать в качестве модели электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением при исследовании электропривода в среде визуального моделирования *Simulink*.

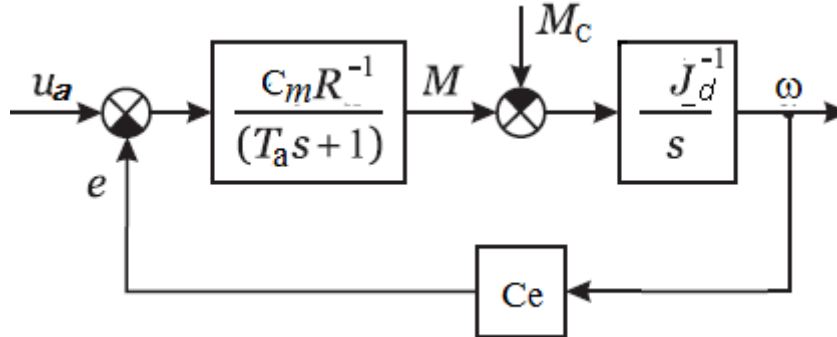


Рисунок 4.2. Структурная схема как модель ЭМС

4.5. Построение моделей ЭМС в виде передаточных функций можно выполнить путём исключения из алгебраических уравнений (4.12) и (4.13) переменных $E(s)$, $I(s)$ и $M(s)$ методом подстановки вместо них соотношений (4.14), (4.15) и далее, принимая за выход переменную $\Omega(s)$, а за входы переменные $U_a(s)$ и $M_c(s)$. Например, таким способом можно получить модель ЭМС, представляющей собой ДПТ НВ в форме передаточных функций соответственно по управляющему воздействию при $M_c(s) = 0$ и возмущающему воздействию при $U_a(s) = 0$.

Вводя обозначения

$T_e = \frac{L}{R}$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи [с];

$T_m = \frac{RJ_d}{C_e C_m}$ – электромеханическая постоянная времени двигателя [с];

$k_{dpt} = \frac{1}{C_e}$ – коэффициент передачи двигателя по управлению $[\frac{C^{-1}}{B}]$;

$k_{dpt_M} = \frac{R}{C_e C_m}$ – коэффициент передачи двигателя по возмущению $[\frac{C^{-1}}{H_M}]$.

Уравнение ДПТ НВ можно переписать в изображениях по Лапласу виде

$$(T_e T_m s^2 + T_m s + 1)\Omega(s) = k_{dpt} U(s) - k_{dpt_M} (T_e s + 1) M_c(s). \quad (4.16)$$

Окончательно уравнение (4.16) можно переписать в следующем образе:

$$\Omega(s) = \frac{k_{dpt}}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1} U(s) + \frac{k_{dpt_M} (T_e s + 1)}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1} M_c(s),$$

откуда следуют выражения для передаточной функции ДПТ НВ по управлению $W^U_{dpt}(s)$ и возмущению $W^M_{dpt}(s)$ соответственно

$$W^U_{dpt}(s) = \frac{k_{dpt}}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1}; \quad W^M_{dpt}(s) = \frac{k_{dpt_M} (T_e s + 1)}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1} \quad (4.17)$$

Следует отметить, что для современных двигателей постоянного тока с независимым возбуждением при управлении со стороны якорной цепи постоянные времени удовлетворяют неравенству $T_m > 4T_e$. Это гарантирует наличие у передаточных функций ДПТ НВ вещественных и разных полюсов. Если это неравенство не выполняется, то передаточные функции (4.17) будут иметь пару комплексно-сопряженных полюсов и в таком случае примут следующий вид:

$$W^U_{dpt}(s) = \frac{k_{dpt}}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}; \quad W^M_{dpt}(s) = \frac{k_{dpt_M} (T_a s + 1)}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}, \quad (4.18)$$

где $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_m}{T_a}}$ – коэффициент демпфирования ($\xi > 1$); $T_a = L_a / R_a$ – постоянная времени якорной обмотки;

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \text{ – обобщенная постоянная времени [с],}$$

где, в свою очередь, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{T_e \cdot T_m}}$ – собственная частота ДПТ НВ [рад/с].

При $T_m \gg T_e$ передаточная функция ДПТ НВ может быть представлена инерционным звеном первого порядка с постоянной времени T_m :

$$W^U_{dpt}(s) = \frac{k_{dpt}}{T_m s + 1}.$$

В некоторых случаях передаточные функции (4.17), для которых полюсы s_1 и s_2 являются вещественными числами, удобно представить в виде

$$W^U_{dpt}(s) = \frac{k_{dpt}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}; \quad W^u_{dpt}(s) = \frac{k_{dpt_M} (T_a s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (4.19)$$

где

$$T_1 = |1/s_1| \text{ и } T_2 = |1/s_2| \text{ или } T_1 = \text{abs}(1/s_1) \text{ и } T_2 = \text{abs}(1/s_2).$$

Постоянные времени T_1 и T_2 можно также вычислить по формулам

$$T_1 = \text{abs}(1/\lambda_1) \text{ и } T_2 = \text{abs}(1/\lambda_2),$$

где λ_1 и λ_2 — характеристические числа для дифференциальных уравнений (4.1) и (4.2), которые равны полюсам s_1 и s_2 передаточных функций (4.17).

При этом постоянная времени T_1 соответствует электромагнитной постоянной времени T_e , которая примерно равна постоянной времени T_a якорной обмотки ДПТ НВ, а постоянную времени T_2 (при $T_2 \gg T_1$) приближенно можно принять равной электромеханической постоянной времени T_m .

4.6. Виртуальная модель ЭМС в пакете SimPowerSystems.

Построение виртуальных моделей ЭМС в пакете SimPowerSystems ничем не отличается от построения Simulink-модели на основе базовой библиотеки Simulink. Так же как и для обычной S-модели, необходимо выполнить расстановку блоков на схеме, задать их параметры, соединить блоки и установить параметры расчета модели в целом. Для моделей пакета расширения SimPowerSystems доступен ускоренный режим расчета и все возможности Simulink. Однако эти модели имеют и некоторые особенности.

Входы и выходы блоков, в отличие от блоков Simulink, не являются направленными, поскольку фактически являются эквивалентами электрических контактов. Таким образом, электрический ток может через вход или выход блока протекать в двух направлениях: как во внутрь блока, так и наружу. Изображение порта на пиктограмме блока представляет собой небольшой квадрат. Эти порты не являются направленными, что соответствует физической природе сигнала, проходящего через такие порты (электрический ток).

Соединительные линии между блоками являются, по сути, моделями электрических проводов, по которым ток может протекать в двух направлениях. В Simulink-моделях информационный сигнал распространяется только в одном направлении — от выхода одного блока к входу другого.

Simulink-блоки и SimPowerSystems-блоки не могут быть непосредственно соединены друг с другом, поскольку имеют сигналы разной природы. Сигнал от S-блока можно передать к SPS-блоку через управляемые источники тока или напряжения, а наоборот — с помощью измерителей тока или напряжения.

Несколько линий связи (проводов) могут быть соединены между собой. Для выполнения такого соединения в SimPowerSystems не требуется использование специальных блоков (соединителей). При расчете схемы, содержащей нелинейные блоки, следует использовать следующие методы (решатели):

- ode15s — многошаговый метод переменного порядка (от 1 до 5), использующий формулы численного дифференцирования;
- ode23tb — неявный метод Рунге-Кутты в начале решения и метод, использующий формулы обратного дифференцирования 2-го порядка, в последующем (они дают наилучшие результаты по быстродействию).

Библиотека SimPowerSystems в своём составе содержит специфический блок **Powergui**, используемый для анализа электрических схем. С переноса это-

го блока в любое место на графической форме Simulink начинается построение виртуальной модели любого элемента электрооборудования. Без этого блока виртуальная модель работать не будет!

Рассмотрим построение виртуальной модели для ЭМС, представленной в виде ДПТ НВ. Пиктограмма блока электрической машины постоянного тока в пакете SimPowerSystems показана на рисунке 4.3.

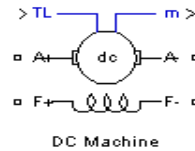


Рисунок 4.3. Пиктограмма блока электрической машины постоянного тока как элемента библиотеки пакета SimPowerSystems

Модель электрической машины постоянного тока состоит из электромагнитной и механической частей. Электромагнитная часть модели включает:

1) якорную цепь (Armature circuit), которая присоединяется к внешней цепи при помощи портов +A, -A и содержит последовательно соединенные сопротивление, индуктивность (R_a, L_a), источник противоЭДС (FCЕМ) и измеритель тока якоря;

2) цепь возбуждения (Field circuit), которая присоединяется к внешней цепи при помощи портов +F, -F содержит последовательно соединенные сопротивление, индуктивность (R_f, L_f) и измеритель тока возбуждения.

Электромагнитная модель электродвигателя описывается следующей системой уравнений (обозначения переменных соответствуют принятым в пакете SimPowerSystems):

$$\begin{aligned} u_a &= L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a, \\ u_f &= L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f, \\ e_a &= k_E \omega, \dots k_E = L_{af} i_f. \end{aligned} \quad (4.20)$$

В уравнениях (4.20) u_a, i_a, e_a — напряжение, ток и противоЭДС якоря;

u_f, i_f — напряжение и ток возбуждения;

$L_a, R_a, L_f, R_f, L_{af}$ — параметры двигателя, которые задаются в окне параметров блока.

Механическая часть модели электродвигателя (Mechanics) описывается уравнением

$$J \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega + T_f + \text{sign } \omega \cdot T_L = k_T i_a. \quad (4.21)$$

В уравнении (4.21) ω, T_L, i_a – угловая скорость, момент нагрузки, ток якоря. В качестве заданных параметров приняты следующие:

- J – момент инерции ротора с присоединенной нагрузкой;
- B_m – коэффициент вязкого трения;
- T_f – момент сухого трения.

В модели коэффициенты момента и противоЭДС приняты равными $k_T = k_E$, что достаточно близко к истине, когда все переменные состояния и параметры представлены в системе СИ. Однако, это обстоятельство следует учитывать при использовании результатов синтеза регуляторов, полученных при помощи структурных моделей, для моделей виртуальных.

На вход механической части подаются момент нагрузки (T_L), ток якоря (i_a), ток возбуждения (i_f). С выхода механической части снимаются противоЭДС электродвигателя (этот сигнал подается на электромагнитную часть модели) и четыре величины (угловая скорость, ток якоря, ток возбуждения, электромагнитный момент), объединенные в вектор и поступающие на выходной измерительный порт «m».

Параметры двигателя, входящие в уравнения (4.20) и (4.21), рассчитываются на основе паспортных данных, помещенных в справочных материалах.

Окно настройки параметров виртуальной модели показано на рисунке 4.4.

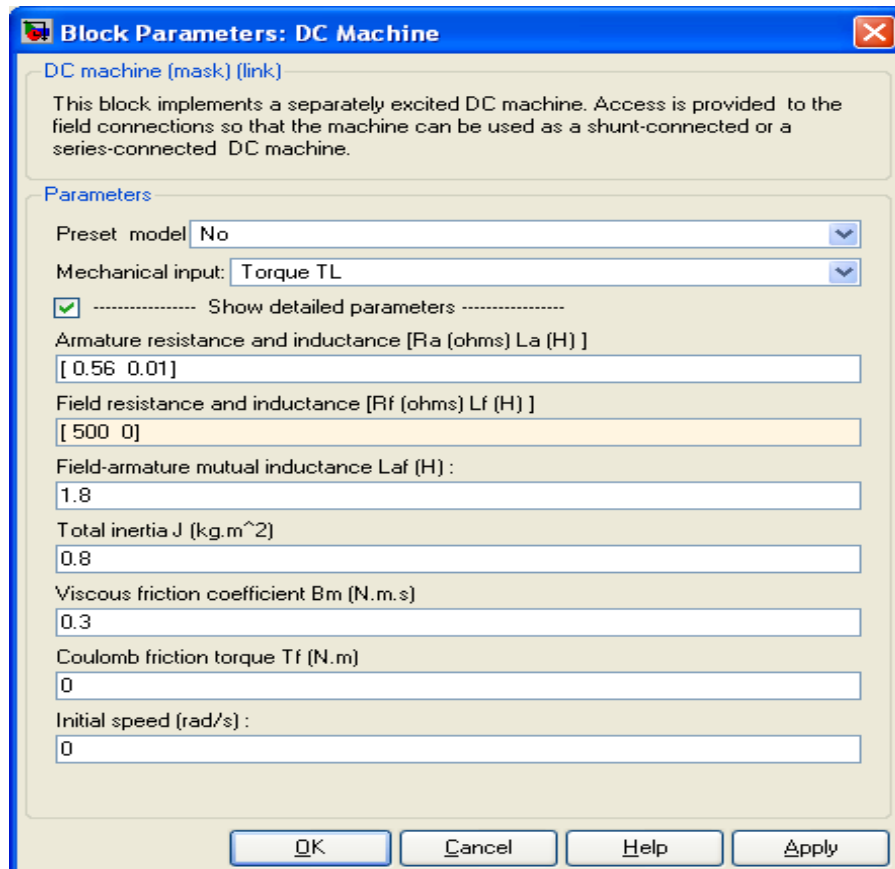


Рисунок 4.4. Окно настройки параметров виртуальной модели электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением

В первом поле **Present model** можно выбрать тип двигателя. В этом случае все параметры будут соответствовать выбранному двигателю. Если в этом поле выбрать **No**, то параметры модели необходимо вводить вручную.

В поле **Mechanical input** можно задать момент **Torque TL** или скорость внешней нагрузки. В первом случае двигатель будет представлять собой источник скорости, величина которой определяется приложенным к валу моментом и параметрами двигателя. Во втором случае двигатель будет представлять собой источник момента, величина которого определяется заданной скоростью и параметрами электродвигателя. В остальных полях указываются данные ДПТ

5. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПРИМЕР ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭМС НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. Исходные данные для электродвигателя постоянного тока, управляемого при помощи якорной цепи, имеют следующие значения:

- номинальная скорость вращения вала двигателя $n_{ном} = 1500$ об/мин;
- номинальное напряжение, подаваемое $U_{ном} = 220$ В;
- номинальная мощность $P_{ном} = 3,2$ кВт;
- номинальный ток $I_{ном} = 18$ А;
- число пар полюсов в конструкции статора электродвигателя $p = 4$;
- момент инерции якоря $J_d = 0,1625$ кг·м²;
- суммарное сопротивление якорной цепи $R = (1,41 + 0,033)$, Ом.
- маховый момент $GD^2 = 0,15$ кг·м²;
- момент нагрузки $M_c = 0 \dots 10$ Нм (подбирается при моделировании);
- момент инерции на валу рабочего механизма $J_{мех} = 55$ кг·м² (если задан);
- скорость вращения вала рабочего механизма $n_{мех} = 100$ об/мин.

5.2. Расчёт параметров моделей ЭМС и построение переходных характеристик при помощи моделей в виде передаточных функций.

Расчёт параметров моделей выполним, используя соотношения, связывающие справочные данные по электродвигателю с параметрами моделей, которые удобно записать в виде программного кода на скрипте с помощью редактора *Edit* и разместить в m-файле.

Используя рассчитанные значения параметров передаточных функций по управлению в виде (4.17) и по возмущению (4.18), можно построить соответствующие графики переходных характеристик и определить по ним показатели качества переходных процессов в ЭМС.

В приложении Б приведён скрипт программы ввода исходных данных **Calculation_model_parameters**, которая осуществляет ввод справочных данных для электродвигателей серии П, приведенных в приложении А, также рассчитывает параметры моделей и строит графики соответствующих переходных характеристик, графики которых показаны на рисунке 5.1.

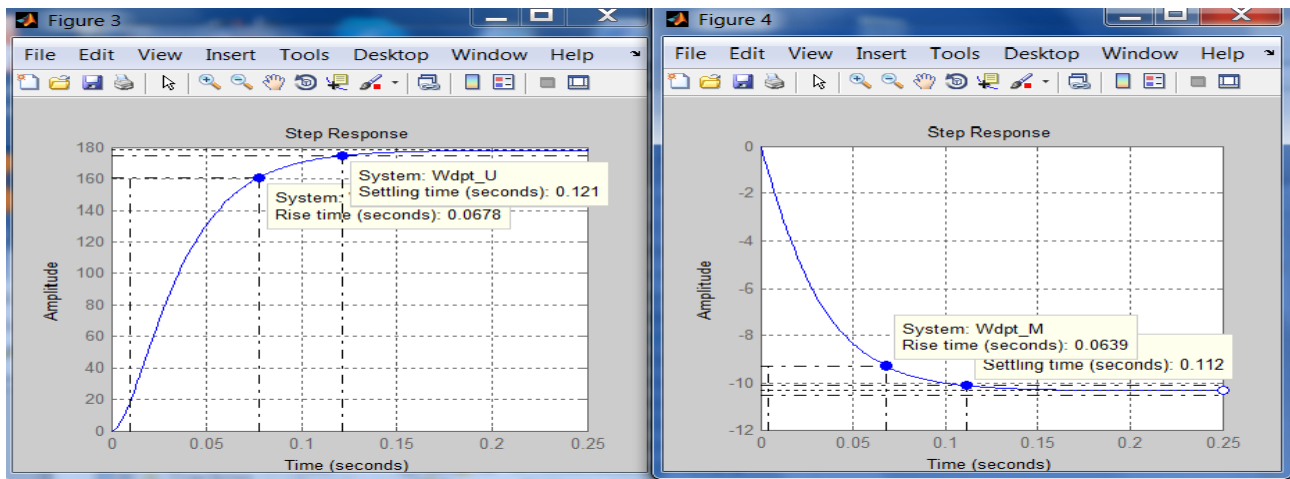


Рисунок 5.1. Переходные характеристики ЭМС, построенные при помощи моделей ДПТ НВ в виде передаточной функции по управлению (слева) и возмущению (справа) при $U_{ном}=220$ В и $M_c=10$ Нм

Показатели качества, определенные методом моделирования ДПТ НВ по передаточным функциям (4.17) или (4.18) из графика (рисунок 5.1) переходной характеристики для угловой скорости при помощи инструмента LTI Viewer, получили следующие числовые значения: время установления $t_p = 0,121$ с; время нарастания $t_n = 0,0678$ с; перерегулирование $\sigma = 0\%$.

5.3. Моделирование динамических (переходных) процессов в ЭМС при помощи модели в форме дифференциальных уравнений пространства состояний выполним в среде визуального моделирования Simulink. Для этой цели по дифференциальным уравнениям (4.4) и (4.5) построим S-модель, используя блоки суммирования и интегрирования, а также блоки библиотеки Simulink, генерирующие и регистрирующие сигналы *Step* и *Scope*. Такой метод моделирования при помощи дифференциальных уравнений называют аналоговым. S-модель для построения переходной характеристики ЭМС с набросом нагрузки аналоговым методом приведена на рисунке 5.2.

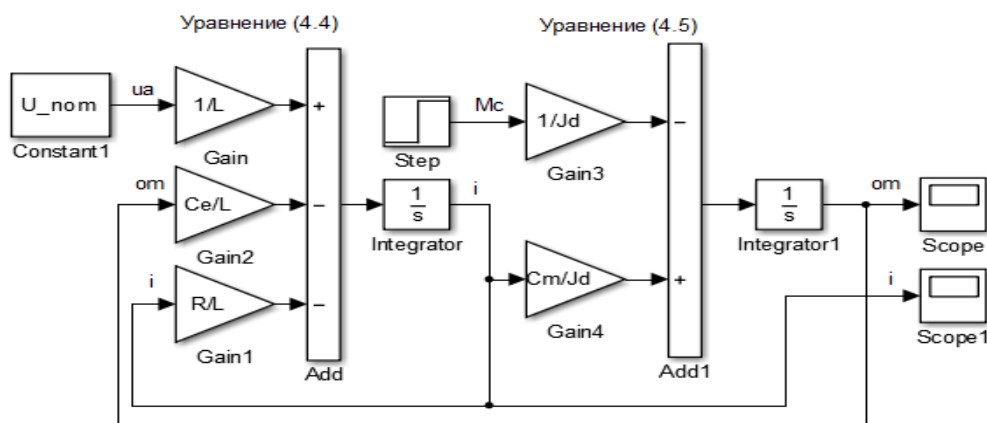


Рисунок 5.2. S-модель для построения переходной характеристики ЭМС
Графики переходных характеристик ЭМС приведены на рисунке 5.3.

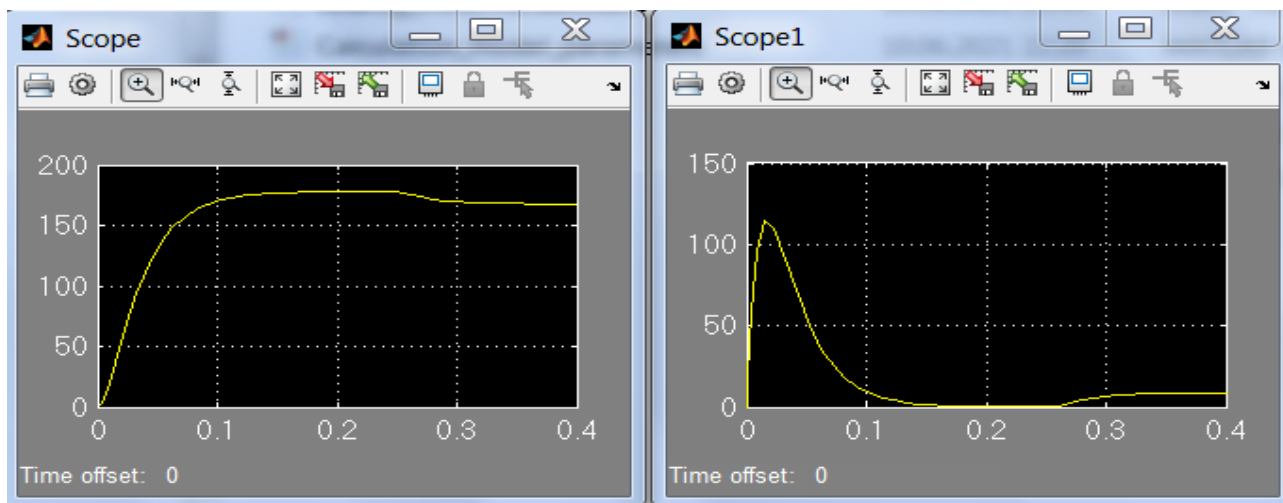


Рисунок 5.3. Графики переходных характеристик ЭМС для угловой скорости (слева) и тока якоря (справа) с учётом наброски нагрузки

Переходные характеристики, графики которых изображены на рисунке 5.3, построены для $u_a = U_{\text{ном}}$ и $M_c = 10 \text{ Нм}$, причём момент нагрузки M_c приложен в момент времени $t = 0,25 \text{ с}$ (наброс нагрузки).

Показатели качества, определенные по переходной характеристике для угловой скорости, имеют следующие числовые значения: время установления $t_p \approx 0,12 \text{ с}$; время нарастания $t_n \approx 0,08 \text{ с}$; перерегулирование $\sigma \approx 0\%$.

5.4. Численное моделирование ЭМС выполним при помощи моделей в форме дифференциальных уравнений пространства состояний. Для решения этой задачи воспользуемся решателями системы MATLAB. Для применения этих решателей следует подготовить текст программы `right_DCM` вычисления правых частей уравнений (4.4) и (4.5) и воспользоваться управляющей программой `Numerical_Sim_DCM`, приведенной в приложении В.

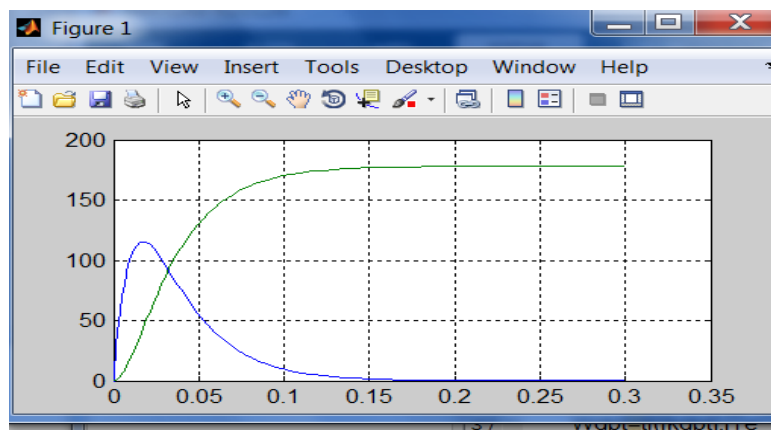


Рисунок 5.4. Графики переходных характеристик ЭМС для угловой скорости и тока якоря при численном моделировании

Тип решателя задаётся в командной строке программы `Numerical_Sim_DCM`. Например, если в качестве решателя используется вычислительный алгоритм

Рунге-Кутты 4 и 5 порядков для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, то командная строка задания типа решателя примет вид

$$[t, x] = \text{ode45}(\text{'right_DCM'}, [t_0, t_f], x_0);$$

Показатели качества определены по переходной характеристики для угловой скорости: время установления $t_p \approx 0,13\text{с}$; время нарастания $t_n \approx 0,08\text{с}$; перерегулирование $\sigma \approx 0\%$.

5.4. Цифровое моделирование динамических (переходных) процессов в ЭМС выполним при помощи модели ДПТ НВ в форме конечно-разностных уравнений (4.9) и (4.10). Для этой цели воспользуемся программой цифрового моделирования Digital_Sim_DCM, приведённой в приложении Г, в текст которой вставим справочные данные электродвигателя, соответствующего заданию.

Результаты цифрового моделирования приведены на рисунке 5.5.

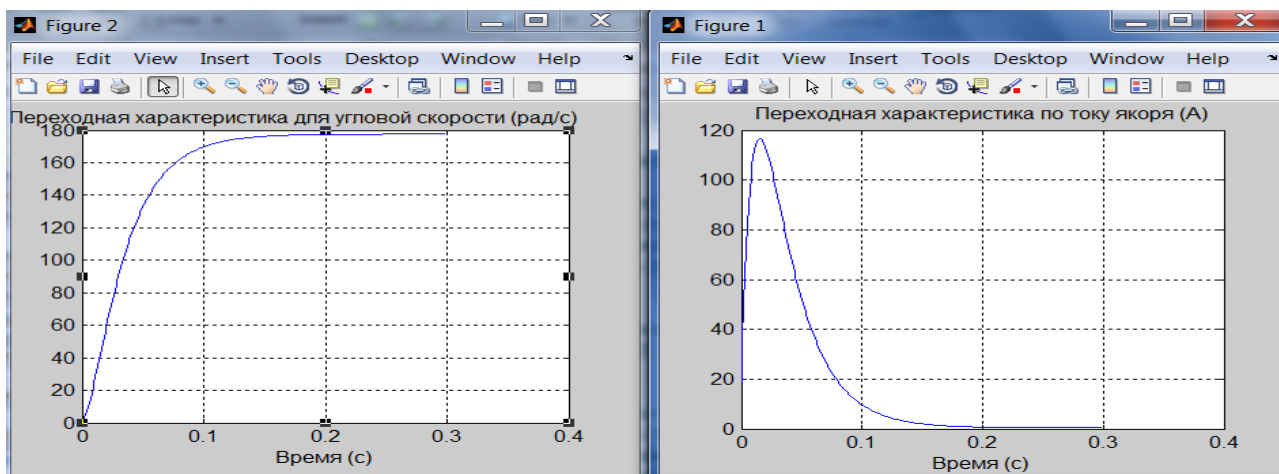


Рисунок 5.5. Переходные характеристики ЭМС для угловой скорости (слева) и тока в якорной цепи (справа), полученные в результате цифрового моделирования.

5.5. Моделирование динамических (переходных) процессов в ЭМС при помощи модели ЭМС в форме структурной схемы

Для моделирования переходных процессов в ЭМС, вызванных управляющим (напряжение u_a) и возмущающим (момент нагрузки M_c) воздействиями, воспользуемся пакетом Simulink и построим S-модель. Для этой цели используем структурную схему, изображённую на рисунке 4.2, и обратимся к библиотеке Simulink, где найдём соответствующие структурной схеме функциональные элементы, блоки моделирования управляющего и возмущающего воздействий соответственно Constant и Step, а также блок Scope для регистрации переходных процессов в виде графика.

Структурная схема S-модели представлена на рисунке 5.6.

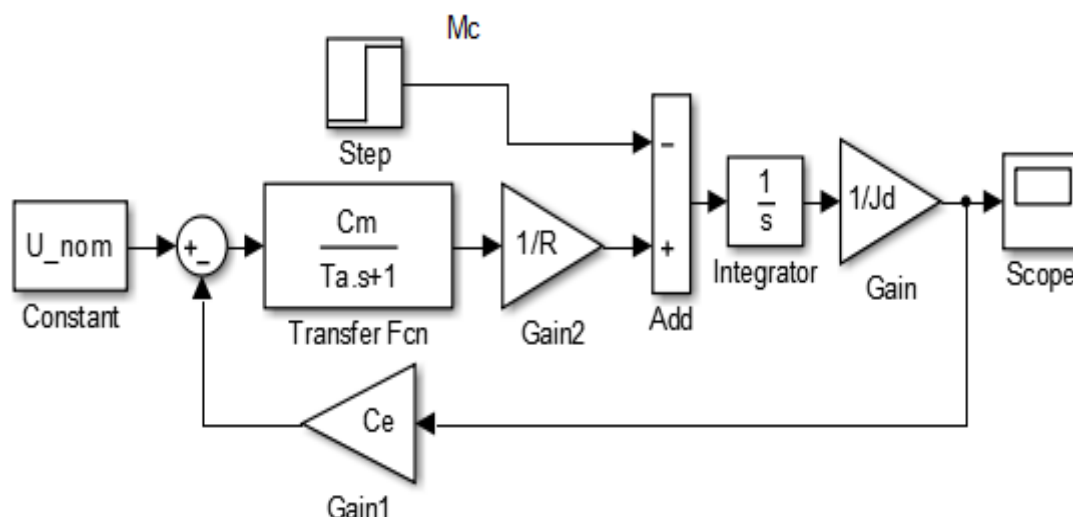


Рисунок 5.6. S-модель ЭМС, построенная на основе структурной схемы ДПТ НВ

Рабочая S-модель создаётся в среде Simulink в виде файла, которому присваивается имя (на латинице) с расширением mdl. Перед запуском S-модели в режим моделирования следует запустить (открыть) файл Calculation_model_parameters.m, где содержится программа, выполняющая ввод справочных данных для электродвигателей серии П и расчёт на их основе параметров, значения которых автоматически передаются в S-модели.

Результаты моделирования в виде графиков переходных характеристик приведены на рисунке 5.7.

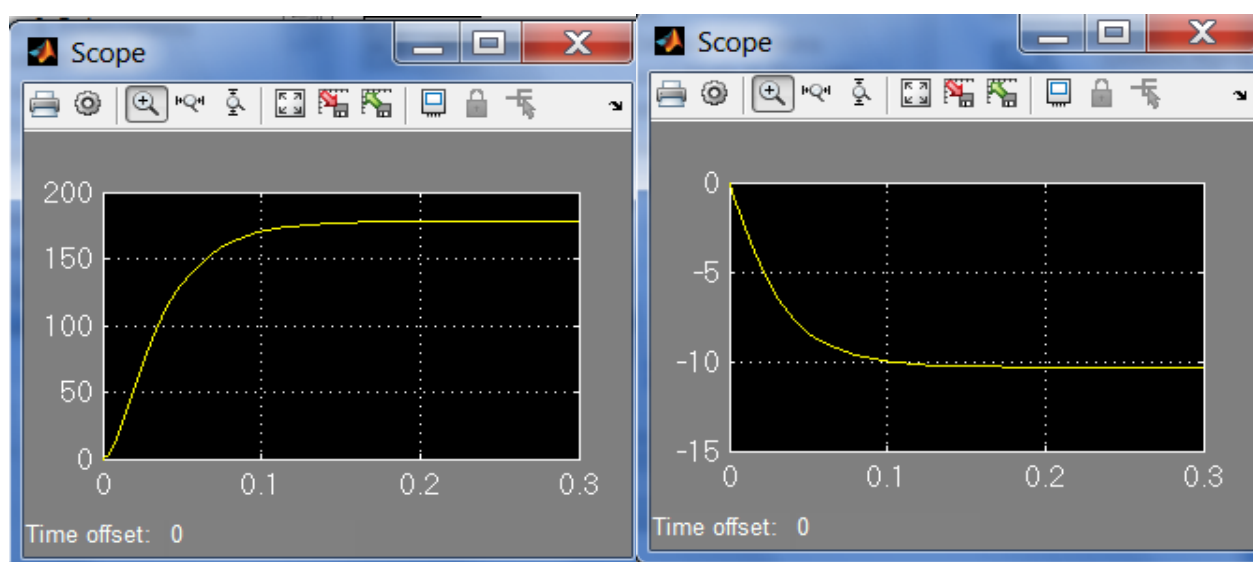


Рисунок 5.7. Переходные характеристики ЭМС по управлению при $u_a = U_{nom}$ и $M_c = 0$ (слева), а также по возмущению при $u_a = 0$ и $M_c = 10 \text{ Нм}$ (справа)

5.6. Виртуальное моделирование прямого пуска в ход ДПТ НВ

Для пуска в ход электрической машины постоянного тока необходимо присоединить к её обмотке возбуждения, соблюдая полярность подключения источник напряжения постоянного тока с номиналом, указанным в справочных данных. После этого, подключив к якорной цепи источник напряжения постоянного тока с номиналом, приведенным в справочнике, можно наблюдать начало вращения вала электродвигателя и выхода на номинальную угловую скорость вращения. При этом от полярности подключения постоянного напряжения к клеммам якорной цепи будет зависеть направление вращения ротора электромашины, а от величины этого напряжения будет зависеть скорость его вращения.

Таким образом, для создания виртуальной модели процесса пуска в ход ДПТ НВ требуются следующие элементы: электромашина постоянного, два источника электропитания (для якорной цепи и цепи возбуждения), а также оборудование, предназначенное для наблюдения за процессом пуска.

Виртуальная модель электрической машины постоянного тока с независимым возбуждением как ЭМС представлена на рисунке 5.8.

Настройку параметров виртуальной модели начнём с блока DC Machine, моделирующего электрическую машину постоянного тока. Для этого откроем окно настройки, пример которого показан на рисунке 4.4. В поле Armature resistance and inductance вместо числовых значений сопротивления и индуктивности якорной цепи вставим переменные L и R , а в поле Total inertia вставим переменную J_d – момент инерции якоря электродвигателя. Остальные поля оставим без изменения.

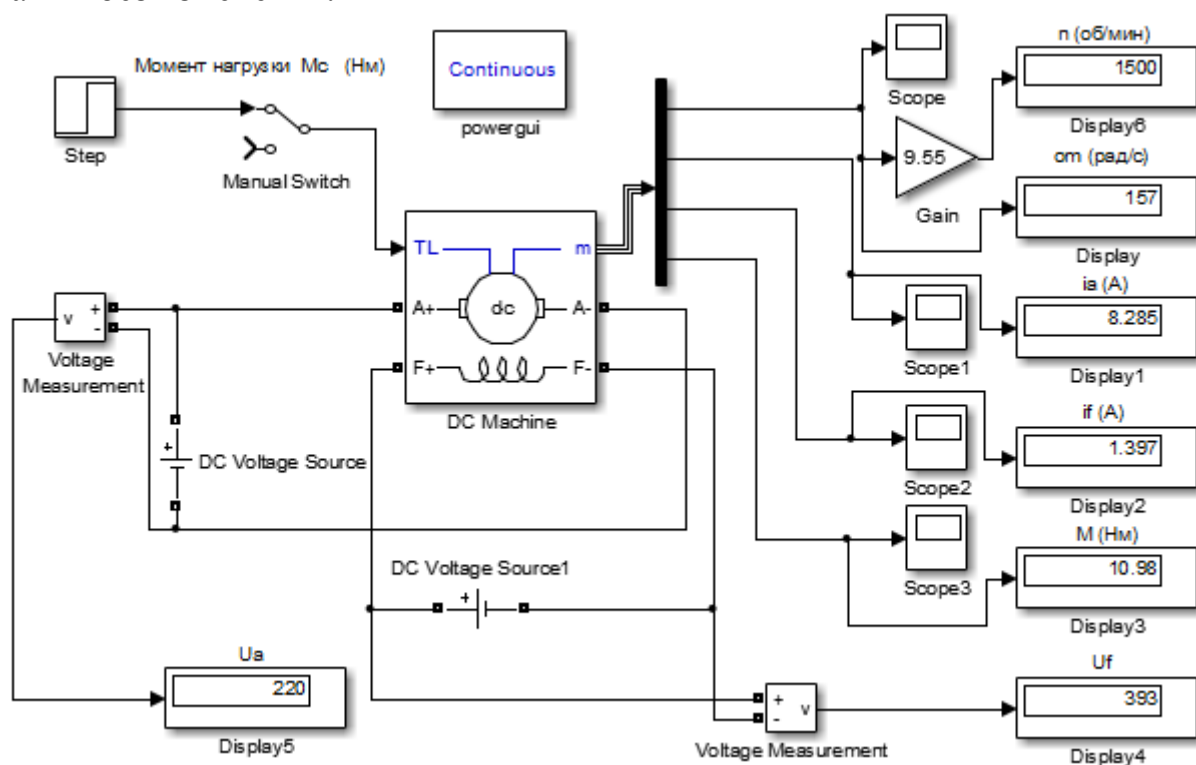


Рисунок 5.8. Виртуальная модель для исследования динамических свойств электромашины постоянного тока с независимым возбуждением как ЭМС

В случае, если к валу электромашины подсоединён рабочий механизм через редуктор с коэффициентом передачи k_{red} , то в поле Total inertia следует вставить приведенный к валу электромашины момент инерции J , который вычисляется по формуле

$$J = J_d + J_{mex} k_{red}^2.$$

Процесс виртуального моделирования следует начинать после запуска программы Calculation_model_parameters, обеспечивающей ввод данных и расчёта параметров моделей. При этом рассчитанные значения параметров L , R и J_d , будут автоматически переданы в библиотечный блок DC Machine. Результаты виртуального моделирования приведены на рисунках 5.9 и 5.10.

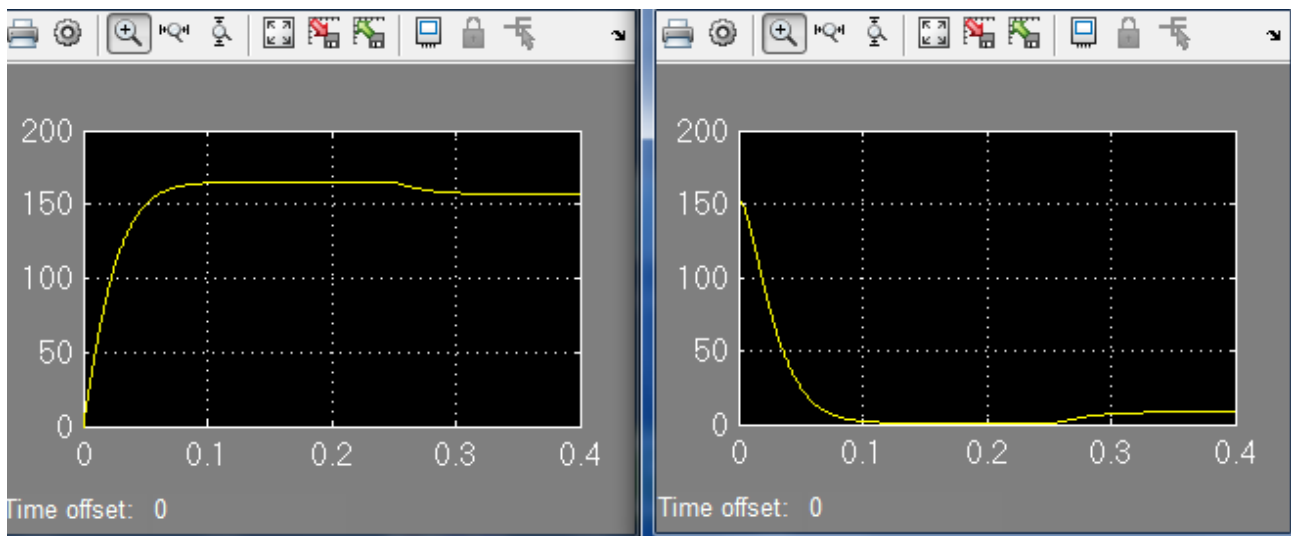


Рисунок 5.9. Переходные характеристики ДПТ НВ для угловой скорости с набросом нагрузки $M_c = 10$ Нм в момент времени 0,25 с (слева) и для тока якорной цепи (справа)

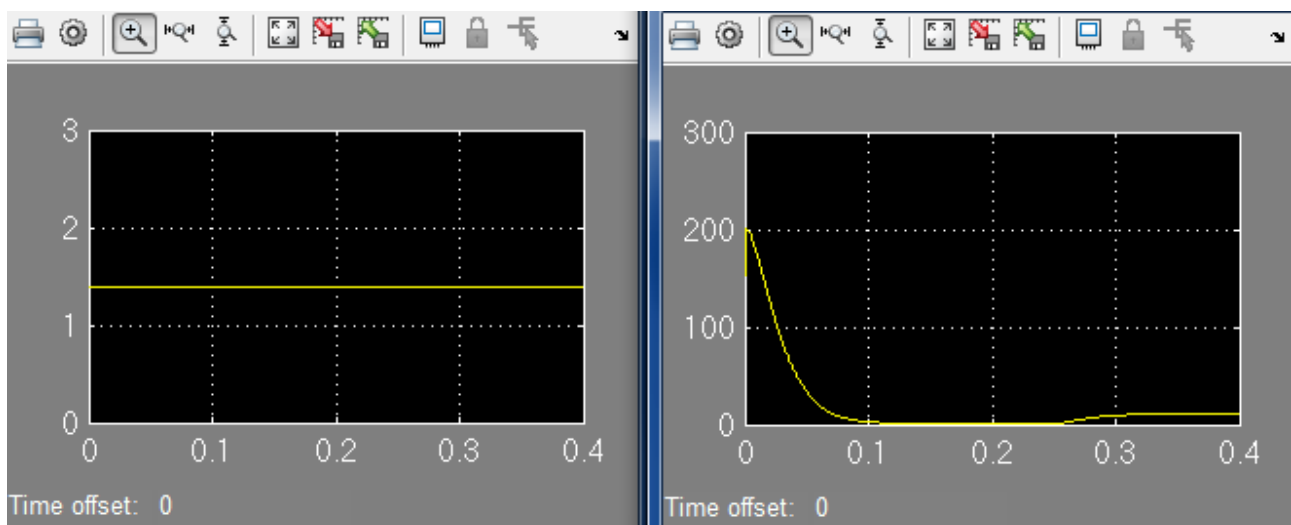


Рисунок 5.10. Графики для тока в обмотке возбуждения (слева) и для электромагнитного момента M (справа) ДПТ НВ

Следует отметить, что в номинальном режиме при напряжении на якорной обмотке $u_a = U_{nom}$ и напряжении на обмотке возбуждения $u_f = U_f = const$ скорость вращения вала ДПТ НВ должна соответствовать номинальному значению $n_{nom} = 1500$ об/мин. Поэтому подберём экспериментально напряжение возбуждения $U_f = 393$ В, при котором скорость вращения вала электродвигателя достигнет номинального значения.

По переходной характеристике на рисунке 5.10 для угловой скорости определим следующие показатели качества:

время установления – $t_p \approx 0,1$ с;

время нарастания – $t_n \approx 0,05$ с;

перерегулирование – $\sigma \approx 0\%$.

Заключение

Результаты анализа переходных характеристик ЭМС на базе ДПТ НВ при помощи различных моделей и методов моделирования показали, что полученные показатели качества динамических процессов в исследуемой ЭМС имеют примерно одинаковые значения.

6. СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РГР

Оформление результатов РГР следует выполнить в форме пояснительной записки, которая выполняется на листах формата А4 и содержит титульный лист с указанием группы, фамилии студента и преподавателя, а также варианта задания, листы с формулировкой задания, описанием хода выполнения пунктов задания, результатов модельных экспериментов, которые должны иллюстрироваться соответствующими S-моделями, графиками и числовыми значениями показателей качества, определённых в ходе моделирования. На отдельном листе с заголовком «Заключение» приводятся формулировки выводов по каждому пункту задания с обязательным указанием числовых значений с соответствующими физическими размерностями показателей, характеризующих динамические свойства исследуемого объекта.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 7.1 Какие существуют формы математического описания электромеханических систем. Приведите примеры.
- 7.2 Как по дифференциальному уравнению ЭМС построить её передаточную функцию?
- 7.3 Как по функциональной схеме построить структурную схему и преобразовать её в S-модель?
- 7.4 Приведите пример ЭМС и одну из форм её моделей.
- 7.5 Как по математической модели ЭМС в виде дифференциального уравнения построить S-модель?

- 7.6 Если известна математическая модель ЭМС, то как применить систему *MATLAB & Simulink* для её моделирования.
- 7.7 Поясните на примере, как настраивается библиотечный блок DC Machine в пакете *SimPowerSystems*?
- 7.8 Приведите пример математической модели ДПТ НВ в форме передаточных функций и соответствующую ей S-модель.
- 7.9 Пример моделирования ДПТ НВ в среде Simulink.
- 7.10 Поясните на примере ДПТ НВ процесс моделирования его в среде MATLAB (скрипт программы).
- 7.11 Цифровое моделирование. Пример цифровой модели ДПТ НВ.
- 7.12 Виртуальная модель. Пример виртуальной модели процесса пуска в ход ДПТ НВ.
- 7.13 Моделирование дифференциальных уравнений в среде Simulink. Пример.
- 7.14 Численное моделирование. Применение решателей дифференциальных уравнений в среде MATLAB.
- 7.15 Цифровое моделирование. Приведение дифференциальных уравнений к конечно-разностным. Пример цифрового моделирования ДПТ НВ.
- 7.16 Пример построения переходной характеристики ЭМС и определение показателей качества.
- 7.17 Приведите пример расчёта параметров модели ЭМС в форме передаточной функции по справочным данным электродвигателя.
- 7.18 Приведите пример исследования переходной характеристики при набросе нагрузки в виде момента на валу электродвигателя.
- 7.19 Поясните на примере порядок построения виртуальной модели ЭМС.
- 7.20 Сделайте сравнительный анализ методов моделирования, применяемых для исследования переходных характеристик ЭМС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
2. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.

Справочные данные двигателей постоянного тока серии П

$n_{ном} = 1500$ об/мин

Таблица А1

№ варианта	Тип двигателя	$U_{ном}, В$	$P_{ном}, кВт$	$I_{ном}, А$	$2p$	$w_{я}$	$r_{я}+r_{дп}, Ом$	$r_{ст}, Ом$	$GD^2, кг*М^2$	$J_{мех}, кгМ^2$	k_{red}	$n_{мех}$ об/мин
1	П-11	110	0,3	4,3	2	826	5,14	0,236	0,001	10	1/15	100
2		220	0,3	2,06	2	1652	22,6	0,88	0,001			
3	П-12	110	0,45	5,2	2	574	2,97	0,125	0,015	15	1/15	100
4		220	0,45	2,88	2	1176	11,75	0,25	0,015			
5	П-21	110	0,7	8,9	2	558	1,52	0,063	0,045	20	1/15	100
6		220	0,7	4,4	2	1188	6,59	0,24	0,045			
7	П-22	110	1,0	11,7	2	414	0,96	0,062	0,055	30	1/15	100
8		220	1,0	5,9	2	864	4,17	0,25	0,055			
9	П-31	110	1,5	17,4	2	342	0,594	0,026	0,085	35	1/15	100
10		220	1,5	8,6	2	756	2,455	0,212	0,085			
11	П-32	110	2,2	24,5	2	234	0,285	0,02	0,105	40	1/15	100
12		220	2,2	12,2	2	468	1,35	0,092	0,105			
13	П-41	110	3,2	36,1	4	243	0,283	0,007	0,15	40	1/15	100
14		220	3,2	18,0	4	540	1,41	0,033	0,15			
15	П-42	110	4,5	50,6	4	162	0,153	0,0048	0,18	55	1/10	150
16		220	4,5	25,3	4	351	0,65	0,0392	0,18			
17	П-51	110	6,0	66	4	155	0,1026	0,0044	0,35	60	1/10	150
18		220	6,0	33	4	372	0,565	0,0073	0,35			
19	П-52	110	8,0	86	4	124	0,0656	0,0022	0,40	65	1/10	150
20		220	8,0	42,6	4	248	0,298	0,0068	0,40			
21	П-61	220	11	57,3	4	248	0,199	0,006	0,56	80	1/15	100
22	П-62	220	14	73	4	186	0,1183	0,004	0,65	100	1/10	150

Параметры модели ЭМС рассчитываются по следующим соотношениям:

$J_d = GD^2 / 4$ – момент инерции якоря, (кгм²), где GD^2 - маховый момент [кгМ²];

$\omega_{ном} = \frac{\pi n_{ном}}{30} = \frac{n_{ном}}{9,55}$ – номинальное значение угловой скорости вала [рад/с],

где $n_{ном}$ – номинальное значение угловой скорости вращения вала [об/мин];

$L = 0,6 \frac{U_{ном}}{\omega_{ном} \cdot I_{ном} \cdot p}$ – индуктивность обмотки якоря [Гн], где p – число пар полюсов;

$C_e = \frac{U_{ном} - RI_{ном}}{\omega_{ном}}$ – электромагнитная постоянная [Вс/рад];

$C_m = \frac{M_{ном}}{I_{ном}}$ – электромеханическая постоянная [Нм/А], где $M_{ном} = 1000 \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} \frac{[кВт]}{[с^{-1}]}$.

**Программа ввода справочных данных и вычисления параметров
передаточной функции ДПТ НВ, а также построения с её помощью
переходной характеристики**

```
% Program Calculation_model_parameters
% Вычисление параметров передаточной функции ДПТ
clear all; clc; % Очистка памяти и экрана
global R L Jd Ce Cm U_nom
% Ввод исходных справочных данных по ДПТ серии П 62
n_nom=1500 % Номинальная скорость [об/мин]
U_nom=220 % Номинальное напряжение [В]
P_nom=14 % Номинальная мощность {кВт}
I_nom=73 % Номинальный ток [А]
p2=4 % Число пар полюсов
R=0.1183+0.004 % Суммарное сопротивление якорной цепи [Ом]
GD2=0.65 % Маховый момент [кгм^2]

%Расчет параметров модели ДПТ
omega_nom=n_nom/9.55 % Номинальная скорость [рад/с]
L=0.6*U_nom/(omega_nom*I_nom*p2) % Индуктивность якоря [Гн]
Jd=GD2/4 % Момент инерции якоря двигателя [Нм^2]
M_nom=1000*P_nom/omega_nom % Номинальный момент [Нм]
Ce=(U_nom-R*I_nom)/omega_nom % Электромагнитная постоянная
Cm=M_nom/I_nom % Электромеханическая постоянная

% Параметры передаточных функций ДПТ
Te=L/R % Электромагнитная постоянная времени [с]
Ta=Te
Tm=R*Jd/(Ce*Cm) % Электромеханическая пост. времени [с]
kdpt=1/Ce % Коэффициент усиления ДПТ по управлению
kdpt_M=R/(Ce*Cm) % Коэффициент усиления ДПТ по возмущению
% Построение передаточной функции ДПТ
ksi=0.5*sqrt(Tm/Te) % Коэффициент демпфирования
if ksi < 1
Om0=1/sqrt(Te*Tm) % Собственная частота
T0=3.14/Om0 % Эквивалентная постоянная времени колеб. звена
Wdpt=tf([kdpt],[T0^2 2*ksi*T0 1]) % ПФ в форме колебат. звена
s=pole(Wdpt) % Полюсы ПФ ДПТ НВ
figure(1);step(Wdpt); grid on % Построение переходной х-ки по ПФ ДПТ НВ
else
Wdpt=tf([kdpt],[Te*Tm Tm 1]) % ПФ в виде инерционного звена 2 поряд-ка
s=pole(Wdpt) % Полюсы ПФ ДПТ НВ
T1=abs(1/s(1))
T2=abs(1/s(2))
figure(2);step(Wdpt); grid on % Построение переходной х-ки по ПФ ДПТ НВ
end
```

Управляющая программа численного моделирования ЭМС

```

% Numerical_Sim_DCM
% Численное моделирование ДПТ П41_14
close all
global a11 a12 a21 a22 b11 b22 u Mc
% Ввод исходных справочные данных по ДПТ НВ серии П 41
n_nom=1500 % Номинальная скорость [об/мин]
U_nom=220 % Номинальное напряжение [В]
P_nom=3.2 % Номинальная мощность {кВт}
I_nom=18 % Номинальный ток [А]
p2=4 % Число пар полюсов
R=1.41+0.033i % Суммарное сопротивление якорной цепи [Ом]
GD2=0.15 % Маховый момент [кгм^2]
%Расчет параметров модели ЭМС на базе ДПТ НВ
omega_nom=n_nom/9.55 % Номинальная скорость [рад/с]
L=0.6*U_nom/(omega_nom*I_nom*p2) % Индуктивность якоря [Гн]
Jd=GD2/4 % Момент инерции якоря двигателя [Нм^2]
M_nom=1000*P_nom/omega_nom % Номинальный момент [Нм]
Ce=(U_nom-R*I_nom)/omega_nom % Электромагнитная постоянная
Cm=M_nom/I_nom % Электромеханическая постоянная

a11=-R/L; a12=-Ce/L; a21=Cm/Jd; a22=0;
b11=1/L; b22=-1/Jd;
u=U_nom; Mc=0.05;
%Ввод начальных значений
t0=0; tf=0.3;
x0=[0;0];
% Вызов программы вычисления правых частей ДУ
[t, x] = ode45('right_DCM', [t0, tf], x0);
% Вывод графика переходных хаактеристик
figure(1)
plot(t, x), grid;

```

Программа вычисления правых частей ДУ – модели ЭМС

```

function [dx] = right_DCM(t, x)
global a11 a12 a21 a22 b11 b22 u Mc
dx=zeros (2,1);
dx(1)=a11*x(1)+a12*x(2)+b11*u;
dx(2)=a21*x(1)+a22*x(2)+b22*Mc;
end

```

Программа цифрового моделирования ЭМС

```

% Digital_Model_DCM
% Цифровое моделирование ДПТ по 2 разностным уравнениям
clear all; close all;

% Ввод исходных данных
% Ввод исходных справочные данных по ДПТ НВ серии П 41
n_nom=1500 % Номинальная скорость [об/мин]
U_nom=220 % Номинальное напряжение [В]
P_nom=3.2 % Номинальная мощность {кВт}
I_nom=18 % Номинальный ток [А]
p2=4 % Число пар полюсов
R=1.41+0.033i % Суммарное сопротивление якорной цепи [Ом]
GD2=0.15 % Маховый момент [кгм^2]

%Расчет параметров модели ЭМС на базе ДПТ НВ
omega_nom=n_nom/9.55 % Номинальная скорость [рад/с]
L=0.6*U_nom/(omega_nom*I_nom*p2) % Индуктивность якоря [Гн]
Jd=GD2/4 % Момент инерции якоря двигателя [Нм^2]
M_nom=1000*P_nom/omega_nom % Номинальный момент [Нм]
Ce=(U_nom-R*I_nom)/omega_nom % Электромагнитная постоянная
Cm=M_nom/I_nom % Электромеханическая постоянная

T=0.001 % Задание периода дискретизации T=(L/R)/15

% Вычисление коэффициентов разностных уравнений цифровой модели
a11=1-T*R/L; a12= -T*Ce/L; a21=T*Cm/Jd; a22=1; b11=T/L; b22= -T/Jd;

% Ввод начальных значений
k=0; i=0; om=0; l=1; u=U_nom; Mc = 10; tf=0.4;

% Цикл формирования массивов значений тока и угловой скорости
while k<= tf
    i= a11*i + a12*om+b11*u;
    om=a21*i+a22*om+ b22* Mc;
    Omega(l)=om;
    Current(l)=i;
    Time(l)=k;
    k=k+T;
    l=l+1;
end

% Вывод графиков после завершения всех циклов
figure(1)
plot(Time, Current); grid; % Вывод графика тока якоря ДПТ
figure(2)
plot(Time, Omega); grid; %Вывод графика угловой скорости вала ДПТ

```