**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**

**по курсу «Электрический привод»**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Вариант № 4

Автор работы: Кирбаба Д.Д.

Группа: R3438

Преподаватель: Маматов А.Г.

“16” октября 2023 г.

Работа выполнена с оценкой \_\_\_

Дата защиты “\_\_” \_\_\_\_\_\_\_\_ 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

[Цель работы 3](#_Toc148790215)

[Ход работы 3](#_Toc148790216)

[Задание 1. Расчет кинематической схемы 3](#_Toc148790217)

[1. Постановка задачи 3](#_Toc148790218)

[2. Решение задачи 4](#_Toc148790219)

[Задание 2. Расчет кинематической схемы винтового домкрата с электроприводом 6](#_Toc148790220)

[1. Постановка задачи 6](#_Toc148790221)

[2. Решение задачи 7](#_Toc148790222)

[Задание 3. Определение параметров расчетных схем и резонансных частот 10](#_Toc148790223)

[1. Пяти-массовая система тел. 11](#_Toc148790224)

[2. Трех-массовая система тел. 13](#_Toc148790225)

[3. Двух-массовая система тел. 14](#_Toc148790226)

[Задание 4. Моделирование двух-массовой нагрузки в Simulink 14](#_Toc148790227)

[1. Постановка задачи 14](#_Toc148790228)

[2. Задание 1. 15](#_Toc148790229)

[3. Задание 2. 16](#_Toc148790230)

[4. Задание 3. 16](#_Toc148790231)

[5. Задание 4. 17](#_Toc148790232)

[Выводы 20](#_Toc148790233)

# Цель работы

Освоение принципов расчета кинематических схем, определения их параметров и резонансных частот, а также моделирования механики электропривода.

# Ход работы

## Задание 1. Расчет кинематической схемы

### Постановка задачи

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Рисунок 1. Кинематическая схема винтового домкрата с электроприводом.

Исходные данные:

Определить:

* Передаточное отношение и число степеней редуктора;
* Мощность и вращающий момент двигателя;
* Момент инерции, приведенный к валу двигателя, считая моменты инерции валов всех ступеней редуктора равными

Передачу с числом отнести к выходному валу редуктора. Момент инерции входного вала редуктора принять равным

### Решение задачи

Найдем требуемую скорость вращения домкрата:

Определим передаточное число редуктора:

Определим количество степеней редуктора:

Определим развиваемый нагрузкой момент:

Приведем момент нагрузки к валу двигателя:

Рассчитаем мощность двигателя:

Найдем приведенные моменты инерции элементов системы:

Найдем суммарный приведенный момент инерции:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19  20  21  22  23  24  25  26  27  28  29  30  31  32  33  34  35  36  37  38  39  40  41  42 | %% initials  G\_load = **5000**; % kg \* m / s^2  g = **9.8**; % gravity constant  m\_load = G\_load / g;  v\_load = **1** / **100**; % m / s  n\_eng = **725**; %  w\_eng = n\_eng / **60** \* (**2** \* pi); % rad / s  eta\_scr = **0.7**;  eta\_tooth = **0.9**;  j\_max = **5**;  s = **12** \* **10**^(-**3**); % m  J\_1 = **0.005**; % kg \* m^2  J\_2 = **0.02**; % kg \* m^2  J\_3 = J\_2;  %% calculation  w\_scr = **2** \* pi \* v\_load / s; % rad / s  j = w\_eng / w\_scr;  deg\_red = log(j) / log(**5**);  %% results  j\_12 = j\_max;  j\_23 = j / j\_max;  %% calculation  M\_load = G\_load \* v\_load / w\_scr;  M\_load\_s = M\_load / (j\_12 \* j\_23 \* eta\_tooth^**2** \* eta\_scr);  P\_eng = M\_load\_s \* w\_eng;  J\_1\_s = J\_1;  J\_2\_s = J\_2 / j\_12^**2**;  J\_3\_s = J\_3 / j\_12^**2** / j\_23^**2**;  J\_load\_s = m\_load \* (v\_load / w\_eng)^**2**;  J\_sum\_s = J\_1\_s + J\_2\_s + J\_3\_s + J\_load\_s; | |

Листинг 1. MATLAB код расчета задания 1.

## Задание 2. Расчет кинематической схемы винтового домкрата с электроприводом

### Постановка задачи

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Рисунок 2. Кинематическая схема винтового домкрата.

Определить скорость вращения, момент на валу и мощность двигателя, необходимого для привода домкрата, предназначенного для подъема груза массой со скоростью , и произвести его выбор из серии .

Если номинальная скорость не соответствует расчётной, скорректировать ременную передачу изменением диаметра шкива двигателя

Исходные данные:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | |  |  | |  |  | |  |  | |  |  | |  |
| 4400 | 0.016 | | 17 | 31 | | 22 | 54 | | 22 | 76 | | 150 | 200 | | 0.01 |
|  | | | | | | | | | | | | | | | |
|  |  | |  |  | |  |  | |  |  | |  |  | |  |
|  | | | | | | | |  | | | | | | | |
|  |  | |  | 0.14 | | 0.3236 | 0.0809 | | 0.2690 | 0.1047 | | 0.4685 | 0.1213 | | 0.3329 |
|  | | | | | | | | | | | | | | | |
|  | |  | | |  | | |  | | |  | | |  | |
| 0.95 | | 0.9 | | | 0.6 | | | 0.97 | | | 1 | | | 1 | |

Таблица 1. Исходные данные.

### Решение задачи

Определим скорость вращения на выходном валу винтового домкрата:

Найдем передаточные числа ременной передачи и степеней редукторов:

Тогда передаточное число к валу двигателя:

Рассчитаем теперь скорость вращения двигателя:

Радиус приведения к валу двигателя усилия

Определим суммарный статический момент нагрузки, приведенный к валу двигателя:

В нашем случае:

И тогда мощность двигателя:

Выберем ближайший по мощности АД:

A screenshot of a computer

Description automatically generatedA screenshot of a computer

Description automatically generated

Таблица 2. Технические характеристики выбранного двигателя.

Так как номинальная скорость не соответствует расчетной, то требуется корректировка диаметра шкива.

Найдем момент вала второго шкива:

Найдем аналогично скорость вращения второго шкива:

Жесткость из линеаризованной механической характеристики:

Теперь определим новый диаметр шкива, а именно найдем новое передаточное число:

Тогда диаметр шкива:

Новое передаточное число системы:

Итого:

- скорость вращения двигателя:

- момент на валу:

- мощность:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19  20  21  22  23  24  25  26  27  28  29  30  31  32  33  34  35  36  37  38  39  40  41 | %% calculations  n\_scr = **60** \* v\_load / (z \* s); % rpm  w\_scr = **2** \* pi \* n\_scr / **60**; % rad/s  j\_12 = d\_2 / d\_1;  j\_23 = z\_2 / z\_1;  j\_34 = z\_4 / z\_3;  j\_45 = z\_6 / z\_5;  j\_15 = j\_12 \* j\_23 \* j\_34 \* j\_45;  n\_eng = n\_scr \* j\_15; % rpm  w\_eng = **2** \* pi \* n\_eng / **60**; % rad/s  r\_load\_wave = v\_load / w\_eng;  M\_c = m\_load / **2** \* g \* r\_load\_wave / (eta\_belt \* eta\_tooth^**3** \* eta\_scr) \* (**1** + **1** / eta\_chain);  N\_eng = M\_c \* w\_eng;  %% engine 5A80MB2 data  N\_nom = **2200**;  M\_nom = **7.4**;  n\_0 = **3000**;  w\_0 = **2** \* pi \* n\_0 / **60**;  n\_nom = **2850**;  w\_nom = **2** \* pi \* n\_nom / **60**;  J\_eng = **0.0021**;  %% recalculating the d\_1  M\_2 = M\_nom \* j\_12 \* eta\_belt;  w\_2 = w\_eng / j\_12;  h = M\_nom / (w\_0 - w\_nom);  j\_12\_new = w\_0 / **2** / w\_2 \* (**1** + sqrt(**1** - (**4** \* M\_2 \* w\_2)/(eta\_belt \* h \* w\_0^**2**)));  d\_1\_new = d\_2 / j\_12\_new;  j\_15\_new = j\_12\_new \* j\_23 \* j\_34 \* j\_45;  n\_eng\_new = n\_scr \* j\_15\_new;  w\_eng\_new = **2** \* pi \* n\_eng\_new / **60**;  r\_load\_wave\_new = v\_load / w\_eng\_new;  M\_c\_new = m\_load / **2** \* g \* r\_load\_wave\_new / (eta\_belt \* eta\_tooth^**3** \* eta\_scr) \* (**1** + **1** / eta\_chain);  N\_eng\_new = M\_c\_new \* w\_eng\_new; | |

Листинг 2. Код для расчета 2 задания.

## Задание 3. Определение параметров расчетных схем и резонансных частот

Динамический момент инерции ротора:

Рассчитаем приведенные моменты инерции отдельных звеньев:

Жесткость

Приведенные жесткости:

Для поиска резонансных частот для каждой системы будем исследовать матрицы вида:

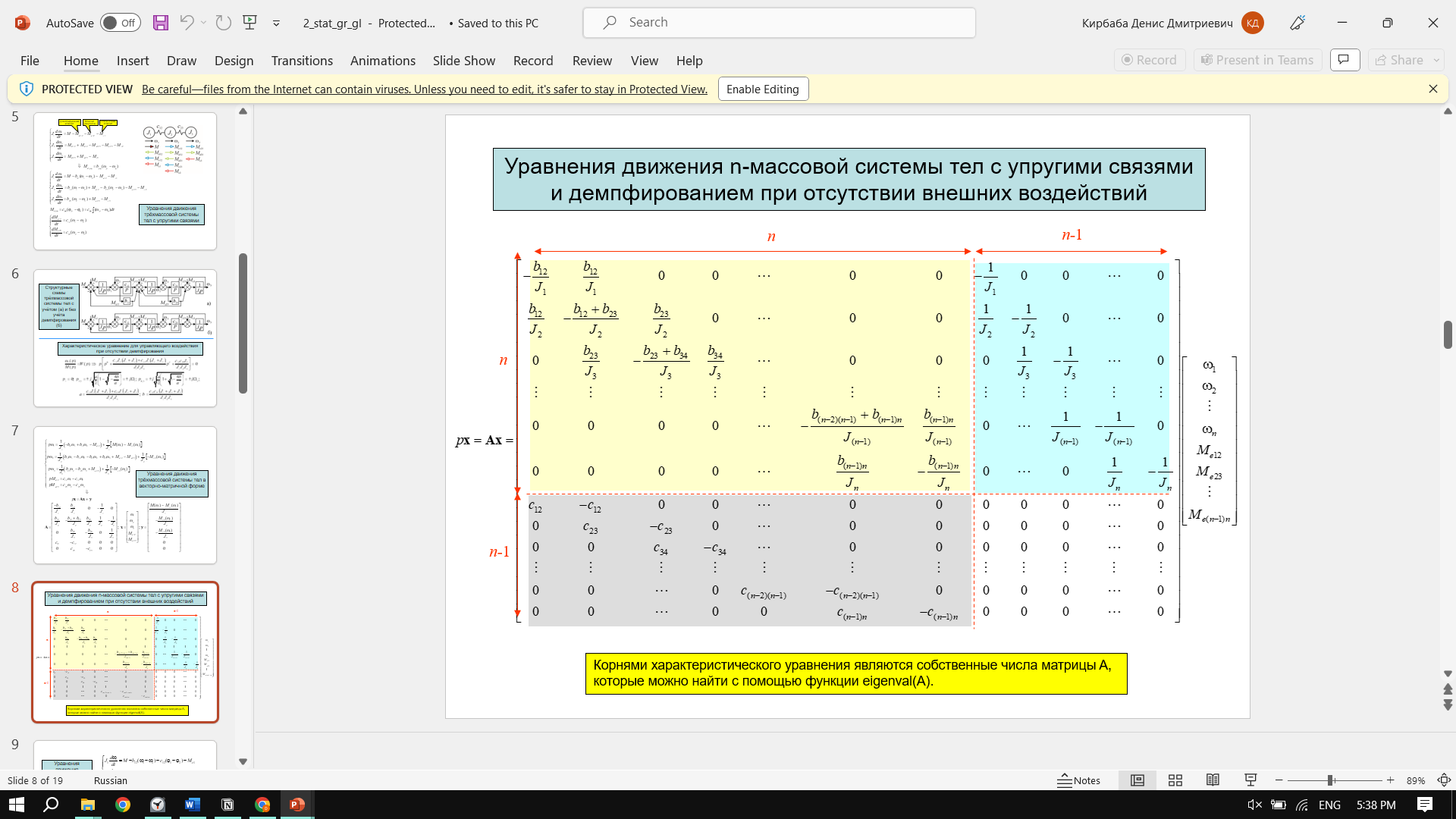


Рисунок 3. Матрица исследуемой системы.

Однако так как в нашем случае мы не учитываем демпфирование, то коэффициенты

### Пяти-массовая система тел.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Рисунок 4. Схема системы.

Рассчитаем параметры системы:

Теперь рассчитаем резонансные частоты данной системы. Для этого составим матрицу на основе параметров системы:

Найдем ее собственные числа и поделим их на :

Тогда резонансные частоты пяти-массовой системы:

### Трех-массовая система тел.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Рисунок 5. Схема системы.

Рассчитаем параметры системы:

Теперь рассчитаем резонансные частоты данной системы. Для этого составим матрицу на основе параметров системы:

Найдем ее собственные числа и поделим их на :

Тогда резонансные частоты пяти-массовой системы:

### Двух-массовая система тел.

A screenshot of a computer

Description automatically generated

Рисунок 6. Схема системы.

Рассчитаем параметры системы:

Теперь рассчитаем резонансные частоты данной системы. Для этого составим матрицу на основе параметров системы:

Найдем ее собственные числа и поделим их на :

В итоге получим резонансные частоты двух-массовой системы:

## Задание 4. Моделирование двух-массовой нагрузки в Simulink

### Постановка задачи

Дана система:

, где

– момент инерции первой массы;

– момент инерции второй массы;

– коэффициент жесткости;

– коэффициент демпфирования;

– статический момент действующий на первую массу (сухое трение);

– статический момент действующий на вторую массу (активный момент);

– момент электрического двигателя.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

Таблица 3. Исходные данные для задания 4.

### Задание 1.

Получить передаточную функцию (ПФ) от момента двигателя к скорости вращения первой массы.

Преобразуем систему в матричный вид:

Для того, чтобы найти передаточную функцию , создадим систему в MATLAB и используя матричные преобразования, выразим необходимую нам ПФ.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | 1  2  3  4  5  6  7  8  9  10  11  12  13  14  15  16  17  18  19  20  21  22 | %% initial data  J\_1 = **5.8**;  J\_2 = **36.8**;  K\_12 = **10**^**6**;  b\_12 = **100**;  M\_L1 = **2**;  M\_L2 = **10**;  M = **20**;  %% evaluate the system  A = [-b\_12/J\_1 b\_12/J\_1 -**1**/J\_1;  b\_12/J\_2 -b\_12/J\_2 **1**/J\_2;  K\_12 -K\_12 **0**];  B = [**1**/J\_1;  **0**;  **0**];  sys = ss(A, B, [**1** **0** **0**], **0**);  syms p  W = [**1** **0** **0**] \* inv(**1**i \* p \* eye(**3**) - A) \* B | |

Листинг 3. Поиск ПФ с помощью MATLAB.

Итого,

### Задание 2.

Аналитически посчитать частоты анти-резонанса и резонанса.

Для поиска частот резонанса и анти-резонанса необходимо построить АЧХ по вычисленной уже ПФ и найти её экстремумы, то есть продифференцировать и приравнять к нулю. Воспользуемся MATLAB для данных операций.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| |  |  | | --- | --- | | 1  2  3  4  5 | W\_real = real(W);  W\_imag = imag(W);  amp\_freq\_char = sqrt(W\_real^**2** + W\_imag^**2**);  diff\_amp\_freq\_char = diff(amp\_freq\_char);  answer = double(solve(diff\_amp\_freq\_char == **0**, p, Real=true)) | |

Листинг 4. Расчет частот резонанса и анти-резонанса.

Итого,

### Задание 3.

Построить АЧХ по полученной ПФ, убедиться, что частоты анти-резонанса и резонанса совпадают с рассчитанными.

A graph of a graph

Description automatically generated

Рисунок 7. АЧХ системы.

Как видно, минимум и максимум действительно соответствуют аналитически рассчитанным значениям.

### Задание 4.

Построить модели двух-массовой нагрузки в Simulink и Simscape. Убедиться, что модели работают идентично. Убедиться, что частота колебаний скорости соответствует рассчитанной резонансной частоте.

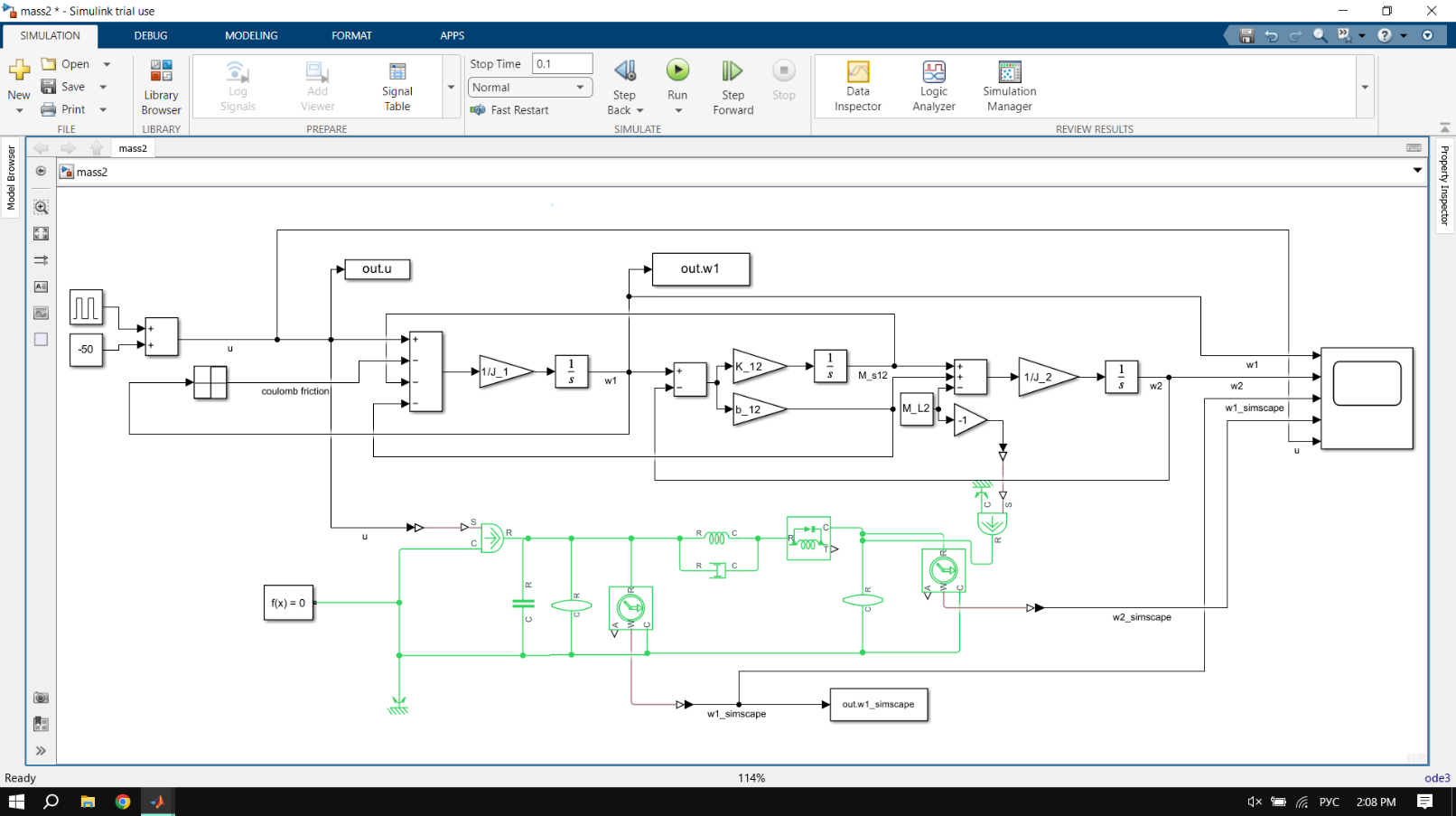


Рисунок 8. Схема модели системы в Simulink и Simscape.

Итак, запустим моделирование при частоте входящего сигнала

A graph with blue lines

Description automatically generated

Рисунок 9. Входной сигнал при 50 Гц.

A graph showing a wave

Description automatically generated with medium confidence

Рисунок 10. Графики моделей Simulink и Simscape.

Как видим, частота точно выше, частоты входящего воздействия. Однако точную величину установить не удастся из-за округления моделирования.

Смоделируем поведение системы при частоте входного воздействия равной рассчитанной ранее резонансной

A graph showing a number of blue lines

Description automatically generated

Рисунок 11. Входное воздействие с частотой 446.82 Гц.

A graph with red and blue lines

Description automatically generated

Рисунок 12. Графики моделей Simulink и Simscape при входном воздействии с резонансной частотой.

Здесь частота соответствует резонансной.

Также отметим, что так как графики переходных процессов моделей Simulink и Simscape совпадают, то построенные модели идентичны.

# Выводы

В данной лабораторной работе исследовалась механика электропривода.

В первой части работы были произведены расчеты кинематических схем двух моделей с различными звеньями. Находились передаточные отношения, числа степеней редуктора, мощность и вращающий момент двигателей, приведенные моменты инерции. По рассчитанным значениям был произведен выбор подходящего электропривода для условий задачи. После этого пересчитывались характеристики двигателя с измененным диаметром шкива для того, чтобы выбранный электродвигатель работал в номинальном режиме.

Во второй части работы был проведен анализ двух-массовой системы (определялись параметры расчетных схем и значения резонансных частот) с последующим моделированием системы в двух пакетах MATLAB: Simulink и Simscape. Результаты расчетов и построения моделей сошлись с ожидаемыми предположениями. Модели идентичны, а рассчитанные параметры соответствуют поведению смоделированных систем.