**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Санкт-Петербургский государственный**

**электротехнический университет**

**«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)**

**Кафедра КСУ**

Курсовая работа

**по дисциплине «Моделирование систем управления»**

Тема: Моделирование электромеханических систем средствами MATLAB

**Вариант 2**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Студентка гр. 8491 |  | Масленникова Е.А. |
| Преподаватель |  | Лукомская О.Ю. |

Санкт-Петербург

2022

# **ЗАДАНИЕ на курсовую работу**

|  |
| --- |
| **Студентка: Масленникова Е.А.** |
| **Группа 8491** |
| **Тема работы:** Моделирование электромеханических систем средствами MATLAB |

**Задание на курсовую работу:**

Моделирование электрической машины постоянного тока:

1. Аппроксимация обратной кривой намагничивания
2. Исследование переходных процессов в системе
3. Расчет статических характеристик электрической машины
4. Исследование линеаризованной математической модели

Содержание пояснительной записки:  
«Оглавление», «Введение», «Аннотация», «Заключение», «Список используемой литературы».

Предполагаемый объем пояснительной записки:

Не менее 20 страниц.

Дата выдачи курсовой работы: 10.02.2022.

Дата сдача курсовой работы: 07.04.2022.

Дата защита курсовой работы: 07.04.2022.

**Масленникова Е.А .**

**Лукомская О.Ю.**

# **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Исходные данные по электрической машине (ЭМ) представлены в таблице 1. На рисунке 1 представлена схема ГПТ НВ.

Таблица 1. Исходные данные по ЭМ.

|  |  |
| --- | --- |
| № Варианта | Тип ЭМ |
| 2 | ГПТ НВ, работающая на сеть большой мощности |

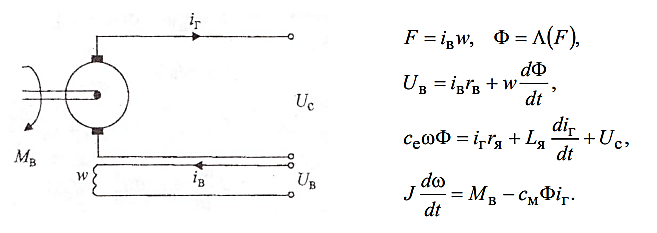


Рисунок 1. Электрическая схема ГПТ НВ.

Таблица 2. Параметры объекта моделирования

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер варианта | , Ом | , Ом | w, вит | , Гн | , Ом |  |  | J, кг·м2 |
| 2 | 145 | 0.3 | 4000 | 0.01 | – | 205 | 200 | 0.35 |

Таблица 3. Входные, выходные и нормировочные переменные

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер варианта | , Вб | , с-1 | , А | , Н·м | , Н·м | , В | , В | Вход |
| 2 | 0.007 | 100 | 50 | 70 | – | 220 | 220 |  |

Таблица 4. Кривые намагничивания

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | Значения | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| F/4000,А\*w | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 |
|  | 0 | 0.3 | 0.52 | 0.67 | 0.78 | 0.86 | 0.92 | 0.96 | 1.01 | 1,02 |

# **СОДЕРЖАНИЕ**

[**ЗАДАНИЕ на курсовую работу** 2](#_Toc99740272)

[**ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ** 3](#_Toc99740273)

[**СОДЕРЖАНИЕ** 5](#_Toc99740274)

[**АННОТАЦИЯ** 6](#_Toc99740275)

[**ВВЕДЕНИЕ** 7](#_Toc99740276)

[**ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ** 8](#_Toc99740277)

[**1.** **АППРОКСИМАЦИЯ ОБРАТНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ** 8](#_Toc99740278)

[**2.** **ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ** 14](#_Toc99740279)

[**3.** **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ** 19](#_Toc99740280)

[**4.** **ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ** 30](#_Toc99740281)

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** 36](#_Toc99740282)

[**СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ** 37](#_Toc99740283)

**АННОТАЦИЯ**

В ходе выполнения курсового проекта будет проведено исследование и моделирование линейной и нелинейной динамической системы на примере электрической машины постоянного тока. В процессе выполнения будет проведен анализ данной системы, а также моделирование электрической машины в пакете прикладных программ для решения задач технического вычисления – MATLAB.

**SUMMARY**

In the course of the course project, research and modeling of a linear and non-linear dynamic system will be carried out using the example of a DC electric machine. In the course of execution, an analysis of this system will be carried out, as well as the simulation of an electric machine in the application package for solving problems of technical calculation - MATLAB.

**ВВЕДЕНИЕ**

Рассматриваемая в курсовом проекте система, описывающая генератор постоянного тока, работающий на сеть большой мощности, нелинейная. Её математическая модель, используемая для моделирования, описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, так как содержит кривую намагничивания и произведения переменных состояния. Математическая модель такой системы содержит 3 класса переменных:

* Входные переменные: ;
* Переменные состояния: ;
* Внутренние переменные: .

Моделируя такую систему были поставлены следующие задачи:

* Аппроксимация обратной кривой намагничивания и замена табличных значений в дальнейшем аппроксимирующим полиномом;
* Определение статических режимов в системе с помощью метода численного интегрирования — Ньютона;
* Исследование переходных процессов в системе с помощью метода Эйлера;
* Исследование линеаризованной математической модели и сравнение полученных результатов с нелинейной системой.

# **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

## **АППРОКСИМАЦИЯ ОБРАТНОЙ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ**

Сперва нормируем значения Ф и F и занесем их в таблицу 5. Так как в исходном задании поток задан уже нормированный, учитывая, что Вб, запишем в таблицу 4 вместе с нормированными значениями ненормированные. Для МДС рассчитаем базовое значение и рассчитаем нормированные.

Таблица 5.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| F/4000,А\*w | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 |
| F, А\*w | 0 | 800 | 1600 | 2400 | 3200 | 4000 | 4800 | 5600 | 6400 | 7200 |
|  | 0 | 0,1318 | 0,2636 | 0,3955 | 0,5273 | 0,6591 | 0,7909 | 0,9227 | 1,055 | 1,1864 |
|  | 0 | 0.3 | 0.52 | 0.67 | 0.78 | 0.86 | 0.92 | 0.96 | 1.01 | 1,02 |
| Ф, Вб | 0 | 0.0021 | 0.00364 | 0.00469 | 0.00546 | 0.00602 | 0.00644 | 0.00672 | 0.00707 | 0.00714 |

Затем напишем код, представленный в листинге 1, для вычисления нормированных полиномов 3 и 5 степени. Для этого сперва составим матрицы G3 и G5 для полиномов 3 и 5 степеней соответственно. На рисунке 2 представлены полученные матрицы. Затем были сосчитаны векторы C3 и C5, которые содержат нечетные коэффициенты полиномов. И исходя из этих значений составим сами полиномы.

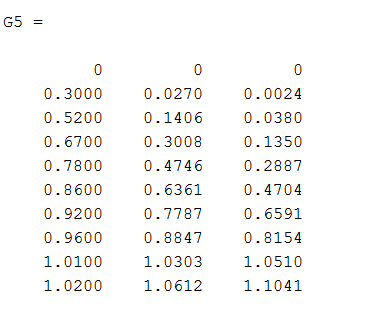
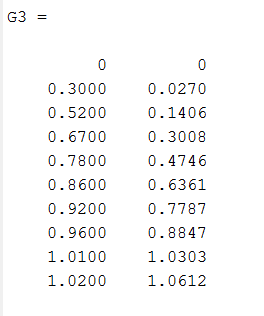


Рисунок 2. Матрицы G3 и G5

Листинг 1.

clc,clear

F=(0:800:7200)';

OIOp=0:0.00001:0.0075;

OIOpnorm=0:0.01:1.05;

OIO=[0;0.0021;0.00364;0.00469;0.00546;0.00602;0.00644;0.00672;0.00707;0.00714]

OIO\_norm=[0;0.3;0.52;0.67;0.78;0.86;0.92;0.96;1.01;1.02]

F\_norm=[0;0.1318;0.2636;0.3955;0.5273;0.6591;0.7909;0.9227;1.0545;1.1864]

G3=[OIO\_norm,diag(OIO\_norm)\*diag(OIO\_norm)\*(OIO\_norm)]

C3=(inv((G3')\*G3))\*((G3')\*F\_norm)

pol3\_norm=[C3(2),0,C3(1),0]

pol3=[C3(2)\*6069/((0.007)^3),0,C3(1)\*6069/(0.007),0]

p3\_norm=polyval(pol3\_norm,OIOpnorm);

p3=polyval(pol3,OIOp);

G5=[OIO\_norm,diag(OIO\_norm)\*diag(OIO\_norm)\*(OIO\_norm),diag(OIO\_norm)\*diag(OIO\_norm)\*diag(OIO\_norm)\*diag(OIO\_norm)\*(OIO\_norm)]

C5=(inv((G5')\*G5))\*((G5')\*F\_norm)

pol5\_norm=[C5(3),0,C5(2),0,C5(1),0]

pol5=[C5(3)\*6069/((0.007)^5),0,C5(2)\*6069/((0.007)^3),0,C5(1)\*6069/(0.007),0]

p5\_norm=polyval(pol5\_norm,OIOpnorm);

figure(1)

xlabel('Ф')

hold on

plot(OIO,F,'k\*',OIOp,p3,'k-')

legend('F','p3');

hold off

figure(2)

xlabel('Ф')

hold on

plot(OIO,F,'k\*',OIOp,p5,'k-')

legend('F','p5');

figure(3)

xlabel('Ф-')

hold on

plot(OIO\_norm,F\_norm,'k\*',OIOpnorm,p3\_norm,'k-')

legend('F-','p3-');

hold off

figure(4)

xlabel('Ф-')

hold on

plot(OIO\_norm,F\_norm,'k\*',OIOpnorm,p5\_norm,'k-')

legend('F-','p5-');

В результате выполнения программы полученные нормированные полиномы:

Учитывая, что и , запишем ненормированные полиномы:

Вычисленные с помощью листинга 1 ненормированные значения Ф, F(Ф), p3(Ф), p5(Ф) занесены в таблицу 6. На рисунке 3 представлены графики ненормированных зависимостей F(Ф) и p3(Ф), а на рисунке 4 — F(Ф) и p5(Ф).

Таблица 6.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Ф, Вб | 0 | 0.0021 | 0.00364 | 0.00469 | 0.00546 | 0.00602 | 0.00644 | 0.00672 | 0.00707 | 0.00714 |
| F, А | 0 | 800 | 1600 | 2400 | 3200 | 4000 | 4800 | 5600 | 6400 | 7200 |
| p5\*103 | 0 | 0.8944 | 1.5957 | 2.3089 | 3.1418 | 4.0246 | 4.8996 | 5.6089 | 6.6633 | 6.8991 |
| p3\*103 | 0 | 0.5095 | 1.3587 | 2.3568 | 3.3744 | 4.2924 | 5.0900 | 5.6772 | 6.4772 | 6.6463 |



Рисунок 3. Ненормированные зависимостей F(Ф) и p3(Ф)



Рисунок 4. Ненормированные зависимостей F(Ф) и p5(Ф)

В таблицу 7 занесены нормированные значения Ф, F(Ф), p3(Ф), p5(Ф), а на рисунке 5 представлены графики нормированных зависимостей F(Ф) и p3(Ф), на рисунке 6 — F(Ф) и p5(Ф).

Таблица 7.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0 | 0.3 | 0.52 | 0.67 | 0.78 | 0.86 | 0.92 | 0.96 | 1.01 | 1,02 |
|  | 0 | 0,1318 | 0,2636 | 0,3955 | 0,5273 | 0,6591 | 0,7909 | 0,9227 | 1,055 | 1,1864 |
|  | 0 | 0.0025 | 0.0068 | 0.0118 | 0.0169 | 0.0215 | 0.0254 | 0.0284 | 0.0324 | 0.0332 |
|  | 0 | 0.0045 | 0.0080 | 0.0115 | 0.0157 | 0.0201 | 0.0245 | 0.0280 | 0.0333 | 0.0345 |



Рисунок 5. Нормированные зависимости F(Ф) и p3(Ф)



Рисунок 6. Нормированные зависимости F(Ф) и p5(Ф)

С помощью листинга 2 подсчитаем значения функционалов точности для полиномов третьей и пятой степени.

Листинг 2.

i3sum=0;

i5sum=0;

for i=1:1:10

i3sum=i3sum+(F\_norm(i)-p3\_norm(100\*OIO\_norm(i)+1))^2;

end

for i=1:1:10

i5sum=i5sum+(F\_norm(i)-p5\_norm(100\*OIO\_norm(i)+1))^2;

end

В результате получим:

В результате были рассчитаны аппроксимирующие полиномы 3 и 5 степени, где аппроксимация для полинома 5 степени точнее, чем для полинома 3 степени, о чем свидетельствуют графики, полученные в процессе моделирования, на рисунках 3-6. Также, для полинома 5 степени значение функционала точности меньше, чем для полинома 3 степени, следовательно, аппроксимация обратной кривой намагничивания электрической машины постоянного тока методом наименьших квадратов будет точнее. Искомая функция полинома 5-й степени в нормированном виде: , в исходном виде: .

1. **ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Рассматриваемый генератор описывается следующими уравнениями:

С помощью данных уравнений, так как в статическом режиме производные равны 0, перепишем систему в виде:

Тогда описание системы в виде СНЛАУ будет иметь вид:

С учетом того, что переменные состояния в данной системе:

А входные переменные:

Можем переписать систему уравнений в виде:

Или же численно:

Для использования метода Ньютона для нахождения переменных состояния запишем матрицу частных производных:

Или, подставляя известные значения:

На листинге 3 представлен код для нахождения векторов переменных состояния при изменении одного из входных параметров и неизменных двух других. Для описания системы в виде СНЛАУ используется листинг 5. Для описания матрицы частных производных написана функция в листинге 6. Функция для описания метода Ньютона представлена на листинге 4.

Листинг 3.

clc,clear

u1=1:-0.01:0.1;

u=[u1;1\*ones(size(u1));1\*ones(size(u1))];

x0=[1;1;1];

xx=[];

eps=0.1;

for i=1:length(u1)

x=newton('fun\_F','fun\_G',x0,u(:,i),eps);

xx=[xx x];

x0=x;

end

figure(1)

plot(u1,xx(1,:),'k:',u1,xx(2,:),'k--',u1,xx(3,:),'k-.');

legend('Ф(Uв)','iг(Uв)','w(Uв)')

u=[1\*ones(size(u1));u1;1\*ones(size(u1))];

x0=[1;1;1];

xx=[];

for i=1:length(u1)

x=newton('fun\_F','fun\_G',x0,u(:,i),eps);

xx=[xx x];

x0=x;

end

figure(2)

plot(u1,xx(1,:),'k:',u1,xx(2,:),'k--',u1,xx(3,:),'k-.');

legend('Ф(Mв)','iг(Mв)','w(Mв)')

u=[1\*ones(size(u1));1\*ones(size(u1));u1];

x0=[1;1;1];

xx=[];

for i=1:length(u1)

x=newton('fun\_F','fun\_G',x0,u(:,i),eps);

xx=[xx x];

x0=x;

end

figure(3)

plot(u1,xx(1,:),'k:',u1,xx(2,:),'k--',u1,xx(3,:),'k-.');

legend('Ф(Uc)','iг(Uc)','w(Uc)')

Листинг 4.

function [F]=newton(fun\_F,fun\_G,x0,u,eps)

k=1;

f=feval(fun\_F,x0,u);

while (k)

g=feval(fun\_G,x0,u);

F=x0-inv(g)\*f;

x0=F;

f=feval(fun\_F,x0,u);

if (norm(feval(fun\_F,x0,u))<=eps)

k=0;

end

end

Листинг 5.

function F=fun\_F(x,u)

p=[0.0227, 0, 0.0058, 0, 0.0152, 0];

F=[-(p(1)\*(x(1)^5)+p(3)\*(x(1)^3)+p(5)\*x(1))+0.03\*u(1); 143.5\*x(1)\*x(3)-15\*x(2)-220\*u(3);70\*u(2)-70\*x(1)\*x(2)];

Листинг 6.

function G=fun\_G(x,u)

p=[0.1135,0,0.0174,0,0.0152];

G=[-(p(1)\*(x(1)^4)+p(3)\*(x(1)^2)+p(5)) 0 0;143.5\*x(3) -15 143.5\*x(1);-70\*x(2) -70\*x(1) 0];

На рисунках 7-9 представлены зависимости переменных состояния от одной из входных переменных , соответственно.



Рисунок 7. Зависимости



Рисунок 8. Зависимости



Рисунок 9. Зависимости

Для исследования статических режимов данной динамической системы сперва были составлены СНЛАУ, с помощью метода Ньютона произведен расчет переменных состояния. Также на рисунках 7-9 можно пронаблюдать зависимости переменных состояния при изменении входного воздействия.

Переменные состояния в статическом режиме при номинальных значениях, рассчитанные с помощью метода Ньютона:

1. **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Рассматриваемый генератор описывается следующими уравнениями:

С помощью данных уравнений перепишем систему, выразив производные:

Перейдем к записи СНДУ в унифицированном виде

В листинге 7 представлена запись СНДУ в нормированном виде с подставленными номинальными значениями.

Листинг 7.

function f=fun\_dF(x,u,t)

p=[0.8477 0 -0.1894 0 0.5022 0];

f=[(1/28)\*((-220)\*(p(1)\*(x(1)^5)+p(3)\*(x(1)^3)+p(5)\*x(1))+220\*u(1));...

(1/0.5)\*(143.5\*x(1)\*x(3)-15\*x(2)-220\*u(3));...

(1/35)\*(70\*u(2)-70\*x(1)\*x(2))];

В листинге 8, а далее в листинге 9-19 представлена программа решения СНДУ численным методом и построения графиков переходных процессов и фазовых траекторий.

Листинг 8.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t));ones(size(t))];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(t,x(1,:),'k--',t,x(2,:),'k',t,x(3,:),'k:'), grid on

title('График при номинальных значениях')

legend('x\_1(t)','x\_2(t)','x\_3(t)')



Рисунок 10. График переходных процессов при номинальных значениях.

Листинг 9.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t));ones(size(t))];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(t,y(1,:),'k--',t,y(2,:),'k'), grid on

title('График при номинальных значениях')

legend('y\_1(t)','y\_2(t)')



Рисунок 11. График переходных процессов при номинальных значениях.

Листинг 10.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t));ones(size(t))];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(x(2,:),x(3,:),'k'), grid on

title('Фазовый портрет при номинальных значениях')

legend('x\_3(x\_2)')



Рисунок 12. Фазовый портрет при номинальных значениях.

Листинг 11.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t));ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(t,x(1,:),'k--',t,x(2,:),'k',t,x(3,:),'k:'), grid on

title('График при уменьшенном U\_c на 20%')

legend('x\_1(t)','x\_2(t)','x\_3(t)')



Рисунок 13. График переходных процессов при отличии третьего компонента от номинального.

Листинг 12.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t));ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(t,y(1,:),'k--',t,y(2,:),'k'), grid on

title('График при уменьшенном U\_c на 20%')

legend('y\_1(t)','y\_2(t)')



Рисунок 14. График переходных процессов при отличии третьего компонента от номинального.

Листинг 13.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t));ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(x(2,:),x(3,:),'k'), grid on

title('Фазовый портрет при уменьшенном U\_c на 20%')

legend('x\_3(x\_2)')



Рисунок 15. Фазовый портрет при отличии третьего компонента от номинального.

Листинг 14.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t))\*0.85;ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(t,x(1,:),'k--',t,x(2,:),'k',t,x(3,:),'k:'), grid on

title('График при уменьшенном M\_в на 15%, U\_c на 20%')

legend('x\_1(t)','x\_2(t)','x\_3(t)')



Рисунок 16. График переходных процессов при отличии второго и третьего компонента от номинального.

Листинг 15.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t))\*0.85;ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(t,y(1,:),'k--',t,y(2,:),'k'), grid on

title('График при уменьшенном M\_в на 15%, U\_c на 20%')

legend('y\_1(t)','y\_2(t)')



Рисунок 17. График переходных процессов при отличии второго и третьего компонента от номинального.

Листинг 16.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t));ones(size(t))\*0.85;ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(x(2,:),x(3,:),'k'), grid on

title('Фазовый портрет при уменьшенном M\_в на 15%, U\_c на 20%')

legend('x\_3(x\_2)')



Рисунок 18. Фазовый портрет при отличии второго и третьего компонента от номинального.

Листинг 17.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t))\*0.8;ones(size(t))\*0.85;ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(t,x(1,:),'k--',t,x(2,:),'k',t,x(3,:),'k:'), grid on

title('График при уменьшенном M\_в на 15%, U\_c на 20%, U\_в на 20%')

legend('x\_1(t)','x\_2(t)','x\_3(t)')



Рисунок 19. График переходных процессов при отличии всех компонентов от номинального.

Листинг 18.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t))\*0.8;ones(size(t))\*0.85;ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(t,y(1,:),'k--',t,y(2,:),'k'), grid on

title('График при уменьшенном M\_в на 15%, U\_c на 20%, U\_в на 20%')

legend('y\_1(t)','y\_2(t)')



Рисунок 20. График переходных процессов при отличии всех компонентов от номинального.

Листинг 19.

clc, clear

t=0:0.01:1;

u=[ones(size(t))\*0.8;ones(size(t))\*0.85;ones(size(t))\*0.8];

x0=[0;0;0];

[y,x]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u,x0,'EILER');

plot(x(2,:),x(3,:),'k'), grid on

title('Фазовый портрет при уменьшенном M\_в на 15%, U\_c на 20%, U\_в на 20%')

legend('x\_3(x\_2)')



Рисунок 21. Фазовый портрет при отличии всех компонентов от номинального.

Далее увеличим значение индуктивности в 10 раз и аналогично построим графики переходных процессов и фазовые траектории. Изменение индуктивности представлено в функции «fun\_dF» - листинг 20.

Листинг 20.

function f=fun\_dF(x,u,t)

p=[0.8477 0 -0.1894 0 0.5022 0];

f=[(1/28)\*((-220)\*(p(1)\*(x(1)^5)+p(3)\*(x(1)^3)+p(5)\*x(1))+220\*u(1));...

(1/5)\*(143.5\*x(1)\*x(3)-15\*x(2)-220\*u(3));...

(1/35)\*(70\*u(2)-70\*x(1)\*x(2))];



Рисунок 22. График переходных процессов и фазовый портрет для U1=1, U2=1, U3=1



Рисунок 23. График переходных процессов и фазовый портрет для U1=1, U2=1, U3=0.8



Рисунок 24. График переходных процессов и фазовый портрет для U1=1, U2=0.85, U3=0.8



Рисунок 25. График переходных процессов и фазовый портрет для U1=0.8, U2=0.85, U3=0.8

С помощью численного интегрирования СНДУ были промоделированы переходные процессы рассматриваемой системы и построены графики зависимости во времени переменных состояние и выходных переменных, а также фазовые портреты. Полученные графики имеют колебательный затухающий и апериодический вид переходных процессов как при номинальных значениях, так и при измененных значениях на 15-20% номинальных. Изменение значений входного воздействия на 15-20% от номинальных изменяет лишь значение перерегулирования и время регулирования. А вот изменение значения индуктивности, а именно, увеличения в 10 раз, приводит к увеличению колебательности в переходных процессах, что подтверждают зависимости переменных состояния от времени и фазовые портреты.

Полученный вектор переменных состояния в номинальном режиме:

1. **ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Рассматриваемый генератор описывается следующими уравнениями:

Тогда описание системы в виде СНДУ будет иметь вид:

С учетом того, что переменные состояния в данной системе:

А входные переменные:

Перейдем к записи СНДУ в унифицированном виде:

Запишем матрицы A, B, C, D для записи линеаризованной системы в виде:

С помощью листинга 21 будем строить переходные процессы линеаризованной и нелинейной системы. В листингах 22-23 представлены функции «lsim» и «NSIM» соответственно.

Листинг 21.

clc, clear

t=0.0:0.01:1.0;

u1 = [ones(size(t)); ones(size(t)); ones(size(t))];

x01=[0.9584;1.0434;2.7135];

x011=[0;0;0];

[y1,x1]=NSIM('fun\_dF','fun\_dG',t,u1,x011,'EILER');

u2 = [1\*zeros(size(t));1\*zeros(size(t));1\*zeros(size(t))];

x02=[0.9584;1.0434;1.7135];

x012=[0;0;0];

[y2,x2]=lsim(fun\_A,fun\_B,fun\_C,fun\_D,u2,t,x012);

figure(1)

plot(t,x1(1,:), 'k',t,x1(2,:), 'k:', t,x1(3,:), 'k--',t,x2(:,1)+x02(1),...

'r',t,x2(:,2)+x02(2), 'r:',t,x2(:,3)+x02(3), 'r--')

grid on

title('Переходные процессы при номинальных значениях')

legend('dx1nl(t)','dx2nl(t)','dx3nl(t)','dx1l(t)','dx2l(t)','dx3l(t)')

Листинг 22.

function [y,x]=lmsim(a,b,c,d,u,t,x0)

h=t(2)-t(1);

% matrix exponent

[m,n] = size(a);

[m,nb] = size(b);

s = expm([[a b]\*h; zeros(nb,n+nb)]);

p = s(1:n,1:n);

g= s(1:n,n+1:n+nb);

x=(ltitr(p,g,u',x0'))';

y=c\*x+d\*u;

Листинг 23.

function [yout,xout]=nsim(F,G,t,u,x0,Method)

x=x0;

h=t(2)-t(1);

n=length(x0);

i=0;

xout=x;

yout=feval(G,x,u(:,1),t(1));

for j=1:length(t)-1,

tt=t(j);

uu=u(:,j);

xh=feval(Method,F,tt,h,x,uu);

tt=tt+h;

x=xh;

xout=[xout x];

yout=[yout feval(G,x,uu,tt)];

i=i+1;

if i==5,

clc

tt

x

i=0;

end

end

На рисунке 26 представлены корни полинома матрицы А. корни находятся в левой полуплоскости, что свидетельствует об устойчивости системы.



Рисунок 26. Корни полинома матрицы А

****

Рисунок 26. Переходные процессы при номинальных значениях.

На рисунках 27-32 представлены переходные процессы в линеаризованной и нелинейной системах при отклонении переменных состояния и входных воздействий от номинальных на 10-30%.



Рисунок 27. Переходные процессы в системе при отклонении на 10%



Рисунок 28. Переходные процессы в системе при отклонении на 20%



Рисунок 29. Переходные процессы в системе при отклонении на 15%



Рисунок 30. Переходные процессы в системе при отклонении на 10%



Рисунок 31. Переходные процессы в системе при отклонении на 20%



Рисунок 32. Переходные процессы в системе при отклонении на 15%

Для линеаризации СНДУ в окрестности статического режима были составлены матрицы A, B, C, D, а затем построены переходные процессы в линеаризованной системе и для сравнения переходные процессы в исходной нелинейной системе. Сравнив полученные графики, было замечено, значения в статических режимах в нелинейной системе и линеаризованной модели подобны, что свидетельствует о том, что линеаризованная модель соответствует нелинейной системе. Найденные корни полинома матрицы А для линеаризованной системы также свидетельствуют об устойчивости такой системы.

# **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения данного курсового проекта была исследована математическая модель нелинейной системы, описывающая генератор постоянного тока независимого возбуждения, работающий на сеть большой мощности. Для моделирования такой нелинейной системы была использована среда Matlab. Для этого сперва была аппроксимирована обратная кривая намагничивания полиномом 5-йстепени:

.

Затем были исследованы статический режим системы с помощью метода Ньютона и переходные процессы с помощью численного метода Эйлера. В результате были также сравнены значения переменных состояния в статических режимах при использовании обоих методов, вследствие сравнения были замечены близкие с достаточной точностью значения.

Также была произведена линеаризация исследуемой нелинейной системы путем замены её математической модели системой линейных уравнений с матрицами состояния, входов, выходов и обхода. В результате построения зависимостей переменных состояния в линеаризованной системе и сравнении данных зависимостей с зависимостями нелинейной системы было замечено, что в статических режимах линеаризованная модель с определённой точностью подобна нелинейной модели.

# **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А.Н. Мирошников, С.Н. Румянцев. Моделирование систем управления технических средств транспорта. Учебное издание. ГЭТУ.-СПб.:Элмор, 1999.
2. Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов / Е.И. Веремей, В.М. Корчанов, М.В. Коровкин, С.В. Погожев. – СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. – 370 с.
3. Ю. Кетков, А. Кетков, М. Шульц. MATLAB 6.x: программирование численных методов. C-Пб.: БХВ-Петербург, 2004. – 690 c.
4. Моделирование электромеханических систем средствами MATLAB. Методические указания по лабораторным работам по дисциплине «Моделирование систем управления» / Сост.: О. Ю. Лукомская, А. Л. Стариченков, А. Г. Шпекторов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 40 с.