R11 R12 a

 • • •

 i1

K11

i2 i3

 R3

 L

#  U C

 •

 b

Рис.1. Структура электрической цепи

 R11 R12 a

 •

 i1(0-)

i2(0-)i3(0-)

 R3

 U

 Uc(0-)

 •

 b

Рис.2.

## Таблица 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | Параметры элементов цепи | Состояние ключей | Условия коммутации | Напряжение |
| R11, Ом | R12, Ом | L, Гн | C, Ф | R3, Ом | K0 | K11 | Замык | U, В |
| 7 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | З | Р | К11 | 5 |

 R12 a

 •

 i1(0)

Iток i3(0)

 R3

 Iток

#  U

 E

 •

 b

Рис.3.

 R12 a

 •

 i1и

i2и i3и

 R3

#  U

 •

 b

Рис.4.

 R12 a a

 • •

Iток

 R3

 Iток Iток

 R13

#

 i1i i3i

 • •

 b b

Рис.5.

 R12 a

 •

 i3E

 i1E

 R3

 E

 •

 b

Рис.6.

 R12 a

 •

 i1пр

i2пр i3пр

 R3

 U

 •

 b

Рис.7.

Расчетно-графическое задание №1

по разделу курса “Переходные процессы в электрических цепях”

Структура электрической цепи и параметры ее элементов заданы (рис.1, табл.1).

I. Классический метод расчета

1. Система дифференциальных уравнений

 i1-i2-i3=0

 R12•i1+L•di2/dt=U

 R12•i1+R3•i3+1/c•∫i3dt=U

 L•di2/dt-R3•i3-1/c•∫i3dt=0

1. Определение начальных условий

t=0- i1(0-)=i2(0-)=U/(R11+R12), i1(0-)=i2(0-)=5/(2+2)=1.25 А.

 Uc(0-)=0.

Схема на рис.2.

1. Зависимые начальные условия

t=0 i1и=i3и=U/(R12+R3), i1и=i3и=5/(2+1)=1.67 А.

Схема на рис.3 и рис.4.

R13=R12•R3/(R12+R3), R13=2•1/(2+1)=0.67 Ом.

Uab=Iток•R13, Uab=1.25•0.67=0.84 В.

i1i=Uab/R12, i1i=0.84/2=0.42 А.

i3i=Uab/R3, i3i=0.84/1=0.84 А.

Схема на рис.5.

i1E=i3E=E/(R12+R3), i1E=i3E=0.

Схема на рис.6.

Используя метод наложения, получим:

i1(0)=i1и+i1i-i1E, i1(0)=1.67+0.42-0=2.1 А.

i2(0)=Iток, i2(0)=1.25 А.

i3(0)=i3и-i3i-i3E, i3(0)=1.67-0.84-0=0.83 А.

Проверка

i1(0)-i2(0)-i3(0)=0, 2.1-1.25-0.83=0.

Нахождение i1’(0), i2’(0), i3’(0)

R12•i1(0)+L•i2’(0)=U

i2’(0)=0.4 А.

 i1’(0)-i2’(0)-i3’(0)=0

 R12•i1’(0)+R3•i3’(0)+1/c•i3(0)=0

i3’(0)=-0.54 А, i1’(0)=-0.14 А.

1. Определение токов

t=∞ ii(t)=iiпр+iiсв.

 i1пр=i2пр=U/R12, i1пр=i2пр=5/2=2.5 А.

 i3пр=0.

 iiсв=A•e-δtsin(ωсвt+φ).

Схема на рис.7.

1. Определение корней

 1 -1 -1 1 -1 -1

 2 2p 0 = 0. 2 2p 0 = 6p+2/p+4.

 2 0 1+1/p 2 0 1+1/p

 p1,2=-0.33±0.47j.

1. Нахождение А, ϕ

 i1(0)=i1пр+A•sinϕ

 i1’(0)=-δ•A•sinϕ+A•ωсв•cosϕ

A=-0.7, ϕ=34.65°.

i1(t)=2.5-0.7•e-0.33tsin(0.47t+34.65°).

 i2(0)=i2пр+A•sinϕ

 i2’(0)=-δ•A•sinϕ+A•ωсв•cosϕ

A=-1.25, ϕ=89°.

i2(t)=2.5-1.25•e-0.33tsin(0.47t+89°).

 i3(0)=i3пр+A•sinϕ

 i3’(0)=-δ•A•sinϕ+A•ωсв•cosϕ

A=-1.01, ϕ=-55°.

i3(t)=-1.01•e-0.33tsin(0.47t-55°).

II. Операторный метод расчета

В момент t=0+

 I1(p)-I2(p)-I3(p)=0

 R12•I1(p)-L•i2(0)+p•L•I2(p)=U/p

 R12•I1(p)+R3•I3(p)+uc(0)/p+1/(p•c)•I3(p)=U/p

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| I1 | I2 | I3 |  |  | 0 |
| I1(p) | -I2(p) | -I3(p) | =0 | 5/p+2.5 |
| R12•I1(p) | P•L•I2(p) | 0 | =U/p+L•i2(0) | 5/p |
| R12•I1(p) | 0 | I3(p)•(R3+1/(p•c) | =U/p-uc(0)/p |  |

 1 -1 -1

∆= 2 2p 0 = 6p+2/p+4.

 2 0 1+1/p

 0 -1 -1

∆1= 5/p+2.5 2p 0 = 7.5/p+5/p2+12.5.

 5/p 0 1+1/p

 1 0 -1

∆2= 2 5/p+2.5 0 = 7.5/p+5/p2+7.5.

 2 5/p 1+1/p

 1 -1 0

∆3= 2 2p 5/p+2.5 = 5.

 2 0 5/p

По теореме разложения

I1(p)=∆1/∆=(7.5p+12.5p2+5)/(p•(6p2+4p+2)).

i1(t)=i1пр+F1(p1)/F2’(p1)•ep1t+F1(p2)/F2’(p2)•ep2t.

F1(p1)=1.125-0.35j, F2’(p1)=-2.66-1.82j.

i1(t)=2.5+0.73•e-0.33tsin(0.47t+216°).

I2(p)=∆2/∆=(7.5p+7.5p2+5)/(p•(6p2+4p+2)).

I2(t)=i2пр+F1(p1)/F2’(p1)•ep1t+F1(p2)/F2’(p2)•ep2t.

F1(p1)=1.685+1.2j, F2’(p1)=-2.66-1.82j.

i2(t)=2.5+1.28•e-0.33tsin(0.47t-89°).

I3(p)=∆3/∆=5p/(6p2+4p+2).

i2(t)=i2пр+F1(p1)/F2’(p1)•ep1t+F1(p2)/F2’(p2)•ep2t.

F1(p1)=-1.65+2.35j, F2’(p1)=0.04+5.64j.

i3(t)=1.01•e-0.33tsin(0.47t+125.5°).

III. Построение графиков

Расчетно-графическое задание №2

по разделу курса “Цепи переменного тока с ферромагнитными элементами”

Катушка с ферромагнитным сердечником имеет магнитопровод из электротехничес-кой стали сечением S и длиной средней линии магнитной индукции l. Обмотка катушки вы-полнена медным проводом и имеет активное сопротивление R и реактивное сопротивление XS. Катушка включена на синусоидальное напряжение с амплитудой  и частотой ω=314 с-1. Данные о марке стали в табл.1.

Исходные данные:

Вариант: 7 Активное сопротивление обмотки: 3.8 Ом

Марка стали: 4 Реактивное сопротивление обмотки: 45

Сечение сердечника: 0.0017 м2  Напряжение питания катушки: 290 В

Средняя длина м. индукции: 0,7 м Сопротивление R1: 90 Ом

Воздушный зазор: 2 мм Сопротивление R2: 440 Ом

Число витков обмотки: 750

Таблица 1

|  |
| --- |
| Электротехническая сталь №4 |
| Напряженность магнит. поля H  | Индукция B | Удельные потери P0 | Удельная мощность намагни-чивания Q0 |
| А/м | Т | Вт/кг | Вар/кг |
| 50 | 1.05 | 0.18 | 0.8 |
| 100 | 1.23 | 0.36 | 1.4 |
| 200 | 1.37 | 0.65 | 2.8 |
| 300 | 1.41 | 0.87 | 4.4 |
| 400 | 1.44 | 1.08 | 5.8 |
| 600 | 1.46 | 1.43 | 8.7 |
| 800 | 1.48 | 1.62 | 11.6 |
| 1000 | 1.49 | 1.85 | 14.1 |
| 1200 | 1.50 | 1.97 | 16.7 |

1. Рассматривая катушку с ферромагнитным сердечником как идеальную R=0; XS=0; PСТ=0, рассчитать и построить на протяжении одного периода кривые U(t), Ф(t), i(t) для условий:
2. Магнитопровод имеет воздушный зазор. Напряжение питания U=U0. δ=2.0 мм.См. рис.1.

 



  Вб





  

  Гн/м

Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| t | U(t) | Ф(t) | Hc(t) | Hδ(t) | I(t) |
| 0 | 0 | -0.00174 | 50 | 833333.33 | 2.26889 |
| 0.001 | 279.55369 | -0.00127 | 100 | 976190.48 | 2.69651 |
| 0.002 | 409.09264 | -0.00012 | 200 | 1087301.59 | 3.08614 |
| 0.003 | 319.10338 | 0.00109 | 300 | 1119047.62 | 3.26413 |
| 0.004 | 57.87614 | 0.00172 | 400 | 1142857.14 | 3.42095 |
| 0.005 | -234.40873 | 0.00143 | 600 | 1158730.16 | 3.64995 |

Построенные характеристики на рис.4 (а, б, в).

б. Магнитопровод не имеет воздушного зазора. Напряжение питания U=U0.

 

 

   Вб

Таблица 3

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| t | U(t) | Ф(t) | H(t) | I(t) |
| 0 | 0 | -0.00174 | 50 | 0.04667 |
| 0.001 | 126.67193 | -0.00165 | 100 | 0.09333 |
| 0.002 | 240.95679 | -0.00141 | 200 | 0.18667 |
| 0.003 | 331.67883 | -0.00102 | 300 | 0.28 |
| 0.004 | 389.96648 | -0.00054 | 400 | 0.37333 |
| 0.005 | 410.11987 | 0 | 600 | 0.56 |

Построенные характеристики на рис.5 (а, б, в).

в. Магнитопровод не имеет воздушного зазора. Напряжение питания U=0.5•U0.

 ;

;  Вб 

Таблица 4

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| t | U(t) | Ф(t) | H(t) | I(t) |
| 0 | 0 | -0.00087 | 50 | 0.04667 |
| 0.001 | 63.33596 | -0.00083 | 100 | 0.09333 |
| 0.002 | 120.47839 | -0.0007 | 200 | 0.18667 |
| 0.003 | 165.83942 | -0.00051 | 300 | 0.28 |
| 0.004 | 194.98324 | -0.00027 | 400 | 0.37333 |
| 0.005 | 205.05993 | 0 | 600 | 0.56 |

Построенные характеристики на рис.6 (а, б, в).

1. Рассчитать и построить вольт-амперную I(U) и фазовую ϕ(U) характеристики катушки с ферромагнитным сердечником, рассматривая ее как идеализированную R=0; XS=0.

См. рис.2.

 

; 





Таблица 5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ф, Вб | ϕ, град | U, В |
| 1.785•10-3 | 77.3 | 297.245 |
| 2.091•10-3 | 75.6 | 348.201 |
| 2.329•10-3 | 76.9 | 387.834 |
| 2.397•10-3 | 78.8 | 399.157 |
| 2.448•10-3 | 79.4 | 407.650 |
| 2.482•10-3 | 80.7 | 413.312 |
| 2.516•10-3 | 82.0 | 418.973 |
| 2.533•10-3 | 82.5 | 421.804 |
| 2.550•10-3 | 83.3 | 424.635 |

Строим фазовую характеристику ϕ(U). Рис.7.

Таблица 6

|  |  |
| --- | --- |
| U, В | I, А |
| 297.245 | 0.047 |
| 348.201 | 0.093 |
| 387.834 | 0.187 |
| 399.157 | 0.280 |
| 407.650 | 0.373 |
| 413.312 | 0.560 |
| 418.973 | 0.747 |
| 421.804 | 0.933 |
| 424.635 | 1.120 |

Строим вольт-амперную характеристику I(U). Рис.8.

1. Рассчитать и построить схему замещения и векторную диаграмму реальной катушки с ферромагнитным сердечником.

См. рис.3.

При расчете векторной диаграммы напряжение на зажимах идеализированной катушки при-нять U'=0.9•U.

U'=261 В. По графику находим ток в катушке и угол ϕ.

I = 0,011 A ϕ = 

 , т.к ; где δ=90-ϕ

R = 3,8 Ом Xs = 45 Ом





Строим векторную диаграмму. Рис.9.

 i

 W δ

 U

Рис.1. Магнитопровод постоянного поперечного сечения S с зазором δ

 I

 Iа Iр

 U

Рис.2. Идеализированная катушка с ферромагнитным сердечником R=0, XS=0

 I R XS

 Iа Iр

 U

 U'

Рис.3. Схема электрической цепи

 I1 R1 I2 I3

 U U' R2 I(U)

Рис.4. Схема электрической цепи

 R1

 R2 Rн

Рис.5. Электрическая схема по методу эквивалентного генератора

Рис.4 (a). Зависимость U(t) при воздушном зазоре, U=U0

Рис.4 (б). Зависимость Ф(t) при воздушном зазоре, U=U0

Рис.4 (в). Зависимость I(t) при воздушном зазоре, U=U0

Рис.5 (a). Зависимость U(t), нет воздушного зазора, U=U0

Рис.5 (б). Зависимость Ф(t), нет воздушного зазора, U=U0

Рис.5 (в). Зависимость I(t), нет воздушного зазора, U=U0

Рис.6 (a). Зависимость U(t), нет воздушного зазора, U=0.5•U0

Рис.6 (б). Зависимость Ф(t), нет воздушного зазора, U=0.5•U0

Рис.6 (в). Зависимость I(t), нет воздушного зазора, U=0.5•U0

 +j

+1

0

 UXs

 U UR

 U0

 ϕ

 I

 Ia

 δ

 Iр

Рис.9. Векторная диаграмма реальной катушки с ферромагнитным сердечником

Программы на паскале

1)

uses crt,dos;

Const S=0.0017;

 W=750;

 q=0.002;

 l=0.7;

 m0=0.00000126;

var F,B,i,H,mc,ls:real;

begin

 clrscr;

 write('‚ўҐ¤ЁвҐ B: ');

 readln(B);

 write('‚ўҐ¤ЁвҐ H: ');

 readln(H);

 F:=B\*S;

 mc:=H/B;

 i:=(F\*l)/(S\*mc\*W)+(F\*q)/(W\*m0\*S);

 writeln('F: ',F:10:6);

 writeln('i: ',i:10:3);

end.

2)

uses crt,dos;

Const S=0.0017;

 W=750;

 q=0.002;

 l=0.7;

 m0=0.00000126;

var F,B,i,H,mc,ls,p0,q0:real;

begin

 clrscr;

 write('‚ўҐ¤ЁвҐ F: ');

 readln(F);

 write('‚ўҐ¤ЁвҐ P0: ');

 readln(P0);

 write('‚ўҐ¤ЁвҐ Q0: ');

 readln(Q0);

 F:=B\*S;

 mc:=H/B;

 i:=(H\*l)/W;

 writeln('F: ',F:10:6);

 writeln('i: ',i:10:3);

end.

3)

uses crt,dos;

Const S=0.0017;

 W=750;

 q=0.002;

 l=0.7;

 m0=0.00000126;

 e=314;

var U,F,B,i,H,mc,ls,p0,q0,y:real;

begin

 clrscr;

 writeln;

 write('‚ўҐ¤ЁвҐ F: ');

 readln(F);

 write('‚ўҐ¤ЁвҐ P0: ');

 readln(P0);

 write('‚ўҐ¤ЁвҐ Q0: ');

 readln(Q0);

 U:=(W\*e)/(sqrt(2))\*F;

 y:=90-(arctan(P0/Q0))\*180/3.14;

 writeln('U: ',U:10:3);

 write('Y: ',Y:10:1);

end.

4)

uses crt,dos;

Const q=314;

 Fm=0.00174;

 Um=410.12;

 l=0.7;

 w=750;

var r:integer;

 t,F,U,I,H:real;

begin

 clrscr;

 Write('‚ў®¤ t: ');

 readln(t);

 write('‚ў®¤ H: ');

 readln(H);

 F:=Fm\*sin(314\*t-1.57);

 U:=Um\*sin(314\*t);

 I:=(l\*H)/w;

 Writeln('F: ',F:10:5);

 Writeln('U: ',U:10:5);

 Writeln('I: ',I:10:5);

 end.

5)

uses crt,dos;

Const q=314;

 Fm=0.00087;

 Um=205.06;

 l=0.7;

 w=750;

var r:integer;

 t,F,U,I,H:real;

begin

 clrscr;

 Write('‚ў®¤ t: ');

 readln(t);

 write('‚ў®¤ H: ');

 readln(H);

 F:=Fm\*sin(314\*t-1.57);

 U:=Um\*sin(314\*t);

 I:=(l\*H)/w;

 Writeln('F: ',F:10:5);

 Writeln('U: ',U:10:5);

 Writeln('I: ',I:10:5);

 end.

6)

uses crt,dos;

Const Fm=0.00174;

 Um=410.12;

 q=314;

 w=750;

 m0=0.00000126;

 y=0.002;

 l=0.7;

var I,U,F,Hy,t,B:real;

 Hc:integer;

begin

 clrscr;

 write('‚ў®¤ t: ');

 readln(t);

 write('‚ў®¤ Hc: ');

 readln(Hc);

 write('B: ');

 readln(B);

 Hy:=B/m0;

 F:=Fm\*sin(w\*t-1.57);

 U:=Um\*sin(w\*t);

 I:=(Hc\*l)/w+(Hy\*y)/w;

 writeln('U: ',U:10:5);

 writeln('F: ',F:10:5);

 writeln('Hy: ',Hy:10:5);

 writeln('I: ',I:10:5);

 end.