**Методические указания к выполнению расчетных заданий**

В практике встречаются линейные электрически цепи при несинусоидальных воздействиях. Периодические электрические величины, закон изменения которых отличается от синусоидального, принято называть несинусоидальным. При расчете линейных цепей при таких воздействиях используется то обстоятельство, что практически любую несинусоидальную электрическую величину (ЭДС, ток, напряжение) можно представить (разложить) бесконечным тригонометрическим рядом Фурье.



Рисунок 22 – К расчету цепи с несинусоидальной ЭДС

Если к цепи (рисунок 22) приложена несинусоидальная ЭДС, то ее можно представить рядом Фурье:

$$e\left(t\right)=E\_{0}+E\_{1m}\sin(\left(ωt+α\_{1}\right))+E\_{2m}\sin(\left(2ωt+α\_{2}\right))+…+E\_{km}\sin(\left(kωt+α\_{k}\right)).$$

т.е. заменить суммой постоянной ЭДС *Е*0 (нулевой гармоникой) и бесконечным числом синусоидальных ЭДС (гармоник) $e\_{k}=E\_{km}\sin(\left(kωt+α\_{k}\right))$, изменяющихся с различной угловой частотой.

Учитывая, что цепь линейна, задачу определения тока *i* в цепи можно свести к методу наложения, рассчитав ток от действия каждой ЭДС в отдельности. Таким образом, определение токов и напряжений при несинусоидальных воздействиях сводится в общем случае к решению одной задачи на постоянном токе и «*n*» задач – на переменном.

В зависимости от точности решения ограничиваются определенным числом гармоник.

При расчете схем для отдельных гармоник следует учитывать, что реактивное сопротивление индуктивного и емкостного элементов зависит от частоты, поэтому эти элементы оказывают токам разных гармоник различное сопротивление. Сопротивление индуктивного и емкостного элементов токам *k*-ой гармоники определяется:

$$X\_{L\left(k\right)}=kX\_{L\left(1\right),}$$

$$X\_{C(k)}=\frac{X\_{C(k)}}{k}.$$

где *k* - номер гармоники,

*ХL*(1) и *ХС*(1) - сопротивления названных элементов токам первой гармоники.

Векторные диаграммы имеют смысл только для каждой гармоники отдельно, а не для всей несинусоидальной кривой. Это же касается и применения комплексного метода.

**Пример 7**

Определить мгновенные и действующие значения токов в ветвях цепи рисунка 23, если к ней приложена несинусоидальная ЭДС

$$e\left(t\right)=28+24\sin(\left(ωt-73,7°\right))+15\sin(\left(3ωt\right)),$$

параметры цепи

 *R*1 = *R*3 = 2 Ом, *R*2 = 12 Ом, *ХC*(1) = 6 Ом.

Составить баланс мощностей и построить топографическую векторную диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов для первой гармоники.



Рисунок 22 - Схема замещения цепи

**Решение**

1. Рассчитываются токи нулевой гармоники. Схема замещения для нулевой гармоники представлена на рисунке 23.

****

Рисунок 23 - Схема замещения для расчета токов нулевой гармоники

Ток нулевой гармоники в первой ветви определяется:

$$I\_{1(0)}=\frac{E\_{0}}{R\_{1}+R\_{2}}=\frac{28}{12+2}=2 А.$$

Ток нулевой гармоники во второй ветви будет таким же, т.е.

$$I\_{2(0)}=I\_{1(0)}=2 А.$$

2. Комплексная схема замещения для расчета токов первой гармоники приведена на рисунке 24.



Рисунок 24 - Схема замещения для определения токов первой гармоники

В этой схеме комплексы сопротивлений для токов первой гармоники имеют значения:

, ,

.

Ток первой гармоники в неразветвленной части цепи  определяется:

,

где:



Токи первой гармоники  и  в параллельных ветвях можно определить по правилу параллельных ветвей, т.е.:





3. Комплексная схема замещения для определения токов третьей гармоники имеет вид:

****

Рисунок 5 - Схема для определения токов третьей гармоники

Сопротивления токам третьей гармоники:

.

.

.

Токи в ветвях схемы для третьей гармоники:

,

где:







4. Мгновенные значения токов в ветвях







Действующие значения токов в ветвях:

.

.

.

5. Результат расчета в цепях с несинусоидальными токами и напряжениями также можно проверить составлением баланса мощностей. Баланс по активной мощности предусматривает равенство активных мощностей Ри=Рп. мощность вырабатываемая в схеме n, определяется как сумма активных мощностей всех гармоник. При этом мощность синусоидальных гармоник может быть определена по комплексам действующих значений напряжения и тока.



Мощность, потребленная схемой, определяется как , где  - действующее значение несинусоидального тока к-ой ветви, т.е. .

В этой формуле К – номер гармоники тока.



.

Аналогично составляется баланс по реактивной мощности. Мощность источников:



Реактивная мощность потребителей:



.

6. Для построения векторных диаграмм необходимо определить падения напряжения на всех элементах схемы.

,

,

,

,

.

Построение векторных диаграмм начинают с изображения на комплексной плоскости векторов токов, допустим, в масштабе *mI*=0,5 А/см. Топографическую векторную диаграмму напряжений начинают с произвольной точки схемы, допустим, с точки *а*, поместив ее в начало координат комплексной плоскости.



Рисунок 26 - Векторная диаграмма токов, совмещенная с топографической векторной диаграммой напряжений для первой гармоники

При этом векторы напряжений откладываются строго в той последовательности, как соответствующие элементы соединены на схеме. Векторная диаграмма для первой гармоники помещена на рисунке 26. Масштаб по напряжению *mu*=2 В/см.

**Расчет линейной цепи с несинусоидальным воздействием**

1. Построить график изменения заданного несинусоидального воздействия (таблица 2), как результат графического сложения гармоник.

2. Рассчитать мгновенные и действующие значения токов в ветвях исходной схемы (рисунок 1÷10) полагая, что *f*=50 Гц.

3. Составить баланс по активной и реактивной мощностям.

4. Определить показания электроизмерительных приборов, считая, что они:

 а) электромагнитной системы (на переменный ток),

 б) магнитоэлектрической системы (на постоянный ток).

5. Построить векторные диаграммы токов (лучевую) и напряжений (топографическую) для первой гармоники.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| *L,* Гн | 0,035 | 0,01 | 0,012 | 0,032 | 0,022 | 0,015 | 0,018 | 0,02 | 0,025 | 0,03 |
| *С*, мкФ | 50 | 40 | 35 | 45 | 60 | 30 | 25 | 20 | 45 | 70 |
| *R*, Ом | 28 | 16 | 18 | 26 | 32 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 |

Таблица 2

|  |  |
| --- | --- |
| № п/п | Приложенное напряжение |
| 1 | 2 |
| 1 | $$50+80\sin(\left(ωt-15,5°\right))+30\sin(\left(3ωt+40°\right))$$ |
| 2 | $$50+75\sin(\left(ωt+25°\right))+25\sin(\left(2ωt-20°\right))$$ |
| 3 | $$45+50\sin(\left(ωt+23°\right))+30\sin(\left(3ωt-15°\right))$$ |
| 4 | $$60+120\sin(\left(ωt-45°\right))+45\sin(\left(3ωt+30°\right))$$ |
| 5 | $$-28+75\sin(\left(ωt+23°\right))+30\sin(\left(2ωt+20°\right))$$ |
| 6 | $$38+124\sin(\left(ωt-17°\right))+80\sin(\left(2ωt-40°\right))$$ |
| 7 | $$60+100\sin(\left(ωt+45°\right))+45\sin(\left(3ωt+20°\right))$$ |
| 8 | $$40+110\sin(\left(ωt-45°\right))+15\sin(\left(2ωt+30°\right))$$ |
| 9 | $$28+40\sin(\left(ωt-17°\right))+15\sin(\left(3ωt-60°\right))$$ |
| 10 | $$45+70\sin(\left(ωt-30°\right))+15\sin(\left(2ωt+30°\right))$$ |
| 11 | $$60+75\sin(\left(ωt+30°\right))+25\sin(\left(3ωt+15°\right))$$ |
| 12 | $$20+64\sin(\left(ωt-13°\right))+15\sin(\left(2ωt+20°\right))$$ |
| 1 | 2 |
| 13 | $$38+120\sin(\left(ωt+75°\right))+55\sin(\left(3ωt-30°\right))$$ |
| 14 | $$28+70\sin(\left(ωt+50°\right))+15\sin(\left(2ωt-60°\right))$$ |
| 15 | $$50+85\sin(\left(ωt-60°\right))+25\sin(\left(3ωt+15°\right))$$ |
| 16 | $$-38+80\sin(\left(ωt+20°\right))+45\sin(\left(2ωt-50°\right))$$ |
| 17 | $$28+44\sin(\left(ωt-73°\right))+20\sin(\left(3ωt+45°\right))$$ |
| 18 | $$28+24\sin(\left(ωt-73°\right))+15\sin(\left(3ωt\right))$$ |
| 19 | $$82+44\sin(\left(2ωt-30°\right))+20\sin(\left(3ωt+30°\right))$$ |
| 20 | $$45+90\sin(\left(ωt-75°\right))+25\sin(\left(3ωt-15°\right))$$ |
| 21 | $$30+14\sin(\left(2ωt-45°\right))+5\sin(\left(3ωt+30°\right))$$ |
| 22 | $$20+40\sin(\left(ωt+10°\right))+35\sin(\left(3ωt-45°\right))$$ |
| 23 | $$18+30\sin(\left(ωt+90°\right))+15\sin(\left(2ωt+45°\right))$$ |
| 24 | $$38+50\sin(\left(ωt+90°\right))+10\sin(\left(2ωt+25°\right))$$ |
| 25 | $$65+44\sin(\left(ωt-90°\right))+10\sin(\left(3ωt+60°\right))$$ |
| 26 | $$20+30\sin(\left(ωt+60°\right))+15\sin(\left(3ωt-45°\right))$$ |
| 27 | $$15+24\sin(\left(ωt\right))+10\sin(\left(3ωt-90°\right))$$ |
| 28 | $$-20+30\sin(\left(ωt-35°\right))+10\sin(\left(3ωt-15°\right))$$ |
| 29 | $$35+70\sin(\left(ωt-75°\right))+35\sin(\left(2ωt-75°\right))$$ |
| 30 | $$-80+110\sin(\left(ωt-10°\right))+45\sin(\left(3ωt-60°\right))$$ |
| 31 | $$40+75\sin(\left(ωt-25°\right))+30\sin(\left(2ωt+40°\right))$$ |
| 32 | $$50+80\sin(\left(ωt+25°\right))+15\sin(\left(3ωt-30°\right))$$ |
| 33 | $$40+50\sin(\left(ωt+30°\right))+20\sin(\left(3ωt-25°\right))$$ |
| 34 | $$50+100\sin(\left(ωt-60°\right))+35\sin(\left(2ωt+30°\right))$$ |
| 35 | $$-20+70\sin(\left(ωt+30°\right))+20\sin(\left(3ωt+20°\right))$$ |
| 36 | $$40+100\sin(\left(ωt-20°\right))+60\sin(\left(2ωt-45°\right))$$ |
| 37 | $$60+110\sin(\left(ωt+90°\right))+45\sin(\left(3ωt+25°\right))$$ |
| 38 | $$-45+100\sin(\left(ωt+45°\right))+25\sin(\left(3ωt+30°\right))$$ |
| 39 | $$30+50\sin(\left(ωt+18°\right))+25\sin(\left(3ωt-40°\right))$$ |
| 1 | 2 |
| 40 | $$45+60\sin(\left(ωt-60°\right))+15\sin(\left(3ωt-30°\right))$$ |
| 41 | $$50+80\sin(\left(ωt-30°\right))+25\sin(\left(2ωt-15°\right))$$ |
| 42 | $$-25+60\sin(\left(ωt-15°\right))+10\sin(\left(2ωt-20°\right))$$ |
| 43 | $$-40+100\sin(\left(ωt+90°\right))+45\sin(\left(3ωt+30°\right))$$ |
| 44 | $$28+60\sin(\left(ωt+60°\right))+20\sin(\left(3ωt-60°\right))$$ |
| 45 | $$50+80\sin(\left(ωt-60°\right))+25\sin(\left(3ωt+15°\right))$$ |
| 46 | $$-38+80\sin(\left(ωt+30°\right))+40\sin(\left(2ωt-40°\right))$$ |
| 47 | $$-20+40\sin(\left(ωt-70°\right))+20\sin(\left(2ωt+45°\right))$$ |
| 48 | $$24+30\sin(\left(ωt-77°\right))+15\sin(\left(3ωt-30°\right))$$ |
| 49 | $$80+40\sin(\left(2ωt+30°\right))+25\sin(\left(3ωt+40°\right))$$ |
| 50 | $$40+90\sin(\left(ωt-90°\right))+25\sin(\left(3ωt+25°\right))$$ |
| 51 | $$35+15\sin(\left(2ωt-65°\right))+5\sin(\left(3ωt-30°\right))$$ |
| 52 | $$24+45\sin(\left(ωt\right))+25\sin(\left(3ωt-45°\right))$$ |
| 53 | $$15+35\sin(\left(ωt+90°\right))+10\sin(\left(3ωt+45°\right))$$ |
| 54 | $$35+60\sin(\left(ωt+90°\right))+15\sin(\left(2ωt+30°\right))$$ |
| 55 | $$60+40\sin(\left(ωt-90°\right))+14\sin(\left(3ωt+50°\right))$$ |
| 56 | $$-20+35\sin(\left(ωt+70°\right))+10\sin(\left(3ωt-65°\right))$$ |
| 57 | $$32+24\sin(\left(ωt-90°\right))+10\sin(\left(3ωt+60°\right))$$ |
| 58 | $$-20+35\sin(\left(2ωt-35°\right))+10\sin(\left(3ωt-25°\right))$$ |
| 59 | $$30+75\sin(\left(ωt-70°\right))+35\sin(\left(2ωt-65°\right))$$ |
| 60 | $$-70+100\sin(\left(ωt-20°\right))+45\sin(\left(3ωt-18°\right))$$ |

 

Рисунок 1 Рисунок 2

 

Рисунок 3 Рисунок 4

 

Рисунок 5 Рисунок 6

 

Рисунок 7 Рисунок 8

 

Рисунок 9 Рисунок 10