# Тема -12: Расчет симметричных цепей, соединенных в “звезду”. Построение векторных диаграмм Построение векторных диаграмм.

**План:**

**1. Трехфазный ток.**

**2. Расчет симметричных цепей, соединенных в “звезду”.**

**Задача№1.** К генератору трехфазного тока, обмотки которого соединены звездой, подключена нагрузка, также соединенная звездой.

Фазное напряжение генератора *Uф=1000 в*, активное сопротивление каждой фазы нагрузки *R=50 см*, а индуктивное *XL=25 ом*. Определить:

а) фазные токи *Iф*;

б) линейные токи *Iл*;

в) линейное напряжение *Uл*;

г) косинус угла сдвига фаз между током и напряжением.

**Решение.** а) Для определения тока в фазе предварительно определяется полное сопротивление *Z* внешней части цепи каждой фазы

,

откуда

;

б) ;

в) ;

г) .

**Задача№2**. Два активных сопротивления *R1=12 ом* и *R2=20 ом* подключены к трем зажимам трехфазного генератора, обмотки которого соединены звездой.

Напряжение в каждой фазе *Uф=127 в*. Определить:

а) ток *I1*, протекающий через сопротивление *R1*;

б) ток *I2*, протекающий через сопротивление *R2*.

***Решение.***



**Задача№3.** От трехфазного генератора подается линейное напряжение *Uл=120 в*к нагрузке, состоящей из 100 ламп в каждой фазе с мощностью каждой лампы в *150 вт*. Определить:

а) линейный ток *Iл*;

б) ток *Iф* в каждой группе ламп, если они соединены треугольником;

в) напряжение *Uф* у ламп, если они соединены звездой.

***Решение.*** а) Потребляемая мощность



откуда

;

б) 

в) .

**Задача№4** Сопротивление якоря генератора трехфазного тока, включенного звездой, равно *2 ом* на фазу. Действующее значение э.д.с. равно *2000 в*. Определить:

а) напряжение фазы, если величина протекающего тока равна *20а*;

б) линейное напряжение.

*Решение.* а) Потеря напряжения в фазе

;

напряжение фазы

.

б) Линейное напряжение

.

**Задача№5.**



Uф = 100 В

Z = (6 + j8) Ом

Р - ?

**Решение:**

Z

Z

Z

\*

\*

A

B

C





**Задача№6.** Симметричный приемник соединен звездой, фазное напряжение

Uф =220В. Построить векторную диаграмму фазных и линейных напряжений, записать их комплексные значения через вектор фазы «а». То же через фазное напряжение фазы «ab», Uф =380В, но симметричный приемник соединен треугольником.

**Решение.** 1.Схема соединения « » дана на рис. 5.24, а; векторная диаграмма напряжений -на рис.5.24,б.

2. Задаемся комплексным значением фазного напряжения для фазы «а»:



3. Фазные напряжения для «b» и «с»:





4. Линейные напряжения







5. Схема соединения «∆» представлена на рис. 5.25, а; ; векторная диаграмма напряжений -на рис.5.25,б.

6. Задаемся комплексным значением фазного напряжения , одновременно это линейное напряжение фазы «аb»: 

7. Фазные напряжения для «bc» и «сa»:





**Задача№7.** К сети симметричной системой линейных напряжений Uл=100 В подключены соединенные звездой потребители, для которых R=Lω=1/Cω=10 Ом, по двум схемам рис.5.27. Найти положение нейтральных точек, фазные напряжения и токи, проверить первый закон Кирхгофа для каждой схемы.

*Решение.1.* Запишем в комплексной форме систему линейных напряжений:



2. Определим комплексные проводимости фаз для схемы рис.5.27,а:







3. Найдем положение точки «n», определим напряжение для фазы «а»:



4. Определим остальные фазные напряжения по векторной диаграмме:





Векторная диаграмма - на рис. 5.28,а.

1. Для схемы рис.5.27,б комплексные проводимости:

1. Определим напряжение фазы «а»:



1. Напряжение для фаз «b» и «с» по векторной диаграмме:





Векторная диаграмма - на рис. 5.28,б.

1. Токи в фазах нагрузки

8.1. Схема на рис.5.27,а:







Проверка по первому закону Кирхгофа:



* 1. Схема на рис.6.27,б:







Проверка по первому закону Кирхгофа:



**Контрольные вопросы**

**1.** Для симметричной нагрузки, соединённой звездой (сопротивлениям провода пренебречь):

а) Дано: *UЛ=380B. Zф=(95+j55) Oм.*

Определить *IB, Р13, QB, S;*

б) Дано: *UЛ=380B IC=22ej90A,* иА=0.Определить ZA,

РА,QA,S;

в) Дано: UФ=220В,SA=6,6кВ\*А, соs=0.8

определить *ZС, IC, QC, PC.*

Для всех вариантов нарисовать векторную диаграмму напряжений и токов, приняв ИAN=0.

# Тема:13. Расчет электрических цепей, соединенных треугольником. Построение векторных диаграмм.

План:

**1. Расчет электрических цепей, соединенных треугольником.**

**2. Построение векторных диаграмм**

**Задача№1**. При нормальных оборотах генератор трехфазного тока вырабатывает напряжение *6600 в*, которое подается на понижающий трансформатор 6600/220. Вторичная обмотка трансформатора подключена к нагрузке из 120 ламп, соединенных треугольником.

Определить мощность и ток генератора, если ; ток, потребляемый каждой лампой, *0,5 а*; потеря мощности в генераторе, трансформаторе и подводящих проводах составляет 6%.

***Решение.*** Ток в каждой фазе нагрузки.

.

Линейный ток

.

Мощность, потребляемая нагрузкой

.

Мощность генератора

,

где 0,94 – к.п.д. цепи;

.

Ток, вырабатываемый генератором,

.

**Задача№2** Генератор трехфазного тока подает напряжение *120 в* и должен питать 150 электроламп по *50 вт*. Определить:

а) величину тока в подводящих проводах;

б) величину тока в лампах, если они включены треугольником;

в) напряжение у ламп при включении звездой.

*Решение.* а) Потребляемая мощность



откуда



б) Величина тока в каждой группе ламп включении треугольником

.

в) Напряжение у ламп при включении звездой

.

**Задача№3.**

**A**

**IA**

**IC UBC**

**C B**

**UЛ=220 B; IA=20 A;**

**PW=2200 BT.**

**P, Q, S-?**

**Решение:**



**Задача№4.**  Рассмотрим некоторые свойства поворачивающего множителя (оператора повтора ) 

**Решение.**  Оператор поворота в полярной, показательной, тригонометрической и алгебраической формах записи.



**Задача№5.** На рис. 1 представлены три единичных комплексных вектора  их значения:

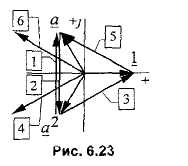


рис. 1

**Решение.**  

Дальнейший поворот  приводит к первоначальному вектору и т.д.

Напомним основное свойство исходных векторов: 

**Задача№6**. По правилам сложения векторов запишем некоторые соотношения (суммарный вектор на рис. 1 отмечен цифрой):

**Решение.**

1)  4) 

2)  5) 

3)  6) 

**Задача№7.**  К трехфазной сети и симметричными линейными напряжениями Uл=220 В подключен треугольником приемник, сопротивление каждой фазы которого  (см. рис. 5.,а). Найти токи в каждой фазе нагрузки и в линейных проводах, показание каждого ваттметра, баланс активных мощностей.

**Решение 1**.Примем комплексные напряжения  тогда напряжения на остальных фазах  и  (см.рис.5.б ).

2. Комплексное сопротивление нагрузки 

3. Определим комплексные фазные токи:







Проверка: 

1. Определим комплексы линейных токов
   1. Вариант по первому закону Кирхгофа для узловых точек a’,b’,c’:

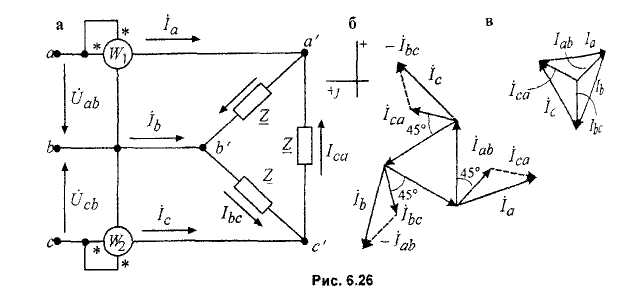






Фазные и линейные токи построены на рис.5., б

Рис.5.



4.2. Вариант с использованием свойств поворачивающего множителя:







Проверка: 

Как видно, рассчитав один ток  и используя множитель , можно определить все токи , они изображены на рис.5.26,в.

5.Найдем показание ваттметров:

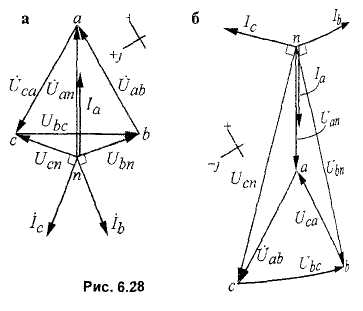
Вт;

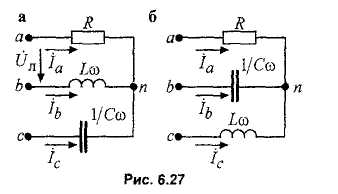


6.Активная мощность в цепи: Р=Р1+Р2=1532+5716=7248 Вт.

Проверка –мощность тепловых потерь: Р=3Рф=Вт.

Баланс мощности удовлетворяется.





**Задача№8.**  Определить напряжение на выводах *А* и *Y* обмоток

генератора (см. рис. 4), если закоротить выводы *X* и *B* этих обмоток

(см. рис. 3б); ЭДС обмоток равны 220 В.

***Решение*.** При соединении выводов *X* и *В* перемычной обмотки фаз

*А* и *В* соединены последовательно (рис. 11а). Следовательно,комплексное напряжение между выводами *А* и *Y* с учётом соотношений (2).

*UAY=EB+EA=220(--j)+220=220e-j60В,*  то есть показание вольтметра 220 В. Соответствующая векторная диаграмма приведена на рис.11б.

**Задача№16.** Из-за ошибочной маркировки концов вторичной обмотки фазы *С* трехфазного трансформатора присоединение вторичных обмоток

звездой были соединены их зажимы *X, Y, С* (см. рис. 4). Определить напряжения *UAB, UAZ,UBZ*, если *EA= EB =EC = 220В.*

***Решение.*** При ошибочном соединении концов обмоток (рисунок 12а) ЭДС фазы С направлена к нейтральной точке N. Векторная диаграмма напряжений дана на рисунке 12б. Из векторной диаграммы с учётом соотношений (2) получим:

#### 

С

В

А

ЕВС

ЕСА

ЕАВ

**V**

B

X

UAY

Y

А

ЕА

ЕВ

Y

В

А

#### 

б)

a)

Рис. 10 Рис. 11

*UAB = EA - EB=220-220(--j) = 380 e j30 B*

*UBZ=EC + EB = 220(-+j)+220(--j) =220 e j180 B*

*UAZ = EC +EA = 220(-+j) + 220 = 220 e j60 B*

Следовательно, приёмники с номинальным напряжением 380 В будут подключены на двух фазах к пониженному напряжению 220 В.

Ошибки, допускаемые при соединении звездой двух и трех фаз и рассмотренные в примерах 1 и 2 иногда возможны при подключении двух и трехфазных осветителей, люстр и т. д. В этих случаях часть ламп оказывается под напряжением в  раз меньшим номинально.

**Задача№9.** При соединении обмоток трансформатора в треугольник между собой соединены концы обмоток *А* с *Y, В* с *Z* и *C* с *X* (рис. 4 и 3б). Определить напряжения *UAB, UBC, UCA.*

***Решение.***Соединению трехфазных ЭДС в указанный треугольник (рис. 13а) соответствует векторная диаграмма (рис. 13б).

Из векторной диаграммы имеем:

*UAB = EAB = E e -j150*

ЕСА

ЕВС

ЕАВ

С

В

А

ЕВС

ЕАВ

ЕСА

*UBC = EBC = E e -j270*

*UCA = ECA = E e -j30*

*C*

(рис 13) 

Сравнивая схему рис.13а со схемой рис. 8а (или рисунок 9) видим, что в треугольнике рис. 8, ЭДС направлены против часовой стрелки, а в треугольнике рис. 13а – по часовой стрелке. Соответственно направлены и ЭДС на векторных диаграммах рис. 10 и 13б. Следовательно, изменению порядка соединения обмоток в треугольник (вместо *AZCYBX* соединение *AYBZCX*) соответствует смещение начальной фазы всех ЭДС на 1800 или изменение знака этих ЭДС.

Принято считать начальную фазу где обмотки *AX* равной нулю. Тогда в треугольнике *AZCYBX* (см. рис. 9), присвоив ЭДС EAB начальную фазу, равную нулю, получим «левый треугольник»ЭДС и напряжений (см. рис. 10). В треугольнике *AYBZCX* (рис.13а), присвоив ЭДС Еса начальную фазу, равную нулю, получим «правый треугольник» ЭДС и напряжений (рис. 13б).

**Задача№10.** Определить напряжение на выводах *А* и *Y* обмоток

генератора (см. рис. 4), если закоротить выводы *X* и *B* этих обмоток

(см. рис. 3б); ЭДС обмоток равны 220 В.

***Решение*.** При соединении выводов *X* и *В* перемычной обмотки фаз

*А* и *В* соединены последовательно (рис. 11а). Следовательно,комплексное напряжение между выводами *А* и *Y* с учётом соотношений (2).

*UAY=EB+EA=220(--j)+220=220e-j60В,*  то есть показание вольтметра 220 В. Соответствующая векторная диаграмма приведена на рис.11б.

**Задача№11.** Определить напряжение на выводах *А* и *Y* обмоток

генератора (см. рис. 4), если закоротить выводы *X* и *B* этих обмоток

(см. рис. 3б); ЭДС обмоток равны 220 В.

**Решение.** При соединении выводов *X* и *В* перемычной обмотки фаз

*А* и *В* соединены последовательно (рис. 11а). Следовательно, комплексное напряжение между выводами *А* и *Y* с учётом соотношений (2).

*UAY=EB+EA=220(--j)+220=220e-j60В,*  то есть показание вольтметра 220 В. Соответствующая векторная диаграмма приведена на рис.11б.

**Задача12**. Определить мощность всех двигателей и потери в проводах по условия примера 4.

**Решение*.*** Фазный ток трансформатора и фазное напряжение нагрузки вычислены в примере 4. При полученных данных комплексная мощность фазы.

SФ=Uф Iф=UAIA=220ej4 15 =4100 ej60 BA

Мощности трехфазной нагрузки полная S=3 SФ =34,1=12,3кВА

активная и реактивная Р=S cos=12,30,5=6,15кВт

Q=S sin=12,3=10,6 кВ

Мощность потер в проводах трехфазной цепи.

Рпр=3IфUА=3IфRпр=3192 1=1083 Вт

**Контрольные вопросы**

**1.** Для симметричной нагрузки, соединённой треугольником (сопротивление проводов пренебречь):

а) Дано: *UЛ=380B, ZAB=(192+j192) Ом.* Определить *IB,РВС,QBC, S.*

б) Дано: *Uф=220B, ICA=5 A, СА=370*

Определить *IA, PAB, SAB, Q.*

в) Дано: *UФ=220В, IC=17,3А, соsСА=600.*

Определить *IАВ,PAB,QAB, S.*

Для всех вариантов нарисовать векторные диаграммы токов.

**Тема-14.** **Расчет несимметричных соеденённом звездой трёхфазных электрических цепей. Построение векторных диаграмм.**

План:

1. Расчет несимметричных трёхфазных электрических цепей

2. Построение векторных диаграмм

**1.**  Для контроля правильности чередования фаз (т.е. маркировки выходных зажимов или шин трехфазных источников энергии) используется схема с двумя лампочками и конденсатором (рис.21а), имеющими одинаковые по модулю проводимости.

# 

N1

A

B

A

N

UBN1

UCN1

UAN1

C

B

A

N

Ярко

Тускло

а) б)

Рис.3

Необходимо определить напряжения на лампочках.

**Решение.** По формуле (11) находим напряжение смешение нейтрале, если *УА= jBС УВ=УС=G=BC*

*UN== = = =U  =  = (-1+j3)*

Полученному значению комплексного напряжения *UN* соответствует вектор *N N1*(рис.21б). Из этой же диаграммы напряжения на фазах *В* и *С*.

*UBN=U BN –UN=U а-(-1+j3)=U(-+0.2-j0.6)=U(-0.3-j1.465);*

*UCN = UCN-UN=Uа-U(-0.2+j0.6)=U(-++0.2-j0.6)=U(-0.3--+j0.265).*

Если *U*=220B,то напряжения на фазах *В* и *С*.



При правильном чередовании фаз *А,В,С* лампочка в фазе *В* горит ярко, а лампочка в фазе *С* горит тускло (рис. 21а)

***2.*** В трех фазном нагревателе, соединенном звездой с нулевым проводом (19 рис ключ К замкнут), *ZA* =10ом, *ZB* = 4ом, *ZC* = 5ом а линейное напряжение *UЛ*=380B. Определить ток в цепи.

**Решение:**При наличие нулевого провода *UN=0*, поэтому токи в фазах напряжение  *UФ=UЛ /=220B*

*IA=UA/ZA*=220/10=22A;

*IB= UВ/ZВ=220а2/4=55(- -j) A*

*IC= UC/ZC=220a/5=44(- +j) A*

Уравнительный ток нулевого провода



Векторная диаграмма токов показана на рис 22.

***3.***  Электропитание квартир жилого дома производиться по схеме звезда с нулевым проводом (рис23). Номинальное напряжение потребителей 127 *В,* а лампочки освещения перегорают при перенапряжение около 30% [т.е. перегорают при напряжение .

Необходимо определить токи в фазах при нормальном режиме и дать анализ аварийного режима, возникшего в результате случайного обрыва нулевого провода.

С

N1

N

N

B

A

100 Вт

100 Вт

100 Вт

100 Вт

300 Вт

300 Вт

300 Вт

Рис 23

**Решение:** Определим фазные токи в нормальном режиме:

Так как нагрузка активная, то фазные токи совпадают по фазе с фазными напряжениями.

Ток нулевого провода

*IN=IA+IB+IC=IA+a2IB+aIC=7.1+(-  - j) 2.36+(-- + j) 0.786=*

*=5.53-j1.38=5.7e -j14 A.*

Рассмотрим режим при обрыве нулевого провода. Для определения смещения нейтрали предварительно определим сопротивления фаз:

*R*A=/*P*A=1272/900=18 ом;  *R*B=/*P*B=1272/300=54 ом; *R*C=/*P*C=1272/100=162 ом

Смещение нейтрала *UN===*

*=68.5-j16.9 B*

N1

С

В

А

N1

За счёт смещения нейтрала резко возрастут напряжения на

фазах В и С (рис 24). Рассчитаем эти напряжения:

*UCN=UCN-UN=127(-  + j)-68.5+j16.9=-132+j126.9B*

*UBN=UBN-UN=127(-  - j)-68.5+j16.9=-132-j93.1B*

*UCN==183B; UBN==164B рис 24*

В фазе *А* напряжение значительно понизится. В фазе *B* и *С* напряжение значительно поднимется *UBN*=164B *UCN*=183B;

**Вывод:** для поддержания номинального напряжения на нагрузки нельзя отключать нулевой провод. Поэтому в нулевой провод никогда не ставятся предохранители и выключатели.

**Контрольные вопросы:**

**1.** В трех квартирах (рис.23) включено освещение. Суммарная мощность лампочек в фазе А 660 Вт , в фазе В 330 Вт, в фазе С 55 Вт. Фазное напряжение 220 В.

Определить (сопротивлением проводов пренебречь):

а) токи фаз и нулевого провода;

б) напряжения на фазах при обрыве нулевого провода, считая сопротивление провода постоянными.

Для контроля правильности чередования фаз используется схема, где вместо конденсатора включена Катюшка индуктивности с проводимости BL = GB = GC

Определить напряжения на лампочках в фазах В и С.

**2.**Каковы напряжения на фазах симметричной нагрузки, если произошел обрыв линейного провода фазы С, а линейное напряжение источника  *Uл = 380 В?* Сравните их с напряжениями в нормальном режиме.

6.В трехфазной активной несимметричной цепи с активной нагрузкой, соединенной звездой с нулевым проводом (см. рис.15),известны показания *İA, İВ, İС*трех амперметров *АА АВ АС.* Определить показание *İN* амперметра *АN* , включенного в нулевой провод,если:

а) *İA=10 А, İВ = 40 А, İС = 10 А;*

б) *İA=10 А, İВ = 20 А, İС = 30 А.*

**Тема-15:** **Расчет несимметричных соеденённом триуголником трёхфазных электрических цепей. Построение векторных диаграмм.**

План:

1. Расчет несимметричных трёхфазных электрических цепей

2. Построение векторных диаграмм

**1.** На рис. 1,а дана цеп с параметрами нагрузки, соединенными в треугольник

,,

 и сопротивлением подводящих проводов На зажимы цепи подана несимметричная система линейных напряжений UAB=220B, UBC=190B, UCA=150B.

Определить фазные и линейные токи, провести проaверку по законам Кирхгофа.

***Решение****.*1. Комплексные значения сопротивлений в полярной форме:

2. Эквивалентное преобразование схемы

2.1. Переход от «∆» к эквивалентной «λ»:

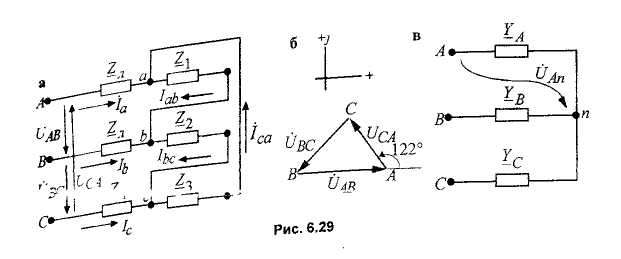


Рис.1







2.2. Суммарное сопротивление фаз:







2.3 Эквивалентные проводимости фаз:







Эквивалентная схема на рис.1,в.

**2**. Построим треугольник напряжений на комплексной плоскости (рис.1б). Порядок построения: за основу примем отрезок АВ, путем засечек – отрезки АС и ВС и находим положение точки С. Запишем комплексные значения линейных напряжений:



Углы могут быть определены по теореме косинусов или непосредственным замером на чертеже в масштабе.

4.Определим положение точки «n» через напряжение для фазы «А».



5. Напряжения на фазах «В» и «С»:





6.Токи в линейных проводах:







Проверка:



1. Падения напряжения в линейных проводах:







8. Напряжения на фазах эквивалентной звезды:







9. Линейные напряжения в узловых точках a,b,c:



10. Определим токи в фазах нагрузки:







11. Проверка по первому закону Кирхгофа:







Соблюдается во всех точках в пределах точности счета (сравнение с токами п.6 данной задачи).

12. Проверка по второму закону Кирхгофа для контура AabBA(рис.5.а):



Результат совпадает с заданным напряжением.

13. Комплексные мощности элементов схемы:













14. Суммарная комплексная мощность



**3.** Разложить несимметричную систему напряжений , ,  на симметричные составляющие аналитическим и графическим методами. Найти симметричные составляющие линейных напряжений.

***Решение.* 1**. Исходную систему фазных напряжений представим в алгебраической форме: , , 

2. Определим симметричные составляющие фазного напряжения (для фазы «а»):







3. Определим симметричные составляющие напряжения для фаз «b» и «с»:











**4.** Симметричные составляющие линейных напряжений

4.1.Нулевой последовательности: -нет составляющих нулевой последовательности.

4.2. Прямой последовательности







* 1. Обратной последовательности:







5. Графическое разложение проводят с использованием аналитических выражений п.2 данной задачи

5.1.Исходная векторная диаграмма фазных напряжений -рис. 5.30, а.

5.2. Строим вектор - рис. 5.30, б.

5.3. Строим вектор  -рис. 5.30,в.

5.4. Строим вектор  - рис. 5.30,г.

Каждый суммарный отрезок при построении равен соответственно 

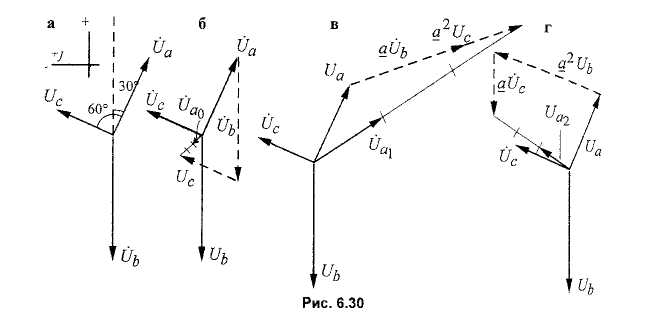


Рис. 5.30

**2.**. В трехфазном нагревательном приборе, элементы которого соединены треугольником, ZAB=10 Ом ZBC= 4 Ом , ZCA=5 Ом**.** Определить фазные и линейные токи, если *Ú AB=220 е j30*B.

**Решение*.***Так как фазные и линейные токи, не образуют симметричную трехфазную систему, то расчет тока каждой фазы производится в комплексной форме.

Фазные токи



Линейные токи

*İA= İAB - İCA=(19+j11) – (-38+j22) =(57-j11)=58.1e –j10.55 A*

*İB = İBC - İAB= -j55-(19+j11) = (-19- j66)=68.6 e106.5 A*

*IC= İCA - İBC=(-38+ j22)- (- j 55)= (-38 + j 77) = 86 e j116.15 A*

Векторная диаграмма линейных токов показана на рис.25.

IC

UФО

IC

С

В

А

А

В

С

Рис. 3 Рис4

**Контрольные вопросы:**

1. определить напряжения и токи фаз при обрыве нулевого провода по данным примера.

в несимметричном треугольнике Uл = 220 В ;

ZAB = (173 + j100) Oм;

ZВС = - j200 Ом;

ZСА = 173-j100 Ом.

а) Определить линейные и фазные токи.

б) Рассчитать мощность трехфазной цепи.

в)Определить линейные и фазные токи при обрыве линейного провода фазы А.

**2.** В трехфазной активной несимметричной цепи (см.рис.15) произошел обрыв нулевого провода. Измерены показания *ÚAB* и *ÚA* двух приборов *VAB*и *VA*.Определить показание вольтметра *VВ*, если сопротивления двух фаз *В* и *С* одинаковы, а показания приборов

1) *UАВ = 380 В UА = 77 В*

2) *UАВ = 380 В UА = 253 В*.

**Тема-16: Расчет несинусоидальных электрических цепей**

План:

1. Расчет периодических несинусоидальных электрических цепей.
2. Расчёт действующего значения периодических токов, ЭДС, напряжений.

Расчет периодических несинусоидальных электрических цепей.

***1.*** Предоставить треугольный периодический ток (см. рис.а) в виде ряда Фурье.

*i*.A 1 2 3 4 5

0

-0.1 T Imin I0 Imax -0.2

-0.3

Рис.а

**Решение*.*** Используем таблицу -1 и сравниваем треугольную функцию (u) и заданную. При этом оказывается, что заданная функция отличается от табличной (u) среднее знание I0=0.2A. Табличная функция, имеющая U0=0 раскладывается в следующий ряд: U(wt)=(sinwt-sinwt+sinwt-…) определяемый двумя параметрами: Umи =2П/Т.

Для заданной функции (рис а) с учётом постоянной составляющей I0 вычислим все обходимые постоянные величины: Im и, максимальное по модулю отклонение от среднего значения

Im== Imin-I0 = -0.3-(-0.2) =0.1A

Условия частоты первой гармоники

=2π/Т=2 π /210-3=3140 ряд/c

Тогда после подстановки в табличную функцию в место Um значений Im=0.1А и =3140 ряд/c, а также добавлено постоянной составляющий I0=0,2А периодический ток (рис а) представляется следующим рядом Фурье:

I(t)=I0+(sin t-sin3t+sin5 t…)=-0.2+(sin3140t-sin3 3140t+ sin53140t-…).

Рассмотреть периодического напряжения и, заданное осциллограммой (не жирная, кривая на рис 1а) и дать анализ его разложения в ряд Фурье.

Решение: Из анализа графика рисунок 1 а видно, что это периодическое напряжения не обладает никакой симметрией. Действительно, его разложение в ряду Фурье (7,2), ограниченное тремя первыми членами и данное рисунок 7,1 а графиками 1-й и 3-й гармоник и постоянной составляющей u(t)=115+150sin(t-300)+60sin(3t-900) в аналитической форме включает постоянную составляющею и 1-ю и 3-ю гармоники с ненулевыми начальными фазами, которые при записи ряда в форме (1) дадут и синусоидальную и косинусоидальную составляющие:

U(t)=115+130sint-75cost-60cos3t.

Однако при смещении начало отчёта на одну треть периода вправо эта функция станет симметричной относительно оси ординат (симметрия 1) и её разложение в ряд Фурье не будет содержать синусоиды (см. положение 1-й и 3-й гармоник относительно нового начала отсчёта на рис 1а)

u(t)=115+150cost-60cos3t.

Если же сместить начало отсчёта на 1/12 периода (т.е. по фазе 1-й гармоники на 300), то это периодическое напряжение относительно постоянной составляющей будет обладать симметрией 3. Если при этом одновременно сдвинуть ось абсцисс вверх на постоянную составляющую U0=115 B (т.е. условно приняв u0=0), то периодическое напряжение, заданное рис 7,1а, будет одновременно обладать симметрией 2 и 3 итак, при смещении начала отсчёта на 1/12 периода вправо

U(t)=115+150sin +60 sin3t,

т.е. разложение в ряд Фурье содержит только постоянную составляющую и синусоиды с несчётными порядковыми номерами (см. положение 1-й и 3-й гармоник относительно этого начала отсчёта на рис. 1а).

**3.** Для анализа гармоник напряжения однополупериодного выпрямления используется схема рис 5. Необходимо определить ёмкость конденсаторов фильтров 1-4й гармоник, если индуктивная катушка всех фильтров имеет индуктивность 100м Гн, а её активным сопротивлением можно пренебречь.

**Решение.** Из осциллограммы напряжения определяем период напряжения Т=0,02с. Тогда угловая частота первой гармоники =2П=2П\*50=314рад/с. Пренебречь активным сопротивлением индуктивной катушки и активной проводимости конденсаторов, имеем резонансную частоту =1/=1/3142\*0.1=106\*10-6ф=106мкф.

Для 2-й, 3-й, 4-й гармоник имеет частоты е=2о3=3о;

 4=4о и соответственно с2=с1=26,5мкф с3=с1=11,8мкф

с4=с1=6,9мкф.

Конденсатор с0 (рис. 7,5) используется для выделения постоянной составляющей. Практически добротность резонансных контуров не очень высока, поэтому избирательность такого анализатора гармоник не достаточно, а сами фильтры нуждаются в экспериментальной настройке.

**Контрольные вопросы и задачи.**

Используя таблицу 7,1 разложить на гармоническое составляющее:

а) напряжение однополупериодного выпрямления (рис. б).

б) напряжение двух полупериодного выпрямления (рис. 7.г).

1. Какое из этих напряжений (рис. б и рис .7.г) будет содержать больше гармоник и почему?
2. Использую таблицу 7,1; разложить линейно нарастающие напряжения (7,1б) в ряд Фурье.

**Замечание:** считать, что линейный участок не имеет разрывов, частоту первой гармоники обозначит 1; объяснить, почему разложение этой функции не содержит косинусоиды.

4. Обладают ли симметрией периодические напряжения (рис.7.1 в,е)?

Возможно ли изменением начала отчёта привести их к какому-либо виду симметрии? На какую часть периода необходимо для этого произвести смещение начала отчёта?

1. Для анализа периодического напряжения (рис.3) использован фильтр (рис.5) . Получение гармоники изображены на этом же графике.

а) Записать разложение периодического напряжения в ряд Фурье.

б) На каких из четырёх фильтров выделены гармоники и почему?

u.b u.b

300 30

200 20 T U Uo

100 10

0

0.01 0.02 0.03t m.c  1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 t mc

рис б. рис в.

**Расчёт действующего значения периодических токов, ЭДС, напряжений.**

1. Определить мгновенные значения токов в схеме (рис.6) где L1=0.1Гн, С1=40мкф, R1=30ом R2=50ом L2=0.04Гн e(t)=8+3cos500t.

Собственным потреблением энергии вольтметра и амперметра пренебрегаем.

A

V

L1 C1

i1 R2 V L2

i R1 E A

рис 6

**Решение.** Поочерёдно рассчитаем токи при действии только одной составляющей.

1. Принимаем, что действует только постоянная составляющая ЭДС E0=8В. При этом постоянный ток контура R1, R2, L2.

I0=I02=E0/(R1+R2)=8/(50+30)=0,1А

так как ток ветви с ёмкостью С1 равен нулю I01=0

2.Считаем, что действует только гармоническая составляющая ЭДС

E1=3cos500t=3sin(500t+900).

На частоте этой гармоники реактивные сопротивления цепи

XLI=L1=500\*0,1=50ом XС1=1/С1=1/500\*40\*10-6=50ом

XL2=L2=500\*0.04=20ом; X1=XLI-XС1=50-50=0

Так как x1=0,то ветвь с L1и С1 на этой частоте накоротко заменяет ветвь с R2 и L2.. В соответствие с законом Ома комплексные токи

1==E1/R1=3ej90/30=0.1e j90.  I=0

Мгновенные знания тока ветвей: i(t)=0;

I1(t)=i(t)=0.1sin(500t+900)=0.141cos500t.

3.Суммируем частичные токи и определяем мгновенные значения токов ветвей:

i=I0+i1=0.1+0.141cos500t A; i1=I01+i=0.141 cos500t A:

i2=I02+i=0.1 A.

к

ом

Rgon 30

25

20 Rg

RB 15 R0 T

10

LB 5 RB

а) рис .7 0 б)

***2.*** Номинальное значение постоянной составляющей напряжения автомобильного трёхфазного генератора Uном=14,213, сопротивление обмотки возбуждения RB=4.5ом. При некоторой частоте вращения генератора 1/5 часть периода напряжение генератора приложено непосредственно к обмотке, а остальную часть периода через добавочное сопротивление Rgon=27.7 ом (первая ступень регулирования)- рис 7а.

График периодического изменения сопротивления во времени показан на рис 7,7б.

Определить среднее значение тока обмотки возбуждения генератора.

**Решение.** Среднее значение сопротивления Ro (рис. 7б) определяется в соответствии с формулой Uo=(t) dt.с учётом того, что (t)dt=(t)dt+(t)dt=RB-0.2T+(RB+Rgon)(T-0.2T)

Среднее значение тока в цепи возбуждения (постоянная составляющая) I0UНОМ/R0=14.2/26.7=0.54A.

Заменим, что поддержание тока вблизи его постоянной составляющей с небольшими компаниями обеспечиваются индуктивностью обмотки возбуждения. Действительно, по правилу Ленца ЭДС самоиндукции обмотки возбуждения стремится поддерживать ток обмотки возбуждения около его начального значения в моменты срабатывания контактов. Чем больше индуктивность обмотки LB и чем меньше период Т, тем стабильнее поддерживается значение I0.

***3.*** Вычислить среднюю мощность цепи рисунок -6.

**Решение.** Используя расчёты токов в этой схеме, выполненные в примере 7,4 этого параграфа, имеем мгновенные значения ЭДС и тока в ветви с ЭДС:

e(t)=8+3cos500t

i(t)=0.1+0.1 cos500t

Тогда в соответствии с формулой (7,4)

P=E0I0+E1I1cos1=8\*0.1+3\*0.1=1.1 Bт.

**Контрольные вопросы.**

1. Рассчитать мгновенные значения токов в ветвях схемы (рисунок 7,8), если, R1=20 ом; R2=40 ом; R3=30 ом; L1=0.1Гн; С1=10мкФ; С2=5 мкФ

U(t)=50+20sin(1000t+300).

Определить показания приборов (рисунок 7,8), если они измеряют действующее значение.

1. Определить постоянную составляющую периодического тока в обмотке возбуждения генератора по исходным данным примера 7,5.

Генератор имеет большую частоту вращения, поэтому 1/10 часть периода обмотка непосредственно включена на напряжение генератора, а остальная часть периода включена через добавочное сопротивление.

1. К цепи (рисунок 7,9) подведено напряжение U (t), определяемое

гармониками (рисунок 7,3). Параметры цепи L1=L2=0.1Гн, C2=11.25мкФ

а) Определить ёмкость С1 из условия обеспечения резонанса напряжений

на 1-й гармонике для L1 и С1

б) При вычисленном значении С1 определить показания приборов, если

они измеряют действующие значения.

**4.** Определить среднее по модулю значение периодического напряжения, заданного осциллограммой (см. рисунок 7,3-жирная кривая).

**Решение.** Исследуемое напряжение симметрично относительно начала координат и представляется следующим рядом.

Фурье: U(t)=300 sint-100 sin3t.

Тогда среднее значение функции за половину периода

Uср=(Um1-Um3)=0.637(300-100)=170 B

**5.** Вычислить действующее значение периодического напряжения (см. рисунок 7,1а).

**Решение.** Разложение этого периодического напряжения дано в примере 7,2.U содержит только при слагаемых:

U(t)=115+150cost-60cos3t.

Согласно формуле (7,3) U=

***6.*** Определить показания приборов в схеме (см рисунок 7,6), если они измеряют действующее значение.

**Решение.** Используя расчёты примера 7,4, определяем составляющие напряжения на зажимах вольтметра поочерёдно при действии каждой из составляющих ЭДС

1. При действии E0=8 B

UOV=UOR2=I02\*R2=0.1\*50=5 B

1. При действии e1=3cos500t

U=U=U=XC1I=50\*0.1=5 B

В соответствии с формулой (7,3) показание вольтметра

UV===7.07 B

Показание амперметра (расчёт токов см пример 7,4)

IA== =0.141 A

**7.** Вычислить среднюю мощность цепи рисунок 7,6.

**Решение.**  Используя расчёты токов в этой схеме, выполненные в примере 7,4 этого параграфа, имеем мгновенные значения ЭДС и тока в ветви с ЭДС:

e(t)=8+3cos500t

i(t)=0.1+0.1 cos500t

Тогда в соответствии с формулой (7,4)

P=E0I0+E1I1cos1=8\*0.1+3\*0.1=1.1 Bт.

**7.** Определить коэффициенты dф,da,dиск для напряжения, заданного осциллограммой рисунок 7,3.

**Решение.** Для расчёта коэффициентов воспользуемся разложением этой функции в ряд Фурье, содержащий первую и третью гармоники:

U(t)=300sint =100sin3t

Действующее значение вычисляем по формуле (7,3)

U===223 B.

Среднее по модулю значение рассчитаем с учётом среднего значения для синусоиды за половину периода

UСР===0.637Um1- 0.637Um3=0.637 (300-100)=170 B.

Аналогичный результат получен в примере 7,6. Максимальное значение функции и действующие значения 1-й гармоники определяем из осциллограммы рисунок 7,3:

Umax=400 B U1=Um1/=300/=213 B.

Тогда значения коэффициентов будут равны:

dф==1.31; da==1.79; dиск==0.955.

Синусоида, искаженная 3-й гармоникой, имеет коэффициенты, значительно отличающиеся от соответствующих коэффициентов идеальной синусоиды (таблица 7,1).

**8** Трёхфазный трансформатор на выходных зажимах имеет несинусоидальное напряжение (рисунок 7,11) и питает симметричную трёхфазную цепь. Активное сопротивление фазы RФ=17,3ом, ёмкостное сопротивление фазы на 1-й гармонике XФ1=30ом. Дать анализ режимом цепи при соединении звездой с нулевым проводом и без него.

**Решение.** Из осциллограммы рис. 7,11 в соответствии с масштабом записываем напряжение фазы А рядом Фурье (на рисунке пунктром изображена 1-я гармоника фазы В и сплошной линией 3-я гармоника ЭДС, одинаковая для всех трёх фаз): UA=540sint+56sin3t

Полное сопротивление фазы на 1-й гармонике

Z1===34.6 ом

на 3-й гармонике Z2===20 ом

При соединении звездой с нулевым проводом:

фазное напряжение UФ===385 В

линейное напряжение U^=U1==664 B

По методу наложения рассчитаем токи поочерёдно для каждой гармоники.

Фазный ток 1-й гармоники I1==11.1 A

Фазный ток 3-й гармоники I3==2 A

Фазный ток Iф===11.3 A

Ток нулевого провода IN=3I3=6 A

и соизмерим с фазным током.

При соединении звездой без нулевого провода напряжение смещения для 1-й гармоники равно нулю, а для 3-й

UNN= т.е. напряжения смещения равно 3-й гармонике напряжение трансформатора: UNN=U3=56/=40 B

фазные токи не содержит 3-й гармоники IФ=I2=U1/Z1=11.1 A

Если соединить обмотки трансформатора в треугольник, то линейное напряжение нагрузки равно фазному и содержит только 1-ю гармонику:

U^=UФ=U1, поэтому токи приёмника при этом способе его соединения содержат только 1-ю гармонику.

Если к выводам разомкнутого треугольника обмоток трансформатора включить вольтметр то он покажет утроенное напряжение нулевой последовательности: 3U3=3\*40=120 В

**Контрольные вопросы.**

1. Рассчитать мгновенные значения токов в ветвях схемы (рисунок 7,8), если, R1=20 ом; R2=40 ом; R3=30 ом; L1=0.1Гн; С1=10мкФ; С2=5 мкФ

U(t)=50+20sin(1000t+300).

1. Определить показания приборов (рисунок 7,8), если они измеряют действующее значение.
2. Определить постоянную составляющую периодического тока в обмотке возбуждения генератора по исходным данным примера 7,5.
3. Генератор имеет большую частоту вращения, поэтому 1/10 часть периода обмотка непосредственно включена на напряжение генератора, а остальная часть периода включена через добавочное сопротивление.
4. К цепи (рисунок 7,9) подведено напряжение U (t), определяемое гармониками (рисунок 7,3). Параметры цепи L1=L2=0.1Гн, C2=11.25мкФ

а) Определить ёмкость С1 из условия обеспечения резонанса напряжений на 1-й гармонике для L1 и С1

б) При вычисленном значении С1 определить показания приборов, если они измеряют действующие значения.

# Тема-17 Определение параметров схем преобразования пассивных четырехполюсников.

**План:**

**1. Т- образная четырехполюсник.**

**2. П- образная четырехполюсник**

## Т- образная четырехполюсник

## .Для Т- образная четырехполюсника схема замещения

I1

I2

I0

R1

R2

U1

U2

R0



если равно А=, В=, С= D=  то основные уравнений четырехполюсника :



**П- образная четырехполюсник**

Для П- образная четырехполюсника схемы замещения

111

11

211

21

R0

R2

R1

I2

I1

U2

U1



если А=; В=; С=, D= то основные уравнений четырехполюсника

Коэффициенты А и D безразмерны, коэффициент В имеет размерность *Ом* , коэффициент С - *Сим*



Из вышесказанного можно сделать вывод, что зная коэффициенты четырехполюсника, всегда можно найти параметры Т- и П-образных схем его замещения.

Четырехполюсник называет симметричным, если при перемене местами источника питания и нагрузки токи в источнике питания

**3.**



**;**

A



**.**

**U1-?**

**Решение:**



### Таблица 1. Формы записи уравнений пассивного четырехполюсника

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Форма | Уравнения | Связь с коэффициентами основных уравнений |
| А-форма | image043;  image045; |  |
| Y-форма | image047;  image049; | image051; image053; image054; image056; |
| Z-форма | image058;  image060; | image062; image064;  image066; image068; |
| Н-форма | image070;  image072; | image074; image076;  image078; image080; |
| G-форма | image082;  image084; | image086; image088;  image090; image092; |
| B-форма | image094;  image096. | image098; image100;  image102; image104. |

4. Определить связь коэффициентов Y-, H- и G-форм с коэффициентами А-формы.

Определить коэффициенты А, В, С и D для П-образной схемы замещения четырехполюсника на рис. 3,б.

**Ответ:** image243; image245; image247; image249.

Коэффициенты уравнений пассивного четырехполюсника image251; image253; image255

Определить параметры Т-образной схемы замещения.

**Ответ:** image257; image259; image261.

5. Параметры Т-образной схемы замещения четырехполюсника: image263; image264.

Определить, при каком сопротивлении нагрузки входное сопротивление четырехполюсника будет равно нагрузочному сопротивлению.

**Ответ:** image266.

## Контрольные вопросы и задачи

Для решения каких задач применяется теория четырехполюсников?

Сколько коэффициентов четырехполюсника являются независимыми?

Какой четырехполюсник называется симметричным?

Как можно определить коэффициенты четырехполюсника?

Как определяются коэффициенты одной формы записи уравнений четырехполюсника через коэффициенты другой?

Что определяет коэффициент распространения?

# Тема 18: Расчет переходные процессы в электрических цепях

**План:**

1. **Расчет переходные процессы в** RL **цепях.**
2. **Расчет переходные процессы в** RС **цепях.**
3. **Расчет переходные процессы в** RLС **цепях**

**Пример** **1.** В цепи (рис.1) переходный процесс возникает при размыкании контакта (рас шунтируется сопротивление R2).

Требуется составить уравнение для описания переходного процесса.

**Решение.** Так как переходный процесс начинается после коммутации, то и уравнения необходимо составлять для цепи, образовывается после коммутации.

На основе второго закона Кирхгофа

U=UL+UR1+UR2

где UL,UR1 и UR2 -пока неизвестные функции времени.

**Пример 2.** цепь (рис.2) включается на постоянное напряжение. Составить уравнение для переходного процесса.

**Решение.** В одноконтурной цепи, получаемой после коммутации, по законам Кирхгофа можно составить только одно уравнение

UR+UL+Uc=U (5)

Используя соотношения между напряжением и током для элементов (см. табл.№1), уравнение (5) преобразуем к уравнению с одним неизвестным:

Ri + L+(t)dt +Uc(0)=U (6)

Продифференцируем по времени уравнение (6)

L+R+i=(7)

**Пример 3.**Найти принуждённую составляющую тока для цепи первого порядка с индуктивностью (рис.1).

**Решение.** Принуждённая составляющая тока цепи iLпр(t) является частным решением дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс (см. пример 2).

Ldi (dt + i (R1 +R2)=U в любой момент времени.

Будем искать iLпр(t) при t→ ∞ , т.е. по окончании, завершения переходного процесса, когда в цепи (рис.6) под воздействием постоянного напряжения ток является постоянным, т.е. di/dt=0.

Тогда из уравнения, описывающего переходный процесс в цепи, при t→ ∞ определяем принуждённую составляющую:

iпр=U/ (R1 +R2)

Этот же результат получится при определении постоянного тока в цепи (рис.1), под воздействием постоянного внешнего напряжения.

**Пример 4.** Найти принужденную составляющую тока в цепи (рис.1), если на входе вместо постоянного напряжения U действует синусоидальное U(t)=UmSin (ωt+ϕU).

**Решение.** По окончании переходного процесса в цепи наступит установившийся синусоидальный режим. Поэтому частное решение дифференциального уравнения цепи (см. пример 2) при t→ ∞ есть установившийся синусоидальный ток в цепи с последовательным соединением индуктивности и сопротивлений i(t)=imSin (ωt+ti)

где Im= (8)

i=u-=u-arctg (9)

**Пример 5.** На вход цепи с последовательным соединением ёмкости и сопротивления (рис.3а) включается постоянное напряжение. Проанализировать режимы, при которых экспериментально можно выделить свободную составляющую напряжения.

**Решение.** Как было обсуждено в п.3.2 «б», свободная составляющая определяется только запасами энергии в элементах цепи при отсутствии внешних источников энергии.

R2

t, мс

*i*

R1

u

*i(t)*

L

а)

б) R2

Рис. 5

**Пример 6** Определить постоянную времени экспоненты напряжения U(0+)рис.1.

**Решение.** В соответствии с примером 7 множитель при экспоненты А=U(0)-Uпр==25-10=15 В. Тогда значение экспоненты при

0.06

0.05

0.04

0.03

0.02 A r r

0 0.2 0.6 1.0 1.4 1.8 t, мс

рис. 12.

t =r равно 0,368⋅А=5,52В. Определить сумму Ае-1 и установившегося значения напряжения: U(∞)+0,368A=10+5,52= 15,52 B.

Тот же результат получили из:

U(0) – 0,632А = 25-0,632⋅15 = 15,52 В.

Отрезок от начала экспоненты до ее значения U(t=r)=15,52 равен 1мс. Следовательно, постоянного времени r=1мс.

**Пример 7.** Записать уравнение переходного напряжения по его осциллограмме (рис.4,б) и определить время переходного процесса, если U(0)=-2B; U(∞)=3В.

**Решение.** Из графика определяем А и r в соответствии с масштабами по оси ординат и абсцисс:

А=U(0)-Uпр.(0+)=-2-3=-5В r=10mc=10⋅10-3c.

Тогда в соответствии с (13)

U(t)=Uпр+Ae-t/r=3-5е-100tВ

Время переходного процесса

2πr=2⋅3,14⋅10=62,8⋅10-3c

R2

t, мс

*i*

R1

u

*i(t)*

L

а)

б) R2

Рис. 5

**Пример 8.** Определить независимые начальные условия в схеме (рис. 4), если R1=200 ом, R2=R3=400 ом, U=16 B.

**Решение.** В данной схеме независимым начальным условием будет только ток ветви с индуктивностью, который в соответствии с законом коммутации будет равен току в этой ветви до коммутации.

R1 R3R1

**+  L**  C

## u R2 u R2 R3

## - i1 iL

рис 4 рис 5

R

+ +

L

u R1u C

- i L

R2

рис 6 рис 7

Для расчёта iL(0) предварительно определим i1(0). Так как до коммутации в цепи (рисунок 4) ток сопротивления R1 был постоянным, то

i1(0-)= A

Тогда ток ветви с индуктивностью до коммутации

iL(0-)= i1(0-)  А.

В соответствии с законом коммутации

iL(0-) =iL(0+)=0,02А.

**Контрольные вопросы.**

Что такое коммутация?

1. Закон коммутации для индуктивности.
2. Закон коммутации для ёмкости.
3. Определить независимые начальные условия в схеме (рисунок 5) если R2=1ком, R3=1,25ком, R1=3ком, а внешнее напряжение U=40В.
4. Определить независимые начальные условия в схеме (рисунок 6) если R1=100 ом, R2=150 ом, U=25В.
5. Определить независимые начальные условия в схеме с последовательным соединением сопротивления, ёмкости и индуктивности при её включении на постоянное напряжение U=32В, если до коммутации ёмкость была заряжена до напряжения 20В (рисунок 7).
6. Почему при отключении ёмкостной нагрузки от источника на размыкаемых контактах нет искры, а при индуктивной нагрузке есть?

**Контрольные вопросы**. 1.Составить дифференциальное уравнение для расчета переходных процессов после коммутации:

а) в цепи с индуктивностью (рис.5);

б) в цепи с емкостью (рис.3).

1. Найти принужденную составляющую напряжения емкости после коммутации в схеме рис.5, если R2=1кОм, R3=1,25 кОм, R1=3кОм U=40В.
2. Найти принужденный ток i∠пр после коммутации:

а) в цепи рис.8;

б) в цепи рис.1 (в общем виде).

# Литературы

1. Андреев Ф.И. Теоретические основы электротехники. Уч.пос. Екатерг. 2003 г.
2. Андреев Ф.И. Основы электротехники. Уч.пос. Екатеринбург . 2004 г.

3. Л.А Бессонов. Теоретические основы электротехники. Т.1. Эл. цепи М: Высшая школа 1978 г.

4. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники.Т.2. Электромагнитное поле. М: Высшая школа 1884

1. Л.Р. Нейман, К.С Демирчян. Теоретические основы электротехники. т.1,2. Л: Энергоиздат 1981

6. К.М. Поливанов. Линейные электрические цепи с сосредоточенными параметрами. Энергия. 1972

7.А.С Каримов и др. Назарий электротехника. Т. Укитувчи

8. Основы теории цепей: Учеб. для вузов /Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. –5-е изд., перераб. –М.: Энергоатомиздат, 1989. -528с.

9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. Учеб. для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов. –7-е изд., перераб. и доп. –М.: Высш. шк., 1978. –528с.

10. Каплянский А. Е. и др. Электрические основы электротехники. Изд. 2-е. Учеб. пособие для электротехническихи энергетических специальностей вузов. -М.: Высш. шк., 1972. -448с.