**Методичні рекомендації з підготовки студентів**

**до практичних занять**

Практичні заняття є складовою частиною навчальної програми з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Практичні заняття проводяться тільки в другому семестрі вивчення дисципліни (4 семестр) в об’ємі 17 годин з використанням посібника «Практикум з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки». Електрон. варіант. Сірий Д.Т. 2020 р., 26 с.»

Приклади практичних занять приводяться нижче.

**Тема 2.1.** **Приклади розрахунку чотириполюсників**

**Задача № 1**

До чотириполюсника, схема якого зображена на рис. 5.I, ввімкнутий приймач з опором *Z = 50+j50* *Ом*. Визначити сталі чотириполюсника та знайти вхідні струм і напругу, якщо струм на виході *I2 = 1A*, а параметри елементів чотириполюсника такі: ω = 2500 1/с; R1 = 30 Ом; L1 = 16 мГн;   
R2 = 10 Ом; L2 = 12 мГн; R0 = 100 Ом; С = 8 мкФ.

Побудувати векторну діаграму чотириполюсника.

I1

Рис. 5.1

R0

С

R2

U1

R1

L1

L2

Z

I2

U2

1

1′

2

2′

Розв’язання

I. Знайдемо параметри даного чотириполюсника. Із схеми видно, що чотириполюсник Т – подібний:

Z1 = R1+jωL1 = 30+j2500·15·10-3 = 30+j40 Ом;

Z2 = R2+jωL2 = 10+j2500·12·10-3 = 10+j30 Ом;



 См;



Ом;



***І спосіб***

2. Визначимо сталі чотириполюсника, використовуючи відомі співвідношення між його параметрами та сталими.

С = Y0 = 0,01+j0,02 См. D = 1+Y0Z2 = 0,5+j0,5.

A = 1+Y0Z1 = 1+(0,01+j0,02)(30+j40) = 1+0,3+j0,4+j0,6–0,8 = 0,5+j.

B=Z1+Z2+Y0Z1Z2 = 30+j40+10+j30+(0,01+j0,02)(30+j40)(10+j30) =

= 40+j70+(–0,5+j)(10+j30) = 40+j70+j10–30–5–j15 = 5+j65 Ом.

1. Розрахуємо напругу та струм на вході чотириполюсника.

U1 = AU2+BI2 ,

де U2 = I2·Z = 1·(50+j50) = 50+j50 B. (ψi2 = 0).

Тоді U1 = (0,5+j)(50+j50)+(5+j65)·1 = 25+j25+j50–50+5+j65 =

= - 20+j140 B.

I1 = CU2+DI2 = (0,01+j0,02)(50+j50)+(0,5+j0,5)·1 =

= 0,5+j0,5+j–1+0,5+j0,5 = j2 A.

4. Будуємо векторну діаграму струмів та напруг чотириполюсника   
(рис. 5.1,а).

***ІІ спосіб***

20 В

0,5 А

U2

U1

φ2

φ1

МU

І1

j

1

0

І2

МІ

Рис. 5.1,а

2. Визначимо сталі чотириполюсника за методом холостого ходу та короткого замикання, використовуючи відомі співвідношення між його сталими та вхідними опорами. Знаходимо в такій послідовності: D→B→C→A:

;



;



; .



Для Т – подібного чотириполюсника за допомогою схеми знайдемо всі вхідні опори.

Z1x = Z1+Z0 = 30+j40+20–j40 = 50 Ом;

Z2x=Z2+Z0 = 10+j30+20­–j40 = 30–j10 Ом;



Ом;



Тоді:



, D′ = 0,5+j0,5; D″ = 0,5–j0,5.



Далі:



См.



A = Z1x·C = 50·(0,01+j0,02) = 0,5+j .

B = Z1кз·D = (70+j60)(0,5+j0,5) = 35+j35+j30–30 = 5+j65 Ом;

**Задача № 2**

Сталі чотириполюсника відповідно дорівнюють:

A = I; B = 100 Ом; D = I+j2.

Визначити параметри Т і П – подібних схем заміщення.

Розв’язання

***І спосіб***

1. Для Т – подібної схеми заміщення маємо:

, , .



Із AC–BC = 1 знаходимо .



См;



Тоді: Y0 = j0,02 См.

; Ом.



2. Для П – подібної схеми:

Z0 = B = 100 Ом,

См, .



***ІІ спосіб***

Розрахуємо параметри схем заміщення за відомими сталими чотириполюсника методом холостого ходу і короткого замикання.

Відомо, що

; ; .



Тому: Ом;



Ом;



Ом.



Для Т – подібної схеми чотириполюсника маємо:

Z1x = Z1+Z0; (1) Z2x = Z2+Z0 ; (2) Z1кз = Z1+ (3).



Із рівнянь (1) та (2) знаходимо

Z1 = Z1x–Z0, Z2 = Z2x–Z0.

Підставимо значення Z1, Z2 в рівняння (3) і знайдемо Z0:

Z1кз = Z1x–Z0+;



Z1кз·Z2x = Z1x·Z2x–Z0·Z2x+Z0·Z2x–Z02 ;



Ом;



Z1′ = j50 Ом; Z0″ = –j50 Ом.

Тоді:

Z1′ = Z1x–Z0′ = –j50–j50 = –j100 Ом;

Z1″ = Z1x–Z0­″ = 0.

Z2′ = Z2x–Z0′ = –j50+100–j50 = 100–j100 Ом.

Z2″ = Z2x–Z0″ = 100–j50+j50 = 100 Ом.

Параметри П – подібної схеми можна знайти за відомими параметрами Т – подібної схеми заміщення, використовуючи формули еквівалентного переходу від зірки до трикутника.

Z1П = Z1T+Z0T+.



Для Z0″ = –j50 Ом; Z1″ = 0; Z2″ = 100 Ом маємо:

Z1П = 0–j50+0 = –j50 Ом.

Тоді:

См.



Z2П = Z2Т+Z0T+.



Тоді:

Y2→0. Z0 = Z1T+Z2T+Ом.



**Задача № 3**

Чотириполюсник, схема якого зображена на рис. 5.3, а параметри дорівнюють: *R*1 = 50 Ом;  *L*2 = 40 мГн;  *C*3 = 2 мкФ; *R*4 = 150 Ом; *Z*H = 50 – j50 Ом; ω = 2500 рад./с, живиться від напруги *U* = 380 *В*. Визначити вхідний опір чотириполюсника в режимах: холостого ходу, короткого замикання, робочому режимі та в режимі зворотного короткого замикання. Визначити коефіцієнти чотириполюсника в А-формі, коефіцієнти передачі напруги і струму, параметри Т- і П- схеми заміщення, побудувати схеми заміщення.



Розв’язання

Всі розрахунки виконуємо в комплексній формі.

Визначаємо комплексні опори схеми чотириполюсника:

*Z*1 = *R*1 + *R*4 = 200 Ом;

*Z*2 = *j*ω*L* = j2500\*40\*10–3 = j100 Ом;

*Z*3 = *1/(jωC)* = – j /(2500\*2\*10–6) = –j200 Ом.

Визначаємо вхідні опори чотириполюсника в різних його режимах:

*Z*1P = *Z*1 + *Z*3(*Z*2 + *Z*H)/(*Z*2 + *Z*3 + *Z*H) = 200 + (–j200)(j100 + 50 – j50)/(50 – j200 + j50) = 280 + j40 = 282, 843 Ом;



*Z*1X = *Z*1 + *Z*3 = 200 – j200 = 282,843 Ом;



*Z*1K = *Z*1 + *Z*2 *Z*3/(*Z*2 + *Z*3) = 200 + j200 = 282,843Ом;



*Z*2K = *Z*2 + *Z*1*Z*3/(*Z*1 + *Z*3) = 100 Ом.

Коефіцієнти (сталі) А-форми чотириполюсника визначаємо за відомими формулами:

*A ={Z1XZ1K/[Z2K(Z1X – Z1K)]}0,5 = [2]0,5 = 1 + j;*



*B = AZ2K = 100 + j100 Ом;*

*C = A/Z1X = j0,005 См;*

*D = B/Z1K = 0,5.*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| К_62_64 | | |
| Рис. 5.3 | Рис. 5.3,а | Рис. 5.3,б |

Параметри Т- і П- схем заміщення визначаємо із співвідношень:

*Z*1 = (A – 1)/C = j/j0,005 =200 Ом;

*Z*2 = (D – 1)/C = (0,5 – 1)/j0,005 = j100 Ом;

*Z*3 = 1/C = 1/j0,005 = –j200 Ом;

*Z*4 = B = 100 + j100 Ом;

*Z*5 = B/(D – 1) = (–200 – j200) Ом;

*Z*6 = B/(A – 1) = (100 – j100) Ом.

Схеми заміщення зображені на рис. 5.3,а та рис. 5.3,б.

Визначаємо коефіцієнти передачі напруги і струму.

КU = *Z*H/(A*Z*H + B) = (50 +j50)/[(1+ j)(50– j50) + 100 + j100] = (1 + j)/(4 + +j2) = 0,3 + j0,1 = 0,31623.



KI = 1/(C*Z*H + D) = 1/[j0,005(50– j50) + 0,5] = 1/(0,75 + j0,25) =   
= 1/0,79057= 1,265.



**Тема 2.2. Приклади розрахунку трифазних електричних кіл**

**Задача № 1**

До симетричного трифазного генератора с фазовою напругою *Uф*=100В підключене несиметричне навантаження, з’єднане зіркою (рис. 4.1,а):   
*ZА = - j100 Oм, ZB = ZC =100 Ом.*

Визначити струми в фазах споживача та активну напругу. Побудувати топографічну діаграму.

UN

U'C

U'B

U'А

A'

UВ

UС

UА

ZC

B

N

A

C

n

ZА

ZB

ІА

B'

C'

ІB

ІC

Рис. 4.1,а

Розв’язання

1. Визначимо напругу *UN* між нейтральними точками споживача та генератора:

.



Візьмемо *UA*=*100В.*

Тоді *UB =100 e-j120° B, де е-j120°= - 0.5 – j 0.87,*

*UC =100 ej120° B, де еj120°= - 0.5 + j 0.87.*

; ;



1. Визначимо напругу на фазах споживача:

*U’A =UA - UN =100 - (-20+j60)=120 - j60 =134 e-j26°34’ B;*

*U’B = UB - UN =100 e-j120°- (-20+j60)= -50 - j87+20 - j60 =*

*= - 30 - j147= - 150 e+j78°28’ B;*

*U’C=UC - UN =100ej120°- (-20+j60)= -50+j87+20-j60= -30+j27= -40e-j42° B;*

1. Знайдемо фазові струми



4. Знайдемо споживану активну потужність

+j

U'C

UВ

UС

UА

B

N

A

C

n

U'А

U'B

+1

UN

Рис. 4.1,б

MU

20*B*

*PA = 0,*

*PB = RB I2B =100 (1,5)2=225 Bm,*

*PC = RC I2C =100 (0,4)2=16 Bm,*

*P=PB+PC =225+16=241 Bm.*

5. Побудуємо топографічну діаграму (рис. 4.1,б).

Бачимо, що напруги на фазах *В* та *С* споживача сильно відрізняються між собою, хоча опори цих фаз однакові.

**Задача № 2**

Симетричний трифазний приймач з комплексним опором фаз   
*Z*=40+j30 Ом, з’єднаний трикутником, працює від симетричного генератора (рис. 4.2,а).

Визначити фазні та лінійні струми, а також активну, реактивну та повну потужності приймача, якщо *UA* =200 B. Побудувати векторну діаграму струмів.

Розв’язання

1. Так як в колі симетричний режим, то струми в фазах приймача рівні за величиною, але зсунуті по фазі один від одного на 120°.

Рис. 4.2,а

ІА

ІC

Z

В

ІАВ

ІВС

ІСА

Z

Z

А

С

ІB

Визначимо фазний струм:



.



2. Лінійні струми також створюють симетричну систему струмів і рівні:

+j

IВ

IС

IАB

N

IА

+1

Рис. 4.2,б

MI

1 A

IBC

ICA

.



3. Визначимо потужності:

*P=3RI2Ф=3\*40\*42=1920 Bm;*

*Q=3XI2Ф=3\*30\*42=1440 вар;*

*S=3ZI2Ф=3\*50\*42=2400 BA;*

4. Побудуємо векторну діаграму струмів (рис. 4.2,б)

**Задача № 3**

До трифазного симетричного генератора ввімкнуті 2 споживачі (рис. 4.3). Визначити струми в лінійних та нульовому проводах, якщо *UФ* =100В, ZA=10 Ом, ZB=10e-j30° Ом, ZC=10ej30° Ом, ZAB=17,3ej30° Ом, ZBC=17,3e-j90° Ом, ZCA=17,3ej60° Ом.

ZАВ

ZСА

ZВС

ІАВ

ІСА

ІВС

ІА2

ІВ2

ІС2

ІС1

ІВ1

ІА1

ZА

ZВ

ZС

ІА

ІВ

ІС

ІN

В

С

А

N

n

Рис. 4.3

Розв’язання

1. Запишемо в символічній формі фазні та лінійні напруги генератора:

*UA=100 B; UB=100 e-j120° B; UC =100 ej120° B.*

.



Лінійні та фазні напруги зв’язані залежністю:

*UAB =UA - UB = UA - UA e-j120° = UA (1+0,5+/2j)=*



*=UA (/2+0,5j)= UA ej30°,*



аналогічно: *UBС =UВ – UС ; UСА =UС - UА* .

1. Знайдемо струми споживача, з’єднаного зіркою:



1. Визначимо струм в нульовому проводі:

*IN=IA1+IB1+IC1=10 -j10+j10=10A.*



1. Знайдемо фазні струми споживача, з’єднаного трикутником:



1. Визначимо лінійні струми другого споживача:

*IA2=IAB -ICA =10 -j10 A;*

*IB2=IBC -IAB =10 -10=0;*

*IC2=ICA -IBC =j10 -10 A.*

1. Розрахуємо лінійні струми генератора:

*IA=IA1+IA2=10+10 -j10 =20 -j10=22.4 e-j26°34’ A;*

*IB=IB1+IB2= - j10 =10 e-j90° A;*

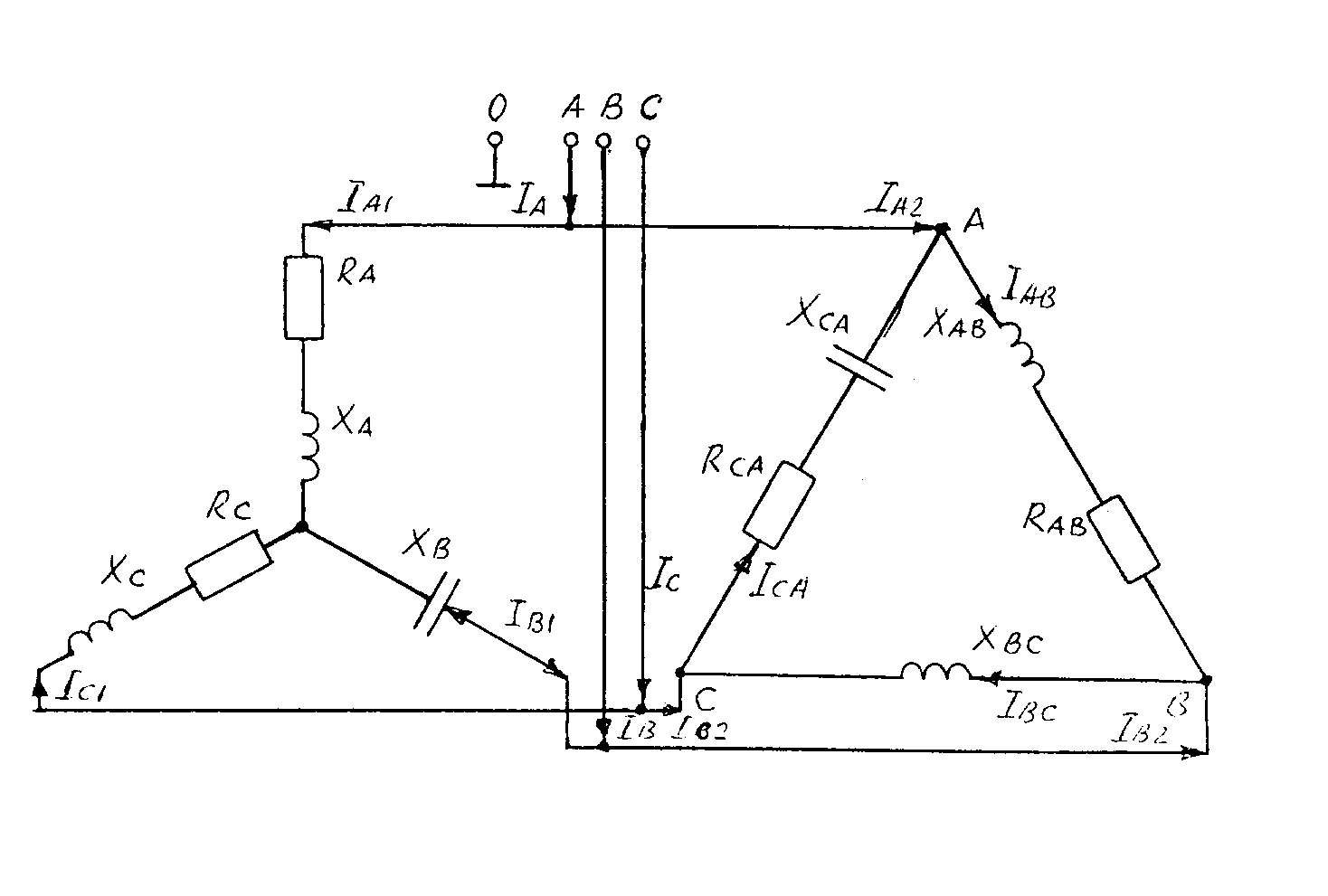
*IC=IC1+IC2=j10+j10 – 10 = - 10+j20 = - 22.4 e-j63°26’ A.*

**Задача № 4**

У трифазному електричному колі, що має симетричне джерело енергії і два несиметричні споживачі, з’єднаних зіркою та трикутником, (рис 4.4), визначити фазні і лінійні струми і напруги на елементах споживачів за умови: *E*Ф = 380 В; *E*n = 180 Ом; *Ψ*n = 60o; *R*A = 90 Ом; *R*B = 0; *R*C = 40 Ом;   
*X*A = 80 Ом;  *X*B = – 80 Ом; *X*C = 70 Ом; *R*AB = 200 Ом; *R*BC = 0; *R*CA = 150 Ом; *X*AB = 280 Ом; *X*BC = 150 Ом; *X*CA = – 150 Ом; *n* – індекс лінійного проводу (у даному випадку *n* відповідає проводу фази *В* кола. У зручному масштабі побудувати променеву векторну діаграму струмів кола і топографічні векторні діаграми напруг для кожного із споживачів.

Розв’язання

Розрахунки для споживачів, з’єднаних зіркою і трикутником, будемо виконувати окремо в комплексній формі.



С′

*0′*

*ІВ*

*ІС2*

В′

А′

*ІВ2*

Рис. 4.4

Для схеми зірка-зірка, прийнявши, що *ЕФ=U*А, визначаємо напругу між нульовими точками споживача і джерела за формулою:

*U*N = (*U*A*Y*A + *U*B*Y*B + *U*C*Y*C)/(*Y*A + *Y*B + *Y*C + *Y*N),

де

*U*A = 380 B;

*U*B = 380= – 190 – j329 B;



*U*C = 380= – 190 + j329 B;



*Y*A = 1/*Z*A = 1/(*R*A + *jX*A) = 1/(90 + j80) См;

*Y*B = 1/*Z*B = 1/(– *jX*B) = 1/( – j90) См;

*Y*C = 1/*Z*C = 1/(*R*C + *jХ*C) = 1/( 40 + j70) См;

*Y*N = 0.



Після підстановки числових значень параметрів отримуємо:

*U*N = 581,448 + j232,418 = 628,18В.



Напруги фаз споживача-зірки визначимо у відповідності з другим законом Кірхгофа:

*U′*A = *U*A – *U*N = – 201,448 – j232,418 =307,57 B;



*U′*B = *U*B – *U*N = – 771,448 – j561,508 = 954,16 B;



*U′*C = *U*C – *U*N = – 771,448 + j96,671 = 777,48 B.



Фазні (а для споживача-зірки вони є і лінійними) струми визначаємо за законом Ома:

*I*A1 = *U*A/*Z*A = – 2,533 – j0,331 = 2,555 A;



*I*B1 = *U*B/*Z*B = 6,239 – j8,572 =10,6 A;



*I*C1 = *U*C/*Z*C = – 3,706 +j8,903 = 9,644 A.



Напруги на елементах споживача-зірки визначаємо також за законом Ома:

*U*RA = *R*A*I*A1 = - 227,94 – j29,804 = 229,88 B;



*U*XA = *X*A*I*A1 = 26,493 – j202,614 = 204,34 B;



*U*RB = *R*B*I*B1 = 0; *U*XB = *U′*B = 954,16 B;



*U*RC = *R*C*I*C1 = - 148,252 + j356,112 = 385,74 B;



*U*XC = *X*C*I*C1 = - 623,196 – j259,441 = 675,04 B.



Напруги і струми споживача-трикутника визначаємо з урахуванням співвідношень між фазними та лінійними напругами і струмами. Лінійні напруги трифазної системи, які є також фазними напругами споживача-трикутника, визначаємо за формулами:

*U*AB = *U*A – *U*B = 570 + j329 = 658 B;



*U*BC = *U*B – *U*C = – j658 = 658 B;



*U*CA = *U*C – *U*A = – 570 + j329 = 658 B.



Фазні і лінійні струми споживача-трикутника визначаємо за законом Ома та першим законом Кірхгофа відповідно:

*Ι*ΑΒ = *U*AB/*Z*AB = 1,741 – j0,792 = 1,913 A;



*I*BC = *U*BC/*Z*BC = – 4,388 A;

*I*CA = *U*CA/*Z*CA= – 2,997 – j0803 = 3,103 A.



*I*A2 = *I*AB – *I*CA = 4,738 + j0,011 = 4,738 A;

*I*B2 = *I*BC – *I*AB = – 6,129 + j0,792 = 6,18 A;



*I*C2 = *I*CA = *I*BC = 1,391– j0,803 = 1,606 А.



Напруги на елементах споживача-трикутника визначаємо за законом Ома:

*U*RAB = *R*AB*I*AB = 348,218 – j158,416 = 382,56 B;



*U*XAB = *jX*AB*I*AB = 221,782 +j487,505 = 535,58 B;



*U*RBC = *R*BC*I*BC = 0; *U*XBC = *U*BC = 658 B;



*U*RCA = *R*CA*I*CA = – 449,545 – j120,455 = 465,4 B;



*U*XCA = *jX*CA*I*CA = – 120,455 + j449,545 = 465,4 B.



Струми джерела електроенергії визначаємо за першим законом Кірхгофа:

*I*A = *I*A1 + *I*A2 = 2,205 – j0,32 = 2, 228 A;



*I*B = *I*B1 + *I*B2 = 0.11 – j7,78 = 7,781 A;



*I*C = *I*C1 + *I*C2 = – 2,315 + j8,1 = 8,424 A.



Векторні діаграми побудовані на рис. 4.4,а.

Рис. 4.4,а

UXA

U′A

UC

UB

UA

UN

С

0

0′

А

В

U′B

U′C

URA

UXC

URC

+1

+j

UC

UB

UA

0

А

B

C

UBC

UAB

UCA

URAB

UXAB

UXCA

URCA

+j

+1

IA1

IC2

IA

+1

+j

IA2

IAB

IB1

ICA

IBC

IB2

IC1

IC

IB

**Задача № 5**

Використовуючи умови і результати рішення попередньої задачі, оцінити точність розрахунків, розв’язавши рівняння балансу активних і реактивних потужностей. Скласти схему ввімкнення у електричне коло двох ватметрів для вимірювання активної потужності трифазної системи.

Розв’язання

Оцінювати точність розрахунків електричних кіл прийнято за відносною похибкою, яку отримують з рішення рівняння балансу потужностей. Рівняння балансу потужностей записують у наступному вигляді

*S*ДЖ = *S*СП,

де *S*ДЖ = *P*ДЖ + *jQ*ДЖ = *E*A(*I*A)\* + *E*B(*I*B)\* + *E*C(*I*C)\* – комплексна повна потужність джерела електроенергії;

(*I*Ф)\* – спряжений комплексний струм *I*Ф;

*S*СП = *P*СП+ *jQ*СП = *R*A(*I*A1)2 + *R*B(*I*B1)2 + *R*C(*I*C1)2 + *R*AB(*I*AB)2 + *R*BC(*I*BC)2 + +*RCA(I*CA)2 + *j*[*X*A (*I*A1)2 + *X*B(*I*B1)2 + *X*C(*I*C1)2 + *X*AB(*I*AB)2 + *X*BC(*I*BC)2 + *X*CA(*I*CA)2] – – комплексна повна потужність, яка споживається двома трифазними споживачами.

Після підстановки чисел у формули потужностей маємо:

*P*ДЖ = 6482,7937 Вт; *Q* ДЖ = – 615,6424 вар;

*P*СП = 6482,7931 Вт; *Q*СП = – 615,6692 вар.

Похибка обчислень складає:

- для активної складової:

ΔР% = 2 [(*P*ДЖ – *P*СП)/(*P*ДЖ + *P*СП)] 100% = 1,08\*10-5 %;

для реактивної складової:

ΔQ% = 2 [(*Q*ДЖ – *Q*СП)/(*Q*ДЖ + *Q*СП)] 100% = 4,53\*10-3 %.

Схема вимірювання активної потужності за допомогою двох ватметрів приведена на рис. 4.5.

Ватметри вимірюють наступні значення потужностей:

ІА

Рис. 4.5

W1

\*

\*

С

П

О

Ж

И

В

А

Ч

В

А

С

UCB

ІC

UАB

W2

\*

\*

*P*1 = *U*AB*I*Acos(*U*AB^*I*A) = *=*|*U*AB*I*A|cos(38,257o) = 1152 Вт;

*P*2 = *U*CB*I*Ccos(*U*CB^*I*C) = =|*U*BC*I*C|cos(– 15,95o) = 5331 Вт.

Сумарна потужність ватметрів *Р*Σ = *P*1 + *P*2 = 6483 Вт практично не відрізняється від результатів розрахунку.

**Задача № 6**

Визначити показання амперметрів в електричному колі рис 4.6, якщо *U*ф=300 В, *Z*AB = *Z*BC = *Z*CA = *Z*ф.тр = 24 Ом, *Z*A= *Z*B = *Z*C = *Z*ф.зір = 8 Ом.

Розв’язання

1. Амперметри *А* та *А*3  вимірюють діючі значення фазних струмів “трикутника” (*І*ВС, *І*АВ), значення яких при даному симетричному навантаженні у всіх фазах однакові і дорівнюють:

*І*Ф.тр = *U*л /*Z*ф.тр =√3*U*ф / *Z*ф.тр = 300√3/24 = 21,6 А.

ZАВ

ZСА

ZВС

ІАВ

ІСА

ІВС

ІА2

ІВ2

ІС2

ІС1

ІВ1

ІА1

ZА

ZВ

ZС

ІА

ІВ

ІС

В

С

А

Рис. 4.6

*А*4

*А*2

*А*3

*А*

*А*5

*А*6

*А*1

*А*7

1. Амперметри *А*4 та *А*2  вимірюють діючі значення лінійних струмів “трикутника” в фазах А і В (*І*А2, *І*В2), які рівні за величиною і дорівнюють:

*І*л.тр = √3 *І*Ф.тр = 37,5 А.

1. Амперметри *А*5 та *А*6 вимірюють діючі значення лінійних (фазних) струмів “зірки в фазах А і В (*І*А1, *І*В1), значення яких при даному симетричному навантаженні у всіх фазах однакові і дорівнюють:

*І*зір = *U*ф / *Z*ф.зір = 300/8 = 37,5 А.

1. Амперметри *А*1 та *А*7 вимірюють діючі значення струмів фаз В і С генератора (*І*В, *І*С), які складаються з лінійних струмів “трикутника” та “зірки” і при даному симетричному активному навантаженні однакові і дорівнюють їх сумі:

*І*ген = *І*л.тр + *І*зір = 75 А.

**Тема 2.3. Приклади розрахунку електричних кіл несинусоїдного струму**

**Задача № 1**

Визначити показання приладів електромагнітної системи і активну потужність в колі, якщо

, *R=4 Oм, XL=ωL=3 Ом.*

R

L

*u*

*uа*

*uL*

*i*

Рис. Р7.1

А

V



Записати вираз для миттєвого значення струму.

**Розв’язок**

1. Представляємо джерело несинусоїдної напруги у вигляді послідовного з'єднання джерел з постійною напругою *Uо = 60 B* та синусоїдних напруг

.



2. Розрахуємо коло, коли в ньому діє тільки джерело з постійною напругою *Uо = 60 B*:





3. Розрахуємо коло, коли в ньому діє тільки перша гармоніка :



– знаходимо струм в колі:



де











- визначимо закон зміни напруги на кожному елементі кола:







- обчислимо активну, реактивну і повну потужності, споживані колом:







4. Розрахуємо задане коло, коли в ньому діє тільки джерело напруги, що змінюється з подвійною кутовою частотою :



- знаходимо закон зміни струму кола



де











- визначаємо закон зміни напруги на кожному елементі кола:







- обчислимо активну, реактивну і повну потужності, споживані колом:







5. Визначимо:

- миттєве значення струму в колі



- миттєве значення напруги на кожному елементі кола





- діюче значення несинусоїдного струму (показання амперметра)



- показання вольтметра



- активну, реактивну та повну потужності







- коефіцієнт потужності кола



**Задача № 2**

Визначити діючі струми в гілках, активну потужність, споживану колом, якщо ,



**Розв’язок**

i1

Рис. P7.2

i2

i3

L

R

С

R

u

R

1. Застосуємо для розрахунку кожної гармоніки струму окремо символічний метод.

2. Розрахуємо коло, коли в ньому діє напруга першої гармоніки:

- знаходимо комплексні напругу першої гармоніки і опори гілок:





- запишемо комплексний опір кола для струму першої гармоніки





=

- знаходимо комплексну амплітуду струму в нерозгалуженій частині кола



* визначимо комплексні амплітуди струмів в кожній гілці



- запишемо вирази для миттєвих значень струмів в гілках



- визначимо активну потужність, споживану колом і кожною гілкою



3. Розрахуємо задане коло при дії в ньому джерела напруги, що змінюється з потрійною кутовою частотою :



- знаходимо реактивні опори гілок

,



.



* визначимо комплексні опори гілок і кола



* знаходимо комплексну амплітуду струму третьої гармоніки в нерозгалуженій частині кола і в кожній гілці



* запишемо вирази для миттєвих значень струмів в гілках



* визначимо активну потужність, споживану колом і кожною гілкою

, ,



, .



1. Обчислимо діючі струми в гілках і активну потужність, споживану колом:



**ТРИФАЗНІ СИСТЕМИ. ЧОТИРИПОЛЮСНИКИ ТА КОЛА**

**НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ**

**Приклади розрахунку трифазних електричних кіл**

***Задача*** **1.** До симетричного трифазного генератора із фазною ЕРС підключено трифазне навантаження, кожна фаза якого має однаковий опір  Ом.

Фази навантаження з’єднані зіркою і кожний лінійний провід має комплексний опір  Ом, рис. 4.1.

Визначити фазні струми та напруги приймача.



Рис. 4.1

Оскільки режим у трифазному колі є симетричним, то виконати розрахунок можна для однієї фази, наприклад, фази .

Приймаючи початкову фазу фазної ЕРС  за нуль, розраховуєм струм у фазі :

.

Оскільки система фазних струмів симетрична, то

,

.

Фазні напруги визначаються за законом Ома:



.

Напруги на інших фазах:

,

.

Значення лінійних напруг для симетричного режиму визначаються як

.

Із векторно-топографічної діаграми напруг навантаження виходить, що вектор лінійної напруги випереджає вектор відповідної фазної напруги на кут .

Таким чином:

,

,

,

.

**Висновок:** Струми та напруги на інших фазах визначаються шляхом повороту відповідних векторів, знайдених для фази , на  та .

***Задача*** **2.** Розрахувати симетричний режим трифазної системи з фазною ЕРС генератора . Фазні опори навантаження Ом з’єднані трикутником, рис. 4.2.

Спочатку знаходимо лінійні напруги генератора, враховуючи, що вектор лінійної напруги випереджає відповідний вектор фазної напруги на кут . Таким чином:

, , .



Рис. 4.2

Для симетричного режиму розраховуємо тільки фазу . Тоді:

.

Інші фазні струми:

,

.

Враховуючи співвідношення між фазними та лінійними струмами  (для симетричного режиму) та маючи на увазі, що вектор лінійного струму відстає від відповідного вектора фазного струму на кут  (дивись векторно-топографічну діаграму струмів симетричного навантаження), визначаємо лінійні струми генератора:



,

.

***Задача*** **3.** До симетричного генератора з лінійною напругою  підключено навантаження, фази якого з’єднані трикутником рис. 4.2. Фазні опори дорівнюють:

Ом, Ом, Ом.

Визначити фазні та лінійні струми.

Приймаючи початкову фазу лінійної напруги генератора  за нуль, знаходимо фазні струми навантаження за законом Ома:

,

,

.

Лінійні струми генератора знаходяться за першим законом Кірхгофа:



,



,



.

***Задача*** **4.** Розрахувати несиметричний режим трифазної системи з фазною ЕРС генератора . Фазні опори навантаження з’єднані зіркою (рис. 4.1.) і дорівнюють

Ом, Ом, Ом.

Опір лінії для кожної фази дорівнює 5 Ом. Визначити струми, фазні та лінійні напруги навантаження.

Визначаємо еквівалентні опори навантаження в кожній фазі:

Ом, Ом, Ом.

Визначаємо напругу зміщення нейтралі (напругу між точками генератора та навантаження  і ):







.

Далі знаходимо струми в лінії:





,



.

Визначаємо фазні напруги:

,

,

.

Лінійні напруги навантаження отримують за другим законом Кіріхгофа:



,



,



.

**Приклади розрахунку лінійного електричного кола несинусоїдного струму**

***Задача*** **1.** На вході лінійного двополюсника діє несинусоїдна напруга , яка викликає несинусоїдний струм  на його вході, рис. 4.3. Визначити показання вольтметра та амперметра, розрахувати активну, реактивну та повну потужності, що споживаються двополюсником, якщо



Рис.4.3

,

.

Знаходимо діючі значення несинусоїдних струму та напруги, які будуть показані відповідними приладами:



.

Розраховуємо активну та реактивну потужності:



 Вт,



.

Повна потужність:

.

Коефіцієнт потужності:

.

**Висновок:** поява вищих гармонік у кривих напруг та струму приводить до зниження коефіцієнта потужності у порівнянні з випадком, коли струм і напруга при тих же діючих значеннях мають синусоїдну форму.

***Задача*** **2.** До лінійного електричного кола на рис. 4.4. прикладена несинусоїдна напруга . Значення параметрів елементів:  Ом,  мГн,  мкФ. Визначити показання амперметра та вольтметра, якщо

.

Розрахунок проведемо у відповідності з принципом суперпозиції (накладання).



Рис. 4.4

***Розрахунок основної гармоніки.*** Визначаємо комплексний опір кола на першій гармоніці:



Ом.

.

Миттєве значення струму:

.

***Розрахунок другої гармоніки*:**

Комплексний опір:



Діюче та миттєве значення струму:

,

.

Несинусоїдний струм у колі визначається як

.

Показання амперметра:

.

Показання вольтметра:

.

***Задача*** **3.** Знайти коефіцієнти форми, амплітуди та спотворення несинусоїдної напруги

.

Шукані коефіцієнти визначаються за такими формулами:

, , ,

де  – середнє значення за модулем несинусоїдної напруги,  – максимальне значення цієї напруги.

Враховуючи, що форма криво  за додатній напівперіод така ж, як і за відємний напівперіод (подібна), то для визначення середньої за модулем напруги розглянемо тільки додатній напівперіод :



Розраховуємо максимальне значення напруги, для чого необхідно продиференціювати несинусоїдну напругу *u*(*t*) і прирівняти нулю отриманий вираз.

Похідна :



або

.

Рішення квадратного рівняння має два корні :



Для  маємо

.

Для  маємо .

Таким чином, шукані коефіцієнти дорівнюють:



Нагадаємо, що для ідеальної синусоїдної кривої:



**Приклади розрахунку параметрів чотириполюсника**

***Задача*** **1.** Задані первинні параметри чотириполюсника (ЧП):

.

До вхідних затискачів ЧП прикладено синусоїдну напругу з діючим значенням 100 В. Визначити вхідний струм ЧП та напругу і струм у навантаженні , яке підключене до вихідних затискачів ЧП.

Основні рівняння ЧП у формі А:



Враховуючи, що , з першого рівняння знаходимо струм у навантаженні:

,

.

Напруга на навантаженні :



З другого рівняння ЧП знаходимо вхідний струм :



***Задача*** **2.** Знайти параметри Т- схеми заміщення ЧП, якщо задані такі значення первинних параметрів :

.

Спочатку знаходимо коефіцієнт , враховуючи умову, що виконується для пасивного ЧП :

,

звідки



Визначаємо параметри Т-схеми заміщення :



***Задача*** **3.** Визначити коефіцієнти Т-схеми ЧП у формі *А*, якщо її параметри такі : .

Основні рівняння у формі *А* мають вигляд



Здійснюючи режими холостого ходу (ХХ) та короткого замикання (КЗ) на виході, можна отримати значення шуканих коефіцієнтів.

1. Режим ХХ на виході (). З першого рівняння маємо :



З другого рівняння знаходимо коефіцієнт :



2. Режим КЗ на виході (). З першого рівняння отримуємо коефіцієнт 



З другого рівняння знаходимо коефіцієнт :



***Задача*** **4.** Т-схема заміщення симетричного ЧП має комплексні опори . Чотириполюсник підключений до джерела синусоїдної напруги з діючим значенням 100 В і навантажений на характеристичний опір . Визначити його коефіцієнт передачі, вхідний та вихідний струми, напругу на виході.

Спочатку знаходимо коефіцієнти ЧП у формі *А* :



.

Характеристичний опір ЧП:



Характеристичний коефіцієнт передачі:





Таким чином, коефіцієнт затухання ЧП дорівнює ,

а коефіцієнт фази .

Оскільки для симетричного ЧП має місце співвідношення



то знаходимо вхідний струм ЧП:

.

Визначаємо напругу і струм на виході ЧП. Оскільки



то



звідки



Початкова фаза вихідної напруги:



тобто



Вихідний струм ЧП дорівнює:



**Комп’ютерний тест 4**

Поточне комп’ютерне тестування проводиться після вивчення кожного мікромодуля (або кількох мікромодулів, пов’язаних логікою змісту дисципліни).

У всіх запропонованих завданнях параметри елементів задані в омах, а показання приладів визначаються в амперах, вольтах, ватах.

|  |  |
| --- | --- |
| **1.** | **2.** |
| **3.** | **4.** |
| **5.** | **6.** |
| **7.** | **8.** |
| **9.** | **10.** |
| **11.** | **12.** |
| **13.** | **14.** |
| **15.** | **16.** |
| **17.** | **18.** |
| **19.** | **20.** |
| **21.** | **22.** |
| **23.** | **24.** |
| **25.** | **26.** |
| **27.** | **28.** |
| **29.** | **30.** |
| **31.** | **32.** |
| **33.** | **34.** |
| **35.** |  |

**Домашнє завдання**

Розрахунок трифазного електричного кола

1.Виконати розрахунок лінійних та фазних струмів трифазного кола.

2. Перевірити правильність розрахунків методом балансу потужностей.

3. Накреслити векторно-топографічні діаграми струмів і напруг навантаження.

4. Виконати розрахунок трифазного кола при обриві у споживача фази *ab*. Накреслити векторно-топографічну діаграму струмів навантаження.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер  варіанта | *U*,  B | *R*л  Ом | *X*л  Ом | *Rab*  Ом | *Rbc*  Ом | *Rca*  Ом | *Xab*  Ом | *Xbc*  Ом | *Xca*  Ом |
| 1 | 127 | 2 | 2 | 8 | 6 | 4 | 6 | 4 | 8 |
| 2 | 220 | 4 | 2 | 6 | 6 | 8 | 4 | 4 | 8 |
| 3 | 380 | 2 | 4 | 8 | 8 | 4 | 2 | 2 | 4 |
| 4 | 127 | 3 | 4 | 5 | 8 | 5 | 3 | 2 | 3 |
| 5 | 220 | 2 | 3 | 6 | 5 | 4 | 2 | 4 | 4 |
| 6 | 380 | 3 | 5 | 10 | 12 | 12 | 4 | 8 | 10 |
| 7 | 127 | 2 | 1 | 4 | 6 | 6 | 4 | 6 | 6 |
| 8 | 220 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 9 | 380 | 4 | 4 | 6 | 8 | 8 | 3 | 4 | 4 |
| 0 | 220 | 3 | 3 | 8 | 6 | 6 | 5 | 3 | 8 |

|  |  |
| --- | --- |
| **1** | **2** |
| **3** | **4** |
| **5** | **6** |
| **7** | **8** |
| **9** | **0** |

**Контрольні питання**

1. Принцип дії найпростішого трифазного генератора змінного струму.
2. Трифазна система. Схеми з’єднання обмоток трифазного генератора. Основні визначення.
3. Основні види трифазних систем. Симетричний режим трифазної системи при з’єднанні опорів навантаження зіркою.
4. Векторно-топографічні діаграми струмів та напруг при з’єднанні опорів навантаження зіркою. Основні співвідношення.
5. Симетричні режими трифазної системи при з’єднанні опорів навантаження трикутником. Векторно-топографічні діаграма струмів.
6. Несиметричний режим трифазної системи при з’єднанні опорів навантаження зіркою. Векторно-топографічна діаграма напруг.
7. Несиметричний режим трифазної системи при з’єднанні опорів навантаження трикутником. Векторно-топографічна діаграма.
8. Основні співвідношення та векторно-топографічна діаграма аварійних режимів роботи трифазної системи (обрив лінійного проводу, розвантаження фази, коротке замикання фази та обрив нейтрального проводу).
9. Вимірювання активної, реактивної та повної потужностей у трифазних системах.
10. Миттєва потужність симетричної трифазної системи.
11. Розрахунок трифазних систем з кількома струмоприймачами.
12. Методи розрахунку трифазних систем складної конфігурації (врахування опорів лінії між струмоприймачами): метод контурних струмів та метод вузлових напруг.
13. Основні рівняння чотириполюсника (ЧП). Класифікація ЧП.
14. Визначення коефіцієнтів ЧП у різних формах.
15. Схема зміщення ЧП та визначення їх параметрів.
16. Характеристичні параметри ЧП: характеристичні опори, коефіцієнт передачі, коефіцієнти згасання та фази.
17. Експериментальне визначення коефіцієнтів ЧП.
18. Аналітичне визначення коефіцієнтів ЧП за їх схемами заміщення.
19. Ряди Фур’є для несинусоїдних струмів і напруг. Визначення коефіцієнтів ряда Фур’є.
20. Діюче значення несинусоїдного струму.
21. Активна, реактивна та повні потужності несинусоїдного струму.
22. Розрахунок лінійного кола несинусоїдного струму. Методика розрахунку.
23. Коефіцієнти форми, амплітуди і спотворення, їх визначення.

**Тема 2.4. Приклади розрахунку перехідних процесів**

**Задача № 1**

На кінці лінії постійного струму в навантаженні відбулося коротке замкнення. Електромагнітне реле захисту від короткого замикання з внутрішніми параметрами *R, L*, вимкнуло своїми контактами *Sp* (рис. 6.1) лінію від джерела енергії, коли струм в ній досяг значення *30 А*. Визначити закон зміни струму в лінії і проміжок часу, за який спрацює реле після короткого замикання, якщо *R=3 Ом, L=0,2 Гн, Rл=2 Ом, Rн=20 Ом, U=200 B.*

L

R

U

I

Рис. 6.1

Rн

Sр

реле

Rл

i

Розв’язання

1. Визначимо контур, в якому протікає перехідний процес.

Після виникнення короткого замикання (ввімкнення вимикача *S* на   
рис. Р8.1) перехідний процес буде протікати в контурі, що включає реле з параметрами *R, L* та контактом *Sр*, опір лінії *Rл* та джерело енергії з   
напругою *U.*

1. Позначимо напрям перехідного струму та обходу контуру.
2. Визначимо незалежні початкові умови із контуру до комутації з врахуванням вибраного напряму перехідного струму:

*iL(0)=I=.*



Такий струм протікав в колі до короткого замикання.

1. Складаємо рівняння перехідного процесу для контуру після комутації:

.



1. Рішення диференціального рівняння шукаємо в вигляді суми двох складових: *і=іус+ів.*

Для визначення усталеної складової перехідного струму *іус*розрахуємо коло після закінчення перехідного процесу:

*iус=.*



Вільну складову перехідного струму *ів* шукаємо як загальне рішення однорідного рівняння:



в вигляді: ,



де *р –* корінь характеристичного рівняння:

*(R+Rл )+ pL=0,*

звідки .



Тому ,



де – стала часу кола.



Таким чином  *і=іус+ів=40+Ае-25t A.*

1. Сталу інтегрування *А* знаходимо із початкових умов при *t=0*:

*і(0)=іус(0)+ів(0), 8=40+А, А= - 32 А.*

Тепер можемо записати кінцевий вираз для перехідного струму:

*і=40 - 32е-25t A.* (1)

7. Визначимо проміжок часу *tc*, за який спрацює реле після виникнення короткого замикання.

За умовою реле спрацює, коли перехідний струм досягне значення *30А*. Підставимо це значення струму в рівняння (1) і розрахуємо його відносно часу *t=tc*:

*30=40-32,* або *32=10.*



Тоді  *, .*



8. Побудуємо часову діаграму *і(t),* для цього спершу окремо побудуємо усталену складову перехідного струму   
*іус = 40 А –* це пряма,   
та вільну складову

-20

8

12

*i,A*

2τ

3τ

τ



4

-40

20

40

0

*i*

*iус*

*iв*

tc

12

12

Рис. 6.1,а



в масштабі часу, кратному сталій часу кола *τ=0,04 с.*

Пам’ятаємо, що за інтервал часу  *τ* вільна складова зменшується в *е (е=2,71…)* раз. Перехідний струм *і* знаходимо як суму *і=іус+ів*. За кривою *і(t)* для струму *І=30 А* визначаємо час спрацювання реле *tc*. (рис. 6.1,а).

**Задача № 2**

Коло зі змішаним з’єднанням елементів *R1, C, R2* знаходиться під постійною напругою *U=120* В. Визначити закони зміни перехідних напруг на конденсаторі і струму в ньому після вимикання вимикача, якщо *R1=40 Ом, R2=20 Ом, С=50 мкФ*(рис. 6.2).

I

S

i

Рис. 6.2

С

U

R2

R1

uc

Розв’язання

1. Показуємо в контурі, де протікає перехідний процес, напрямок перехідного струму *і* та напруги на конденсаторі *uc* і обхід контуру за напрямом перехідного струму.
2. Визначимо незалежні початкові умови *uc(0)* з кола до комутації:

.



1. Складемо рівняння перехідного процесу для контуру після комутації, в якому протікає перехідний струм:

, або , де .



1. Рішення цього рівняння шукаємо в вигляді суми двох складових:

*uc* = *ucус*+ *uсв*

Усталену складову *ucус* знаходимо в колі після комутації для усталеного режиму:

.



В усталеному режимі струм в колі не протікає, тому *uR1= 0,* а

*uсус=U=120 В.*

Вільну складову *uсв* знаходимо як загальне рішення однорідного рівняння



в вигляді: *ucв=Аерt ,*

де *р* - корінь характеристичного рівняння *R1C p+1=*0.

.



Таким чином .



1. Визначимо сталу інтегрування *А* із початкових умов:

*uc(0)* = *ucус(0)*+ *uсв(0)* ,



звідки *А*=- 80 В.

Кінцевий вираз для перехідної напруги на конденсаторі має такий вигляд:

.



6. Знаходимо перехідний струм:



**Задача № 3**

Електричне коло (рис. 6.3) підключене до джерела постійного струму. Визначити закони зміни струмів в гілках *і1, і2* і напруги на вході кола *uаб*після вимкнення вимикача, якщо *R1=R2=10 Ом,  
 J=2 A, С=100 мкФ*.

uаб

б

uc

С

i2

S

J

Рис. 6.3

J

R2

R1

i1

a

Розв’язання

1. Показуємо напрямок перехідних струмів в гілках.
2. Визначаємо незалежні початкові умови *uc(0)* з кола до комутації:

так як джерело струму замкнене накоротко, то  *uc(0)= uаб(0)= 0*.

1. Складемо рівняння за I-м законом Кірхгофа для вузла «а»:

*і2*. *і1+і2=J.*

Наступні перетворення будемо здійснювати відносно струму.

Враховуючи, що: ,



отримаємо:



або, враховуючи, що



1. Вирішимо отримане рівняння, рішення будемо шукати в вигляді:



де



*р* – корінь характеристичного рівняння, рівний:

.



Таким чином

.



1. Визначимо сталу інтегрування *А* із початкових умов при *t=0*:



Тоді .



1. Визначимо перехідні струми в гілках:



1. Визначимо напругу на вході кола

.



**Задача № 4**

Знайти перехідну напругу на обкладинках конденсатора після вимикання вимикача *S* в колі рис. 6.4, якщо *u=200sin(1000t+ψu) B, R=50 Ом, L=0,05 Гн, С=20 мкФ* і при *t=0* напруга, зростаючи, досягає позитивної величини, рівної її діючому значенню.

i

R

u

б

uc

С

i

Рис. 6.4

R1

a

S

L

Розв’язання

1. Попередньо знаходимо початкову фазу прикладеної напруги *u* із умови:



або 135°.



В нашому випадку *ψu*=45°, так як комутація виконується в той момент, коли напруга зростає в області позитивних значень.

Таким чином:

.



1. Знаходимо напругу на конденсаторі в колі до комутації:



де



В показовій формі:

.



Переходячи до тригонометричної форми, отримаємо напругу на конденсаторі до комутації:



1. Визначаємо незалежні початкові умови:



1. Складемо рівняння перехідного процесу за ІІ-м законом Кірхгофа для контуру *R,C* відносно *uc*:



1. Вирішимо складено рівняння:



1. При *t=0*:

*uc(0)=ucус(0)+ucв(0),*

*.*



Тому .



**Задача № 5**

Визначити перехідний струм при включенні кола рис. 6.5 на постійну напругу , якщо ; ; .



Розв’язання

1. Відповідно до полярності прикладеної напруги вказуємо на схемі (рис. Р8.6) позитивний напрямок перехідного струму.
2. На підставі закону Ома складемо вираз для перехідного струму в операторній формі:

.



1. За допомогою теореми розкладання за знайденим операторним струмом знайдемо перехідний струм

L

U

i

Рис. 6.5

S

R

С

.



Знайдемо корні рівняння ,



, ,



Обчислимо значення похідної при знайдених коренях



,



,



.



Знайдемо значення :



.



Підставимо у формулу розкладання числові значення величин:



.



При необхідності будь-яку перехідну напругу на ділянці кола можна знайти відразу, не обчислюючи струм. Наприклад:



Застосувавши до цього виразу теорему розкладання, знайдемо .



**Задача № 6**

Розрахувати перехідний процес при відключенні кола рис. 6.6 від джерела постійної напруги, якщо



uc(0)

*i(t)*

Рис. 6.6

С

U

R

L

S

Розв’язання

При вимиканні рубильника *S* утвориться коло з послідовним з’єднанням *R*, та , до якого можна застосувати закон Ома для ненульових початкових умов.



1. Задамося напрямками перехідних струму, напруги на конденсаторі та обходу контуру (рис. Р8.7).
2. Визначимо значення струму в котушці та напруги на конденсаторі в колі до комутації з врахуванням вибраного напряму перехідного процесу:

, "+" – тому, що співпадає з ;



*uc(0)= - U= - 150 B.*

1. Складемо вираз для операторного перехідного струму за законом Ома для ненульових початкових умов:

.



так як немає джерела енергії в контурі після комутації.



4. За допомогою теореми розкладання за операторним струмом знайдемо перехідний струм:

.



Визначимо корені рівняння



, ,



, ,



.



Визначимо похідну та її значення при знайдених коренях:



.



,



.



Знайдемо значення :



,



Підставивши у формулу розкладення числові значення величин, отримаємо:



5. Зробимо перевірку

1. На відповідність початковим умовам:

при *t*=0 .



1. На відповідність усталеним значенням:

при .



Умови задачі задовольняються.

**Література**

1. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки Підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. – 416 с.

2. Теоретичні основи електротехніки. Практикум : навчальний посібник / С. М. Тихонравов, О. Є. Зінченко, Н. П. Карпенко та ін. – Харків : УкрДУЗТ, 2019. – 154 с.

3. Мусихіна Н. П. та ін. Конкурсні задачі з електротехніки. Навчальний посібник / Н. П. Мусихіна, В. І. Коруд, І. І. Васильчишин, П. Г. Стахів, В. С. Мадай, В. С. Марков. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 200 с.

4. Зеленков О.А., Шахов В.П., Бунчук О.О. Лінійні електричні кола постійного та змінного струму: Конспект лекцій.: НАУ, 2003. – 156 с.

5. Зеленков О.А., Шахов В.П., Бунчук О.О. Лінійні і нелінійні електричні кола: Конспект лекцій.: НАУ, 2003. – 168 с.

6. Зеленков О.А., Шахов В.П., Бунчук О.О. Перехідні процеси в лінійних електричних колах: Конспект лекцій.: НАУ, 2003. – 132 с.

7. Зеленков О.А., Бунчук О.О. Теоретичні основи електротехніки. Віртуальна лабораторія: методичний посібник.: НАУ, 2003. – 108 с.

8. Козловський В.Ф., Калмикова Л.М. Теорія електричних та магнітних кіл. Лабораторний практикум.: НАУ, 2011.- 96 с.

9. Козловський В.Ф., Калмикова Л.М. Теорія електричних та магнітних кіл. Методичні рекомендації до виконання курсової роботи: НАУ, 2011.- 32 с.

10. Гумен М.Б., Гурій А.М., Співак В.М. Основи теорії електричних кіл. Кн. 1: Аналіз лінійних електричних кіл. Часова область. – К.: Вища школа, 2003. – 400с.

11. Гумен М.Б., Гурій А.М., Співак В.М. Основи теорії електричних кіл. Кн. 2: Аналіз лінійних електричних кіл. Частотна область. – К.: Вища школа, 2004. – 360с.

12. Гумен М.Б., Гурій А.М., Співак В.М. Основи теорії електричних кіл. Кн. 3: Аналіз нелінійних електричних кіл. – К.: Вища школа, 2004. – 392с.