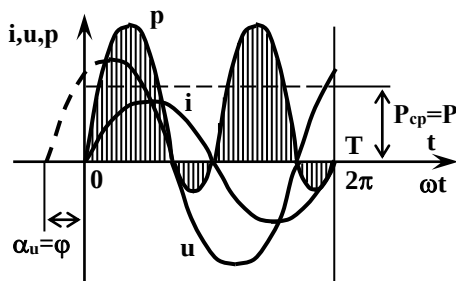


Міністерство освіти і науки України
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»
Інженерно-технічний факультет

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ



Ужгород – 2015

Методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів інженерних спеціальностей. УжНУ, 2015, – 50 с.

Укладач: Цигика В.В., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри приладобудування

Рецензент: Славик В.М., канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри приладобудування

Відповідальний за випуск:

Турияця І.І., канд. фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри приладобудування

Затверджено на засіданні кафедри приладобудування
5 вересня 2014 р., протокол № 1

Схвалено методичною комісією інженерно-технічного
факультету “___” _____ 2015 р., протокол № ___

ВСТУП

Даний лабораторний практикум призначений для студентів ІТФ, які вивчають наступні електротехнічні дисципліни: «Електротехніка», «Теорія електричних і магнітних кіл», «Електропостачання та електричні мережі».

При підготовці до виконання, захисту лабораторної роботи студенти повинні вивчати відповідні розділи вказаних в списку літератури, або інших підручників з курсу загальної електротехніки. Слід зауважити, що в різних підручниках має місце невідповідність умовних позначень векторних і комплексних величин, які в даному методичному посібнику позначаються рискою знизу, наприклад, комплексний опір $\underline{Z}$, вектор діючого значення сили струму $\underline{I}$ і т. д.

При виконанні робіт необхідно суворо дотримуватися правил інструктажу з техніки безпеки, експлуатації обладнання і вимірювальних приладів, наприклад: не допускати короткого замикання чи підключення резистора з малим опором до виводів джерел живлення, генераторів; при підключенні вимірних приладів потрібно знати порядок вимірюваної величини або встановлювати перемикач діапазонів на максимальне значення досліджуваного параметру; при наявності регульованого джерела живлення плавно збільшувати напругу від нульового значення, контролюючи при цьому покази приладів, тощо.

Перед виконанням завдань викладач контролює достатність попередньої підготовки студентів, які, після допуску до роботи, збирають досліджуване коло, підключають вимірювальні прилади. Включення джерел живлення здійснюється тільки з дозволу викладача. В процесі виконання завдань потрібно проводити попередні обчислення з тим, щоб в разі допущення промахів мати можливість їх виправити. По закінченні вимірів виконавець демонструє працездатність макету і вимірних приладів керівнику занять, розбирає схему, дає на підпис робочий зошит.

Перед початком нової роботи студенти повинні представити оформлені звіти по попереднім. Захист виконаних робіт повинен проходити поступово на протязі семестру.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: ознайомитися з режимами роботи електричного кола, особливостями передачі електроенергії по лінії.

Постановка задачі, розрахункові співвідношення.

Дослідити режими роботи електричного кола, схема заміщення якого наведена на рис.1.

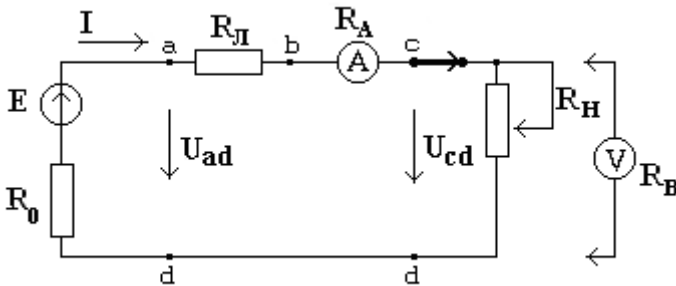


Рис. 1

На схемі R_0 – внутрішній опір джерела е.р.с. E , R_L – опір лінії, R_A , R_V – опори амперметра і вольтметра, R_H – опір навантаження (споживач електроенергії). Спад напруги на опорі навантаження в номінальному режимі знаходимо згідно закону Ома, або згідно другого закону Кірхгофа:

$$U_{cd} = I \cdot R_H, \text{ або } U_{cd} = E - I \cdot (R_0 + R_L + R_A).$$

Напруга на затискачах джерела живлення $U_{ad} = E - I \cdot R_0$.

В режимі холостого ходу $I = 0$, $U_{cdxx} = U_{adxx} = E$.

В режимі короткого замикання $U_{cd} = 0$, $I_{кз} = E / (R_0 + R_L + R_A)$.

Потужність, яку розвиває джерело живлення $P_1 = I \cdot E$, потужність споживача $P_2 = I^2 \cdot R_H$.

Слід зауважити, що $R_A \rightarrow 0$ і в даній роботі ним можна нехтувати. В узгодженому режимі $R_H \approx R_0 + R_L$ і на споживачі виділяється максимальна потужність. Баланс потужності:

$$I \cdot E = I^2 \cdot R_H + I^2 \cdot (R_0 + R_L + R_A).$$

Коефіцієнт корисної дії електричного кола $\eta = P_2/P_1 = R_H / (R_H + R_0 + R_L + R_A)$, спад напруги в лінії $U_{ab} = U_{ad} - U_{cd}$, опір лінії $R_L = U_{ab}/I$.

Похибки вимірювання електричних величин.

Абсолютну похибку вимірювання аналоговим приладом електричної величини A визначають за класом точності. Цифра класу точності

$$\gamma_{кл.т.} = \frac{\Delta A}{A_H} \cdot 100,$$

де ΔA – абсолютна похибка, A_H – номінальне, тобто, в даному випадку, максимальне значення величини A , яке може бути виміряне приладом. Дійсне значення величини знаходиться в межах $A_d = A_B \pm \Delta A$, де A_B – виміряне значення. Відносна похибка

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_d} \cdot 100.$$

Порядок виконання роботи.

1. Скласти схему згідно рис.1. Встановити таку напругу живлення U_{ad} , щоб в режимі короткого замикання сила струму не перевищувала номінальний струм міліамперметра.
2. Зняти залежності $U_{ad} = f(I)$ та $U_{cd} = f(I)$.
3. Розрахувати величини R_H , P_1 , P_2 , η , R_L , R_0 . Отримані дані звести до таблиці.

4. Побудувати зовнішню характеристику джерела живлення $U_{cd} = f(I) = E - I \cdot (R_0 + R_L)$, а також залежності P_1 , P_2 , η від сили струму.
5. Розрахувати залежність $\eta(P_2)$ для випадку вдвічі вищої напруги живлення U_{ad} . Побудувати і порівняти залежності $\eta(P_2)$ для U_{ad} та $2U_{ad}$.
6. Визначити похибки вимірювань напруги та сили струму для узгодженого режиму, режимів холостого ходу та короткого замикання. В узгодженому режимі визначити також абсолютну і відносну похибку для всіх розрахованих величин.
7. Зробити висновки по роботі.

Таблиця

Виміряно			Розраховано					
I, A	U_{ad} , В	U_{cd} , В	R_H , Ом	P_1 , Вт	P_2 , Вт	η , %	R_L , Ом	R_0 , Ом

Контрольні питання

1. Електричне коло. Класифікація електричних кіл. Види електричних схем. Визначення понять: вітка, вузол, контур.
2. Записати рівняння закону Ома для ділянки кола і повного кола. Сформулювати і записати рівняння законів Кірхгофа.
3. Записати рівняння другого закону Кірхгофа для досліджуваного контуру.
4. Визначити поняття про режими роботи електричного кола. Як за допомогою електровимірювальних приладів визначити електрорушійну силу та внутрішній опір джерела живлення?
5. Пояснити зміст твердження про баланс потужності в електричному колі.

6. Довести твердження, що в узгодженому режимі на споживачі виділяється максимальна потужність. Визначити к.к.д. узгодженого режиму. В яких випадках застосовують узгоджений режим ?
7. Чому передача електроенергії на великі відстані здійснюється по високовольтних лініях ?
8. Джерела е.р.с. і джерела струму, їх схеми заміщення та зовнішні характеристики.
9. Розрахунок електричних кіл постійного струму методом еквівалентних перетворень.
10. Порядок розрахунку електричних кіл методом безпосереднього застосування законів Кірхгофа.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

Мета роботи: навчитись визначати параметри елементів електричного кола непрямим методом – за допомогою амперметра, вольтметра та ватметра.

Постановка задачі, розрахункові співвідношення.

При виконанні лабораторної роботи необхідно визначити опір резистора R , активний R_L , індуктивний X_L , повний Z та комплексний $\underline{Z}$ опори котушки індуктивності, індуктивність L , ємнісний опір X_C , електроємність конденсатора C .

Опір резистора можна визначити за допомогою амперметра і вольтметра. Згідно схеми рис.2а $R=U/(I_A-I_B)$, якщо $R_V \gg R$, то $I_B=U/R_V \rightarrow 0$, $R \approx U/I_A$.

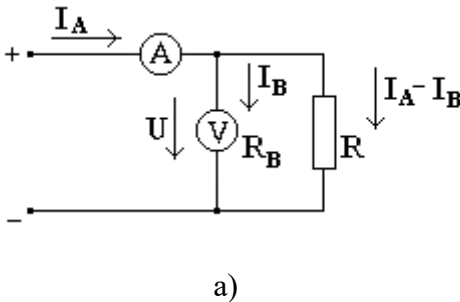
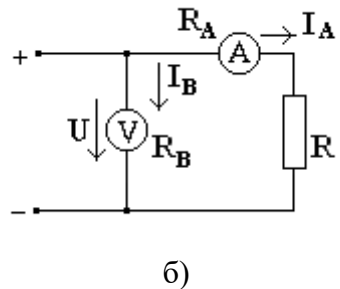


Рис. 2

Для схеми рис.2б $U=I_A \cdot (R_A+R)$, $R=(U/I_A) - R_A$. Якщо $R \gg R_A$, то $R \approx U/I_A$.

Схема рис..2а застосовується для вимірювання малих опорів ($R \leq 1 \div 10$ Ом), схема рис. 2б – для вимірювання великих опорів.

На рис. 3а наведена послідовна схема заміщення котушки індуктивності без феромагнітного осердя.

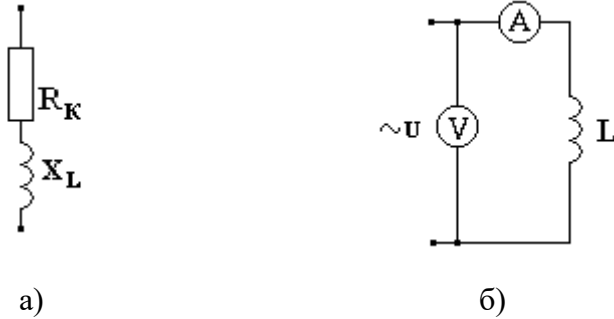


Рис. 3

За законом Ома $I=U/Z$, де повний опір котушки $Z = \sqrt{R_K^2 + X_L^2}$, індуктивний опір $X_L = \omega L$, $\omega = 2\pi \cdot f$. Активний опір котушки R_K на частоті $f = 50$ Гц мало відрізняється від омичного, тому його можна виміряти омметром. Кут зсуву по фазі між струмом і напругою $\varphi = \arccos R_K/Z$.

Для конденсатора застосовують паралельну схему заміщення (рис.4а).



Рис. 4

Активна провідність конденсатора $G \rightarrow 0$, тому $I=U/X_C$, де ємнісний опір $X_C = 1/\omega C$.

В котушці з феромагнітним осердям в колі змінного струму виникають магнітні втрати, обумовлені вихровими струмами і перемагнічуванням. Схема заміщення такої котушки включає (без врахування магнітних потоків розсіяння) активний опір R_K , опір магнітних втрат R_0 та індуктивний опір X_L . Потокозчеплення котушки $\Psi = w \cdot \Phi = L \cdot I$, де w – кількість витків, Φ – магнітний потік, L – індуктивність. Для ділянки магнітного

кола $\Phi = Iw/R_M$, де магнітний опір $R_M = l/\mu\mu_0 S$, l – довжина ділянки магнітопровода (осердя) з магнітною проникністю μ і площею поперечного перерізу S , $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнітна стала. Із наведених співвідношень отримаємо, що індуктивність $L = w^2/R_M$, отже її можна змінювати за допомогою феромагнітного осердя. Параметри такої котушки визначають за допомогою амперметра, ватметра і вольтметра (рис. 5).

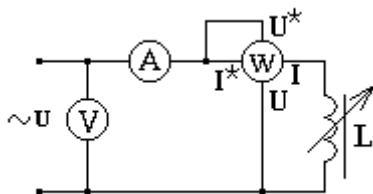


Рис. 5

Активна потужність $P = I \cdot U \cdot \cos\varphi = I^2 \cdot R$. В даному випадку R – результуючий опір, обумовлений втратами в провідниках (міді) та осерді (сталі), тобто $R = R_K + R_0$. Повний опір $Z = U/I$, індуктивний опір $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$, індуктивність $L = X_L/\omega$, $\cos\varphi = P/PU = R/Z$.

Порядок виконання роботи.

1. Визначити номінал резистора згідно схем рис. 2.
2. Визначити параметри котушки (R_K , Z , X_L , L), $\cos\varphi$ за схемою рис. 3б та за допомогою омметра.
3. Визначити ємнісний опір X_C та ємність C конденсатора (рис. 4б).
4. Визначити параметри котушки згідно схеми на рис. 5, а саме: Z , R , R_0 , L , $\cos\varphi$, комплексний опір $\underline{Z}$. Виміри провести для двох положень феромагнітного осердя.
5. Побудувати векторні діаграми для схем рис. 3 – рис. 5.
6. Оцінити похибки вимірювань.
7. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання.

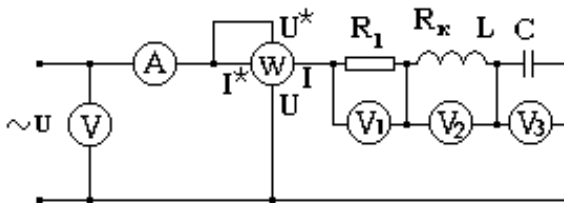
1. Закон електромагнітної індукції. Самоіндукція. Індуктивність.
2. Електроємність. Конденсатори.
3. Основні характеристики синусоїдного струму та напруги.
4. Представлення синусоїдних величин в різних формах.
5. Закон Ома для кола змінного струму.
6. Чому опір дрітного резистора в колі змінного струму відрізняється від опору в колі постійного струму?
7. Чому відрізняється визначений за допомогою амперметра і ватметра активний опір котушки індуктивності з осердям і без осердя?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ЕЛЕКТРИЧНЕ КОЛО ЗМІННОГО СТРУМУ

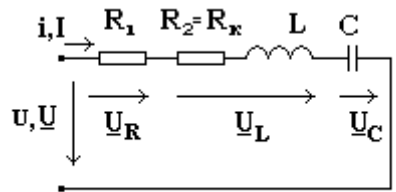
Мета роботи: освоєння методів розрахунку параметрів кола синусоїдного струму, побудови векторних діаграм по дослідним даним

Постановка задачі, розрахункові співвідношення.

В даній роботі необхідно дослідити електричне коло змінного струму при послідовному і паралельному сполученні споживачів електроенергії – резистора R_1 , котушки індуктивності L , і конденсатора C . На рис. 6а наведена схема електрична принципова, а на рис. 6б – схема заміщення для послідовного сполучення елементів R_1, L, C . На схемі $R_2 = R_K$ – активний опір котушки.



а)



б)

Рис. 6

Розрахунок параметрів елементів схеми здійснюють згідно показів вимірних приладів за законом Ома для кола змінного струму, співвідношенням для активної потужності та з урахуванням, що частота напруги живлення $f = 50\text{Гц}$.

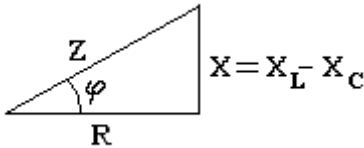
Закон Ома: $I = U/Z$,

де $Z = \sqrt{R + (X_L - X_C)^2}$ - повний опір, R – активний, $(X_L - X_C)$ - реактивний, $X_L = \omega L$ – індуктивний, а $X_C = 1/\omega C$ – ємнісний опори.

Результуючий активний опір R знаходять як суму всіх послідовно сполучених опорів; аналогічно визначають реактивний опір. Для розглянутого електричного кола (рис.6) отримаємо:

$$I = U \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (\omega L - 1/(\omega \cdot C))^2}$$

Зв'язок між активним, реактивним та повним опором ілюструє трикутник опорів (рис.7).



Кут φ трикутника відповідає зсуву по фазі між струмом I та напругою U . З трикутника слідує, наприклад, $\varphi = \arccos R/Z$.

Рис. 7

Активна потужність $P = I \cdot U \cdot \cos \varphi = I^2 \cdot R$ (Вт), реактивна потужність $Q = I \cdot U \cdot \sin \varphi$ (Вар), повна потужність $S = I \cdot U$ (ВА), причому $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$, де $Q = Q_L - Q_C$.

Для побудови векторної діаграми кола з послідовним сполученням елементів в якості вихідного вектора доцільно вибрати вектор струму $\underline{I}$ з нульовою початковою фазою ($\alpha_i = 0$). Зсув по фазі $\varphi = \alpha_u - \alpha_i$ між струмом I та спадами напруг U_R , U_L , U_C на ділянках електричного кола: $\varphi_R = 0$, $\varphi_L = \arccos(R_K / \sqrt{R_K^2 + (\omega L)^2})$, $\varphi_C = -\pi/2$. Згідно другого закону Кірхгофа у векторній формі: $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C$.

Вектор напруги на котушці $\underline{U}_L = \underline{U}_A + \underline{U}_P$, тобто включає активну складову $\underline{U}_A$ (на активному опорі R_K) та реактивну складову $\underline{U}_P$ (на індуктивному опорі X_L).

Схема заміщення паралельного сполучення елементів наведена на рис.8. Діючі значення струмів кожної вітки визначають за законом Ома:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L)^2}}; \quad I_3 = U \cdot \omega \cdot C$$

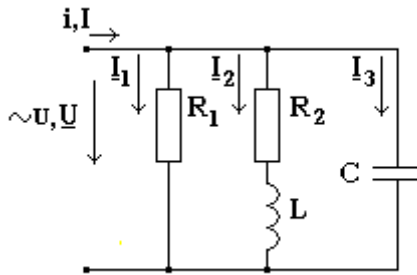


Рис. 8

Визначення діючого значення результуючого струму I можливе різними способами.

Спосіб 1. Будують векторну діаграму кола. В якості вихідного вектора вибирають вектор напруги $\underline{U}$ з нульовою початковою фазою ($\alpha_u = 0$). Далі визначають зсув по фазі між напругою U та струмом кожної вітки. Стосовно кола рис. 8:

$$\varphi_1 = 0; \quad \varphi_2 = \arccos(R_2 / \sqrt{R_2^2 + (\omega L)^2}); \quad \varphi_3 = -\pi / 2.$$

Визначають результуючий струм згідно першого закону Кірхгофа:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3.$$

Спосіб 2. Для розрахунку кола з паралельним сполученням елементів застосовують поняття провідності. Повна провідність $Y = 1/Z = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$, де G – активна провідність, $(B_L - B_C)$ – реактивна провідність. Результуючу активну провідність G визначають як суму активних провідностей всіх паралельних віток:

$G = \sum_{K=1}^n G_K$. Аналогічно визначають результуючу індуктивну і ємнісну провідності B_L і B_C . Активна провідність k -ої вітки $G_k = R_k / Z_k^2$, індуктивна провідність $B_{Lk} = X_{Lk} / Z_k^2$, ємнісна провідність $B_{Ck} = X_{Ck} / Z_k^2$.

Стосовно електричного кола на рис.8 з трьома паралельними вітками отримаємо:

$$G_1 = \frac{1}{R} ; \quad B_1 = 0 \quad (\text{перша вітка});$$

$$G_2 = \frac{R_2}{R_2^2 + (\omega L)^2} ; \quad B_{L_2} = \frac{\omega L}{R_2^2 + (\omega L)^2} \quad (\text{друга вітка});$$

$$G_3 = 0; \quad B_{C_3} = \omega \cdot C \quad (\text{третья вітка}).$$

Повна провідність $Y = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_{L_2} - B_{C_3})^2}$, діюче значення струму:

$$I = U \cdot Y.$$

Спосіб 3. Розрахунок проводять в комплексній формі. Слід зауважити, що цей спосіб є основним для розрахунку електричних кіл змінного струму.

Закон Ома в комплексній формі:

$$\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}$$

Комплексна напруга $\underline{U} = U \cdot e^{j\alpha_U}$.

Комплексний опір $\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi} = Z \cos \varphi + j Z \sin \varphi = R + j(X_L - X_C)$.

Скористаємося методом перетворення кола. Враховуючи, що $1/\underline{Z}_e = 1/\underline{Z}_1 + 1/\underline{Z}_2 + 1/\underline{Z}_3$, визначимо еквівалентний комплексний опір

$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3 + \underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2}$$

Для кола на рис.8 $\underline{Z}_1 = R_1$; $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_L$; $\underline{Z}_3 = -jX_C$.

Комплексний струм $\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}_e$.

Порядок виконання роботи.

1. Зібрати схему згідно рис.6а (без вольтметрів V_1 , V_2 , V_3), виміряти значення U , I , P .
2. Почергово підключити вольтметр V в положення V_1 , V_2 , V_3 і виміряти спади напруг на ділянках кола U_R , U_L , U_C . При вимірюваннях врахувати, що спади напруг на реактивних елементах можуть перевищувати напругу живлення U .

3. Почергово підключити виводи ватметра U^* , U паралельно до резистора, котушки та конденсатора, виміряти активні потужності P_R , P_L та впевнитись, що конденсатор не споживає активної потужності ($P_C = 0$).

4. Згідно показів вимірних приладів розрахувати наступні величини: повний опір всього кола (еквівалентний опір) Z та його складові R , X , зсув по фазі ϕ між струмом I та напругою U , опори R_1 , R_2 , X_L , X_C , індуктивність L , ємність C , ϕ_L – зсув по фазі між U_L та I .

5. Побудувати векторну діаграму кола рис. 6.

6. Провести розрахунок електричного кола рис.8, тобто визначити невідомі струми I , I_1 , I_2 , I_3 для заданої напруги живлення U та розрахованих в п.4 величин R_1 , R_2 , L , C . Струм I визначити трьома вищезазначеними способами.

Контрольні питання.

1. До резистора $R = 10$ Ом прикладена синусоїдна напруга $u = 310 \sin(314t + 30^\circ)$. Визначити покази амперметра, частоту f , миттєве значення сили струму, побудувати векторну діаграму.
2. До котушки $L = 100\text{мГн}$ прикладена напруга $u = 157 \sin(314t + 45^\circ)$. Знайти діюче та миттєве значення сили струму, е.р.с. самоіндукції та побудувати векторну діаграму.
3. Знайти еквівалентний опір ділянки електричного кола (рис.9).

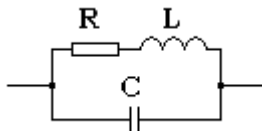


Рис. 9

4. Комплексний струм $I = 3 + j4\text{А}$. Визначити діюче та миттєве значення сили струму.

5. Комплексний опір ділянки електричного кола $\underline{Z}=6-j8$ Ом. Нарисувати схему заміщення, визначити зсув фази між струмом і напругою даної ділянки.
6. Розрахувати комплексні струми електричного кола рис.8, якщо $U = 200\text{В}$, $R_1= 700$ Ом, $R_2=150$ Ом, $L = 1$ Гн, $C = 4$ мкФ, $f = 50$ Гц.
7. Визначити миттєве значення сили струму $\underline{I} = 2 + j2$ А в момент часу $t = 10$ мс (частота $f = 50$ Гц).
8. Явища резонансу в електричних колах.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

Мета роботи: вивчення трифазних електричних кіл.

Постановка задачі, розрахункові співвідношення.

Трифазним називається електричне коло, у вітках якого діють три однакових за амплітудою і частотою синусоїдні електрорушійні сили, які зсунуті по фазі одна відносно одної на кут 120° .

Обмотки трифазних генераторів сполучають по схемі зірки і трикутника. Сполучення по схемі зірки приведено на рис.10. Вузол N називається нейтральною точкою генератора. Провідники, які йдуть від початків фаз A, B, C до приймачів, називаються лінійними. Провід від нейтральної точки генератора – нейтральний. Потенціал нейтральної точки генератора приймається рівним нулю.

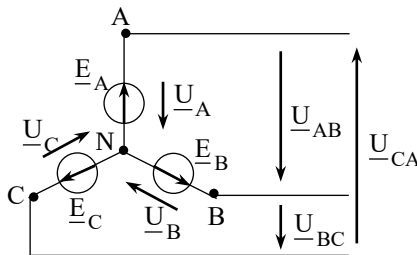


Рис. 10

Фазні напруги генератора

$$\underline{U}_A = \underline{U}_{AN} = U_\Phi e^{j0};$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_{BN} = U_\Phi e^{-j120}; \quad (4.1)$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_{CN} = U_\Phi e^{j120}.$$

де U_Φ – діюче значення фазної напруги генератора.

Напруги між початками двох фаз, тобто між проводами лінії, називаються лінійними.

Згідно рис.10:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (4.2)$$

Підставляючи (4.1) в (4.2), одержимо:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \sqrt{3}U_{\Phi} e^{j30} = U_L e^{j30} \\ \underline{U}_{BC} &= \sqrt{3}U_{\Phi} e^{j90} = U_L e^{-j90} \\ \underline{U}_{CA} &= \sqrt{3}U_{\Phi} e^{j150} = U_L e^{j150} \end{aligned} \quad (4.3.)$$

де діюче значення лінійної напруги:

$$U_L = \sqrt{3}U_{\Phi}. \quad (4.4)$$

Трифазні приймачі, аналогічно як і обмотки генераторів, включають як по схемі зірки, так і трикутника.

У випадку несиметричного навантаження, тобто, коли $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$, застосовують схему зірки з нейтральним проводом (рис.11).

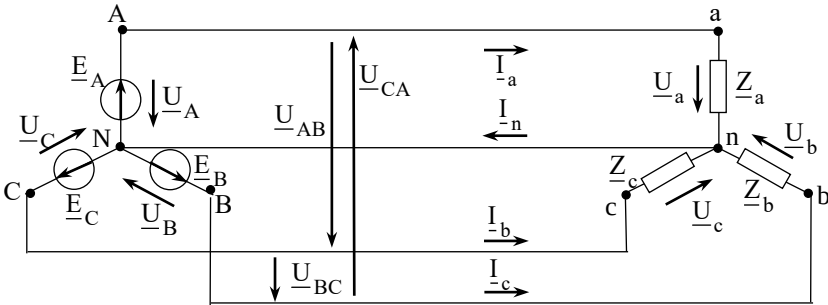


Рис. 11

Для даної схеми режими роботи фаз є взаємонезалежними, фазні струми приймача розраховують згідно закону Ома:

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a}; \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b}; \quad \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} \quad (4.5)$$

Струм в нейтральному проводі, згідно першого закону Кірхгофа в комплексній формі:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c \quad (4.6)$$

Фазні струми приймача співпадають з лінійними, а лінійні і фазні напруги зв'язані співвідношеннями (4.3) та (4.4),

При симетричному навантаженні $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\Phi = Z_\Phi e^{j\varphi}$ розрахунок струмів спрощується і зводиться до розрахунку струму в одній фазі:

$$I_\Phi = \frac{U_\Phi}{Z_\Phi}.$$

Діючі значення фазних струмів I_Φ рівні, а їх вектори зсунуті відносно векторів фазних напруг на однаковий кут φ . Векторна діаграма, що відповідає симетричному активно-індуктивному навантаженню $\underline{Z}_\Phi = R + jX_L$ приведена на рис.12.

9

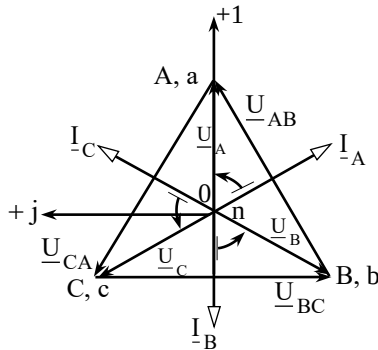


Рис. 12

Струм в нейтральному проводі $\underline{I}_N$, згідно (4.6) та рис.12, рівний нулю, тобто, при симетричному навантаженні нейтральний провід не потрібен. Особливістю схеми зірки без нейтрального проводу є взаємозалежність режимів роботи фаз. Для даної схеми при несиметричному навантаженні порушується симетрія фазних напруг і струмів приймача.

Виникає напруга зміщення нейтралі $\underline{U}_{nN}$ – напруга між нейтральними точками генератора і приймача. Згідно методу двох вузлів:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_a + \underline{E}_B \underline{Y}_b + \underline{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}, \quad (4.7)$$

де $\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c$ – комплексні провідності фаз приймачів. Напруга зміщення нейтралі обумовлює зміну фазних напруг приймача:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} \quad (4.8)$$

Отже, для схеми зірки без нейтрального проводу співвідношення $U_{\text{Л}} = \sqrt{3}U_{\text{Ф}}$ справедливе тільки для випадку симетричного навантаження.

На рис.13 показана схема сполучення фаз приймача трикутником. Опори фаз при сполученні трикутником позначаються подвійними індексами: $\underline{Z}_{ab}$, $\underline{Z}_{bc}$, $\underline{Z}_{ca}$.

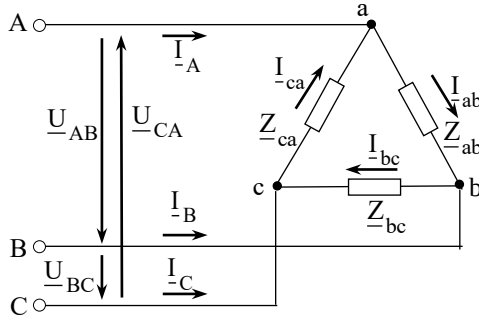


Рис. 13

Згідно схеми, кожна фаза приймача включена на лінійну напругу генератора, тому ці напруги є фазними напругами приймача:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}; \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC}; \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA} \quad (4.9)$$

Струми в проводах лінії між генератором і приймачем I_A , I_B , I_C називаються лінійними. Струми в фазах приймача I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} називаються фазними.

Фазні струми розраховують згідно закону Ома:

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; \quad I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; \quad I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}} \quad (4.10)$$

Співвідношення між лінійними і фазними струмами згідно першого закону Кірхгофа для вузлів a, b, c:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_B = I_{bc} - I_{ab}; \quad I_C = I_{ca} - I_{bc} \quad (4.11)$$

Активна потужність кожної фази розраховується так, як і для однофазного приймача:

$$P_\Phi = I_\Phi U_\Phi \cos \varphi_\Phi = I_\Phi^2 R_\Phi.$$

При симетричному навантаженні потужності всіх фаз однакові, тому:

$$P = 3P_\Phi = 3I_\Phi U_\Phi \cos \varphi_\Phi;$$

При симетричному навантаженні потужності можна виразити через лінійні напруги і струми. В цьому випадку, незалежно від схем сполучення приймачів:

$$\begin{aligned} P &= \sqrt{3} I_L U_L \cos \varphi_\Phi \\ Q &= \sqrt{3} I_L U_L \sin \varphi_\Phi \\ S &= \sqrt{3} I_L U_L \end{aligned} \quad (4.12)$$

Вимірювання активної потужності в трифазних колах в залежності від схеми сполучення фаз споживача і симетрії навантаження реалізується одним, двома або трьома ватметрами.

Для трьохпроводних трифазних кіл застосовують метод двох ватметрів. Одна з трьох можливих схем включення двох ватметрів представлена на рис.14. Причому, активна потужність трифазної системи рівна сумі показів двох ватметрів: $P = P_1 + P_2$.

Можна показати, що при симетричному навантаженні реактивна потужність $Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$.

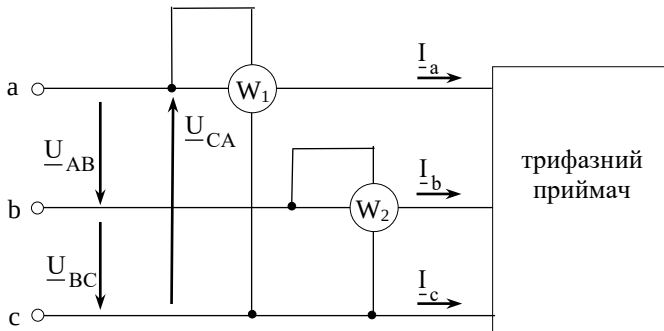


Рис. 14

Порядок виконання роботи.

1. Нарисувати (включно з вимірювальними приладами) і зібрати схеми зірки з нейтральним проводом: а) для симетричного активно-індуктивного навантаження $\underline{Z}_{\phi} = R + jX_L$; б) для несиметричного навантаження.
2. Виміряти фазні і лінійні напруги і струми, струм у нейтральному проводі, активну потужність, що споживається кожним приймачем.
3. Зібрати схему рис.14 для симетричного активно-індуктивного навантаження і виміряти потужність трифазного кола методом двох ватметрів.
4. Розрахувати повний, активний та реактивний опори для кожної фази, реактивну та повну потужності трифазного кола.
5. Побудувати в масштабі векторні діаграми досліджених кіл.
6. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання.

1. Переваги трифазної системи передачі електроенергії.
2. Навести рівняння, графіки та векторну діаграму трифазної симетричної системи напруг.

3. Навести співвідношення між лінійними і фазними напругами і струмами при сполученні приймачів зіркою.
4. Пояснити призначення нульового проводу. Чому не ставлять запобіжників в нульовий провід?
5. Що називається зміщенням нейтралі?
6. Які явища спостерігаються в трипровідній системі із сполученні приймачів зіркою при обриві однієї з фаз? Короткому замиканні однієї з фаз?
7. Знайти графічно і аналітично величину струму в нульовому проводі у випадку обриву одного лінійного проводу (навантаження симетричне).
8. Обґрунтувати вибір схеми підключення навантаження в трифазних системах для конкретних споживачів.
9. Активна, реактивна і повна потужність, методи їх вимірювання для трифазного кола, одиниці вимірювань.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Мета роботи: вивчення перехідних процесів в електричних колах при комутації джерела постійної е.р.с., експериментальне визначення форми сигналів на виході R, C-, R, L-, та R, L, C- кіл.

Постановка задачі, розрахункові співвідношення.

Перехідні процеси відбуваються при зміні режиму роботи електричного кола внаслідок, наприклад, комутації. Комутацією називають зміну схеми з'єднань електричного кола (включення, виключення, перемикання і т. д.).

Два закони комутації: струм в індуктивному і напруга на ємнісному елементах не можуть мінятися стрибкоподібно.

Перехідні процеси описуються диференціальними рівняннями, складеними згідно законів Кірхгофа для миттєвих значень напруг і струмів. Для розв'язку цих рівнянь застосовують різні методи: класичний, операторний, спектральний.

Розглянемо деякі приклади.

Підключення послідовного RC- кола до джерела постійної е.р.с. E (рис. 15) описується рівнянням другого закону Кірхгофа

$$u_R + u_C = E, \text{ де } u_R = iR = RC \frac{du_C}{dt}.$$

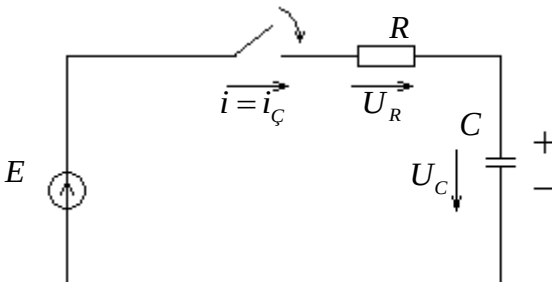


Рис. 15

Отже, рівняння даного кола має вигляд

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E.$$

Його розв'язок: $u_C = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, де $\tau = RC$ - постійна часу R,C-кола. При умові, що $t \geq 3\tau$, конденсатор встигає майже повністю зарядитися і напруга на ньому досягає значення $u_C \approx E$. Якщо дане коло відключити від джерела живлення і замкнути накоротко (рис. 16), то конденсатор розряджається через резистор R, причому струми зарядки i_z та розрядки i_p направлені у взаємопротилежні сторони.

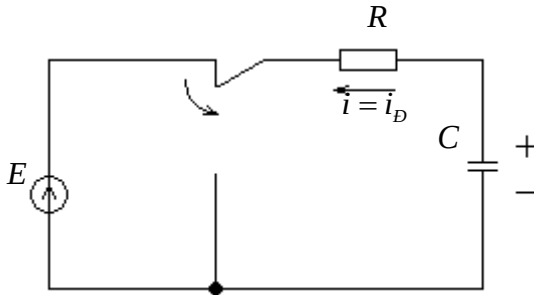


Рис. 16

Рівняння даного кола: $RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$. Його розв'язок:

$u_C = Ee^{-\frac{t}{\tau}}$, а графічну залежність $u_C(t)$ наведено на рис.17.

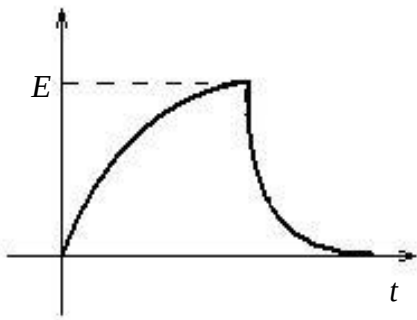


Рис. 17

Розглянемо підключення до E послідовного R , L , C – контура (рис. 18)

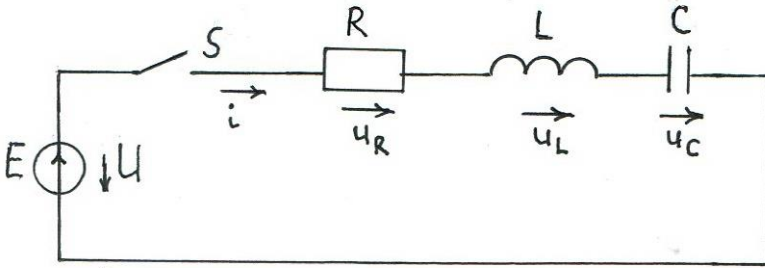


Рис. 18

Згідно другого закону Кірхгофа для миттєвих значень напруг і струмів $u_R + u_L + u_C = E$, де $u_L = L \frac{di}{dt}$, $i = C \frac{du_C}{dt}$.

Диференціальне рівняння, що описує перехідні процеси в даному послідовному контурі, а саме, зміну напруги на конденсаторі, має вигляд:

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E.$$

Згідно класичного методу, розв'язок може бути представлено у вигляді суми усталеної (частковий розв'язок неоднорідного диф. рівняння) та вільної (загальний розв'язок однорідного диф. рівняння) складових:

$$u_C = U_{\text{ст}} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

де $U_{\text{ст}}$ – усталена складова напруги конденсатора, яка встановлюється по закінченні перехідного процесу. Для даного випадку $U_{\text{ст}} = E$. Постійні A_1 і A_2 визначають із початкових умов, а p_1 і p_2 є коренями характеристичного рівняння $LCp^2 + RCp + 1 = 0$. Тобто,

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Якщо $\frac{R}{2L} \geq \frac{1}{LC}$, тобто, $R \geq 2\sqrt{L/C} = 2\rho$, то корені характеристичного рівняння будуть дійсними, якщо $R < 2\rho$, то комплексними спряженими:

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_c.$$

В першому випадку процес у колі аперіодичний (експоненціальні функції), у другому – коливний (рис.19).

Параметр $\delta = \frac{R}{2L}$ - коефіцієнт загасання,

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad - \quad \text{кутова частота згасаючих}$$

коливань періодичного перехідного процесу, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - резонансна частота послідовного R, L, C – контуру, а розв'язок диференціального рівняння:

$$u_C = E - \frac{\omega_0}{\omega_c} E e^{-\delta t} \sin(\omega_c t + \alpha),$$

де $\alpha = \arctg \omega_c / \delta$.

$$\text{Сила струму в контурі } i = \frac{E}{\omega_c L} e^{-\delta t} \sin \omega_c t = I e^{-\delta t} \sin \omega_c t.$$

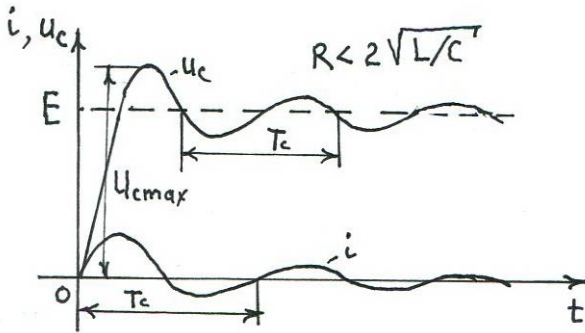


Рис. 19

Період згасаючих коливань $T_c = 2\pi/\omega_c$, швидкість зменшення амплітуди характеризується декрементом коливань Δ , який визначають як відношення амплітуд в моменти часу t і $t+T_c$.

Стосовно сили струму $\Delta = \frac{Ie^{-\delta t} \sin \omega_c t}{Ie^{-\delta(t+T_c)} \sin \omega_c(t+T_c)}$, звідки слідує, що декремент коливань $\Delta = e^{\delta T_c}$. Величину $\ln \Delta = \delta T_c$ називають логарифмічним декрементом коливань

Порядок виконання роботи.

1. В якості джерела вхідного сигналу використати генератор імпульсів (ГІ) П- подібної форми. Встановити період однополярних імпульсів $T = 100$ мкс, тривалість імпульсу $t_i = 50$ мкс, амплітуду $U_m = 5$ В.
2. Встановивши зовнішню синхронізацію від фронту імпульсу, зарисувати з екрану осцилографа часову залежність напруги генератора $u_{вх}(t)$.
3. Зібрати схему, наведену на рис. 20.

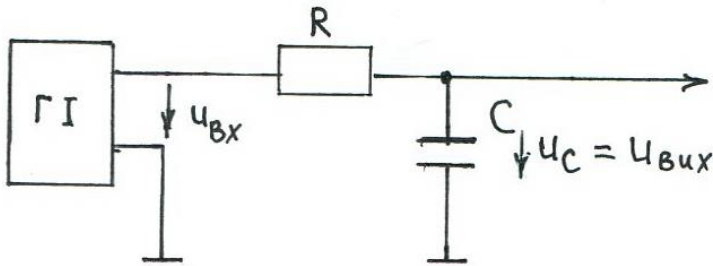


Рис. 20

Зарисувати осцилограми напруг на конденсаторі $u_c(t)$ при умові, що $C = 1$ нФ, та двох номіналах резистора R : $R_1 = 5$ кОм, та $R_2 = 15$ кОм.

4. Змінити схему рис.20, помінявши місцями резистор і конденсатор. Зарисувати осцилограми напруг на резисторах $R_{1,2}$.

5. Виконати завдання п. 2 -3 для R, L – кола при умовах $L = 315$ мкГн, $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 20$ Ом.

6. Зібрати схему, наведену на рис. 21.

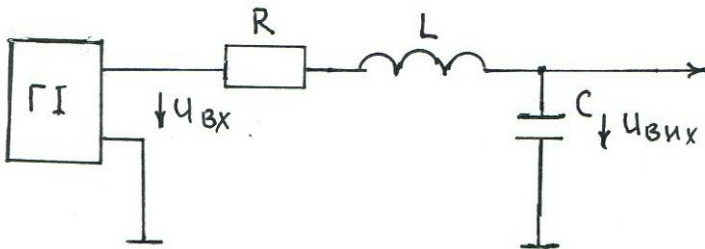


Рис. 21

Зняти та зарисувати з екрану осцилографа залежності $u_c(t)$ для випадків $R_1 = 50$ Ом, та $R_2 = 5$ кОм, $L = 315$ мкГн, $C = 1$ нФ.

7. Розрахувати постійні часу R, C- та R, L- кіл ($\tau = RC$ та $\tau = R/L$, відповідно). Визначити постійні часу з осцилограм і порівняти їх з розрахованими.

8. Записати рівняння, яким відповідають отримані осцилограми.

9. Для послідовного R, L, C- контуру розрахувати значення критичного опору $R = 2\sqrt{L/C} = 2\rho$, резонансну частоту ω_0 , хвильовий опір ρ , добротність $Q = \rho/R$, коефіцієнт згасання δ , кутову частоту та період згасаючих коливань ω_c , T_c , логарифмічний декремент коливань $\ln \Delta$.

Визначити T_c , Δ із осцилограм і порівняти їх з розрахованими.

10. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання.

1. Закони комутації. Початкові умови.
2. Методи розрахунку перехідних процесів.
3. Перехідні процеси в R, L- колі.
4. Перехідні процеси в R, C- колі.
5. Перехідні процеси в послідовному R, L, C- контурі.
6. Експериментальні методи визначення постійної часу.
7. Визначити характер перехідного процесу в послідовному R, L, C - контурі, якщо $R = 5 \text{ Ом}$, $L = 0,4 \text{ Гн}$, $C = 100 \text{ мкФ}$.
8. Послідовний R, L, C - контур підключають до джерела постійної напруги. Розрахувати декремент коливань, практичний час перехідного процесу, період згасаючих коливань, якщо $R = 20 \text{ Ом}$, $L = 16.6 \text{ мГн}$, $C = 5.92 \text{ мкФ}$.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 ДИФЕРЕНЦІЮЮЧІ І ІНТЕГРУЮЧІ КОЛА

Мета роботи: : експериментальне визначення форми сигналів на виході RC- кіл при різних співвідношеннях постійної часу і тривалості сигналу.

Постановка задачі, розрахункові співвідношення.

В якості диференціюючих і інтегруючих можуть бути застосовані R, L- і R, C- кола. На практиці частіше застосовують R, C- кола, оскільки їх простіше реалізувати.

Розглянемо R, C – коло, наведене на рис. 22.

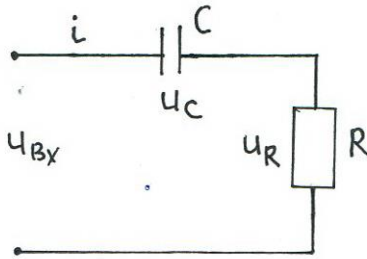


Рис. 22

Миттєве значення сили струму, що протікає через конденсатор

$$i = i_C = C \frac{du_C}{dt}. \quad (6.1)$$

За другим законом Кірхгофа

$$u_{\text{вх}} = u_C + u_R, \quad (6.2)$$

де $u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ (6.3) а $u_R = iR = RC \frac{du_C}{dt}$ (6.4).

Диференціююче коло отримаємо при умові, що вихідною напругою буде напруга на резисторі ($u_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} = u_R$), а вхідна напруга $u_{\hat{a}\hat{o}} \approx u_N$ (6.5). Диференціювання буде тим точнішим, чим ближче значення напруги конденсатора до вхідної напруги. Дана умова виконується, якщо тривалість вхідного сигналу $\square \tau$, де $\tau = RC$ - постійна часу R , C - кола. Тобто, по приході вхідного сигналу конденсатор встигає зарядитися і накопичити максимально можливий електричний заряд $q = Cu_C$. В результаті отримаємо $u_C \approx u_{\hat{a}\hat{o}}$, а $u_R \rightarrow 0$.

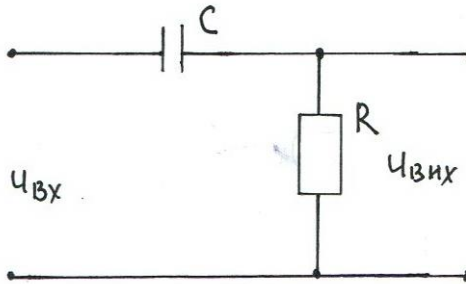


Рис. 23

Таким чином, схема диференціюючого кола має вигляд, наведений на рис. 23, де, згідно рівнянь (6.3, 6.4) та умови (6.5), вихідна напруга

$$u_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} \approx RC \frac{du_{\hat{a}\hat{o}}}{dt} = \tau \frac{du_{\hat{a}\hat{o}}}{dt}. \quad (6.6)$$

Якщо на вході діє синусоїдна напруга $u_{\hat{a}\hat{o}} = U_m \sin \omega t$, то умова (6.5) виконується, якщо період вхідного сигналу $T \square 2\pi\tau$. Дійсно, $u_C = iX_C \square u_R = iR$, або $\frac{1}{\omega C} \square R \Rightarrow T \square 2\pi\tau$, а вихідна напруга випереджує по фазі вхідну майже на 90° :

$$u_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} \approx \tau \frac{du_{\hat{a}\hat{o}}}{dt} = \tau \omega U_m \cos \omega t = \tau \omega U_m \sin(\omega t + \pi/2). \quad (6.7)$$

Часові залежності вхідної і вихідної напруг диференціюючого кола наведено на рис.24а, векторну діаграму - на рис.24б.

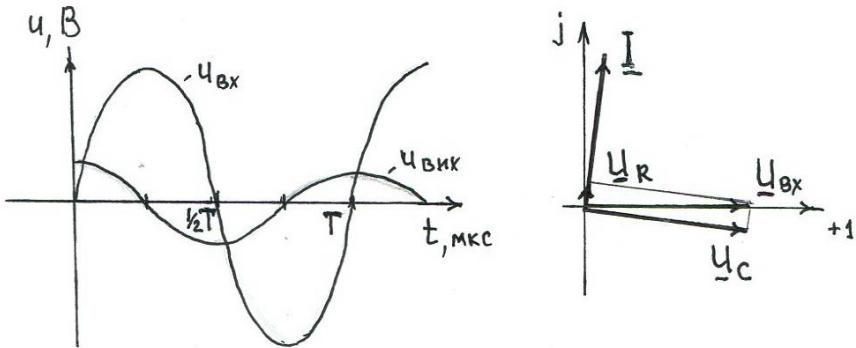


Рис. 24

Враховуючи, що при зменшенні τ зменшується і величина вихідного сигналу, для збільшення $u_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}$ необхідно застосовувати підсилювачі напруги. Якщо вхідна напруга періодична несинусоїдна, тобто містить вищі гармоніки $k\omega_1$, то їх диференціювання із збільшенням номеру гармоніки реалізується менш точно.

Схему інтегруючого кола наведено на рис. 25.

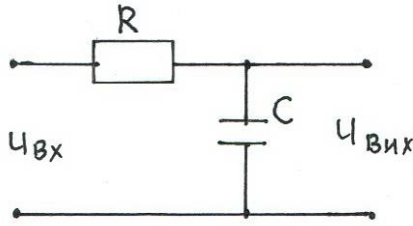


Рис. 25

Вихідною напругою є напруга на конденсаторі, тобто:

$$u_{\text{вих}} = u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{RC} \int u_R dt. \quad (6.8)$$

Якщо тривалість інтегрування набагато менша τ , то конденсатор не встигає накопичити електричний заряд, тому $u_C \approx 0$ а $u_{\text{вих}} \approx u_R$.

В такому випадку вихідна напруга

$$u_{\text{вих}} \approx \frac{1}{\tau} \int u_{\text{вих}} dt + U_0, \quad (6.9)$$

де U_0 початкова напруга на конденсаторі (при нульових початкових умовах $U_0 = 0$).

Враховуючи, що при вищезгаданих умовах $u_{\text{вих}} \rightarrow 0$, для збільшення вихідної напруги потрібно застосовувати підсилювачі.

Інтегрування буде тим точнішим, чим ближче значення напруги на резисторі до вхідної напруги. Якщо на вході діє синусоїдна напруга $u_{\text{вих}} = U_m \sin \omega t$, вимога $u_R \ll u_C$ має вигляд:

$R \ll \frac{1}{\omega C}$, або $\omega RC \ll 1$. Враховуючи, що $\omega = \frac{2\pi}{T}$, а $RC = \tau$ отримаємо $T \ll 2\pi\tau$. При виконанні даного співвідношення між періодом T вхідного сигналу і постійною часу R, C – кола, миттєве значення вихідної напруги:

$$u_{\text{вих}} \approx \frac{1}{\tau} \int u_{\text{вих}} dt = \frac{1}{\tau} \int U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\omega \tau} (-\cos \omega t) = \frac{U_m}{\omega \tau} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Інтегрування періодичних несинусоїдних сигналів можливе, якщо умова інтегрування $T \gg \tau$ виконується для основної гармоніки, оскільки інтегрування вищих гармонік в R, C – колі реалізується більш точно.

Порядок виконання роботи.

1. В якості джерела вхідного сигналу використати низькочастотний генератор синусоїдної напруги (ГНЧ). Встановити напругу генератора $u_{\text{вх}} = u_{\text{до}} = 4 \sin 2\pi 10^5 t$ В.
2. Зібрати схему диференціюючого R, C – кола з конденсатором, ємність якого $C = 1$ нФ, згідно схеми рис.26.

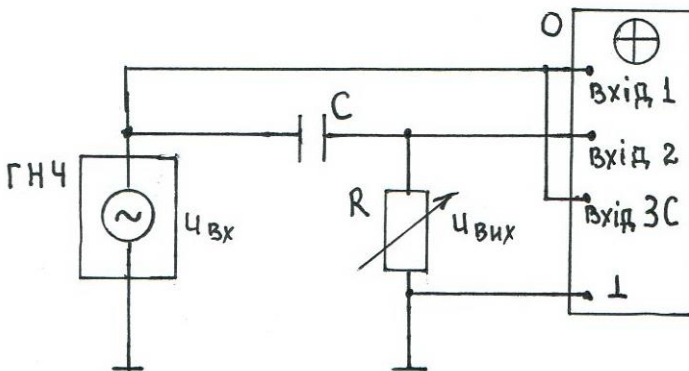


Рис. 26

На схемі ГНЧ – генератор низької частоти, О – двохходовий осцилограф, ЗС – вхід зовнішньої синхронізації, R – магазин опорів.

3. Зарисувати осцилограми вхідної і вихідних напруг при умовах $\tau_1 \leq T/10$ і $\tau_2 \geq 10T$.
4. Зібрати схему інтегруючого кола та зарисувати з екрану осцилографа часові залежності вихідних напруг при умовах, зазначених в п. 3.

5. Записати рівняння вихідних напруг згідно отриманих осцилограм. Визначити діючі значення струмів і напруг, нарисувати векторні діаграми досліджених електричних кіл.
6. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання.

1. При яких значеннях постійної часу R, C - коло є інтегруючим і при яких – диференціюючим?
2. Від яких параметрів залежить точність диференціювання і інтегрування в R, C - колі і рівень вихідного сигналу?
3. Яку схему повинно мати R, L - коло і які співвідношення мають мати місце в ньому, щоб таке коло було диференціюючим? – інтегруючим?
4. Де використовуються диференціюючі і інтегруючі кола?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 Вивчення схем випрямлячів

Мета роботи: : вивчення схем одно- та трифазних випрямлячів.

Постановка задачі, розрахункові співвідношення.

Випрямлячі призначені для перетворення змінної напруги в постійну. Це перетворення здійснюється резистивними нелінійними елементами (НЕ) з односторонньою провідністю, які називаються вентилями. В якості вентилів найчастіше застосовують напівпровідникові діоди, які відносяться до безінерційних НЕ, для яких вольт-амперна характеристика (ВАХ) для миттєвих значень $i(u)$ практично співпадає з ВАХ в колі постійного струму. Умовне позначення діода і його ВАХ представлено на рис.27.

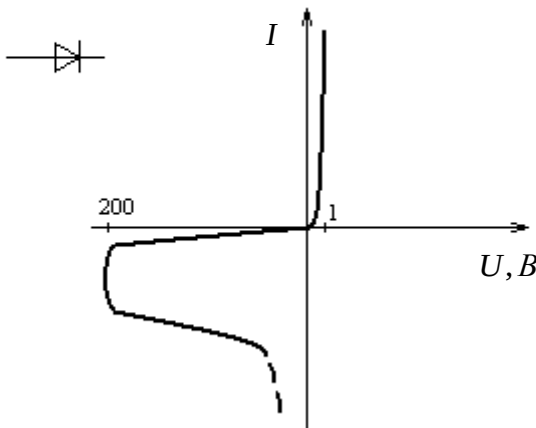


Рис. 27

Випрямлячі є обов'язковою складовою частиною будь-якого блоку живлення, який перетворює змінну напругу в постійну і складається, як правило, із таких структурних

елементів, як трансформатор, випрямляч, електричний фільтр і стабілізатор напруги.

В залежності від числа робочих напівперіодів напруги живлення u розрізняють одно- і двонапівперіодні схеми випрямлення, а в залежності від числа фаз одно- і багатofазні випрямлячі.

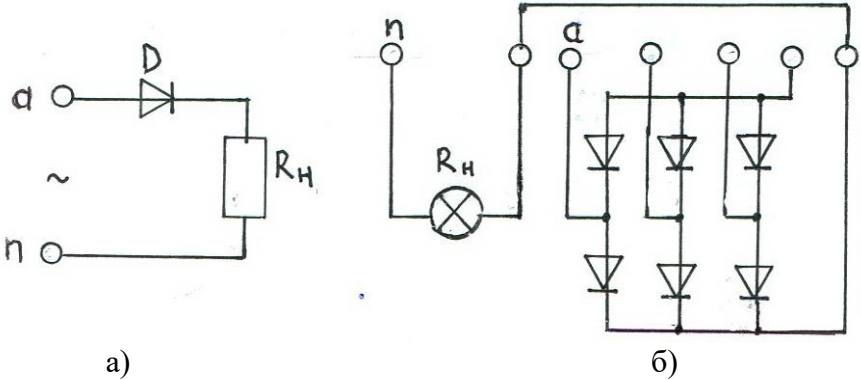


Рис. 28

На рис. 28а наведено схему однонапівперіодного випрямляча. Одна з основних величин, що характеризує випрямляч - середнє значення випрямленого струму I_{cp} (або напруги $U_{cp} = I_{cp} R_i$). Для однонапівперіодного випрямляча

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{I_m}{\pi} \approx 0,318 I_m. \quad (7.1)$$

Пульсації випрямленого струму характеризують коефіцієнтом пульсації $k_i = \frac{I_{1m}}{I_{\text{нв}}}$, де I_{1m} амплітуда першої гармоніки пульсуючого струму, яку знаходять розкладом функції $i(t)$ в ряд Фур'є. Для однонапівперіодного випрямляча $k_n = 1,57$.

Важливе значення мають такі параметри, як максимально допустиме значення зворотної напруги на діоді - $U_{зв\ max}$, середнє за період максимальне значення випрямленого струму

I_{ср.тах}. Перевищення даних параметрів може привести до теплового пробою напівпровідникового діода. Для схеми рис. 28а $U_{3\phi} = U_m$.

На рис. 29а наведено мостову схему двонапівперіодного випрямляча. Для даної схеми $I_{cp} = \frac{2I_m}{\pi} \approx 0,637I_m$, $k_n = 0,66$.

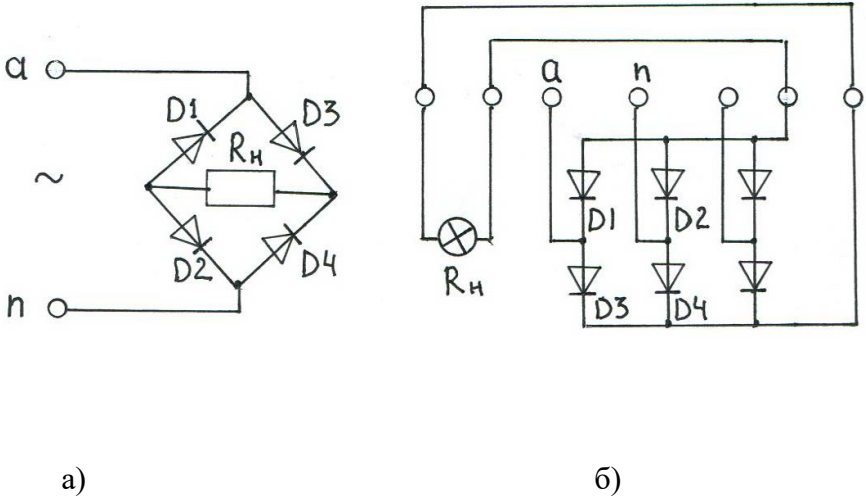


Рис. 29

На рис. 30а наведено схему трифазного випрямляча з нульовою точкою. Кожен діод відкритий в ті інтервали часу, коли додатна напруга на ньому більша, ніж на двох інших. Середнє значення випрямленої напруги:

$$U_{cp} = \frac{3}{T} \int_{T/12}^{5T/12} U_m \sin \omega t dt = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_m \approx 0,826 U_m,$$

коефіцієнт пульсації $k_n = 0,25$, а зворотна напруга рівна лінійній напрузі трифазної мережі $U_{л}$.

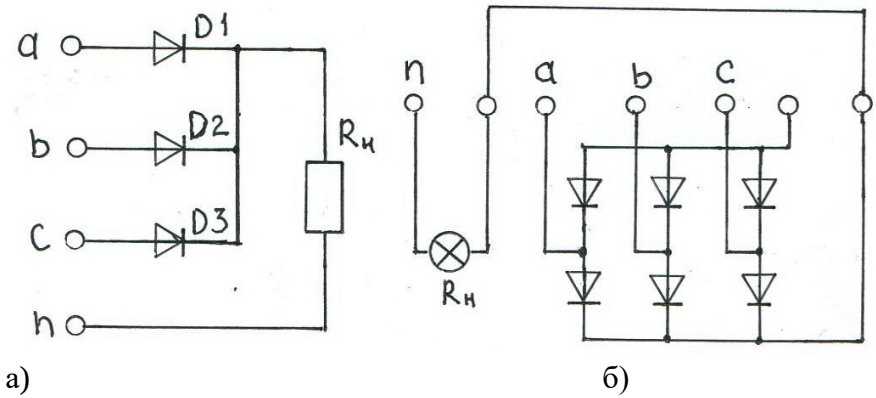


Рис. 30

На рис. 31а наведено мостову схему трифазного випрямляча, в якій діоди попарно включають на лінійну напругу. На відміну від попередньої схеми, нейтральний повід тут не задіяно. Середнє значення випрямленої напруги $U_{cp} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_m = 1,652 U_m$, де U_m – амплітудне значення фазної напруги, а коефіцієнт пульсації $k_n = 0,057$.

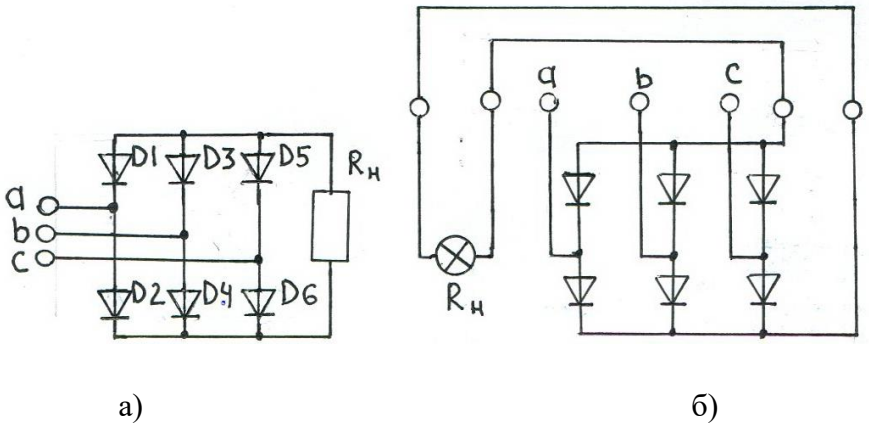


Рис. 31

Порядок виконання роботи.

Роботу виконувати на відповідному лабораторному макеті із комплектом 6 діодів та монтажною схемою їх включення. Живлення схем випрямлячів здійснювати від трифазного трансформатора з амплітудним значення фазної напруги вторинних обмоток ≈ 12 В. Початки фаз і нейтральна точка позначені на схемі загальноприйнятими символами a, b, c, та n.

1. Почергово зібрати випрямлячі, схеми електричні монтажні яких наведено на рис. 28б -31б, зарисувати осцилограми вхідних та вихідних напруг.

2. Визначити із отриманих осцилограм амплітуду та період напруг живлення, розрахувати середні значення та амплітуду першої гармоніки випрямлених напруг. Розрахувати середні значення випрямленого струму для $R_n = 150$ Ом.

3. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання.

1. Випрямні напівпровідникові діоди, їх ВАХ та основні параметри.
2. Стабілітрони. Схема параметричного стабілізатора напруги.
3. Накреслити схеми випрямлячів, показати шлях струму в різні моменти часу .
4. Накреслити структурну схему блоку живлення, пояснити призначення окремих складових.
5. Навести схеми і пояснити принцип дії згладжуючих електричних фільтрів різних типів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

Вивчення однофазного трансформатора

Мета роботи: дослідження режимів роботи однофазного двохобмоточного трансформатора.

Постановка задачі, розрахункові співвідношення

Трансформатор – це статичний електромагнітний апарат, принцип дії якого оснований на явищі електромагнітної індукції, призначений для перетворення напруг змінного струму. Складається з наступних основних частин: магнітопроводу, виготовленого із окремих взаємоізованих пластин електротехнічної сталі і, як мінімум, двох обмоток, між якими немає гальванічного зв'язку.

Особливою різновидністю трансформаторів є автотрансформатори, між обмотками яких наявний не тільки магнітний, але й гальванічний зв'язок.

На рис. 32 наведено схему досліді холостого ходу (ХХ) двохобмоточного трансформатора. В режимі ХХ вторинна обмотка розімкнена, струм $I_{2\text{хх}} = 0$.

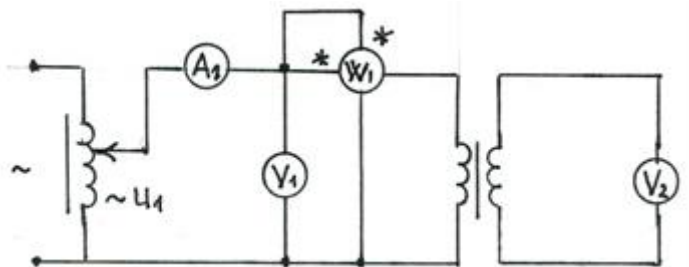


Рис. 32

Підключимо первинну обмотку до синусоїдної напруги живлення u_1 (на схемі рис. 32 u_1 регулюється

автотрансформатором).

Магніторушійна сила струму холостого ходу $F_1 = i_{1xx} w_1$ породжує синусоїдний магнітний потік Φ в магнітопроводі, який пронизує обмотки з числом витків w_1, w_2 . За законом електромагнітної індукції, в обмотках індукуються е.р.с. $e_1 = -w_1 \frac{d\delta}{dt}$ (е.р.с. самоіндукції) та $e_2 = -w_2 \frac{d\delta}{dt}$ (е.р.с. взаємоіндукції), діючі значення яких, згідно

рівняння трансформаторної е.р.с., пропорційні числу витків:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \hat{O}_m, E_2 = 4,44 f w_2 \hat{O}_m. \quad (8.1)$$

Схему заміщення первинної обмотки трансформатора наведено на рис. 33. На схемі R_1 - активний опір обмотки,

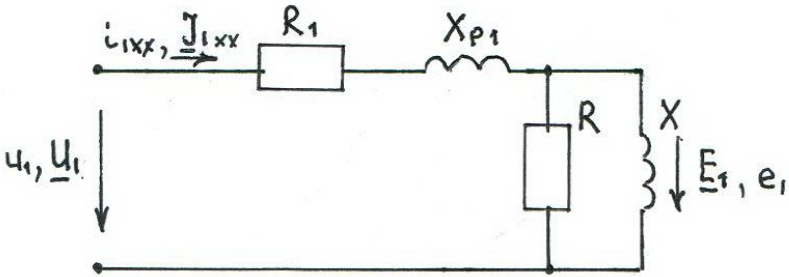


Рис. 33

X_{p1} - індуктивний опір, обумовлений магнітним потоком розсіяння Φ_p , R - опір магнітних втрат (гістерезис і вихрові струми), X - індуктивний опір обмотки. Для даної схеми

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_{1xx} (R_1 + jX_{p1}) \quad (8.2)$$

В режимі холостого ходу $E_1 \approx U_1$ (спад напруги в обмотці незначний, тому, що струм холостого ходу набагато менший номінального), а $E_2 = U_2$.

Дослід холостого ходу застосовують для визначення коефіцієнта трансформації k , яким називають відношення

номінальної вищої напруги трансформатора $U_{\hat{A}}$ до номінальної нижчої $U_{\hat{A}}$:

$$k = U_{\hat{A}} / U_f . \quad (8.3)$$

Враховуючи (8.1), рівності $E_1 \approx U_1$ та $E_2 = U_2$, коефіцієнт трансформації понижуючого трансформатора , для якого $U_1 > U_2$, визначають як відношення:

$$k = w_1 / w_2 = E_1 / E_2 \approx U_1 / U_2 . \quad (8.4)$$

Для підвищуючого трансформатора навпаки: $U_1 < U_2$, а коефіцієнт трансформації

$$k = w_2 / w_1 \approx U_2 / U_1 . \quad (8.5)$$

Окрім коефіцієнта трансформації, із даного дослідження визначають струм ХХ $I_{\text{ХХ}}$, втрати в стальному осерді

$R \approx P_{\text{ХХ}} / I_{\text{ХХ}}^2$, кут магнітних втрат $\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi_{\text{ХХ}}$, де

$\varphi_{\text{ХХ}} = \arccos \frac{P_{\text{ХХ}}}{I_{\text{ХХ}} U_1}$ - зсув по фазі між струмом і напругою первинної обмотки.

Якщо до вторинної обмотки підключити опір навантаження Z_f , то у вторинній обмотці протікає струм I_2 .

Будь-яка зміна струму I_2 викликає зміну струму I_1 так, що магнітний потік в осерді залишається незмінним

($\hat{O}_m = E_1 / 4,44 f w_1$), а рівняння магніторушійних сил має вигляд:

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_{\text{ХХ}} w_1 .$$

Схему дослідження навантаженого трансформатора наведено на рис. 34.

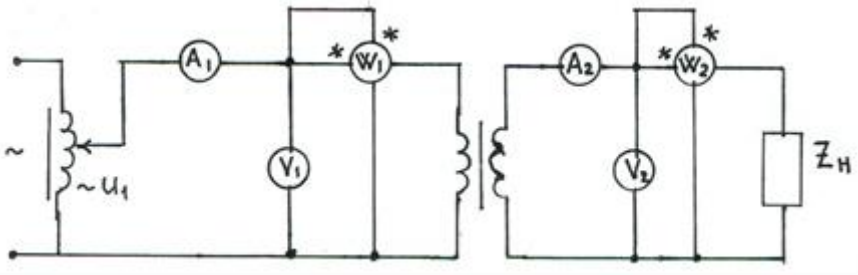


Рис. 34

Схему заміщення, тобто, розрахункову модель даного електричного кола, наведено на рис. 35.

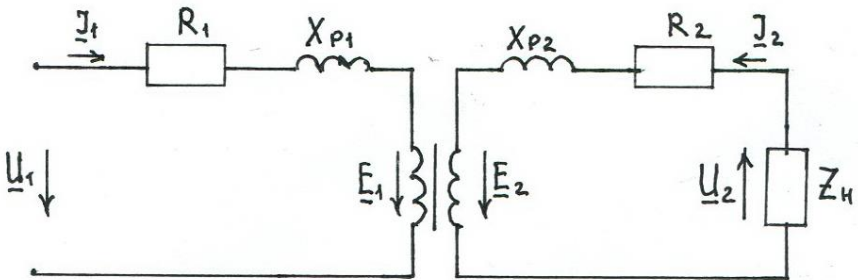


Рис. 35

У відповідності із цією схемою, рівняння другого закону Кірхгофа для первинного і вторинного кола трансформатора:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 (R_1 + jX_{p1}) \quad (8.6)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 (R_2 + jX_{p2}) \quad (8.7)$$

Залежність $\underline{U}_2(I_2)|_{U_1=\text{const}}$ називається зовнішньою характеристикою трансформатора.

В досліді короткого замикання (КЗ) напругу живлення u_1 зменшують до нуля, до вторинної обмотки підключають

амперметр і встановлюють таке значення u_1 , при якому струм первинної обмотки рівний номінальному: $I_{1\hat{e}\zeta} = I_{1\hat{f}\hat{i}}$. При цих умовах магнітні втрати незначні, активна потужність $P_{\hat{e}\zeta}$ витрачається на нагрів обмоток :

$$P_{\hat{e}\zeta} = I_{1\hat{e}\zeta}^2 R_{\hat{e}\zeta} \approx I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2,$$

де $R_{\kappa 3}$ – активний опір спрощеної схеми заміщення дослідів КЗ, наведеної на рис.36. (Зауваження: не плутати дослід КЗ з аварійним режимом КЗ, коли трансформатор може вийти з ладу !)

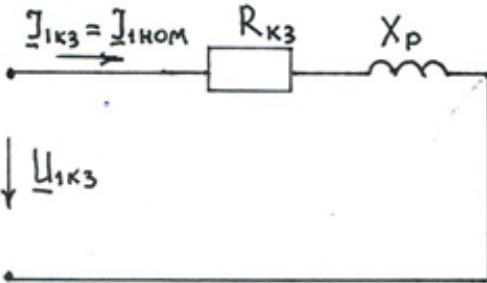


Рис.36

В режимі дослідів КЗ магнітний потік $\hat{O} \rightarrow 0$, в рівнянні магніторушійних сил можна прийняти $I_1 w_1 + I_2 w_2 = 0$, звідки слідує: $I_1 w_1 = I_2 w_2$. Отже, дослід КЗ теж можна використати для визначення коефіцієнту трансформації: $k = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{I_{2\hat{e}\zeta}}{I_{1\hat{e}\zeta}}$.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\hat{n}o} + P_i}, \text{ де } P_1 - \text{споживана потужність, } P_2 -$$

потужність, яку віддає трансформатор, P_{cm} - втрати потужності в сталюму осерді (гістерезис і вихрові струми), P_m - втрати потужності на нагрів обмоток (втрати в міді).

Порядок виконання роботи.

1. Зібрати схему, наведену на рис.32, виконати дослід ХХ при номінальній напрузі живлення первинної обмотки $U_1 = U_{\text{н}} \cdot$
2. Зменшити напругу живлення U_1 до нуля. Підключити до вторинної обмотки амперметр і, плавно збільшуючи U_1 за допомогою автотрансформатора, виконати дослід КЗ при номінальному значенні сили струму первинної обмотки $I_{1\text{н}} = I_{\text{н}} \cdot$
3. Зібрати схему, наведену на рис.34 для активно - індуктивного навантаження $Z_{\text{н}} = R_{\text{н}} + jX_{\text{н}}$, виміряти параметри первинного і вторинного кола.

Результати вимірювань п. 1-3 занести до таблиці.

Таблиця

Дослід	U_1 В	I_1 А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	P_2 , Вт
Холостий хід						
Коротке замикання						
Активно – індуктивне навантаження						

4. Змінюючи індуктивність навантаження, зняти і побудувати зовнішню характеристику трансформатора $U_2(I_2) \Big|_{U_1=\text{const}}$.
5. Виконати завдання п. 3 для активного і ємнісного навантажень.
6. За результатами вимірювань розрахувати параметри трансформатора $k, \delta, R, R_{\text{в}}, X_{\text{в}}, \varphi, \eta$.
7. Побудувати векторні діаграми дослідів ХХ і навантаженого трансформатора.
8. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання.

1. Ідеалізована котушка з магнітопроводом в колі змінного струму (рівняння для магнітного потоку, рівняння трансформаторної є.р.с., схема заміщення, векторна діаграма).
2. Реальна котушка з магнітопроводом в колі змінного струму.
3. Конструкція і принцип дії однофазного трансформатора.
4. Види трансформаторів.
5. Основні рівняння, що характеризують роботу трансформатора.
6. Основні електричні параметри трансформатора і методи їх визначення.
7. Що означають терміни: «втрати в сталі», «втрати в міді»?
8. Пояснити, чому зміна I_2 викликає зміну I_1 .
9. Пояснити, чому зміна I_2 викликає зміну U_2 .

ЛІТЕРАТУРА

1. Коруд В.І., Гамола О.Є., Малинівський С.М. Електротехніка. - Львів: "Магнолія плюс", 2005. - 447 с.
2. Волинский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. – М.:Энергоатомиздат, 1987, 525 с.
3. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника.- М.: ВШ, 2000, 542 с.

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	3
1. Дослідження кола постійного струму.....	4
2. Вимірювання параметрів елементів електричного кола.....	8
3. Електричне коло змінного струму.....	12
4. Трифазні електричні кола	18
5. Перехідні процеси в електричних колах	25
6. Диференціюючі і інтегруючі кола.....	32
7. Вивчення схем випрямлячів	38
8. Вивчення однофазного трансформатора	43
Література.....	49