



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕДУВАННЯ
імені адмірала Макарова**

Кафедра теоретичної
електротехніки та
електронних систем

ІНДИВІДУАЛЬНИЙ КОМПЛЕКТ
навчально-методичних матеріалів
з дисципліни: *Електротехніка та основи електроніки*

Студента групи _____
Спеціальність _____

Викладач: доц. Жук О.К.

Рекомендовано методичною радою ІЗДО як методичні вказівки

Миколаїв, 2008

Жук О.К. Індивідуальний комплект навчально-методичних матеріалів з дисципліни “Електротехніка та основи електроніки”: Методичні вказівки. – Миколаїв; ІЗДО НУК. 2008: – 94 с.

Кафедра теоретичної електротехніки та електронних систем

Наведені скорочена програма курсу і конспективний виклад її основних розділів: електричні кола постійного струму, однофазні кола синусоїдального струму, трифазні кола синусоїдального струму, електричні вимірювання й прилади, електричні трансформатори, електричні машини, основи промислової електроніки, електробезпечність. Методичні вказівки містять також вихідні дані до контрольних завдань та приклади їх виконання, список літератури.

Рекомендовано для використання студентами-заочниками не електротехнічних спеціальностей НУК ім. адмірала Макарова.

© Жук О.К.
© ТОВ “УНІВЕРСИТЕТ – НКІ”

Програма курсу “Електротехніка та основи електроніки”

1. Основні поняття й визначення.
 - 1.1 Загальні відомості.
 - 1.2 Резистивні елементи.
 - 1.3 Індуктивний і ємнісний елементи.
 - 1.4 Джерела постійної напруги (ДПН).
2. Електричні кола постійного струму.
 - 2.1 Загальні відомості.
 - 2.2 Закони Кірхгофа
 - 2.2.1 Перший закон Кірхгофа.
 - 2.2.2 Другий закон Кірхгофа.
 - 2.3 Розподіл потенціалу уздовж електричного кола.
 - 2.4 Послідовне й паралельне з'єднання резистивних елементів.
 - 2.4.1 Послідовне з'єднання.
 - 2.4.2 Паралельне з'єднання.
 - 2.5 З'єднання резисторів трикутником і зіркою.
 - 2.6 Електрична енергія й потужність.
 - 2.7 Номінальні величини джерел і приймачів. Режими роботи електричних кіл.
3. Лінійні однофазні електричні кола синусоїдального струму.
 - 3.1 Основні величини, що характеризують синусоїдальні струм, напруга й ЕРС.
 - 3.1.1 Миттєве значення.
 - 3.1.2 Діюче й середнє значення синусоїдальних струмів і напруг.
 - 3.1.3 Зображення синусоїдальних струмів, напруг і ЕРС комплексними числами й векторами.
 - 3.2 Елементи електричних кіл синусоїдального струму.
 - 3.2.1 Резистивний елемент (РЕ).
 - 3.2.2 Індуктивний елемент.
 - 3.2.3 Ємнісний елемент.
 - 3.3 Розрахунок розгалуженого електричного кола синусоїдального струму.
 - 3.4 Потужність у лінійних колах синусоїдального струму.
4. Трифазні лінійні електричні кола синусоїдального струму.
 - 4.1 Трифазне джерело електричної енергії.
 - 4.2 Аналіз електричних кіл при з'єднанні трифазного джерела й приймача за схемою «зірка» з нульовим проводом.
 - 4.3 З'єднання приймача за схемою «трикутник».
 - 4.4 Потужність трифазного кола.
 - 4.4.1 Трифазне електричне коло із симетричним приймачем.
5. Електричні вимірювання й прилади.
 - 5.1 Системи електричних вимірювальних приладів.
 - 5.2 Основні характеристики електричних вимірювальних приладів.
 - 5.2.1 Статична характеристика.
 - 5.2.2 Похибка.
 - 5.2.3 Клас точності.
 - 5.2.4 Варіація.
 - 5.2.5 Ціна поділки.
 - 5.2.6 Границя вимірювання.
 - 5.2.7 Чутливість.
 - 5.3 Вимірювання струму, напруги й потужності.
 - 5.3.1 Вимірювання струму.

- 5.3.2 Вимірювання напруги.
 - 5.3.3 Вимірювання потужності електричного струму.
 - 6. Електричні трансформатори.
 - 6.1 Загальні відомості.
 - 6.2 Принцип дії електричного трансформатора.
 - 6.3 Робота електричного трансформатора в режимі холостого ходу.
 - 6.4 Дослід короткого замикання.
 - 6.5 Потужність втрат у трансформаторі.
 - 6.6 Автотрансформатори.
 - 7. Електричні машини.
 - 7.1 Загальні відомості.
 - 7.2 Обертове магнітне поле.
 - 7.3 Асинхронні машини.
 - 7.3.1 Принцип дії асинхронного двигуна (АД).
 - 7.3.2 Будова асинхронного двигуна.
 - 7.3.3 Характеристики асинхронного двигуна.
 - 7.4 Машини постійного струму.
 - 7.4.1 Загальні поняття про будову машин постійного струму й принцип їхньої дії.
 - 7.4.2 ЕРС обмотки якоря й електромагнітний момент.
 - 7.4.3 Електричні двигуни постійного струму.
 - 7.4.4 Способи регулювання швидкості двигуна постійного струму.
 - 7.4.5 Пуск електродвигунів постійного струму.
 - 8. Основи промислової електроніки.
 - 8.1 Загальні відомості.
 - 8.2 Напівпровідникові діоди.
 - 8.3 Випрямлячі на напівпровідникових діодах.
 - 8.4 Транзистори.
 - 8.4.1 Загальні відомості.
 - 8.4.2 Підсилювач на транзисторах.
 - 9. Електробезпе́чність.
 - 9.1 Загальні відомості.
 - 9.2 Захисне заземлення.
 - 9.3 Занулення.
 - 9.4 Конструкція заземлювача.
- Контрольні завдання⁶⁹.
- Вступ.
- Вказівки по виконанню контрольних робіт.
- К.1. Електричні кола постійного струму.
 - К.2. Електричні кола змінного струму. Однофазні кола.
 - К.3. Трифазні електричні кола.
 - К.4. Асинхронний двигун.
 - К.5. Підсилювачі на біполярних транзисторах.
- Додатки.
- Література.

1. Основні поняття й визначення

1.1 Загальні відомості

Електротехніка – наука про практичне застосування електричних та магнітних явищ.

Механізація й автоматизація технологічних процесів багато в чому залежить від рівня електрифікації цих процесів.

У процесі роботи на технологічному устаткуванні проводять не тільки основні, але й допоміжні операції. Залежно від співвідношення цих операцій, а також участі людини в їхньому виконанні розрізняють устаткування неавтоматичної, напівавтоматичної й автоматичної дії. У неавтоматичному (простому) устаткуванні допоміжні й частина основних операцій виконують вручну. В автоматах всі основні й допоміжні операції виконуються устаткуванням без участі людини.

Для роботи будь-якого електротехнічного пристрою необхідно, щоб через нього проходив електричний струм, обов'язковою умовою існування якого є наявність замкнутого контуру - електричного кола.

Основними елементами електричного кола є джерела й приймачі електричної енергії. Крім цих елементів, електричне коло містить вимірювальні прилади, комутаційну апаратуру, сполучні лінії, проведення.

У джерелах електричної енергії різні види енергії перетворюються в електричну.

Так, у генераторах електростанцій в електричну енергію перетворюється енергія механічна, у гальванічних елементах і акумуляторах - хімічна, у сонячних батареях - світлова й т.д.

У приймачах електрична енергія джерел перетворюється в теплову (нагрівальні елементи), світлову (електричні лампи), хімічну (електролізні ванни) і т.д.

Для теоретичного аналізу якого-небудь електричного кола її зображують схемою - графічним зображенням електричного кола за допомогою умовних позначок.

Приймачі електричної енергії по характеру фізичних процесів, що протікають у них, діляться на три основних види: резистивні; індуктивні; ємнісні.

1.2 Резистивні елементи

У резистивних елементах (резисторах) електрична енергія *необоротно* перетворюється в інші види енергії. Приклади резистивних елементів - лампи накаливання (електрична енергія необоротно перетворюється у світлову й теплову енергії), нагрівальні елементи (електрична енергія необоротно перетворюється в теплову), електродвигуни (електрична енергія необоротно перетворюється в механічну й теплову енергії) і ін.

Основною характеристикою резистивного елемента є його вольт-амперна характеристика (ВАХ).

$$U = f(I) \quad (1.1)$$

де U - напруга, В;

I - сила струму, А.

Якщо ця залежність лінійна, то резистивний елемент називається лінійним і вираз (1.1) має вигляд, відомий як закон Ома:

$$U = RI \quad (1.2)$$

де R - опір резистора, Ом.

Однак у багатьох випадках ВАХ резисторів є нелінійною. Для багатьох резисторів (нагрівальні спіралі, реостати й ін.) нелінійність ВАХ пояснюється тим, що ці елементи - металеві провідники й електричний струм у них - є струмом провідності (спрямований рух - "дрейф" вільних електронів).

Дрейфу електронів перешкоджають (чинять опір) атоми, що коливаються і амплітуда коливань яких визначається температурою провідника (температура - *міра кінетичної енергії атомів*).

При протіканні струму, вільні електрони зіштовхуються з атомами й ще більше розгойдують їх. Отже, температура провідника зростає, від чого збільшується і його опір R . Таким чином, опір R залежить від струму $R = f(I)$ і ВАХ нелінійна (рис. 1.1).

При зміні температури в невеликих межах опір провідника виражається формулою

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)], \quad (1.3)$$

де R_0, R - опори провідників при температурі T_0, T , Ом;

T_0 - початкова температура провідника, К;

T - кінцева температура провідника, К;

α - температурний коефіцієнт опору.

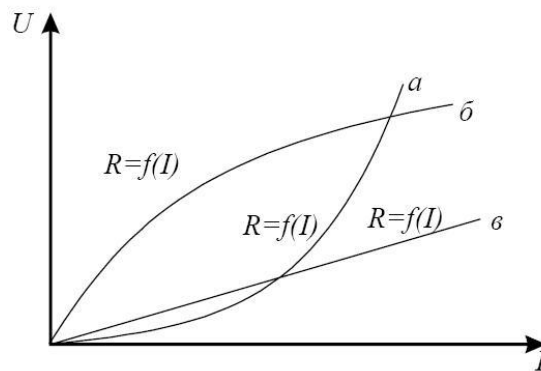


Рис. 1.1. Загальний вигляд ВАХ металевих (а), напівпровідникового (б), і константанового (в) резистивних елементів.

У більшості чистих металів $\alpha > 0$, що означає, що з підвищенням температури опір металів збільшується.

В електролітах, виробках із графіту й напівпровідниках $\alpha < 0$ (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

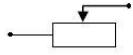
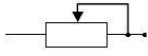
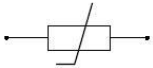
Питомий опір і температурний коефіцієнт опору деяких матеріалів

Найменування матеріалу	Питомий опір при 20 °С, мкОм/м	Температурний коефіцієнт опору, 1/°К
Мідь	0,0172-0,0182	0,0041
Алюміній	0,0295	0,0040
Сталь	0,125-0,146	0,0057
Вольфрам	0,0508	0,0048
Вугілля	10-60	-0,005
Манганін (Cu-80 %, Mn-12%, Ni-3 %)	0,4-0,52	$3 \cdot 10^{-5}$
Константан	0,44	$5 \cdot 10^{-5}$
Ніхром (Cr-20 %, Ni-80 %)	1,02-1,12	0,0001
Напівпровідники (Si, Ge)	1,0-14	-(0,2-0,8)

У таблиці 1.2 наведені умовні графічні позначення резистивних елементів.

Таблиця 1.2

Умовні позначення резисторів

Найменування	Позначення
Резистор постійний (лінійна ВАХ)	
Резистор змінний:	
загальне позначення	
с розривом кола	
без розриву кола	
Резистор нелінійний (нелінійна ВАХ)	

Для характеристики провідних властивостей різних матеріалів існує поняття *об'ємного питомого електричного опору*. Об'ємний питомий електричний опір ρ_V даного матеріалу дорівнює опору між гранями куба з ребром 1 м відповідно до формули:

$$\rho_V = \frac{RS}{l} \quad (1.4)$$

де S – площа поперечного перерізу провідника, м^2 ;

l – довжина провідника, м.

1.3. Індуктивний і ємнісний елементи

Ці елементи мають принципову відмінність від резистивних елементів у тім, що в них не відбувається необоротного перетворення електричної енергії в інші види енергії.

Тому, коли зіставляють елементи за своїм характером, ті резистивні елементи називають *активними*, а індуктивний і ємнісний елементи *реактивними*.

Класичним прикладом індуктивного елемента є котушка, намотана провідником на магнітопровід (сердечник). Прикладами ємнісного елемента є конденсатори плоскі, циліндричні, сферичні й т.д.

Напруга u_L на ідеальному індуктивному елементі пов'язана зі струмом i_L у цьому елементі формулою:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad (1.5)$$

де L - індуктивність елемента, Гн.

Для ідеального ємнісного елемента струм i_C і напруга u_C зв'язані ідентичною формулою:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (1.6)$$

де C - ємність елемента, Ф.

З (1.5) і (1.6) випливають висновки:

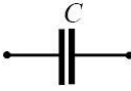
- при постійному струмі ($i_L = const$) напруга $u_L = 0$, внаслідок чого й опір індуктивного елемента на постійному струмі дорівнює нулю;
- при постійній напрузі ($u_C = const$) струм $i_C = 0$, внаслідок чого опір ємнісного елемента на постійному струмі дорівнює нескінченності.

Таким чином, індуктивний елемент пропускає постійний струм *без опору*, а ємнісний елемент *не пропускає* постійний струм.

Конденсатори можна розглядати як *ідеальні ємнісні елементи*. Однак, котушки індуктивності часто мають значний резистивний опір, і тому не можуть розглядатися в якості ідеальних індуктивних елементів.

Умовні позначення в схемах електричних кіл:

ідеального індуктивного елемента: 

ідеального ємнісного елемента: 

1.4 Джерела постійної напруги

Джерело постійної напруги (ДПН) характеризується наступними основними параметрами:

- електрорушійною силою (ЕРС) E ;
- внутрішнім опором R_0 ;
- напругою U на затискачах (полюсах) джерела.

Схема ДПН із підключеним до нього приймачем R зображена на рис. 1.2,а.

Основною характеристикою ДПН є його ВАХ (зовнішня характеристика) - залежність напруги U на його затискачах від струму I джерела (пряма 1 на рис. 1.2,б).

$$U = E - R_0 I \quad (1.7)$$

Зменшення напруги U джерела при збільшенні струму пояснюється збільшенням спадання напруги на внутрішньому опорі R_0 джерела - доданок $R_0 I$ в (1.7).

Пряма 2 відповідає ВАХ ідеального ДПН, у якого $R_0 = 0$.

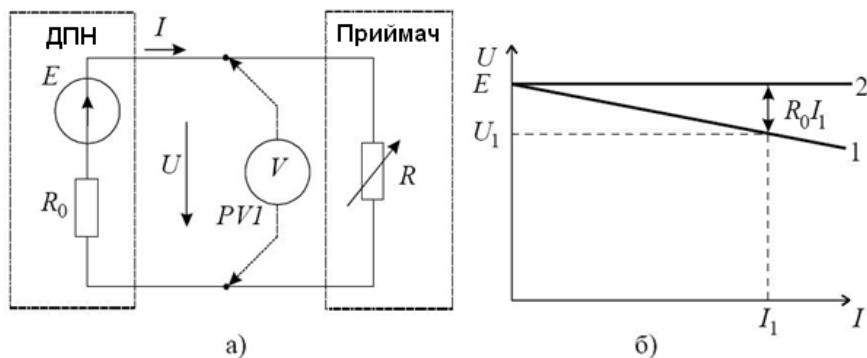


Рис. 1.2. Схема найпростішого електричного кола (а) і ВАХ ДПН (б)

Аналіз (1.7) дозволяє зробити висновки:

- при струмі джерела $I = 0$ (холостий хід джерела) напруга джерела дорівнює його ЕРС: $U = E_{I=0}$;
- ЕРС джерела - це його напруга в режимі холостого ходу;

- по відомій ВАХ джерела (рис. 1.2,б) можна визначити його внутрішній опір по формулі:

$$R_0 = \frac{E - U_1}{I_1}, \quad (1.8)$$

ЕРС джерела (рис. 1.2,а) можна виміряти в режимі холостого ходу вольтметром РV1 з відносно більшим внутрішнім опором R_V , тому що при ($R_V \gg R_0$) з (1.7) маємо:

$$E = U_V + R_0 I = I R_V + R_0 I \approx U_V, \quad (1.9)$$

2 Електричні кола постійного струму

2.1 Загальні відомості

Електротехнічні пристрої, установки й системи постійного струму мають велике практичне застосування на транспорті (двигуни піднімальних механізмів, трамваїв, тролейбусів, електровозів, електрокар), при електрохімічному одержанні металів (електролізні ванни), у космічній техніці, у радіоелектроніці, комп'ютерній техніці і т.п.

Застосування високовольтних ліній електропередач (ЛЕП) постійного струму великої довжини економічно виявляється більш доцільно, ніж ЛЕП змінного струму.

Перші кроки електротехніки були пов'язані з освоєнням енергії постійного струму, що вироблялася гальванічними елементами.

У цей час основними джерелами постійного струму (ДПС) є випрямні перетворювачі (випрямлячі), хімічні акумулятори, електромашинні генератори постійного струму.

Розвиваються й удосконалюються нові види ДПС:

- джерела, що перетворюють променисту енергію Сонця за допомогою фотоелементів, що є основними джерелами електричної енергії космічних апаратів;
- Магнітогідродинамічні генератори (МГД-генератори);
- є повідомлення про створення в США електрохімічних ДПС для електромобілів, у яких електрична енергія утворюється в результаті реакції кисню атмосферного повітря з бензиновим паливом.

В електротехніці вирішуються два завдання:

- синтез електротехнічних пристроїв;
- аналіз цих пристроїв.

Завдання синтезу вирішується при створенні нових пристроїв конструкторами. Це - найбільш складне завдання. Аналіз роботи електроприладів найчастіше необхідно проводити вже при їхній експлуатації, тому існують типові завдання аналізу.

Як правило, завдання аналізу полягає у визначенні струмів і напруг на всіх ділянках електричного кола. При цьому конфігурація кола й параметри її елементів (ВАХ джерел і споживачів енергії, електричні опори струмопроводів і ін.) вважаються відомими.

При аналізі (розрахунку режиму роботи) електричного кола необхідно це коло представити й зобразити графічно схемою, у якій елементи електричного кола представлені у вигляді з'єднань ідеалізованих елементів - резистивного R , індуктивного L , і ємнісного C , а джерела електричної енергії представляються як послідовне з'єднання ЕРС і внутрішніх опорів цих джерел.

Однак, при аналізі електричних кіл постійного струму, пасивними елементами схем є тільки резистивні елементи, тому що опори індуктивних елементів ($X_L = \omega L$) постійному струму рівні нулю, а опори ємнісних елементів ($X_C = 1/(\omega C)$) при цьому рівні нескінченності, так що ємнісні елементи розривають електричні кола постійного струму.

2.2 Закони Кірхгофа

Закони Кірхгофа лежать в основі аналізу електричних кіл.

2.2.1 Перший закон Кірхгофа.

Алгебраїчна сума струмів у вузлі електричного кола дорівнює нулю. Математично це записується так:

$$\sum I = 0. \quad (2.1)$$

Всім струмам, спрямованим *від вузла*, у рівнянні (2.1) приписується однаковий знак, наприклад, *позитивний*, тоді всі струми, спрямовані *до вузла*, увійдуть у рівняння з *негативним* знаком.

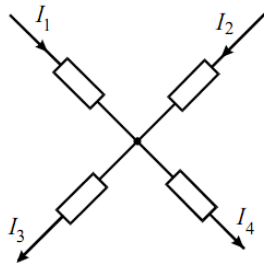


Рис. 2.1. Ілюстрація до першого закону Кірхгофа

На рис. 2.1 показаний вузол, у якому сходяться чотири вітки. Рівняння (2.1) у цьому випадку приймає вид:

$$-I_1 - I_2 + I_3 + I_4 = 0.$$

Перший закон Кірхгофа відображає той факт, що у вузлі електричний заряд не накопичується й не витрачається. Сума електричних зарядів, що приходять до вузла, дорівнює сумі зарядів, що йдуть від вузла за той самий проміжок часу.

2.2.2 Другий закон Кірхгофа.

Алгебраїчна сума ЕРС у будь-якому контурі кола дорівнює алгебраїчній сумі напруг на елементах цього контуру:

$$\sum E = \sum U. \quad (2.2)$$

Якщо в розглянутому контурі відсутні ЕРС, то рівняння (2.2) приймає вид:

$$\sum U = 0. \quad (2.3)$$

Обхід контуру відбувається в довільно обраному напрямку. При цьому ЕРС і напруги, що збігаються з напрямком обходу, беруться з однаковими знаками, наприклад, зі знаками «+».

Наприклад, для схеми (рис. 2.2) маємо:

$$E_1 - E_2 = U_1 + U_2 + U_3 - U_4$$

Другий закон Кірхгофа можна застосовувати й для контурів, які складаються не тільки з ділянок схеми, але й з напруг між якими-небудь крапками схеми.

Так для контуру 4-5-3-6-4, що складає з ділянки кола 4-5-3 і напруги 4-6-3, можна скласти рівняння:

$$E_2 = -I_3 R_3 - U_{43}$$

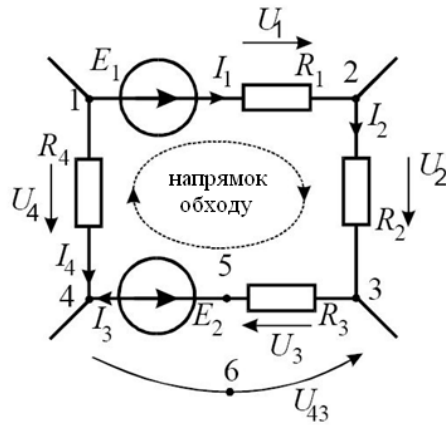


Рис. 2.2. Ілюстрація до другого закону Кірхгофа

2.3 Розподіл потенціалу уздовж електричного кола

Розглянемо нерозгалужене електричне коло постійного струму (ЕКПС), що містить резистори з опором R і джерелами ЕРС E (рис. 2.3).

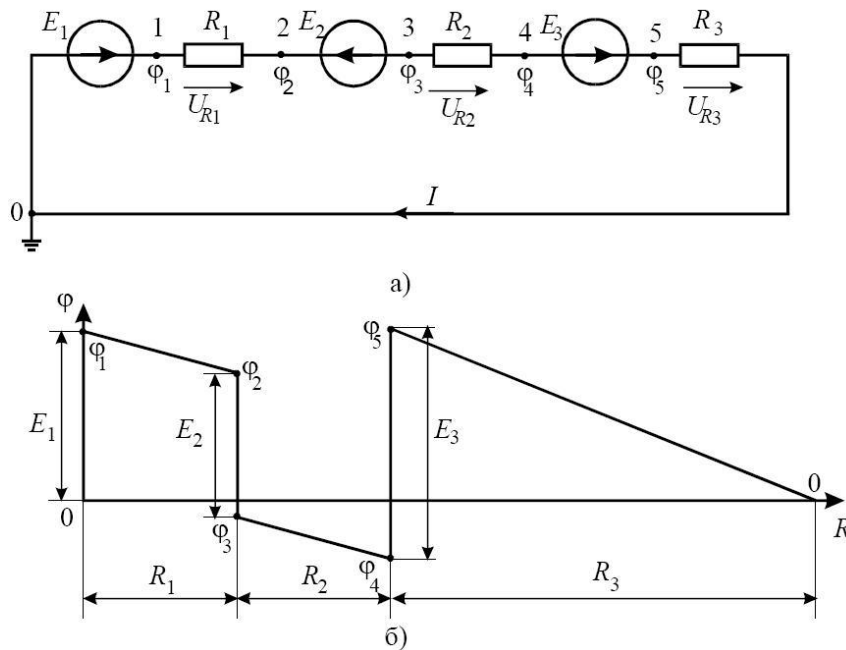


Рис. 2.3. Схема ЕКПС (а) і графік зміни потенціалу (б) уздовж цього кола (контуру).

Приймемо потенціал однієї із точок ЕКПС рівним нулю $\varphi_0 = 0$. Тоді зможемо знайти потенціали інших крапок схеми при відомих значеннях сили струму I , ЕРС E_1, E_2, E_3 і опорів R_1, R_2, R_3 :

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi_0 + E_1 \\ \varphi_2 &= \varphi_1 - IR_1 \\ \varphi_3 &= \varphi_2 + E_2 \\ \varphi_4 &= \varphi_3 - IR_2 \\ \varphi_5 &= \varphi_4 + E_3 \\ \varphi_0 &= \varphi_5 - IR_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Графік зміни потенціалу відповідно до формул (2.4) представлений на рис. 2.3, б. Цей графік служить графічною ілюстрацією другого закону Кірхгофа.

2.4 Послідовне й паралельне з'єднання резистивних елементів

2.4.1 Послідовне з'єднання.

Розглянемо коло з послідовним з'єднанням резисторів з відповідними опороми R_1, R_2 (рис. 2.4)

Струм I , що протікає по цих резисторах той самий. Напруги U_1 і U_2 на кожному з резисторів різні.

На підставі другого закону Кірхгофа можна записати:

$$U = U_1 + U_2 \quad (2.5)$$

де U – напруга джерела ЕРС, прикладене до обох резисторів, В.

Застосовуючи закон Ома, перепишемо рівняння (2.5)

$$\begin{aligned} U &= IR_1 + IR_2; \\ U &= I(R_1 + R_2) = IR_{12}; \end{aligned} \quad (2.6)$$

де R_{12} - загальний (еквівалентний) опір всього кола відносно затискачів 1 і 2, Ом.

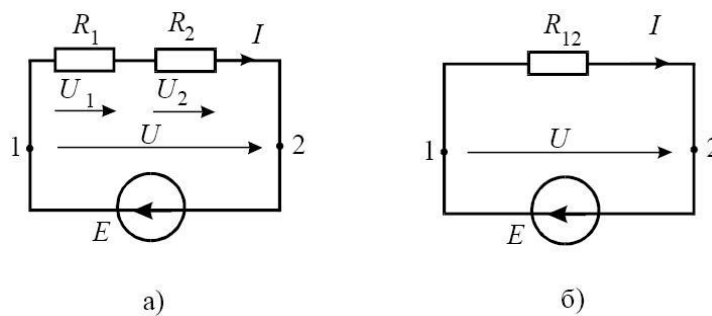


Рис. 2.4. Схема ЕК із послідовним з'єднанням резисторів (а) і спрощена схема цього кола з еквівалентним опором (б)

Отримані результати можна поширити на n послідовно з'єднаних резисторів:

$$R_{1,2,\dots,n} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (2.7)$$

Опір кола, що складається з декількох послідовно з'єднаних резистивних елементів, дорівнює сумі їхніх опорів.

2.4.2 Паралельне з'єднання

При паралельному з'єднанні елементів (рис. 2.5,а) до них прикладена та сама напруга.

На підставі першого закону Кірхгофа можна записати

$$I = I_1 + I_2$$

або

$$\frac{U}{R_{12}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.8)$$

звідки

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

де R_{12} - загальний еквівалентний опір кола, Ом.

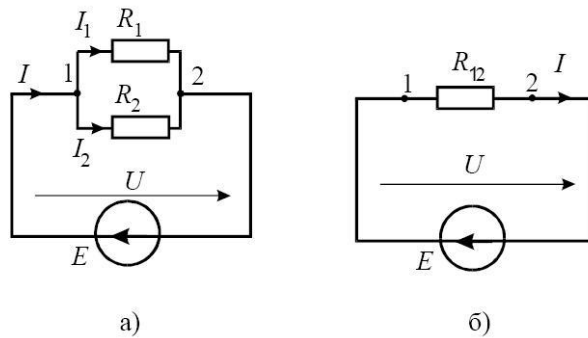


Рис. 2.5. Схема ЕК із паралельним з'єднанням резисторів (а) і спрощена схема цього кола з еквівалентним опором (б)

Вираз (2.8) можна поширити на випадок n паралельно з'єднаних резистивних елементів. Тоді

$$\frac{1}{R_{1,2,\dots,n}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}, \quad (2.9)$$

Якщо замість опорів резисторів увести поняття *електричної провідності*, рівної $G_1 = \frac{1}{R_1}$, $G_2 = \frac{1}{R_2}$ і т.д., одержимо:

$$G_{1,2,\dots,n} = G_1 + G_2 + \dots + G_n, \quad (2.10)$$

Загальна еквівалентна провідність $G_{1,2,\dots,n}$ електричного кола, що складається з n паралельно з'єднаних резистивних елементів, дорівнює сумі їх провідностей $G_1 + G_2 + \dots + G_n$

Паралельне включення - основний спосіб включення в ЕК різних приймачів (споживачів) електричної енергії.

Коло, що живить струмом який-небудь населений пункт, являє собою систему паралельно з'єднаних приймачів електричної енергії. Основна лінія розпадається на паралельні лінії, що йдуть до окремих районах населеного пункту. Ці районні лінії у свою чергу розгалужуються на більше дрібні, обслуговуючі окремі вулиці, будинки, підприємства. Але

й ці лінії розгалужуються на більше дрібні ділянки, поки, нарешті, в окремі кінцеві ділянки не виявляться включеними безпосередньо приймачі електричної енергії: електродвигуни в цехах заводів, лампи в будинках і т.д. На рис. 2.6 зображена така кінцева ділянка електричного кола, у якій паралельно включені лампи накаливання 1, нагрівальні прилади 2, електродвигун 3 і акумулятор 4, поставлений на зарядку.

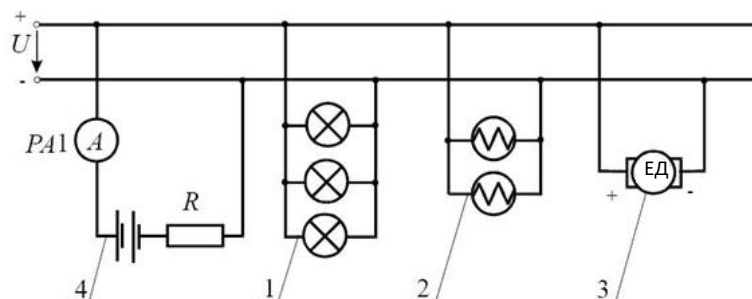


Рис. 2.6. Схема ЕК із паралельно включеними приймачами електричної енергії

- 1 - лампи накаливання,
- 2 - нагрівальні прилади,
- 3 - електродвигун,
- 4 - акумулятор.

2.5 З'єднання резисторів трикутником і зіркою

Під з'єднанням резисторів трикутником, (рис. 2.7, а) розуміють таке з'єднання, при якому кінець (x) одного з резисторів з'єднується з початком (b) другого, кінець (y) другого – з початком (c) третього, кінець (z) третього з початком (a) першого, а отримані точки (вузли) a, b, c підключаються до іншої частини кола.

Для спрощення аналізу й розрахунку деяких електричних кіл, що містять з'єднання резисторів трикутником, доцільно замінити ці резистори еквівалентними резисторами R_a, R_b, R_c , з'єднаними зіркою (рис. 2.7, б).

Заміна трикутника резисторів еквівалентною зіркою повинна бути зроблена таким чином, щоб після її струми I_a, I_b, I_c і напруги U_{ab}, U_{bc}, U_{ac} у неперетвореній частині електричного кола залишилися без зміни.

Значення опорів R_a, R_b, R_c еквівалентної зірки перебувають по формулах

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ac}}{\sum R}; R_b = \frac{R_{ab}R_{bc}}{\sum R}; R_c = \frac{R_{ac}R_{bc}}{\sum R},$$

$$\text{де } \sum R = R_{ab} + R_{bc} + R_{ac}.$$

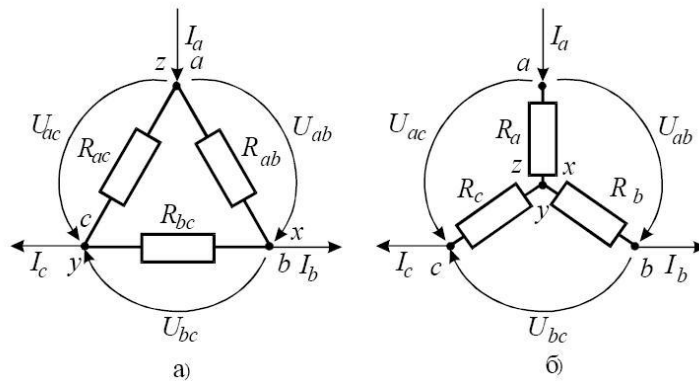


Рис. 2.7. Схеми з'єднань резисторів трикутником (а) і зіркою (б)

Іноді може виникнути зворотне завдання - перетворення зірки резисторів у трикутник резисторів. У цьому випадку використовують формули:

$$\begin{aligned} R_{ab} &= R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c}; \\ R_{bc} &= R_b + R_c + \frac{R_b \cdot R_c}{R_a}; \\ R_{ac} &= R_a + R_c + \frac{R_a \cdot R_c}{R_b}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.6 Електрична енергія й потужність

У будь-якому електричному колі електрична енергія (а також потужність) вироблювана джерелами, дорівнює енергії (потужності), споживаної приймачами.

Відповідно до закону Джоуля-Ленца енергія, споживана резистивним елементом (резистором) з опором R , визначається по формулах:

$$\begin{aligned} W &= I^2 R t \\ W &= \frac{U^2}{R} t; \\ W &= U I t \end{aligned} \quad (2.13)$$

В електричному колі постійного струму потужність P дорівнює відношенню енергії W до проміжку часу t , протягом якого енергія була вироблена джерелом або перетворена приймачем електричної енергії.

$$P = \frac{W}{t} \quad (2.14)$$

Потужність чисельно дорівнює енергії W , якщо проміжок часу t дорівнює одиниці.

З (2.13) і (2.14) одержуємо вираз для розрахунку потужності резистивного приймача:

$$\begin{aligned} P_{np} &= I^2 R = \frac{I^2}{G}; \\ P_{np} &= \frac{U^2}{R} = U^2 G; \\ P_{np} &= UI. \end{aligned}$$

Якщо напрямок ЕРС і струму через джерело збігаються, то потужність, вироблювана джерелом з ЕРС E дорівнює:

$$P_u = EI$$

У протилежному випадку потужність джерела негативна

$$P_u = -EI \quad (2.15)$$

та її відносять до потужності приймача.

Для будь-якого електричного кола можна записати рівняння балансу потужностей

$$P_u = P_n,$$

або

$$\sum E_i I_i = \sum I_i^2 R_i, \quad (2.16)$$

У лівій частині рівняння (2.16) перебувають потужності, що вироблюються всіма джерелами електричної енергії, у правій - потужності, перетворені (споживані) всіма приймачами електричної енергії.

Основними одиницями електричної енергії (ЕЕ) і потужності є 1 джоуль (1 Дж=1 ВАс) і 1 ват (1 Вт=1 Дж/с=1 ВА). Для потужності й енергії промислових установок часто використовуються більші одиниці: 1 кіловат (1 кВт= 10^3 Вт), 1 мегават (1 МВт= 10^6 Вт), 1 кіловат-година (1 кВтг= $3,6 \cdot 10^6$ Втс).

2.7 Номінальні величини джерел і приймачів.

Режими роботи електричних кіл

Кожний приймач електричної енергії характеризується номінальними величинами, які приводяться в довідковій літературі, на щитку, прикріпленому до корпусу й ін.

До номінальних величин приймачів відносять номінальна напруга U_n , потужність P_n і струм I_n (наприклад, на лампах накаливання є штамп, у якому вказується номінальна напруга й потужність).

Як номінальні величини акумуляторів вказуються напруга і ємність (в ампер-годинах), що показує, який заряд може пройти через акумулятор, поки його напруга не знизиться до деякого мінімального значення.

Електричні кола можуть працювати в різних режимах.

Номінальний режим роботи будь-якого елемента електричного кола (джерела, приймача) вважається такий режим, у якому даний елемент працює при номінальних величинах.

Узгодженням називається режим, при якому потужність, що віддається джерелом або споживана приймачем, має максимальне значення. Максимальні значення потужностей виходять при певному співвідношенні (узгодженні) параметрів ЕК.

Під **режимом холостого ходу** (ХХ) розуміється такий режим, при якому через джерело або приймач не протікає струм. При цьому джерело не віддає енергію в зовнішнє коло, а приймач не споживає її.

Режимом короткого замикання (КЗ) називається режим, що виникає при з'єднанні між собою без якого-небудь опору (закороченні) затискачів джерела або інших елементів електричного кола, між якими є напруга.

Режим короткого замикання може бути наслідком порушення ізоляції, обриву проводів, помилки оператора при складанні електричного кола і т.п. При короткому замиканні можуть виникнути неприпустимо великі струми, електрична дуга, що призводить до важких наслідків, тому режим короткого замикання є аварійним.

3 Лінійні однофазні електричні кола синусоїдального струму

3.1 Основні величини, що характеризують синусоїдальні струм, напруга й ЕРС

Цими основними величинами є:

- миттєве значення;
- амплітудне значення;
- початкова фаза;
- діюче значення;
- середнє значення;
- комплекс діючого або амплітудного значення й ін.

3.1.1 Миттєве значення.

Миттєве значення величини a показує закон її зміни й записується у вигляді:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi), \quad (3.1)$$

де A_m - амплітуда (максимальне значення) величини;

ω - кутова частота, рад/с;

t - поточне значення часу, с;

ψ - початкова фаза.

Миттєві значення струму i , напруги u або ЕРС e записуються у вигляді:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (3.2)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (3.3)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e). \quad (3.4)$$

Аргумент синуса $(\omega t + \psi)$ називається **фазою**. Кут ψ дорівнює фазі в початковий момент часу $t=0$ і тому називається **початковою фазою**.

Кутова частота ω пов'язана з періодом T и частотою $f = 1/T$ формулами:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ або } \omega = 2\pi f \quad (3.5)$$

Частота f рівна числу коливань за 1с, вимірюється в герцах (Гц). При $f=50$ Гц маємо $\omega = 314$ рад/с.

З урахуванням (3.5) формула (3.1) може мати вигляд:

$$a = A_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \psi\right), \quad (3.6)$$

На рис. 3.1 зображені графіки синусоїдальних струмів однакової частоти, але з різними амплітудами й початковими фазами:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1);$$

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \psi_2).$$

По осі абсцис відкладений час t і величина ωt часу пропорційна й вимірювана в радіанах.

Початковий фазний кут відлічується від початку синусоїди, тобто від моменту переходу синусоїди від негативних до позитивних значень до моменту часу $t=0$ (початок координат). При $\psi_1 > 0$ початок синусоїди зсунутий уліво, а при $\psi_2 < 0$ – вправо від початку координат.

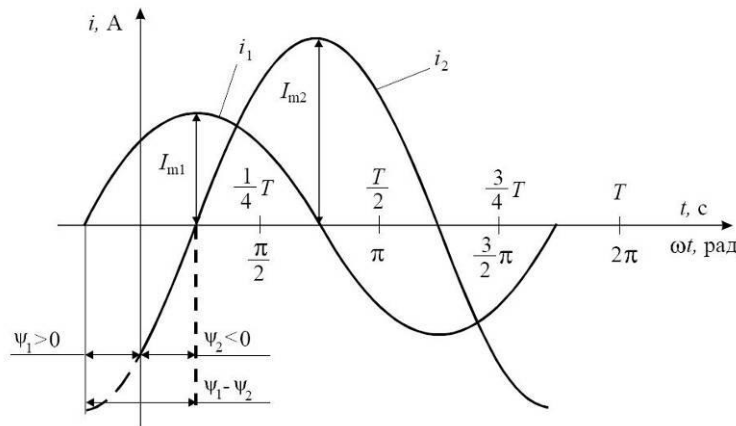


Рис. 3.1. Графіки синусоїдальних струмів однакової частоти, але з різними амплітудами й початковими фазами.

Якщо в декількох синусоїдальних функціях, що змінюються з однаковою частотою, початки синусоїд не збігаються, то говорять, що вони зсунуті одна від одної по фазі.

Зсуви фаз вимірюються різницею фаз, що дорівнює різниці початкових фаз. На рис. 3.1 $\psi_1 - \psi_2 > 0$, тобто струм i_1 випереджає по фазі струм i_2 на кут $\psi_1 - \psi_2$, або, що теж саме, струм i_2 відстає по фазі від струму i_1 на кут $\psi_1 - \psi_2$.

Якщо в синусоїдальних функціях однієї частоти однакові початкові фази, то говорять, що вони збігаються по фазі; якщо різниця їхніх фаз дорівнює $\pm\pi$, то говорять, що вони протилежні по фазі (у протифазі). І, якщо різниця їхніх фаз дорівнює $\pm\pi/2$, то говорять, що вони перебувають у квадратурі.

Найбільше поширення в електротехніці одержав синусоїдальний струм частотою 50 Гц, що прийнято за стандарт в Європі. У США стандартною є частота $f=60$ Гц.

Діапазон частот синусоїдальних струмів і напруг, що застосовуються на практиці дуже широкий: від часток герца, наприклад, у геологорозвідці, до десятків тисяч мегагерц (МГц) у радіолокації.

Синусоїдальні струми й напруги низьких частот (до декількох кілогерців) одержують за допомогою синхронних генераторів, у яких використовується принцип одержання синусоїдальної напруги шляхом обертання витка з постійною кутовою швидкістю в однорідному магнітному полі. Цей принцип заснований на явищі

електромагнітної індукції, відкритому в 1831 році М.Фарадеєм. Синусоїдальні струми й напруги високих частот (ВЧ) одержують за допомогою лампових або напівпровідникових генераторів.

Джерела синусоїдальної ЕРС (джерела синусоїдальної напруги) позначають на схемах за допомогою умовних позначень (рис. 3.2, а, б) або тільки показують напругу між затискачами джерела (рис. 3.2, в), тому що в більшості випадків приймають джерела ідеальними й через рівність нулю їхнього внутрішнього опору маємо $e = u$, $\dot{E} = \dot{U}$ і т.д.

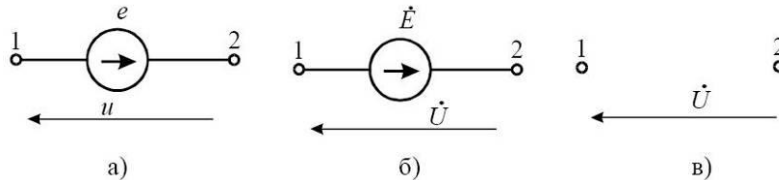


Рис. 3.2. Умовні позначення ідеальних джерел ЕРС

3.1.2 Діюче й середнє значення синусоїдальних струмів і напруг.

Відповідно до закону Джоуля-Ленца теплова енергія Q , виділювана в резисторі з опором R при протіканні по ньому постійного струму I_0 протягом проміжку часу t дорівнює:

$$Q = I_0^2 R t. \quad (3.7)$$

Для синусоїдального струму формулу (3.7) можна застосувати лише для визначення теплової енергії dQ , що виділилася в резисторі з опором R за нескінченно малий проміжок часу dt , протягом якого, можна вважати, сила струму i не змінюється:

$$dQ = i^2 R dt, \quad (3.8)$$

За період часу T енергія, що виділилася:

$$Q = \int_0^T i^2 R dt, \quad (3.9)$$

Нехай $i = I_m \sin \omega t$, тоді:

$$Q = \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t R dt = I_m^2 R \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{I_m^2}{2} R T$$

Введемо величину $I = I_m / \sqrt{2}$, що називають діючим значенням синусоїдального струму, і, підставивши її в останній вираз, одержимо:

$$Q = I^2 R T, \quad (3.10)$$

Зіставивши формулу (3.10), отриману для синусоїдального струму, з формулою (3.7), справедливої для постійного струму, робимо висновок: *Діюче значення синусоїдального струму дорівнює такому значенню постійного струму, що за один період виділяє в тім же резисторі таку ж кількість тепла, що і синусоїдальний струм.*

Аналогічно існують поняття діючих значень синусоїдальних напруг і ЕРС:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ і } E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.11)$$

З формул (3.9) і (3.10) одержуємо:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (3.12)$$

У силу (3.12) діюче значення синусоїдального струму часто називають середньоквадратичним або ефективним значеннями.

Діючі значення струмів і напруг показують більшість електровимірювальних приладів (амперметрів, вольтметрів).

У діючих значеннях вказуються номінальні струми й напруги в паспортах різних електроприладів і пристроїв.

Під *середнім значенням* синусоїдального струму розуміють його середнє значення за половину періода:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m, \quad (3.13)$$

тобто середнє значення синусоїдального струму становить $2/\pi = 0,638$ від амплітудного значення. Аналогічно,

$$E_{\text{ср}} = \frac{2E_m}{\pi}, U_{\text{ср}} = \frac{2U_m}{\pi}.$$

3.1.3 Зображення синусоїдальних струмів, напруг і ЕРС комплексними числами й векторами.

Синусоїдально змінюваний струм i зображується комплексним числом:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \Leftrightarrow I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}. \quad (3.14)$$

Прийнято зображення струму знаходити для моменту часу $t=0$:

$$i = I_m \sin \psi_i = \dot{I}_m \Leftrightarrow I_m e^{j\psi_i} \quad (3.15)$$

Величину \dot{I}_m називають комплексною амплітудою струму або комплексом амплітуди струму.

Під комплексом діючого значення струму або під комплексом струму \dot{I} розуміють частку від ділення комплексної амплітуди струму на $\sqrt{2}$:

$$\dot{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\psi_i} = I \cdot e^{j\psi_i}, \quad (3.16)$$

Під комплексами напруги й ЕРС розуміють подібні вирази

$$\dot{U} = \frac{\dot{U}_m}{\sqrt{2}} = U \cdot e^{j\psi_u}, \quad \dot{E} = \frac{\dot{E}_m}{\sqrt{2}} = E \cdot e^{j\psi_e}.$$

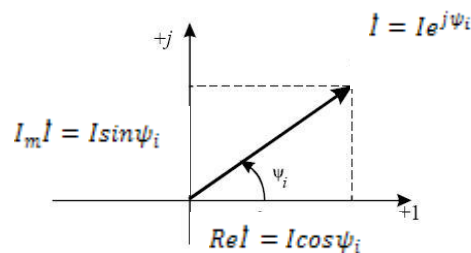


Рис. 3.3 - Зображення синусоїдального струму на комплексній площині вектором \dot{I}

Комплекси струму, напруги й ЕРС зображуються також на комплексній площині векторами. Наприклад, на рис. 3.3 зображений вектор \dot{I} . При цьому кут ψ_1 відлічується від осі +1 проти годинникової стрілки, якщо $\psi_1 > 0$. З малюнка 3.3 виходить, що комплекс струму \dot{I} (так само, як комплекс напруги й ЕРС) можна представити

- вектором \dot{I} ;
- комплексним числом у показовій, алгебраїчній й тригонометричній формах:

$$\dot{i} = I e^{j\psi i} = \operatorname{Re} \dot{i} + j \operatorname{Im} \dot{i} = I \cos \psi + j I \sin \psi \quad (3.17)$$

Приклад 3.1 Струм $i = 2 \sin(\omega t + 30^\circ)$ А. Записати вираз для комплексної амплітуди цього струму.

Рішення. У цьому випадку $I_m = 2$ А, $\psi = 30^\circ$. Отже,

$$\dot{i}_m = 2 e^{j30^\circ} = (2 \cos 30^\circ + j 2 \sin 30^\circ) = \sqrt{3} + j 1 \text{ А}$$

Приклад 3.2 Комплексна амплітуда струму $I_m = 25 \cdot e^{-j30^\circ}$ А. Записати вираз для миттєвого значення цього струму.

Рішення. Для переходу від комплексної амплітуди до миттєвого значення треба помножити \dot{i}_m на $e^{j\omega t}$ і взяти уявну частину від отриманого добутку:

$$i = \operatorname{Im}(25 e^{-j30^\circ} \cdot e^{j\omega t}) = \operatorname{Im}(25 e^{j(\omega t - 30^\circ)}) = 25 \sin(\omega t - 30^\circ).$$

Приклад 3.3 Записати вираз комплексу діючого значення струму для прикладу 3.1.

Розв'язок:

$$\dot{i} = \frac{\dot{i}_m}{\sqrt{2}} = \frac{2 \cdot e^{j30^\circ}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \cdot e^{j30^\circ} \text{ А.}$$

3.2 Елементи електричних кіл синусоїдального струму

Основні елементи електричних кіл синусоїдального струму:

- джерела електричної енергії (джерела ЕРС і джерела струму);
- резистивні елементи (резистори, реостати, нагрівальні елементи й т.д.);
- ємнісні елементи (конденсатори);
- індуктивні елементи (катушки індуктивності).

3.2.1 Резистивний елемент (РЕ).

На рис. 3.4, а зображений РЕ, по якому тече струм

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (3.18)$$

За законом Ома напруга РЕ

$$u = iR = R I_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t, \quad (3.19)$$

де $U_m = R I_m$.

З формул (3.18) і (3.19) робимо висновок: *струм і напруга в резистивному елементі збігаються по фазі (змінюються синфазно)*. Це положення наочно ілюструється на рис. 3.4, б, в. З формули (3.19) робимо й інший висновок: *закон Ома виконується як для амплітудних значень струму й напруги:*

$$U_m = R I_m, \quad (3.20)$$

так і для діючих значень струму й напруги:

$$U = R I. \quad (3.21)$$

Виразимо миттєву потужність p через миттєві значення струму i і напруги u :

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) \quad (3.22)$$

Графік зміни потужності p у часі представлений на рис. 3.4, г. Аналіз графіка й формули (3.22) дозволяють зробити висновки:

— миттєва потужність p має постійну складову $\frac{U_m I_m}{2} = UI$ і змінну складову $\left(\frac{U_m I_m}{2}\right) \cos 2\omega t$, що змінюється із частотою 2ω ;

- потужність у будь-який момент часу позитивна ($p > 0$). Це значить, що в резистивному елементі відбувається *необоротне* перетворення електричної енергії в інші види енергії («споживання» енергії);
- постійна складова в формулі (3.22) є середнім значенням миттєвої потужності за проміжок часу і дорівнює періоду T . Тобто, енергія W , переутворена в резистивному елементі протягом періоду, підраховується по формулі:

$$W = \frac{U_m I_m T}{2} = UI T. \quad (3.23)$$

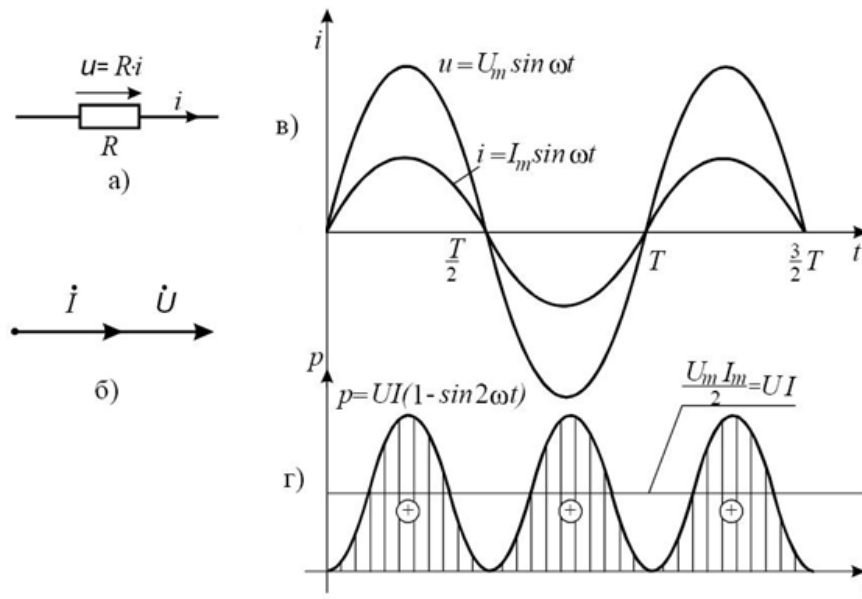


Рис. 3.4. Резистивний елемент

- а) зображення на схемі;
- б) вектори струму й напруги;
- в) графіки струму й напруги;
- г) графік миттєвої потужності.

Енергія, переутворена в резистивному елементі за будь-який проміжок часу від 0 до t визначається по формулі

$$W = \int_0^t p dt = UI \int_0^t (1 - \cos 2\omega t) dt. \quad (3.24)$$

3.2.2 Індуктивний елемент.

Класичним прикладом індуктивного елемента (ІЕ) є котушка індуктивності - дріт, намотаний на ізоляційний каркас (рис. 3.5,а)

На рис. 3.5,б зображений індуктивний елемент, по якому тече струм

$$i_L = I_m \sin \omega t. \quad (3.25)$$

Відповідно до закону електромагнітної індукції напруга на індуктивному елементі

$$U_L = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d(L \cdot i)}{dt} = L \frac{di}{dt}, \text{ тобто } u_L = L \frac{di_L}{dt}. \quad (3.26)$$

де ψ – магнітне потокозчеплення усередині індуктивного елемента;

$$\psi = w\Phi$$

де w – число витків котушки;

Φ - магнітний потік, сконцентрований усередині котушки;

L - індуктивність елемента (коефіцієнт пропорційності між потокозчепленням і струмом в індуктивному елементі), для лінійного індуктивного елемента індуктивність $L = const$.

Підставляючи в (3.26) вираз (3.25), одержимо:

$$u_L = \omega L I_m \cos \omega t = \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (3.27)$$

де $U_m = \omega L I_m = X_L I_m$.

Величина $X_L = \omega L$ називається *індуктивним опором*, виміряється в омах і залежить від частоти ω .

Зіставляючи вираз (3.25) і (3.27) зробимо важливий висновок: *струм в індуктивному елементі відстає по фазі від напруги на $\pi/2$ (90°)*.

Це положення ілюструється на рис. 3.5, в, г. З формули (3.27) витікає також:

- індуктивний елемент робить синусоїдальному (змінному) току

опір, модуль якого $X_L = \omega L$, прямо пропорційний частоті.

- «Закон Ома» виконується як для амплітудних значень струму й напруги:

$$U_m = X_L I_m, \quad (3.28)$$

так і для діючих значень:

$$U_m = X_L I_m \Rightarrow \frac{U_m}{\sqrt{2}} = X_L \frac{I_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U = X_L I. \quad (3.29)$$

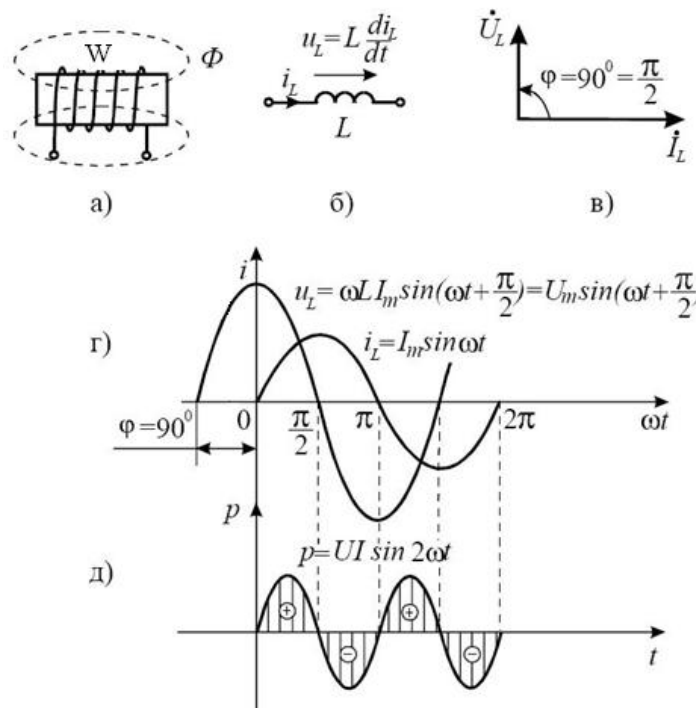


Рис. 3.5. Індуктивний елемент:

а) схема конструкції котушки індуктивності;

б) зображення ІЕ на схемі;

в) вектори струму й напруги;

г) графіки струму й напруги;

д) графік миттєвої потужності.

Виразимо миттєву потужність p через i і u :

$$p = ui = U_m \cos \omega t I_m \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t . \quad (3.30)$$

Графік зміни потужності p з часом побудований на підставі формули (3.30) на рис. 3.5, д. Аналіз графіка й (3.30) дозволяють зробити висновки:

- миттєва потужність на індуктивному елементі має тільки змінну **складову**

$$\left(\frac{U_m I_m}{2}\right) \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t, \quad \text{що змінюється з подвійною частотою } (2\omega).$$

- потужність періодично міняється за знаком: то позитивна, то негативна. Це значить, що протягом одних чвертьперіодів, коли $p > 0$, *енергія запасається* в індуктивному елементі (у вигляді енергії магнітного поля), а протягом інших чвертьперіодів, коли $p < 0$ енергія вертається в електричне коло. Енергія, що запасається в індуктивному елементі, за час dt дорівнює:

$$dW = p dt. \quad (3.31)$$

Максимальна енергія, запасена в індуктивному елементі, визначиться по формулі:

$$W_m = \int_0^{T/4} p dt = \int_0^{T/4} UI \sin 2\omega t = UI \frac{1}{\omega}. \quad (3.32)$$

Підставляючи в (3.32) $U = I \cdot \omega \cdot L$, одержимо:

$$W_m = I^2 L = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (3.33)$$

3.2.3. Ємнісний елемент

Прикладом ємнісного елемента є плоский конденсатор – дві паралельні пластини, що перебувають на невеликій відстані одна від одної (рис. 3.6, а).

Нехай до ємнісного елемента прикладена напруга (рис. 3.6, б)

$$u_c = U_m \sin \omega t. \quad (3.34)$$

На пластинках ємнісного елемента з'явиться заряд q , пропорційний прикладеній напрузі:

$$q = Cu_c. \quad (3.35)$$

Тоді струм у ємнісному елементі

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m (\omega t + 90^\circ). \quad (3.36)$$

Таким чином, одержимо важливі співвідношення:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}. \quad (3.37)$$

$$I_m = \frac{U_m}{1/(\omega C)} = \frac{U_m}{X_c}, \quad (3.38)$$

де $X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$ – ємнісний опір, вимірюється в Омах і залежить від частоти.

Зіставляючи вираз (3.36) і (3.34), дійдемо до висновку: *струм у ємнісному елементі випереджає по фазі напругу, прикладену до нього, на 90° .*

Це положення ілюструється на рис. 3.6, в, г.

Аналіз виразів (3.36) і (3.38) дозволяє зробити й інші висновки:

- ємнісний елемент чинить синусоїдальному (змінному) струму опір, модуль якого X_c обернено пропорційний частоті.

- закон Ома виконується як для амплітудних значень струму й напруги:

$$U_m = X_c I_m, \quad (3.39)$$

так і для діючих значень:

$$U_m = X_c I_m \Rightarrow \frac{U_m}{2} = X_c \frac{I_m}{2} \Rightarrow U_c = X_c I_c. \quad (3.40)$$

Виразимо миттєву потужність p через i і u :

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \cos \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t. \quad (3.41)$$

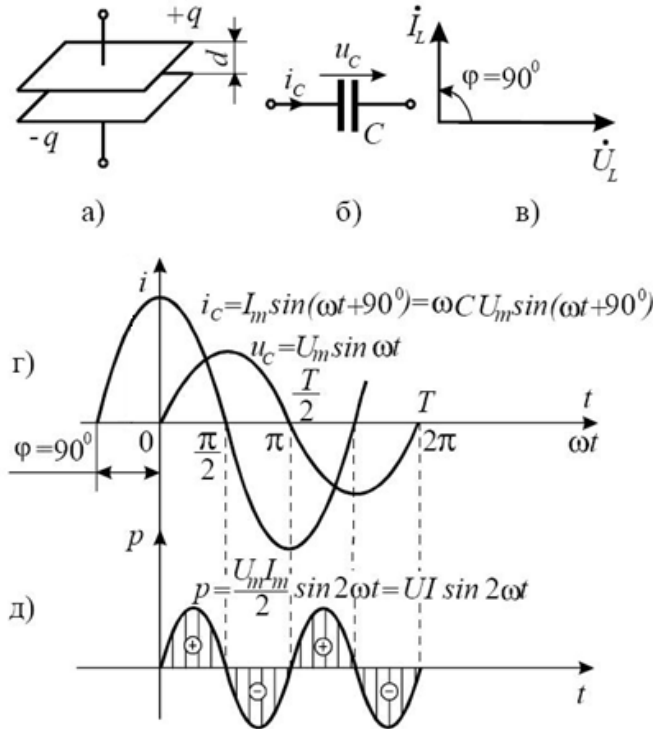


Рис. 3.6. Ємнісний елемент:

- а) схема конструкції плоского конденсатора;
- б) зображення ємнісного елемента на схемі;
- в) вектори струму й напруги на ємнісному елементі;
- г) графіки миттєвих значень струму й напруги;
- д) графік миттєвої потужності.

Графік зміни потужності p з часом побудований на рис. 3.6, г. Аналіз графіка й (3.41) дозволяють зробити висновки:

- миттєва потужність на ємнісному елементі має тільки змінну складову $\frac{U_m \cdot I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t$, що змінюється з подвійною частотою (2ω).

- потужність періодично міняється за знаком - то позитивна, то негативна. Це значить, що протягом одних чвертьперіодів, коли $p > 0$, енергія запасється в індуктивному елементі (у вигляді енергії магнітного поля), а протягом інших чвертьперіодів, коли $p < 0$ енергія вертається в електричне коло. Енергія, що запасється в індуктивному елементі, за час dt дорівнює:

$$dW = p dt. \quad (3.42)$$

Максимальна енергія, запасена в ємнісному елементі, визначиться по формулі:

$$W_m = \int_0^{T/4} p dt = \int_0^{T/4} UI \sin 2\omega t = UI \frac{1}{\omega}. \quad (3.43)$$

З огляду на те, що $I = C\omega U$, одержимо:

$$W_m = U^2 C = \frac{CU_m^2}{2}. \quad (3.44)$$

3.3 Розрахунок нерозгалуженого електричного кола синусоїдального струму

Для розрахунку режиму нерозгалуженого електричного кола застосуємо комплексний метод. Представимо всі синусоїдальні величини їхніми комплексами:

$$\begin{aligned} \dot{E} &= E e^{j\psi_e}; \dot{I} = I e^{j\psi_i}; \dot{U}_R = U_R e^{j\psi_{uR}}; \\ \dot{U}_L &= U_L e^{j\psi_{uL}}; \dot{U}_C = U_C e^{j\psi_{uC}} \end{aligned}$$

Порядок розрахунку такий же, як і на постійному струмі. По-перше, стрілками зображуємо позитивні напрямки струму, ЕРС і напруг. По-друге, вибираємо напрямок обходу контуру по напрямку руху годинникової стрілки й записуємо рівняння по другому закону Кірхгофа:

$$\dot{U}_L + \dot{U}_R + \dot{U}_C = j\omega L \dot{I} + R \dot{I} = j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = \dot{E} \quad (3.45)$$

Вирази $R \dot{I}$, $j\omega L \dot{I} = jX_L \dot{I}$, $-j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = (-jX_C \dot{I})$ відбивають

особливості прояву закону Ома для резистивного, індуктивного і ємнісного елементів електричного кола:

$$\dot{U}_R = R \dot{I}; \dot{U}_L = jX_L \dot{I}; \dot{U}_C = -jX_C \dot{I}.$$

Тут множення на $+j$ означає, що напруга \dot{U}_L випереджає по фазі струм \dot{I} на 90° , множення на $-j$ означає, що напруга \dot{U}_C відстає по фазі від струму \dot{I} на 90° .

З (3.45) знаходимо комплексний струм у колі:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}. \quad (3.46)$$

або (тому що $\dot{E} = \dot{U}$)

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}. \quad (3.47)$$

де $\dot{U} = U e^{j\psi_u} = \dot{E} = E e^{j\psi_e}$ - напруга між виводами ab нерозгалуженого кола (рис. 3.7, а). Величина, що знаходиться в знаменнику,

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j(X_L - X_C), \quad (3.48)$$

називається *комплексним опором* нерозгалуженого кола.

Величина, зворотна комплексному опорі, називається *комплексною провідністю*:

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}.$$

На рис. 3.7,б побудована векторна діаграма струму й напруг нерозгалуженого кола для випадку: $X_L > X_C$.

Звичайно векторна діаграма будується наприкінці розрахунку за отриманим значенням струму й напруг. При цьому перевіряється правильність розрахунку.

Поділивши всі тридцятимільйонної векторної діаграми на \dot{I} , одержуємо значення комплексних опорів і зображуємо комплексні опори $R, jX_L, -jX_C, \underline{Z}$ на комплексній площині (рис. 3.7, в) одержуємо діаграму, подібну до діаграми струму й напруг.

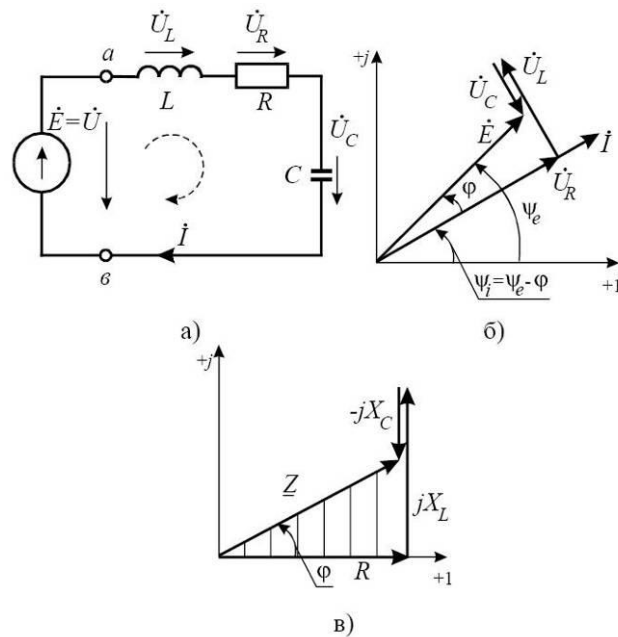


Рис. 3.7. Розрахунок нерозгалуженого електричного кола синусоїдального струму:

- а) схема електричного кола;
- б) векторна діаграма струму й напруг;
- в) зображення комплексних опорів на комплексній площині.

Звернемо увагу на “трикутник опорів” (заштрихована площа), сторони якого відповідають опорам R , $X = X_L - X_C$ і \underline{Z} . Трикутник опорів подібний до трикутника напруг (рис. 3.7, б).

Аналіз діаграми опорів дозволяє перейти від алгебраїчної форми запису комплексного опору до тригонометричної й показової форм:

$$\underline{Z} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi; \quad (3.49)$$

$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi}, \quad (3.50)$$

де $Z = |\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ - модуль комплексного опору або повний опір;

$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$ - аргумент комплексного опору.

Залежно від знака величини $(X_L - X_C)$ аргумент комплексного опору може бути або позитивним (індуктивний характер), або негативним (ємнісний характер).

Підставивши (3.50) в (3.46) або в (3.47), одержимо закон Ома для нерозгалуженого кола:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}} = \left(\frac{E}{Z} \right) e^{j(\psi_e - \varphi)}, \quad (3.51)$$

або

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \left(\frac{U}{Z} \right) e^{j(\psi_u - \varphi)}, \quad (3.52)$$

Тобто

$$I = \frac{U}{Z}; \quad \psi_i = \psi_u - \varphi. \quad (3.53)$$

При декількох послідовно з'єднаних елементах комплексний опір

$$\underline{Z} = \sum R + j(\sum X_L - \sum X_C) = R + jX \quad (3.54)$$

де $R = \sum R$ - активний опір кола;

$X = \sum X_L - \sum X_C$ - реактивний опір кола.

В активному опорі відбувається *необоротне* перетворення електричної енергії в інші види енергії, а в реактивному опорі - не відбувається.

Повний опір і аргумент комплексного опору можна розраховувати по формулах:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad (3.55)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right). \quad (3.56)$$

3.4 Потужність у лінійних колах синусоїдального струму

У лінійних колах синусоїдального струму мають місце три види потужності:

- активна;
- реактивна;
- повна;
- комплексна.

Активна потужність - це потужність необоротного *перетворення* електричної енергії в інші види енергії в резистивних елементах кола. У джерелах електричної енергії активна потужність P розраховується по формулах:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (3.57)$$

$$P = \operatorname{Re}(\dot{U}\dot{I}) \quad (3.58)$$

де U - діюче значення напруги в ПЕЕ, В;

I - діюче значення струму в ПЕЕ, А;

\dot{U} - комплекс діючого значення напруги, В;

\dot{I} - комплексно-спряжене значення струму, А;

φ - кут зрушення фаз між струмом і напругою.

У резистивних елементах активна потужність визначається як по (3.57) і (3.58), так і по формулі:

$$P = I^2 R$$

де R - опір резистивного елемента, Ом;

I - сила струму через нього, А.

У реактивних елементах *реактивна потужність* Q визначається по формулах:

$$Q = I^2 X, \quad (3.59)$$

$$Q = UI \sin \varphi, \quad (3.60)$$

$$Q = \operatorname{Im}(\dot{U}\dot{I}), \quad (3.61)$$

Повна потужність визначається по формулі:

$$\bar{S} = \dot{U}\dot{I} = P + jQ, \quad (3.62)$$

де \dot{I} - комплексно-спряжене значення струму, що протікає через відповідний елемент, А;

\dot{U} - комплекс напруги на цьому елементі, В;

Повна потужність:

$$S = |S|, \quad (3.63)$$

$$S = UI, \quad (3.64)$$

$$S = ZI^2 = \frac{U^2}{Z}, \quad (3.65)$$

4 Трифазні лінійні електричні кола синусоїдального струму

Як і в однофазних електричних колах, у трифазних електричних колах основними елементами є джерело електричної енергії (генератор) і приймач (споживач).

4.1 Трифазне джерело електричної енергії

На відміну від однофазного, трифазне джерело електричної енергії має не два, а чотири виводи (рис. 4.1, а).

Виводи A, B, C називаються *фазними*, а вивод N - *нейтральним або нульовим*.

Напруги між фазними виводами U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} називаються *лінійними*, а напруги між відповідними фазними виводами й нульовим виводом U_{AN}, U_{BN}, U_{CN} - *фазними* напругами.

За традицією замість позначень U_{AN}, U_{BN}, U_{CN} застосовуються позначення U_A, U_B, U_C .

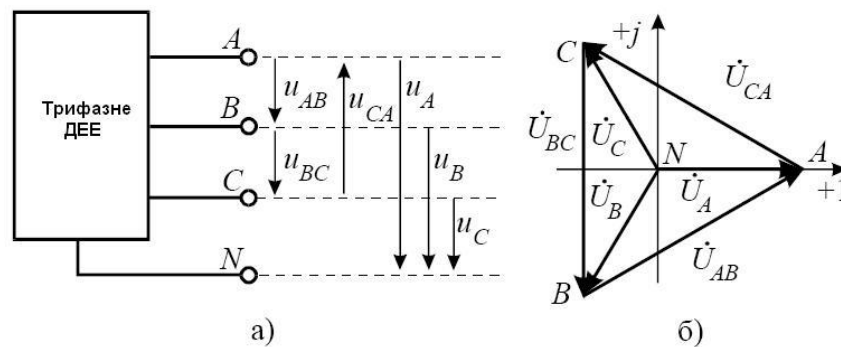


Рис. 4.1. Схема трифазного джерела електричної енергії (а) і векторна діаграма його напруг (б).

Таким чином, трифазне джерело електричної енергії виробляє не одну, а шість напруг, причому лінійні напруги по модулю пов'язані з фазними напругами залежністю

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}, \quad (4.1)$$

де $U_{\text{л}}$ і $U_{\text{ф}}$ - діючі значення лінійних та фазних напруг трифазного джерела електричної енергії.

Наприклад, при $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ $U_{\text{ф}} = 380 / \sqrt{3} = 220 \text{ В}$, при $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$

$U_{\text{ф}} = 220 / \sqrt{3} = 127 \text{ В}$ і т.д.

Очевидно, що співвідношення (4.1) справедливо й для амплітудних значень напруг трифазного джерела електричної енергії ($U_{\text{мл}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{мф}}$).

Наявність напруг двох рівнів (фазної і лінійної), на які можна переходити шляхом простого перемикання, є *перевагою* трифазного генератора в порівнянні з однофазним.

Основними частинами трифазного генератора є *статор* і *ротор*. У пазах статора розташовані три однакові обмотки (катушки) A, B, C , осі яких зміщені відносно один одного на 120° або $2\pi/3$ рад.

Обмотки генератора називаються фазами, які позначаються відповідно A, B, C .

Таким чином, термін «фаза» в електротехніці позначає в одних випадках аргумент синуса $(\omega t + \psi)$, а в інших випадках - одну з обмоток трифазного генератора або тільки висновок цієї обмотки.

У кожній обмотці (фазі) статора під дією обертового магнітного поля (ОМП) ротора, відповідно до закону електромагнітної індукції, індуються синусоїдальні напруги з рівними амплітудами U_m і кутовими частотами, але зрушені по фазі на кут $2\pi/3$ друг відносно друга:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t; \\ u_B &= U_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ u_C &= U_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right); \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

де u_A, u_B, u_C - миттєві значення фазних напруг.

Система напруг, описувана рівняннями (4.2), називається *симетричною*, а генератор, що виробляє таку систему напруг - *симетричним*.

Фазні напруги (4.2) трифазного симетричного генератора в комплексній формі мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= U_A e^{j^0} = U; \\ \dot{U}_B &= U_B e^{-j\frac{2\pi}{3}} = U e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \\ \dot{U}_C &= U_C e^{-j\frac{4\pi}{3}} = U e^{-j\frac{4\pi}{3}}. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

де U – діюче значення фазної напруги.

На рис. 4.1,б побудована на комплексній площині векторна діаграма фазних і лінійних напруг симетричного джерела електричної енергії відповідно до рівнянь (4.2) і (4.3).

Трифазна система вперше розроблена й застосована російським інженером-електриком М.І. Доливо-Добровольским в 80-х роках XIX століття в Німеччині. У теперішній час генератори електростанцій всіх видів є трифазними.

4.2 Аналіз електричних кіл при з'єднанні трифазного джерела й приймача за схемою «зірка» з нульовим проводом

У джерела енергії, виконаного за схемою «зірка» кінці фазних обмоток X, Y, Z генератора з'єднуються в загальний вузол N (рис. 4.2).

Аналогічний вузол n утворює з'єднання кінців x, y, z трьох фаз приймача, а крапки N і n з'єднує *нейтральний провід*, у результаті чого потенціали цих точок рівні. Інші три проводи, що з'єднують виводи генератора A, B, C з виводами приймача a, b, c називаються *лінійними*.

Таким чином, замість шести проводів (у випадку роздільного живлення фаз приймача однофазними джерелами) трифазна система, виконана за схемою «зірка» з нульовим проводом містить чотири проводи.

Отже, трифазне електричне коло забезпечує передачу електричної енергії з меншими втратами й з меншою витратою матеріалу проводів при передачі однакової потужності. У цьому наступна перевага трифазних електричних кіл перед однофазними.

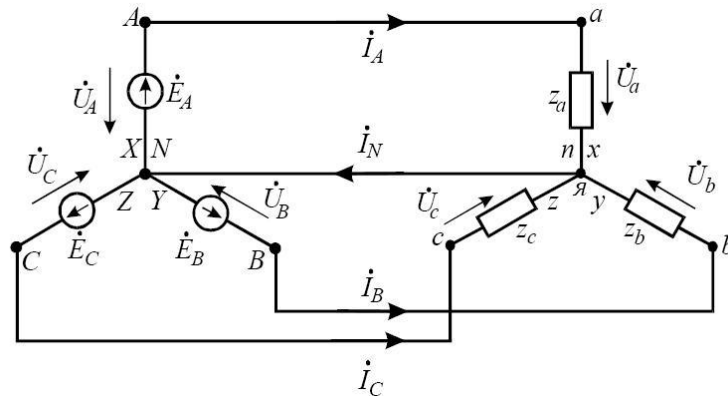


Рис. 4.2. Схема електричного кола при з'єднанні джерела й приймача за схемою «зірка» з нульовим проводом

Лінійні струми $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ у лініях (проводах) $A - a, B - b, C - c$ визначаються за законом Ома в комплексній формі:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}. \quad (4.4)$$

Струм \dot{I}_N у нейтральному проводі пов'язаний з лінійними струмами законом Кірхгофа в комплексній формі:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (4.5)$$

Очевидно, що в схемі (рис. 4.2) лінійні струми $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ є одночасно й фазними, тобто вони протікають одночасно у фазах джерела й приймача й у з'єднуючих їхніх проводах (лініях).

Приймач із однаковими опорами всіх трьох фаз ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi \cdot e^{j\varphi}$) називається *симетричним*.

З рівнянь (4.4) випливає, що при симетричному приймачі діючі значення лінійних струмів I_π і струмів I_ϕ всіх фаз приймача рівні:

$$I_\pi = I_\phi = I_A = I_B = I_C. \quad (4.6)$$

Рівні також зсуви фаз φ цих струмів відносно відповідних фазних напруг.

Таким чином, струми $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ представляють симетричну систему струмів, у зв'язку із чим їхня векторна сума дорівнює нулю й струм у нейтральному проведенні \dot{I}_N згідно (4.5) також дорівнює нулю.

Векторна діаграма напруг і струмів при ємнісному характері симетричного приймача (струм випереджає напругу по фазі на кут φ) зображена на рис. 4.3,а.

Векторна діаграма напруг на рис. 4.3,а повторює векторну діаграму напруг джерела електричної енергії (рис. 4.1), тому що система фазних і лінійних напруг у розглянутому електричному колі задається джерелом і не залежить від навантаження. У цьому перевага електричного кола з нульовим проведенням.

Складемо рівняння по другому закону Кірхгофа для контуру $ANBA$ (рис. 4.2):

$$\dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_{AB}, \quad (4.7)$$

де \dot{U}_{AB} - комплекс лінійної напруги.

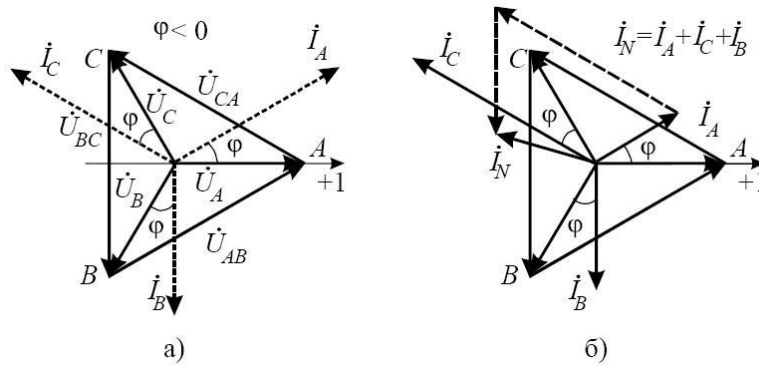


Рис. 4.3. Векторна діаграма напруг і струмів трифазного електричного кола при з'єднанні симетричного приймача й джерела за схемою «зірка» при ємнісному характері приймача (а), при несиметричному приймачі (б)

На векторній діаграмі вектор \dot{U}_{AB} , спрямований у т. А так, щоб виконувалася умова (4.7)

Фізично цей напрямок вектора вказує, що умовно потенціал т. А вище потенціалу т. В.

З векторної діаграми треба, що при симетричному приймачі, з'єднаному в «зірку», і при наявності нульового (нейтрального) провідення, симетричній системі напруг (4.3) відповідає *симетрична* система струмів:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin(\omega t + \varphi); \\ i_B &= I_m \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ); \\ i_C &= I_m \sin(\omega t + \varphi - 240^\circ); \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

Однак, якщо приймач несиметричний, струми в схемі (рис. 4.2) не будуть представляти симетричну систему й у нульовому провіденні відповідно до (4.5) з'явиться струм \dot{I}_N .

На рис. 4.3,б наведена векторна діаграма струмів для випадку несиметричного приймача ємнісного характеру.

4.3 З'єднання приймача за схемою «трикутник»

У цьому випадку до фазних виводів джерела електричної енергії А,В,С приєднуються виводи приймача а,в,с (рис. 4.4)

Таким чином, до фаз приймача прикладена симетрична система лінійних напруг трифазного джерела електричної енергії.

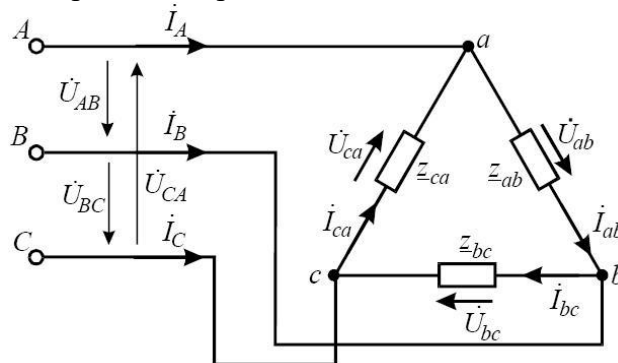


Рис. 4.4. Схема трифазного електричного кола при з'єднанні приймача «трикутником»

У лінійних проводах $A - a, B - b, C - c$ протікають лінійні струми I_A, I_B, I_C . У фазах приймача протікають фазні струми I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} , обумовлені за законом Ома в комплексній формі:

$$\dot{i}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{i}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{i}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}; \quad (4.9)$$

Лінійні струми I_A, I_B, I_C при відомих фазних струмах знаходяться во першому закону Кірхгофа в комплексній формі:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_A &= \dot{i}_{ab} - \dot{i}_{ca}; \\ \dot{i}_B &= \dot{i}_{bc} - \dot{i}_{ab}; \\ \dot{i}_C &= \dot{i}_{ca} - \dot{i}_{bc}; \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

З рівнянь (4.9) і (4.10) випливає, що при симетричному приймачі ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi$) системи фазних ($\dot{i}_A, \dot{i}_B, \dot{i}_C$) і лінійних (I_A, I_B, I_C) струмів симетричні, а модулі фазних I_ϕ і лінійних I_π струмів перебувають у співвідношенні:

$$I_\pi = \sqrt{3} I_\phi \quad (4.11)$$

У випадку несиметричного приймача струми не будуть являти собою симетричні системи й співвідношення (4.11) не виконується.

На рис. 4.5 наведений приклад векторної діаграми струмів і напруг для схеми електричного кола (рис. 4.4) для випадків симетричного й несиметричного приймачів резистивного характеру (зсув по фазі між фазними напругами й фазними струмами приймача дорівнює нулю $\varphi = 0$).

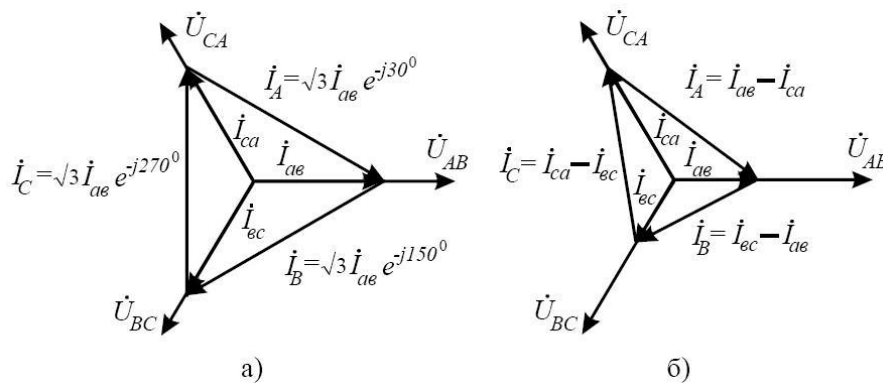


Рис. 4.5. Векторна діаграма струмів і напруг електричного кола при з'єднанні приймача резистивного характеру трикутником для випадку симетричної (а) і несиметричної (б) навантажень

4.4 Потужність трифазного кола

Як і в однофазному лінійному колі синусоїдального струму, у трифазному лінійному колі можуть мати місце три види потужності:

- активна P ;
- реактивна Q ;
- повна S .

Активною потужністю трифазного електричного кола називається сума активних потужностей всіх фаз джерел електричної енергії або всіх фаз приймача.

4.4.1 Трифазне електричне коло із симетричним приймачем.

В електричному колі із симетричним приймачем, при будь-якій схемі їхніх з'єднань, для кожної з фаз приймача маємо:

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi,$$

де φ - кут зрушення фаз між фазними напругою \dot{U}_{ϕ} і струмом \dot{I}_{ϕ} .

Очевидно, у цьому випадку активна потужність всього електричного кола:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi, \quad (4.12)$$

або

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi, \quad (4.13)$$

Реактивна потужність для кожної з фаз приймача:

$$Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi, \quad (4.14)$$

Реактивна потужність всього кола:

$$Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi, \quad (4.15)$$

або

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi, \quad (4.16)$$

Для повної потужності у випадку симетричного приймача маємо:

$$S = 3U_{\phi} I_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}. \quad (4.17)$$

5 Електричні вимірювання й прилади

Електричні вимірювальні прилади - необхідні елементи електричних кіл при контролі режимів роботи електроустаткування, обліку електроенергії, при експериментальному дослідженні електричних кіл, при одержанні достовірної інформації для систем автоматичного керування.

Електричні вимірювальні прилади вимірюють як електричні величини (струм, напруга, потужність, $\cos \varphi$, частоту, електричну енергію і т.п.), так і неелектричні величини (температуру, тиск і т.п.).

Електричні вимірювальні прилади відрізняються високою чутливістю, простою конструкцією й надійністю. Показання електричних вимірювальних приладів відносно просто передавати на далекі відстані (телевимірювання) при автоматизації й керуванні технологічними процесами.

Недоліком електричних вимірювальних приладів є неможливість їхнього застосування у вибухонебезпечних й вогненебезпечних приміщеннях.

5.1 Системи електричних вимірювальних приладів

Електричний вимірювальний прилад складається з рухомої й нерухомої частин. По переміщенню рухомої частини вимірюють значення вимірюваних величин.

Залежно від принципу дії розрізняють системи: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, теплову, індукційну й ін.

У таблиці 5.1 наведені умовні позначення найбільш широко застосовуваних систем приладів. Ці позначення й інші найважливіші характеристики вказуються на лицьовій панелі електричних вимірювальних приладів (рис. 5.1).

Системи електричних вимірювальних приладів і їхні умовні позначення

Система приладу	Позначення
Магнітоелектрична	
Електромагнітна	
Електродинамічна	
Теплова	
Індукційна	

Робота приладів магнітоелектричної системи заснована на взаємодії поля постійного магніту й рухомої котушки.

На рис. 5.2 схематично показана основна частина магнітоелектричного вимірювального механізму: рухома котушка, розташована в сильному рівномірному радіальному магнітному полі.

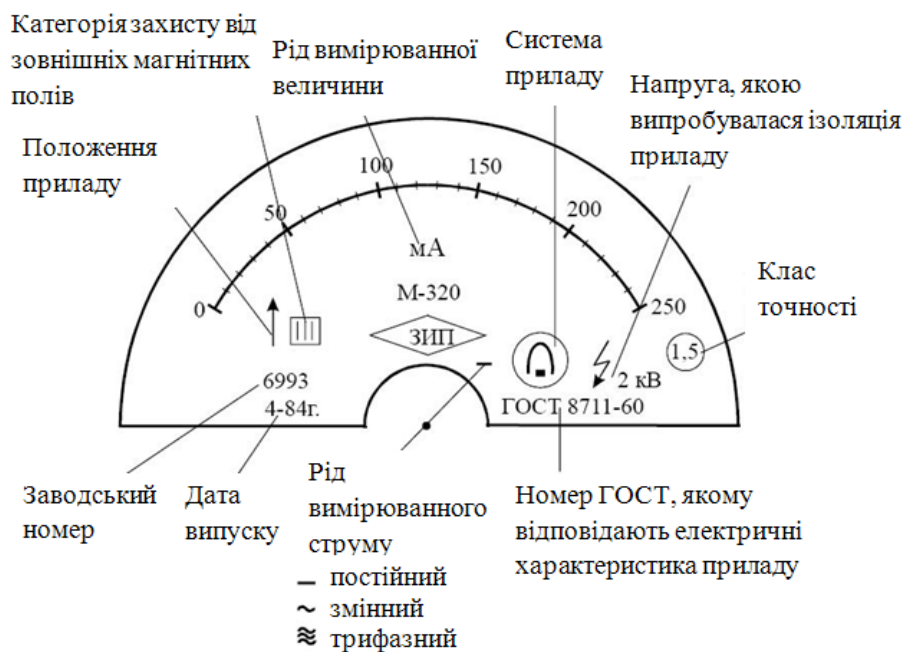


Рис. 5.1. Шкала вимірювального приладу

Рухома котушка з тонкого мідного або алюмінієвого проволу намотана на каркас (або без нього). На осі рухомої частини приладу укріплена стрілка, кінець якої переміщається по шкалі електричного вимірювального приладу.

При протіканні по котушці електричного струму відповідно до закону Ампера виникають сили F , що прагнуть повернути котушку. При рівності обертаючого $M_{вр}$ і протидіючого $M_{пр}$ моментів котушка зупиняється.

Для створення протидіючого моменту $M_{пр}$ і одночасно для підведення струму в котушку служать дві спіралі.

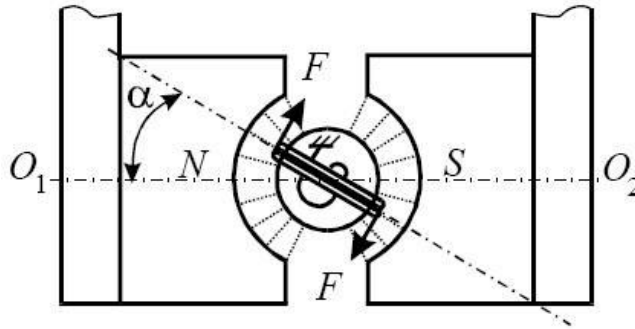


Рис. 5.2. Рухлива котушка в радіальному магнітному полі

Загальний вираз для обертаючого моменту має вигляд:

$$M_{\text{впр}} = dW / d\alpha \quad (5.1)$$

де W - енергія електромагнітного поля, зосереджена у вимірювальному механізмі;

α - кут повороту рухливої частини.

Енергія електромагнітного поля W дорівнює роботі A по переміщенню активної частини проведення котушки в постійному магнітному полі з індукцією B .

Відповідно до закону Ампера сила F , що діє на активну частину проведення котушки при протіканні по ній струму I дорівнює

$$F = IBl \sin \varphi \quad (5.2)$$

де φ - кут між напрямком струму в активній частині проведення й індукцією магнітного поля;

l - довжина активної частини котушки.

У нашому випадку $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $\sin \varphi = 1$. Отже, робота з переміщення двох активних частин проведення котушки, перпендикулярних площині креслення (рис. 5.2), дорівнює

$$A = W = 2Fx = 2IBlr\alpha, \quad (5.3)$$

де $x = r \cdot \alpha$ - довжина траєкторії активної частини провода;

r - радіус траєкторії;

α - кут повороту котушки.

Підставляючи (5.3) в (5.1) одержуємо

$$M_{\text{впр}} = \frac{dW}{d\alpha} = 2IBl.$$

Так як протидіючий момент $M_{\text{пр}}$ створюється пружними елементами, то для сталого режиму

$$M_{\text{впр}} = M_{\text{пр}},$$

або

$$W_{\alpha} = 2IBlr,$$

де W - питомий протидіючий момент, що залежить від властивостей пружного елемента.

Отже, кут повороту котушки α пропорційний струму I

$$\alpha = \frac{2B \cdot l \cdot r}{W} I = SI, \quad (5.4)$$

де S - чутливість вимірювального механізму.

Як видно з (5.4) при зміні напрямку струму в котушці міняється на зворотне й напрямок відхилення рухливої частини й покажчика (стрілки).

Для одержання відхилення покажчика в потрібну сторону необхідно при включенні приладу дотримувати зазначену на приладі полярність.

Достоїнства приладів магнітоелектричної системи: висока чутливість до вимірюваної величини, висока точність (клас точності до 0,05, мале споживання потужності, мала чутливість до зовнішніх магнітних полів). Недолік - можливість застосування тільки в колах постійного струму.

У приладах електромагнітної системи в нерухомій котушці, по якій протікає вимірюваний струм, створюється магнітне поле, у яке втягується, повертаючись на осі, феромагнітний сердечник, що намагнічується цим же полем. Причому втягування відбувається як при постійному, так і при змінному магнітному полі, а кут повороту α пропорційний квадрату сили вимірюваного струму. Тому:

а) прилади електромагнітної системи можуть застосовуватися в колах постійного і змінного струмів;

б) шкала приладу нерівномірна, сильно стисла в початковій частині.

Переваги електричних вимірювальних приладів електромагнітної системи: простота й надійність конструкції, невелике споживання потужності.

Недоліки: невисока чутливість до вимірюваної величини, відносно низька точність (клас точності до 1.0), більша чутливість до зовнішніх магнітних полів.

Обертаючий момент електромагнітного вимірювального механізму

$$M_{\text{вр}} = \frac{dW_{\text{с}}}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{L \cdot I^2}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}.$$

Якщо протидіючий момент створюється за допомогою пружних елементів, то для режиму сталого відхилення

$$M = W_{\alpha} i \alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \quad (5.5)$$

5.2 Основні характеристики електричних вимірювальних приладів

5.2.1 Статична характеристика.

Статична характеристика вимірювального приладу - залежність вихідного сигналу y від вхідного сигналу x у статичному режимі роботи зазначеного приладу.

Статична характеристика в загальному випадку описується нелінійним рівнянням

$$y = f(x).$$

Так, наприклад, для електронних вимірювальних приладів магнітоелектричної системи статичною характеристикою буде рівняння (5.3), у якому вхідним сигналом буде електричний струм I , а вихідним - кут повороту котушки α :

$$\alpha = SI.$$

Оскільки $S = \frac{2BLr}{w} = \text{const}$, то статична характеристика електровимірювального приладу магнітоелектричної системи лінійна.

5.2.2 Похибка.

Абсолютна похибка приладу в даній точці діапазону вимірювання дорівнює

$$\Delta = x - x_{\text{ц}} \quad (5.6)$$

де x - показання приладу;

$x_{\text{ц}}$ - дійсне значення вимірюваної величини.

Однак у зв'язку з тим, що дійсне значення найчастіше невідомо, на практиці замість нього використовується дійсне значення x_d , у якості якого застосовують або середнє арифметичне значення ряду вимірів, або показання зразкового приладу.

Очевидно, що абсолютна похибка приладу виражається в тих же одиницях, що й вимірювана величина.

Абсолютна похибка приладу не характеризує повною мірою точність виміру, тому при вимірюваннях визначається також *відносна похибка* - відношення абсолютної погрішності до справжнього (дійсного) значення вимірюваної величини

$$\delta = \frac{\Delta}{x_u} = \frac{\Delta}{x_d}, \quad (5.7)$$

або у відсотках

$$\delta(\%) = \frac{\Delta}{x_d} 100\%. \quad (5.8)$$

Наведена похибка γ електричного вимірювального приладу дорівнює відношенню абсолютної погрішності до нормального значення, x_N , що приймається рівним верхній границі вимірювання (якщо нульова оцінка перебуває на краю або поза шкалою) або діапазону вимірювання (якщо нульова оцінка перебуває усередині діапазону вимірювань):

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N},$$

або у відсотках

$$\gamma(\%) = \frac{\Delta}{x_N} 100\%. \quad (5.9)$$

Похибка електровимірювального приладу залежить від умов проведення вимірів. Розрізняють *основну й додаткову похибки*.

Основна похибка - це похибка, що існує при нормальних умовах, які зазначені в нормативних документах, що регламентують правила випробування й експлуатації електровимірювальних приладів.

Під нормальними умовами, наприклад, можуть розумітися:

- температура навколишнього середовища ($+20 \pm 2$) °C;
- положення приладу горизонтальне, з відхиленням від горизонтального не перевищуючим ± 2 °C;
- відносна вологість (65 ± 15) %;
- практична відсутність зовнішніх магнітних і електричних полів;
- частота живильної мережі (50 ± 1) Гц і так далі.

Додаткова похибка виникає при відхиленні умов випробування й експлуатації приладу від нормальних.

Наприклад, наведена похибка електронно-вимірювальних приладів при нормальних умовах не перевищує 1 %. Якщо ж температура навколишнього середовища лежить поза зазначеним у нормальних умовах діапазону, то наведена похибка може перевищувати 1 %.

5.2.3 Клас точності.

Клас точності електронних вимірювальних приладів - узагальнена метрологічна характеристика, обумовлена межами припустимих основної й додаткової похибок.

Клас точності K стрілочних і самописних приладів, як правило, позначається одним числом, рівним максимально припустимому значенню основної наведеної погрішності, вираженої у відсотках:

$$K = \frac{\Delta}{x_N} 100 = \gamma 100 \quad (5.10)$$

Електронні вимірювальні прилади діляться на 8 класів точності: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0.

Приклад: Мілівольтметр зі шкалою до 50 мВ має клас точності $K=0,5$. Визначити максимальну абсолютну похибку електронного вимірювального приладу.

Розв'язок:

З (5.10) треба, що максимальна абсолютна похибка при вимірюваннях у всьому діапазоні дорівнює

$$\Delta = \frac{K \cdot x_N}{100} = \frac{0,5 \cdot 50}{100} = \pm 0,25 \text{ мВ.}$$

5.2.4 Варіація.

Варіація показань електровимірювального приладу - це найбільша різниця його показань при тому самому значенні вимірюваної величини.

Основною причиною варіації є тертя в опорах рухливої частини приладу.

Варіацію визначають, порівнюючи показання електровимірювального приладу, лічені один раз після установки необхідного значення вимірюваної величини підходом знизу (з боку менших значень), а інший раз - підходом зверху (з боку більших значень).

5.2.5 Ціна поділки.

Ціна поділки електровимірювальних приладів чисельно дорівнює зміні вимірюваної величини, що викликає переміщення покажчика (стрілки) на одну поділку.

При рівномірній шкалі ціна поділки дорівнює відношенню межі виміру електровимірювального приладу x_m до числа розподілів шкали n :

$$c = \frac{x_m}{n}. \quad (5.11)$$

5.2.6 Границя вимірювання.

Границя вимірювання електровимірювального приладу - значення вимірюваної величини, при якому стрілка приладу відхиляється до кінця шкали. Електровимірювальні прилади можуть мати кілька границь вимірювання (багатограничні прилади). При вимірюваннях такими приладами на різних границях ціна поділки буде різною.

5.2.7 Чутливість.

Чутливість S електровимірювального приладу - це відношення зміни сигналу на виході електровимірювального приладу Δy до його зміни вимірюваної величини Δx :

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}. \quad (5.12)$$

У загальному випадку чутливість

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}. \quad (5.13)$$

Отже, при нелінійній статичній характеристиці чутливість залежить від x , а при лінійній статичній характеристиці - чутливість постійна.

В електровимірювальних приладах при постійній чутливості шкала рівномірна, тобто довжина всіх поділок однакова.

5.3 Вимірювання струму, напруги й потужності

5.3.1 Вимірювання струму.

Для вимірювання струму використовуються амперметри, міліамперметри й мікроамперметри. Ці прилади включаються послідовно в вітку електричного кола.

При цьому необхідно, щоб внутрішній опір амперметра був мало в порівнянні з опором вітки електричного кола, у якій він включений. У протилежному випадку включення приладу викличе істотну зміну опору й струму у даній вітці електричного кола, а так само й зміну режиму роботи всього кола.

Опори котушок (рамок) електровимірювальних приладів становлять 1-2 кОм й розраховані на повне відхилення стрілки при струмі 100-500 мкА (що відповідає спаду напруги на приладі 0,1-1 В). Отже, безпосереднє включення електровимірювального приладу можливо тільки при вимірі малих струмів до 500 мкА у високоомних електричних колах.

Щоб використовувати даний прилад для виміру струмів більших значень і знизити його внутрішній опір застосовують *шунти*.

Шунт являє собою манганінові пластини або стрижні, упаяні в мідні або латунні наконечники. Опір шунта значно менший опору рамки приладу. Шунт включається в електричне коло послідовно, а паралельно йому підключається рамка (котушка) приладу.

По I закону Кірхгофа вимірюваний струм в електричному колі

$$I = I_A + I_{ш}$$

де I_A - струм через рамку приладу, А;

$I_{ш}$ - струм через шунт, А.

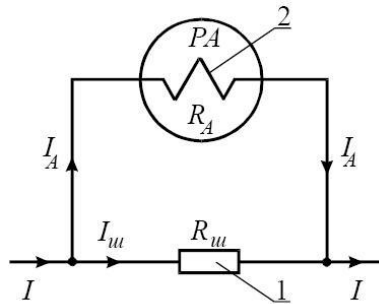


Рис. 5.3. Схема включення приладу із шунтом:

1 - шунт; 2 - рамка (котушка) приладу; I - вимірюваний струм;

$I_{ш}$ - струм через шунт; I_A - струм через рамку приладу.

Так як $r_A \gg r_{ш}$, то $I_A \ll I_{ш}$, так що $I_{ш} \approx I$.

При паралельному з'єднанні

$$I_A \cdot R_A = I_{ш} \cdot R_{ш}$$

або

$$\frac{I_A}{I_{ш}} = \frac{R_{ш}}{R_A}$$

Звідси опір шунта

$$R_{\text{ш}} = \frac{I_A \cdot R_A}{I_{\text{ш}}} = \frac{I_A \cdot R_A}{I - I_A}$$

або

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n - 1}, \quad (5.14)$$

де $n = \frac{I}{I_A}$ - коефіцієнт шунтування.

Приклад: Рамка приладу магнітоелектричної системи має опір $R_A=1500$ Ом і розрахована на максимальне відхилення при струмі $I=250$ мкА. Визначити опір шунта $R_{\text{ш}}$ для виміру струмів до 50 мА.

Розв'язок:

1. Визначимо коефіцієнт шунтування n :

$$n = \frac{I}{I_A} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 10^{-6}} = 200.$$

2. Визначаємо опір шунта:

$$r_{\text{ш}} = \frac{r_A}{n - 1} = \frac{1500}{200 - 1} = 7,54 \text{ Ом.}$$

В амперметрах, призначених для виміру струмів до 100 А, шунти вмонтовані в корпус приладу й приєднані до контактних виводних затискачів.

В амперметрах, призначених для виміру струмів більше 100 А, шунти робляться зовнішніми й приєднуються до них за допомогою спеціальних каліброваних провідників, тому що інакше розподіл струмів будуть неправильним.

Для розширення меж вимірювання амперметрів у колах синусоїдального (змінного) струми застосовуються *трансформатори струму*, які служать для перетворення більших струмів у менші.

Первинна обмотка трансформатора струму, що складає з малого числа витків, включається послідовно у коло з вимірюваним струмом.

Вторинна обмотка складається з великої кількості витків і до неї включаються вимірювальні прилади (амперметри), ізольовані від високовольтних і сильнострумових проводів.

На паспорті у вигляді дроби вказується коефіцієнт трансформації трансформатора струму:

$$K = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}$$

де I_1 – струм первинної обмотки, А;

I_2 – струм вторинної обмотки, А;

w_1 – число витків первинної обмотки;

w_2 – число витків вторинної обмотки.

Наприклад, 100/5 А означає, що даний трансформатор струму розрахований на первинний струм 100 А и вторинний струм – 5 А. Коефіцієнт трансформації цього трансформатора $K=100/5=20$.

Знаючи K и одержавши показання амперметра у вторинному ланцюзі трансформатора струму I_2 , можна визначити первинний струм

$$I_1 = KI_2 .$$

Більшість трансформаторів токи випускаються з номінальним вторинним струмом 5 А.

5.3.2 Вимірювання напруги.

Для вимірювання напруги служать вольтметри. Вони підключаються паралельно ділянці, на якій необхідно виміряти напругу.

Внутрішній опір вольтметра повинен бути значно більший опору ділянки до якої він підключається, тому що в протилежному випадку вольтметр буде впливати на розподіл струму в електричному колі й результати вимірювання будуть містити велику похибку.

Для розширення границь вимірювання вольтметрів послідовно з ними включають *додаткові опори*.

У приладах на напругу до 300 В, додаткові опори вмонтовані в корпус приладів або укріплені зовні приладів.

Для вимірювань напруг понад 300 В додаткові опори приєднують до одного з вихідних затискачів приладу.

Додаткові опори розраховують так, щоб у колі зі збільшеною напругою по обмотці (рамці) вольтметра проходив той же струм, що й при номінальній напрузі, на якому розрахована обмотка.

Обмотка розрахована на струм

$$I_V = \frac{U}{R_V},$$

де I_V – струм, що протікає через рамку вольтметра, А;

U – напруга на рамці, В;

R_V – опір рамки, Ом.

При збільшенні напруги в ланцюзі в n раз, струм I_V повинен залишитися колишнім

$$I_V = \frac{nU}{R_V + R_{доб}} = \frac{U}{R_V},$$

звідси

$$R_{доб} = R_V(n - 1). \quad (5.14)$$

Приклад. Вольтметром на 15 В необхідно виміряти напругу 150 В. Визначити додатковий опір, якщо внутрішній опір вольтметра 900 Ом.

Розв'язок:

1. Визначимо відношення вимірюваної напруги до напруги вольтметра

$$n = \frac{150}{15} = 10.$$

2. Додатковий опір

$$r_{доб} = r_V(n - 1) = 900 \cdot 9 = 8100 \text{ Ом.}$$

Для виміру високих напруг синусоїдального струму застосовують трансформатори напруги.

Первинна обмотка трансформатора напруги включається паралельно споживачеві й має велику кількість витків.

У паспорті трансформатора напруги вказується відношення напруг первинної й вторинної обмоток. Наприклад 5000/100 означає, що номінальна напруга первинної обмотки 5000 В, вторинної -100 В.

Коефіцієнт трансформації напруги

$$K = \frac{5000}{100} = 50$$

Знаючи K и напругу вторинної обмотки U_2 , можна визначити первинна напруга:

$$U_1 = KU_2$$

Більшість трансформаторів напруги випускається з номінальною вторинною напругою 100 В.

5.3.3 Вимірювання потужності електричного струму.

Для виміру потужності в колах постійного й у колах синусоїдального струму промислової частоти застосовуються ватметри, що забезпечують безпосередній відлік потужності по шкалі.

Ватметри електродинамічної системи складається із двох котушок (рамок):

- нерухомої, струмової з товстого проводу, що включається послідовно зі споживачем;
- рухливої обмотки напруги, виконаної з тонкого проводу, що підключається паралельно споживачеві.

При постійному струмі обертаючий момент електродинамічного приладу пропорційний добутку струмів у його обмотках:

$$M_{\text{вр}} = kI_n \cdot I_n,$$

де I_n - струм у нерухливій котушці, А;

I_n - струм у рухливій котушці, А.

У ватметрі струм рухомої обмотки прямо пропорційний прикладеній напрузі

$$I_n = \frac{U}{R_n},$$

де R_n - опір рухливої котушки, Ом.

Отже, обертовий момент прямо пропорційний потужності. Тому електродинамічний ватметр має рівномірну шкалу, тобто

$$M_{\text{вр}} = K \cdot I_n \frac{U}{R_n} = k' \cdot P$$

Обертовий момент електродинамічного приладу, включеного в коло синусоїдального струму

$$M_{\text{вр}} = K \cdot I_n \cdot I_n \cos \varphi,$$

тобто показання ватметра пропорційні току, напрузі й $\cos \varphi$, тобто активній потужності кола P .

Ватметр має чотири затискачі, до однієї пари виводиться обмотка струму, до другої - обмотка напруги. Перша пара затискачів включається у вимірюваний коло послідовно, друга - паралельно. Початок обмоток позначається зірочками (*) і з'єднуються разом. Це необхідно, щоб струми в котушках пропускалися в певному напрямку.

На шкалі ватметра вказуються верхні границі вимірювання струму й напруги. Якщо, наприклад на шкалі ватметра позначене $I = 5$ А и $U = 100$ В, це значить, що верхня межа виміру ватметра $P = 500$ Вт, тобто їм можна вимірювати потужності до 500 Вт.

Очевидно, що ціна поділки ватметра дорівнює

$$c = \frac{P}{n} = \frac{IU}{n},$$

де n - число поділок шкали.

6 Електричні трансформатори

6.1 Загальні відомості

Електричний трансформатор - електромагнітний пристрій, що перетворює напругу й струм одного рівня в напругу й струм іншого рівня при незмінній частоті й малій втраті потужності.

Генератори електричних станцій виробляють електричну енергію при напрузі 6, 10, 15 кВ, тому що на більш високих напругах складно забезпечити надійну ізоляцію обмоток.

У той же час у лініях електропередачі застосовують напруги до 110, 220, 400, 500 кВ і більше, щоб зменшити силу струму в лінії, а значить і перетин проводів, що дозволяє різко знизити потужність втрат і вартість ліній електропередач.

Таким чином, необхідні *підвищувальні трансформатори*, що збільшують напругу генераторів електричних станцій до напруги ліній електропередач.

У місцях же споживання електричної енергії, на виробництві, у побуті і т.д. необхідні *знижувальні трансформатори*, щоб мати напруги 380, 220, 127 В і менші.

Електричні трансформатори мають високий коефіцієнт корисної дії, що доходить до 99 % і високу надійність, тому що не містять частин, що рухаються.

Винайшов електричний трансформатор в 1876 році П.Н. Яблочков, який при розробці електричного освітлення зустрівся з необхідністю забезпечити автономну роботу декількох світильників з різною напругою від одного генератора.

В 1891 році М.О. Доливо-Добровольским була розроблена конструкція першого *трифазного електричного трансформатора*, після чого застосування електротрансформатора стало різко зростати.

Найпростіший однофазний електричний трансформатор (рис. 6.1) складається із двох обмоток, розміщених на феромагнітному магнітопроводі, що набраний з ізольованих один від одного листів електротехнічної сталі товщиною 0.3-0.5 мм, з метою зменшення втрат на вихрові струми (втрат у сталі) P_c .

Обмотка, що підключається до джерела електричної енергії (генератора) або до лінії електропередач (електричної мережі) називається *первинною (вхідною)*. Обмотка, до якої підключається приймач електричної енергії – *вторинною (вихідною)*.

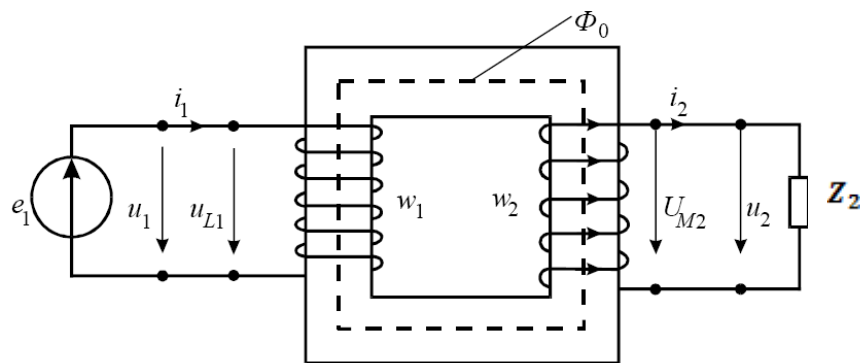


Рис. 6.1. Схема електричного кола із трансформатором

На щитку електричного трансформатора вказуються:

- висока і низька номінальні напруги $U_{1н}$ і $U_{2н}$;
- номінальна повна потужність $S_{н} = U_{1н} \cdot I_{1н}$, ВА або кВА;
- частота f (Гц);

- струми в первинній і вторинній ($I_{1н}, I_{2н}$) обмотках при номінальній потужності;
- коефіцієнт трансформації K ;
- число фаз;
- схема з'єднань обмоток (зірка або трикутник) у випадку трифазного електричного трансформатора;
- режим роботи (тривалий або короткочасний);
- спосіб охолодження (масляний, повітряний).

6.2 Принцип дії електричного трансформатора

Дія трансформатора заснована на явищі електромагнітної індукції (рис. 6.1).

При подачі від джерела електричної енергії напруги u_1 на первинну обмотку електричного трансформатора в ній виникає струм i_1 , збуджуючий у магнітопроводі змінний магнітний потік Φ_1 , який, пронизуючи витки w_1 первинної обмотки, створює в ній напругу u_{L1} у результаті явища самоіндукції.

Відповідно до закону електромагнітної індукції ця напруга визначається по формулі

$$u_{L1} = w_1 \Phi_1', \quad (6.1)$$

де $\Phi_1' = \frac{d\Phi_1}{dt}$ – похідна магнітного потоку за часом.

Якщо $\Phi_1 = \Phi_{m1} \sin \omega t$, то

$$\Phi_1' = w_1 \Phi_{m1} \cos \omega t = w_1 \Phi_{m1} \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Отже

$$u_{L1} = U_{mL1} \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (6.2)$$

де $U_{mL1} = \omega w_1 \Phi_{m1} = w_1 2\pi f \Phi_{m1}$ - амплітуда напруги самоіндукції в первинній обмотці електричного трансформатора.

Діюче значення напруги u_{L1} дорівнює

$$U_{L1} = \frac{U_{mL1}}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 \Phi_{m1}, \quad (6.3)$$

У вторинній обмотці в результаті явища взаємної індукції магнітний потік Φ_1 створює напруга u_{M2} , що діє значення, який дорівнює

$$U_{M2} = 4,44 f w_2 \Phi_{m1}. \quad (6.4)$$

Якщо до кінців вторинної обмотки приєднаний приймач електричної енергії Z_2 (рис. 6.1), то під дією напруги u_{M2} в вторинній обмотці потече струм i_2 , що у свою чергу збуджує магнітний потік Φ_2 , спрямований відповідно до закону Ленца протилежно магнітному потоку Φ_1 .

У результаті результуючий магнітний потік у магнітопроводі

$$\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (6.5)$$

зменшиться, що приведе до зменшення напруги u_{L1} .

Однак напруга u_{L1} не може бути менше певного значення, обумовленого у відповідності з II законом Кірхгофа

$$u_1 = u_{L1} + u_{LS_1} + u_{R1}, \quad (6.6)$$

де u_{LS_1}, u_{R1} - напруги в первинній обмотці, що виникають у результаті наявності резистивного опору й магнітного потоку розсіювання в цій обмотці.

Таким чином, струм у первинній обмотці зростає до такого значення, при якому результуючий магнітний потік Φ_0 індукує необхідне значення u_{L1} , що відповідає рівнянню (6.6) і заданому навантаженню Z_2 .

В усталеному режимі роботи електричного трансформатора має місце співвідношення

$$i_1 w_1 - i_2 w_2 = i_{1x} w_1 \quad (6.7)$$

де $i_1 w_1$ - сила, що намагнічує, первинної обмотки;

$i_2 w_2$ - магніторушійна сила (МРС) вторинної обмотки;

i_{1x} - струм холостого ходу.

Струм i_{1x} також називають струмом намагнічування, тому що він визначає значення результуючого магнітного потоку Φ_0 .

У зв'язку з вищевикладеним очевидно, що результуючий (сумарний) магнітний потік у магнітопроводі електричного трансформатора в режимі навантаження дорівнює магнітному потоку первинної обмотки трансформатора в режимі холостого ходу.

6.3 Робота електричного трансформатора в режимі холостого ходу

Режим холостого ходу - такий режим роботи електричного трансформатора, при якому його вторинний коло розімкнутий, і струм у ній дорівнює нулю ($i_2 = 0$).

Під дією прикладеної напруги u_1 по первинній обмотці протікає струм i_{1x} , що збуджує в магнітопроводі магнітне поле Φ_0 .

Більша частина магнітного потоку замикається в магнітопроводі. Однак невелика частина цього потоку замикається навколо витків тільки первинної обмотки, створюючи потік розсіювання Φ_S , і не індукує напругу взаємодукції u_{M2} у вторинній обмотці.

У первинній обмотці Φ_0 індукується напруга

$$u_{S1} = 2\pi f L_{S1} i_{1x} = x_{LS1} i_{1x}, \quad (6.8)$$

де L_{S1} - індуктивність розсіювання первинної обмотки електричного трансформатора;

x_{LS1} - індуктивний опір розсіювання цієї обмотки.

Крім того, у первинній обмотці присутній резистивний опір R_1 . На рис. 6.2 представлена схема заміщення електричного трансформатора з обліком резистивних опорів R_1 і R_2 первинної й вторинної обмоток і їхніх індуктивностей розсіювання L_{S1} і L_{S2} .

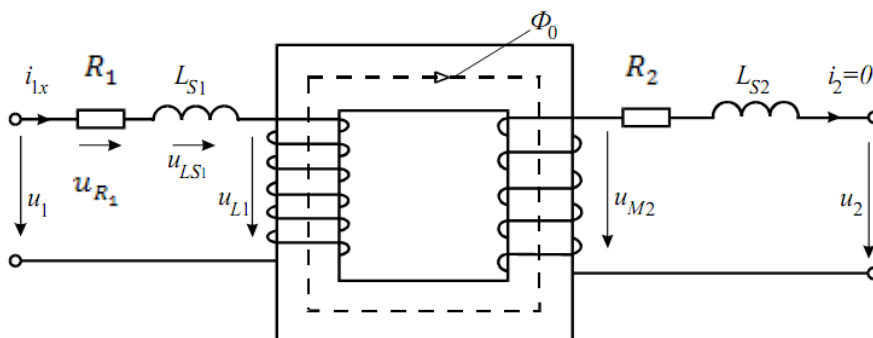


Рис. 6.2. Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

Складемо рівняння для первинного кола по II законі Кірхгофа в комплексній формі

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_{1x} R_1 + \dot{U}_{LS1} + \dot{U}_{L1}. \quad (6.9)$$

На рис. 6.3 представлена векторна діаграма напруг і струмів, побудована відповідно до (6.9).

Дослідом холостого ходу називається випробування електричного трансформатора при розімкненому колі вторинної обмотки й номінальному прикладеному до первинної обмотки напрузі $U_{1x} = U_{1н}$.

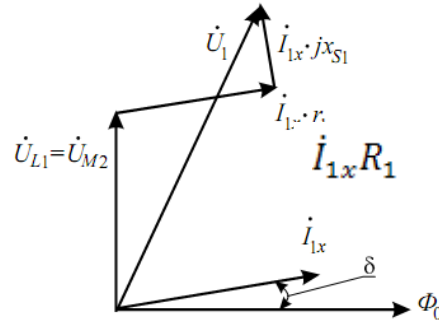


Рис. 6.3. Векторна діаграма напруг і струму трансформатора в режимі холостого ходу
Для проведення досвіду холостого ходу збирається електричне коло відповідно до схеми рис. 6.4.

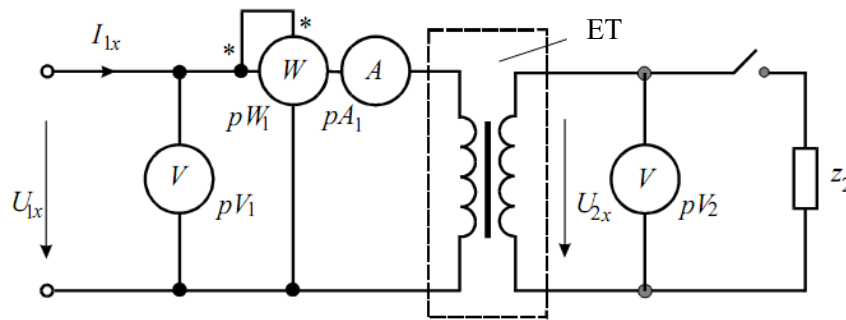


Рис. 6.4. Схема електричного кола для проведення досвіду холостого ходу трансформатора

При $U_{1x} = U_{1н}$ струм I_{1x} становить 3...10 % від номінального первинного струму $I_{1н}$. Отже, у формулі (6.9) доданками $\dot{U}_{LS1} = jx_{S1} \cdot \dot{I}_{1x}$ та $\dot{U}_{R1} = R_1 \cdot \dot{I}_{1x}$ можна зневажити. Тоді маємо:

$$\dot{U}_{1x} = \dot{U}_{L1}. \quad (6.10)$$

При розімкненому ланцюзі вторинної обмотки

$$U_{2x} = U_{M2}. \quad (6.11)$$

Тому, вимірявши вольтметром $PV1$ первинну напруга U_{1x} і вольтметром $PV2$ - вторинну напруга U_{2x} , визначають коефіцієнт трансформації

$$K = \frac{U_{M2}}{U_{L1}} \approx \frac{U_{2x}}{U_{1x}} = \frac{w_2}{w_1}. \quad (6.12)$$

Цей коефіцієнт вказується на щитках електричних трансформаторів як відношення вищої напруги до нижчого (наприклад, $K = 6000 / 230$).

При холостому ході $I_{1x} \ll I_{1н}$ і потужність втрат у проводах первинної обмотки (втрати в міді) P_{M1} мала в порівнянні із втратами на вихрові струми (втрати в сталі) P_c .

Тому в досвіді холостого ходу за показниками ватметра pW визначають потужність втрат у магнітопроводі.

6.4 Дослід короткого замикання

Необхідно розрізнити *досвід короткого замикання* й *режим короткого замикання*, тому що в останньому випадку має місце аварійний режим електричного трансформатора, при якому він сильно розігрівається й може відбутися загоряння трансформатора.

Дослід короткого замикання – випробування електричного трансформатора при короткозамкненому колі вторинної обмотки й номінальному струмі в первинній обмотці

$$I_{1k} = I_{1н}. \quad (6.13)$$

Цей дослід проводиться при атестації електричного трансформатора для визначення найважливіших параметрів:

- втрат потужності у проводах обмоток (втрати в міді) P_M ;
- внутрішнього спадання напруги;
- коефіцієнта трансформації й ін.

Досвід короткого замикання (рис. 6.5), як і досвід холостого ходу, обов'язковий при заводських випробуваннях.

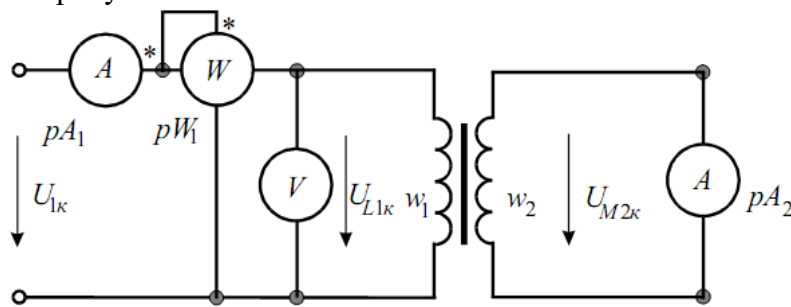


Рис. 6.5. Схема електричного кола для проведення досвіду короткого замикання трансформатора

У досліді короткого замикання ($U_2 = 0$) напруга U_{M2k} , що індукується у вторинній обмотці дорівнює

$$\dot{U}_{M2k} = \dot{I}_{2k} R_2 + jx_{S2} \dot{I}_{2k}, \quad (6.14)$$

де $I_{2k} \cdot R_2$ – напруга на резистивному опорі вторинної обмотки;

$x_{S2} \cdot I_{2k}$ – напруга на індуктивному опорі розсіювання вторинної обмотки.

Напруга первинної обмотки в досліді короткого замикання U_{1k} при струмі $I_{1k} = I_{1н}$ становить 5-10 % від номінального $U_{1н}$. Тому діюче значення напруги індукції U_{M2k} становить лише 2-5 % від діючого значення U_{M2} у робочому (номінальному) режимі.

Пропорційно значенню U_{M2} зменшується магнітний потік Φ_0 у магнітопроводі, а разом з ним і потужність втрат у магнітопроводі P_c , яка пропорційна Φ_0^2 .

Отже, у досліді короткого замикання майже вся потужність трансформатора P_{1k} дорівнює потужності втрат у проводах первинної й вторинної обмоток (втрати в міді):

$$P_{1k} = I_{1k}^2 R_1 + I_{2k}^2 R_2 \approx P_M. \quad (6.15)$$

Значення цієї потужності визначається за показниками ватметра $pW1$ (рис. 6.5). I_{1k} і I_{2k} - струми в досвіді короткого замикання відповідних обмоток трансформатора, обумовлені за показниками амперметрів $pA1$ і $pA2$.

При короткому замиканні в рівнянні (6.7) складова $I_{1x} \cdot w_1$ мізерно мала, у порівнянні із двома іншими тридцятимільйонними, і нею можна зневажити, отже

$$w_1 \cdot I_{1k} \approx w_2 \cdot I_{2k},$$

і коефіцієнт трансформації

$$K = \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{I_{1k}}{I_{2k}},$$

Таким чином, дослід короткого замикання може служити для визначення коефіцієнта трансформації K .

6.5 Потужність втрат у трансформаторі

Відношення активної потужності P_2 на виході трансформатора до активної потужності P_1 на вході

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{або} \quad \eta(\%) = \left(\frac{P_2}{P_1}\right) \cdot 100\%$$

називається коефіцієнтом корисної дії трансформатора. Коефіцієнт корисної дії трансформатора залежить від режиму роботи.

При номінальних значеннях напруги $U_1 = U_{1н}$ і струму $I_1 = I_{1н}$ первинної обмотки трансформатора й коефіцієнті потужності приймача $\cos \varphi_2 > 0,8$ коефіцієнт корисної дії дуже високий (в потужних електричних трансформаторах він перевищує 99 %).

Із цієї причини не застосовується пряме визначення коефіцієнта корисної дії трансформатора на підставі безпосереднього вимірювання потужностей P_1 і P_2 , тому що для одержання задовільних результатів потрібно було б вимірювати потужності P_1 і P_2 з дуже високою точністю (понад 1 %), що практично важко одержати.

Але відносно просто можна визначити коефіцієнт корисної дії методом непрямого вимірювання, заснованого на прямому вимірюванні потужності втрат у трансформаторі.

У зв'язку з тим, що потужність втрат $\Delta P = P_1 - P_2$, коефіцієнт корисної дії трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}.$$

Потужність втрат в електричних трансформаторах дорівнює сумі потужностей втрат у магнітопроводі P_c (втрати в сталі) і в проводах обмоток P_M (втрати в міді).

При номінальних значеннях первинних напруг $U_1 = U_{1н}$ і струму $I_1 = I_{1н}$ потужності втрат у магнітопроводі й проводах обмоток практично дорівнюють активним потужностям трансформатора в досвідах холостого ходу й короткого замикання відповідно.

6.6 Автотрансформатори

У ряді випадків при передачі електроенергії потрібно з'єднати через трансформатор електричні кола, відношення номінальних напруг яких не перевищує два, наприклад кола високої напруги 110 й 220 кВ.

У подібних випадках економічно доцільно замість електротрансформатора застосувати автотрансформатор, тому що його коефіцієнт корисної дії вище, а габарити менше, ніж в електротрансформатора тієї ж номінальної потужності.

Автотрансформатор відрізняється від електротрансформатора тим, що має лише одну обмотку - обмотку вищої напруги, а обмоткою нижчої напруги служить частина обмотки вищої напруги (рис. 6.6).

Обмотка вищої напруги автотрансформатора може бути первинною (рис. 6.6,а) або вторинною (рис. 6.6,б).

Напруги й струми автотрансформатора зв'язані тими ж наближеними співвідношеннями, що й в електротрансформаторі, якщо знехтувати резистивними опорами обмоток ($R_1 = R_2 = 0$) і індуктивними опорами потоків розсіювання ($X = X_{LS2} = 0$)

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{I_1}{I_2}.$$

Струм у спільній частині обмотки дорівнює різниці вторинного I_2 і первинного I_1 струмів (рис. 6.6).

Якщо коефіцієнт трансформації лише небагато відрізняється від одиниці, то діючі значення струмів I_2 і I_1 та їхні фази майже однакові і їхня різниця ($I_2 - I_1$) мала в порівнянні з кожним з них.

Тому спільну частину первинної й вторинної обмоток можна зробити зі значно більше тонкого проведення, тобто вартість обмотки автотрансформатора менше, ніж обмоток електротрансформатора й для її розміщення потрібно менше місця.

Розрахункова повна потужність спільної частини обмотки автотрансформатора

$$S' \approx U_2(I_2 - I_1) \approx U_2 I_2 \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right).$$

Розрахункова повна потужність іншої частини обмотки

$$S'' \approx I_1(U_1 - U_2) \approx U_1 I_1 \left(1 - \frac{w_2}{w_1}\right).$$

З урахуванням рівності $U_2 \cdot I_2 \approx U_1 \cdot I_1$, виходить що $S' \approx S'' \approx S_{ам}$.

Розрахункова повна потужність кожної з обмоток звичайного трансформатора

$$S_T \approx I_2 U_2 \approx U_1 I_1.$$

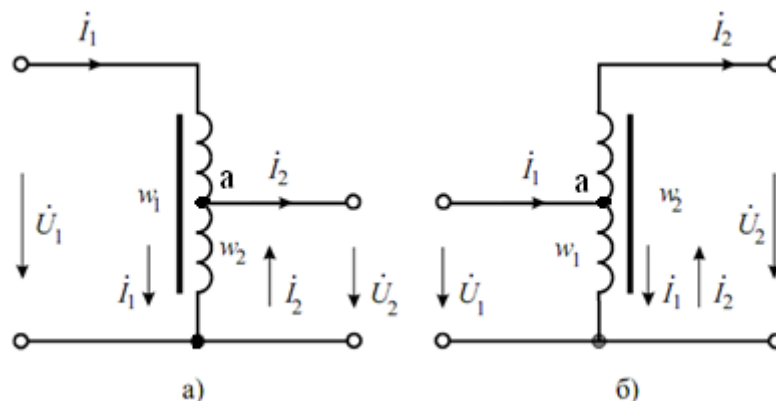


Рис. 6.6. Схема автотрансформаторів з первинною обмоткою вищої напруги (а) і первинною обмоткою нижчої напруги (б)

Отже, при одній і тій же повній потужності в опорі навантаження вірне наступне співвідношення між розрахунковими повними потужностями автотрансформатора й електротрансформатора

$$\frac{S_{AT}}{S_{ET}} = 1 - \frac{w_2}{w_1},$$

тобто чим менше різняться числа витків w_2 і w_1 (коефіцієнт трансформації K близький до одиниці), тим вигідніше застосовувати автотрансформатор.

Оскільки первинне і вторинне кола автотрансформатора електрично з'єднані, то при високій напрузі на первинній стороні й великому коефіцієнті трансформації (наприклад, $K = 6000 \text{ В}/220 \text{ В}$), при користуванні вторинною напругою необхідно вживати додаткових заходів до забезпечення безпеки й посилення ізоляції вторинного електричного кола.

Широке застосування знаходять лабораторні малопотужні автотрансформатори (ЛАТри), що дозволяють шляхом зміни положення точки a (рис. 6.6.) регулювати вторинну напругу.

7 Електричні машини

7.1 Загальні відомості

Електрична машина - електромагнітний пристрій, що складається зі статора й ротора, і перетворює механічну енергію в електричну (генератори) або електричну в механічну (електричні двигуни).

Принцип дії електричних машин заснований на законах електромагнітної індукції, Ампера і явищі обертового магнітного поля.

Відповідно до закону електромагнітної індукції, відкритому М. Фарадеєм в 1831 р., у провіднику, що поміщен у магнітне поле й рухається відносно нього зі швидкістю V наводиться ЕРС E , напрямком якої визначається правилом правої руки (рис. 7.1).

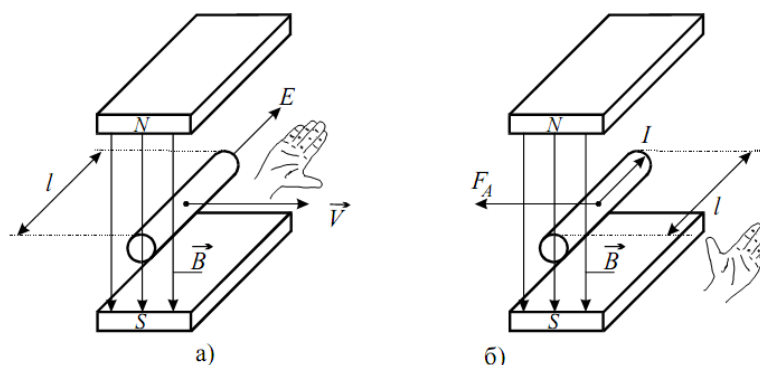


Рис. 7.1. Ілюстрація до закону електромагнітної індукції (а), і закону Ампера (б)

Якщо провідник довжиною l рівномірно рухається перпендикулярно силовим лініям магнітного поля, то значення наведеної в провіднику ЕРС дорівнює

$$E = VB l, \quad (7.1)$$

де B - індукція магнітного поля.

Відповідно до закону Ампера на провідник зі струмом I , поміщений у магнітне поле, діє сила, напрямком якої визначається правилом лівої руки, а значення - формулою:

$$F_A = IB l, \quad (7.2)$$

де напрямок струму I , магнітної індукції \vec{B} и сили \vec{F}_A взаємно перпендикулярні.

7.2 Обертове магнітне поле

Важливою перевагою трифазного струму є можливість одержання обертового магнітного поля, що лежить в основі принципу дії електричних машин - асинхронних і синхронних двигунів трифазного струму.

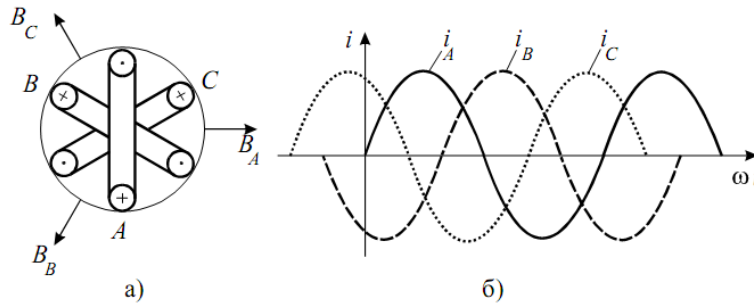


Рис. 7.2. Схема розташування котушок при одержанні обертового магнітного поля (а) і часова діаграма трифазної симетричної системи струмів, що протікають по котушках (б)

Обертове магнітне поле одержують, пропускаючи трифазну систему струмів (рис. 7.2,б) по трьох однакових котушках A, B, C (рис. 7.2,а), осі яких розташовані під кутом 120° відносно один одного.

На рис. 7.2,а показані позитивні напрямки струмів у котушках і напрямку індукцій магнітних полів B_A, B_B, B_C , створюваних кожної котушок окремо.

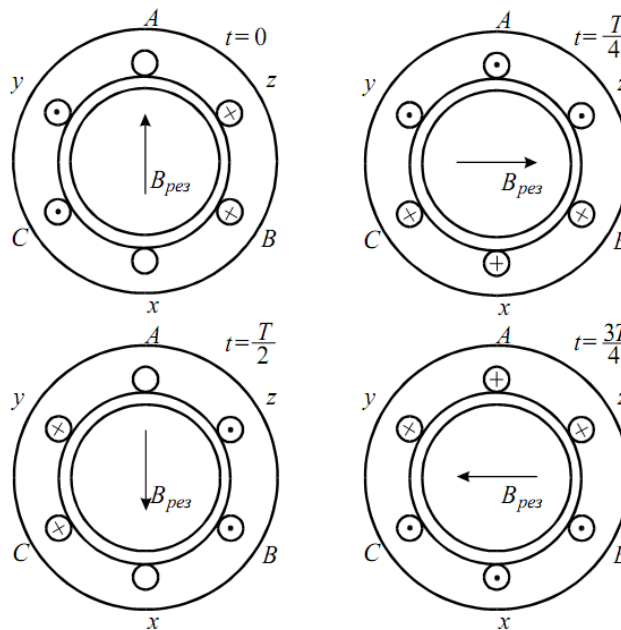


Рис. 7.3. Напрямок індукції обертового магнітного поля в різні моменти часу

На рис. 7.3 показані дійсні напрямки струмів для моментів часу $t = 0; t = \frac{T}{4}; t = \frac{T}{2}; t = \frac{3T}{4}$ та напрямлення індукції результуючого магнітного поля $B_{рез}$, створюваного трьома котушками.

Аналіз малюнка 7.3 дозволяє зробити такі висновки:

- індукція $B_{рез}$ результуючого магнітного поля із плином часу міняє свій напрямок (обертається);
- частота обертання магнітного поля така ж, як і частота зміни струму. Так, при $f = 50$ Гц обертове магнітне поле робить п'ятдесят обертів у секунду або три тисячі обертів у хвилину.

Значення індукції результуючого магнітного поля постійно:

$$B_{рез} = 1,5B_m,$$

де B_m – амплітуда індукції однієї котушки.

7.3 Асинхронні машини

7.3.1 Принцип дії асинхронного двигуна (АД).

Помістимо між нерухомими котушками (рис. 7.4) в області обертового магнітного поля укріплений на осі рухливий металевий циліндр - ротор.

Нехай магнітне поле обертається «за годинниковою стрілкою», тоді циліндр щодо обертового магнітного поля обертається у зворотному напрямку.

З огляду на це, за правилом правої руки знайдемо напрямки наведених у циліндрі струмів.

На рис. 7.4 напрямки наведених струмів (уздовж утворюючої циліндра) показані хрестиками («від нас») і крапками («до нас»).

Застосовуючи правило лівої руки (рис. 7.4,б) одержуємо, що взаємодія наведених струмів з магнітним полем породжує сили F , що приводять в обертовий рух ротор у тім же напрямку, у якому обертається магнітне поле.

Частота обертання ротора ω_p менша від частоти обертання магнітного поля ω , тому що при однакових кутових швидкостях відносна швидкість ротора й обертового магнітного поля дорівнювала б нулю і в роторі не було б наведених ЕРС і струмів. Отже, не було б сил F , що створюють обертаючий момент. Розглянутий найпростіший пристрій пояснює принцип дії асинхронних двигунів. Слово «асинхронний» (грецькою) означає неодноразовий. Цим словом підкреслюється розходження в частотах обертового магнітного поля й ротора - рухомої частини двигуна.

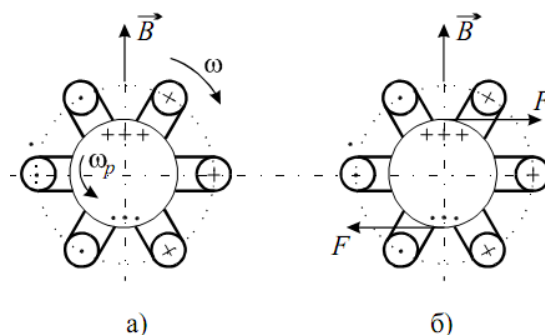


Рис. 7.4. До принципу дії асинхронного двигуна

Обертове магнітне поле, створюване трьома котушками, має два полюси й називається двухполюсним обертовим магнітним полем (одна фаза полюсів).

За один період синусоїдального струму двухполюсне магнітне поле робить один оберт. Отже, при стандартній частоті $f = 50$ Гц це поле робить три тисячі обертів у хвилину. Швидкість обертання ротора дещо менша від цієї синхронної швидкості.

У тих випадках, коли потрібний асинхронний двигун з меншою швидкістю, застосовується багатополюсна обмотка статора, яка складається із шести, дев'яти й т.д. котушок. Відповідно обертове магнітне поле буде мати дві, три й т.д. пари полюсів.

У загальному випадку, якщо поле має p пар полюсів, то його швидкість обертання

$$n = \frac{60f}{p}, \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

7.3.2 Будова асинхронного двигуна.

Магнітна система (магнітопровід) асинхронного двигуна складається із двох частин: зовнішньої нерухомої, що має форму порожнього циліндра і внутрішньої - обертового циліндра (рис. 7.5).

Обидві частини асинхронного двигуна збираються з аркушів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм. Ці аркуші для зменшення втрат на вихрові струми ізолюються один від друга шаром лаку.

Нерухлива частина машини називається статором, а обертова – ротором (від латинського stare – стояти й rotate – обертатися).

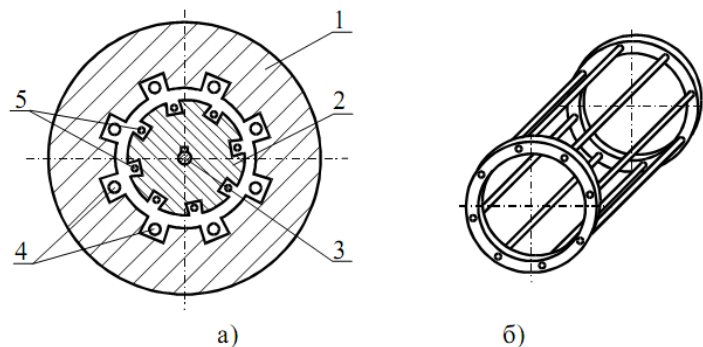


Рис. 7.5 - Схема пристрою асинхронного двигуна:
поперечний розріз (а); обмотка ротора(б)
1 - статор; 2 - ротор; 3 - вал; 4 - витки обмотки статора;
5 - витки обмотки ротора

У пазах із внутрішньої сторони статора покладена трифазна обмотка, струми якої збуджують обертове магнітне поле машини. У пазах ротора розміщена друга обмотка, струми в якій індукуються обертовим магнітним полем.

Магнітопровід статора укладений у масивний корпус, що є зовнішньою частиною машини, а магнітопровід ротора укріплений на валу.

Ротори асинхронних двигунів виготовляються двох видів: короткозамкнені й з контактними кільцями. Перші з них простіші по будові пристрою й частіше застосовуються.

Обмотка короткозамкненого ротора являє собою циліндричну клітку («біляче колесо») з мідних шин або алюмінієвих стрижнів, замкнених накоротко на торцях двома кільцями (рис. 7.5,б). Стрижні цієї обмотки вставляються без ізоляції в пази магнітопроводу.

Застосовується також спосіб заливання пазів магнітопроводу ротора розплавленим алюмінієм з одночасною відливкою і замикаючих кілець.

7.3.3 Характеристики асинхронного двигуна.

Швидкість обертання обертового магнітного поля визначається або кутовою частотою ω , або числом обертів n у хвилину. Ці дві величини зв'язані формулою

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} \quad (7.6)$$

Характерною величиною є відносна швидкість обертового магнітного поля, називана *ковзанням*

$$s = \frac{\omega - \omega_p}{\omega} \text{ або } s = \frac{n - n_p}{n},$$

де ω_p - кутова частота ротора, рад/с;

n_p - число обертів у хвилину, об/хв.

Чим ближче швидкість ротора n_p до швидкості обертового магнітного поля n , тим менше ЕРС, що індукуються полем у роторі, а, отже, і струми в роторі.

Убування струмів зменшує обертаючий момент $M_{\text{вп}}$, що впливає на ротор, тому ротор двигуна повинен обертатися повільніше обертового магнітного поля - асинхронно.

При збільшенні механічного навантаження асинхронного двигуна гальмуючий момент на валу стає більше обертаючого й ковзання s зростає.

Збільшення ковзання викликає зростання ЕРС і струмів в обмотці ротора, завдяки чому збільшується обертаючий момент $M_{\text{вп}}$ і відновлюється динамічна рівновага обертаючого $M_{\text{вп}}$ і гальмуючого M_m моментів:

$$M_{\text{вп}} = M_m = M.$$

Таким чином, збільшення навантаження асинхронного двигуна викликає збільшення його ковзання.

У сучасних асинхронних двигунів ковзання навіть при повному навантаженні відносно невелике - близько 0,04 (чотири відсотки) у малих і близько 0,015-0,02 (півтора-два відсотки) у великих двигунів.

Характерна крива залежності M від ковзання s показана на рис. 7.6,а.

Максимум обертового моменту розділяє криву $M = f(s)$ на стійку частину від $s = 0$ до s_k і нестійку частину від s_k до $s = 1$, у межах якої обертаючий момент зменшується з ростом ковзання.

На ділянці від $s = 0$ до s_k при зменшенні гальмуючого моменту M_m на валу асинхронного двигуна збільшується швидкість обертання, ковзання зменшується, так що на цій ділянці робота асинхронного двигуна стійка.

На ділянці від s_k до $s = 1$ зі зменшенням M_m швидкість обертання збільшується, ковзання зменшується й обертаючий момент збільшується, що приводить до ще більшого зростання швидкості обертання, так що робота двигуна нестійка.

Таким чином, поки гальмуючий момент $M_m < M_{\text{max}}$, динамічна рівновага моментів автоматично відновлюється. Коли ж $M_m > M_{\text{max}}$, при подальшому збільшенні навантаження зростання ковзання приводить до зменшення обертового моменту M і двигун зупиняється внаслідок переваги гальмуючого моменту над обертаючим.

Для практики велике значення має залежність швидкості двигуна n_p від навантаження на валу $n_p = F(M)$. Ця залежність зветься *механічною характеристикою* (рис. 7.6,б).

Як показує крива малюнка 7.6,б, швидкість асинхронного двигуна лише незначно знижується при збільшенні обертаючого моменту в межах від нуля до максимального значення M_{max} . Таку залежність називають жорсткою.

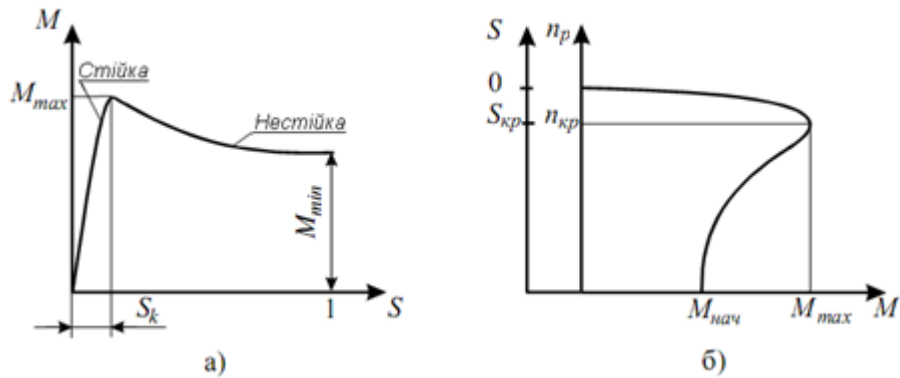


Рис. 7.7 - Залежність обертаючого моменту на валу асинхронного двигуна від ковзання (а) і механічна характеристика (б)

Механічна характеристика асинхронного двигуна може бути представлена як залежність $M(s)$:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_{kp}} + \frac{s_{kp}}{s}}, \quad (7.7)$$

При перевантаженні понад максимальний момент M_{max} двигун входить в область нестійкого режиму й зупиняється.

Асинхронні двигуни одержали широке поширення завдяки наступним достоїнствам:

- простоті пристрою;
- високої надійності в експлуатації;
- низької вартості.

За допомогою асинхронних двигунів приводяться в рух підйомні крани, лебідки, ліфти, ескалатори, насоси, вентилятори й інші механізми.

Як недоліки асинхронних двигунів слід зазначити таке:

- струм при пуску асинхронного двигуна в 5-7 разів перевищує струм у номінальному режимі $I_n = (5-7)I_n$;
- пусковий обертаючий момент відносно моменту в номінальному режимі незначно більший $M_n = (1,2 - 1,6)M_n$;
- регулювання швидкості обертання ротора утруднено.

7.4 Машини постійного струму

7.4.1 Загальні поняття про будову машин постійного струму й принципи їхньої дії

У машині постійного струму нормального виконання циліндричний ротор з розташованою на ньому обмоткою, який називається якорем, обертається в нерухомому магнітному полі (рис. 7.7). У витках 1-3 і 2-4 обмотки якоря indukуються змінні ЕРС, для одержання незмінного напрямку струму і в опорі навантаження \square застосовується колектор К, що складається з мідних ізольованих друг від друга пластин, що утворюють циліндр, по якому скочають щітки а - б . Наявність колектора є відмінною рисою машини постійного струму. До його пластин приєднуються початки й кінці витків

обмотки. Сторони витків, розташовані за площиною малюнка, умовно показані штриховими лініями.

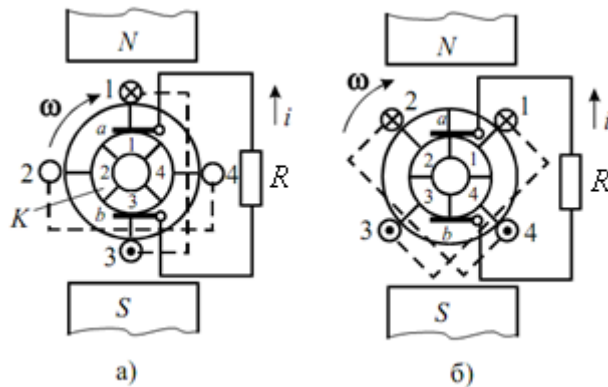


Рис. 7.8. Найпростіший генератор із двома витками й чотирма колекторними пластинами

У положенні, показаному на рис. 7.8, а, між щітками буде максимальна ЕРС, тому що сторони 1–3 витки перетинають магнітні лінії перпендикулярно. При подальшому обертанні ця ЕРС почне зменшуватись. Після повороту якоря на 45° (рис. 7.8,б) щітки перейдуть із пластин 1–3 колектори на пластини 2–4 і підключаться до наступного витка. ЕРС у ньому буде спочатку зростати до максимуму, а потім почне зменшуватись, поки щітки знову не перейдуть на пластини 3-1; ЕРС знову почне зростати й т.д. Ріст і зменшення ЕРС відбуваються за час, що відповідає повороту якоря на кут $\frac{\pi}{2}$ (рис. 7.9), протягом цього часу кожна щітка торкається однієї й тієї ж колекторної пластини.

Пулсації ЕРС (і токи) шкідливо позначаються на роботі приймачів і самого генератора. Для їхнього зменшення збільшують число витків, у котрих індукується ЕРС, і число колекторних пластин.

Відповідно до принципу оборотності машина постійного струму може працювати як генератор і як двигун. У кожному разі провідники перетинають лінії поля й у них виникає ЕРС.

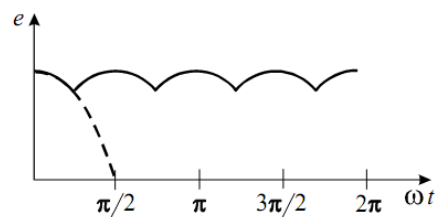


Рис. 7.9. ЕРС генератора з чотирма колекторними пластинами

Одночасно на провідники зі струмом у магнітному полі впливають електромагнітні сили.

Генератор перетворює механічну енергію, що підводить до вала первинним двигуном, в електричну, споживану приймачем, підключеним до його затискачів. Механічна сила F первинного двигуна (рис. 7.10,а) приводить провідники якоря в рух з деякою швидкістю v . Виникаюча ЕРС E викликає струм I такого ж напрямку й повинна перебороти спадання напруги в обмотці якоря й опір навантаження:

$$E = U + I \cdot R_{\text{я}},$$

де U - напруга на затискачах генератора або приймача;

$R_{\text{я}}$ - опір кола якоря.

Електромагнітна сила $F_{\dot{a}}$ діюча на провідники зі струмом, створює протидію силі F первинного двигуна. В усталеному режимі при постійній швидкості ці сили рівні:

$$F_{\dot{a}} = F.$$

Механічна потужність, що розвивається первинним двигуном,

$$P_{\text{мех}} = F \cdot v = F_{\text{мех}} \cdot v = P_{\text{ем}}. \quad (7.8)$$

перетвориться в електромагнітну потужність генератора $P_{\text{ем}}$. Остання частково витрачається на нагрівання обмотки якоря, а та її частина, що залишається, становить електричну *потужність* $P_{\text{ел}}$, споживану приймачем ($P_{\text{ем}} = UI$)

$$P_{\text{ем}} = EI = (U + I \cdot R_{\text{я}}) \cdot I = P_{\text{ел}} + I^2 R_{\text{я}}. \quad (7.9)$$

У двигуні протікання струму в обмотці якоря обумовлено прикладеною напругою U , напрямком якого збігається з напрямком струму (рис. 7.10,б). На провідники зі струмом діє електромагнітна сила $F_{\text{эм}}$, що приводить у рух якір зі швидкістю v . При тому ж напрямку струму, що й у генераторі, напрямком руху буде протилежним. Виникаюча в провідниках при перетинанні ліній поля ЕРС виявляється протилежною струму, а, отже, і напрузі U , що повинна перебороти цю ЕРС і спадання напруги в обмотці якоря:

$$U = E + I \cdot R_{\text{я}}. \quad (7.10)$$

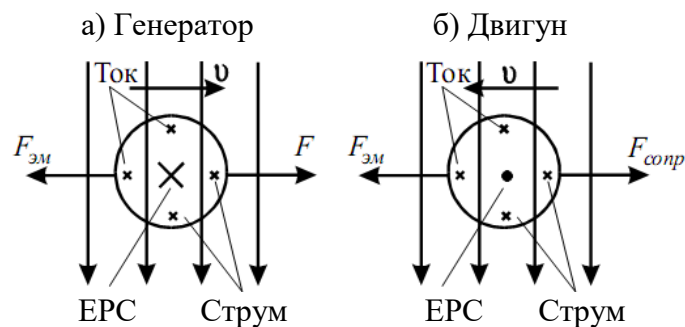


Рис. 7.10. ЕРС, струми й механічні сили в провіднику обмотки якоря генератора й двигуна постійного струму

При постійній швидкості електромагнітна сила повинна переборювати силу опору $F_{\text{опор}}$ на валу двигуна. Електрична потужність, споживана двигуном з мережі,

$$P_{\text{ел}} = UI = EI + I^2 R_{\text{я}} = P_{\text{ем}} + I^2 R_{\text{я}} \quad (7.11)$$

частково йде на нагрівання обмотки якоря. Залишившася її частина являє собою електромагнітну потужність, що виявляється рівною механічній потужності, що розвивається двигуном на валу:

$$P_{\text{ем}} = EI = F_{\text{эм}} v = F_{\text{опор}} v P_{\text{мех}} \quad (7.12)$$

Отримані вирази можна об'єднати:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{ел}} \pm I^2 R_{\text{я}}; \quad E = U \pm I^2 R_{\text{я}}. \quad (7.13)$$

(знак “плюс” береться для генератора, “мінус” - для двигуна).

7.4.2 ЕРС обмотки якоря й електромагнітний момент.

Зразкова крива розподілу індукції в повітряному зазорі під одним полюсом показана на рис. 7.11. За краями наконечника полюса індукція різко зменшується й стає рівної нулю посередині між полюсами. Потік одного полюса

$$\Phi_0 = \int B ds = \int_{x=0}^R B l dx = B_{cp} l \tau, \quad (7.14)$$

де l - довжина полюса в осьовому напрямку;

B_{cp} - середнє значення індукції в зазорі в межах одного полюсного поділу.

Середнє значення ЕРС індукується в одному провіднику обмотки якоря, який рухається з лінійною швидкістю v , дорівнює

$$E_{cp} = B_{cp} l v = \frac{v}{t} \Phi_0$$

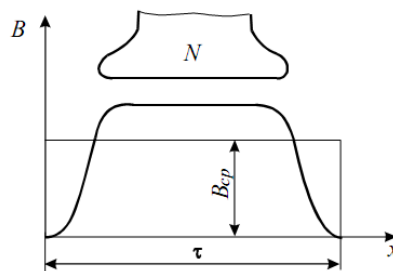


Рис. 7.11. Розподіл магнітної індукції під полюсом

Якщо загальне число провідників якоря дорівнює N , то в одній паралельній галузі послідовно з'єднане $\frac{N}{2a}$ провідників, де a - число пар паралельних віток.

Тому ЕРС. машини визначається виразом

$$E = \frac{N}{2a} E_{cp} = \frac{N v}{2a t} \Phi_0,$$

Лінійну швидкість v й полюсний розподіл τ можна виразити через діаметр якоря

D :

$$v = \frac{\omega D}{2}; \quad \tau = \frac{\pi D}{2p},$$

де ω - частота обертання якоря;

p - число пар полюсів.

З урахуванням цих відносин одержуємо

$$E = \frac{p \omega N}{2\pi a} \Phi_0. \quad (7.15)$$

У виготовленій машині значення p , N і a постійні, тому

$$E = k \omega \Phi_0. \quad (7.16)$$

Струм i_a у будь-якому провіднику обмотки якоря дорівнює току в одній паралельній вітці:

$$i_a = \frac{I}{2a}, \quad (7.17)$$

де I - струм, який споживається двигуном або віддається генератором.

Середнє значення електромагнітної сили, що діє на провідник,

$$f_{cp} = B_{cp} l i_a.$$

Електромагнітний момент (у ньютон-метрах), що розвивається всіма провідниками обмотки якоря,

$$M_{\text{ем}} = f_{\text{ср}} N \frac{D}{2} = B_{\text{ср}} l i_a N \frac{D}{2} = k \Phi_0 I. \quad (7.18)$$

7.4.3 Електричні двигуни постійного струму.

Якщо збудити машину постійного струму й підключити якір до мережі, вона починає працювати двигуном. Двигуни працюють, як правило, при незмінній напрузі мережі. Лише в спеціальних випадках, коли потрібне регулювання швидкості (частоти обертання ω) двигуна в широких межах, напруга на його затискачах змінюється.

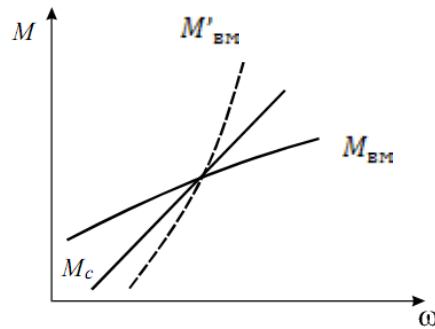


Рис. 7.12. Криві моменту опору й обертаючого моменту двигуна

З'ясуємо умови стійкої роботи двигуна. На рис. 7.12 зображена залежність статичного моменту опору M_c на валу двигуна, що збільшується зі зростанням швидкості. Припустимо, що електромагнітний момент двигуна $M_{\text{ем}}$ також зростає зі збільшенням швидкості, але повільніше статичного моменту (суцільна лінія). Точка перетину кривих відповідає роботі двигуна з постійною швидкістю, тому що момент опору врівноважується електромагнітним моментом. Якщо за якимись причинами швидкість двигуна збільшиться, момент опору стане більше електромагнітного і якір загальмується. При зменшенні швидкості електромагнітний момент перевищить момент опору й двигун буде прискорюватися, поки його швидкість не прийме колишнє значення. Робота буде стійкою.

Якщо електромагнітний момент (штрихова крива $M'_{\text{ем}}$) зростає швидше моменту опору, то він може стати більше моменту опору й двигун буде безупинно розганятися. При зменшенні електромагнітного моменту переважає момент опору й двигун загальмується. Робота буде нестійкою. Для стійкої роботи двигуна необхідно, щоб електромагнітний момент зростав повільніше моменту опору:

$$\frac{dM_{\text{ем}}}{d\omega} < \frac{dM_c}{d\omega}. \quad (7.19)$$

Двигуни постійного струму мають властивість *саморегулювання* - при зміні навантаження автоматично встановлюється нове значення швидкості, при якій двигун працює стійко. Роль регулятора відіграє проти-ЕРС, що виникає в обмотці якоря. У сталому режимі ($M_{\text{ем}} = M_c$) струм, споживаний двигуном, визначається моментом на валу:

$$I = \frac{M_c}{k \Phi_0}. \quad (7.20)$$

З основного рівняння двигуна

$$U = E + IR_a = k\omega\Phi_0 + IR_a,$$

виходить, що швидкість визначається електромеханічною характеристикою

$$\omega = \frac{U - IR_{\pi}}{k\Phi_0}. \quad (7.21)$$

При підстановці вираз (7.20) в (7.21) одержимо механічну характеристику двигуна:

$$\omega = \frac{U}{k\Phi_0} - M \frac{R_{\pi}}{k^2\Phi_0^2}. \quad (7.22)$$

7.4.4 Способи регулювання швидкості двигуна постійного струму.

Аналіз рівняння (7.22) дозволяє визначити способи регулювання швидкості електродвигунів. Для регулювання швидкості можна використовувати зміну наступних параметрів електродвигуна:

- зміну опор у якірного кола шляхом введення додаткових опорів;
- зміну магнітного потоку шляхом введення додаткового опору в коло обмотки збудження;
- зміну напруги, що підводиться до якірного кола при наявності індивідуального джерела живлення двигуна.

Механічні характеристики двигуна при сталості параметрів R_{π} , Φ_0 , U , являють собою лінійні залежності:

$$\omega = a - M \cdot b$$

Механічна характеристика двигуна, отримана при відсутності додаткових опорів у якірному колі, при номінальних значеннях магнітного потоку й живлячої напруги називається природною.

Змінюючи той або інший параметр механічної характеристики можна для заданих значень моменту опору на валу двигуна одержати різні швидкості обертання, тобто регулювати швидкість двигуна. Отримані механічні характеристики будуть називатися штучними.

Регулювання швидкості двигуна зміною опору якірного кола. Як видно на рис. 7.13 всі характеристики перетинаються в точці $\omega = 0$ при $M = 0$. Ця швидкість називається швидкістю ідеального холостого ходу й визначається виразом

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi_0}; \quad \Delta\omega = M \cdot \frac{R_{\pi} + R_{\pi'}}{k^2 \cdot \Phi_0^2}.$$

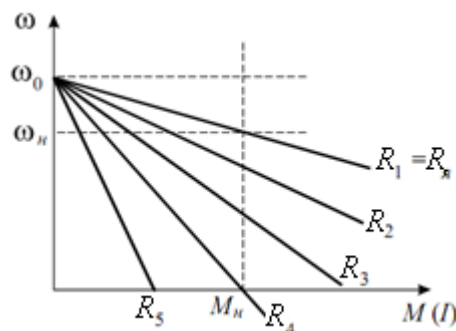


Рис. 7.13. Механічні характеристики при регулюванні швидкості обертання зміною опору якірного кола

Якщо в коло якоря включати додаткові опори, то механічні характеристики, отримані при цьому, називаються штучними або реостатними. Реостатні характеристики так само лінійні як і природня, але мають значно більший нахил до осі моментів, тобто мають меншу жорсткість. Чим більше опір, тим крутіше характеристики, тим менше її жорсткість.

Регулювання швидкості обертання двигуна зміною магнітного потоку. При включенні регулювального реостата в коло обмотки збудження (рис. 7.14,а), магнітний потік Φ зменшується, а швидкість двигуна зростає. жорсткість характеристик при зміні магнітного потоку трохи нижче (рис. 7.14,б), ніж у природної. Варто звернути увагу на те, що при малих значеннях струму збудження, або при випадковому обриві кола збудження швидкість обертання двигуна різко зростає й стає небезпечною для механічної міцності двигуна. Двигун іде «у рознос». Тому при експлуатації двигуна необхідно стежити за справністю кола збудження.

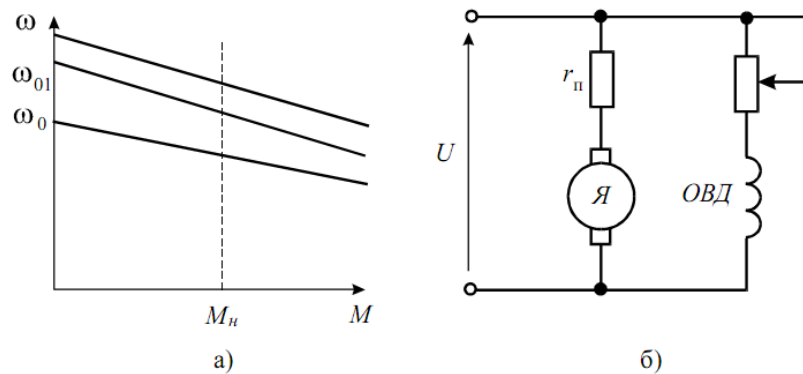


Рис. 7.14. Механічні характеристики (а) і схема регулювання швидкості обертання зміною магнітного потоку (б)

Регулювання швидкості обертання двигуна зміною напруги, що підводиться до якоря двигуна (рис. 7.15). Таке регулювання можливо при наявності індивідуального джерела живлення двигуна. Жорсткість характеристики в даному способі регулювання відповідає жорсткості природної характеристики. Раніше часто використовувалася схема Г-Д (генератор-двигун), зараз частіше застосовують напівпровідникові перетворювачі. Сучасні перетворювачі дозволяють одержати діапазон регулювання швидкості порядку 10000, тобто

$$\frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} = 10000.$$

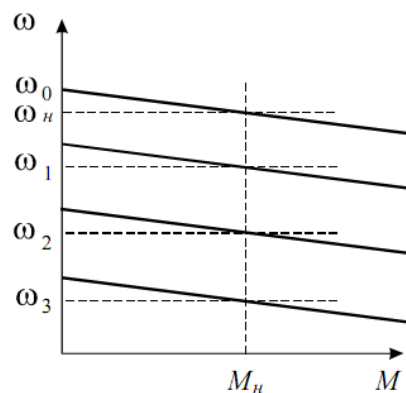


Рис. 7.15. Механічні характеристики при регулюванні швидкості обертання зміною напруги якоря двигуна

7.4.5 Пуск електродвигунів постійного струму.

Пуск двигуна постійного струму може бути здійснений прямим включенням у мережу, введенням реостата в коло якоря або ж зміною напруги джерела живлення. Пуск шляхом безпосереднього включення двигуна в застосовується для двигунів невеликої потужності (до 1-2 кВт). У перший момент в обмотці якоря нерухомого двигуна відсутній проти-ЕРС і кидок струму перевищує номінальне значення в 8-10 і більше раз, а механічний удар впливає на деталі передачі від двигуна до робочої машини. Більші поштовхи струму, що виходять при включенні великих двигунів, шкідливо відбиваються на роботі інших споживачів, підключених до мережі. У малих двигунів розгін відбувається швидко (протягом 0,1-0,3 с), обмотка якоря не встигає значно нагрітися, а стрибок струму виявляється по абсолютній величині невеликим.

Для обмеження пускового струму в коло якоря двигуна включають спеціальний пусковий реостат, опір якого R_{π} по мірі розгону двигуна поступово повністю виводиться. Значення початкового пускового струму

$$I_{\pi} = \frac{U}{R_{я} + R_{\pi}}. \quad (7.23)$$

Звичайний опір R_{π} вибирається так, щоб пусковий струм був трохи більше номінального: $\frac{I_{\pi}}{I_{ном}} = 1,5 - 2,5$. Пусковий реостат не призначений для тривалої роботи в ланцюзі якоря. Тому по закінченні пуску необхідно переконатися, що він повністю відключений, що інакше залишилася включеної його частина перегріється й буде ушкоджена.

У процесі розгону в обмотці якоря з'являється проти-ЕРС, і струм у який-небудь момент часу визначається виразом

$$I_{\pi} = \frac{U - E}{R_{я} + R_{\pi}}. \quad (7.24)$$

По мірі збільшення швидкості зростання ЕРС E і при незмінному значенні R_{π} зменшуються струм у якорі й момент, що розвивається двигуном. Коли цей момент стане рівним моменту опору на валу, зростання швидкості припиниться. При зменшенні опору R_{π} збільшуються струм і обертаючий момент, що стане більше моменту опору, що приведе до подальшого зростання швидкості. Звичайно пусковий реостат має кілька ступенів, виведених послідовно один за одним.

Пуск відбувається швидко й легко, коли двигун розвиває значний момент, що перевищує момент опору на валу. Тому пуск виконується при максимальному значенні потоку, для чого перед пуском необхідно вивести повністю опір регульовального реостата в колії збудження. Схема двигуна повинна бути зібрана так, щоб струм збудження не залежав від струму в якорі й не змінювався при маніпуляціях з пусковим реостатом. Тому коло збудження завжди одержує живлення від незалежного джерела. При зупинці двигуна й відключенні його від мережі варто ввести повністю пусковий опір і вивести регульовальний опір у колії збудження, тобто підготувати двигун до наступного пуску.

8 Основи промислової електроніки

8.1 Загальні відомості

Промислова електроніка - наука про застосування електронних приладів і пристроїв у промисловості.

У промисловій електроніці можна виділити три області:

- інформаційну електроніку (ІЕ);
- енергетичну електроніку (ЕЕ);
- електронну технологію (ЕТ).

Інформаційна електроніка є основою електронно-обчислювальної, інформаційно-вимірювальної техніки й автоматизації виробництва.

Енергетична електроніка є основою пристроїв і систем перетворення електричної енергії середньої й великої потужностей. Сюди ставляться випрямлячі, інвертори, потужні перетворювачі частоти й ін.

Електронна технологія містить у собі методи й пристрої, що використовуються в технологічних процесах, засновані на дії електричного струму й електромагнітних хвиль різної довжини (високочастотне нагрівання й плавка, ультразвукове різання й зварювання й т.д.), електронних і іонних пучків (електронна плавка, зварювання й т.д.).

Головні властивості електронних пристроїв (ЕП):

- висока чутливість;
- швидкодія;
- універсальність.

Чутливість електронних пристроїв – це абсолютне значення вхідної величини, при якому електронний пристрій починає працювати. Чутливість сучасних електронних пристроїв становить 10^{-17} А по струму, 10^{-13} В по напрузі, 10^{-24} Вт по потужності [3].

Швидкодія електронних пристроїв обумовлює їхнє широке застосування в автоматичному керуванні, контролі й керуванні швидкоплинними процесами, що тривають частки мікросекунди.

Універсальність полягає в тім, що в електронних пристроях використовується електрична енергія, що порівняно легко утворюється із різних видів енергії й легко перетворюється в інші види енергії, що дуже важливо, тому що в промисловості використовуються всі види енергії.

У цей час широке застосування в промисловій електроніці знаходять напівпровідникові прилади, тому що вони мають важливі достоїнства:

- високий ККД;
- довговічність;
- надійність;
- малі маса й габарити.

Одним з головних напрямків розвитку напівпровідникової електроніки в останні десятиліття була *інтегральна мікроелектроніка*.

В останні роки широке застосування одержали напівпровідникові інтегральні *мікросхеми* (ІС).

Мікросхема – мікромініатюрний функціональний вузол електронної апаратури, у якому елементи й сполучні провідники виготовляються в єдиному технологічному циклі на поверхні або в обсязі напівпровідника й мають загальну герметичну оболонку.

У великих інтегральних схемах (ВІС) кількість елементів (резисторів, діодів, конденсаторів, транзисторів і т.д.) досягає декількох сотень тисяч, а їхні мінімальні розміри становлять 2...3. Швидкодія ВІС привела до створення мікропроцесорів і мікрокомп'ютерів.

Останнім часом широкий розвиток одержав новий розділ науки й техніки – *оптоелектроніка*. Фізичну основу оптоелектроніки становлять процеси перетворення електричних сигналів в оптичні й обернено, а також процеси поширення випромінювання в різних середовищах.

Оптоелектроніка відкриває реальні шляхи подолання протиріччя між інтегральною напівпровідниковою електронікою й традиційними електро- радіо-компонентами (резистори змінні, кабелі, рознімання, ЕЛТ, лампи накалювання й т.д.).

Перевагою оптоелектроніки є невичерпні можливості підвищення робочих частот і використання принципу паралельної обробки інформації.

8.2 Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковий діод (НД) – прилад з одним $p - n$ переходом і двома виводами.

Він добре пропускає струм одного напрямку й погано пропускає струм протилежного напрямку.

Ці струми й відповідні їм напруги між виводами напівпровідникового діода називаються прямими $I_{пр}$ і зворотними $I_{зв}$ струмами, прямими $U_{пр}$ і зворотними $U_{зв}$ напругами.

На рис. 8.1 наведено умовне зображення напівпровідникового діода в схемах електричних кіл і його ідеалізована вольтамперна характеристика (ВАХ).

Прямий струм $I_{пр}$ у НД спрямований від одного виводу (анода) до іншого (катода).

Аналіз ВАХ НД дозволяє зробити висновок, що НД - нелінійний елемент і опір його залежить від величини й напрямку струму.

Так прямий опір НД становить звичайно не вище декількох десятків Ом, а зворотний опір не нижче декількох сотень Ом.

Вольтамперна характеристика НД має яскраво виражені три ділянки, які називаються прямою (I), зворотною (II) ділянками й ділянкою зворотного пробую або стабілізації (III).

Напівпровідникові діоди, у яких робочою ділянкою є ділянка стабілізації III, називаються *стабілітронами*. Вони мають значний зворотний опір і застосовуються в схемах стабілізації напруги.

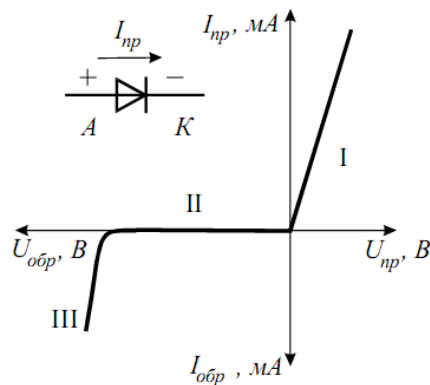


Рис. 8.1. Вольтамперна характеристика НД і його умовне позначення

8.3 Випрямлячі на напівпровідникових діодах

Найбільш часто джерела постійної напруги одержують шляхом перетворення синусоїдальної (змінної) напруги в постійну напругу.

Пристрої, що здійснюють таке перетворення, називаються *випрямлячами*.

У більшості випадків для випрямлення змінної напруги застосовуються випрямлячі на НД, оскільки вони добре проводять струм у прямому напрямку й погано у зворотному.

Найпростіша схема випрямляча показана на рис. 8.2,а.

У ній послідовно з'єднані джерело змінної ЕРС (e), діод VD і навантажувальний резистор R_H . Ця схема називається однопівперіодною. Часто її називають однофазною однократною, тому що джерело змінної ЕРС є однофазним і струм проходить через нього в одному напрямку один раз за період (один такт за період).

Як джерело синусоїдальної ЕРС звичайно служить силовий трансформатор, включений в електричну мережу (рис. 8.2,б).

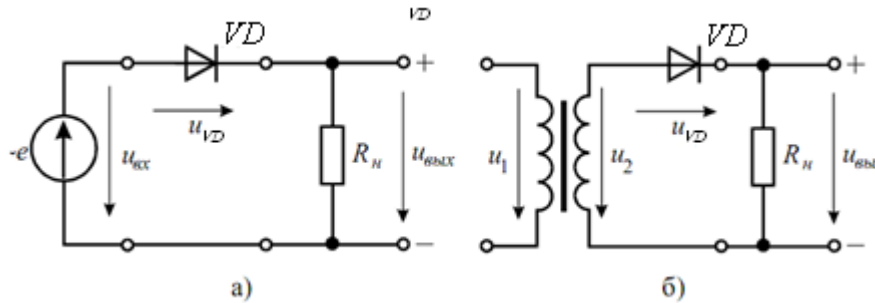


Рис. 8.2. Схеми випрямлячів на НД

Графіки на рис. 8.3 ілюструють процеси у випрямлячі. ЕРС генератора зображена синусоїдою з амплітудою E_m (рис. 8.3,а).

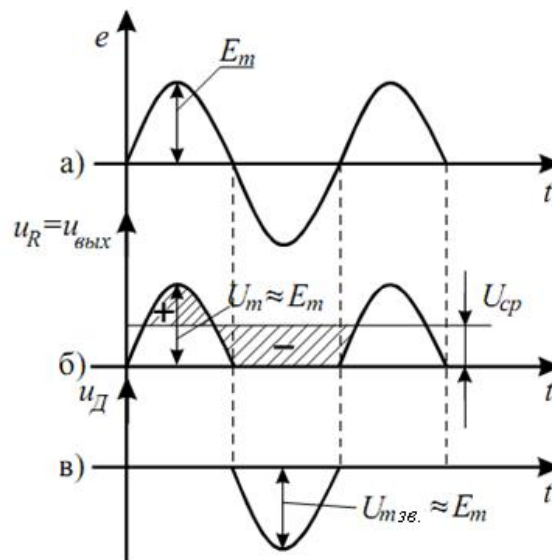


Рис. 8.3. Графіки напруг випрямляча, що пояснюють його роботу

Протягом позитивного напівперіоду ЕРС e напруга для діода є прямою, опір його малий, і проходить струм i , що створює на резисторі R_H спадання напруги $u_R = u_{\text{вих}}$.

Протягом наступного напівперіоду напруга є зворотним, струму практично немає через великий опір діода ($R_{VD} \gg R_H$) і $u_R = u_{\text{вих}} = 0$.

Таким чином, через діод D , навантажувальний резистор R_H і генератор проходить пульсуючий струм у вигляді імпульсів, що тривають півперіода й розділених проміжками також у півперіода. Цей струм називають випрямленим струмом. Він створює на резисторі R_H пульсуючу випрямлену напругу, полярність якої: з боку катода – “плюс”, а з боку анода – “мінус”.

Корисною частиною випрямленої напруги є його *постійна складова*, або *середнє значення*, $U_{ср}$, що за весь період дорівнює:

$$U_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi} \approx 0,318 \cdot U_m$$

Віднімаючи з пульсуючої напруги його середнє значення, одержимо змінну складову U_{\sim} , що має несинусоїдальну форму. Для неї нульовою віссю є пряма лінія, що зображує постійну складову. Напівхвилі змінної складової U_{\sim} , заштриховані (рис. 8.3,б).

Змінна складова є «шкідливою» частиною випрямленої напруги. Для її зменшення в навантажувальному резисторі й у вихідній напрузі, тобто для згладжування пульсацій випрямленої напруги *згладжувальні фільтри* (ЗФ). Найпростішим ЗФ є конденсатор великої ємності, через який відгалужується змінна складова струму, щоб можливо менша частина її проходила в навантаження.

Конденсатор добре згладжує пульсації, якщо його ємність C_{ϕ} така, що виконується умова:

$$\frac{1}{\omega \cdot C_{\phi}} \ll R_{н}.$$

При наявності конденсатора великої ємності $U_{ср}$ наближається до U_m і може бути рівним $(0,8-0,95)U_m$ і навіть вище.

Основними електричними параметрами однопівперіодного випрямляча є:

- середні значення випрямлених струму й напруги $I_{ср}, U_{ср}$;
- потужність навантаження $P_{ср} = I_{ср} \cdot U_{ср}$;
- амплітуда основної гармоніки випрямленої напруги $\sim U_m$;
- коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги $p = \frac{U_m}{U_{ср}}$;
- діючі значення струму й напруги первинної й вторинної обмоток трансформатора I_1, U_1 і I_2, U_2 ;
- типова потужність трансформатора $s_{тп} = 0,5(s_1 + s_2)$, де $s_1 = U_1 \cdot I_1$, $s_2 = U_2 \cdot I_2$;
- коефіцієнт корисної дії;

$$\eta = \frac{P_{ср}}{P_{ср} + P_{тп} + P_{д}}$$

Де $P_{тп}$ - втрати в трансформаторі;

$P_{д}$ - втрати в діодах.

Однопівперіодний випрямляч застосовують звичайно для живлення високоомних навантажувальних пристроїв малої потужності, що допускають підвищену пульсацію живильної напруги.

Найбільше поширення одержав *двухпівперіодний мостовий випрямляч* (рис. 8.4).

Він складається із трансформатора T_p і чотирьох діодів $VD1, VD2, VD3, VD4$, підключених до вторинної обмотки трансформатора за мостовою схемою. До однієї з діагоналей моста приєднується обмотка T_p , а до іншої - навантажувальний резистор $R_{н}$. Кожна пара діодів $VD1 - VD3$ і $VD2 - VD4$ й працює по черзі.

Діоди $VD1, VD3$ відкриті в I напівперіод напруги u_2 . коли потенціал крапки a вище потенціалу крапки b .

У наступний напівперіод напруги u_2 потенціал крапки b вище потенціалу крапки a , діоди $VD2, VD4$ відкриті, а діоди $VD1, VD3$ закриті.

В обидва напівперіоди, як видно з рис. 8.4 струм через навантажувальний резистор R_H має той самий напрямок.

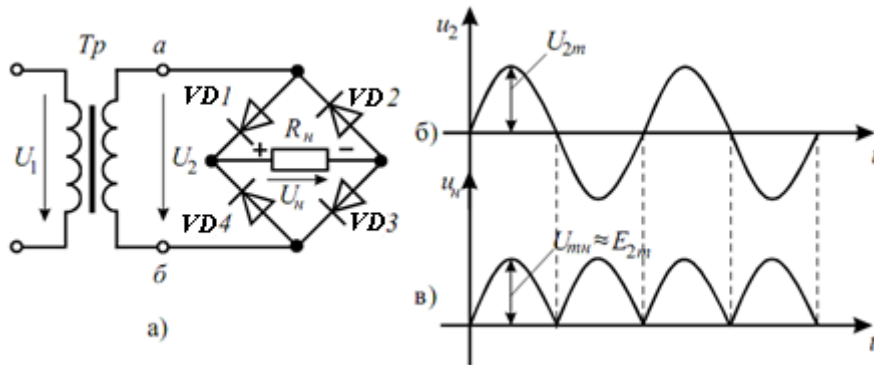


Рис. 8.4. Схема (а) і часові діаграми напруг мостового двохпівперіодного випрямляча

Вираз для середніх значень випрямлених напруги й струму мають вигляд

$$U_{\text{нсп}} = \frac{1}{(T/2)} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin \omega t dt = \frac{2U_{2m}}{\pi}; \quad I_{\text{нсп}} = \frac{U_{\text{нсп}}}{R_H}.$$

Аналіз наведених співвідношень показує, що при однакових значеннях параметрів трансформаторів і опорів R_H мостовий випрямляч у порівнянні з однопівперіодним має наступні переваги:

- середні значення випрямлених струму $I_{\text{нсп}}$ і напруги $U_{\text{нсп}}$ удвічі більші;
- пульсації значно менші;
- частота пульсацій удвічі вища, що зменшує габарити фільтра.

8.4 Транзистори

8.4.1 Загальні відомості.

Транзистори (Т) - напівпровідникові прилади, що служать для посилення потужності електричних сигналів. За принципом дії транзистори діляться на біполярні й польові (уніполярні).

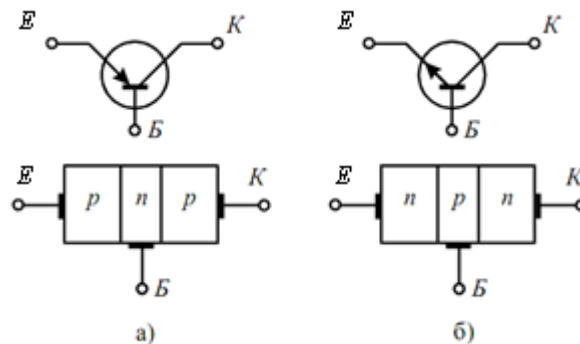


Рис. 8.5. Структура біполярного транзистора типів $p-n-p$ (а), $n-p-n$ (б) і їхні умовні позначення

Біполярний транзистор (БТ) - являє собою тришарову структуру (рис. 8.5).

Залежно від способу чергування шарів БТ називаються транзисторами типу $p-n-p$ або типу $n-p-n$ (рис. 8.5, а, б).

Транзистор називається біполярним, якщо фізичні процеси в ньому пов'язані з рухом носіїв обох знаків (вільних електронів і дірок).

У біполярному транзисторі середній шар називається *базою* (Б), один крайній шар - *колектором* (К), а інший крайній шар - *емітером* (Е). Кожний шар має свій вивід, за допомогою яких біполярний транзистор підключається в коло.

Структура й умовна позначка одного з видів польових транзисторів показана на рис. 8.6. У польових транзисторів так само, як і в біполярних - три електроди, називані *джерелом*, *стоком* і *затвором*.

Джерелом (Д) називається електрод, з якого в центральну область ПТ (канал) входять основні носії заряду n або p -типів.

Стік (С) - електрод, через який основні носії йдуть із каналу.

Затвір (З) - електрод, керуючий потоком носіїв заряду.

Оскільки в польовому транзисторі струм зумовляється рухом носіїв тільки одного знака p або n -типів, ці транзистори називають також *уніполярними*.

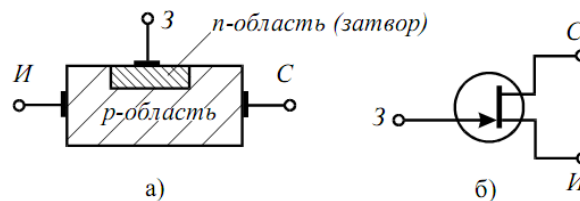


Рис. 8.6. Структура (а) і умовна позначка польового транзистора з каналом p -типу

8.4.2 Підсилювачі на транзисторах.

Посилення електричних сигналів необхідно при прийманні радіосигналів, контролю й автоматизації технологічних процесів, при вимірі електричних і неелектричних величин і т.д.

Найпростішим підсилювачем є *підсилювальний каскад* (рис. 8.7), що містить нелінійний керований елемент КЕ, як правило біполярний або польовий транзистор, резистор R і джерело електричної енергії E .

Підсилювальний каскад має *вхідне коло*, до якої підводить вхідна напруга $U_{вх}$ (посилюваний сигнал) і *вихідне коло*, з якого знімається вихідна напруга $U_{вих}$ (посилений сигнал).

Посилений сигнал має значно більшу потужність у порівнянні із вхідним сигналом. Збільшення потужності сигналу відбувається за рахунок джерела електричної енергії. Процес посилення здійснюється за допомогою зміни опору керованого елемента, а, отже, і струму у вихідному колі, під впливом вхідної напруги або струму.

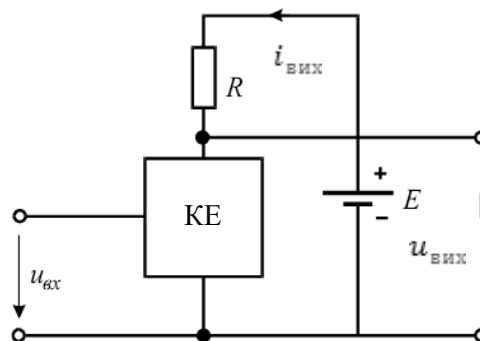


Рис. 8.7. Структурна схема підсилювального каскаду

Вихідна напруга знімається з керованого елемента або резистора R . Таким чином, посилення засноване на перетворенні електричної енергії джерела постійної ЕРС E в енергію вихідного сигналу за рахунок зміни опору керованого елемента за законом, що задається вхідним сигналом.

Основними параметрами підсилювального каскаду є:

- коефіцієнт підсилення по напрузі $K_u = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}}$;
- коефіцієнт підсилення по струму $K_i = \frac{i_{\text{вих}}}{i_{\text{вх}}}$;
- коефіцієнт підсилення по потужності $K_p = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{u_{\text{вих}} i_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}} i_{\text{вх}}} = K_u K_i$;

Підсилювальний каскад має коефіцієнт підсилення по напрузі K_u , рівним декільком десяткам.

Для одержання більших значень K_u , що досягають багатьох тисяч і більше, використовують *багатокаскадні підсилювачі*, у яких кожний наступний каскад приєднаний до виходу попередні (рис. 8.8).

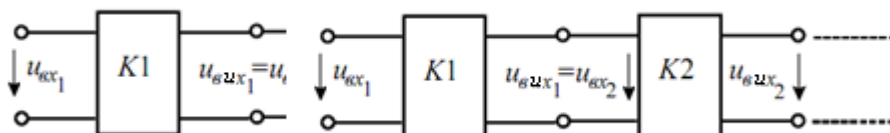


Рис. 8.8 - Структурна схема многокаскадного підсилювача

Коефіцієнт підсилення многокаскадного підсилювача

$$K_U = \frac{u_{\text{вих}n}}{u_{\text{вх}1}} = K_1 K_2 \dots K_n,$$

де K_1, K_2, \dots, K_n – коефіцієнти підсилення першого, другого й n -го каскаду.

9 Електробезпечність

9.1 Загальні відомості

Електричний струм (ЕС), при проходженні через людське тіло, спричиняє уражуючу дію на організм. Це відбувається при торканні до окремих частин електроустановок, що перебувають під напругою.

Ступінь поразки ЕС залежить від тривалості й частоти струму. Найнебезпечнішим є струм промислової частоти (50 Гц), сила якого в 0,05 А і більше є смертельною.

Найнебезпечніша поразка виникає, коли струм проходить через мозок або серце.

Сила струму I , що проходить через тіло людини, яка потрапила під напругу U , визначається відповідно до закону Ома опором $R_{\text{ч}}$ тіла людини:

$$I = \frac{U}{R_{\text{ч}}}$$

Опір людини змінюється в широких межах - від декількох тисяч до декількох сотень Ом, тому що воно залежить від багатьох факторів: стану шкірного покриву, площі поверхні зіткнення тіла зі струмоведучими частинами й т.д.

Найменший опір людин має в сирому запиленому середовищі, при високій температурі навколишнього середовища, коли все тіло покрите потім і забруднене. Тому навіть низькі напруги можуть бути небезпечними для людини. Так, наприклад, при $R_{\text{ч}} = 600$ Ом небезпечною є напруга

$$U = R_{\text{ч}} \cdot I = 600 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ В}$$

На практиці в найбільш важких умовах можна вважати безпечним напруга нижче 12 В, у сухих, мало забруднених приміщеннях - нижче 36 В. По ступені небезпеки всі приміщення діляться на три категорії: без підвищеної небезпеки, з підвищеною небезпекою й особливо небезпечні. До першої категорії ставляться приміщення сухі, опалювані, з струмонепровідними підлогами й відносно вологістю 60 %. У приміщеннях з підвищеною небезпекою мають місце висока вологість (більше 75 %), струмопровідні підлоги й температура вище плюс 30 °С. Особливо небезпечними є приміщення з вологістю, близької до 100 %, з хімічно активним середовищем і т.п.

Струмопровідними вважаються брудні або сирі дерев'яні, бетонні, залізобетонні підлоги або підлоги з металевих плит. До непровідних відносяться сухі й чисті дерев'яні підлоги.

Безпечні умови експлуатації електротехнічних пристроїв забезпечуються рядом заходів, передбачених технікою безпеки. Основними з них є:

- а) захист за допомогою відповідних огорожень всіх струмоведучих частин;
- б) спорудження захисного заземлення або занулення елементів обладнання, що нормально не перебувають під напругою, але здатних в аварійних випадках потрапити під напругу;
- в) застосування ізолюючих підставок, гумових рукавиць і бот, ізолюючих штанг і т.п.

9.2 Захисне заземлення

Захисне заземлення (ЗЗ) призначене для того, щоб знизити значення напруги на корпусах заземленого електроустаткування до рівня, безпечного для людини.

Захисне заземлення застосовується у випадку, коли заводські мережі трифазного струму бувають *трьохпровідними*, тобто при відсутності нейтрального проводу. При цьому нейтраль N трансформатора трьохпровідної мережі ізолювана (не з'єднана із землею) (рис. 9.1).

На рис. 9.1 зображений виробничий механізм (ВМ) 1, двигун 2, прикріплений за допомогою фланця до механізму, заводська трифазна мережа 3 і ємності C_A, C_B, C_C між кожним з лінійних проводів мережі й землею.

Провідності мережі й землі відіграють роль обкладинок конденсатора, між якими перебуває ізолятор (повітря).

При значній довжині заводської мережі, ємності C_A, C_B і C_C виявляються значними, а ємнісний опір $X_C = \frac{1}{\omega C}$, порівняним з опором $R_{\text{ч}}$ тіла людини.

У нормальних умовах всі струмоведучі частини ВМ і двигуна ізолювані від металевого корпусу й торкання людини до ВМ не представляє небезпеки. Однак у випадку пробією ізоляції електричний провід з'єднається з корпусом ВМ, і людина, що торкнулась цього корпусу, виявиться з'єднаною з одним із проводів електричної мережі (рис. 9.1, із проводом *A*). У результаті цього утвориться замкнутий контур (рис. 9.1, фаза *A* - $R_{\text{ч}}$ - земля - $C_{\text{Б}}$ - фаза *B*), сила струму в якому в основному залежить від ізоляції між ногами людини й землею. Якщо підлога волога і добре з'єднана із землею, то людина потрапить під лінійну напругу $U_{\text{л}}$ (рис. 9.1 напруга U_{AB}), під дією якої по людині протече струм

$$I_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{(R_{\text{ч}} + R)^2 + X_{\text{C}}^2}}$$

де R - опір підлоги й інших елементів, з'єднаних послідовно з тілом людини, Ом.

У результаті людина може бути уражена струмом.

Для усунення такої небезпеки корпус ВМ надійно з'єднують із землею - заземлюють (рис. 9.1,б).

Заземлювач Z покладений у землі й має з нею гарний контакт. У цьому випадку тіло людини й заземлювач виявляються включеними паралельно.

При виконанні заземлення намагаються, щоб його опір $R_{\text{з}}$ був в багато разів менше внутрішнього опору джерела.

Звичайно $R_{\text{з}}$ становить 0,5-10 Ом залежно від рівня напруги й потужності джерела живлення.

При виникненні однофазних замикань на корпус джерело живлення працює в режимі короткого замикання й по ньому й заземлювачу протікає великий струм $I_{\text{кз}}$, що приводить до значного спадання напруги на внутрішньому опорі джерела й напруги на затискачах джерела, а, отже на корпусах устаткування знижується до безпечного рівня відповідно до закону Ома для повного кола:

$$\dot{U} = \dot{E} - \dot{I}_{\text{кз}} \cdot R_0,$$

де \dot{U} - комплекс напруги на затискачах джерела, В;

\dot{E} - комплексне значення ЕРС джерела, В;

R_0 - внутрішній опір джерела, Ом;

$\dot{I}_{\text{кз}}$ - комплекс струму короткого замикання на землю, А.

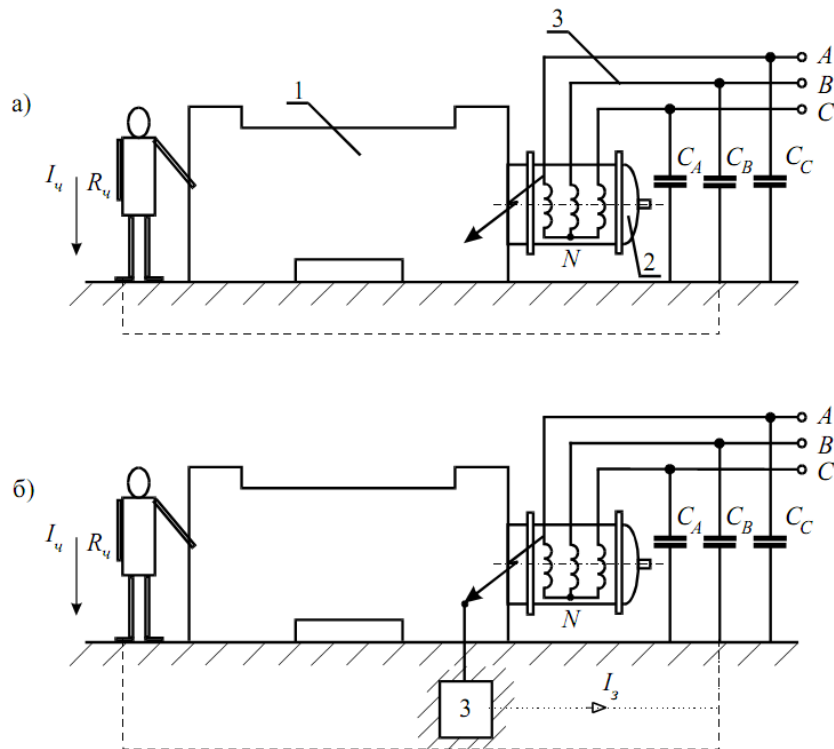


Рис. 9.1 - Схеми електричного кола при пробі ізоляції й влученні людини під напругу при відсутності заземлення (а) і при наявності заземлення (б)

9.3 Занулення

Занулення виконується в чотирьохпровідній системі трифазного струму й має ту ж мету, що й заземлення.

Занулення корпусів устаткування виробляється шляхом їхнього приєднання до нейтрального проводу.

Пробій ізоляції в цьому випадку приводить до короткого замикання, що викликає вигорання плавких запобіжників і відключення ушкодженої ділянки.

Занулення й заземлення обов'язково у всіх виробничих приміщеннях, де напруга 127 В й вище, за винятком сухих конторських приміщень із дерев'яною підлогою, де заземлення й занулення обов'язково лише при напрузі 380 В и вище.

Заземленню й зануленню підлягають корпуси двигунів, станини верстатів, конструкції розподільних пристроїв, освітлювальні арматури, корпуси й магнітопроводи трансформаторів і т.п.

9.4 Конструкція заземлювача

Будова заземлюючого пристрою (ЗП) визначається питомим опором ґрунту й геометричних розмірів заземлювача.

ЗП, що складається з одиночного заземлювача, має значний опір і несприятливий характер розподілу напруженості електричного поля в зоні розтікання струму короткого замикання. Тому ЗП складається з декількох заземлювачів. При цьому загальний опір ЗП знижується й визначається по формулі

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{\text{оз}}}{n\eta},$$

де $R_{\text{оз}}$ - опір одиночного заземлювача, Ом;

n - число заземлювачів;

η - коефіцієнт використання заземлювачів, що визначається з графіків і таблиць залежно від конструкції ЗП.

При розрахунку ЗП необхідно знати питомий опір ґрунту в тій місці, де буде проходити заземлююча лінія й де закладені заземлювачі. На нафтових промислах, наприклад, ґрунт може виявитися просоченим нафтою, у результаті чого його питомий опір різко зростає, і необхідний опір ЗП 4-10 Ом одержати важко. У таких випадках забивають заземлювачі в більше глибокі шари ґрунту, не просочені нафтою або відносять їх в інше більше віддалене місце. Аналогічні заходи застосовують у районах зі скелястим ґрунтом, у районах вічної мерзлоти й т.п.

При спорудженні ЗП необхідно максимально використовувати наявні природні заземлювачі: металеві конструкції будинків і споруджень, що мають з'єднання із землею; свинцеві оболонки кабелів, прокладених у землі; обсадні труби; водопровідні й інші металеві трубопроводи (крім трубопроводів горючих рідин, гарячої води, а також горючих або вибухових газів і т.д.).

У якості штучних заземлювачів рекомендується застосовувати вертикальні сталеві труби або горизонтально прокладені сталеві смуги. Сталеві труби діаметром 38-50 мм, довжиною 2-3 м і товщиною стінок не менш 3,5 мм забивають у землю на глибину від поверхні землі до верхнього кінця труби 0,5-0,8 м. Для зменшення взаємного екранування труб їх варто розташовувати на відстані одна від одної не менш однієї довжини труби. Замість труб допускається використовувати круглу сталь діаметром не менш 25 мм або кутову сталь 20х30х3 мм.

Для створення смугових заземлювачів застосовують сталеві смуги шириною 20-40 мм і товщиною не менш 4 мм, що укладаються в траншеї глибиною 0,5-0,8 м. Такі ж смуги застосовують для з'єднання один з одним трубчастих заземлювачів. Смуги з'єднують між собою й із трубами заземлювачів зварюванням.

Кожний елемент установки, що заземлюється, приєднують до ЗП або заземлюючої магістралі за допомогою окремого відгалуження.

Послідовне включення в заземлюючий провід декількох ділянок, що заземлюються, не допускається, тому що при такому з'єднанні у випадку обриву заземлюючого відгалуження всі частки, що заземлюються, виявляться незаземленими.

Площа перетину заземлюючих провідників повинна задовольняти вимогам Правил пристрою електроустановок (звичайно не менш 24 мм²).

КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

Вступ

Курс «Електротехніка й основи електроніки» передбачає підготовку студентів в галузі електротехніки й електроніки. Контрольні завдання дають певні навички при розрахунках електричних кіл, виборі необхідного обладнання, збиранні електричних схем, а також знайомлять студентів з методами електричних вимірювань і основних систем вимірювальних приладів.

Вивчення даного курсу слід проводити в три етапи.

Перший етап включає вивчення таких тем, як «Лінійні електричні кола постійного струму», «Лінійні електричні кола змінного струму», «Електричні вимірювання й прилади», «Трансформатори», «Електричні машини». Другий етап включає основи електропривода, а також розділ «Електрообладнання й електропостачання». Третій етап представляє розділ «Основи електроніки».

Весь курс вивчається студентами-заочниками самостійно. Під час лабораторно-екзаменаційної сесії студенти повинні зробити визначене число лабораторних робіт. У цей же час по окремим розділам курсу їм читають лекції.

Вказівки по виконанню контрольних робіт приводяться нижче, безпосередньо перед завданнями на контрольні роботи.

Самостійне вивчення курсу зустрічає певні труднощі, що полягають насамперед в абстрагованості окремих явищ, зрозуміти які тільки з одних механічних подань неможливо. Звідси слідує, що для успішного оволодіння матеріалом потрібні знання фізики, особливо по розділу «Електрика та магнетизм».

З метою контролю при самостійній роботі над матеріалом необхідно відповісти на питання для самоперевірки, присутні наприкінці кожного розділу методичних вказівок, а також розібрати й вирішити наведені в посібнику задачі.

Дані методичні вказівки складені відповідно до програми дисципліни «Електротехніка і основи електроніки» для студентів-заочників неелектротехнічних спеціальностей НУК.

Вказівки по виконанню контрольних робіт

Виконання контрольних робіт - важливий етап у процесі вивчення теоретичного матеріалу; крім того, правильне рішення завдань є критерієм ступеня засвоєння матеріалу студентом. Всі завдання необхідно вирішувати самостійно, опираючись на пророблений теоретичний матеріал. У випадку труднощів, що зустрічаються при вивченні тієї або іншої теми, студент може звернутися в університет на кафедру за усною або письмовою консультацією. Відповідно до програми кожен студент повинен виконати дві контрольні роботи. Завдання для контрольних робіт з різних розділів курсу поміщені далі.

Номера завдань, які повинен виконати студент у кожній з контрольних робіт, установлюються кафедрою електротехніки університету, у якому він навчається. Номер варіанта контрольних завдань визначається по останній цифрі навчального шифру студента. Наприклад, якщо навчальний шифр 12117, то студент виконує варіант 17.

При виконанні контрольних робіт слід дотримуватися наступних вимог:

1) контрольні роботи виконувати чорним, залишаючи в зошиті поля для заміток викладача;

2) контрольні завдання вирішувати в загальному вигляді, докладно пояснюючи основні етапи рішення. В отримані формули підставляти цифрові значення величин, указуючи розмірність отриманого результату;

3) всі рисунки, графіки, схеми виконувати акуратно, у досить великому масштабі. Для виконання схем і графіків користуватися папером у клітинку (міліметровкою);

4) схеми й векторні діаграми виконувати за допомогою креслярських інструментів, елементи схем позначати відповідно до ГОСТ;

5) на початку контрольної роботи вказати прізвище, ім'я, по батькові, навчальний шифр, спеціальність, домашню адресу студента й рік видання методичних вказівок, якими він користувався;

б) наприкінці контрольної роботи проставити дату її виконання й особистий підпис студента.

Контрольні роботи зараховуються, якщо рішення всіх завдань виконано принципово правильно й відповідає перерахованим вимогам. У випадку, якщо контрольна робота не зарахована, всі виправлення повинні бути зроблені студентом у тім же зошиті після підпису викладача-рецензента. Виправлений варіант контрольної роботи студент повинен представити разом з первісним варіантом.

К.1. Електричні кола постійного струму

1. Варто добре зрозуміти принципову різницю між джерелами напруги й джерелами струму. Якщо внутрішній опір джерела R_b набагато менший, ніж опір приймача R_n , тоді $E = IR_b + IR_n \approx IR_n$. У цьому випадку $E = U = IR_n = \text{const}$, тобто напруга є величина постійна. Таке джерело називається джерелом ЕРС. Якщо внутрішній опір R_b набагато більше, ніж опір приймача R_n , тоді $E = IR_b + IR_n \approx IR_b$, тобто $I = EG_b$. У цьому випадку струм джерела не залежить від опору R , $I = \text{const}$. Таке джерело називається джерелом струму.

2. Одним з важливих питань цього розділу є розрахунок розподілу струмів у розгалужених лінійних електричних колах з декількома джерелами живлення. Основним методом розрахунку є метод безпосереднього застосування законів Кірхгофа. Нехай коло, яке потрібно розрахувати, містить m віток і n вузлів. Тому що по кожній вітці проходить свій струм, то число невідомих струмів дорівнює числу віток і для визначення їх необхідно скласти m рівнянь. Послідовність операції розрахунку:

а) позначають струми у всіх вітках (I_1, I_2, \dots, I_m), довільно вибирають їхні позитивні напрямки й позначають на схемі ці напрямки стрілками;

б) складають по першому закону Кірхгофа рівняння для $(n - 1)$ вузлів;

в) відсутні $m - (n - 1)$ рівнянь одержують по другому закону Кірхгофа, для чого вибирають у схемі $m - (n - 1)$ взаємно незалежних контурів. Вибирають напрямки обходу цих контурів (за напрямком годинникової стрілки або проти нього) і відповідно позначають їх на схемі;

г) складають по другому закону Кірхгофа рівняння для обраних контурів і напрямків їхнього обходу.

У результаті виходить система з m рівнянь. Рішення цієї системи дозволяє визначити не тільки числові значення струмів, але і їхні дійсні напрямки. Якщо рішення привело до негативного знака для якого-небудь струму, то його дійсний напрямок протилежний довільно обраному на початку позитивному напрямку.

Як ілюстрацію розглянемо коло, схема якого зображена на рис. К.1. Схема містить 6 віток і 4 вузли ($m = 6, n = 4$). На схемі позначені обрані позитивні напрямки всіх шести струмів.

За першим законом Кірхгофа складаємо $4 - 1 = 3$ рівняння для вузлів а, б, с:

$$\text{вузол а: } I_1 - I_2 - I_3 = 0;$$

$$\text{вузол б: } I_2 + I_4 + I_5 = 0;$$

$$\text{вузол с: } -I_5 - I_4 - I_6 = 0;$$

По другим законом Кірхгофа складаємо $6 - 3 = 3$ рівняння для контурів aеа, аbсdа, bfcб (напрямок обходу приймаємо за годинниковою стрілкою):

$$\text{контур aеа: } E_1 = I_1(R_{01} + R_1) + I_3R_3;$$

$$\text{контур аbсdа: } 0 = I_2R_2 - I_4R_4 + I_6R_6 - I_3R_3;$$

$$\text{контур bfcб: } -E_2 = -I_5(R_{02} + R_5 + R_6) + I_4R_4.$$

Таким чином, при розрахунку даного кола за методом безпосереднього застосування законів Кірхгофа доводиться вирішувати систему із шести рівнянь.

3. Метод контурних струмів дозволяє скоротити число спільно розв'язуваних рівнянь із m до $(m - n + 1)$. Послідовність операцій розрахунку:

а) вибирають у схемі взаємно незалежні контури (так, щоб одна з віток відповідного контуру входила тільки в цей контур);

б) для обраних незалежних контурів приймають довільно напрямки контурних струмів у них;

в) складають для обраних контурів рівняння по другому закону Кірхгофа щодо контурних струмів.

Для кола, зображеного на рис.1, вибираючи колишні незалежні контури й приймаючи указані на рис. К.2 напрямки контурних струмів, отримаємо наступні три рівняння

$$E_1 = I_I (R_{01} + R_1 + R_3) - I_{II} R_3;$$

$$0 = I_I (R_2 + R_4 + R_7 + R_3) - I_I R_3 + I_{III} R_4;$$

$$E_2 = I_{III} (R_{02} + R_5 + R_4 + R_6) + I_{II} R_4$$

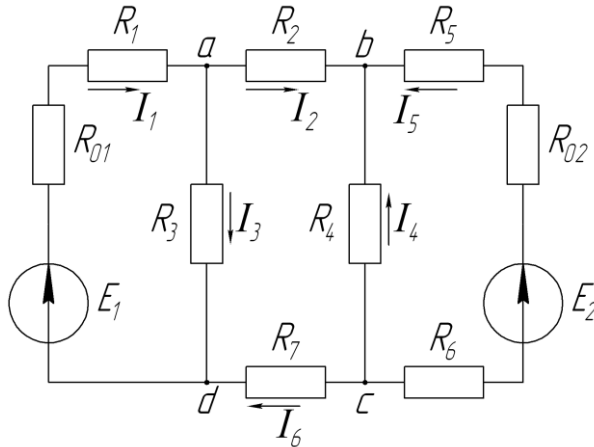


Рис. К.1

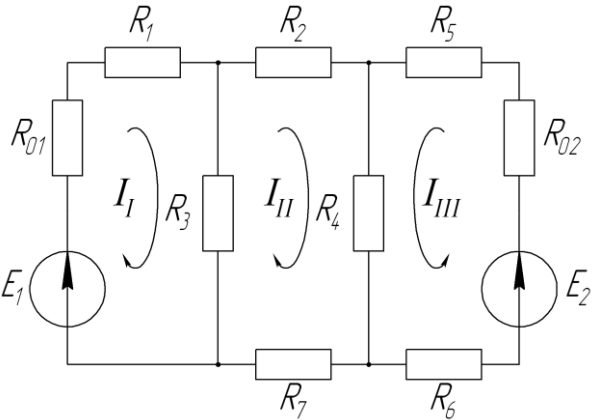


Рис. К.2

Після того як знайдені контурні струми, визначати дійсні струми в вітках. У вітках, що не є спільними для суміжних контурів, знайдений контурний струм буде дорівнювати дійсному струму гілки. У вітках же спільних для суміжних контурів дійсний струм дорівнює алгебраїчній сумі контурних струмів. Таким чином, у цьому випадку дійсні струми рівні:

$$I_1 = I_I; \quad I_2 = I_{II}; \quad I_3 = I_I - I_{II};$$

$$I_4 = - (I_{II} + I_{III}); \quad I_5 = I_{III}; \quad I_6 = I_{II}.$$

Задача 1. Коло (рис. К.3, таб. К.1) має ЕРС джерела E , внутрішній опір R_0 . Опір електроприймачів рівні R_1 і R_2 . Визначити струми в опорах R_1 , R_2 , напругу на затискачах електроприймачів і скласти рівняння балансу потужностей.

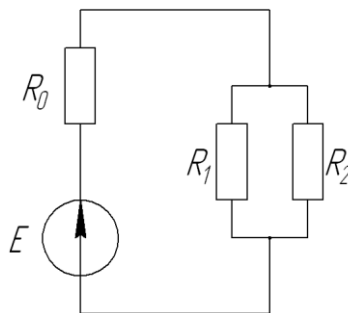


Рис. К.3

Таблиця К.1

№ варіанта	Величина			
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	E , В	R_0 , Ом
1	6	4	100	1,0
2	7	5	110	1,1
3	8	6	120	1,2
4	9	7	130	1,3
5	10	8	140	1,4
6	12	9	150	1,5

Продовження таблиці К.1

№ варіанта	Величина			
	R_1 , Ом	R_2 , Ом	E , В	R_0 , Ом
7	13	10	160	1,6
8	14	11	170	1,7
9	15	12	180	1,8
10	16	17	190	1,9
11	4	6	100	1,1
12	5	7	110	1,2
13	6	8	120	1,3
14	7	9	130	1,4
15	8	10	140	1,5
16	9	12	150	1,6
17	10	13	160	1,7
18	11	14	170	1,8
19	12	15	180	1,9
20	17	16	190	2,0
21	5	7	100	0,9
22	4	6	110	1,0
23	7	9	120	1,1
24	6	8	130	1,2
25	9	12	140	1,3
26	8	10	150	1,4
27	11	14	160	1,5
28	10	13	170	1,6
29	17	16	180	1,7
30	12	15	190	1,8

К.2. Електричні кола змінного струму. Однофазні кола

1. Одним з важливих питань цього розділу є розрахунок кіл, і зокрема, при змішаному з'єднанні різного роду (активних і реактивних) опорів. Всі методи розрахунку лінійних кіл постійного струму можуть бути застосовані для розрахунку складних кіл синусоїдального струму, якщо користуватися методом комплексних чисел. На рис. К.4 зображене коло, що легко розраховується цим методом.

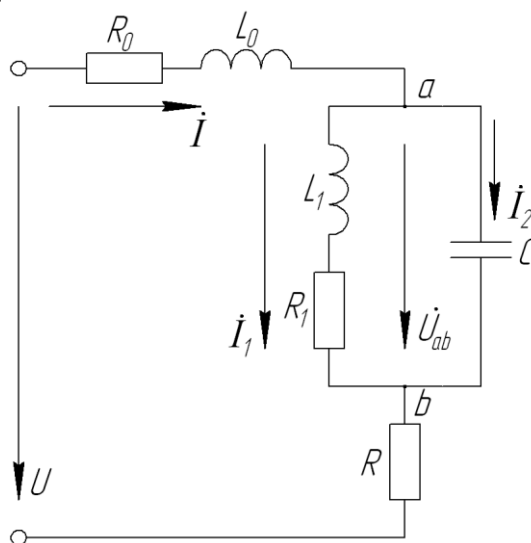


Рис. К.4

Комплексний повний опір всього кола

$$\underline{Z} = R_0 + jX_{L_0} + R + \frac{R_1 + jX_{L_1}(-jX_C)}{R_1 + jX_{L_1} - jX_C}$$

Знаючи Z_0 легко визначити струм у нерозгалуженій частині кола:

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

Напруга між точками а і b

$$U_{ab} = I \frac{R_1 + jX_{L_1}(-jX_C)}{R_1 + jX_{L_1} - jX_C}$$

Після визначення U_{ab} легко знайти струми в паралельних вітках.

2. При включенні в коло індуктивності L часто говорять про індуктивний опір, індуктивне падіння напруги або індуктивну складову напруги. Однак у дійсності в цих поняттях є умовність. При включенні в коло котушки, що має активний опір R і індуктивністю L, на змінну синусоїдальну напругу U рівняння по другому закону Кірхгофа записується так:

$$U = RI + jX_L I,$$

де U, I - комплексні діючі значення напруги та струму;

добуток $jX_L I = U_L$ називають індуктивним падінням напруги (за аналогією з активним падінням напруги RI);

$X_L = \omega L$ називають реактивним опором.

3. Варто звернути увагу на те, що поняття активної й реактивної провідностей мають умовно-розрахунковий характер. Наприклад, для паралельно включеної котушки з опором R і

індуктивністю L активна провідність, що визначається за формулою $G = \frac{R^2}{R^2 + X_L^2}$, включає в

себе не тільки активний опір R, але й індуктивний X_L . Аналогічно у формулу індуктивної

провідності $B_L = \frac{X}{R^2 + X_L^2}$ входить не тільки індуктивний опір X_L але й активний R.

4. Вивчаючи явище резонансу, необхідно засвоїти наступне. При резонансі напруги й струм на затискачах кола завжди збігаються по фазі. Настроювання ж кола на резонанс залежать від схеми з'єднань індуктивності і ємності. Для послідовного кола умовою резонансу є рівність індуктивного і ємнісного опорів: $X_L = X_C$. Для кола, що містить паралельний контур, в одній з віток якого знаходиться індуктивність, а в іншій – ємність, умовою резонансу є рівність реактивних провідностей віток: $B_L = B_C$.

5. При виконанні розрахунків по методу комплексних чисел варто мати на увазі, що дійсна й уявна частини комплексного опору, комплексної провідності й комплексної потужності завжди являють собою відповідно активну й реактивну складові цих величин; що ж стосується комплексної напруги й комплексного струму, то таке положення має місце лише в окремих випадках. Дійсна й уявна частини комплексної напруги й комплексного струму визначаються початковими фазами величин, інакше кажучи, залежать від розташування відповідних векторів щодо осей комплексної площини, тоді як їх активна й реактивна складові визначаються кутом зсуву по фазі ϕ між цими двома векторами.

Задача 2. У мережу змінного струму напругою U включене коло, що складається з віток з активними опорами R_1, R_2, R_3 , індуктивним опором X_L , ємнісним опором X_C (рис. К.5, таб. К.2). Визначити показання вимірювальних приладів, включених у коло, повну й реактивну потужність кола, побудувати векторну діаграму й трикутник потужностей.

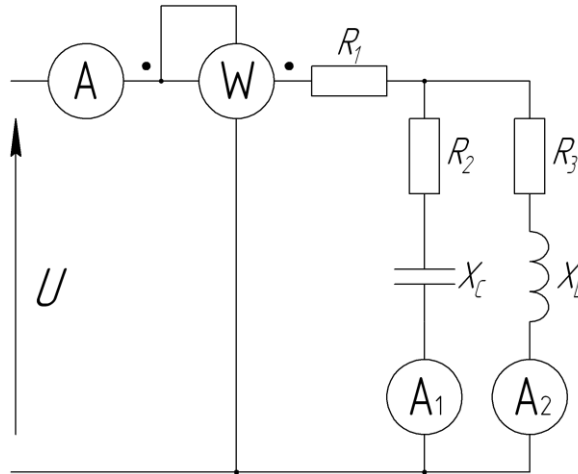


Рис. К.5

Таблиця К.2

№ варіанта	Величина					
	U, В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	X _L , Ом	X _C , Ом
1	110	1,8	9	3,8	4,8	10
2	150	2,7	12	5,2	7,2	8
3	200	3,5	15	6,6	9,6	6
4	250	4	18	8	12	4
5	300	4,8	21	9,4	14,4	12
6	350	5,6	24	10,8	17,4	14
7	380	6,5	27	12,2	18	17
8	400	7	30	13,6	19,6	12
9	500	8	33	15	21,6	14
10	600	10	36	16,6	25,2	10
11	110	1,9	8	3,8	5,8	9
12	150	2,8	11	5,2	8,2	7
13	200	3,6	14	6,6	10,6	5
14	250	4,1	17	8	13	3
15	300	4,9	20	9,4	15,5	11
16	350	5,7	23	10,8	18	13
17	380	6,6	26	12,2	19	16
18	400	8	29	13,6	20,4	11
19	500	9	32	15	23	13
20	600	11	35	16,6	26,6	9
21	110	1,8	11	3,8	5,8	10
22	150	2,7	10	5,2	8,2	8
23	200	3,5	18	6,6	10,6	6
24	250	4	15	8	13	4
25	300	4,8	24	9,4	15,5	12
26	350	5,6	21	10,8	18	14
27	380	6,5	29	12,2	19	17
28	400	7	27	13,6	20,4	12
29	500	8	36	15	23	14
30	600	10	33	16,6	26,6	10

К.3. Трифазні електричні кола

При вивченні цього розділу особливу увагу необхідно звернути на переваги, які має трифазна система в порівнянні з однофазною. Розглядаючи схеми з'єднання обмоток

генераторів, треба усвідомити зв'язок між фазними й лінійними напругами в схемі з'єднання зіркою, а також зв'язок між фазними й лінійними струмами в схемі з'єднання трикутником.

Необхідно чітко уявити, що в трифазному колі можуть бути два режими: симетричний і несиметричний. Розрахунок трифазного кола в симетричному режимі зводиться до розрахунку для однієї фази й провадиться аналогічно розрахунку однофазного кола з одним джерелом. Трифазне коло може розглядатися як розгалужене коло із трьома джерелами живлення, і для його розрахунку застосовуються методи, які використовуються при розрахунку електричних кіл з декількома джерелами. Наприклад, якщо несиметричний приймач з'єднаний без нейтрального проводу, то для розрахунку трифазного кола можна застосувати метод вузлової напруги в комплексній формі.

Після вивчення даного розділу студенти повинні:

- 1) знати основні елементи трифазних кіл, способи з'єднання фаз обмотки генератора й включення в трифазне коло приймачів; способи зображення трифазної симетричної системи ЕРС;
- 2) розуміти роль нейтрального проводу; принципи побудови потенціальних діаграм; вплив роду й схеми включення навантаження на величину струму в нейтральному проводі, схеми електропостачання підприємства;
- 3) уміти аналізувати різні режими симетричних і несиметричних кіл; читати схеми з'єднання трифазних і однофазних приймачів; передбачати наслідки комутаційних змін у колі на його електричний стан.

Задача 3. У чотирьохпровідну трифазну мережу з лінійною напругою $\dot{U}_{\text{л}} = 220 \text{ А}$ включений зіркою приймач, активні й індуктивні опори фаз якого відповідно дорівнюють $R_a=3 \text{ Ом}$, $X_a=4 \text{ Ом}$, $R_b=3 \text{ Ом}$, $X_b=5,2 \text{ Ом}$, $R_c=4 \text{ Ом}$, $X_c=3 \text{ Ом}$, (рис. К.6). Визначити струми в лінійних і нейтральних проводах і побудувати векторну діаграму.

Розв'язання. Уважаємо, що вектор фазної напруги

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{U}_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 127 \text{ А}, \quad \dot{U}_a = \frac{\dot{U}_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 127e^{-j120^\circ} \text{ А}, \quad \dot{U}_c = \frac{\dot{U}_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = 127e^{j120^\circ} \text{ А}$$

Знаходимо лінійні струми:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{127}{3 + j4} = \frac{127}{5e^{j53^\circ}} = 25,4e^{-j53^\circ} \text{ А}; \quad \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{3 + j5,2} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{6e^{j60^\circ}} = 21,2e^{-j180^\circ} \text{ А};$$

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{U}_n}{Z_n} = \frac{127e^{j120^\circ}}{4 + j3} = \frac{127e^{j120^\circ}}{5e^{j37^\circ}} = 25,4e^{j83^\circ} \text{ А}$$

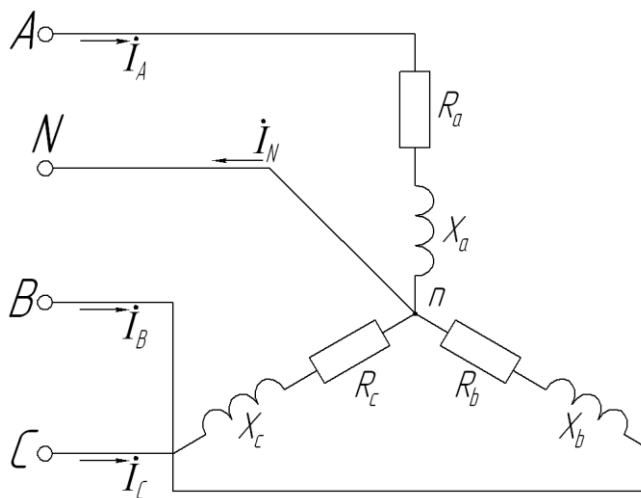


Рис. К.6

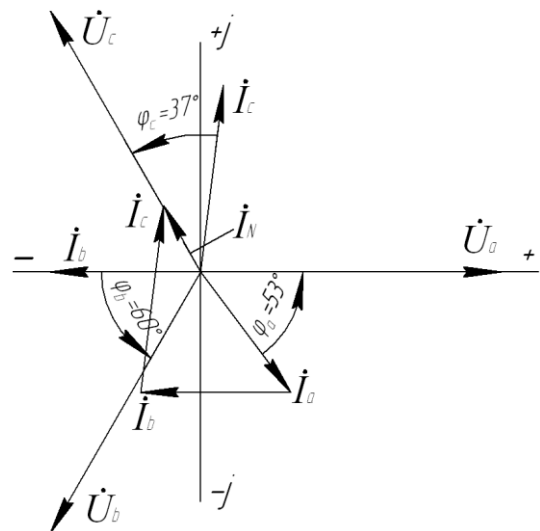


Рис. К.7

Струм у нейтральному проводі визначається як геометрична сума лінійних струмів:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 25,41e^{-j53^\circ} + 21,2e^{-j180^\circ} + 25,4e^{j83^\circ} = 5,9e^{j124^\circ} \text{ A}$$

Векторна діаграма показана на рис. К.7.

При несиметричному навантаженні для визначення активної потужності знаходять потужність кожної фази окремо:

$P_\phi = U_\phi I_\phi \cos\phi$, а потужність всієї трифазної системи одержують як суму потужностей всіх фаз або використовують схему включення двох ваттметрів.

Задача 4. У трифазне чотирьохпровідне коло із симетричною лінійною напругою U_Δ включені зіркою опори R_a, R_b, R_c і X_a, X_b, X_c . (рис. К.8, таб. К.3). Визначити фазні й лінійні струми, струм у нейтральному проводі, активну потужність всього кола й кожної фази окремо. Побудувати векторну діаграму струмів і напруг.

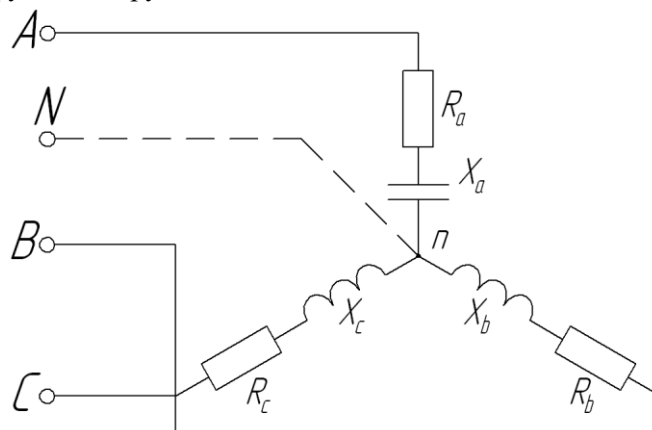


Рис. 8

Таблиця К.3

№ варіанта	Величина						
	$U_\Delta, \text{В}$	$R_a, \text{Ом}$	$R_b, \text{Ом}$	$R_c, \text{Ом}$	$X_a, \text{Ом}$	$X_b, \text{Ом}$	$X_c, \text{Ом}$
1	380	3	4	6	4	3	8
2	220	1,5	2	3	2	1,5	4
3	127	1	15	15	1	1	2
4	380	5	6	8	6	5	10
5	220	4	5	7	5	4	9
6	127	2,5	3,5	5,5	3,5	2,5	7,5
7	380	7	8	1	8	7	12
8	220	6	7	9	7	6	11
9	127	3	3,5	3,5	4	6	8
10	380	4	6	8	12	6	3
11	380	6	3	4	3	8	4
12	220	3	1,5	2	1,5	4	2
13	127	15	1	15	1	2	1
14	380	8	5	6	5	10	6
15	220	7	4	5	4	9	5
16	127	5,5	2,5	3,5	2,5	7,5	3,5
17	380	1	7	8	7	12	8
18	220	9	6	7	6	11	7
19	127	3,5	3	3,5	6	8	4
20	380	8	4	6	6	3	12
21	380	4	6	3	8	4	3
22	220	2	3	1,5	4	2	1,5
23	127	15	15	1	2	1	1
24	380	6	8	5	10	6	5
25	220	5	7	4	9	5	4

№ варіанта	Величина						
	U _л , В	R _а , Ом	R _б , Ом	R _с , Ом	X _а , Ом	X _б , Ом	X _с , Ом
26	127	3,5	5,5	2,5	7,5	3,5	2,5
27	380	8	1	7	12	8	7
28	220	7	9	6	11	7	6
29	127	3,5	3,5	3	8	4	6
30	380	6	8	4	3	12	6

К.4. Асинхронний двигун

Вивчення асинхронного двигуна треба починати з його устрою й принципу роботи. Необхідно звернути особливу увагу на електромагнітні процеси, що виникають у двигуні, як при його пуску, так і в процесі роботи. Векторна діаграма й еквівалентна схема асинхронного двигуна полегшує вивчення його роботи й використовується при виводі основних рівнянь. Експлуатаційні параметри асинхронного двигуна демонструються механічними й робочими характеристиками.

Після вивчення даного розділу студент повинен:

1) знати значення термінів: ковзання, синхронна швидкість, кругове обертове магнітне поле, короткозамкнений ротор, фазний ротор, потік полюса, глибокопазний ротор, подвійна «біляча клітка», способи зміни напрямку обертання магнітного поля; устрої й області застосування двох типів трифазних асинхронних двигунів; умовні позначення трифазних асинхронних двигунів на схемах; вигляд механічних характеристик; способи регулювання частоти обертання двигуна;

2) розуміти принцип збудження багатополосного обертового магнітного поля; принцип дії трифазної асинхронної машини в режимах двигуна, генератора й електромагнітного гальма; фактори, що впливають на частоту обертання ротора трифазного асинхронного двигуна; можливість заміни трифазного асинхронного двигуна з обертовим ротором еквівалентним двигуном з нерухомим ротором; аналогію фізичних явищ у трифазному асинхронному двигуні з нерухомим ротором і в трансформаторі з резистивним навантаженням; енергетичні перетворення в трифазному асинхронному двигуні;

3) уміти здійснювати пуск асинхронного двигуна; вимірювати за допомогою стробоскопічного пристрою частоту обертання і ковзання; оцінювати величини номінального, пускового й максимального моментів, пускового струму й номінального ковзання за даними каталогу. Приступаючи до вивчення цієї теми, необхідно зрозуміти умови збудження обертового магнітного поля.

Механічні характеристики $M = f(S)$ і $\omega = f(M)$ можуть бути побудовані по розрахунковій формулі обертаючого моменту

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 \frac{R_2'}{S}}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right) + (X_1 + X_2')^2 \right]}, \quad (K.1)$$

де M - обертаючий момент двигуна, Н·м; $U_{1\phi}$ - фазна напруга статорної обмотки; S - ковзання; R_1 , X_1 - значення опорів статорної обмотки; R_2' , X_2' - наведені значення опорів роторної обмотки; f_1 - частота напруги живлення статорної обмотки; p - кількість пар полюсів; $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ - кутова швидкість обертання магнітного поля.

По залежності $M = f(s)$ легко побудувати характеристику $\omega = f(M)$. Механічні характеристики можна побудувати й за даними каталогу. Відомо, що

$$M = 2M_{i \text{ аєн}} / \left(s_{i \text{ аєн}} / s + s / s_{i \text{ аєн}} \right), \quad (K.2)$$

де $M_{\text{макс}}$ - максимальний (критичний) обертовий момент двигуна; $s_{\text{кр}}$ - ковзання, при якому двигун розвиває максимальний момент.

Знаючи відношення максимального моменту до номінального $M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}} = \lambda$ і визначивши номінальний момент як

$$M_{\text{ном}} = 9550 P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}},$$

де $P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність двигуна, кВт; $\eta_{\text{ном}}$ - номінальна частота обертання ротора, об/хв, легко одержати вираз для $S_{\text{макс}}$.

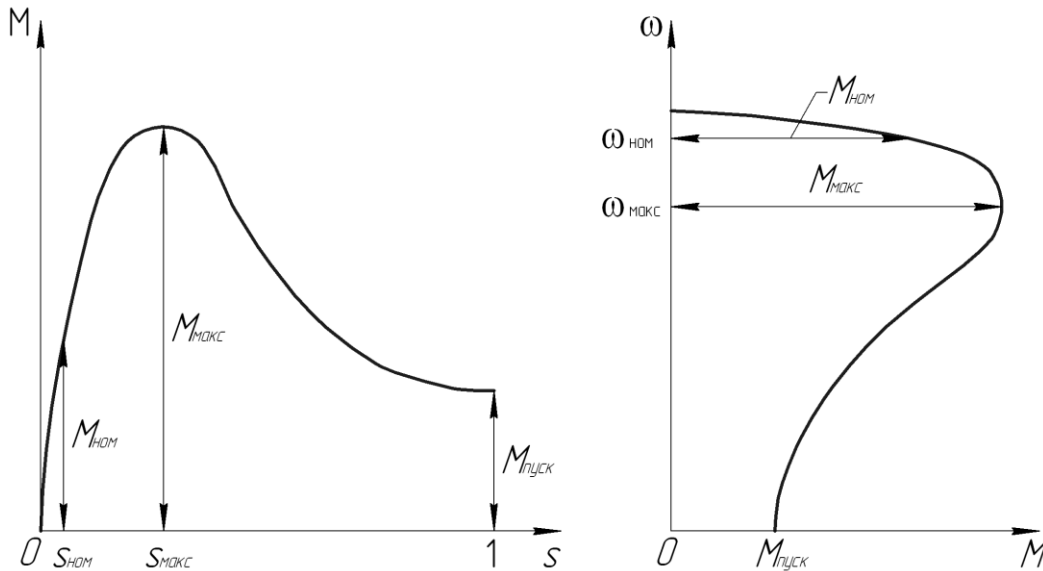


Рис. К.9

Розглядаючи рівняння (К.2) для номінального режиму й з огляду на те, що $M_{\text{ном}}/M_{\text{макс}}=1/\lambda$, одержуємо

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2}{s_{i\text{ае}n} / s_{i\text{іі}} + s_{i\text{іі}} / s_{i\text{ае}n}} \quad (\text{К.3})$$

Розв'язуючи рівняння (К.3) щодо критичного ковзання, знаходимо

$$s_{i\text{ае}n} = s_{i\text{іі}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$$

Знаючи $M_{\text{макс}}$ і $s_{\text{макс}}$ і задаючись значеннями s у межах від 0 до 1, легко побудувати механічну характеристику $M=f(s)$, дані для побудови якої знаходять із рівняння (К.2).

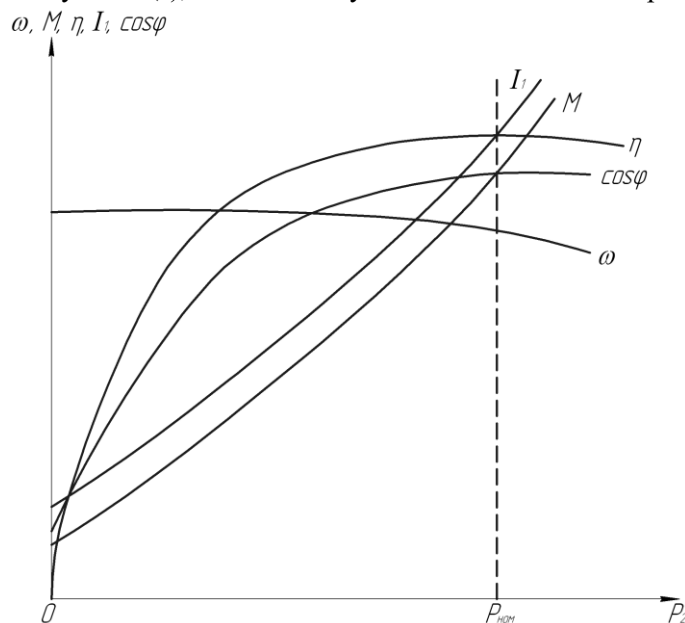


Рис. 10

Характеристику $\omega = f(M)$ одержують із характеристики $M = f(s)$, з огляду на при цьому, що

$$\omega = \omega_0(1 - s) \quad (K.4)$$

де ω - кутова швидкість обертання ротора, 1/с.

Механічні характеристики асинхронного двигуна, зображені на рис. К.9, показують властивості двигуна в системі електропривода: пускові властивості, перевантажувальну здатність, стійкість роботи.

Для більш повного виявлення властивостей двигуна служать робочі характеристики, що показують залежність швидкості обертання ротора ω , обертового моменту M , ККД η , струму I і коефіцієнта потужності $\cos\phi$ від потужності на валу двигуна P_2 . Ці характеристики можна розрахувати за даними каталогу або одержати в процесі випробування двигуна в лабораторних умовах.

Робочі характеристики асинхронного двигуна зображені на рис. К.10.

Задача 5. Номінальна потужність трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором $P_{\text{ном}} = 10$ кВт, номінальна напруга $U_{\text{ном}} = 380$ В, номінальна частота обертання ротора $\omega_{\text{ііі}} = 1420$ об/хв, номінальний коефіцієнт потужності $\cos\phi_{\text{ном}} = 0,85$. Кратність пускового струму $I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}} = 6,5$, а перевантажувальна здатність двигуна $\lambda = 1,8$.

Визначити: 1) споживану потужність; 2) номінальні й максимальний (критичний) обертаючі моменти; 3) пусковий струм; 4) номінальне й критичне ковзання. Побудувати механічні характеристики $M = f(s)$ і $\omega = f(M)$.

Рішення.

Споживана потужність

$$P_{\text{ііі}} = P_{\text{ііі}} / \eta_{\text{ііі}} = 10 / 0,84 = 11,9 \text{ кВт}$$

Номінальний і максимальний моменти:

$$\dot{I}_{\text{ііі}} = 9550 \frac{P_{\text{ііі}}}{n_{\text{ііі}}} = 9550 \frac{10}{1420} = 67,3 \text{ А} \cdot \dot{\text{і}}; \quad \dot{I}_{\text{max}} = \lambda \dot{I}_{\text{ііі}} = 1,8 \cdot 67,3 = 121 \text{ А} \cdot \dot{\text{і}}$$

Номінальний і пусковий струми:

$$I_{\text{ііі}} = \frac{P_{\text{ііі}}}{\sqrt{3} U_{\text{ііі}} \cos \phi_{\text{ііі}}} = \frac{11,9 \cdot 1000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,84} = 21,2 \text{ А}; \quad I_{\text{ііі}} = 6,5 I_{\text{ііі}} = 6,5 \cdot 21,2 = 138 \text{ А}$$

Номінальне й критичне ковзання:

$$s_{\text{ііі}} = (n_0 - n_{\text{ііі}}) / n_0 = (1500 - 1420) / 1500 = 0,053;$$

$$s_{\text{ііі}} = s_{\text{ііі}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 0,053(1,8 + \sqrt{1,8^2 - 1}) = 0,175.$$

Механічна характеристика $M = f(s)$ будується по рівнянню (К.2):

$$\dot{I} = \frac{242}{0,175 / s + s / 0,175}$$

Задаючись ковзанням s від 0 до 1, підраховуємо обертаючий момент. Швидкість обертання ротора визначаємо з рівняння (R.4). Розрахункові дані наведені в таб. К.4. Характеристики, побудовані за даними таблиці, будуть ідентичними кривими на рис К.9.

Таблиця К.4.

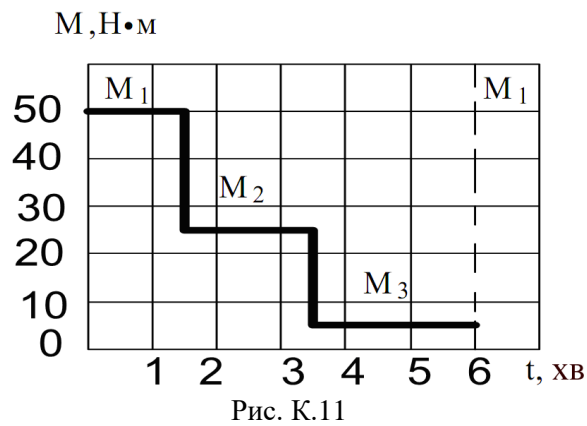
s	ω , 1/с	M, Н·м	s	ω , 1/с	M, Н·м
0,053	149	67,3	0,5	79	75,5
0,10	142	104,3	0,6	63	65,2
0,175	130	121,0	0,7	48	57,0
0,2	126	120,5	0,8	31,6	50,5
0,3	110	105,3	0,9	15,8	45,5
0,4	94	88,8	1,0	0	41,2

Задача 6. Асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором має наступні дані: $P_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$, $M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$, $p = 2$ (таб. К.5). Потрібно: 1) побудувати механічні характеристики $M(S)$ двигуна: а) при номінальній напрузі; б) при зниженій напрузі $U = 0,9U_{\text{ном}}$; 2) визначити частоту обертання двигуна при моменті $M = 220 \text{ Н}\cdot\text{м}$: а) при номінальній напрузі; б) при зниженій напрузі $U = 0,9U_{\text{ном}}$; 3) визначити можливість пуску двигуна при $U = 0,9U_{\text{ном}}$, якщо момент опору виробничого механізму, що приводиться в дію двигуном, $M_{\text{оп}} = 170 \text{ Н}\cdot\text{м}$; 4) установити можливість роботи двигуна при наявності миттєвих перевантажень $M_{\text{мп}} = 400 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

Таблиця К.5.

№ варіанта	Величина			
	$P_{\text{ном}}$, кВт	$n_{\text{ном}}$, об/хв	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}} = \lambda$	p
1	4	1450	2,2	2
2	4,5	1450	2,2	2
3	5	1450	2,2	2
4	5,5	1450	2,2	2
5	6	1450	2,2	2
6	6,5	1450	2,2	2
7	7,5	1450	2,2	2
8	8,5	1450	2,2	2
9	9,5	1450	2,2	2
10	11	1450	2,2	2
11	12,5	1450	2,2	2
12	14	1450	2,2	2
13	15	1450	2,2	2
14	16	1450	2,2	2
15	17	1450	2,2	2
16	18,5	1450	2,2	2
17	20	1450	2,2	2
18	21	1450	2,2	2
19	22	1450	2,2	2
20	25	1450	2,2	2
21	28	1450	2,2	2
22	30	1450	2,2	2
23	32	1450	2,2	2
24	34	1450	2,2	2
25	36	1450	2,2	2
26	38	1450	2,2	2
27	40	1450	2,2	2
28	42	1450	2,2	2
29	44	1450	2,2	2
30	46	1450	2,2	2

Задача 7. Режим роботи верстата заданий графіком, наведеним на рис К.11. Визначити потужність і вибрати трифазний асинхронний двигун для привода верстата, якщо частота обертання вала двигуна повинна бути близькою до n (табл. 6).



Таблиця К.6

№ варіанта	Величина
	n , об/хв
1	900
2	920
3	940
4	950
5	1200
6	1300
7	1460
8	1610
9	2150
10	2970
11	2520
12	1850
13	1480
14	1460
15	1440
16	1410
17	1580
18	2240
19	2920
20	2700
21	1470
22	730
23	790
24	2415
25	2890
26	2370
27	1150
28	710
29	850
30	880

К.5. Підсилювачі на біполярних транзисторах

Підсилювачі є одним з найпоширеніших електронних пристроїв, застосовуваних у системах автоматики й радіосистемах. Підсилювачі підрозділяються на підсилювачі попередні (підсилювачі напруги) і підсилювачі потужності. Попередні транзисторні підсилювачі, як і лампові, складаються з одного або декількох каскадів посилення. При цьому всі каскади підсилювача мають спільні властивості, розходження між ними може бути тільки кількісне: різні струми, напруги, різні значення резисторів, конденсаторів і т.п.

Для каскадів попереднього підсилювача найпоширеніші резистивні схеми (з реостатно-емнісним зв'язком). Залежно від способу подачі вхідного сигналу й одержання вихідного підсилювальні схеми отримали наступні назви:

- 1) із загальним емітером - ЗЕ (рис. К.13);
- 2) із загальною базою - ЗБ (рис. К.14);
- 3) із загальним колектором (емітерний повторювач)- ЗК (рис. К.15).

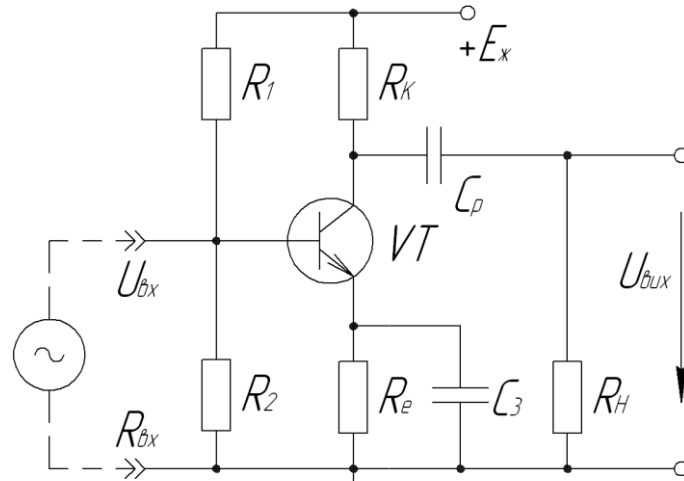


Рис. К.13

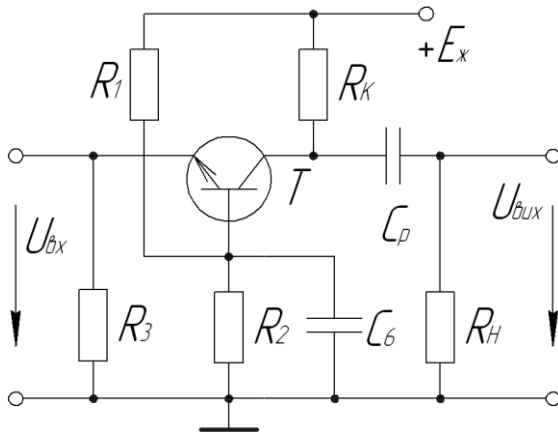


Рис. К.14

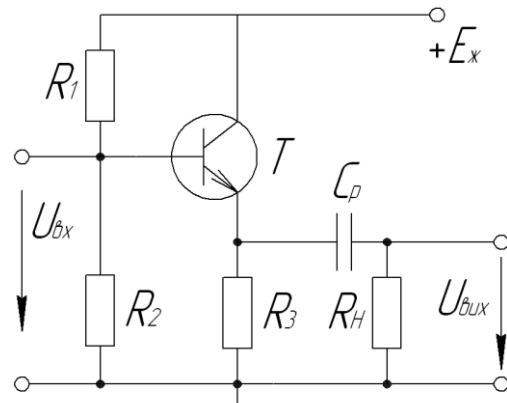


Рис. К.15

Найпоширенішою є схема із ЗЕ. Схема із ЗБ у попередніх підсилювачах зустрічаються рідко. Емітерний повторювач має найбільший із всіх трьох схем вхідний й найменший вихідний опір, тому його застосовують при роботі з високоомними перетворювачами як перший каскад підсилювача, а також для узгодження з низькоомними навантажувальним резистором. У таб. К.10. дається порівняння різних схем включення транзисторів.

Таблиця К.10

Параметри	Схема включення		
	с ЗБ	с ЗЕ	с ЗК
коефіцієнт підсилення за напругою	30-400 Ом	30-1000	≈1
коефіцієнт підсилення за струмом	≈1	10-200	10-200
коефіцієнт посилення за потужністю	30-400	3000-30000	10-200
вхідний опір	50-100 Ом	200-2000 Ом	10-500 кОм
вихідний опір	0,1-0,5 мОм	30-70 кОм	50-100 Ом

Розглянемо підсилювальний каскад з ЗЕ. При розрахунку каскаду підсилювача звичайно відомі: 1) R_n – опір навантаження, на яке повинен працювати каскад, що розраховується; навантаженням може бути й аналогічний каскад; 2) I_{nm} або U_{nm} – необхідне значення амплітуди струму або напруги навантаження; 3) припустимі частотні спотворення; 4) діапазон робочих температур; 5) напруга джерела живлення колекторного кола в більшості випадків є заданим. У результаті розрахунку повинні бути визначені: 1) тип транзистора; 2) режим роботи обраного транзистора; 3) параметри каскаду; 4) значення всіх елементів схеми (резистори, конденсатори), їхні параметри й типи.

Розрахунок каскаду підсилювача напруги низької частоти з реостатно-ємнісним зв'язком

Послідовність розрахунку приводиться для транзистора, включеного за схемою з ЗЕ. На рис. К.13 дана схема каскаду підсилювача.

Вихідні дані: 1) напруга на виході каскаду $U_{вих\ max}$ (напруга на навантаженні); 2) опір навантаження R_n ; 3) нижня гранична частота f_n ; 4) припустиме значення коефіцієнта частотних спотворень каскаду в області нижніх частот M_n ; 5) напруга джерела живлення $E_{ж}$.

Примітка. Уважати, що каскад працює в стаціонарних умовах ($T_{min}=+15^\circ C$; $T_{max}=+25^\circ C$). при розрахунку впливом температури на режим транзистора нехтуємо.

Визначити: 1) тип транзистора; 2) режим роботи транзистора; 3) опір колекторного навантаження R_k ; 4) опір у колі емітера R_e ; 5) опори ділянки напруги R_1 і R_2 , що стабілізують режим роботи транзистора; 6) ємність розділяючого конденсатора C_p ; 7) ємність конденсатора в колі емітера C_e ; 8) коефіцієнт підсилення каскаду по напрузі.

Порядок розрахунку: 1. Вибираємо тип транзистора, керуючись наступними міркуваннями: а) $U_{ке\ доп} \geq (1,1 \div 1,3)E_{ж}$, $U_{ке\ доп}$ - найбільше допустиме напруження між

колектором і емітером, приводиться в довідниках; б) $I_{e\ доп} > 2I_{im} = \frac{2U_{âêðð}}{R_i}$, I_{im} – найбільша

можлива амплітуда струму навантаження; $I_{к\ доп}$ – найбільший припустимий струм колектора, приводиться в довідниках.

Примітка. а) Заданому діапазону температур задовольняє кожний транзистор. б) Для обраного типу транзистора виписати з довідника значення коефіцієнтів підсилення за струмом для ЗБ β_{min} і β_{max} (h_{21min} і h_{21max}). У деяких довідниках дається коефіцієнт підсилення α за струмом для схеми ОБ і початковий струм колектора $I_{кн}$. Тоді $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$ (при виборі режиму роботи транзистора необхідно виконати умову $I_{к\ min} \geq I_{кн}$). в) Для каскадів підсилювачів напруги звичайно застосовують малопотужні транзистори типу КТ315, КТ163 та ін. Вибір конкретного типу транзистора проводиться по довідковій літературі. Режим роботи транзистора визначаємо по навантажувальній прямій, побудованій на сімействі вихідних статичних (колекторних) характеристик для ЗЕ. Побудова навантажувальної прямої показана на рис. К.16. Навантажувальна пряма будується по двох точках: 0 – точка спокою (робоча) і I, обумовлена значенням напруги джерела живлення $E_{ж}$. Координатами 0 є струм спокою $I_{к0}$ і напруга спокою $U_{ке0}$ (тобто струм і напруга, що відповідають $U_{вх} = 0$). Можна прийняти $I_{к0} = (1,05 \div 1,2)I_{вих} \approx (1,05 \div 1,2)I_{nm}$. Напруга спокою: $U_{ке0} = U_{вихм} + \Delta U_{ке} = U_{км} + \Delta U_{ке}$, де $\Delta U_{ке}$ – напруга на колекторі, що відповідає області нелінійних початкових ділянок вихідних характеристик транзистора. Для малопотужних транзисторів можна прийняти $\Delta U_{ке} = 0,5 \div 1,0$ В.

3. Визначаємо значення опорів R_k і R_e . По вихідних характеристиках (рис. К.16) визначаємо $R_3 = R_k + R_e$. Загальний опір у колі емітер–колектор $R_3 = E_{ж}/I$, де I – струм, обумовлений точкою 4, тобто точкою перетину навантажувальної прямої з віссю струмів.

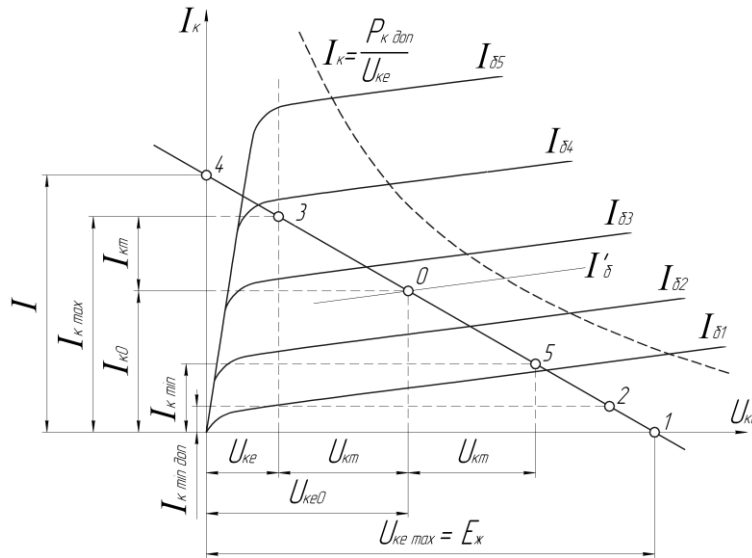


Рис. К.16

Приймаючи $R_e = (0,15 \div 0,25)R_k$, одержуємо: $R_k = R_{об}/(1,15 \div 1,25)$; $R_e = R_{об} - R_k$.

4. Визначаємо найбільші амплітудні значення вхідного сигналу струму $I_{вхм}$ і напруги $U_{вхм}$, необхідні для забезпечення заданого значення $U_{вихм}$. Задавшись найменшим значенням коефіцієнта підсилення транзистора за струмом β_{min} , одержуємо

$I_{вхм} = I_{бм} = I_{кп}/\beta_{min}$, причому струм $I_{вхм}$ не повинен перевищувати значення $(I_{бmax} - I_{бmin})/2$, де для малопотужних транзисторів $I_{бmax} \approx 1 \div 2$ мА, $I_{бmin} \approx 0,05$ мА.

По вхідній статичній характеристиці для схем ОЕ (рис. К.17) і знайденим значенням $I_{бmin}$ і $I_{бmax}$ знаходять значення $2U_{вхм}$.

5. Визначаємо вхідний опір $R_{вх}$ каскаду змінному струму (без урахування напруги R_1 і R_2):

6. Розраховуємо опір ділянки R_1 і R_2 . Для зменшення шунтуючої дії ділянки на вхідне коло каскаду по змінному струмі приймають

$R_{1-2} \geq (8 \div 12) R_{вх}$, де $R_{1-2} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$. Тоді $R_1 = E_{ж} R_{1-2} / R_e I_{е} = E_{ж} R_{1-2} / R_e I_{к0}$; $R_2 = R_1 R_{1-2} / (R_1 - R_{1-2})$.

7. Коефіцієнт нестабільності роботи каскаду

$$S = \frac{R_e(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{R_e(R_1 + R_2) + \frac{R_1 R_2}{1 + \beta_{max}}}$$

де β_{max} - найбільший можливий коефіцієнт підсилення за струмом обраного типу транзистора.

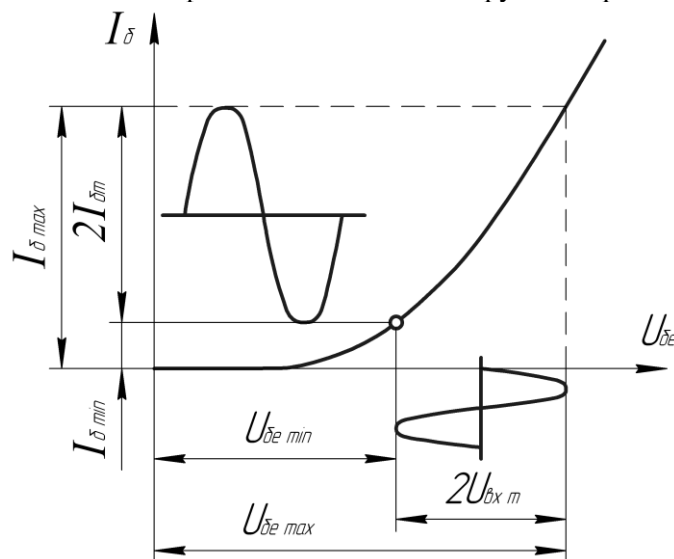


Рис.17

Для нормальної роботи каскаду коефіцієнт нестабільності не повинен перевищувати декількох одиниць.

8. Визначаємо ємність розділювального конденсатора C_p :

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_i R_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}} \sqrt{M_i^2 - 1}};$$

$$R_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}} = R_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}\dot{o}} R_e / (R_{\dot{a}\dot{e}\dot{o}\dot{o}} - R_e) + R_i$$

де $R_{\text{вих т}}$ - вихідний опір транзистора, який визначається по вихідних статичних характеристиках для схеми ЗЕ. У більшості випадків $R_{\text{вих т}} \gg R_k$, тому можна прийняти $R_{\text{вих т}} \sim R_k + R_n$

9. Знаходимо ємність конденсатора $C_e \geq 2\pi f_i R_e$.

10. Розраховуємо коефіцієнт підсилення каскаду по напрузі:

$$K_U = U_{\text{вихп}} / U_{\text{вхп}}$$

Примітка. Наведений порядок розрахунку не враховує вимог на стабільність роботи каскаду.

При аналізі транзисторних підсилювачів широке розповсюдження отримали h-параметри. Електричний стан транзистора, включеного за схемою з ЗЕ, характеризується чотирма величинами: I_b , U_{be} , I_k , U_{ke} . Із практичних міркувань зручно вибирати як незалежні значення U_{ke} й I_b , тоді

$$U_{be} = f_1(I_b, U_{ke}) \text{ і } I_k = f_2(I_b, U_{ke}).$$

У підсилювальній схемі вхідним і вихідним сигналами є збільшення вхідних і вихідних напруг і струмів.

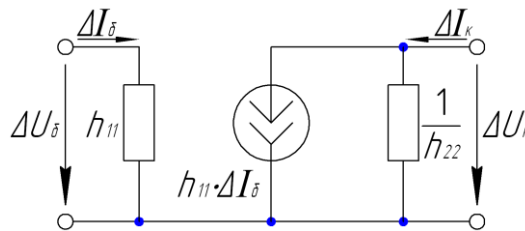


Рис.18

У межах лінійної частини характеристик для збільшень $\Delta U_{\dot{a}\dot{a}}$ й $\Delta I_{\dot{e}}$ справедливі рівності

$$\Delta U_{\dot{a}\dot{a}} = h_{11} \Delta I_{\dot{a}} + h_{12} \Delta U_{\dot{e}\dot{a}} \quad (5)$$

$$\Delta I_{\dot{e}} = h_{21} \Delta I_{\dot{a}} + h_{22} \Delta U_{\dot{e}\dot{a}}$$

де h - параметри - відповідні часткові похідні, які легко можна знайти по сімейству вхідних і вихідних характеристик транзистора, включеного за схемою ЗЕ:

$$h_{11} = \Delta U_{\dot{a}\dot{a}} / \Delta I_{\dot{a}} \text{ при } U_{\dot{e}\dot{a}} = const (\Delta U_{\dot{e}\dot{a}} = 0);$$

$$h_{12} = \Delta U_{\dot{a}\dot{a}} / \Delta U_{\dot{e}\dot{a}} \text{ при } I_{\dot{a}} = const (\Delta I_{\dot{a}} = 0);$$

$$h_{21} = \Delta I_{\dot{e}} / \Delta I_{\dot{a}} \text{ при } U_{\dot{e}\dot{a}} = const (\Delta U_{\dot{e}\dot{a}} = 0);$$

$$h_{22} = \Delta I_{\dot{e}} / \Delta U_{\dot{e}\dot{a}} \text{ при } I_{\dot{a}} = const (\Delta I_{\dot{a}} = 0).$$

Значення h_{11} являє собою вхідний опір транзистора. Безрозмірний параметр h_{12} є коефіцієнтом зворотного зв'язку по напрузі. Як показує аналіз схем на транзисторах, значення $h_{12} = 0,002 \div 0,0002$, тому при практичних розрахунках його можна вважати рівним нулю: h_{21} – безрозмірний коефіцієнт передачі за струмом, що характеризує підсилювальні властивості (за струмом) транзистора при постійній напрузі на колекторі; h_{22} характеризує вихідну провідність транзистора при постійному струмі бази; h – параметри добре описують роботу транзистора в області низьких і середніх частот. Відповідно до рівнянь (5) на рис. 18 зображена схема заміщення транзистора для змінних складових струмів і напруг при $h_{12} = 0$. Для розрахунку параметрів підсилювача необхідно визначити h - параметри поблизу робочої точки по сімействах відповідних характеристик. При цьому коефіцієнт підсилення підсилювача по напрузі в режимі холостого ходу

$$K_{ux} = \frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_K}{1 + h_{22}R_K} \approx \frac{h_{21}}{h_{11}} R_K,$$

а при навантаженні (R_H) $K_u = K_{ux} \frac{R_H}{R_H + R_K}$

Вхідний опір підсилювача $R_{вх} \approx h_{11}$, а вихідний опір $R_{вих} \approx R_K$.

Задача 10. Розрахувати каскад транзисторного підсилювача напруги для схеми із загальним емітером (див. рис. К.13):

$$U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} = 4\hat{A}; \quad R_H = 500\hat{\Omega}; \quad f_H = 100\hat{\text{А}}\hat{\omega}; \quad \hat{I}_i = 1,2; \quad \hat{A}_e = 12\hat{A}.$$

Розв'язання. 1. $U_{\hat{e}\hat{a}\hat{i}} \geq \hat{A}_e = 1,2 \cdot 12 = 14,4\hat{A}$

$$I_{\hat{e}\hat{a}\hat{i}} > I_{i\hat{o}} = 2 \frac{U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}}}{R_H} = 2 \frac{4}{500} = 0,016\text{ A} = 16\hat{i}\text{ A}$$

Обираємо транзистор МП42А, для якого $I_{к\text{ доп}} = 30\text{ mA}$;

$$U_{\hat{e}\hat{a}\hat{i}} = 15\hat{A}, \quad \beta_{\min} = 50, \quad I_{\hat{e}\text{ min}\hat{a}\hat{i}} = 25\hat{i}\hat{A}$$

2. Для побудови навантажувальної прямої знаходимо робочу точку спокою (0); для цього визначаємо

$$I_{\hat{e}\hat{a}\hat{i}} > 1,2I_{i\hat{o}} = 1,2 \cdot 8 = 9,6\hat{i}\text{ A};$$

$$U_{\hat{e}\hat{a}\hat{o}} \geq U_{\hat{a}\hat{e}\hat{o}} + \Delta U_{\hat{e}\hat{a}} = 4 + 1 = 5\hat{A}$$

Друга точка навантажувальної прямої $U_{к\text{е}} = E_{ж} = 12\text{ В}$. За отриманим значенням будується навантажувальна пряма.

3. По статичних вихідних характеристиках і навантажувальній прямій знаходимо $I = 18\text{ mA}$, звідки

$$R_{\zeta} = 12 / (18 \cdot 10^{-3}) = 670\hat{\Omega}$$

Отже,

$$R_i = R_{\zeta} / 1,2 = 670 / 1,2 = 560\hat{\Omega}$$

$$R_e = R_{\zeta} - R_i = 670 - 560 = 110\hat{\Omega}$$

4. Найменший коефіцієнт підсилення за струмом (для схем ОЕ) для транзистора МП42А $\beta_{\min} = 30$, тоді $I_{вх\text{ min}} = I_{б\text{ min}} = I_{к\text{ min}}$.

Через мале значення $I_{к\text{ min}}$ можна прийняти $I_{к\text{ min}} \approx 0\text{ i}$, отже, $I_{б\text{ min}} \approx 0$.

$$I_{\hat{a}\hat{o}} = I_{\hat{e}\hat{o}} / \beta_{\min} = 14 / 30 = 0,47\hat{i}\hat{A}$$

Амплітуда вхідного струму

$$I_{\hat{a}\hat{o}} = I_{\hat{a}\text{ max}} - I_{\hat{a}\text{ min}} / 2 = 0,47 / 2 = 0,235\hat{i}\hat{A}$$

По вхідній статичній характеристиці (для схеми ОЕ):

$$U_{\hat{a}\hat{a}\text{ min}} = 0,11\hat{A}; \quad U_{\hat{a}\hat{a}\text{ max}} = 0,33\hat{A};$$

$$2U_{\hat{a}\hat{o}} = U_{\hat{a}\hat{a}\text{ max}} - U_{\hat{a}\hat{a}\text{ min}} = 0,33 - 0,11 = 0,22\hat{A}$$

5. Знаходимо вхідний опір транзистора змінному струму:

$$R_{\hat{a}\hat{o}} = 2U_{\hat{a}\hat{o}} / 2I_{\hat{a}\hat{o}} = 0,22 / 0,47 \cdot 10^{-3} \approx 470\hat{\Omega}$$

6. Для визначення R_1 і R_2 знаходимо $R_{1-2} \geq 8R_{\hat{a}\hat{o}} = 8 \cdot 470 = 3800\hat{\Omega}$. Звідси

$$R_1 = E_i R_{1-2} / R_{\hat{a}\hat{i}}^2 = 12 \cdot 3800 / 110 \cdot 9,6 \cdot 10^{-3} = 43000\hat{\Omega}$$

$$R_2 = R_1 R_{1-2} / (R_1 - R_{1-2}) = 43000 \cdot 3800 / (43000 - 3800) = 4200\hat{\Omega}$$

7. Визначаємо, чи буде схема досить стабільна:

$$S = \frac{R_{\hat{a}}(R_1 + R_2) + R_1 R_2}{R_e(R_1 + R_2) + R_1 R_2 / (1 + \beta_{\max})} = \frac{110(43000 + 4200) + 43000 \cdot 4200}{110(43000 + 4200) + 43000 \cdot 4200 / (1 + 50)} \approx 2,66$$

Отже, робота розрахованого каскаду досить стабільна.

8. Визначаємо ємність:

$$C_{\delta} = \frac{1}{2\pi f_H (R_K + R_H) \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100(560 + 500) \sqrt{1,2^2 - 1}} = 2,28 \cdot 10^{-6} \hat{O}$$

Приймаємо $C_p = 3,0$ мкФ.

9. Знаходимо ємність

$$C_{\dot{a}} \geq \frac{10}{2\pi f_H R_e} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 110} = 159 \cdot 10^{-6} \hat{O} = 159 \text{ і } \hat{e}\hat{O}$$

Для повного усунення негативного зворотного зв'язку необхідно включити $C_{\dot{A}} \geq 159 \text{ і } \hat{e}\hat{O}$. Ця ємність занадто велика. Звичайно використовують $C_{\dot{A}} = 10 \div 30 \text{ і } \hat{e}\hat{O}$. Приймаємо

$C_{\dot{A}} = 20 \text{ і } \hat{e}\hat{O}$.

10. Коефіцієнт підсилення каскаду по напрузі

$$K_u = U_{\hat{a}\hat{o}\hat{o}} / U_{\hat{a}\hat{o}\hat{o}} = 4 / 0,11 = 36,4$$

Технічні дані асинхронних електродвигунів трифазного струму з короткозамкненим ротором закритого виконання серії, що обдувається, 4А

Типорозмір	Номинальна потужність, кВт	При номінальному навантаженні			Кратність пускового струму	Кратність моментів		
		Струм при напрузі 380 В	ККД	Коефіцієнт потужності		Максимального	пускового	Мінімального

Синхронна частота обертання 3000 об/хв

4A71A2B3	0,75	1,7	0,77	0,87	5,5	2,2	2	1,2
4A61Y2B3	1,1	2,5	0,775	0,87	5,5	2,2	2	1,2
4A80A2B3	1,5	3,3	0,81	0,85	6,5	2,2	2	1,2
4A80Y2B3	2,2	4,6	0,83	0,87	6,5	2,2	2	1,2
4A902B3	3	6,1	0,845	0,88	6,5	2,2	2	1,2
4A1002B3	4	7,9	0,865	0,89	7,5	2,2	2	1,2
4A1002B3	6,5	10	0,875	0,91	7,5	2,2	2	1,2
4A112C2B3	7,5	14,8	0,875	0,88	7,5	2,2	2	1
4A132C2B3	11,5	21,2	0,88	0,9	7,5	2,2	1,6	1
4A1602B3	14	28,5	0,88	0,91	7,5	2,2	1,4	1
4A160M2B3	18,5	34,6	0,885	0,92	7,5	2,2	1,4	1
4A1802B3	22	41,7	0,885	0,91	7,5	2,2	1,4	1
4A18M2B3	30	55	0,9	0,92	7,5	2,2	1,4	1
4A00M2B3	37	70	0,9	0,89	7,5	2,2	1,4	1
4A2002B3	45	84	0,91	0,9	7,5	2,2	1,4	1

Синхронна частота обертання 1500 об/хв

4A71Y4B3	0,75	2,1	0,72	0,73	4,5	2,2	2	1,6
4A80A4B3	1,1	2,7	0,75	0,81	5	2,2	2	1,6
4A80Y4B3	1,5	3,5	0,77	0,83	5	2,2	2	1,6
4A904B3	2,25	5	0,8	0,83	6	2,2	2	1,6
4A1004B3	3	6,7	0,82	0,83	6,5	2,2	2	1,6
4A1004B3	4	8,6	0,84	0,84	6,5	2,2	2,2	1,6
4A1124B3	5,5	11,5	0,855	0,85	7	2,2	2	1,6
4A1324B3	7,5	15,2	0,875	0,86	7,5	2,2	2	1,6
4A132M4B3	11	22	0,875	0,87	7,5	2,2	2	1,6
4A1604B3	15	29,3	0,885	0,88	7	2,2	1,4	1
4A160M4B3	18,5	35,8	0,898	0,88	7	2,2	1,4	1
4A180M4B3	22	41,4	0,9	0,9	7	2,2	1,4	1
4A180M4B3	30	56,1	0,905	0,9	7	2,2	1,4	1
4A200M4B3	37	68,7	0,91	0,9	7	2,2	1,4	1
4A2004B3	45	83	0,92	0,9	7	2,2	1,4	1

Синхронна частота обертання 1000 об/хв

4A80A6B3	0,75	2,2	0,69	0,74	4	2,2	2	1,6
4A8PB6B3	1Д	3	0,74	0,74	4	2,2	2	1,6
4A906B3	1,5	4,1	0,75	0,74	5,5	2,2	2	1,6
4A1006B3	2,2	5,6	0,81	0,73	5,5	2,2	2	1,6
4A112M6B3	3	7,4	0,81	0,76	6	2,2	2	1,6
4A112MB6B3	4	9,2	0,82	0,81	6	2,2	2	1,6
4A1326B3	5,5	12,3	0,85	0,8	7	2,2	2	1,6
4A132M6B3	7,5	16,5	0,855	0,81	7	2,2	2	1,6
4A1606B3	11	22,6	0,86	0,86	6	2,2	1,2	1
4A160M6B3	15	30	0,875	0,87	6	2	1,2	1
4A180M6B3	18,5	36,8	0,88	0,87	6	2	1,2	1
4A200M6B3	22	41,4	0,9	0,9	6,5	2	1,2	1
4A2006B3	30	56,2	0,905	0,9	6,5	2	1,2	1
4A225M6B3	37	69,5	0,91	0,89	6,5	2	1,2	1
4A2506B3	45	84	0,915	0,89	7	2	1,2	1

Література

- 1 Малинівський С.М. Загальна електротехніка: підручник.- Львів: видавництво «Бескид Біт», 2003.-640с.
- 2 Электротехника: Учебное пособие для неэлектротехн. спец. вузов /А.С.Касаткин, М.В.Немцов. - 4-е вид., перепрац.- М: Энергоатомиздат, 1983. - 440 с.
- 3 Борисов Ю.М. Электротехника: Учебник для вузов. - 2-е вид., перепрац.- М: Энергоатомиздат, 1985. - 335 с.
- 4 Блажкин А.Т. Общая электротехника: Учебное пособие для неэлектротехн. спец. вузов. /А.Т.Блажкин, В.А.Бесекерский і ін. - 4-е вид., перепрац. і доп. - Л.: Энергоатомиздат, 1986. - 159 с.
- 5 Глазенко Т.А., Прянишников В.А. Электротехника и основы электроники. - М.:Высшая школа, 1996. -356 с.
- 6 Основы промышленной электроники. /Під ред. В.В.Герасимова. - М.: Высшая школа, 1986. - 572 с.
- 7 Инженерное оборудование и электроснабжение: Конспект лекций для студентов АСФ /А.В.Желтяков, Б.И. Огорелков, В.Н. Трубникова. - Оренбург: ОГУ, 2000. - 108 с.